

Chemische Ingenieur-Technik

Unter Mitwirkung von

Dr.-Ing. R. Bemann-Darmstadt, Priv.-Dozent Dipl.-Ing. Dr. A. Chwala-Wien,
Dr. rer. nat. A. Ernst-Ludwigshafen a. Rh., Dr.-Ing. M. Gompertz-Berlin,
Dipl.-Ing. H. Haehndel-Berlin, Dr.-Ing. E. Hegelmann-Ludwigshafen a. Rh.,
Dr. phil. C. Hilburg-Ludwigshafen a. Rh., Dr.-Ing. H. Holdt-Darmstadt, Prof.
Dr. phil. E. Jänecke-Heidelberg, Dipl.-Ing. R. Kranz-Mannheim, Prof. Dr. phil.
H. Mark-Wien, C. Mittag-Magdeburg, Dipl.-Ing. E. Richter-Wuppertal-Elber-
feld, Obering. A. Römer-Hersfeld, Dr.-Ing. B. Schmitt-Ludwigshafen a. Rh.,
Dr.-Ing. H. Schranz-Magdeburg, Dr.-Ing. L. C. Simon-Ludwigshafen a. Rh.,
Dr.-Ing. W. Speidel-Halle a. S., Dr.-Ing. K. Thormann-Breslau, Prof. Dr.
A. Thum-Darmstadt, Prof. Dr. A. Walther-Darmstadt, Dr.-Ing. K. Winnacker-
Frankfurt a. M.-Höchst, Dipl.-Ing. E. Wisotzky-Berlin,

herausgegeben von

Ing.-Chem. Dr. phil. Ernst Berl

Professor am Carnegie Institute of Technology, Pittsburgh (USA.),
früher Professor der Technischen Chemie und Elektrochemie
an der Technischen Hochschule zu Darmstadt

Erster Band

Mit 700 Textabbildungen
und einer Tafel



Berlin
Verlag von Julius Springer
1935

ISBN-13:978-3-642-88989-9 e-ISBN-13:978-3-642-90844-6
DOI: 10.1007/978-3-642-90844-6

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung
in fremde Sprachen, vorbehalten.

Copyright 1935 by Julius Springer, Berlin.
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1935

Vorwort.

Das vorliegende Werk soll den in der chemischen Industrie tätigen Chemikern, Physikern, Maschineningenieuren und Elektrotechnikern ein Ratgeber sein. Es hält die Mitte zwischen Hand- und Lehrbuch. Es ist deshalb auch geeignet, den an den Hochschulen Studierenden zu zeigen, welche große Anforderungen an die in der Praxis Stehenden gestellt werden, und sie in den Stand zu setzen, sich für diese Anforderungen rechtzeitig vorzubereiten.

Die Entwicklung der chemischen Industrie geht heute mehr denn je in der Richtung einer planmäßigen, industriellen Verwertung wissenschaftlicher Forschungen. Oft ist kein Gleichmaß zu konstatieren zwischen wissenschaftlicher Erkenntnis und deren Übersetzung in die Praxis. Oft geht und ging die Entwicklung den empirischen Weg und die wissenschaftliche Erklärung hinkte der durch zahllose Versuche als optimal erkannten Arbeitsweise nach. Die Kunstseideindustrie und die Ammoniaksodaerzeugung mögen als Beispiele für viele gelten. Häufig aber — die moderne Ammoniakindustrie mit all ihren Verzweigungen ist hierfür das klassische Beispiel — sind die wissenschaftlichen Grundlagen im wesentlichen ermittelt, bevor die überaus schwierige Übersetzung dieser rein wissenschaftlichen Erkenntnisse in die Technik erfolgen konnte.

Der Herausgeber hat während seiner langjährigen Tätigkeit an Hochschulen festgestellt, daß Studierende und in der Praxis Stehende das Fehlen geeigneter chemisch-technologischer Werke sehr empfinden. Fast alle vorliegenden chemisch-technologischen Bücher sind rein beschreibend, ohne den Benutzern neben dem dargestellten „Wie“ sehr oft veralteter Vorgänge das „Warum“ — die Erklärung — zu geben.

Durch die in diesem Werke gewählte Darstellung wird dem Benutzer die theoretische und praktische Seite chemisch-technischer Probleme in gleicher Weise dargelegt. In vielen Fällen konnte die Darstellung der Einzelabschnitte derartig gegliedert werden, daß die „zeitlosen“ Gesetzmäßigkeiten vorerst ihre Darstellung fanden, gefolgt von der Darstellung der auf diesen Gesetzmäßigkeiten aufgebauten „zeitgebundenen“ Apparaturen.

Der Benutzer wird die erhebliche Spannweite des Werkes feststellen können. Sie ist mit Absicht gewählt, damit er möglichst viele Fragen beantwortet erhält. Die praktisch-mathematischen Darlegungen, die Abschnitte über Thermodynamik und Geschwindigkeitslehre, Katalyse und Phasenlehre sind entsprechend ihrer Wichtigkeit behandelt worden. Die Kapitel über „Werkstoffe“ und über „Technische Meß- und Regelverfahren“ werden den Benutzern sehr wertvoll erscheinen. Über alle drei Einzelbände verteilt, finden sich Darstellungen von wichtigen Einzelgebieten. Hervorgehoben seien die Kapitel über „Elektrotechnik“,

„Energiewirtschaft“, „Wärmeübertragung“, „Feuerungen und Dampfkesselwirtschaft“, „Reinigung von Fabrikationswasser“, „Trocknung“, „Kältetechnik“, „Verdichtung und Förderung von Gasen“, „Förderung von Flüssigkeiten und festen Stoffen“, „Zerkleinerung“, „Abklärvorgänge“, „Erz- und Schwimmaufbereitung“ und die Darstellung der vielfach in der chemischen Technik angewendeten Arbeitsweisen wie „Rühren, Mischen, Extrahieren, Filtrieren, Verdampfen, Destillieren, Rektifizieren, Gaswaschung, Lösungsmittelgewinnung“ u. a. m.

Kritische Beurteiler werden vielleicht an dem Werke gewisse Inhomogenitäten feststellen. Es ist eine Frage des Standpunktes, ob man einen Abschnitt zu theoretisch oder zu praktisch, zu kurz oder zu lang empfindet. Der Herausgeber glaubt derartige Beurteilungen damit entkräften zu können, daß er auf die wissenschaftlichen und technischen Qualitäten der Bearbeiter der betreffenden Abschnitte verweist, die zu den besten Kennern und Förderern der einschlägigen Gebiete gehören.

Ohne die hingebende Hilfe seines früheren Assistenten und Mitarbeiters, des Herrn Dr. Karl Winnacker, Frankfurt a. M.-Höchst, hätte der Herausgeber die Arbeiten an dem Werke nicht durchführen können. Ihm sei auch an dieser Stelle der herzlichste Dank gesagt. Das Werk wurde erheblich gefördert durch führende Persönlichkeiten der chemischen Industrie und des Maschinenbaues. Ihnen und vielen Unternehmungen, welche in weitherziger Art Hilfsmittel zur Verfügung stellten, sei herzlichst gedankt. Der Verlagsbuchhandlung Julius Springer gebührt Dank dafür, daß sie in wohlbekannter, vortrefflicher Weise das Werk gefördert und ausgezeichnet ausgestattet hat.

Pittsburgh, Pennsylvanien, USA., November 1934.

E. Berl.

Verzeichnis der Mitarbeiter an der Chemischen Ingenieur-Technik.

- Dr. Ing. R. Bemann, Darmstadt (gemeinsam mit Prof. Dr. E. Berl) Reinigung, Enthärtung und Entgasung von Fabrikationswasser, Abwasserreinigung.
Gewinnung und Wiedergewinnung flüchtiger Lösungsmittel.
Trocknung von Gasen.
Reinigung von Gasen.
- Prof. Ing. Dr. E. Berl, Carnegie Institute of Technology, Pittsburgh, Pa., USA. (gemeinsam mit Dr.-Ing. R. Bemann) Reinigung, Enthärtung und Entgasung von Fabrikationswasser, Abwasserreinigung.
Gewinnung und Wiedergewinnung flüchtiger Lösungsmittel.
Trocknung von Gasen.
Reinigung von Gasen.
(gemeinsam mit Dr. K. Winnacker) Vorgänge bei der Verbrennung, Spaltung und Bildung von Brennstoffen.
(gemeinsam mit Dr.-Ing. H. Schranz und Dr.-Ing. B. Schmitt) Schwimmaufbereitung (Flotation).
- Privatdozent Dipl.-Ing. Dr. A. Chwala, Technische Hochschule Wien Zerkleinerungschemie.
- Dr. rer. nat. Albert Ernst, Ludwigs-hafen a. Rh. (gemeinsam mit Dr. phil. C. Hilburg VDI) Technische Meß- und Regelverfahren.
- Dr.-Ing. Max Gompertz VDI, Berlin-Charlottenburg Kältetechnik.
Tiefemperaturtechnik.
- Dipl.-Ing. H. Haehndel VDI, Berlin-Tegel Verdichtung und Förderung von Luft und Gasen.
- Dr.-Ing. E. Hegelmann VDI, Ludwigs-hafen a. Rh. Wärmeübertragung.
Abklärvorgänge, hydraulische Trennung (Sedimentation, Dekantation, hydraulische Separation).
Krystallisieren.
Schleudern (Zentrifugieren).
Filtrieren.
Auspressen flüssigkeitshaltiger Massen.
Verdampfen.
Trennung von Gasen und Dämpfen durch Absorption (Gaswaschung).
- Dr. phil. C. Hilburg VDI, Ludwigs-hafen a. Rh. (gemeinsam mit Dr. rer. nat. Albert Ernst) Technische Meß- und Regelverfahren.
- Dr.-Ing. Helmut Holdt VDI, Technische Hochschule Darmstadt (gemeinsam mit Prof. Dr. A. Thum VDI) Werkstoffe für die chemische Ingenieur-technik.
- Prof. Dr. phil. Dr.-Ing. E. h. E. Jänecke, Universität Heidelberg Phasenlehre.

- Dipl.-Ing. R. Kranz VDI, Brown, Boveri & Cie., Mannheim (gemeinsam mit Dr.-Ing. W. Speidel VDI) Energiewirtschaft.
- Prof. Dr. phil. H. Mark, Vorstand des I. Chemischen Institutes der Universität Wien Thermodynamik, Gleichgewichts- und Geschwindigkeitslehre.
Die Katalyse.
- Carl Mittag VDI, Abteilungsdirektor der Friedr. Krupp Grusonwerk A. G., Magdeburg. Zerkleinerung.
- Dipl.-Ing. E. Richter VDI, Vereinigte Technische Staatslehranstalten für Maschinenwesen in Wuppertal-Elberfeld Feuerungen und Dampfkesselwirtschaft.
- Oberingenieur August Römer, in Firma Benno Schilde, Hersfeld, Hessen-Nassau (gemeinsam mit Dr.-Ing. L. C. Simon) Trocknung.
- Dr.-Ing. H. Schranz, Friedr. Krupp Grusonwerk A. G., Magdeburg (z. Z. Persische Regierung, Teheran) Allgemeine Erzaufbereitung.
- (gemeinsam mit Prof. Dr. E. Berl und Dr.-Ing. B. Schmitt) Schwimmaufbereitung (Flotation).
- Dr.-Ing. B. Schmitt, Ludwigshafen a. Rh. (gemeinsam mit Dr.-Ing. H. Schranz und Prof. Dr. E. Berl) Schwimmaufbereitung (Flotation).
- Dr.-Ing. L. C. Simon, Ludwigshafen a. Rh. (gemeinsam mit Oberingenieur August Römer) Trocknung.
- Dr.-Ing. W. Speidel VDI, Halle a. S. (gemeinsam mit Dipl.-Ing. R. Kranz VDI) Anwendungsgebiete der Elektrotechnik.
Energiewirtschaft.
- Dr.-Ing. K. Thormann VDI, Breslau Aufbau von Anlagen.
Fördern fester Stoffe.
Speichern.
Industrielle Öfen.
Elektroöfen.
Rühren.
Mischen.
Kneten.
Extrahieren.
Pressen fester Stoffe.
Schmelzen.
Sublimieren.
Destillieren und Rektifizieren.
- Prof. Dr. A. Thum VDI, Technische Hochschule Darmstadt (gemeinsam mit Dr.-Ing. Helmut Holdt VDI) Werkstoffe für die chemische Ingenieurtechnik.
- Prof. Dr. rer. techn. A. Walther VDI, Technische Hochschule Darmstadt Praktisch-mathematische Grundlagen.
- Dr.-Ing. K. Winnacker, Frankfurt a. M.-Höchst (gemeinsam mit Prof. Dr. E. Berl) Vorgänge bei der Verbrennung, Spaltung und Bildung von Brennstoffen.
- Dipl.-Ing. Erich Wisotzky VDI, Berlin-Charlottenburg Förderung von Flüssigkeiten, besonders von Säuren und Laugen.

Inhaltsverzeichnis des ersten Bandes.

Praktisch-mathematische Grundlagen.

Von Prof. Dr. A. Walther, Darmstadt.

	Seite
Vorbemerkungen	1
I. Logarithmen und Dreieckspapier	2
1. Einiges über Exponentialfunktion, Logarithmus und Potenz.	2
α) Exponentialfunktion, Anschauliches und Umrechnungen 3. —	
β) Organisches Wachstum, Differentialgleichung 3. — γ) Exponentielle	
Annäherung an einen Grenzwert 3. — δ) Halbwertszeit 4. ϵ) Logarith-	
mus. Briggscher Logarithmus, natürlicher Logarithmus 4. —	
ζ) Potenz. Geometrischer Verlauf 5.	
2. Aufbau und Eigenschaften des Logarithmenpapiers	6
α) Beschreibung des Logarithmenpapiers. Exponentialpapier, halb-	
logarithmisches Papier. Potenzpapier, ganzlogarithmisches Papier 6 —	
β) Gerade auf Logarithmenpapier. Bestimmung der Konstanten.	
Zeichnerische Ermittlung der Konstanten 7. — γ) Beispiele, graphische	
Potenztafel, Kreisprozesse 9. — δ) Addieren oder Subtrahieren von	
Strecken und von y -Werten auf Logarithmenpapier. Potenz- und	
Exponentialsummen. Gleichungslösen 10. — ϵ) Andere Funktions-	
papiere 12. — Reziprokpapier, Quadratpapier 12.	
3. Dreieckspapier	12
α) $x + y = \text{konst}$, dargestellt auf einer Strecke. Binäres Gemisch	
12. — β) $x + y + z = \text{konst}$, dargestellt in einem gleichseitigen	
Dreieck. Ternäres Gemisch 12. — γ) Darstellung einer dem ternären	
Gemisch zugeordneten Größe 13. — δ) Mischung von zwei Ausgangs-	
gemischen. Gerade auf Dreieckspapier. Mischungsberechnung 13. —	
ϵ) Mischung von drei Ausgangsgemischen 15. — ζ) Allgemeines	
Dreieckspapier 17.	
II. Nomographie	18
1. Funktionsleitern	19
α) Begriff und Herstellung einer Funktionsleiter 19. — β) Beispiele,	
insbesondere logarithmische Leiter. Gleichmäßige, quadratische und	
logarithmische Leiter. Doppelleiter 20. — γ) Projektive Leiter. Maß-	
stabänderung. Reziproke Leiter 20. — δ) Mehmkes Unterteilung	
einer Funktionsleiter 23. — ϵ) Vorzüge der Funktionsleiter 23. —	
ζ) Doppelleiter, Verschiebbarkeit 24.	
2. Rechenschieber	24
α) Allgemeines 24. — β) Graphische Gebrauchsanweisung zum	
Rechenschieber 25. — Multiplikation, Division 26. — Mehrfache	
Multiplikation und Division 26. — Quadrieren und Quadratwurzel-	
ziehen 26. — Kubieren und Kubikwurzelziehen 27. — Zusammen-	
gesetzte Rechnungen 27. — Trigonometrische Rechnungen 28. —	
Potenzen mit gebrochenem Exponenten 28. — Quadratische und	
kubische Gleichungen 28. — γ) Logarithmentafeln, Rechenmaschinen,	
gewöhnliches Zahlenrechnen 29.	

	Seite
3. Netztafeln und Leitertafeln	30
α) Netztafel 30. — β) Graphische Interpolation 31. — γ) Verzer- rung von Netztafeln 31. — δ) Nachteile der Netztafeln 32. — ϵ) Kenn- zeichnung von Netz- und Leitertafeln 32. — ζ) Einfachste Typen von Leitertafeln 33. — a) Parallele gleichabständige Leitern 33. — b) Drei parallele Leitern in beliebigen Abständen 35. — c) Zwei parallele Leitern von einer dritten geschnitten, N-Tafeln 38. — d) Drei Leitern durch einen Punkt (Büscheltafeln) 39. — e) Zwei geradlinige parallele Leitern, eine krummlinige Leiter 40. — η) Nomogramme für mehr als drei Veränderliche. Nomogramme mit Zapfenlinie 41. — θ) Verbindung von Netz- und Leitertafeln 43. — ι) Tafeln mit Ablesekreuz 43. — κ) Sonderschieber 44.	
III. Praktische Differential- und Integralrechnung	44
1. Zeichnerisches Differenzieren	44
α) Ableitung als Steigungsmaß 44. — β) Abgeleitete Kurve 45. — γ) Zweite Ableitung 45. — δ) Geschwindigkeit und Beschleunigung 46. — ϵ) Differential und Differentialquotient 46. — ζ) Sekante und Tangente. Funktionsdifferenz und Differenzenquotient 46. — η) Diffe- renzierregeln 47. — a) Allgemeine Regeln 47. — b) Differenzieren besonderer Funktionen 47. — θ) Gerade Linie 48. — ι) Winkel der Kurventangente 48. — κ) Vereinfachtes zeichnerisches Differen- zieren. Maßstabsfragen 48. — λ) Genauigkeit des zeichnerischen Differenzierens 49. — a) Tangentenlegen 49. — b) Ausgleichskurve 49. — c) Glätten und Aufrauhn der Kurven 50. — μ) Spiegellinea- 50. — ν) Hilfskonstruktionen zum Tangentenlegen 51. — a) Kon- struktion nach Lambert 51. — b) Konstruktion nach Pirani durch gleiche Sehnen 51. — c) Konstruktion durch gleiche x -Schritte 52. — ξ) Unmittelbare Bestimmung der zweiten Ableitung. Höchstfehler bei linearer Interpolation 52. — \omicron) Partielle Ableitungen. Gradient 52. — π) Vollständiges Differential 53.	
2. Zeichnerisches Integrieren	54
α) Unbestimmtes Integral. Integrationskonstante 54. — β) Integ- rierformeln 54. — a) Allgemeine Regeln 54. — b) Integrierregeln für besondere Funktionen 54. — γ) Rückweg von der abgeleiteten Kurve zur Urkurve über den Anstieg. Integraph 55. — γ) Differen- tial als Rechteck an der abgeleiteten Kurve. Fläche der abgeleiteten Kurve. Bestimmtes Integral 56. — ϵ) Fundamentalsatz der Differen- tial- und Integralrechnung in der formelmäßigen und in der prakti- schen Mathematik 1. Planimeter, numerisches Integrieren, graphi- sches Integrieren 57. — ζ) Praktische Regeln zum zeichnerischen Integrieren 59. — η) Zwickelabgleich 59. — θ) Genauigkeit des zeich- nerischen Integrierens 60. — ι) Polverschiebung. Maßstabsfragen 60. — κ) Planimeter 61. — λ) Doppelintegral und Kurvenintegral. Unabhängigkeit vom Wege 63. — μ) Andeutungen über numerisches Differenzieren und Integrieren, Interpolieren und Glätten. Formel- mäßige, graphische und rechnerische Verfahren. Interpolations- polynom und Näherungspolynom 64.	
IV. Bearbeitung von Beobachtungen	65
1. Fehlerrechnen und Fehlerkritik	65
α) Höchstfehler. Absolut- und Relativfehler. Fehler einer Funk- tion 65. — β) Sonderfälle 67. — γ) Mehrere unabhängige Veränder- liche 68.	
2. Rechnen mit kleinen Größen	69
3. Ausgleichung und mathematische Statistik	71
α) Durchschnitt, Streuung, mittlerer Fehler 71. — β) Bedeutung und Berechnung der Streuung 72. — γ) Mittlerer Fehler der Einzel- beobachtung 73. — δ) Mittlerer Fehler des Durchschnitts 73. —	

ε) Beispiel für die praktische Berechnung der eingeführten Größen 74. — ζ) Durchschnittliche und wahrscheinliche Abweichung 74. — η) Gaußsche Fehlerverteilung 75. — θ) Beispiel zur mathematischen Statistik 76. — ι) Geometrisches an der Gaußschen Fehlerkurve 77. — κ) Fehlerfortpflanzungsgesetz 78. — λ) Mittlerer Relativfehler von Potenzausdrücken 79. — μ) Indirekte Beobachtungen. Glättung. Beste Annäherung 80. — ν) Korrelationskoeffizient 81.

Thermodynamik, Gleichgewichts- und Geschwindigkeitslehre.

Von Prof. Dr. phil. H. Mark, Wien.

I. Charakterisierung der Stoffe	81
Einleitung	81
A. Die idealen Gase	83
1. Das Gesetz von Avogadro	83
2. Die Gesetze von Boyle und Mariotte, Dalton und Gay-Lussac	83
3. Die Zustandsgleichung der verdünnten Gase	84
Avogadro'sche Zahl 85. — Partialdruck 86. — Molekulargewichtsbestimmung 86. — Molekülgeschwindigkeit 88. — Boltzmann'sche Konstante 88. — Maxwell'sche Energieverteilung 89. — Stoßzahl 90. — Mittlere freie Weglänge 90. — Spezifische Wärme 91. — Mittlere Molwärme 92.	
B. Die realen Gase und die Flüssigkeiten	93
1. Die Volumenkorrektur	93
2. Die Druckkorrektur	93
Van der Waal'sche Gleichung 94. — Van der Waal'sche Konstanten 94.	
3. Der Verflüssigungsvorgang und das Theorem der übereinstimmenden Zustände	95
Kritische Daten 96.	
4. Einige Regeln über das Verhalten der Flüssigkeiten	97
a) Die Trouton'sche Regel 97. — b) Die Regel von Eötvös 98. — c) Die Regel von Guldberg 98. — d) Die Sugden'sche Regel 98. — Parachor 99.	
5. Die Molwärmen der Flüssigkeiten	99
6. Dampfdruck und Oberflächenform	99
C. Die Festkörper	100
1. Krystallstruktur	101
Krystallsystem, Krystallklassen 102. — Ionenradien und Atomabstand 103.	
2. Die Zustandsgleichung des festen Körpers	104
Dulong-Petitsches Gesetz 104. — Atomwärmen, Tab. 105. — Eigenfrequenz 106.	
3. Leitfähigkeit, Plastizität und Festigkeit	107
II. Die Hauptsätze der Thermodynamik	108
Einleitung	108
A. Der erste Hauptsatz	108
1. Die Formulierung des ersten Hauptsatzes	108
Mechanisches Wärmeäquivalent 109.	
2. Einige Anwendungen des ersten Hauptsatzes	110
Molwärmen bei konstantem Volumen und konstanter Temperatur 112. — Isotherme Kompression 112. — Adiabatische Kompression 113.	
B. Der zweite Hauptsatz	116
1. Die Formulierung des zweiten Hauptsatzes	116
2. Carnotscher Kreisprozeß	118
Helmholtz'sche Gleichung 120. — Entropie 121.	

		Seite
	3. Die Gleichung von Clausius und Clapeyron	123
	Schmelzvorgang 123. — Verdampfung 123. — Kirchhoff- scher Satz 124.	
	C. Der dritte Hauptsatz	125
III.	Gleichgewichtslehre	127
	A. Die Phasenregel	127
	B. Polymorphie-Erscheinungen: der Umwandlungspunkt	128
	Umwandlung von weißem in graues Zinn 129. — Berthelot- sches Prinzip 131.	
	C. Der Schmelzvorgang	132
	Schmelzwärmen Tab. 132. — Unterkühlung 133.	
	D. Der Verdampfungsvorgang und die Dampfdruckkurve	133
	Verdampfungswärmen, Tab. 134. — Chemische Konstanten, Tab. 135.	
	E. Gleichgewichte bei homogenen Gasreaktionen	136
	1. Massenwirkungsgesetz.	136
	Reaktionsisotherme 137. — Maximale Arbeiten und Bildungs- wärmen, Tab. 138.	
	2. Die Temperaturabhängigkeit homogener Gasgleichgewichte . . .	138
	Reaktionsisochore 139.	
	3. Die Näherungsgleichung von Nernst	141
	K_p -Werte, Tab. 141.	
	F. Gleichgewichte in verdünnten Lösungen	142
	Osmotischer Druck 142. — Siedepunktserhöhung 143. — Schmelz- punktserniedrigung 143. — Löslichkeitsprodukt, Tab. 144.	
	G. Heterogene chemische Gleichgewichte	145
	Dissoziationsdruck 145. — Sättigungsdruck, Tab. 147.	
	H. Gleichgewichte an Phasengrenzen; das Adsorptionsgleichgewicht .	148
	Adsorptionsisotherme 149.	
	J. Die kinetisch-statistische Betrachtung von Gleichgewichten	149
	Dissoziationsenergie 150. — Kinetische Ableitung der Dampf- druckformel 150.	
IV.	Chemische Kinetik	152
	Reaktionsgeschwindigkeit 152. — Aktivierungsenergie 153.	
	A. Die monomolekulare Reaktion	154
	Halbwertszeit 155.	
	B. Die bimolekulare Reaktion	156
	Aktivierungswärmen, Tab. 158. — Druckabhängigkeit der mono- molekularen Reaktionskonstanten, Tab. 159. — Verseifungsge- schwindigkeiten, Tab. 160.	
	C. Reaktionen anderer Ordnung	160
	D. Die Kinetik heterogener Reaktionen	161
	E. Diffusion und Wärmeleitung	162
	Diffusionsgleichung 163. — Diffusionskoeffizienten, Tab. 164. — Molekülradius aus Diffusionsmessungen 165.	

Die Katalyse.

Von Prof. Dr. phil. H. Mark, Wien.

I.	Das Wesen katalytischer Vorgänge.	166
	Homogene Katalyse 167. — Kontakte 167. — Trägersubstanzen 168. Adsorptionswärmen 169.	
II.	Der Katalysator	171
	Anwendung von Katalysatoren, Tab. 172. — Mischkatalysatoren 174. — Aktivatoren 174. — Aktive Stellen 176. — Kontaktgifte 177. — Enzyme und Fermente 178. — Negative Katalysatoren 179.	

	Seite
III. Einige technische Anwendungen der Katalyse	179
A. Die katalytische Herstellung von Ammoniak	179
B. Die Reduktion des Kohlenoxyds	180
C. Die katalytische Ammoniakoxydation	181
D. Die Herstellung der Schwefelsäure	182
1. Nach dem Kontaktverfahren	182
2. Nach dem Bleikammerverfahren	183
E. Die Hydrierung organischer Verbindungen	184

Phasenlehre.

Von Dr. phil. Dr.-Ing. e. h. E. Jä necke, ord. Hon. Professor, Heidelberg.

I. Allgemeines	185
1. Geschichtliches	185
2. Die Phasenregel	186
3. Beweis der Phasenregel	187
II. Einstoffsysteme	188
1. Einfache Stoffe, Druck-Temperatur	188
Tripelpunkte 190. — Dampfdruck 191.	
2. Druck-Temperatur-Volumen	191
Schmelz- und Sublimationskurve 191. — Schmelzen unter Druck	
193.	
3. Stoffe mit mehreren Modifikationen	194
Polymorphie 195. — Umwandlungspunkte, Tab. 195. — Um-	
wandlung unter dem Einfluß von Druck, Tab. 196, 197. —	
Enantiotropie, Monotropie 199.	
4. In der Natur vorkommende Phasengleichgewichte	200
Gletscher 200.	
5. Anwendung in Wissenschaft und Technik	201
III. Zweistoffsysteme	201
1. Das Modell von Roozeboom	201
2. Das Gleichgewicht flüssig-gasförmig im Zweistoffsystem	203
Siedekurven 204. — Dampfdruckkurven 204.	
3. Das Sieden in einer Kolonne oder Säule	206
Destillation und Kondensation 207.	
4. Gleichgewicht fest-flüssig mit einem Eutektikum	208
Eutektikum 208. — Löslichkeit 209.	
5. Das Gleichgewicht fest-flüssig-dampfförmig	209
6. Bildung zweier Flüssigkeiten bei Zweistoffsystemen	211
Entmischung von Flüssigkeitsgemischen 212. — Mischungsverhält-	
nisse von Flüssigkeiten (Schema) 213.	
7. Gleichgewichte fest-flüssig in Zweistoffsystemen mit Mischkrystallen	
und Verbindungen	214
Vergütbarkeit 215. — Kongruent, Inkongruent 216. — Misch-	
krystalle 217. — Eisen-Kohlenstoff 218, 220.	
8. Das Gleichgewicht fest-gasförmig	220
9. Das Kohlenstoff-Sauerstoff-Gleichgewicht fest-gasförmig	221
Boudouardsches Gleichgewicht 221.	
IV. Dreistoffmischungen	222
1. Graphische Darstellung	222
2. Sieden und Schmelzen im einfachsten Falle	222
3. Bildung zweier Flüssigkeiten	223
Entmischung 224.	
4. Hydrate und Anhydride einer Komponente als Bodenkörper	225
5. Wäßrige Lösungen zweier Salze	225
Löslichkeitskurven 225. — Verdrängungskurven 226.	
6. Gleichgewichte fest-flüssig in Systemen ohne Wasser	228
Reziproke Salzpaare 229.	

	Seite
7. Die Gleichgewichte fest-gasförmig	230
8. Dreistoffmischungen. Die Gleichgewichte zwischen Gas, Kohlenstoff, Metalloxyden und Metallen	231
Gasgleichgewichte Zn—C—O 231. — Hochofenprozeß 233.	
V. Vierstoffmischungen	234
1. Graphische Darstellung	234
2. Die Gleichgewichte fest-flüssig	236
3. Lösungen von drei gleichionigen Salzen in Wasser	236
NaCl—BaCl ₂ —CuCl ₂ 237. — NaCl—Na ₂ CO ₃ —Na ₂ SO ₄ 237. — NaCl—NaNO ₃ —Na ₂ SO ₄ 238.	
4. Lösungen reziproker Salzpaare in Wasser	239
Stabile und labile Salzpaare 240. — Salpeter-Konversion 242. — MgCl ₂ —K ₂ SO ₄ 243.	
5. Bildung mehrerer Flüssigkeiten	244
VI. Fünf- und Mehrstoffmischungen	245
1. Allgemeines	245
2. Wäßrige Lösungen	245
3. Ozeanische Salze	246
(Na ₂ SO ₄ —KCl—MgCl ₂)—H ₂ O 247.	
4. Die Entstehung der Salzlager	249
VII. Praktische Anwendung der Phasenlehre (bearbeitet von K. Winnacker und E. Berl)	249
A. Bestimmung des Umwandlungspunktes durch dilatometrische Messungen.	249
B. Die thermische Analyse.	250
Eutektische Gerade 251. — Duraluminiumlegierungen 252.	
C. Die optische Untersuchung von Phasengleichgewichten	252
D. Phasengleichgewichte in Salzlösungen	252
1. Das System Natriumsulfat-Glaubersalz	252
2. Reziproke Salzpaare	254
a) Zu gewinnendes labiles Salzpaar 254. — b) Zu gewinnendes stabiles Salzpaar 255. — α) NaNO ₃ + KCl = KNO ₃ + NaCl 255. β) NaCl + NH ₄ HCO ₃ = NaHCO ₃ + NH ₄ Cl 256.	

Vorgänge bei der Verbrennung, Spaltung und Bildung von Brennstoffen.

Von Dr.-Ing. K. Winnacker, Frankfurt a. M.-Höchst und Prof. Dr. E. Berl, Pittsburgh.

I. Thermodynamik der Verbrennungs- und Spaltungsvorgänge	258
A. Die Verbrennungs- und Bildungswärme	258
1. Begriffsbestimmung	258
Heizwert, Verbrennungswärme 258.	
2. Die Änderung der Wärmetönung mit der Temperatur	259
3. Berechnung der Verbrennungswärme	260
Formel von Dulong 261. — Verbandsformel 263. — Thermodynamische Daten 262. — Thermische Eigenschaften von Brennstoffen 263. — Disponibler Wasserstoff 263. — Spaltungswärmen 264.	
B. Die Verbrennungstemperatur.	265
1. Die theoretische Verbrennungstemperatur.	265
Spezifische Wärmen, Tab. 266—268.	
2. Verbrennungstemperatur unter Berücksichtigung der Dissoziation	269
3. Die Verbrennungstemperatur unter Berücksichtigung der Strahlung	270
C. Gasgleichgewichte.	271
1. Berechnung	271
2. Die Dissoziation von H ₂ O und CO ₂	272

	Seite
3. Das Generatorgasgleichgewicht	274
Das Boudouardsche Gleichgewicht 274. — Luftgasherstellung 275. — Reduktionen mit Kohlenstoff und Kohlenoxyd 276.	
4. Das Wassergasgleichgewicht	276
Wassergasprozeß 277. — Gleichgewichtskurven 278.	
5. Wasserstoffherstellung aus Methan	278
Spaltung von Methan mit Wasserdampf 279. — Spaltung von Methan mit Luft 279.	
6. Bildung und Zerfall von Kohlenwasserstoffen	280
Gleichgewichtskurven 281. — Freie Energien, Tab. 282. — Bildung aromatischer Kohlenwasserstoffe 283.	
7. Hydrierung	284
8. Synthese organischer Verbindungen aus Wassergas	285
9. Über den Einfluß von Druck auf die Spaltungs-, Bildungs- und Zersetzungsreaktionen	286
Methangleichgewichte unter Druck 287.	
II. Kinetik	288
A. Allgemeines über Reaktionsgeschwindigkeit	288
Aktivierungsenergie 289. — Kettenreaktionen 289. — Störungsreaktionen 290. — Reaktionen an Wandflächen 291.	
B. Flammgeschwindigkeit und Explosion	291
Explosionswelle 292. — Explosionsgeschwindigkeit, Tab. 293. — Selbstentzündungstemperatur 295.	
C. Chemischer Verlauf der Verbrennung	295
Verbrennungsreife 295.	
1. Die Verbrennung des Kohlenstoffs	296
2. Verbrennung technischer Brennstoffe	297
Wasserstoffabspaltung 298. — Freie Radikale 298. — Autoxydation 299. — Autokatalyse 299. — Peroxyde 299.	
3. Die Zündung	301
Vorverbrennung 301. — Fremdzündung 301. — Selbstentzündungstemperaturen 302.	
4. Das brennbare Gemisch	303
Verbrennungsgrenzen bei Normaldruck 304, — bei Überdruck 305, — bei Unterdruck 309.	
III. Verbrennungsformen	310
Zündung und Brennzeit, Zusammenstellung 310.	
A. Die Verbrennung der Gase bei konstantem Druck	311
1. Die leuchtende Bunsenflamme	312
2. Die entleuchtete Bunsenflamme	312
3. Die Entzündungsgeschwindigkeit	313
a) Entzündungsgeschwindigkeiten von Gasmischungen 314. —	
b) Die Berechnung von Entzündungsgeschwindigkeiten 316. — Entzündungsgeschwindigkeiten unter dem Einfluß der Vorwärmung, Tab. 317.	
4. Die Leistung des Gasbrenners	318
Brennerleistung 319. — Méker-Brenner 319. — Preßluftbrenner 320.	
5. Die Oberflächenverbrennung	320
B. Die Verbrennung von Kohle und Öl	321
1. Die Verbrennung der Kohle auf dem Rost	322
Korngröße 322. — Schütthöhe 323. — Luftgeschwindigkeit 323. — Zündzeit 324. — Zündverzug 324. — Kennlinien nach Werkmeister 325. — Theoretischer Luftbedarf 327.	

	Seite
2. Die Verbrennung von Kohlenstaub	327
Brennzeit, Feuerleistung 327. — Korngröße 328. — Verbrennungsschema 329.	
3. Die Ölfeuerung	331
C. Die Verbrennung in den Verbrennungskraftmaschinen	332
1. Der Vergasermotor	332
Thermodynamischer Wirkungsgrad 332. — Kompressionsverhältnis 333. — Früh- und Spätzündung 333. — Klopfen 334. — Siedeanalyse 334. — Toluolwerte 335. — Kompressionsfestigkeit 336. — Antiklopfmittel 336. — Klopfeste Mischungen 337.	
2. Der Dieselmotor	338
Eigenschaften der Dieselöle 339. — Zündpunkt und Verdichtungsdruck 340. — Zündvorgang und Druckverlauf 341.	

Anwendungsgebiete der Elektrotechnik.

Von Dr. Ing. W. Speidel, Halle a. S.

I. Allgemeine theoretische Grundlagen	342
A. Das elektrische Feld	342
1. Elektrizitätsmenge	342
2. Elektrische Feldstärke	342
3. Elektrische Verschiebung	342
Dielektrizitätskonstante 343.	
4. Elektrische Spannung	344
5. Kapazität	344
6. Elektrische Energie und mechanische Kräfte elektrischen Ursprungs	345
7. Elektrische Isoliermaterialien und elektrische Festigkeit	346
Durchschlagsfestigkeit 347. — Isoliermaterialien, feste und flüssige 347.	
8. Ableitungs- und dielektrische Verluste	348
Verlustwinkel 349. — Verwendungsfähigkeit verschiedener Isoliermaterialien 350.	
B. Der Gleichstrom	352
1. Ohmsches Gesetz	352
Widerstand und Temperaturkoeffizient 353.	
2. Kirchhoffsche Gesetze	353
3. Die Elektrizitätsleitung in Gasen	354
C. Magnetisches Feld und Induktionsgesetz	354
1. Einheitspol, magnetische Feldstärke	354
2. Magnetische Felder elektrischer Ströme	354
3. Magnetische Induktion \mathfrak{B}	355
4. Ferromagnetismus	356
a) Hysteresis 356. — b) Wirbelströme 358. — c) Temperaturabhängigkeit ferromagnetischer Körper 358.	
5. Der elektromagnetische Kreis	359
6. Das Induktionsgesetz	360
7. Selbstinduktivität	361
8. Gegeninduktivität	361
9. Die magnetische Energie und mechanische Kräfte magnetischen Ursprungs	362
10. Die Kraftwirkungen des magnetischen Feldes	363
D. Wechselströme und Ausgleichsvorgänge	363
1. Grundbegriffe	363
Kreisfrequenz 363. — Phasenverschiebung 364. — Scheitelfaktor 364. — Blindleistung 365. — Induktivität 366.	
2. Ohmsches Gesetz für Wechselstrom	366

	Seite
3. Ausgleichsvorgänge, Wanderwellen, Überspannungen	367
Einschalten eines Gleichstromkreises 368. — Einschalten eines Wechselstromkreises 368. — Abschalten von Stromkreisen 369.	
4. Drehstrom oder Dreiphasenstrom	370
Sternschaltung 371. — Dreieckschaltung 371.	
II. Der Transformator	371
A. Der magnetische Kreis des Transformators	371
B. Der leerlaufende Transformator	372
C. Der belastete Transformator	373
D. Der Transformator bei Kurzschluß	374
E. Das Einschalten des Transformators	374
F. Der Transformator bei Überspannung	375
G. Transformatorverluste	376
H. Belastbarkeit des Transformators	376
J. Transformierung von Dreiphasenstrom	379
K. Übergang von Zwei- in Dreiphasenstrom	381
L. Transformatoren zur Spannungsregelung	381
III. Gleichstromerzeuger und Gleichstrommaschinen.	382
A. Allgemeines über Gleichstrommaschinen	382
1. Aufbau	382
2. Wirkungsweise	383
3. Ankerrückwirkung	384
4. Stromwendung	385
B. Gleichstromerzeuger	386
1. Ankerspannung und Drehmoment	386
2. Die Betriebseigenschaften der Gleichstromerzeuger	386
a) Beim fremderregten Gleichstromerzeuger 387. — b) Bei Nebenschlußerregung 387. — c) Bei Reihenschlußerregung 388. — d) Änderung der Drehrichtung 389. — e) Bei Parallelschaltung von Gleichstromerzeugern 389. — f) Die Reihenschaltung 389.	
C. Gleichstrommotoren	390
1. Klemmenspannung, Drehzahl und Drehmoment	390
2. Die Betriebseigenschaften der Gleichstrommotoren	390
a) Der fremderregte Gleichstrommotor 390. — b) Der Nebenschlußmotor 391. — c) Der Reihenschlußmotor 391. — d) Erzeuger als Motor, Drehrichtungsumkehr 392.	
IV. Wechselstromerzeuger und Wechselstrommaschinen	392
A. Synchroner Wechselstrommaschinen	392
1. Aufbau	392
Ankerwicklung 394. — Ableitung der Verlustwärme 394.	
2. Wirkungsweise	395
3. Verhalten im Betrieb	397
a) Die Kennlinien der Synchronmaschinen 397. — b) Das Parallelschalten von Synchronmaschinen 398.	
B. Asynchrone Wechselstrommaschinen.	400
1. Aufbau	400
2. Die Wirkungsweise	402
3. Verhalten im Betrieb	402
a) Im Leerlauf 402. — b) Bei Kurzschluß der Läuferwicklung 403. — c) Bei motorischer Belastung der Asynchronmaschine 403. — d) Die Asynchronmaschine als Erzeuger 403.	
4. Der Anlauf von Mehrphasenasynchronmotoren.	404
a) Der direkt eingeschaltete normale Kurzschlußläufermotor 404. — b) Der direkt eingeschaltete Wirbelstromläufermotor 404. — c) Doppelnutläufermotore 405. — d) Direkte Ein-	

	Seite
schaltung oder Stern dreieckanlauf 405. — e) Der Schleifringläufermotor 406.	
5. Drehzahlregelung von Mehrphasenasynchronmotoren	406
6. Der Einphasensynchronmotor	407
C. Wechselstrom-Kommutatormaschinen	407
1. Aufbau	407
2. Wirkungsweise	408
3. Verhalten im Betrieb	409
a) Der Drehstromreihenschlußmotor 409. — b) Der Drehstromnebenschlußmotor 410.	
V. Umformer und Stromrichter	411
A. Umformer	411
1. Motorgenerator	411
2. Einankerumformer	412
3. Kaskadenumformer	413
B. Stromrichter	414
1. Allgemeine Begriffserklärung	414
2. Allgemeine Wirkungsweise	414
3. Der elektrische Lichtbogen als Hilfsmittel zur Stromrichtung 414	
4. Die Quecksilberdampfgleichrichter mit flüssiger Kathode	417
a) Allgemeines 417. — b) Gleichstromspannung und Gleichstromwelligkeit 418. — c) Transformatorschaltungen, Ausnutzungsgrad und primäre Scheinleistung 421. — d) Der Betrieb von Quecksilberdampfgleichrichtern 422.	
5. Die Quecksilberdampfgleichrichter mit Glühkathode	423
6. Anwendung gesteuerter Gleichrichter und Umrichter	424
a) Schaltung von Strömen 425. — b) Spannungsregelung 426. c) Frequenzumformung 428.	
VI. Akkumulatoren und deren Behandlung	430
A. Der Bleiakкумулятор	430
1. Die elektrochemischen Vorgänge im Bleiakкумулятор	430
2. Die Spannung des Bleiakкумуляtors	431
3. Die Kapazität des Bleiakкумуляtors	432
4. Der Wirkungsgrad des Bleiakкумуляtors	433
5. Konstruktive Ausführung von Akkumulatorplatten	433
6. Behandlung im Betrieb	435
C. Die alkalischen Akkumulatoren	436
VII. Elektrofilter	437
A. Allgemeines	437
Staubentwicklung in verschiedenen Industrien 438.	
B. Die Wirkungsweise von Elektrofiltern	439
Wanderungsgeschwindigkeit von Staubteilchen 440.	
C. Konstruktiver Aufbau	441
D. Anwendung der Elektrofilter	443
Schwefelsäureindustrie 443. — Gichtgasreinigung, Rauchgasreinigung 444.	
VIII. Elektrische Heizung	445
A. Allgemeines	445
B. Grundlegende Rechnungs- und Betriebswerte	445
1. Die nutzbare Wärme	445
2. Die Verlustwärme	445
3. Die Speicherwärme	446
4. Der Anschlußwert	446
5. Bemessung von Heizwiderständen	447
Widerstände von Heizdrähten 448.	
6. Baustoffe für elektrische und Wärmeisolation	449
C. Konstruktiver Aufbau	450
D. Die Anwendung der elektrischen Heizung	451

Werkstoffe für die chemische Ingenieurtechnik.

Von Prof. Dr. August Thum, Darmstadt und Dr.-Ing. Helmut Holdt, Darmstadt.

I. Allgemeiner Teil	451
A. Die Bedeutung der Werkstoffe für die chemische Ingenieurtechnik	451
B. Die mechanischen und chemischen Beanspruchungen der Werkstoffe	452
Festigkeit 453. — Dauerbruch 453. — Gewaltbruch 453. — Korrosion 453.	
C. Das Verhalten der Werkstoffe bei mechanischen Beanspruchungen .	454
1. Mechanische Beanspruchungen	454
a) Elastizität 454. — b) Plastische Formänderungen und Formänderungswiderstand 455. — c) Trennfestigkeit, spröde und zähe Werkstoffe 456. — d) Formänderungsbehinderung infolge Kerbwirkung 456. — e) Wechselfestigkeit 459. — Dauerbruch 459. — Ermüdungsbruch 459. — f) Stoßfestigkeit 460. — g) Verschleißfestigkeit 461.	
2. Chemische Einflüsse. — Korrosion	462
Interkristalline Brüchigkeit 464. — Korrosionsschutz 465. — Oberflächenbehandlung 466.	
3. Werkstofftechnische Gesichtspunkte für die Konstruktion. . . .	466
D. Die Prüfung der Werkstoffe auf ihre Eignung	468
1. Der Zerreißversuch	468
2. Der Druckversuch	471
3. Der Biegeversuch	471
4. Schlagproben	472
Kerbschlagprobe 473. — Kerbzähigkeit 473.	
5. Härteprüfung	474
Probe nach Brinell 474. — Härtezahl 474. — Rockwellhärte 475.	
6. Dauerversuch bei ruhender Belastung	475
Dauerstandsfestigkeit 476. — Kriechgrenze 476.	
7. Dauerversuch bei veränderlicher Beanspruchung	477
Dauerfestigkeit 477. — Wöhler-Kurve 479.	
8. Dauerschlagprobeversuch.	480
9. Technologische Proben	480
Faltversuch 480. — Schweißbarkeit 480. — Hin- und Herbiegeprobe 481. — Tiefziehprobe 481.	
10. Chemische Untersuchung und Gefügeuntersuchung	481
11. Prüfung der Korrosionsbeständigkeit	482
12. Prüfverfahren für feuerfeste Baustoffe	484
II. Die Werkstoffe, ihre Eigenschaften und Verwendung	485
A. Stahl und Eisen.	485
1. Die technischen Eisenarten und das Eisen-Kohlenstoff-Schaubild	485
2. Einfluß der thermischen und mechanischen Vorbehandlung des Stahles	488
a) Ausglühen 488. — b) Kaltverformung 488. — c) Alterung 488. — d) Rekristallisation 489. — e) Warmformgebung (Schmieden und Walzen) 489. — f) Härten und Vergüten 489. — g) Einsatzhärten 491. — Zusammenstellung der Kohlenstoffstähle, Tab. 492. — h) Nitrierhärtung 494.	
3. Geschmiedete Kohlenstoffstähle	494
a) Unlegierte Kohlenstoffstähle Klasse A 494. — b) Unlegierte Kohlenstoffstähle Klasse B (Regelstähle für den Maschinenbau) 495. — c) Die unlegierten Sonderstähle (DIN 1661) 495.	
4. Legierte Stähle	496
a) Nickelstähle und Chromnickelstähle 496. — b) Molybdän-, Wolfram- und Vanadinstähle 497. — c) Manganstähle und Siliciumstähle 500.	

	Seite
5. Stahlguß	501
6. Stähle für besondere Verwendungszwecke	501
a) Behälterbleche und Rohre 501. — b) Korrosionsbeständige Stähle 504. — Nichtrostende Stähle 504. — VA-Stähle 506. — c) Warmfeste und hitzebeständige Stähle 507. — Hochhitzebeständige Legierungen 509.	
7. Gußeisen	509
a) Gefügebau und Festigkeitseigenschaften 509. — b) Säurebeständiger Guß 511. — Thermisilid 511. — Neutrалеisen 511. — Esilit 511. — Tantiron 511. — Duriron 511. — Monelgußeisen 511. — c) Hitzebeständiges Gußeisen 512.	
B. Nichteisenmetalle	512
1. Aluminium	512
2. Aluminiumlegierungen	513
Silumin 513. — KS-Seewasser 513. — Hydronalium 513. — Duraluminium 515. — Lantal 515.	
3. Blei	516
Hartblei 516.	
4. Kupfer	516
5. Kupfer-Zinklegierungen (Messinge)	518
Tombak 519. — Sondermessing 521.	
6. Kupfer-Zinnlegierungen (Bronze und Rotguß)	523
Stahlbronze 524. — Aluminiumbronze 524.	
7. Kupfer-Manganlegierungen	524
8. Nickel	525
9. Nickellegierungen	526
a) Kupfer-Nickellegierungen 526. — Monelmetall 526. — b) Kupfer-Nickel-Zinklegierungen 527. — Neusilber 527. — Alpakka 527. — c) Nickel-Chromlegierungen 527.	
10. Magnesium und Magnesiumlegierungen	528
Elektronmetall 528.	
11. Zink	529
12. Zinn	529
13. Lagermetalle	530
Weißmetalle 530.	
14. Edelmetalle	530
a) Silber 530. — b) Gold 531. — c) Platin 531.	
C. Nichtmetallische Werkstoffe	532
1. Holz	532
2. Keramische Erzeugnisse	533
a) Feuerfeste Erzeugnisse 535. — Feuerfeste Steine, Tab. 536. — Druckfestigkeit feuerfester Steine 538. — Magnesitsteine 539. — b) Töpfererzeugnisse und Steingut 539. — c) Steinzeug 539. — d) Porzellan 541. — e) Steatit 541.	
3. Glas	541
4. Beton	542
Eisenbeton 543. — Prodoritbeton 543.	
5. Kohlenstoff	543
6. Gummi und Hartgummi	544
7. Kunstharze	545
Bakelite 545. — Havegmaterial 545. — Hartpapier 545.	
D. Schutzüberzüge	545
1. Metallische Überzüge	545
a) Verzinkung 546. — b) Verbleiung 546. — c) Verzinnung 546. — d) Nickelüberzüge 546. — e) Cadmium- und Chromüberzüge 547. — f) Aluminiumüberzüge 547.	
2. Nichtmetallische Überzüge	547
a) Email 547. — b) Silasit 547. — c) Parkerisieren, Coslettieren 548. — d) Anstriche 548. — e) Kitte 549. — Säurefeste Kitte 549. —	

Spezifisches Gewicht, Schmelzpunkt, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärme und Elastizitätsmodul verschiedener Werkstoffe Tab. 550. — Korrosionsbeständigkeit einiger Werkstoffe, Tab. 551. — Werkstoffe für chemische Apparateile bei verschiedenartigen Beanspruchungen, Tab. 562.

Technische Meß- und Regelverfahren

Von Dr. rer. nat. A. Ernst und Dr. phil. C. Hilburg VDI, Ludwigshafen a. Rh.

I. Die gemeinsamen Elemente technischer Meßverfahren . . .	573
A. Überblick über die Grundformen technischen Messens und ihre Bedeutung	573
B. Abgrenzung gegen Spezialgebiete	574
C. Registriervorrichtungen	575
a) Trommelschreiber 577. — b) Streifenschreiber 577. — c) Kreisblattschreiber 577.	
D. Zählvorrichtungen	578
1. Mechanische Zähler	578
2. Elektrische Zähler	579
a) Gleichstrommotorzähler 579. — b) Wechselstrommotorzähler 580. — c) Elektrolytzähler 580.	
E. Fernmeßvorrichtungen	580
1. Direkte Meßeinrichtungen mit Fernleitungen	581
a) Druckmeßgeräte 581. — b) Elektrische Meßgeräte 581. — c) Akustische und optische Einrichtungen 581.	
2. Indirekte Fernmeßeinrichtungen	583
a) Mechanische Fernmeßeinrichtungen 583. — b) Hydraulische und pneumatische Fernmeßeinrichtungen 583. — c) Elektrische Fernmeßeinrichtungen 584.	
F. Signaleinrichtungen	588
G. Regeleinrichtungen	590
1. Kraftverstärker	590
2. Regelorgane	592
3. Reglergruppen	594
4. Regelmethoden	595
II. Temperaturmessung	597
A. Grundlagen der Temperaturmessung	597
Temperaturfixpunkte, Tab. 597.	
B. Technische Temperaturmeßverfahren	599
1. Thermoelemente	599
a) Strommessung mit Drehspulinstrumenten 600. — b) Technische Kompensationsschaltung 600. — c) Halbpotentiometrische Schaltung 601. — d) Mehrfach-Thermoelemente 601. — e) Meßgenauigkeit der Thermoelemente 601. — f) Größe der Thermokräfte 602.	
2. Widerstandsthermometer	602
3. Strahlungs-pyrometer	603
C. Thermometereinbau	604
D. Temperaturregler	605
1. Regler für Raumtemperaturen	605
2. Temperaturregler für Apparate und Industrieanlagen.	606
a) Elektrische Regler 606. — b) Mechanische Regler 608. — c) Kombinierte Regler 610.	
3. Regler für Sonderzwecke	610
III. Druckmessung	611
A. Allgemeines	611
B. Manometer	613

	Seite
1. Flüssigkeitsmanometer	613
a) U-Rohr- und Gefäßmanometer 613. — b) Barometer 616. — Vakuummeter 618. — c) Mikromanometer 618. — Wassermini- meter 620. — Drucklibelle 622. — Schrägrohrmanometer 623. — Druckwaage 625. — Ringwaage 625. — Schreibende Manometer 626. — d) Glockenmanometer 627.	
2. Metallmanometer	628
a) Plattenfedermanometer 629. — Aneroidbarometer 630. — b) Röhrenfedermanometer 630. — Schreibmanometer 632.	
3. Kolbenmanometer	633
a) Gewichtsbelastete Kolben 633. — b) Federbelastete Kolben 636.	
4. Differenzdruckmanometer	637
a) Einfache Differenzdruckmanometer 637. — b) Differenz- druckmanometer mit Radiziereinrichtung 639. — Mechanische Radizierung 640. — Elektrische Radizierung 641. — Ringwaage mit Radiziereinrichtung 642.	
5. Elektrische Manometer	644
6. Verschiedene Druckmesser	647
C. Sicherung der Druckmessung	649
Einbau 650. — Meßleitungen 650. — Ausgleichsgefäße 651. — Eichung 652.	
IV. Dichtemessung	653
A. Flüssigkeitsdichteschreiber	653
B. Gasdichteschreiber	655
C. Dichtemessung fester Körper	658
D. Dichteregler	658
V. Feuchtigkeitsmessung	659
A. Grundlagen der Feuchtigkeitsmessung	659
B. Technische Feuchtigkeitsmeßgeräte	660
C. Feuchtigkeitsregler	663
VI. Heizwertmessung	664
A. Theoretische Grundlagen der Heizwertmessung	664
B. Heizwertschreiber	666
C. Heizwertregler	667
VII. Physikalische Analysenverfahren	667
A. Mechanische, chemische Analysenverfahren	667
B. Physikalische Analysenverfahren, nach vorausgegangenen chemi- schen und physikalischen Reaktionen	667
C. Physikalische Analysenverfahren, auf Grund gleichzeitiger chemi- scher Reaktionen	668
Rauchgasanalyse 669. — Schwefelprober 669. — Sauerstoff- prüfer 670. — I. G.-Titrierautomat 670. — Schwefelwasserstoff- schreiber 670. — Kondenswasserprüfer 672. — p_n -Meßgeräte 672. — Dielektrizitätskonstante 673.	
D. Rein physikalische Analysenverfahren	673
VIII. Mengenmessung	675
A. Allgemeine Bemerkungen zur Mengenmessung	675
1. Zweck der Messung	675
2. Verwertung der Meßergebnisse	676
3. Wirtschaftlichkeit der Mengenmessung	677
B. Mengenmessung fester Stoffe	678
1. Allgemeine Beziehungen zwischen Volumen und Gewicht	678
2. Volumetrische Mengenmessung	679
a) Volumenermittlung durch Ausmessung 679. — α) Regel- mäßig gestaltete Körper 679. — β) Schüttgüter 680. — b) Mengen- ermittlung durch Zählen 680. — c) Leistung verschiedener Förder- einrichtungen 681. — d) Genauigkeit volumetrischer Mengen- messung 684.	

	Seite
3. Mengenummessung durch Wägung	684
a) Masse und Gewicht 684. — b) Übersicht über die verschiedenen Wägeeintrichtungen 685. — c) Zur Theorie der Hebelwaage 687. — α) Einfache Hebelwaage mit Gewichtsschale 687. — Wägungsgleichung 687. — Empfindlichkeit 688. — Hebeldurchbiegung 689. — β) Die zusammengesetzte Hebelwaage 690. — Wägungsgleichung 690. — Empfindlichkeit 692. — Hebeldurchbiegung 692. — γ) Schaltungsgewichtswaagen 692. — δ) Laufgewichtswaagen 693. — ϵ) Neigungswaagen 694. — ζ) Selbsttätige Waagen mit fester Einspiellage 695. — Selbsttätige Balkenwaage 697. — Selbsttätige Laufgewichtswaagen 697. — η) Selbsttätige Hebelwaagen zur Verwiegung von stetig geförderten Wägegütern 697. — Band- und Becherwerkswaagen 697. — Die Balan-Kontrollwaage 698. — θ) Deformationswaage 698. — Federwaage 698. — ι) Hydrostatische Waagen 699. — d) Sicherung der Wägung 699. — α) Von Hand zu bedienende Waagen 699. — Aufstellung 699. — Empfindlichkeit 701. — Richtigkeit 701. — Unveränderlichkeit 702. — Gewichte 702. — Bedienung 703. — Fehler 703. — β) Selbsttätige Waagen 704. — Balken- und Laufgewichtswaagen: Einbau 704. — Fehler 705. — Förderband- und Becherwerkswaagen: Einbau 705. — Fehler 705. — e) Eichvorschriften 706. — α) Eichpflicht und Eichfrist 706. — β) Fehlergrenzen 707. — der Wägeeintrichtungen 708. — der Gewichte 710. — f) Genauigkeit der Wägeeintrichtungen 712. — α) Wägungsmethoden 712. — β) Die praktische Genauigkeit 714.	
C. Mengenummessung von Flüssigkeiten, Gasen und Dämpfen	716
1. Allgemeine Betrachtungen zur Mengenummessung von Flüssigkeiten	716
α) Einheiten bei technischen Mengenummessungen 716. — b) Allgemeine Eigenschaften der Flüssigkeiten 717. — Spezifisches Gewicht 718. — Kompressibilität 719. — Dampfdruck 722. — Abweichung von den idealen Gasgesetzen 724. — Spezifisches Dampfgewicht 725. — c) Charakteristische Kenngrößen für dynamische Mengenummessung 726. — α) Zähigkeiten 726. — β) Reynoldssche Zahl 727. — γ) Grundarten der Strömungsformen 729.	
2. Unmittelbare Methoden zur Messung von Flüssigkeiten	731
a) Volumetrische Mengenummessung 731. — α) Raummessung bei gleichbleibendem Druck 731. — Abreibnadel 732. — Meßlatte, Bandmaß 732. — Schwimmer 732. — β) Raummessung bei veränderlichem Druck 733. — Auffüll- und Ausblasmethode 733. — Indicatorgramm 734. — γ) Selbsttätige Raummessung 734. — Gasuhr 734. — Nasse Gasuhr 735. — Taumelmesser 735. — Trockene Gasuhr 736. — Kipp- und Trommelmesser 736. — Kolbenmesser 737. — Kapsel- und Scheibenmesser 739. — b) Gewichtsmäßige Mengenermittlung von Flüssigkeiten 740. — α) Bedienung von Hand 740. — β) Selbsttätige Einrichtungen 740. — c) Sicherung der unmittelbaren Mengenummessung 741. — α) Eichung der Meßgeräte 741. — β) Eichamtliche Bestimmungen 742. — Fehlergrenzen 743.	
3. Mittelbare Methoden zur Mengenummessung von Flüssigkeiten	745
a) Stöchiometrische oder chemische Methoden 745. — b) Calorische Methoden 745. — c) Methoden der Geschwindigkeitsmessung 746. — α) Mit Hilfe loser Fremdstoffe 746. — Schwimmer 746. — Meßschirm 747. — Impffverfahren 747. — β) Mit Hilfe ortsfester Kraftwerke 747. — Anemometer 748. — Flügelräder 749. — Woltmann-Messer 750. — γ) Geschwindigkeitsmessung mit dem Staugerät 753. — δ) Geschwindigkeitsmessung bei Verwendung von Durchflußwiderständen 755. — Drosselgeräte 755. — Blende 756. — Düse 756. — Venturirrohr	

	Seite
758. — Durchflußgleichungen 759. — Durchflußzahlen 766. — Expansionsberichtigung 767. — Differenzdruckmesser 769. — Sicherung der Durchflußmessung mit Drosselgeräten 770. — Einbau 773. — Druckübertragungsleitungen 774. — Hilfseinrichtungen 778. — ε) Geschwindigkeitsmessung mit Ausflußöffnungen 780. — Düsen und Blenden 780. — Überfälle 781. — ζ) Geschwindigkeitsmessung mit Schwimmermessern 783. — Rotamesser 785. — Grefe-Schwimmermesser 786. — Bayer-Siemens-Messer 786. — η) Mengenermittlung aus dem Druckabfall bei glatten, runden Rohrleitungen 787. — Druckabfall 789. — Widerstandszahl 790.	
4. Mengenummessung mit Messerkombinationen	791
Teilstrommeßverfahren 793. — Stromteiler 794.	
IX. Regelung von Druck und Menge	795
A. Allgemeine Bemerkungen zur Regelung von Druck und Menge	795
1. Vorbemerkungen	795
2. Die Drosselorgane	796
3. Der Drosselquerschnitt	797
Ausflußwert 798. — Durchflußgewicht 799.	
B. Druck- und Mengenregelung von Flüssigkeiten (Gasen und Dämpfen)	801
1. Handregelung	801
a) Handbetätigte Einstellorgane 801. — b) Handbetätigte Sicherheitsabsperroorgane 803.	
2. Selbsttätige Regelung von Druck und Menge	805
a) Allgemeine Betrachtungen 805. — α) Reine Selbstregelung 805. — β) Die verschiedenen Reglerarten 806. — γ) Die Arbeitsweise der Regler 807, — ohne Zwischenstellung 807, — mit Zwischenstellung 807. — b) Verschiedene Regelaufgaben und Reglerausführungen 809. — α) Einhaltung eines bestimmten, vorher einstellbaren Zustandes 810. — Einregelung von Drücken 810. — Stetige Druckregelung 814. — Druckregelung in Schritten 816. — Einzelmengenregelung 818. — Ausflußregelung 818. — Durchflußregelung 818. — Gewichtsregelung bei tropfbaren Flüssigkeiten 818. — Gemischregelung 819. — Feuerungsregelung 821. — β) Beeinflussung des Reglereinstellwertes durch bestimmte Meßgrößen 825. — Programmregelung 825. — Regelzustand in Abhängigkeit von einer oder mehreren beliebigen Meßgrößen 825. — Luftüberschußregelung bei Kesselfeuerungen 827. — β) Selbsttätige Sicherheits- und Absperreinrichtungen 827. — Unmittelbare Sicherheitseinrichtungen 827. — Mittelbare Sicherheitseinrichtungen 829.	
C. Mengenregelung fester Stoffe	830
1. Mengenregelung von Hand	830
a) Volumetrische Mengenregelung 830. — Zuteiler 831. — Zellenspeiser 831. — Bandzuteiler 832. — Meßrahmen 832. — b) Gewichtsmäßige Mengenregelung 833. — Gattierungswaage 833. — Automatische Balkenwaage 835. — Becherwerks- und Förderbandwaage 836.	
2. Selbsttätige Mengenregelung fester Stoffe	837
a) Selbsttätige Volumenregelung 837. — Zellenrad-Bandzuteiler 838. — Regelung der Brennstoffzufuhr 839. — b) Selbsttätige Gewichtsregelung 840. — Automatische Ausschüttwaagen 840. — Dosierwaagen 842. — Fernregelung des Laufgewichtes 845.	
Namenverzeichnis	846
Sachverzeichnis	854

Inhaltsverzeichnis des zweiten Bandes.

	Seite
Aufbau von Anlagen. Von Dr.-Ing. K. Thormann VDI, Breslau	1
Energiewirtschaft. Von Dr. W. Speidel VDI, Halle a. S. und Dip.-Ing. K. Kranz VDI, Mannheim	15
Wärmeübertragung. Von Dr.-Ing. E. Hegelmann VDI, Ludwigshafen a. Rh.	97
Feuerungen und Dampfkesselwirtschaft. Von Dipl.-Ing. Eckart Richter VDI, Wuppertal-Elberfeld	143
Reinigung, Enthärtung und Entgasung von Fabrikationswasser. Abwasser- reinigung. Von Prof. Dr. phil. E. Berl, Darmstadt-Pittsburgh und Dr.-Ing. K. Bemann, Darmstadt	246
Kältetechnik. Von Dr.-Ing. M. Gompertz, Berlin	327
Verdichtung und Förderung von Luft und Gasen. Von Dipl.-Ing. H. Haehn- del VDI, Berlin-Tegel.	406
Förderung von Flüssigkeiten, besonders von Säuren und Laugen. Von Dipl.- Ing. E. Wisotzky VDI, Berlin-Charlottenburg	494
Fördern fester Stoffe. Von Dr.-Ing. K. Thormann VDI, Breslau	593
Speichern. Von Dr.-Ing. K. Thormann VDI, Breslau	602
Trocknung. Von Obering. A. Römer, Hersfeld und Dr.-Ing. L. C. Simon, Ludwigshafen a. Rh.	614
Industrielle Öfen. Von Dr.-Ing. K. Thormann VDI, Breslau	718
Elektroöfen. Von Dr.-Ing. K. Thormann VDI, Breslau	770

Inhaltsverzeichnis des dritten Bandes.

Zerkleinerung. Von Carl Mittag, Abteilungsdirektor der Fried. Krupp Grusonwerk A. G., Magdeburg-Buckau.	1
Sieben und Sichten. Von Dr.-Ing. K. Thormann VDI, Breslau	50
Abklärvorgänge, hydraulische Trennung. (Sedimentation, Dekantation, hydraulische Separation.) Von Dr.-Ing. E. Hegelmann VDI, Ludwigs- hafen a. Rh.	62
Allgemeine Erzaufbereitung. Von Dr.-Ing. H. Schranz, Magdeburg.	87
Schwimmaufbereitung (Flotation). Von Dr. Ing.-H. Schranz in Fa. Krupp- Gruson, Magdeburg, Prof. Dr. E. Berl, Pittsburgh und Dr.-Ing. Bernh. Schmitt, Ludwigshafen a. Rh.	116
Rühren. Von Dr.-Ing. K. Thormann VDI, Breslau	147
Mischen. Von Dr.-Ing. K. Thormann VDI, Breslau	151
Kneten. Von Dr.-Ing. K. Thormann VDI, Breslau	159
Extrahieren. Von Dr.-Ing. K. Thormann, Breslau	162
Krystallisieren. Von Dr.-Ing. E. Hegelmann VDI, Ludwigshafen a. Rh.	179
Schleudern (Zentrifugieren). Von Dr.-Ing. E. Hegelmann VDI, Ludwigs- hafen a. Rh.	210

	Seite
Filterieren. Von Dr.-Ing. E. Hegelmann, Ludwigshafen a. Rh.	231
Auspressen flüssigkeitshaltiger Massen. Von Dr.-Ing. E. Hegelmann VDI, Ludwigshafen a. Rh.	298
Pressen. Von Dr.-Ing. K. Thormann VDI, Breslau	310
Schmelzen. Von Dr.-Ing. K. Thormann, Breslau	318
Sublimieren. Von Dr.-Ing. K. Thormann, Breslau	333
Verdampfen. Von Dr.-Ing. E. Hegelmann VDI, Ludwigshafen a. Rh. . .	337
Destillieren und Rektifizieren. Von Dr.-Ing. K. Thormann, Breslau . . .	395
Tieftemperaturtechnik. Von Dr.-Ing. M. Gompertz, Berlin	441
Trennung von Gasen und Dämpfen durch Auswaschung (Gaswaschung). Von Dr.-Ing. E. Hegelmann VDI, Ludwigshafen a. Rh.	463
Gewinnung und Wiedergewinnung flüchtiger Lösungsmittel. Von Prof. Ing. Dr. E. Berl, Darmstadt-Pittsburgh und Dr.-Ing. R. Bemann, Darmstadt	521
Trocknung von Gasen. Von Prof. Dr. Ing. E. Berl, Darmstadt-Pittsburgh und Dr.-Ing. R. Bemann, Darmstadt	544
Reinigung von Gasen. Von Prof. Ing. Dr. E. Berl, Darmstadt-Pittsburgh und Dr.-Ing. R. Bemann, Darmstadt	547
Zerkleinerungs-Chemie. (Kolloidchemie der Trübungen mit Berücksichtigung der Zerkleinerung.) Von Privatdozent Dipl.-Ing. Dr. A. Chwala, Wien	554

Praktisch-mathematische Grundlagen.

Von Prof. Dr. rer. techn. A. Walther VDI, Darmstadt.

Vorbemerkungen.

Ein Hauptgebot für den Naturwissenschaftler und Ingenieur, wenn er Mathematik anwendet, muß die Anschaulichkeit sein. Deshalb sind, wo es irgend möglich ist, graphische Verfahren zu bevorzugen. Sie tragen der Tatsache Rechnung, daß den meisten Menschen Mathematik durch das Auge leichter eingeht als allein durch logisches Schließen; sie dringen rasch und tief zu den natürlichen, im gesunden Menschenverstand liegenden Quellen mathematischer Erkenntnis und mathematischer Arbeit vor; sie befreien die mathematischen Überlegungen von Nebensachen und lassen das Wesentliche „anschaulich“ in wörtlichem und höherem Sinne zutage treten. Ihr Gebrauch setzt heutzutage noch bei manchem — beim Naturwissenschaftler wohl mehr als beim Ingenieur, dessen Sprache von jeher die Zeichnung war — eine grundlegend veränderte geistige Haltung gegenüber der Mathematik und im Anfang auch etwas geduldige Übung voraus. Denn gerade der Nichtfachmathematiker, wenn er nicht Mathematik überhaupt ablehnt, neigt oft merkwürdig stark dazu, bei mathematischen Dingen im Formalen, Abstrakten stecken zu bleiben und in Tabellen, Buchstaben- oder Zahlenrechnungen zu schwelgen. Demgegenüber handelt es sich bei den graphischen Verfahren, allgemeiner überhaupt in der praktischen Mathematik darum, jede mathematische Betrachtung in Skizzen augenfällig zu machen und sich immer wieder zur Einfachheit, zu einem gesunden Verhältnis von Inhalt und Methode, von Frage und Ergebnis, von Zeichnung, Rechnung und Formel zu zwingen.

Unter den kurz umrissenen Gesichtspunkten ist die folgende Zusammenstellung einiger für den Praktiker erkenntnis- oder anwendungsmäßig wertvoller Verfahren der praktischen Mathematik entstanden. Sie soll dem der Mathematik bisher Fernstehenden den Weg zur Mathematik ebnen und sie dem schon mit ihr Vertrauten in besonderer Ausprägung zeigen, um so zu begrifflicher Klarheit und zu der dringend notwendigen engeren Verschmelzung von Mathematik, Naturwissenschaft und Technik beizutragen. Die Auswahl war durch den Aufgaben- und Leserkreis der „Chemischen Ingenieurtechnik“ bestimmt.

Verzeichnis der Stellen,

wo einige Bezeichnungen erklärt werden:

→ S. 2 ∞ S. 2 \approx S. 3 \triangleq S. 6 Dim_x S. 7 || S. 11 Σ S. 56.

I. Logarithmen- und Dreieckspapier.

Logarithmenpapier dient dazu, zwei in den Anwendungen immer wieder vorkommende Funktionen, die Exponentialfunktion $y = ba^x$ und die Potenz $y = bx^a$, besonders bequem, nämlich geradlinig darzustellen. Diese Möglichkeit ist vor allem wertvoll, wenn für beobachtete Werte ein Zusammenhang von der Form der Exponentialfunktion oder der Potenz vermutet wird: statt durch die auf Millimeterpapier eingetragenen Versuchswerte eine sich ihnen „möglichst gut“ anschließende Ausgleichskurve legen zu müssen, hat man bei Logarithmenpapier nur eine Ausgleichsgerade zu ziehen, für die außerdem die formelmäßigen Konstanten a und b weit leichter bestimmbar sind als für die Kurve auf Millimeterpapier. Aber auch andere Funktionen stellt man zuweilen auf Logarithmenpapier dar, etwa wenn man große Wertebereiche erfassen will, weil die Logarithmen viel schwächer anwachsen als die Zahlen selbst. Beispiel: Wöhlerkurve für die Wechselfestigkeit bei der Werkstoffprüfung; als Abszisse dient die praktisch etwa zwischen 10^4 und 10^8 liegende Anzahl n der Belastungswechsel, nach der das Probestück in dem betreffenden Dauerversuch bricht, als Ordinate der Höchstwert σ der bei jedem Belastungswechsel des Dauerversuchs erreichten Spannung. — Oder manchmal sollen beim Anwachsen einer Veränderlichen nicht gleiche Unterschiede, wie zwischen 1 und 2, 2 und 3, ... auf Millimeterpapier, sondern gleiche Verhältnisse wie zwischen 1 und 10, 10 und 100, ... immer durch dieselbe Streckenlänge dargestellt werden. Auch das erreicht man durch Logarithmenpapier, weil der Logarithmus zwischen 1 und 10 ebenso um 1 zunimmt wie zwischen 10 und 100.

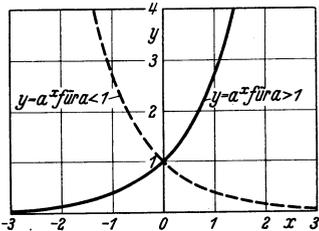


Abb. 1. Exponentialfunktion $y = a^x$
 (ausgezogen: $y = e^x$,
 $a = e \approx 2,71828$;
 gestrichelt: $y = e^{-x}$,
 $a = \frac{1}{e} \approx 0,36788$).

1. Einiges über Exponentialfunktion, Logarithmus und Potenz.

a) Exponentialfunktion. Anschauliches und Umrechnungen. Die Exponentialfunktion $y = a^x$ (Multiplikation mit der Kon-

stanten b in $y = ba^x$ bewirkt nur eine Ausdehnung oder Zusammendrückung in der y -Richtung, allenfalls bei negativem b noch eine Spiegelung an der x -Achse) hat die unabhängige Veränderliche x im Exponenten der (positiven) Grundzahl a . Sie steigt bei $a > 1$ für wachsendes x exponentiell an (Abb. 1) und fällt bei $a < 1$ für wachsendes x exponentiell nach dem Grenzwerte 0 ab (klingt für $x \rightarrow \infty$ exponentiell ab¹, nähert sich asymptotisch der x -Achse). Für abnehmendes x ist es gerade umgekehrt, insbesondere² gilt $y \rightarrow 0$ für $x \rightarrow -\infty$ bei $a > 1$.

¹ $x \rightarrow \infty$, gesprochen: „ x nach unendlich“ bedeutet nur, daß x unbegrenzt wachsen soll. Man lege nicht mehr hinein.

² Die suggestive, anschaulich unmittelbar verständliche Bezeichnung \rightarrow für den „Grenzübergang“ wird gesprochen: „nach“ oder „gegen“.

In der Regel wird aber, wie immer bei Aussagen über das Steigen und Fallen von Kurven, x als wachsend vorausgesetzt. Für $x = 0$ geht die Kurve bei jedem positiven a durch den Punkt $y = 1$ der y -Achse.

Sehr oft (vgl. ϵ) wird die Grundzahl a als Potenz 10^m von 10 oder als Potenz e^n der Basis $e = 2,71828\dots$ des natürlichen Logarithmen-systems geschrieben:

$$a = 10^m = e^n, \text{ wobei } m \text{ und } n \geq 0 \text{ für } a \geq 1,$$

also
$$y = ba^x = b \cdot 10^{mx} = b \cdot e^{nx}.$$

m ist die Zahl, mit der man 10 potenzieren muß, um a zu erhalten, also der Zehnerlogarithmus $\log a$ von a , und n der natürliche Logarithmus $\ln a$ von a :

$$m = \log a \text{ und } n = \ln a.$$

Die Umrechnungsgleichungen lauten¹:

$$10 \approx e^{2,30259}, \text{ also } 10^m \approx e^{2,30259 m} \approx e^n, \text{ daher } n \approx 2,30259 m, \\ e \approx 10^{0,43429}, \text{ also } e^n \approx 10^{0,43429 n} \approx 10^m, \text{ daher } m \approx 0,43429 n.$$

Wenn $a < 1$ ist, also m und $n < 0$ sind, wird gern $m = -c$ ($c > 0$) und $n = -k$ ($k > 0$) gesetzt, also

$$y = ba^x = b \cdot 10^{-cx} = b \cdot e^{-kx}.$$

Die Kurve für y hat dann den gestrichelten, exponentiell abklingenden Verlauf der Abb. 1, und zwischen c und k gelten dieselben Umrechnungsgleichungen wie zwischen m und n .

β) Organisches Wachstum. Die Exponentialfunktion $y = be^{nx}$ (vgl. die Doppelleitern Abb. 6, S. 9 und Abb. 27, 28, S. 23) hat die Ableitung $y' = nbe^{nx}$ (S. 47—48), ist also die Lösung der Differentialgleichung

$$y' = ny$$

des organischen Wachstums: Änderungsgeschwindigkeit y' von y proportional der Funktion y selbst mit dem Proportionalitätsfaktor n , der als Faktor der unabhängigen Veränderlichen x in den Exponenten von e tritt. Die Konstante b ist von diesem Standpunkte aus die beim Lösen der Differentialgleichung hereinkommende willkürliche Integrationskonstante, und zwar der Anfangswert von y für $x = 0$. Anwendungen z. B.: Lichtabsorption, radioaktiver Zerfall, Seilreibung, Abklingen eines elektrischen Stroms [vgl. A. Walther: Einführung in die mathematische Behandlung naturwissenschaftlicher Fragen. Berlin: Julius Springer 1928].

γ) Exponentielle Annäherung an einen Grenzwert. Außer der Exponentialfunktion selbst tritt in den Anwendungen häufig auch die exponentielle Annäherung an einen Grenzwert

$$y = Y - be^{-kx} \text{ mit konstantem } Y \text{ und } k > 0$$

auf. Für $x \rightarrow \infty$ geht $e^{-kx} \rightarrow 0$, daher $y \rightarrow Y$; d. h. Y ist der Grenzwert (unscharf ausgedrückt: Höchstwert) y_∞ , dem y , von $y = Y - b$ für $x = 0$ ausgehend, bei wachsendem x zustrebt (Abb. 2). Wegen $y' = kbe^{-kx}$ genügt y der Differentialgleichung

$$y' = k(Y - y),$$

¹ \approx bedeutet: „angenähert gleich“.

Änderungsgeschwindigkeit y' von y proportional dem Unterschiede $Y - y$ von y gegen den Grenzwert Y , und zwar mit dem Proportionalitätsfaktor k , der bei der Lösung im Exponenten $-kx$ von e^{-kx} wieder auftritt. y' hat den Wert kb für $x = 0$ (Veranschaulichung von k , Abb. 2) und nimmt für $x \rightarrow \infty$, $y \rightarrow Y$ nach 0 ab.

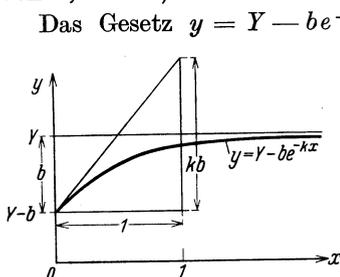


Abb. 2. Exponentielle Annäherung an einen Grenzwert.

Das Gesetz $y = Y - be^{-kx}$ liegt z. B. für die Temperatur y zur Zeit x vor, wenn sich eine Maschine beim Anfahren von der Temperatur $Y - b$ des umgebenden Maschinenraumes auf die Betriebstemperatur Y erwärmt. (Die Auskühlung von Y auf $Y - b$ beim Auslaufen erfolgt nach dem ähnlichen Gesetze $y = Y - b + be^{-kx}$.) Ferner werden bei $Y = b$ durch das Gesetz

$$y = Y(1 - e^{-kx})$$

z. B. beherrscht [vgl. A. Walther: Einführung...]:

Ansteigen eines elektrischen Stromes y mit der Zeit x gegen eine Selbstinduktion, $Y = \frac{U}{R}$ Ohmscher Grenzstrom (U Spannung, R Ohmscher Widerstand), $k = \frac{R}{L}$ (L Selbstinduktivität);

Fall eines Körpers entgegen einem Luftwiderstande proportional zur Geschwindigkeit y (x Zeit, Y Grenzgeschwindigkeit);

biologische und wirtschaftliche Wachstumsvorgänge, y Ertrag, x Wachstumsfaktor (Nährstoffgabe, Temperatur, Belichtung, Zeit usw.);

Einmolekülreaktion, z. B. Zuckerinversion, Y Anfangsmenge, y zur Zeit x umgesetzte Menge des reagierenden Stoffes, k Reaktionskonstante.

d) **Halbwertzeit.** Der halbe Grenzwert $\frac{Y}{2}$ wird für das mit $y = 0$ beginnende y in $y = Y(1 - e^{-kx})$ zur Halbwertzeit X erreicht, die aus

$$\frac{Y}{2} = Y(1 - e^{-kX}), \text{ also } e^{-kX} = \frac{1}{2}$$

folgt zu

$$X = \frac{\ln 2}{k};$$

sie ermöglicht also die experimentelle Bestimmung der Abklingungskonstanten k . Bis auf 1⁰/₁₀₀ ist Y angenähert (die Reaktion abgelaufen) für

$$y = 0,999 Y = Y(1 - e^{-kx}), \text{ also } e^{-kx} = \frac{1}{1000} \approx \frac{1}{1024} = \frac{1}{2^{10}},$$

$$kx \approx 10 \ln 2, \quad x \approx 10 X,$$

d. h. rund für die 10fache Halbwertzeit.

ε) **Logarithmus.** In $y = a^x$ ist x die Zahl, mit der man a potenzieren muß, um y zu erhalten. Man nennt diesen Exponenten x den Logarithmus von y zur Basis a und schreibt $x = {}^a\log y$. Gewöhnlich vertauscht

man noch x und y und hat dann als Umkehrfunktion zur Exponentialfunktion die logarithmische Funktion

$$y = {}^a\log x \text{ mit der Bedeutung } x = a^y.$$

Die Kurve $y = {}^a\log x$ geht aus der Kurve $y = a^x$ der Abb. 1 durch Spiegelung an der Geraden $y = x$ hervor. Sie fällt für $x \rightarrow 0$ nach unten ab (${}^a\log x \rightarrow -\infty$ für $x \rightarrow 0$), läuft, bei wachsendem x nach unten hohl ansteigend, durch den Punkt $x = 1$ der x -Achse (${}^a\log 1 = 0$) und erreicht die Höhe $y = 1$ für $x = a$ (${}^a\log a = 1$).

Für den Logarithmus gelten die Logarithmengesetze, die weiter nichts als eine Umschreibung der Potenzgesetze gemäß dem Exponentencharakter des Logarithmus sind und die Grundlage des — durch Rechenschieber und Rechenmaschine mehr und mehr zurückgedrängten — Rechnens mit der Logarithmentafel bilden (vgl. S. 29). Nur Logarithmen ${}^{10}\log x = \log x$ mit der Basis 10 (Zehnerlogarithmen der Logarithmentafel, Briggs; vgl. die Doppelleiter Abb. 21, S. 20) und ${}^e\log x = \ln x$ mit der Basis $e = 2,71828 \dots$ (natürliche Logarithmen, Neper; vgl. die Doppelleiter Abb. 22, S. 20 und A. Walther: Einführung ...) werden praktisch verwendet. Nach S. 3 gilt

$$\log x \approx 0,43429 \ln x \text{ und } \ln x \approx 2,30259 \log x.$$

Z. B. folgt aus $y = Y - be^{-kx}$ durch Logarithmieren unter Einführung eines Bezugspunktes x_1, y_1

$$k = \frac{1}{x - x_1} \ln \frac{Y - y_1}{Y - y} \approx 2,3026 \cdot \frac{1}{x - x_1} [\log (Y - y_1) - \log (Y - y)].$$

Zur rechnerischen Prüfung, ob exponentielle Annäherung an einen Grenzwert vorliegt, hat man also den rechtsstehenden Ausdruck mit der Logarithmentafel auf seine Konstanz zu untersuchen.

§) **Potenz. Geometrischer Verlauf.** Die Potenzkurven (Polytropen) $y = x^a$ für verschiedene Exponenten a sind in Abb. 3 zu sehen. Sie gehen samt und sonders durch den Punkt $x = 1, y = 1$. Bei $a = 1$ hat man die Gerade $y = x$, bei $a = 0$ die Waagerechte $y = 1$ und bei $a = -1$ die gleichseitige Hyperbel $y = \frac{1}{x}$.

Diese drei Linien trennen verschiedene Potenztypen:

Bei $a > 1$ steigt $y = x^a$, nach der x -Achse erhaben, an, und zwar für $0 < x < 1$ unterhalb der Geraden $y = x$, für $x > 1$ oberhalb (Beispiele: gewöhnliche Parabel $y = x^2$, kubische Parabel $y = x^3$).

Bei $0 < a < 1$ steigt $y = x^a$, nach der x -Achse hohl, an, und zwar für $0 < x < 1$ oberhalb der Geraden $y = x$, für $x > 1$ unterhalb (Beispiele: Parabel $y = x^{\frac{1}{2}} = \sqrt{x}$; Adsorptionsisothermen nach Boedeker und H. Freundlich [Kapillarchemie, Bd. 1, 4. Aufl. Leipzig:

Akademische Verlagsgesellschaft 1930] $y = bx^{\frac{1}{r}}$, y adsorbierte Menge bei konstanter Temperatur, x Druck oder Konzentration, r zwischen 1 und 10).

Bei $-1 < a < 0$ fällt $y = x^a$, nach der x -Achse erhaben, ab, und zwar für $0 < x < 1$ unterhalb der gleichseitigen Hyperbel $y = \frac{1}{x}$, für $x > 1$ oberhalb. Für $x \rightarrow 0$ geht $y \rightarrow \infty$, und die y -Achse wird schärfer

asymptotisch angenähert als durch die Hyperbel. Für $x \rightarrow \infty$ geht $y \rightarrow 0$, und die x -Achse wird schwächer asymptotisch angenähert als durch die Hyperbel.

Bei $a < -1$ fällt $y = x^a$, nach der x -Achse erhaben, ab, und zwar für $0 < x < 1$ oberhalb der gleichseitigen Hyperbel $y = \frac{1}{x}$, für $x > 1$ unterhalb. Für $x \rightarrow 0$, $y \rightarrow \infty$ wird die y -Achse schwächer, für $x \rightarrow \infty$, $y \rightarrow 0$ die x -Achse schärfer asymptotisch angenähert als durch die Hyperbel

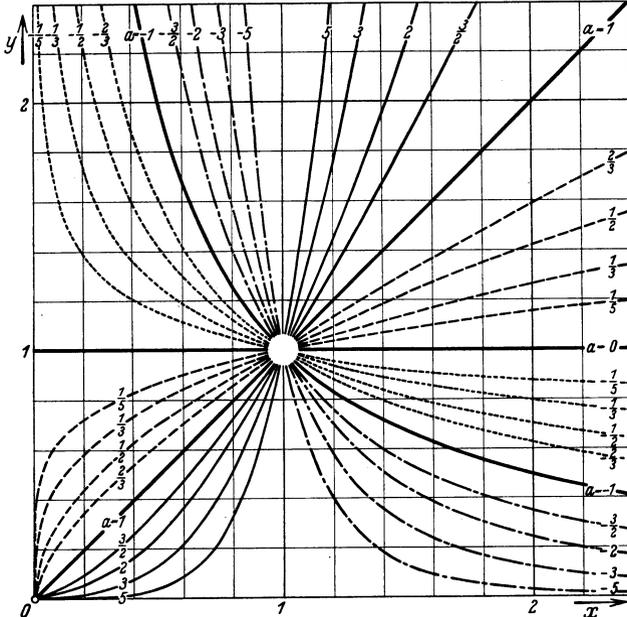


Abb. 3. Potenzen $y = x^a$.

(Beispiel: Adiabate $pV^\kappa = \text{konst}$, $p = \text{konst} \cdot V^{-\kappa}$ in der Thermodynamik, $\kappa = 1,4$ für Luft bei den gewöhnlichen Temperaturen; die Lage der Adiabate zur Hyperbel = Isotherme $pV = \text{konst}$ ist wichtig für die Aufzeichnung von Kreisprozessen).

Bei $a \rightarrow 0$ kommen die Kurven mit positivem und negativem a für alle endlichen $x > 0$ an die Waagerechte $y = 1$ heran. Bei $a \rightarrow +\infty$ nähern sich die Kurven mit positivem a zwischen $x = 0$ und $x = 1$ der x -Achse, bei $a \rightarrow -\infty$ die Kurven mit negativem a für $x > 1$.

2. Aufbau und Eigenschaften des Logarithmenpapiers.

a) Beschreibung des Logarithmenpapiers (Abb. 4). Exponentialpapier (halblogarithmisches Papier). Bei ihm ist die x -Achse gleichmäßig geteilt wie auf Millimeterpapier. Für den Abstand¹ $u \triangleq x$ in

¹ \triangleq bedeutet: „entspricht“, „entsprechend“.

cm vom Nullpunkt auf ihr gilt also (vgl. S. 19—20) mit dem Maßstabsfaktor¹ λ :

$$\text{Abstand } u \text{ cm} = \lambda \frac{\text{cm}}{\text{Dim}_x} \text{ mal } x [\text{Dim}_x].$$

Die y -Achse ist logarithmisch geteilt mit der Maßstabseinheit μ cm (trägt eine logarithmische y -Leiter, S. 20):

$$\text{Abstand } v \text{ cm} = \mu \text{ cm mal } \log y.$$

Der Anfangspunkt hat die Koordinaten $x = 0, y = 1$.

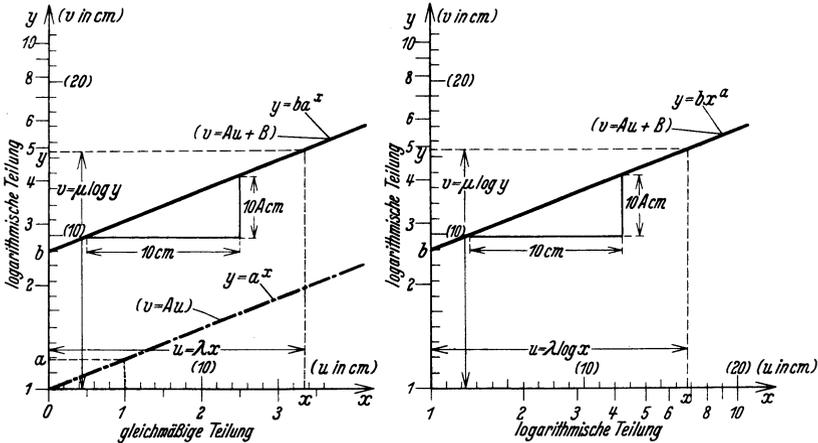


Abb. 4.
Logarithmenpapier.

Potenzpapier (ganzlogarithmisches Papier). Bei ihm sind beide Achsen logarithmisch geteilt:

$$\text{Abstand } u \text{ cm} = \lambda \text{ cm mal } \log x,$$

$$\text{Abstand } v \text{ cm} = \mu \text{ cm mal } \log y.$$

Im Anfangspunkte gilt $x = 1, y = 1$.

Nach diesen Regeln kann man sich erforderlichenfalls selbst Logarithmenpapier herstellen, z. B. in der Thermodynamik oder bei Adsorptionsuntersuchungen, wo oft die Maßstabseinheiten und Bereiche der käuflichen Papiere nicht passen. Man kann auch so verfahren, daß man auf Millimeterpapier nicht die Größen selbst, sondern ihre rechnerisch bestimmten Logarithmen aufträgt.

β) Gerade auf Logarithmenpapier. Bestimmung der Konstanten.

Auf halblogarithmischem Papier wird das Bild der Exponentialfunktion $y = ba^x$ geradlinig.

Auf ganzlogarithmischem Papier wird das Bild der Potenzfunktion $y = bx^a$ geradlinig.

(Daher die Namen Exponential- und Potenzpapier.) Denn eine Gerade

¹ Dim_x gibt die physikalische Dimension bzw. Einheit von x , z. B. Zeit (s), Masse (g) od. dgl.

hat in bezug auf das gleichmäßige Koordinatensystem der Abstände u cm und v cm die Gleichung

$$v = A u + B,$$

die sich je nachdem umrechnet:

Exponentialpapier:

$$\mu \log y = A \cdot \lambda x + B$$

oder $\boxed{y = b a^x}$

mit $b = 10^{\frac{B}{\mu}}$ und $a = 10^{\frac{A \lambda}{\mu}}$.

Potenzpapier:

$$\mu \log y = A \cdot \lambda \log x + B$$

oder $\boxed{y = b x^a}$

mit $b = 10^{\frac{B}{\mu}}$ und $a = \frac{A \lambda}{\mu}$.

Wie die Gleichungen und Abb. 4 zeigen, lassen sich bestimmen:

b am Schnittpunkt mit der y -Achse
an der y -Teilung ablesen

(die y -Achse ist die Senkrechte für

$$x = 0$$

$$x = 1$$

nicht notwendig der Rand des Papiers),

a entweder: Parallele $y = a^x$ durch den Punkt $x = 0, y = 1$ ziehen und an der Stelle $x = 1$ zugehörigen y -Wert ablesen, oder: mittels Steigungsdreiecks A bestimmen und

$$a = 10^{\frac{A \lambda}{\mu}} \text{ ausrechnen.}$$

a : mittels Steigungsdreiecks A bestimmen und $a = \frac{A \lambda}{\mu}$ ausrechnen.

Praktisch ist meist $\lambda = \mu$, also $a = A$.

Diese einfache zeichnerische Ermittlung der Konstanten a und b ist ein Hauptvorteil des Logarithmenpapiers. Der Fabrikant nimmt durch die Herstellung der verwickelten Teilungen auf den Achsen in vernünftiger Arbeitsteilung so viel Mühe auf sich, wie sich ein für allemal leisten läßt, so daß dem Benutzer für jeden Einzelfall hinsichtlich Zeichnung und Konstantenbestimmung nur das unbedingt Notwendige, und zwar in der einfachsten überhaupt erreichbaren Weise, zu tun übrig bleibt. (Ähnliches gilt übrigens für Hersteller und Benutzer von Nomogrammen und ist geradezu ein Grundgedanke der Nomographie, vgl. S. 18.)

Bei den Schreibweisen $y = b \cdot 10^{m x}$ und $y = b \cdot e^{n x}$ empfiehlt es sich, auf Exponentialpapier zwei y -Werte y_1 und y_2 vom Verhältnis $y_2 : y_1 = 10$ bzw. e aufzusuchen (z. B. $y_1 = 1, y_2 = 10$ bzw. $= e$). Sie sind um die Abszissenspanne $x_2 - x_1 = \frac{1}{m}$ bzw. $\frac{1}{n}$ voneinander entfernt.

Für die Gleichung $y = b x^{\frac{1}{r}}$ der Adsorptionsisotherme nach Boedeker und H. Freundlich (Abb. 5, vgl. auch S. 5) nimmt man bei $\lambda = \mu$ auf Potenzpapier ein Steigungsdreieck mit 10 cm senkrechter Kathete. Dann ist das waagerechte Stück 10 r cm lang. Jede Temperatur hat ihr eigentümliche r und b , so daß man für verschiedene Temperaturen verschiedene Geraden auf Potenzpapier erhält.

Ganz ungefährlich ist es, wenn einzelne Geradenteile aus der Zeichenfläche wegführen. Man ändert für sie lediglich die Bezifferung der

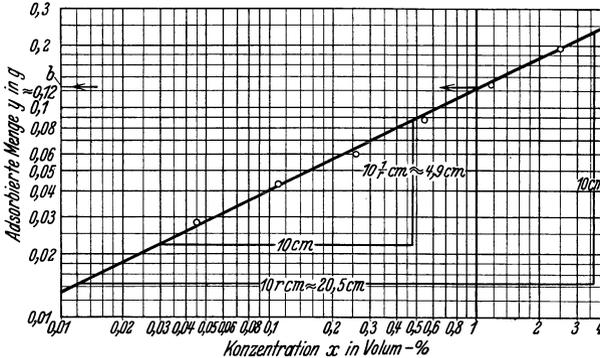


Abb. 5. Adsorption von Essigsäure an 1 g Tierkohle bei 17° C. Gleichung von Boedeker-Freundlich: $y = b x^{\frac{1}{r}}$. Abgelesen: $b \approx 0,12$ g, $\frac{1}{r} \approx 0,49$, $r \approx 2,05$.

logarithmischen Leitern um eine oder mehrere Zehnerpotenzen und erzielt dadurch eine Parallelverschiebung der Geraden, welche die hinausragenden Teile in den Zeichenraum bringt.

γ) Beispiele. Bei der Anwendung von Logarithmenpapier kommen hauptsächlich folgende Fragestellungen vor:

Entweder sind gegeben Versuchswerte x, y , für die man ein Exponential- oder Potenzgesetz vermutet. Man trägt die Werte in Logarithmenpapier ein, legt eine Ausgleichsgerade, die sich den gezeichneten Punkten möglichst gut anschmiegt, und bestimmt die Konstanten a und b (vgl. Abb. 5).

Oder es ist gegeben eine Exponential- oder Potenzfunktion. Aus a und b läßt sich die zugehörige Gerade zeichnen. Als Beispiele hierfür sind in Abb. 6 auf Exponentialpapier die Geraden $y = e^x$ und $y = e^{-x}$ für die natürliche Exponentialfunktion mit $e = 2,71828\dots$ gezeichnet und aus ihnen Doppelleitern für die Funktionen e^x am linken Rande und e^{-x} am rechten Rande hergeleitet (vgl. S. 19), während Abb. 7 die Ausstreckung der Potenzkurven aus Abb. 3 in Geraden auf Potenzpapier zeigt (brauchbare graphische Potenztafel).

Auf Millimeterpapier werden sowohl Exponentialkurven als auch Potenzkurven (wie sie z. B. mit nicht ganzen Exponenten als Polytropen

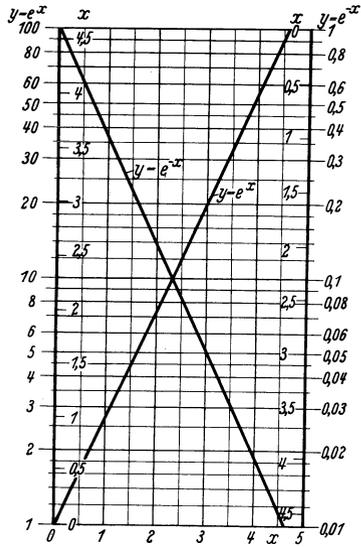


Abb. 6. Exponentialfunktionen $y = e^x$ und $y = e^{-x}$ auf Exponentialpapier. Doppelleitern für sie.

häufig in der Thermodynamik vorkommen) am bequemsten gezeichnet, indem man zuerst die Geraden auf Logarithmenpapier konstruiert und dann die Werte auf Millimeterpapier überträgt.

Kreisprozesse längs Isothermen und Adiabaten in der Thermodynamik haben auf Logarithmenpapier geradlinig begrenzte Bilder [R. Grammel: Die logarithmischen Diagramme in der Thermodynamik der Gase. Ing.-Arch. 2, 353—358 (1932)].

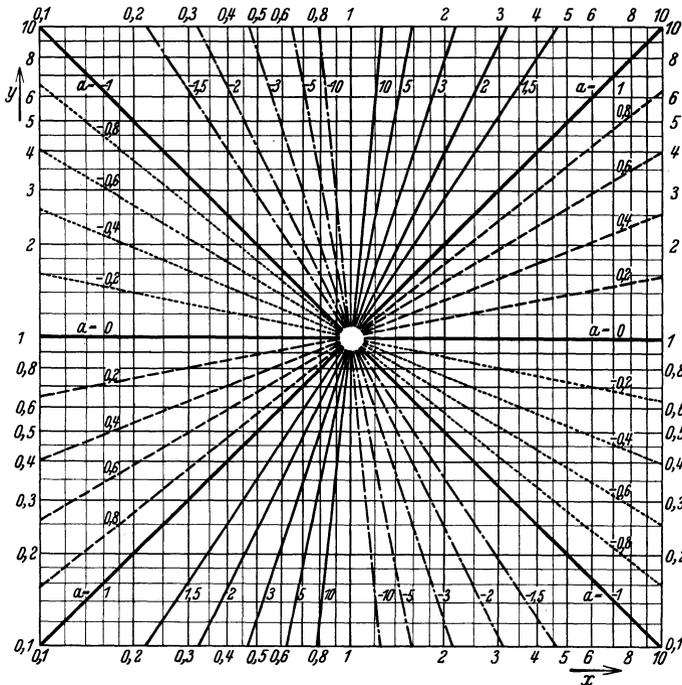


Abb. 7. Potenzen $y = x^a$ auf Potenzpapier. Graphische Potenztafel.

Für die exponentielle Annäherung an einen Grenzwert $y = Y - be^{-kx}$ muß man sich zunächst irgendwoher den Grenzwert Y von y für $x \rightarrow \infty$ verschaffen. Dann ist der Unterschied $Y - y$ die Exponentialfunktion be^{-kx} , wird also auf Exponentialpapier als gerade Linie dargestellt.

d) **Addieren oder Subtrahieren von Strecken und von y -Werten auf Logarithmenpapier. Potenz- und Exponentialsummen. Gleichungslösen.** Das Addieren oder Subtrahieren von y -parallelen Strecken auf Logarithmenpapier addiert oder subtrahiert Logarithmen, ermöglicht also bequemes Multiplizieren oder Dividieren der y -Werte. Wichtiger Sonderfall: Bereichsvergrößerung; Verschieben um ganze logarithmische Einheiten bedeutet Multiplikation mit Zehnerpotenzen, vgl. Schluß von β).

Addieren oder Subtrahieren der y -Werte selbst kann nicht ohne weiteres geometrisch auf Logarithmenpapier durchgeführt werden; man muß vielmehr die y ablesen, addieren oder subtrahieren und dann

erst wieder auf Logarithmenpapier gehen. So zeichnet man z. B. Potenzsummen

$$y = Ax^a + Bx^b + Cx^c + \dots$$

(für nichtnegative ganzzahlige a, b, c, \dots Polynome oder ganze rationale Funktionen genannt), indem man für positives x zunächst die Geraden für die einzelnen Bestandteile $|A|x^a, |B|x^b, |C|x^c, \dots$ mit den Absolutwerten $|A|, |B|, |C|, \dots$ der Vorzahlen A, B, C, \dots ohne Rücksicht aufs Vorzeichen konstruiert¹. Dann fügt man die Bestandteile mit positiven Vorzahlen zu einer Kurve y_1 zusammen und die Bestandteile mit negativen Vorzahlen — diese entgegengesetzt genommen — zu einer zweiten Kurve y_2 . Der Wert von y ist dann für jedes x leicht durch $y_1 - y_2$ oder $y_2 - y_1$ bestimmbar (Abb. 8). Insbesondere werden die Nullstellen von y (die Wurzeln der Gleichung $Ax^a + Bx^b + Cx^c + \dots = 0$) als die x der Schnittpunkte zwischen den Kurven y_1 und y_2 gefunden. Für dieses zeichnerische Gleichungslösen kann es zur Erzielung guter Schnitte vorteilhaft sein, die Gleichung zunächst durch eine geeignete Potenz von x zu dividieren. Bei ganzzahligen Exponenten a, b, c, \dots

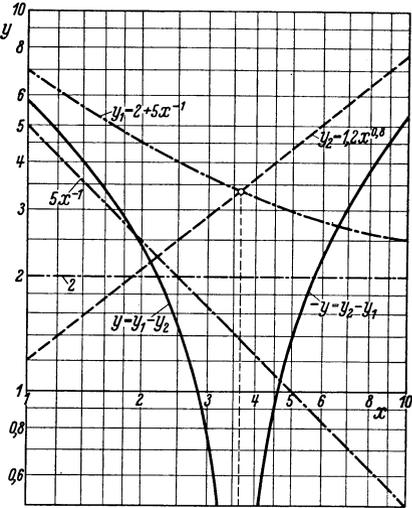


Abb. 8.
Potenzsumme $y = 2 + 5x^{-1} - 1,2x^{0,8}$
und Lösen der Gleichung
 $2 + 5x^{-1} - 1,2x^{0,8} = 0$
auf Logarithmenpapier, Wurzel $x \approx 3,6$.

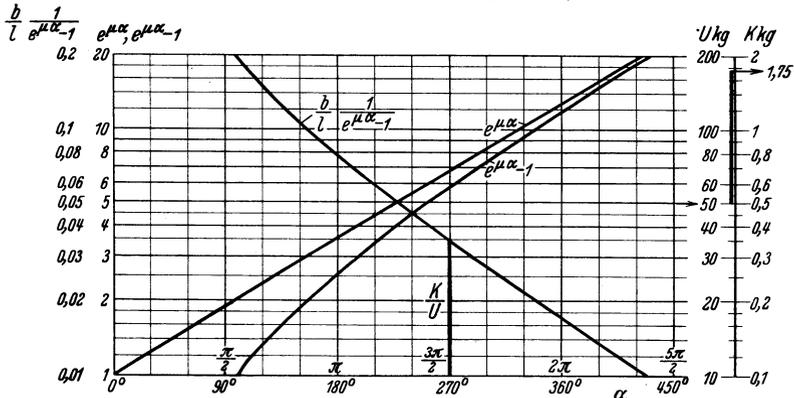


Abb. 9. Bandbremse: $K = U \frac{b}{l} \frac{1}{e^{\mu\alpha} - 1}$, wobei K Bremskraft, U Umfangskraft, $\frac{b}{l} = 0,2$
Hebelverhältnis, $\mu = 0,4$ Reibungsziffer, α Umschlingungswinkel.
Beispiel: $\alpha = 270^\circ, U = 50 \text{ kg}, K \approx 1,75 \text{ kg}$.

¹ Durch || wird der Absolutwert angedeutet.

läßt sich y auch für negative $x = -\xi$, wobei $\xi > 0$ ist, als $y = (-1)^a A \xi^a + (-1)^b B \xi^b + (-1)^c C \xi^c + \dots$ auf Potenzpapier untersuchen. — Exponentialsummen $b_1 e^{m_1 x} + b_2 e^{m_2 x} + \dots$ treten zuweilen als Näherungsausdrücke in empirischen Formeln auf und sind durch Zusammenfügen der einzelnen geradlinig auf Exponentialpapier gezeichneten Bestandteile zu bezwingen, z. B. der hyperbolische Sinus $\text{Sin } x = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$ und der hyperbolische Kosinus $\text{Cos } x = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$. Bei der Bandbremse spielen die Differenz $e^{\mu \alpha} - 1$ und ihr Kehrwert eine Rolle (Abb. 9, μ Reibungsziffer, α Umschlingungswinkel; vgl. Hütte I, S. 287).

ε) **Andere Funktionspapiere.** Ähnlich dem Logarithmenpapier kann man sich für Sonderbedarf auch andere Funktionspapiere herstellen oder käuflich erwerben, z. B. Reziprokpapier, indem man $\frac{1}{x}$ aufträgt und nach x beziffert, Quadratpapier usw.

3. Dreieckspapier.

α) $x + y = \text{konst}$, dargestellt auf einer Strecke. Binäres Gemisch. Die durch einen Punkt P erzeugten Abschnitte x und y einer festen Strecke von der Länge l (Abb. 10) ergänzen sich zu l in ähnlicher Weise

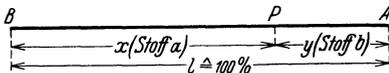


Abb. 10. Binäres Gemisch, dargestellt auf einer Strecke.

wie in einem „binären“ Gemisch aus zwei Stoffen a und b (Zweistoffsystem, Lösung eines Stoffes in einem anderen) die Prozentanteile von a und b zu 100%. Der linke Endpunkt B mit $x = 0$ gibt den Stoff b selbst, der rechte Endpunkt A mit $y = 0$ gibt a . Die Zwischenpunkte P stellen sämtliche möglichen Mischungen $p = ax + by$ mit den Prozentanteilen x und y der Stoffe a und b dar, wenn $l \triangleq 100\%$ gesetzt wird. Zu P kann man als Ordinate eine dem Gemisch zugehörige Größe u wie Schmelztemperatur od. dgl. auftragen und erhält dadurch ein Kurvenschaubild für u über der Strecke (vgl. Abb. 14). Am bekanntesten hierfür ist wohl das Eisen-Kohlenstoffdiagramm [W. Mathesius: Die physikalischen und chemischen Grundlagen des Eisenhüttenwesens. Leipzig: Otto Spamer 1916. — J. Eggert: Lehrbuch der physikalischen Chemie, 2. Aufl. Leipzig: S. Hirzel 1929].

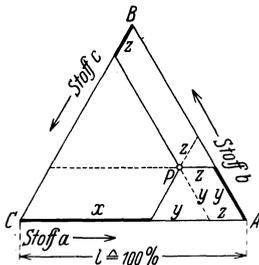


Abb. 11. Ternäres Gemisch, dargestellt in einem gleichseitigen Dreieck.

β) $x + y + z = \text{konst}$, dargestellt in einem gleichseitigen Dreieck. Ternäres Gemisch. Auf „ternäre“ Gemische (Dreistoffsysteme, Lösungen von zwei Stoffen in einem dritten) wird die Darstellung binärer Gemische durch die Punkte einer Strecke verallgemeinert durch das gleichseitige Dreieck. Die Abstände x, y, z eines Punktes P im Innern eines gleichseitigen Dreiecks mit der Seite l , wie in Abb. 11 gemessen und auf dem käuflichen gedruckten Dreieckspapier bequem ablesbar (Abb. 12), haben ersichtlich die Summe l entsprechend wie in einem ternären Gemisch aus drei

Stoffen a, b, c die Prozentanteile von a, b, c die Summe 100%. Der Punkt P verkörpert also bei $l \cong 100\%$ das Gemisch $p = ax + by + cz$ mit den Prozentanteilen x, y, z von a, b, c . Auf der unteren Dreiecksseite ist $y = 0$; auf ihr als Darstellungsstrecke findet man deshalb die binären Gemische aus a und c , entsprechend auf der rechten Dreiecksseite mit $z = 0$ die binären Gemische aus b und a , auf der linken Dreiecksseite mit $x = 0$ die binären Gemische aus c und b . Die drei Eckpunkte C, A, B des Dreiecks sind den Stoffen c, a, b selbst zugeordnet.

γ) **Darstellung einer dem ternären Gemisch zugeordneten Größe.** Eine Größe u für das ternäre Gemisch, z. B. die Schmelztemperatur, wird, indem man sie in P als Höhe senkrecht zur Dreiecksebene aufträgt, dargestellt durch eine Fläche über dem Dreieck (Abb. 13). Deren Schnittkurven $u = \text{konst}$ mit Ebenen parallel zur Dreiecksebene, die sog. Höhenlinien, kann man ins Dreieck einzeichnen und erhält dadurch eine Kurventafel für u (Abb. 14). An die Dreiecksseiten schließt man oft die Kurven für die binären Gemische an; sie entstehen geometrisch, wenn man die Schnittkurven (Abb. 13, 14) der u -Fläche mit Ebenen, die senkrecht zur Dreiecksebene stehen und durch die Dreiecksseiten laufen, in die Dreiecksebene umklappt. Wenn es sich um Schmelztemperaturen handelt, sind die tiefsten Punkte der Schnittkurven die „eutektischen Punkte“ der binären Gemische, und der tiefste Punkt E der u -Fläche ist der eutektische Punkt des ternären Gemisches.

Durch eine einzelne ausgezeichnete Kurve $u = \text{konst}$ oder eine anderweitig eingetragene Linie wird oft ein besonders interessierendes Gebiet eingegrenzt, z. B. für Leichtflüssigkeit im Dreistoffsystem ($\text{Al}_2\text{O}_3, \text{SiO}_2, \text{Basen}$) der Hochofenschlacke, für Erhärtungsdauer beim Beton (Zement, Sand, Kies oder auch $\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{SiO}_2$), für Durchschlagsfestigkeit beim Porzellan (Kaolin, Quarz, Feldspat) usw. Auch wirtschaftliche Fragen lassen sich behandeln. Sind α, β, γ die Preise der Einheitsmengen von a, b, c , so kostet das Gemisch $p = ax + by + cz$ mit den Prozentanteilen x, y, z der drei Stoffe $u = \text{konst} \cdot (\alpha x + \beta y + \gamma z)$. Dieser Preis u wird dargestellt durch eine Ebene, die durch drei Punkte in Höhen proportional γ, α, β über C, A, B läuft. Ihre Höhenlinien konstanten Preises sind Geraden.

Mißt man die Abstände in logarithmischem Maßstab, so erfüllen die Koordinaten x, y, z des Punktes P die Gleichung $x \cdot y \cdot z = \text{konst.}$

δ) **Mischung von zwei Ausgangsgemischen. Gerade auf Dreieckspapier.** Außer zur Veranschaulichung läßt sich das Dreieckspapier mit großem Vorteil auch zur graphischen Mischungsberechnung verwenden.

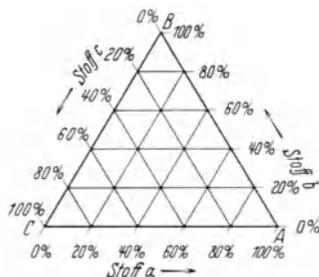


Abb. 12. Netz und Teilstriche bei Dreieckspapier.

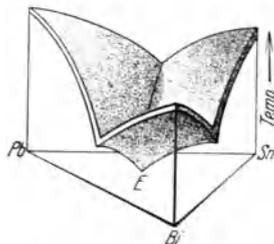


Abb. 13. Schmelztemperaturfläche des ternären Gemisches Zinn-Blei-Wismut.

Gegeben und auf Dreieckspapier dargestellt seien zwei ternäre Ausgangsgemische, z. B. zwei Mischsäuren aus Schwefelsäure, Salpetersäure und Wasser. Man soll aus ihnen ein vorgeschriebenes Endgemisch herstellen, z. B. eine gegebene Mischsäure mit der anderen zu einer gewünschten Mischsäure verdünnen oder wiederbeleben [Berl-Lunge: Chemisch-technische Untersuchungsmethoden, Bd. 2/I, 8. Aufl. Berlin: Julius Springer 1932. — E. Berl, W. Herbert, W. Wahlig: Nomographische

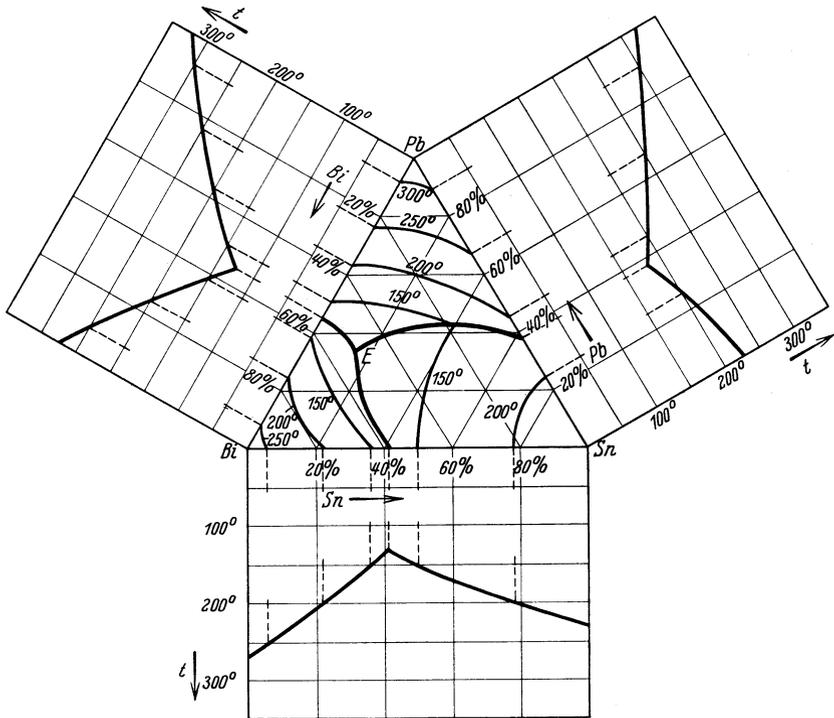


Abb. 14. Schmelztemperaturfläche des ternären Gemischs Zinn-Blei-Wismut, dargestellt durch Höhenlinien. Schmelztemperaturkurven der binären Teilgemische.

Tafeln für die chemische Industrie. Berlin: Julius Springer 1930]. Es sei das

- Ausgangsgemisch p_1 dargestellt durch den Punkt $P_1(x_1, y_1, z_1)$
- Ausgangsgemisch p_2 „ „ „ „ $P_2(x_2, y_2, z_2)$
- Endgemisch p „ „ „ „ $P(x, y, z)$,

und zwar liege P auf der Verbindungsstrecke $P_1 P_2$ und teile sie im Verhältnis $\lambda : (1 - \lambda)$, z. B. $\frac{1}{3} : \frac{2}{3}$. Aus Abb. 15 liest man ab:

$$\frac{\lambda}{1 - \lambda} = \frac{x - x_1}{x_2 - x} = \frac{y - y_1}{y_2 - y} = \frac{z_1 - z}{z - z_2}$$

also

$$\left. \begin{aligned} x &= (1 - \lambda) x_1 + \lambda x_2 \\ y &= (1 - \lambda) y_1 + \lambda y_2 \\ z &= (1 - \lambda) z_1 + \lambda z_2 \end{aligned} \right\}$$

kurz zusammengefaßt:

$$\begin{aligned} p &= (1 - \lambda) p_1 + \lambda p_2 \text{ oder} \\ p &= \frac{P P_2}{P_1 P_2} p_1 + \frac{P P_1}{P_1 P_2} p_2. \end{aligned}$$

Das Endgemisch p entsteht dadurch, daß man die Ausgangsgemische p_1 und p_2 im umgekehrten Verhältnis der Abstände des Bildpunktes P von den Bildpunkten P_1 und P_2 zusammenschichtet. (Übrigens folgt durch Addition, wie es sein muß, $x + y + z = l$.)

Wandert P von P_1 nach P_2 , so nimmt λ : $(1 - \lambda)$ alle Werte von 0 bis ∞ an. Die Punkte P der Verbindungsstrecke $P_1 P_2$ geben also alle aus p_1 und p_2 möglichen Mischungen.

Wenn umgekehrt ein Gemisch p aus p_1 und p_2 herstellbar sein soll, muß sein Bildpunkt P auf $P_1 P_2$ liegen. Praktisch hat man nur P_1 , P_2 und P auf Dreieckspapier einzutragen, zu prüfen, daß P auf $P_1 P_2$ liegt, und durch Abmessen die Verhältnisse

$\frac{P P_1}{P_1 P_2}$ und $\frac{P P_2}{P_1 P_2}$ zu bilden. Sie sind die

von p_2 und p_1 für p nötigen Anteile, wobei $P P_1$ dem „fernen“ Gemisch p_2 (mit Bildpunkt P_2 nicht auf $P P_1$) und $P P_2$ dem „fernen“ Gemisch p_1 zugeordnet ist, und liefern mit der Menge des gesuchten Endgemisches p multipliziert die Mengen von p_1 und p_2 , die man nehmen muß, um die gewünschte Menge von p zu erhalten.

Rein zeichnerische Lösung nach Proportionensätzen: man überträgt durch Parallelen die durch P bewirkte Einteilung der Strecke $P_1 P_2$ auf eine — am bequemsten in P_1 oder P_2 angesetzte — Strecke, deren Länge der gewünschten Menge von p entspricht; diese Strecke wird dann entsprechend den Mengen von p_1 und p_2 geteilt.

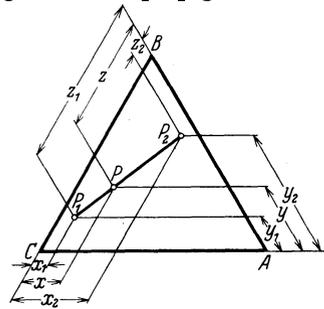


Abb. 15. Mischung von zwei Ausgangsgemischen.

Elimination von λ gibt die lineare Beziehung $y = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} x + \frac{x_2 y_1 - x_1 y_2}{x_2 - x_1}$ zwischen x und y als Gleichung der Geraden durch P_1 und P_2 . Den Punkten P der Geraden außerhalb der Strecke $P_1 P_2$ entsprechen negative λ . Zur Herstellung der zugehörigen Endgemische p müßte man aus dem Ausgangsgemisch p_1 das Ausgangsgemisch p_2 teilweise entfernen können oder umgekehrt p_1 aus p_2 .

Für Mischung von zwei binären Ausgangsgemischen vgl. O. Liesche [Nomogramme 4 und 5 für die Praxis der chemischen Fabrik. Chem. Fabrik 1, 314—315 (1928)] und E. Berl, W. Herbert, W. Wahlig [Graphische Mischungsrechnung für Mischungen aus zwei Komponenten, Anlage zu Berl-Lunge: Chemisch-technische Untersuchungsmethoden, Bd. 1. Berlin: Julius Springer 1931].

ε) Mischung von drei Ausgangsgemischen. Um ein Endgemisch p gewinnen zu können, dessen Bildpunkt P nicht auf der Verbindungsstrecke $P_1 P_2$ gelegen ist, genügen die beiden Ausgangsgemische p_1 und p_2 nicht. Man muß vielmehr noch ein drittes Ausgangsgemisch p_3 zur

Verfügung haben, dessen Bildpunkt P_3 ein Dreieck mit P_1 und P_2 bildet derart, daß P ins Dreiecksinnere fällt (Abb. 16). Man verschafft sich zunächst aus p_1 und p_2 das Zwischengemisch q mit Bildpunkt Q , der auf $P_1 P_2$ durch die Verbindungslinie $P_3 P$ eingeschritten wird:

$$q = \frac{Q P_2}{P_1 P_2} p_1 + \frac{Q P_1}{P_1 P_2} p_2.$$

Aus q und p_3 ist p herstellbar, weil sich der Bildpunkt P auf der Verbindungsstrecke $P_3 Q$ befindet:

$$p = \frac{P P_3}{P_3 Q} q + \frac{P Q}{P_3 Q} p_3,$$

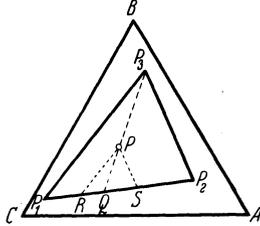


Abb. 16. Mischung von drei Ausgangsgemischen. Erste Vorgehensart.

also bei Einsetzen der Aufbaugleichung von q aus p_1 und p_2 :

$$p = \frac{P P_3}{P_3 Q} \frac{Q P_2}{P_1 P_2} p_1 + \frac{P P_3}{P_3 Q} \frac{Q P_1}{P_1 P_2} p_2 + \frac{P Q}{P_3 Q} p_3.$$

Nun gilt, wenn man durch P Parallelen PR zu $P_3 P_1$ und PS zu $P_3 P_2$ zieht:

$$\frac{P P_3}{P_3 Q} = \frac{S P_2}{Q P_2} \text{ (als Faktor von } p_1) = \frac{R P_1}{Q P_1} \text{ (als Faktor von } p_2),$$

$$\text{weiter } \frac{P Q}{P_3 Q} = \frac{R Q}{P_1 Q} = \frac{Q S}{Q P_2} = \frac{R S}{P_1 P_2}$$

[das letzte, weil aus $RQ = \mu \cdot P_1 Q$ und $QS = \mu \cdot Q P_2$ folgt $RQ + QS = \mu (P_1 Q + Q P_2) = \mu \cdot P_1 P_2$]. So entsteht schließlich

$$p = \frac{S P_2}{P_1 P_2} p_1 + \frac{R P_1}{P_1 P_2} p_2 + \frac{R S}{P_1 P_2} p_3.$$

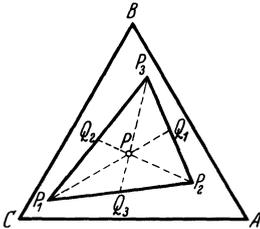


Abb. 17. Mischung von drei Ausgangsgemischen. Zweite Vorgehensart.

Man braucht also nur die Ausgangsgemische p_1, p_2, p_3 und das Endgemisch p auf Dreieckspapier darzustellen und durch den Bildpunkt P von p Parallelen zu zwei Seiten des Dreiecks der Ausgangsgemisch-Bildpunkte zu ziehen. Sie schneiden auf der dritten Dreiecksseite drei Abschnitte ein, die im Verhältnis zur ganzen Dreiecksseite jedesmal den für das Endgemisch erforderlichen Anteil des „fernen“ Ausgangsgemisches liefern.

Wir haben Parallelen zu $P_3 P_1$ und $P_3 P_2$ und als dritte Dreiecksseite $P_1 P_2$ genommen. Weitere Auswahlen ermöglichen wertvolle Proben. Die von p_1, p_2, p_3 erforderlichen Mengen, um eine vorgeschriebene Menge von p zu erhalten, ergeben sich rein zeichnerisch, indem man die Einteilung von $P_1 P_2$ durch R und S durch Parallelen auf eine Strecke entsprechend der Menge von p überträgt.

Das Parallelenziehen wird ganz vermieden und ein symmetrischer Aufbau erzielt, wenn man aus $p = \frac{P P_3}{P_3 Q} q + \frac{P Q}{P_3 Q} p_3$ unter Bezeichnung von Q mit Q_3 durch Analogie schließt (Abb. 17):

$$p = \frac{P Q_1}{P_1 Q_1} p_1 + \frac{P Q_2}{P_2 Q_2} p_2 + \frac{P Q_3}{P_3 Q_3} p_3.$$

Die Anteile sind die Verhältnisse des „unteren“ Abschnittes auf den „Ecktransversalen“ von P nach P_1, P_2, P_3 zur ganzen Ecktransversale. Ihre Summe ist, wie man als geometrisch interessant nachprüfen kann, wirklich 1.

Das geschilderte graphische Verfahren, bei dem die letzte Anordnung vielleicht die praktisch bequemste ist, ersetzt z. B. das umständliche rechnerische Vorgehen bei der Hochofen-Möllerberechnung [E. Berl, W. Herbert, W. Wahlig: a. a. O.]. Die Ausgangsgemische sind hierbei drei Schlackenbildner, und man findet zunächst deren Mengenanteile. Wenn die Schlackenbildner aus Erzen herrühren, in denen sie als Bestandteile darinstecken, müssen durch eine einfache Verhältnisrechnung noch die nötigen Mengen Erz festgestellt werden.

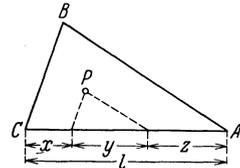


Abb. 18. Allgemeines Dreieckspapier.

§) Allgemeines Dreieckspapier. Das Ergebnis über die Mischung von drei Ausgangsgemischen läßt sich auch so aussprechen (Abb. 18): Die Punkte P im Innern eines beliebigen Dreiecks CAB veranschaulichen die sämtlichen möglichen Mischungen $p = ax + by + cz$ aus drei Stoffen a, b, c , wobei die Prozentanteile x, y, z auf der Dreiecksseite $CA = l$ durch Parallelen zu den Dreiecksseiten BC und BA eingeschnitten werden und $x + y + z = l \hat{=} 100\%$ ist. Offenbar hat man hiermit eine Verallgemeinerung der Eigenschaft des gleichseitigen Dreiecks S. 12–13 auf ein beliebiges Dreieck.

Will man x, y, z bei einem beliebigen Dreieck Abb. 19 entsprechend messen wie bei dem gleichseitigen Dreieck Abb. 11, so sind $\frac{x}{l}, \frac{y}{m}, \frac{z}{n}$ die Anteile von a, b, c für das Gemisch

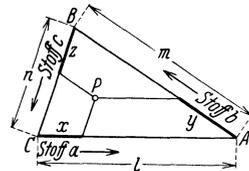


Abb. 19. Allgemeines Dreieckspapier, andere Anordnung.

$$p = a \frac{x}{l} + b \frac{y}{m} + c \frac{z}{n} \text{ zum Bildpunkte } P \text{ mit } \frac{x}{l} + \frac{y}{m} + \frac{z}{n} = 1.$$

Am bequemsten trägt man sogleich die Verhältnisse $\frac{x}{l}, \frac{y}{m}, \frac{z}{n}$ als Bezifferung auf den Dreiecksseiten CA, AB, BC auf. Dann läßt sich mit einem beliebigen Dreieck genau so arbeiten wie mit einem gleichseitigen Dreieck. Im beliebigen Dreieck gewinnt man in gewissen Grenzen größere Maßstabsfreiheit, kann z. B. bei logarithmischen Maßstäben besonders günstig die Beziehung $x^\alpha y^\beta z^\gamma = \text{konst}$ darstellen.

Die Untersuchungen über Mischung von drei Ausgangsgemischen und über allgemeines Dreieckspapier stehen in engem Zusammenhang mit dem „baryzentrischen Kalkül“ von Moebius und den „Dreieckskoordinaten“ der höheren analytischen Geometrie. Für Verallgemeinerungen des Dreieckspapiers auf den Raum vgl. z. B. E. Jänecke [Gesättigte Salzlösungen vom Standpunkte der Phasenlehre. Halle: Wilhelm Knapp 1908].

II. Nomographie.

Nomographie ist die Lehre von graphischen Rechentafeln (Nomogrammen), bei denen es weniger auf Veranschaulichung, sondern mehr darauf ankommt, möglichst bequem, möglichst genau und möglichst schnell Zahlenwerte zu entnehmen („gezeichnete Rechenmaschine“). Nomogramme für Funktionen einer einzigen unabhängigen Veränderlichen sind die Funktionsleitern. Gegeneinander verschiebbare Funktionsleitern geben den gewöhnlichen Rechenschieber und die Sonderrechenschieber. Auch die Lehre vom Logarithmenpapier (S. 6—12) wird oft zur Nomographie gezählt. Das eigentliche Wesen dieses zunächst in Frankreich [M. d'Œcagne: *Traité de nomographie*, 2. Aufl. Paris: Gauthier-Villars 1921; R. Seco de la Garza: *Les nomogrammes de l'ingenieur*. Paris: Gauthier-Villars 1912; R. Soreau: *Nomographie ou traité des abaques*. Paris: E. Chiron 1921] entwickelten, erst nach dem Kriege auch in Deutschland vorgedrungenen Teilgebietes der praktischen Mathematik, dessen Bedeutung und Wert für den Praktiker kaum hoch genug eingeschätzt werden kann, tritt aber erst für Funktionen von mehreren Veränderlichen bei den Netztafeln und Leitertafeln voll zutage. Naturwissenschaftler und Ingenieure können sich viele Rechnungen und Dimensionierungen durch Nomogramme unglaublich erleichtern und übersichtlich gestalten. In den letzten Jahren sind für diesen Zweck zahlreiche Anleitungen zur Nomogrammerstellung und Sammlungen gebrauchsfertiger Nomogramme erschienen [P. Luckey: *Einführung in die Nomographie*; *Nomographie*, Math.-Phys. Bibl., Bd. 28 u. 59/60, 2. Aufl. Leipzig u. Berlin: B. G. Teubner 1925 und 1927. — H. Schwerdt: *Einführung in die praktische Nomographie*, Ma-Na-Te Bibl., Bd. 6. Berlin: Otto Salle 1927; *Lehrbuch der Nomographie*. Berlin: Julius Springer 1924; *Die Anwendung der Nomographie in der Mathematik*. Berlin: Julius Springer 1931. — H. Schwerdt, W. Gütschow, I. Runge, F. Wolf: *Graphisches Rechnen*. RKW-Veröff. 23. Berlin: Beuth-Verlag 1928. — M. Pirani, I. Runge: *Graphische Darstellung in Wissenschaft und Technik*, 2. Aufl. Sammlung Göschen 728. — E. Berl, W. Herbert, W. Wahlig: *Nomographische Tafeln für die chemische Industrie*. Berlin: Julius Springer 1930. — O. Liesche: *Rechenverfahren und Rechenhilfsmittel mit Anwendungen auf die analytische Chemie*. Die chemische Analyse, Bd. 30. Stuttgart: Ferdinand Enke 1932; *Chemische Nomogramme*. Berlin: Verlag Chemie 1929; *Nomographie*. Chem. Fabrik 1, 161—164, 228—230, 241—243, 359—361, 392—394, 450—451, 463—465, 583—584, 595—597, 621—623 (1928); *Nomogramme für die Praxis der chemischen Fabrik*. Chem. Fabrik 1, 264—265, 280—281, 296—297, 314—315, 377, 478, 490—492, 531 (1928); 2, 124—125, 170 bis 171, 279—280, 305—306, 373—374, 391, 437—438 (1929); 3, 150 (1930); 4, 122 (1931). — R. Kempf: *Nomogramme für die Praxis der chemischen Fabrik*. Chem. Fabrik 1, 560—561 (1928). — P. Leybold: *Eine graphische Rechentafel für direkte Prozentumrechnungen*. Chem. Fabrik 2, 401—402 (1929). — J. Schmidt: *Über eine Rechenhilfe für die Gasanalyse*. Chem. Fabrik 4, 137—138 (1931). — W. Schreiber:

Nomogramme für die Praxis der chemischen Fabrik. Chem. Fabrik 4, 495 (1931); 5, 3—4, 12 (1932)].

1. Funktionsleitern.

a) Begriff und Herstellung einer Funktionsleiter. Von der geläufigen Darstellung einer Funktion¹ $y = f(x)$ durch eine Kurve im rechtwinkligen xy -Koordinatensystem mit den Maßstabseinheiten λ cm für x und μ cm für y (bzw. Maßstabsfaktoren $\lambda \frac{\text{cm}}{\text{Dim}_x}$ und $\mu \frac{\text{cm}}{\text{Dim}_y}$, vgl. S. 7 und 45) kommt man nach Abb. 20 zur Darstellung durch eine Funktionsleiter

oder Funktionsskala, indem man von Kurvenpunkten für gleichabständige x waagrecht nach der y -Achse geht und an die eingeschnittenen Punkte die betreffenden x daranschreibt. Zu der schon vorhandenen gleichmäßigen y -Teilung auf der y -Achse tritt auf diese Weise eine im allgemeinen ungleichmäßige x -Teilung, die gestattet, neben x sofort das zugehörige y abzulesen. Man spricht von einer Doppelleiter oder Doppelskala für x und y auf der y -Achse als Träger. Ein Beispiel aus dem täglichen Leben ist das Thermometer mit Celsius- und Reaumurskala.

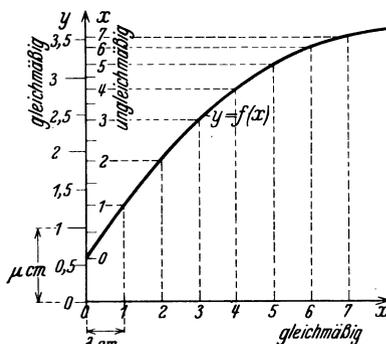


Abb. 20. Funktionsleiter, gewonnen aus Kurvendarstellung.

Die x -Achse und die Kurve $y = f(x)$ können ganz fortgelassen werden. Wenn man auch die gleichmäßige y -Teilung wegnimmt, bleibt nur die ungleichmäßige x -Teilung übrig. Das wechselnde mehr oder weniger Zusammengedrängtsein ihrer Punkte spiegelt den Verlauf der Funktion $y = f(x)$ wider, deshalb: Funktionsleiter oder Funktionsskala für $y = f(x)$. Die gleichmäßige x -Leiter auf der x -Achse wird durch die Funktion $y = f(x)$ in die ungleichmäßige x -Leiter auf der y -Achse „abgebildet“ oder „verzerrt“.

Will man an der Funktionsleiter die Werte $y = f(x)$ ablesen, so muß man beim Fortlöschern der gleichmäßigen y -Teilung die Maßstabseinheit μ cm für y im Sinne behalten. Dann braucht man nur von einem x -Werte mit bekanntem y aus, z. B. von $x = 0$ mit $y = y_0$ aus, mit dem Maßstab abzumessen, wievielmals μ cm in der Entfernung bis zu dem gerade interessierenden x enthalten sind: diese Zahl zum bekannten y_0 hinzugefügt, gibt das gesuchte $y = f(x)$. Umgekehrt stellt man so eine Funktionsleiter ohne den Umweg über die Kurvendarstellung her: man trägt mit einer passenden Maßstabseinheit μ cm, genauer einem Maßstabsfaktor $\mu \frac{\text{cm}}{\text{Dim } f(x)}$ auf einer Geraden als Träger die Abstände

¹ Zum Begriff der Funktion vgl. z. B. A. Walther: Einführung in die mathematische Behandlung naturwissenschaftlicher Fragen. Berlin: Julius Springer 1928.

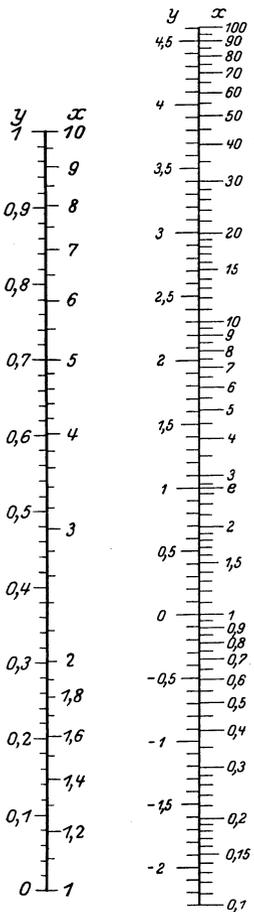


Abb. 21. Logarithmische Doppelleiter $y = \log x$.
 Abb. 22. Doppelleiter für den natürlichen Logarithmus $y = \ln x$.

v in cm = $\mu \frac{\text{cm}}{\text{Dim } f(x)}$ mal $f(x)$ [Dim $f(x)$]
 auf und schreibt die x -Werte daran (bezfiziert nach x).

β) Beispiele, insbesondere logarithmische Leiter.

- Gleichmäßige Leiter $v = \mu x$,
- quadratische Leiter $v = \mu x^2$,
- logarithmische Leiter $v = \mu \log x$

für den Zehnerlogarithmus. In Abb. 21 für die logarithmische Leiter mit $\mu = 10$ cm kommt z. B. $x = 2$ in den Abstand $10 \text{ cm} \cdot \log 2 \approx 3,01$ cm vom Anfangspunkte 1 mit $\log 1 = 0$, ferner $x = 3$ in den Abstand $10 \text{ cm} \cdot \log 3 \approx 4,77$ cm, schließlich $x = 10$ in den Abstand $10 \text{ cm} \cdot \log 10 = 10$ cm. Beim gewöhnlichen Rechenschieber ist für die obere Körper- und obere Zungenskala v in cm = $12,5 \text{ cm} \cdot \log x$ und für die untere Körper- und untere Zungenskala v in cm = $25 \text{ cm} \cdot \log x$. Übrigens stehen an den Zehnteln von μ näherungsweise die Zahlen 1; 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,2; 4; 5; 6,4; 8; 10, die je etwa um 25% zunehmen; danach kann auf kariertem Papier die logarithmische Leiter leicht skizziert werden. Sie ist grundlegend für das Logarithmenpapier (S. 6—7) und für den Rechenschieber (S. 24—25). In Abb. 22 ist die Doppelleiter für den natürlichen Logarithmus zu sehen.

Namentlich die logarithmische Leiter braucht man praktisch, z. B. für Nomogramme (S. 33—38), mit den verschiedensten Maßstabseinheiten. Die Maßstabänderung kann zeichnerisch nach Abb. 23 geschehen: ist μ cm die Maßstabseinheit auf der Ausgangsleiter im Abstände a vom Projektionszentrum C , so beträgt sie auf der parallelen Leiter im Abstände b nach Proportionsätzen $\frac{b}{a} \mu$ cm.

γ) Projektive Leiter. Das Projizieren auf eine parallele Gerade nach Abb. 23 ist ein Sonderfall des Projizierens auf eine beliebig gelegene Gerade. Es führt zu einer zur Ausgangsleiter projektiven Leiter. In den Anwendungen kommt am häufigsten die gewöhnliche projektive Leiter v in cm = $\mu \text{ cm} \cdot \frac{ax + b}{cx + d}$ der gebrochen linearen Funktion $y = \frac{ax + b}{cx + d}$ vor, weil manche empirische Formeln diesen Typus haben, so die Umrechnungsgleichung $d = \frac{144,3}{144,4 - n}$ für Dichte d und Baumégrade n .

Sie entsteht, wenn man eine gleichmäßige x -Leiter von einem Zentrum C aus „zentral“ auf eine gleichmäßige y -Leiter auf einer anderen Geraden

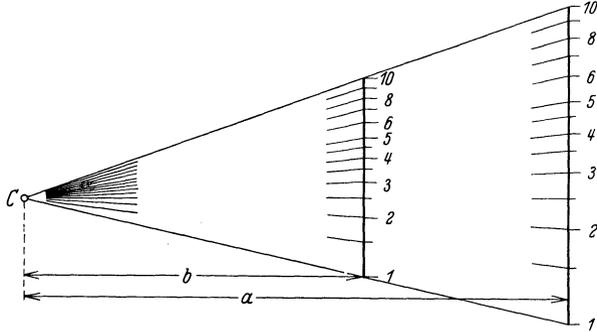


Abb. 23. Maßstabänderung einer Funktionsleiter.

projiziert und die x -Werte nach den neuen Punkten überträgt. In Abb. 24 ist als Beispiel die Funktion $y = \frac{5x}{x+2}$ gewählt, und die y -Leiter ist so

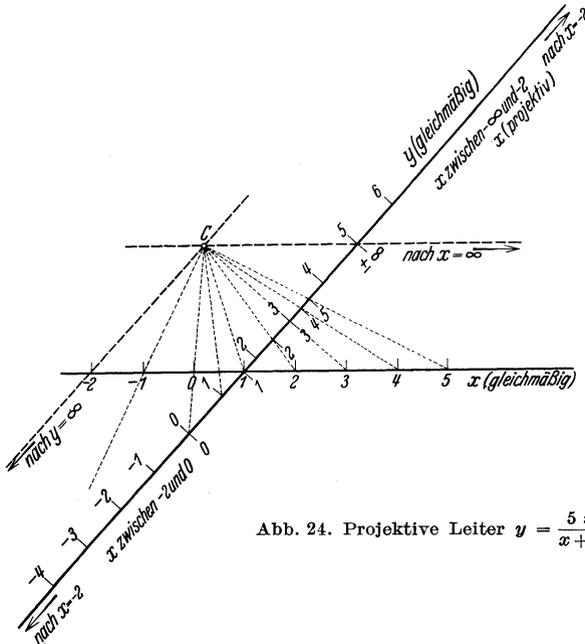


Abb. 24. Projektive Leiter $y = \frac{5x}{x+2}$.

gelegt, daß ihr Punkt $y = \frac{5}{3}$ für $x = 1$ gerade auf dem Punkt $x = 1$ der x -Leiter liegt. Erhebt sich der Projektionsstrahl aus C nach $x = 2, 3, 4, \dots$, so sieht man, wie sich die positiven x auf der projektiven Leiter zusammendrängen, bis die Parallele zum x -Träger den Punkt $x = \infty$

einschneidet. Dann trifft der Projektionsstrahl negative x , die sich nun, dem absoluten Werte nach abnehmend, anschließen. Ausgezeichnet ist wieder die Parallele zum y -Träger. Sie entspricht $y = \infty$ und hinsichtlich x der Nullstelle $x = -2$ des Nenners $x + 2$, die $y = \infty$ macht. Die projektive Leiter läßt besonders deutlich erkennen, wie durch eine Funktion $y = f(x)$ die gleichmäßige x -Leiter verzerrt wird: auf der projektiven x -Leiter drängen sich einzelne x ganz eng zusammen, andere werden weit auseinandergerissen. Ein Sonderfall ist die reziproke Leiter $y = \frac{1}{x}$ (anwendbar zur Konstruktion der gleichseitigen Hyperbel).

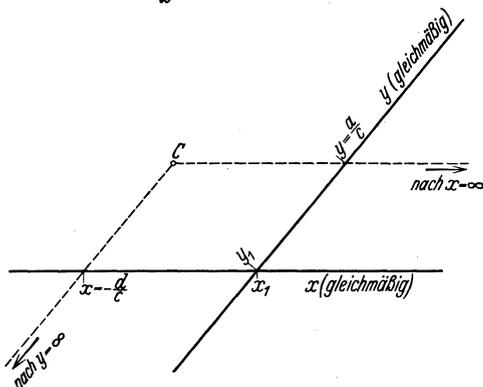


Abb. 25. Konstruktion einer projektiven Leiter.

Die Funktion $y = \frac{ax + b}{cx + d}$ enthält drei wesentliche Parameter (nicht vier, weil man eine der Konstanten a, b, c, d wegekürzen kann). Durch drei Punktepaare x, y ist daher die Konstruktion der projektiven Leiter festgelegt. Man wählt z. B. (Abb. 25):

- a) ein Paar x_1, y_1 , das in den vor allem interessierenden Bereich fällt: in diesem Bereich sollen sich unter günstigem Winkel die Träger schneiden,
- b) und c) die Punktepaare, für die $x = \infty, y = \frac{a}{c}$ bzw. $x = -\frac{d}{c}, y = \infty$ ist; sie bestimmen das Zentrum C : die Projektionsstrahlen von C nach $x = \infty$ bzw. $y = \infty$ sind Parallelen zu den Trägern. Die Parallele nach $x = \infty$ schneidet den Punkt $y = \frac{a}{c}$ der gleichmäßigen y -Leiter ein und legt zusammen mit y_1 deren Einteilung fest, ebenso schneidet die Parallele nach $y = \infty$ den Punkt $x = -\frac{d}{c}$ der gleichmäßigen x -Leiter ein und legt zusammen mit x_1 deren Einteilung fest. Zuweilen sind allerdings die gewünschten Bereiche für x und y so, daß man sie nur mit einem außerhalb der Zeichenfläche liegenden Zentrum C erzielen kann. Dann tut man am besten, $y = \frac{ax + b}{cx + d}$ für einige glatte x -Werte auszurechnen, mit einer passenden Maßstabseinheit geradlinig aufzutragen und die x -Werte daranzuschreiben (S. 19—20).

In Verallgemeinerung der gewöhnlichen projektiven Leiter $\frac{ax + b}{cx + d}$ liefert $\frac{af(x) + b}{cf(x) + d}$ eine projektive Leiter zu der beliebigen Funktionsleiter $f(x)$ und entsteht, wenn man diese von einem Zentrum C aus auf einen anderen Träger projiziert. Parallelität gibt bloße Maßstabsänderung (S. 20 und Abb. 23).

d) **Mehmkes Unterteilung einer Funktionsleiter.** Da die Anzahl drei der wesentlichen Parameter für die projektive Leiter ziemlich groß ist, schmiegt sich die projektive Leiter an eine beliebige Funktionsleiter im allgemeinen gut an und kann nach R. Mehmke [Leitfaden zum graphischen Rechnen, 2. Aufl. Wien u. Leipzig: Franz Deuticke 1924] wegen ihrer leichten Herstellbarkeit zur näherungsweise Unterteilung, z.B. Dezimalteilung, einer schwer zu berechnenden Funktionsleiter benutzt werden wie folgt (Abb. 26): Man bestimme drei Punkte, etwa 0, 5, 10, der Leiter genau und zeichne auf Pauspapier ein Strahlenbüschel durch Punkte 0, 1, 2, ..., 10 einer gleichmäßigen Leiter. Wenn bei passend ausprobiert Lage des auf die Funktionsleiter aufgelegten Pauspapiers die drei Strahlen 0, 5, 10 durch die genau bekannten Punkte 0, 5, 10 gehen, dann schneiden die Zwischenstrahlen die Unterteilung für die zugehörige projektive Leiter und im allgemeinen auch recht genau für die gewünschte Funktionsleiter ein.

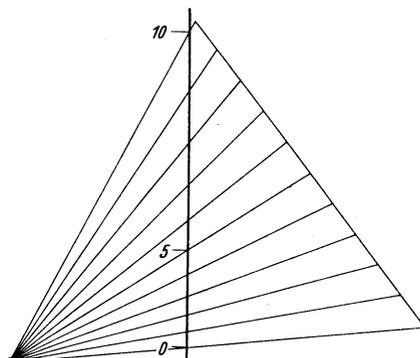


Abb. 26. Mehmkes Unterteilung.

e) **Vorzüge der Funktionsleiter.** Die Hauptvorteile der Funktionsleiter sind: Übersichtlichkeit, leichtes Ablesen von Zwischenwerten (Interpolation), Raumersparnis gegenüber der Kurvendarstellung, gute Herstellbarkeit. Die Funktionsleiter ersetzt eine numerische Tafel (Abb. 27 u. 28), und zwar wegen der bequemen Interpolation nach Augenmaß sogar eine ziemlich feinstufige. Das macht sich vorteilhaft namentlich bei den Leitern für empirische Funktionen [Berl, Herbert, Wahlig: a. a. O.; Liesche: a. a. O.] wie Dampfspannung, Wärmeleitzahl u. dgl. bemerkbar. Dabei behält man in der Regel außer der ungleichmäßigen x -Leiter zum raschen Ablesen auch die gleichmäßige y -Leiter auf demselben Träger bereit, im Falle der Dampfspannung also die Temperaturleiter. Schon für die allereinfachste Funktionsbeziehung, die Proportionalität, sind solche Doppelleitern sehr lohnend [Berl, Herbert, Wahlig: a. a. O.; Liesche: a. a. O.], etwa für die lästigen Umrechnungen

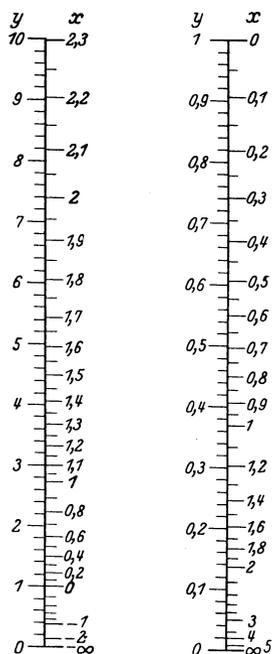


Abb. 27.

Abb. 28.

Abb. 27. Doppelleiter für die Exponentialfunktion $y = e^x$.

Abb. 28. Doppelleiter für die Exponentialfunktion $y = e^{-x}$.

von kW in PS (vgl. Abb. 37, S. 37), von englischen Maßen in metrische Maße, Konzentration in g und %, von Einwaage und Prozentgehalt bei der Analyse usw. Man stellt sie ganz einfach auf Millimeterpapier über die jetzt geradlinige Kurvendarstellung hinweg her. — Nachteilig bei der Funktionsleiter ist die verhältnismäßig geringe Anschaulichkeit.

§) **Doppelleiter. Verschiebbarkeit.** Von einer Doppelleiter spricht man, wenn zwei Leitern auf derselben Trägergeraden liegen (vgl. Abb. 6). Im einfachsten Fall ist eine der Leitern gleichmäßig, vgl. die y -Leiter in Abb. 20, 21, 22, 24, 27, 28 und ϵ). Die allgemeine Doppelleiter kommt durch Aneinanderheften zweier Leitern für $f(x)$ und $\varphi(\xi)$ zustande. An ihr kann man die Zahlenpaare x, ξ ablesen, welche die Gleichung $f(x) = \varphi(\xi)$ befriedigen [Luckey: a. a. O.; A. Walther: Einführung in die mathematische Behandlung naturwissenschaftlicher Fragen. Berlin: Julius Springer 1928].

Verschiebbarkeit der beiden Leitern gegeneinander führt zu den Rechenschiebern, deren klassisches Beispiel der gewöhnliche Rechenschieber ist, während die anderen „Sonderschieber“ heißen. Die Sonderschieber haben sicher noch eine große Zukunft [Luckey: a. a. O. — F. Bahlecke: Sonderrechenstäbe. RKW-Veröff. 68. Berlin: Beuth-Verlag 1931].

2. Rechenschieber.

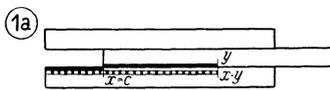
a) **Allgemeines.** Bau und Gebrauch des Rechenschiebers werden in den Grundzügen als bekannt vorausgesetzt [vgl. z. B. A. Rohrberg: Theorie und Praxis des logarithmischen Rechenschiebers, Math.-Phys. Bibl., Bd. 23, 2. Aufl. Leipzig u. Berlin: B. G. Teubner 1919; L. Schrutka: Theorie und Praxis des logarithmischen Rechenschiebers, 2. Aufl. Leipzig u. Wien: F. Deuticke 1929]. Unbedingt sollte man darauf achten, daß außer den oberen quadratischen Leitern mit 12,5 cm Maßstabseinheit auf Körper und Zunge und den unteren Hauptleitern mit 25 cm Maßstabseinheit auf Zunge und Körper noch in der Mitte der Zunge eine — vorteilhaft rot gefärbte — Reziprokleiter, d. h. eine von rechts nach links gegenläufige logarithmische Leiter mit 25 cm Maßstabseinheit vorhanden ist. Die mit ihr verbundenen Erleichterungen, z. B. beim Multiplizieren ohne Umschieben der Zunge vom Anfangs- auf den Endstrich das Produkt stets sofort ablesen, ferner mehrfache Multiplikationen und aneinandergehängte Multiplikationen und Divisionen mit besonders wenig Zungeneinstellungen ausführen zu können, gleichen den ganz geringen Mehrpreis und die etwas dichtere Besetzung des Rechenschiebers mit Strichen und Zahlen reichlich aus. Wer viel mit Rauminhalten zu tun hat, für den empfiehlt sich die kubische Leiter mit $\frac{25}{3}$ cm Maßstabseinheit. Mit ihr erhält man durch Verbindung mit der unteren Körperhauptleiter Kuben und Kubikwurzeln ähnlich wie durch die bekannte Verbindung der oberen quadratischen Körperleiter und der unteren Körperleiter Quadrate und Quadratwurzeln. Kubische und quadratische Leiter zusammengenommen geben $\frac{2}{3}$ te und $\frac{3}{2}$ te Potenzen. Für Potenzen mit beliebigen Exponenten,

die z. B. in der Thermodynamik immer wieder vorkommen, und für Exponentialfunktionen ist die loglog-Leiter vorteilhafter als die gleichmäßige Leiter von 25 cm Maßstabseinheit, mit der man die Längen auf der unteren Körperhauptleiter, d. h. die Logarithmen der Zahlen der unteren Körperhauptleiter abmißt. Beim Läufer, der die Zahlen verschiedener Leitern in Beziehung setzt, ist der Freiblickläufer ohne Verdeckung von Zahlen durch Metallteile angenehm, und zwar mit drei Strichen: zeigt der mittlere Strich einen Durchmesser d auf der unteren Leiter und damit wegen $25 \text{ cm} \cdot \log d = 12,5 \text{ cm} \cdot \log d^2$ das Quadrat d^2 auf der oberen Leiter, so steht der linke Strich auf dem Kreisinhalt $\frac{\pi}{4} d^2$ auf der oberen Leiter. Ebenso für rechten und mittleren Strich; geht man dabei weiter auf den linken Strich, so multipliziert man nochmals mit $\frac{\pi}{4} \approx 0,785$, d. h. bis aufs Komma ungefähr mit dem spezifischen Gewicht des Eisens. Man erhält also näherungsweise das Gewicht je laufenden m einer kreisrunden Eisenstange vom Durchmesser d . Subtraktion im Kopfe macht Rohgewichte zugänglich. Manchmal dienen auch der rechte und der mittlere Strich für $\frac{\pi}{4} \approx 0,785$, der mittlere und der linke Strich für $0,736 = \text{PS} : \text{kW}$. Genauigkeit des Rechenschiebers siehe S. 67—68.

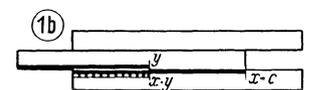
Die gegenseitige Verschiebbarkeit der Leitern ermöglicht bequeme Addition und Subtraktion von Strecken auf den Leitern, also von Logarithmen, und damit Multiplikation und Division der angeschriebenen Zahlen selbst. Das wird im einzelnen durch die folgende graphische Gebrauchsanweisung verdeutlicht, in der die verdickten Strecken Logarithmen angeben. Die Ergebnisstrecken sind schwarz-weiß (wie Eisenbahnlinien auf Landkarten), die Reziprokleiter ist strichpunktiert.

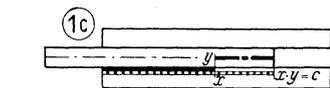
β) Graphische Gebrauchsanweisung zum Rechenschieber. Wegen der größeren Genauigkeit bevorzugt man die unteren Hauptleitern gegenüber den oberen quadratischen Leitern. Daß manchmal der Endstrich statt des Anfangsstriches hereinkommt, ist nicht immer durch Sonderfiguren veranschaulicht.

Multiplikation.

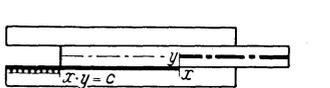
- 

①a



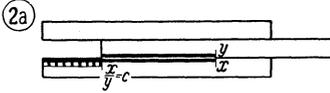
①b
- ①a) $x \cdot y$, insbesondere $c \cdot y$ für konstantes c und veränderliches y .
- ①b) $x \cdot y$, insbesondere $c \cdot y$. Umschieben der Zunge, wenn $x \cdot y$ nicht ablesbar ist.
- 

①c

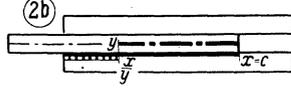


①f
- ①c) $x \cdot y$ am besten mit Reziprokleiter $\cdots \cdots$ (x und y durch Läuferstrich verbinden), weil dann $x \cdot y$ stets ohne Umschieben der Zunge ablesbar ist und sofort weitere Multiplikation oder Division angeschlossen werden kann. Insbesondere $x \cdot y = c$ (konstantes Produkt).
- ①f) $x \cdot y$ am besten mit Reziprokleiter $\cdots \cdots$ (x und y durch Läuferstrich verbinden), weil dann $x \cdot y$ stets ohne Umschieben der Zunge ablesbar ist und sofort weitere Multiplikation oder Division angeschlossen werden kann. Insbesondere $x \cdot y = c$ (konstantes Produkt).

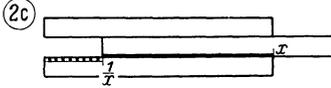
Division.



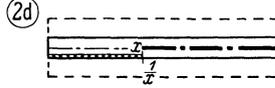
2a) $\frac{x}{y}$, insbesondere $\frac{x}{y} = c$ (festes Verhältnis). Zusammengehörige Werte von x und y mit dem festen Verhältnis c stehen übereinander. Nützlich für proportionales Umrechnen (Vergrößern oder Verkleinern).



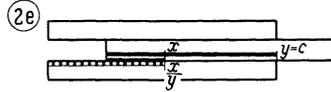
2b) $\frac{x}{y}$ mit Reziprokleiter, insbesondere $\frac{c}{y}$ (fester Dividend, Hyperbelordinate). Zusammengehörige Werte von $\frac{c}{y}$ und y mit dem festen Produkt c stehen übereinander.



2c) Sonderfall: Kehrwert $\frac{1}{x}$ ohne Reziprokleiter.

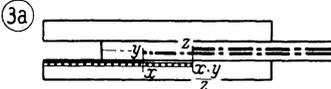


2d) Sonderfall: Kehrwert $\frac{1}{x}$ mit Reziprokleiter (oder unterer Körperleiter und unterer Zungenleiter der gegenläufig hereingesteckten Zunge).



2e) $\frac{x}{y} = \frac{1}{y} \cdot x$, insbesondere $\frac{x}{c}$ (fester Divisor).

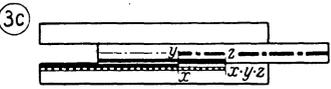
Mehrfache Multiplikation und Division.



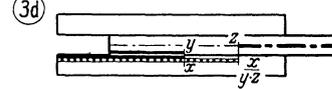
3a) $\frac{x \cdot y}{z}$ mit Reziprokleiter, insbesondere für festes x und y und veränderliches z . Wenn man zwei Zahlen x auf der unteren Körperleiter und y auf der Reziprokleiter verbindet (1a), multipliziert man: $x \cdot y$. Übergang zur Zahl z auf der Reziprokleiter dividiert: $\frac{x \cdot y}{z}$. Also Reziprokleiter Reihenfolge . . .



3b) $\frac{x \cdot y}{z}$ mit unterer Zungenleiter, insbesondere für festes x und z und veränderliches y . Wenn man zwei Zahlen x auf der unteren Körperleiter und z auf der unteren Zungenleiter verbindet (2a), dividiert man: $\frac{x}{z}$. Übergang zur Zahl y auf der unteren Zungenleiter multipliziert: $\frac{x}{z} \cdot y$. Also untere Zungenleiter Reihenfolge . . .

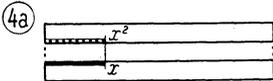


3c) $x \cdot y \cdot z$ mit Reziprokleiter und unterer Zungenleiter, insbesondere bei festem x und y und veränderlichem z .



3d) $\frac{x}{y \cdot z}$ mit unterer Zungenleiter und Reziprokleiter, insbesondere bei festem x und y und veränderlichem z .

Quadrieren und Quadratwurzelnziehen.

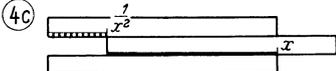
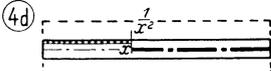
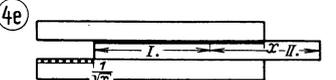
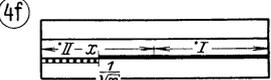
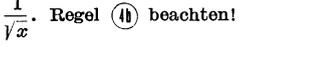
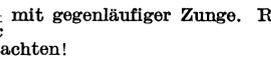


4a) x^2 . Läuferstrich verbindet x auf der unteren und x^2 auf der oberen Körperleiter (Quadratleiter). Zuweilen ist es auch vorteilhaft, $x \cdot x$ zu multiplizieren (Reziprokleiter).

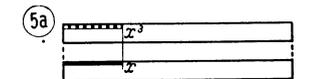
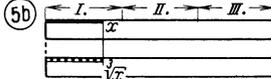
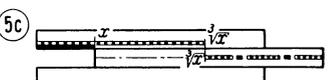
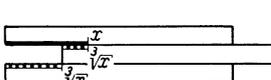
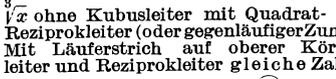
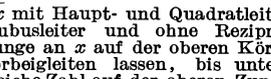


4b) \sqrt{x} . Einstellung:
 $x = 5$ 500 50000 0,05 0,0005
 auf der vorderen Quadratleiter I,
 $x = 50$ 5000 500000 0,5 0,005
 auf der hinteren Quadratleiter II.

Quadrieren und Quadratwurzelziehen (Fortsetzung).

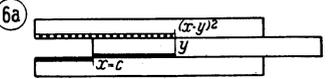
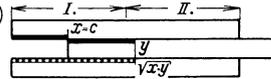
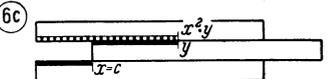
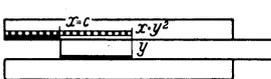
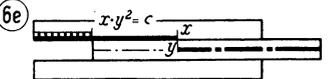
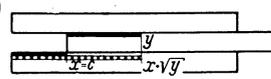
- (4c) 
- (4d) 
- (4e) $\frac{1}{x^2}$ ohne Reziprokleiter. 
- (4f) $\frac{1}{x^2}$ mit Reziprokleiter (oder gegenläufiger Zunge). 
- (4g) $\frac{1}{\sqrt{x}}$. Regel (4h) beachten! 
- (4h) $\frac{1}{\sqrt{x}}$ mit gegenläufiger Zunge. Regel (4h) beachten! 

Kubieren und Kubikwurzelziehen.

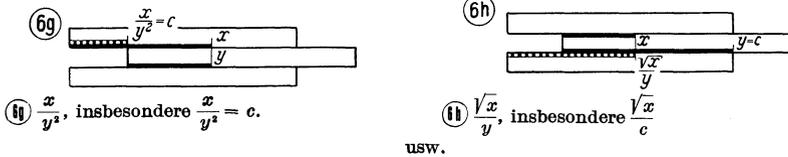
- (5a) 
- (5b) 
- (5c) x^3 mit Kubusleiter und Läuferstrich. Ohne Kubusleiter nach (3c) oder (3d), (3e). 
- (5d) $\sqrt[3]{x}$ mit Kubusleiter. Einstellung:
 $x = 5$ 5000 0,005 0,000005 in I,
 $x = 50$ 50000 0,05 0,00005 in II,
 $x = 500$ 500000 0,5 0,0005 in III. 
- (5e) $\sqrt[3]{x}$ ohne Kubusleiter mit Quadrat- und Reziprokleiter (oder gegenläufiger Zunge). Mit Läuferstrich auf oberer Körperleiter und Reziprokleiter gleiche Zahlen suchen. Begründung siehe (3e). 
- (5f) $\sqrt[3]{x}$ mit Haupt- und Quadratleiter, ohne Kubusleiter und ohne Reziprokleiter. Zunge an x auf der oberen Körperleiter vorbeigleiten lassen, bis unter x die gleiche Zahl auf der oberen Zungenleiter steht wie auf der unteren Körperleiter am Anfangsstrich der Zunge. Begründung siehe (3e). 

Richtige Zungenstellung (Anfangs- oder Endstellung) bei (5e) und (5f) durch Probieren und Überschlag finden. Drei Einstellungen möglich.

Beispiele für zusammengesetzte Rechnungen mit Quadraten und Quadratwurzeln.

- (6a) 
- (6b) $(x \cdot y)^2$, insbesondere $(c \cdot y)^2$ aus (1a) und (4). Ähnlich für (1c) und (4). 
- (6c) $x^2 \cdot y$, insbesondere $c^2 \cdot y$. 
- (6d) $x \cdot y^2$, insbesondere $c \cdot y^2$ (Parabelordinate). 
- (6e) $x \cdot y^3$ mit Reziprokleiter, insbesondere $x \cdot y^3 = c$. 
- (6f) $x \cdot \sqrt{y}$, insbesondere $c \cdot \sqrt{y}$ (Parabelordinate). 

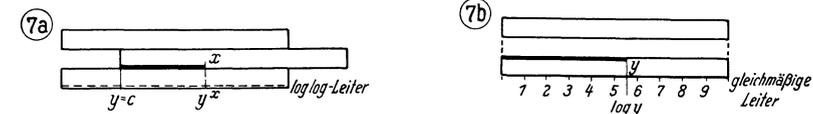
Beispiele für zusammengesetzte Rechnungen mit Quadraten und Quadratwurzeln (Fortsetzung).



Trigonometrische Rechnungen.

Man stellt auf der Rückseite der Zunge (diese in ihrer normalen Lage verschieben, nur von rückwärts betrachten) auf der *S*- oder *T*-Leiter für $\log \sin$ und $\log \tan$ den Winkel auf die vorhandene Marke ein, liest auf der Vorderseite der Zunge den Betrag von \sin oder \tan ab und kann an ihn auf der Vorderseite Multiplikation oder Division sofort anschließen. Die Zuordnung der Skalen ist bei den einzelnen Rechenschiebern verschieden und wird durch einfache Beispiele (z. B. \sin oder \tan von 30° , 45° , 60°) festgestellt. Die *S*-Leiter reicht oft von $5^\circ 43'$ bis 90° , die *T*-Leiter von $5^\circ 43'$ bis 45° , dann gibt es noch eine gemeinsame *S*- und *T*-Leiter von $34'$ bis $5^\circ 43'$. Die von den Fabrikanten leider gewählte, rückständige Unterteilung von $^\circ$ in $'$ und $''$ statt dezimal erschwert die Ablesung sehr. Für kleine Winkel ($\gamma^\circ, \mu', \sigma''$) sind \sin und \tan angenähert gleich dem Bogenmaß $1745 \cdot 10^{-2} \gamma$, $2909 \cdot 10^{-2} \mu$, $4848 \cdot 10^{-2} \sigma$ des Winkels. $\cos \alpha$ rechnet man als $\sin(90^\circ - \alpha)$, $\tan \alpha$ bei $\alpha > 45^\circ$ als $1 : \tan(90^\circ - \alpha)$ und $\cot \alpha$ als $\tan(90^\circ - \alpha)$.

Potenzen mit gebrochenen Exponenten $z = y^x$, insbesondere Exponentialfunktionen $z = c^x$.



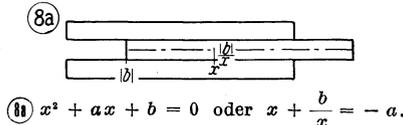
- (7a) Bei Vorhandensein einer *loglog*-Leiter (an der unteren oder oberen Körperkante oder auf der unteren oder oberen Abschrägung des Rechenschiebers) *loglog*-Leiter und Zungenleiter mit Läufer in Verbindung bringen. Begründung: $\log \log z = \log \log y + \log x$. Zuordnung der Leitern (ob untere oder obere Zungenleiter) durch einfache Beispiele ($z = 2^8 = 8$ od. dgl.) feststellen. Zuweilen kann $\log x$ auch mit der Reziprokleiter addiert werden.
- (7b) Mit Hilfe einer gleichmäßigen Leiter zur Grundzahl y auf der unteren Körperleiter mit Läuferstrich und gleichmäßiger Leiter die Mantisse von $\log y$ abmessen. Kennziffer ergänzen, nach (1a), (1b) oder (1c) $\log z = x \cdot \log y$ bilden, Mantisse von $\log z$ auf gleichmäßiger Leiter einstellen, mit Läuferstrich z auf unterer Körperleiter zuordnen, Komma entsprechend der Kennziffer stellen.

Zu y auf der *loglog*-Teilung ordnet der Läufer bei geeigneten Zungenstellungen auf der Zungenleiter den Zehnerlogarithmus $\log y$ oder den natürlichen Logarithmus $\ln y$ zu. Mit der gleichmäßigen Leiter wird $\log y$ unmittelbar abgemessen, in y durch Multiplikation von $\log y$ mit 2,3026 gefunden.

Die Exponentialfunktion c^x für veränderliches x läßt sich bei fest auf c der *loglog*-Teilung eingestelltem Anfangspunkte der Zunge durch bloßes Verschieben des Läufers für Tabellenrechnen, Kurvenzeichnen usw. ähnlich angenehm bestimmen wie $c \cdot y$ nach (1a) und (1b).

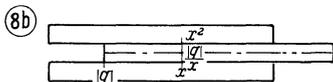
$\frac{c}{y}$ nach (1b), $\frac{x}{c}$ nach (1c), $c y^x$ nach (1d), $c \sqrt{y}$ nach (1e).

Auflösen von quadratischen und reduzierten kubischen Gleichungen.



Anfangspunkt der Zunge auf $|b|$ (Absolutbetrag von b , d. h. b ohne Rücksicht aufs Vorzeichen) der unteren Körperleiter einstellen. Dann haben mit dem Läuferstrich verbundene Wertepaare der unteren Körperleiter und der Reziprokleiter nach (2b) das feste Produkt $|b|$, sind also x und $\frac{|b|}{x}$. Durch Probieren Paare x und $\frac{|b|}{x}$ derart suchen, daß $x + \frac{b}{x} = -a$

wird, daß also x und $\frac{|b|}{x}$ für $b > 0$ die Summe $|a|$ haben und für $b < 0$ die Differenz $|a|$. Für $b > 0$ haben beide Wurzeln gleiche Vorzeichen, und zwar für $a < 0$ positives, für $a > 0$ negatives; für $b < 0$ haben sie entgegengesetztes Vorzeichen, und zwar ist für $a < 0$ die positive Wurzel absolut genommen größer, für $a > 0$ die negative. Hiernach bringt man an den vom Rechenschieber abgelesenen Zahlen x und $\frac{|b|}{x}$ mit der Summe bzw. Differenz $|a|$ die Vorzeichen an.



(8b) $x^2 + px + q = 0$ oder $x^2 + \frac{q}{x} = -p$.

Anfangspunkt der Zunge auf $|q|$ der unteren Körperleiter einstellen. Der Läuferstrich verbindet x auf der unteren Körperleiter, x^2 auf der oberen Körperleiter und $\frac{|q|}{x}$ auf der Reziprokleiter. Durch Probieren $x^2 \pm \frac{|q|}{x} = |p|$ machen (+ für $q > 0$, - für $q < 0$), Vorzeichen durch Überschlag bestimmen.

γ) Logarithmentafeln, Rechenmaschinen, gewöhnliches Zahlenrechnen.

Der Rechenschieber soll für alle normalerweise vorkommenden Rechnungen verwandt werden. Üben gibt große Fertigkeit und Schnelligkeit. Die Genauigkeit reicht meist völlig aus. Wenn nicht, so ist die Logarithmentafel nur wenig zu empfehlen, jedenfalls nicht, wenn die Rechnungen einigermaßen ausgebreitet sind. Vielmehr verschaffe man sich dann unbedingt, gegebenenfalls leihweise, eine Rechenmaschine [Lenz: Die Rechen- und Buchungsmaschinen, 3. Aufl. Leipzig: B. G. Teubner 1932. — E. Martin: Die Rechenmaschinen und ihre Entwicklungsgeschichte. Pappenheim: J. Meyer 1925]. Wenn irgend möglich, soll sie durchgehende Zehnerübertragung auch im Umdrehungszählwerk und automatische Division aufweisen. Vorteil bringt oft Rückübertragung aus dem Ergebniswerk ins Einstellwerk. Die stärkste Erleichterung wird durch Tasteneinstellung und vor allem durch elektrischen Antrieb bewirkt. Rechenmaschinen werden hauptsächlich auf folgenden Konstruktionsgrundlagen hergestellt: Staffelnwalze (erfunden von Leibniz 1672, in größerem Umfange seit 1820 durch Thomas gebaut: Archimedes, Rheinmetall, Monroe u. a.), Sprossenrad (wahrscheinlich auch von Leibniz erfunden, wieder aufgenommen um 1874 von Odhner: Brunsviga, Walther u. a.), proportional verschiebbare Zahnstangen (erfunden von Hamann 1905: Mercedes-Euklid), Schaltklinke an einer Scheibe mit Aussparung (erfunden von Hamann 1925: Hamann-Manus und Hamann-Automat), Multiplikationskörper (erfunden von Bollée 1888 und Steiger 1892: Millionär). Erst wenn man die Rechenmaschine kennt und benutzt, kann man beurteilen, wieviel Zeit und vor allem geistige Kraft dieses Hilfsmittel spart und für edlere Zwecke freimacht, von der Sicherheit gegen Verrechnen ganz zu schweigen. Auch von den reinen Addiermaschinen, oft mit Schreibwerk, wie sie in Banken u. dgl. verbreitet sind, läßt sich für Sonderzwecke nützlicher Gebrauch machen.

Eine Hauptsache bei allen Zahlenrechnungen ist ein vernünftiger, vorher festgelegter Rechenplan mit möglichst schematischer Rechen-

anordnung (vgl. z. B. S. 74, 76—77). Man vergesse nicht Überschlüge und Proben. Nützlich hierzu sind u. a. [vgl. V. Happach: Technisches Rechnen. Berlin: Julius Springer 1933. — O. Liesche: Rechenverfahren und Rechenhilfsmittel mit Anwendungen auf die analytische Chemie. Die chemische Analyse, Bd. 30. Stuttgart: Ferdinand Enke 1932. — K. Menninger: Rechenkünfte, 3. Aufl. Frankfurt a. M.: K. Poths 1934. — C. Runge u. H. König: Vorlesungen über numerisches Rechnen. Berlin: Julius Springer 1924. — P. Werkmeister: Praktisches Zahlenrechnen. Sammlung Göschen 405. — A. Witting: Abgekürzte Rechnung, Math.-Phys. Bibl., Bd. 47. Leipzig u. Berlin: B. G. Teubner 1922]:

freies, mehr intuitives Kopfrechnen,
das sog. Ferrolsche Multiplizieren und Dividieren
[vgl. O. Liesche: a. a. O.],
Subtrahieren mit Hilfe der dekadischen Ergänzung,
Rechnen mit kleinen Größen (S. 69—71),
abgekürztes Rechnen,
Neunerprobe.

Stets dürfen nur soviel Dezimalen angegeben werden, wie wirklich gewährleistet werden können (S. 69—71 und 73—74).

3. Netztafeln und Leitertafeln.

a) Netztafel. Der gewöhnlichen Kurvendarstellung für Funktionen einer Veränderlichen entspricht für Funktionen $z = f(x, y)$ von zwei Veränderlichen die praktisch unbequeme Darstellung durch eine Fläche im Raum. Man trägt zu jedem Paar x, y den Funktionswert z als Höhe über der waagrecht gedachten xy -Ebene auf und verbindet die Höhenendpunkte durch eine Fläche (vgl. auch S. 13 und Abb. 13).

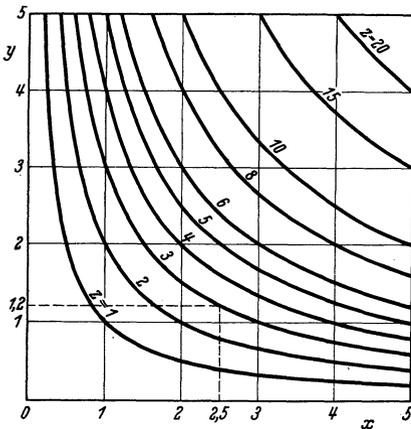


Abb. 29. Netztafel für das Produkt $z = x \cdot y$.
Beispiel: $2,5 \cdot 1,2 = 3$.

Schneidet man diese mit waagerechten Ebenen konstanter Höhe $z = c_1, z = c_2, \dots$, so entstehen als Schnittkurven die Höhenlinien (Schichtlinien). Diese projiziert man in z -Richtung in die xy -Ebene. An die „Grundrißprojektion“ schreibt man jedesmal den betreffenden z -Wert $z = c_1, z = c_2, \dots$ daran und erhält so eine Höhenlinienkarte für die Fläche $z = f(x, y)$ ähnlich wie in der Kartographie für

ein Gelände. Ohne Bezugnahme auf die Flächendarstellung hat man es mit einer Kurventafel (Tafel mit bezifferten Kurven, Netztafel) für die Funktion $z = f(x, y)$ zu tun: man zeichnet im xy -Koordinatensystem die Kurven $z = \text{konst} = c$ mit verschiedenen c und beziffert sie nach c .

Beispiel (Abb. 29): $z = x \cdot y$, Hyperbeln $x \cdot y = 1$, $x \cdot y = 2$, Diese Netztafel kann als Multiplikationstafel dienen, z. B. ist in Abb. 29 eingezeichnet, daß $x = 2,5$ und $y = 1,2$ das Produkt 3 geben. Kommt man mit dem Punkte x, y zwischen zwei Kurven, so schätzt man den Produktwert entsprechend der Lage des Punktes und entsprechend der Bezifferung der Nachbarkurven (graphische Interpolation). In großem Umfange werden Netztafeln in der Thermodynamik (Wärme- und Entropiediagramme [vgl. z. B. Hütte, Bd. I]), in der Lehre von den Maschinenelementen usw. gebraucht. Auch die Veranschaulichung der Potenzen $y = x^a$ (Abb. 3) ist eine Netztafel, wobei der Exponent a als abhängige Veränderliche z aufgefaßt, also die Funktion $z = {}^x \log y$ dargestellt wird.

β) Graphische Interpolation. Zuweilen sind durch Beobachtungen die Kurven $z = z_1, z = z_2, \dots$ nur für unrunde Werte z_1, z_2, \dots und mit

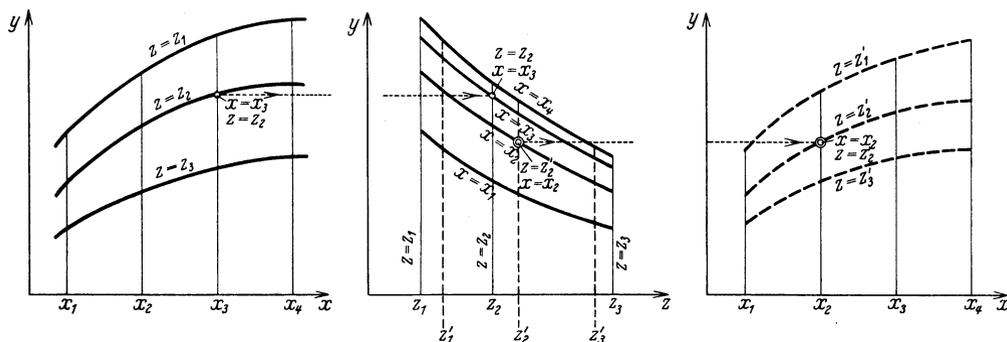


Abb. 30. Graphische Interpolation.

verhältnismäßig großem Zwischenraum gefunden. Man möchte sie für runde Werte von z und enger haben. Dazu verfährt man nach Abb. 30, die sich im xyz -Koordinatensystem auch räumlich deuten läßt. Man geht aus dem xy -System (Grundriß) in das zy -System (Seitenriß). Dort werden die Kurven $z = z_1, z = z_2, \dots$ senkrechte Geraden. Auf diese nimmt man gleichabständige und genügend dichte runde x -Werte x_1, x_2, \dots herüber und erhält so ein Kurvensystem $x = \text{konst} = x_1, x_2, \dots$. Jetzt legt man im zy -System Senkrechte für gleichabständige und genügend dichte runde z -Werte z'_1, z'_2, \dots und wandert ins xy -System zurück.

γ) Verzerrung von Netztafeln. Sehr unbequem ist meist das Zeichnen der vielen krummen Kurven $z = c$. Zuweilen kann man durch passende Wahl der xy -Koordinatenteilungen (z. B. logarithmisch) eine Verzerrung (Verstreckung, Anamorphose) der Kurven herbeiführen, so daß sie bequem zeichnbar (z. B. geradlinig) werden.

Beispiele: Abb. 31: Produkttafel $z = x \cdot y$ auf ganzlogarithmischem Papier mit z -Geraden vom Steigungsmaß -1 entsprechend $y = cx^{-1}$; Abb. 7: Potenztafel $y = x^a = x^z$ oder $z = {}^x \log y$ auf ganzlogarithmischem Papier.

Auch die Verzerrung der Ellipse $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = \text{konst}$ in einen Kreis dadurch, daß man für y die Maßstabseinheit $\frac{a}{b}$ mal so groß wählt wie für x ,

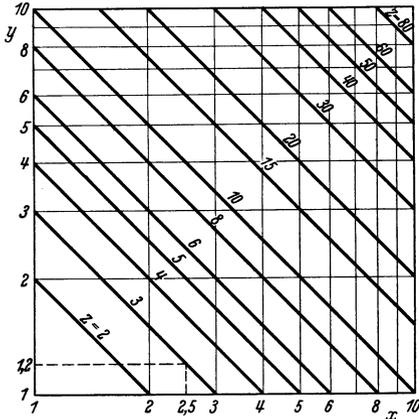


Abb. 31. Verzerrte Netztafel für das Produkt $z = x \cdot y$ auf Potenzpapier. Beispiel: $2,5 \cdot 1,2 = 3$.

ist praktisch zuweilen nützlich.

d) **Nachteile der Netztafeln.** Auch bei Verzerrung bleiben als schwere Nachteile der Netztafel Linienwirrwahl und schlechte Ablesbarkeit bestehen. Viele dicht aufeinanderfolgende Linien sind notwendig, wenn man einigermaßen genau Zwischenwerte einschalten will. Die enge Zusammendrängung ermüdet aber das Auge stark. Ferner steht namentlich bei großem Format die Bezifferung der z -Kurven meist weit entfernt von der Stelle, an der man gerade arbeitet. Läßt man das Auge zu ihr hinschweifen, so können leicht Verwechslungen von Linien eintreten usw. All diese Unannehmlichkeiten der Netztafel

haben ihr, die früher neben der Zahlentafel allein das Feld behauptete, in den letzten Jahren mit Recht mehr und mehr Boden entzogen zugunsten der — allerdings nicht so allgemein anwendbaren — Leiter-

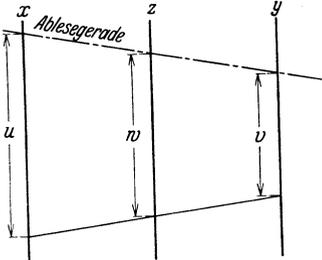


Abb. 32. Trapeztafel mit drei parallelen gleichabständigen Leitern.

tafel (Tafel mit bezifferten Punkten, Fluchtentafel), und diese Entwicklung geht noch weiter.

ε) **Kennzeichnung von Netz- und Leitertafeln.** Die Netztafeln kann man so auffassen: Die Veränderlichen x, y und z werden durch bezifferte Kurven dargestellt, nämlich durch die y -Parallelen (Senkrechten) $x = \text{konst}$, die x -Parallelen (Waagrechten) $y = \text{konst}$ und die Kurven $z = \text{konst}$; die Zusammengehörigkeit von drei Werten x, y, z wird dadurch erkannt, daß sie zum selben Punkte gehören (ihre Kurven

durch ihn gehen). Demgegenüber werden bei den Leitertafeln x, y, z durch bezifferte Punkte auf drei Leitern wiedergegeben; als zusammengehörig betrachtet man drei Werte x, y, z , deren Punkte auf ein und derselben Ableselinie („Weiser“), meist Ablesegeraden, liegen. Die drei Punkte werden durch die Ablesegerade in Verbindung gebracht, „eingefluchtet“ (daher „Fluchtentafeln“) wie vom Landmesser durch Anvisieren drei hintereinanderliegende Vermessungsstangen. Auch bei den Leitertafeln ist passende Verzerrung gelegentlich wertvoll, sei es in der Gestalt der Leitern, sei es in der Anordnung der Punkte auf ihnen.

§) Einfachste Typen von Leitertafeln.

a) Parallele gleichabständige Leitern (Trapeztafel, Abb. 32). Nach dem Satz von der Mittellinie im Trapez gilt für die Abstände u, v, w in cm

$$2w = u + v$$

(w ist das arithmetische Mittel aus den parallelen Trapezseiten u und v). Liegen also auf den drei parallelen Geraden als Trägern Funktionsleitern für x, y, z auf Grund von drei Funktionen $f(x), g(y), h(z)$ mit den Maßstabsfaktoren λ, μ, ν :

$$u \text{ in cm} = \lambda f(x),$$

$$v \text{ in cm} = \mu g(y),$$

$$w \text{ in cm} = \nu h(z),$$

so lautet die Schlüsselgleichung für diesen Nomogrammtypus:

$$\lambda f(x) + \mu g(y) = 2\nu h(z).$$

Beziehungen zwischen x, y und z von dieser Art sind es, die sich durch ein Nomogramm mit drei parallelen gleichabständigen Leitern darstellen lassen. Ihre Mannigfaltigkeit ist größer, als es zunächst scheint. Namentlich der Gebrauch logarithmischer Leitern eröffnet viele Möglichkeiten.

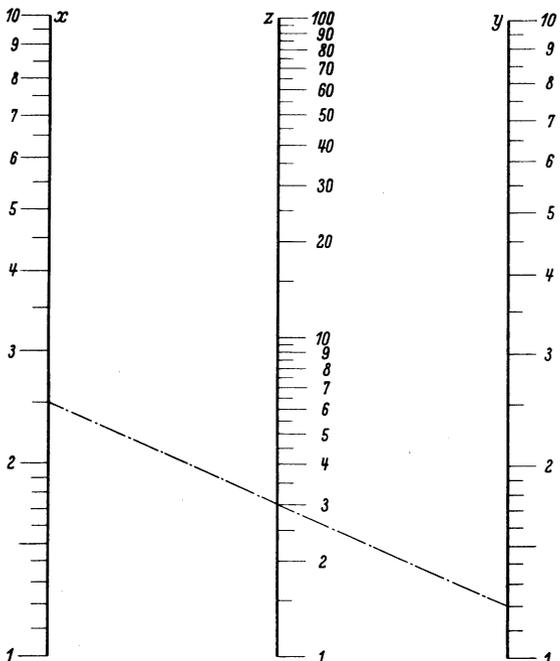


Abb. 33. Leitertafel (Trapeztafel) für das Produkt $z = x \cdot y$.
Beispiel: $2,5 \cdot 1,2 = 3$.

Beispiele: $f(x) = \log x, g(y) = \log y, h(z) = \log z$ gibt für $\lambda = \mu = \nu$ (gleiche Maßstabseinheiten auf allen drei Leitern) $z = \sqrt{xy}$ (z ist das geometrische Mittel aus x und y), für $\lambda = \mu = 2\nu$ hingegen $z = x \cdot y$.

Zeichnet man also (Abb. 33) zwei parallele logarithmische Leitern, je etwa von der Maßstabseinheit 25 cm, und in der Mitte eine parallele logarithmische Leiter von der Maßstabseinheit 12,5 cm, sucht links einen Wert x , rechts einen Wert y und verbindet sie durch eine (nicht einzuzeichnende, sondern nur anzulegende) Ablesegerade (gespannten Fadens, Lineal, am besten durchsichtig mit eingeritztem Strich, um keine Bezifferung zuzudecken), so schneidet diese in der Mitte das Produkt $z = x \cdot y$ an. Offenbar ist diese Leitertafel für das Produkt (Abb. 33) weit übersichtlicher als die Kurventafel Abb. 29 mit Hyperbeln oder die verzerrte Kurventafel Abb. 31 mit Geraden. Unter die Produktform ordnen sich viele praktisch wichtige Fälle unter, z. B. das Ohmsche Gesetz:

Spannung $U =$ Stromstärke I mal Widerstand R oder die Formel:
Leistung $N =$ Spannung U mal Stromstärke I usw.

Besonders bequem ist, daß man multiplikative Konstanten einfach durch Verschieben der Anfangspunkte der logarithmischen Leitern berücksichtigen kann.

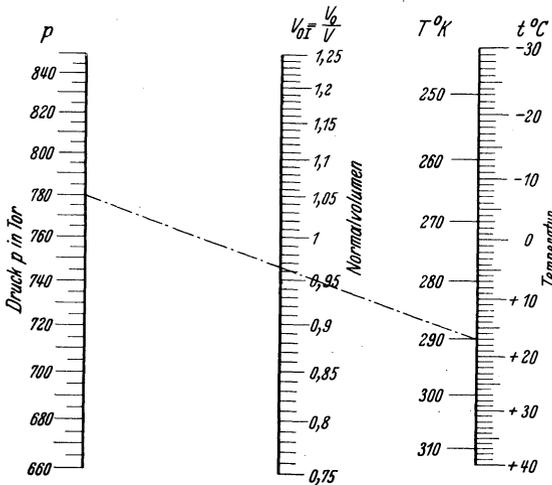


Abb. 34. Normalvolumen einer Gasvolumeneinheit:

$$V_{0I} = \frac{V_0}{V} = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T}$$

Beispiel: $p = 780$ Tor, $t = 17^\circ$ C, $V_{0I} \approx 0,963$.

rücksichtigen kann. Wenn z. B. am Anfangspunkte der u -Messung die Zahl x_0 steht, ist

$$u \text{ in cm} =$$

$$\lambda (\log x - \log x_0) = \lambda \log \frac{x}{x_0}$$

$$\text{bei } \lambda = \mu = 2 \nu$$

$$\text{also } z = \frac{xy}{x_0}$$

Praktisch verfährt man bei einer Beziehung $z = kxy$ oder ähnlich meist so, daß man zuerst die x - und y -Leiter aufträgt, dann zu x und y in einer bequemen Verbindung $z = kxy$ das z ausrechnet, auf der z -Geraden anschnidet, markiert und von ihm aus die z -Leiter aufbaut. So trägt man

(Abb. 34) für das Normalvolumen $V_{0I} = \frac{V_0}{V} = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T}$ einer Gasvolumeneinheit bei $p_0 = 760$ mm Hg (760 Tor) und $T_0 = 273^\circ$ K ($t_0 = 0^\circ$ C)

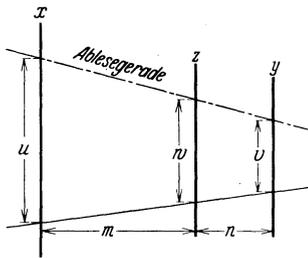


Abb. 35. Paralleltafel mit drei parallelen Leitern.

mit gleichen Maßstabseinheiten λ und μ parallele logarithmische Leitern für Druck p und absolute Temperatur T auf, nach aufwärts für p , nach abwärts für T . Die Anfangspunkte der Strecken $\lambda \cdot \log p$ und $\mu \cdot \log T$ können dabei weit außerhalb der Zeichenfläche liegen. Man richtet es so ein, daß die interessierenden Bereiche von p und T die Zeichenfläche ausfüllen. Vom Punkte p_0 aus gehen dann die Strecken $\lambda (\log p - \log p_0)$ und vom Punkte T_0 aus die Strecken $\mu (\log T_0 - \log T)$; das Minuszeichen bei $\log T$ wird durch das Abwärtsführen der T -Leiter berücksichtigt.

Neben die absolute Temperatur T schreibt man sogleich auch die Celsiustemperatur $t = T - 273$ („Verzifferung“ einer Leiter). Durch die Verbindungsgerade $p_0 \dots T_0$ wird der Anfangspunkt $V_{0I} = 1$ der V -Leiter angeschnitten und auf ihr nach aufwärts mit der halben

Maßstabseinheit $\nu = \frac{\lambda}{2}$ die logarithmische V -Leiter angebracht.

b) Drei parallele Leitern in beliebigen Abständen (Parallelentafel, Abb. 35). Nach Proportionensätzen ist

$$(m + n) w = n u + m v$$

(und zwar ist u mit dem „fernen“ n und v mit dem fernen m gekoppelt).

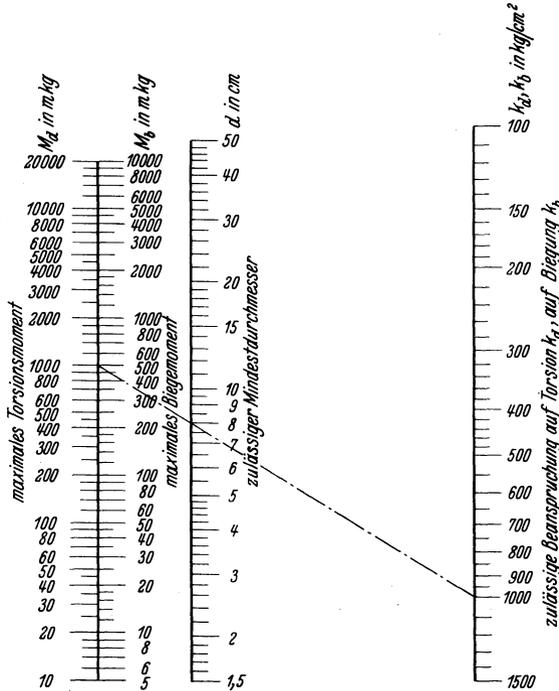


Abb. 36. Zulässiger Mindestdurchmesser einer auf Biegung oder Torsion beanspruchten Welle:

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 M_b}{\pi k_b}} \text{ bzw. } d = \sqrt[3]{\frac{16 M_d}{\pi k_d}}$$

Beispiel: $M_b = 500 \text{ mkg}$, $k_b = 1000 \text{ kg/cm}^2$, $d \approx 8,0 \text{ cm}$.

Z. B. für logarithmische Leitern

$$u = \lambda \log x, \quad v = \mu \log y, \quad w = \nu \log z$$

wird

$$z = x^\alpha y^\beta \text{ mit } \alpha = \frac{\lambda}{\nu} \frac{n}{m+n} \text{ und } \beta = \frac{\mu}{\nu} \frac{m}{m+n}.$$

Die größere Anzahl der Parameter erleichtert günstiges Dimensionieren, d. h. Anpassen an vorgeschriebene Bereiche für x und y .

Beispiel: Zulässiger Mindestdurchmesser d in cm einer auf Biegung beanspruchten Welle in Abhängigkeit vom maximalen Biegemoment M_b und der zulässigen Beanspruchung k_b (Abb. 36):

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 M_b}{\pi k_b}} \text{ (geforderte physikalische Gleichung).}$$

Durch Logarithmieren entsteht eine Gleichungsform, die der geometrischen Schlüsselgleichung für die Parallelentafel entspricht:

$$\log d \sqrt[3]{\frac{\pi}{32}} = \frac{1}{3} \log M_b - \frac{1}{3} \log k_b \text{ umformte physikalische Gleichung,}$$

$$(m + n) w = nu + mv \text{ geometrische Schlüsselgleichung.}$$

Man wird also logarithmische Leitern für d , M_b , k_b wählen, d. h. man setzt

$$\left. \begin{array}{l} u = \lambda \log M_b \\ v = -\mu \log k_b \\ w = \nu \log d' \end{array} \right\} \text{ Maßstabsgleichungen.}$$

Hierbei ist $d' = d \sqrt[3]{\frac{\pi}{32}}$. Die Multiplikation mit dem konstanten Faktor $\sqrt[3]{\frac{\pi}{32}}$ bedeutet bei der logarithmischen d -Leiter nur eine Verschiebung des Anfangspunktes und wird erst zuletzt berücksichtigt. Das Minuszeichen bei $v = -\mu \log k_b$ fordert Gegenläufigkeit der k_b -Leiter.

Nach Einsetzen der Maßstabsgleichungen heißt die geometrische Schlüsselgleichung

$$(m + n) \nu \log d' = n \lambda \log M_b - m \mu \log k_b.$$

Vergleich mit der umgeformten physikalischen Gleichung ergibt völlige Übereinstimmung für

$$(m + n) \nu : n \lambda : m \mu = 1 : \frac{1}{3} : \frac{1}{3}$$

oder

$$(m + n) \nu = 3 n \lambda = 3 m \mu.$$

Diese für die Ausführung des Nomogramms grundlegenden Gleichungen verbinden die Leiterabstände m , n und die Maßstabsfaktoren λ , μ , ν miteinander. Sind z. B. die gewünschten Bereiche:

$$\begin{array}{l} M_b \text{ von } 500 \text{ bis } 10^6 \text{ cmkg,} \\ k_b \text{ von } 100 \text{ bis } 1500 \text{ kg/cm}^2, \end{array}$$

so läuft $\log M_b$ von 2,7 bis 6, also über 3,3 logarithmische Einheiten, $\log k_b$ von 2 bis 3,2, also über 1,2 logarithmische Einheiten. Damit die M_b -Leiter und die k_b -Leiter etwa gleich lang werden, wählt man die Maßstabseinheit für k dreimal so groß wie die für M , also $\mu = 3 \lambda$. Aus $n \lambda = m \mu = m \cdot 3 \lambda$ folgt dann das Abstandsverhältnis $m : n = 1 : 3$ und damit die Lage der d -Leiter, ferner aus $(m + n) \nu = 3 n \lambda$ die Maßstabseinheit ν für die d -Leiter zu $\nu = \frac{9}{4} \lambda$. Geeignet sind also z. B. $\lambda = 4$ cm,

$\mu = 12$ cm, $\nu = 9$ cm, $m = 5$ cm, $n = 15$ cm, indem man $m + n$ als Breite des Nomogramms (hier 20 cm) passend wählt und λ so, daß das Nomogramm möglichst deutlich wird, dabei aber die Gesamtlänge $3,3 \lambda$ Platz

hat. Der konstante Fehler $\sqrt[3]{\frac{\pi}{32}}$ wird schließlich dadurch hereingearbeitet, daß man sich noch einen bequemen Punkt der d -Leiter ausrechnet. Z. B. gehört $d = 10$ cm wegen

$$10 \text{ cm} = \sqrt[3]{1000 \text{ cm}} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 10^4 \pi \text{ cmkg}}{\pi \cdot 320 \text{ kg/cm}^2}}$$

zu $M_b \approx 314 \text{ mkg}$ und $k_b = 320 \text{ kg/cm}^2$;

von hier aus läßt sich die d -Leiter bequem auftragen.

Daß in diesem Beispiel k_b im Nenner steht, wird wie beim vorigen Beispiel für T (S. 34, Abb. 34) durch Gegensinn der k_b -Leiter berücksichtigt. Man könnte natürlich auch $d^3 k_b = \frac{32}{\pi} M_b$ schreiben und gleichsinnige d - und k_b -Leitern außen, die ebenfalls gleichsinnige M_b -Leiter

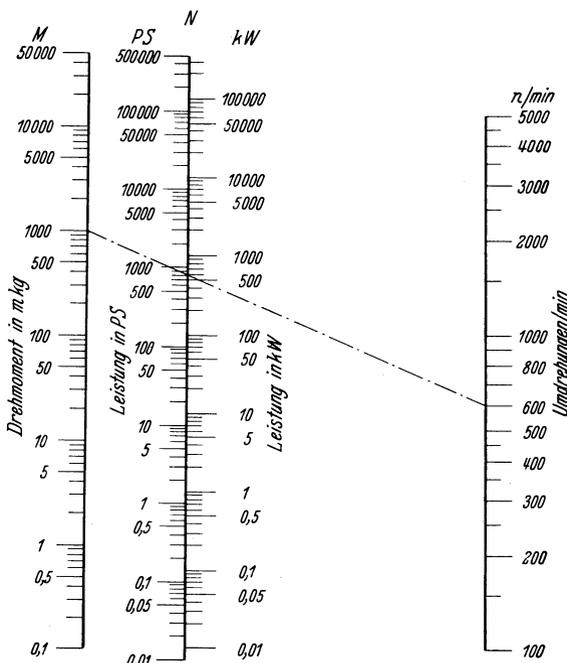


Abb. 37. Leistung N einer Maschine in Abhängigkeit von Drehmoment M und Drehzahl n .
 Beispiel: $M = 1000 \text{ mkg}$, $n = 600/\text{min}$, $N \approx 840 \text{ PS} \approx 620 \text{ kW}$.

innen nehmen. Das ergibt jedoch nicht so günstige Maßstabsverhältnisse. Auch werden etwaige Ungenauigkeiten, die man beim Einstellen der Ablesegeraden auf den Leitern der bekannten Größen begeht, im allgemeinen vergrößert, wenn man zu der gesuchten Größe nach außen fortschreitet. Deshalb ist die Lage wie in Abb. 36 mit den gegebenen Größen außen, der gesuchten Größe innen besonders vorteilhaft. Immerhin muß bei jedem Nomogrammentwurf durchprobiert werden, wie man die Veränderlichen am besten anordnet. Z. B. empfiehlt es sich, wie man selbst nachprüfen möge, bei der Oleumanalyse nach der Formel

$$y = 8,006 \frac{x}{z},$$

wobei¹

y gesamter SO_3 -Gehalt des Oleums in %,

z Einwaage an Oleum in g,

x Menge von $\frac{1}{5}$ n-NaOH in cm^3 zur Titration von $\frac{1}{10}$ der Einwaage

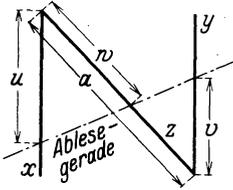


Abb. 38.
N-Tafel: zwei parallele Leitern von einer dritten geschnitten.

und die Bereiche

y von 80 bis 100%, x von 30 bis 64 cm^3 gewünscht werden, z und y außen gegensinnig, x dazwischen und $\lambda = \frac{3}{2}v$, $\mu = 3v$, $m : n = 1 : 2$

zu wählen [vgl. die ähnlich konstruierte Tafel 18 in E. Berl, W. Herbert, W. Wahlig: Nomographische Tafeln für die chemische Industrie. Berlin: Julius Springer 1930].
Bei der Formel

$$\text{Leistung } N \text{ [PS] einer Maschine} = \frac{\text{Drehmoment } M \text{ [mkg]} \cdot \text{Drehzahl } n \text{ [/min]}}{716,2}$$

zielt man vom Punkte $M = 716,2$ durch Ablesegeraden verschiedene n an und bekommt $N = n$ eingeschnitten (Abb. 37, in der die N -Leiter zu einer Doppelleiter mit PS und kW ausgestaltet ist).

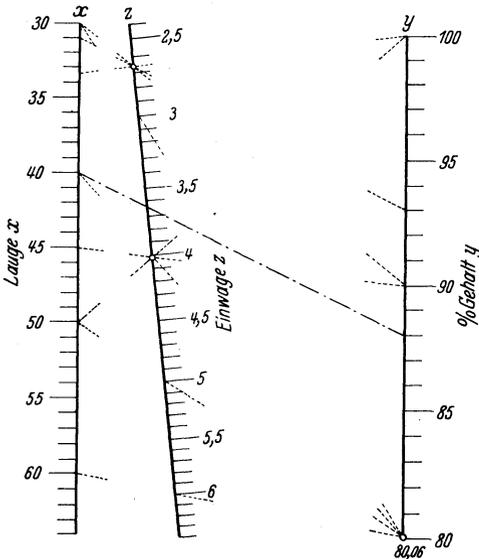


Abb. 39. Oleumanalyse $y = 8,006 \frac{x}{z}$.
 y gesamter SO_3 -Gehalt des Oleums in %,
 z Einwaage an Oleum in g,
 x Menge von $\frac{1}{5}$ n-NaOH in cm^3 zur Titration von $\frac{1}{10}$ der Einwaage.
Beispiel: $x = 40,0$, $z = 3,64$, $y = 88$.

Für das Zeichnen der logarithmischen Leitern ist, wenn es mit den Maßstäben klappt, Logarithmenpapier vorteilhaft. Sonst kann sich zeichnerische Maßstabänderung durch Zentralprojektion nach S. 20 und Abb. 23 empfehlen.

c) Zwei parallele Leitern von einer dritten geschnitten (N-Tafel, Abb. 38). Proportionensätze liefern

$$\frac{u}{v} = \frac{w}{a-w}$$

$$\text{oder } w = a \frac{u}{u+v} = a \frac{\frac{u}{v}}{\frac{u}{v} + 1}$$

Die Länge w ist also projektiv (vgl. S. 20—22) mit dem Verhältnis $\frac{u}{v}$ der Abstände u und v verknüpft. Wenn auf der w -Geraden statt der gleich-

¹ Man füllt die Einwaage mit Wasser auf 100 cm^3 auf und pipettiert zu jeder Analyse 10 cm^3 heraus.

mäßigen w -Teilung eine projektive Teilung mit den Zahlen $\frac{u}{v}$ angebracht wird, erhält man ein bequemes Nomogramm für das Verhältnis $\frac{u}{v}$. Auf diese Weise kann — das ist der Hauptvorteil des N-Nomogramms — ohne logarithmische Leitern, lediglich mit gleichmäßigen Leitern $u = \lambda x$, $v = \mu y$ das Verhältnis $\frac{x}{y}$ dargestellt werden. Allgemeiner führen Leitern $u = \lambda f(x)$, $v = \mu g(y)$ zu $\frac{f(x)}{g(y)}$.

Beispiel: Für die Oleumanalyse S. 37—38 schreibt man Einwaage $z = \frac{8,006 \text{ Lauge } x}{\% \text{ Gehalt } y}$, um die Größen mit gegebenen Bereichen, x und y , durch gleichmäßige Leitern wiedergeben zu können (Abb. 39).

Festlegung des Trägers der z -Leiter:
Die Brüche $\frac{x}{y} = \frac{30}{90}, \frac{31}{93}, \dots, \frac{33^{1/3}}{100}$ haben den festen Wert $\frac{1}{3}$. Die Verbindungsgeraden ihrer x - und y -Werte schneiden sich also in ein und demselben Punkt der z -Geraden und legen ihn fest. Ähnlich

bestimmen die Brüche $\frac{x}{y} = \frac{50}{100}, \frac{45}{90}$ einen zweiten Punkt der z -Geraden. Durch die beiden Punkte kann die z -Gerade gezeichnet werden.

Projektive Teilung der z -Geraden: $z = \frac{8,006 x}{y}$ geht bei festem y aus x durch einfache Proportionalität hervor. Am bequemsten bei $y = 80,06$; dann wird nämlich $z = \frac{x}{10}$. Man projiziert also vom Punkte $y = 80,06$ die x -Punkte auf die z -Gerade und schreibt $\frac{x}{10}$ als Bezifferung dazu.

d) Drei Leitern durch einen Punkt (Büscheltafel, Abb. 40).
Als Summe von Dreiecksflächen ist $\frac{1}{2} u w \sin \delta + \frac{1}{2} v w \sin \varepsilon = \frac{1}{2} u v \sin \alpha$, also

$$\frac{\sin \varepsilon}{u} + \frac{\sin \delta}{v} = \frac{\sin \alpha}{w},$$

insbesondere für die Winkelhalbierende mit $\delta = \varepsilon = \frac{\alpha}{2}$.

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{2 \cos \frac{\alpha}{2}}{w}.$$

Bei $u = \lambda x$, $v = \lambda y$ (gleichen Maßstabseinheiten auf den äußeren Leitern), $w = \nu z$ gilt

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{y} = \frac{k}{z} \text{ mit } k = \frac{2 \lambda \cos \frac{\alpha}{2}}{\nu}$$

$\lambda \cos \frac{\alpha}{2}$ ist (Abb. 41) die Projektion der äußeren Maßstabseinheit auf

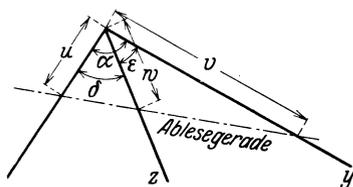


Abb. 40. Büscheltafel mit drei Leitern durch einen Punkt.

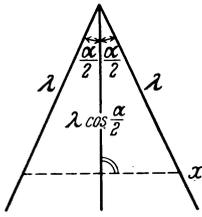


Abb. 41. Maßstabseinheiten.

die innere Leiter. Es muß also die innere Maßstabseinheit gleich $\frac{2}{k}$ mal dieser Projektion genommen werden. Z. B. brauchen für $k = 2$, also $\frac{1}{x} + \frac{1}{y} = \frac{2}{z}$ (z „harmonisches Mittel“ zu x und y) nur die Bezifferungen der äußeren Leitern auf die innere projiziert zu werden, für $k = 1$, also $\frac{1}{x} + \frac{1}{y} = \frac{1}{z}$ unter Halbierung (Abb. 42). Beziehungen vom Typus

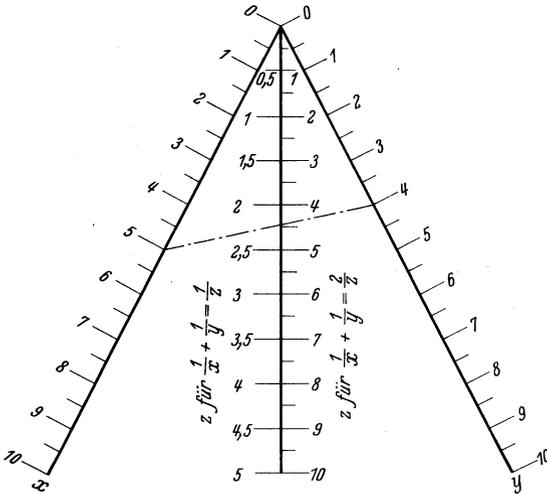


Abb. 42. Büscheltafel für $\frac{1}{x} + \frac{1}{y} = \frac{1}{z}$ oder $\frac{2}{z}$.
Beispiel: $x = 5, y = 4$, gibt $z \approx 2,2$ oder $4,4$.

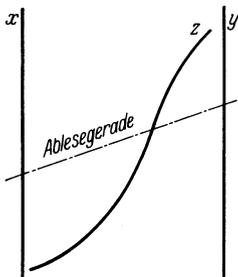


Abb. 43. Zwei parallele geradlinige Leitern, eine krummlinige Leiter.

$\frac{1}{x} + \frac{1}{y} = \frac{k}{z}$ kommen häufig vor, z. B. beim Parallelschalten von Widerständen, beim Hintereinanderschalten von Kapazitäten, beim Linsen- und Spiegelgesetz usw. Sie sind auf anderem Wege als durch das angegebene einfache Nogramm nur recht unangenehm zu behandeln.

e) Zwei geradlinige parallele Leitern, eine krummlinige Leiter (Abb. 43).

Durch diesen Nogrammtypus sind (Beweis hier übergangen) Beziehungen von der Form

$$f(x) + g(y) + h_1(z) + h_2(z) = 0$$

darstellbar¹. Der Schlüsselgleichung können auch andere Gestalten, z. B.

$$f(x) = \frac{g(y) + H_1(z)}{H_2(z)}$$

erteilt werden. Sie gilt auch, wenn die geradlinigen Leitern für x und y beliebig schief zueinander liegen. Das gibt große Freiheit und Schmiegsamkeit beim Dimensionieren. Man zeichnet sich irgendwie geradlinige x - und y -Leitern und verstreckt und verdreht sie (unter Wahrung der Geradlinigkeit) so lange, bis die punktweise

zu konstruierende krumme z -Leiter gute Lage und Einteilung hat [vgl. H. Schwerdt: Lehrbuch der Nomographie. Berlin: Julius Springer 1924].

¹ Eine Veränderliche allein, die zweite in Verbindung mit der dritten, die dritte wieder allein.

Beispiel: Nomogramm für die quadratische Gleichung $x^2 + ax + b = 0$ (Abb. 44). Die Koeffizienten a und b sind durch gleichmäßige Leitern dargestellt, die Ablesegerade schneidet auf der (hyperbolischen) x -Leiter die reellen Wurzeln ein. — Ähnliche Nomogramme lassen sich auch für höhere Gleichungen herstellen.

Von dem angegebenen Typus ist z. B. auch die Sprungsche Beziehung

$$\varphi = \frac{p_{t'} - 0,5(t - t')}{p_t} = \frac{-0,5t + [p(t') + 0,5t']}{p(t)}$$

φ relative Feuchtigkeit am Psychrometer, t Lufttemperatur, t' Temperatur des feuchten Thermometers, $p(t)$ und $p(t')$ Sättigungsdruicke für t und t' .

η) Nomogramme für mehr als drei Veränderliche. Nomogramme mit Zapfenlinie. Ein Hauptvorteil der Nomographie ist, daß ihr auch Beziehungen mit mehr als drei Veränderlichen verhältnismäßig leicht zugänglich sind. Hat man z. B. drei parallel geschaltete Widerstände x, y, z und will aus ihnen den Gesamtwiderstand nach der

$$\text{Gleichung } \frac{1}{r} = \frac{1}{x} + \frac{1}{y} + \frac{1}{z}$$

für viele x, y, z berechnen, so führt man eine Hilfsveränderliche s ein

gemäß $\frac{1}{x} + \frac{1}{y} = \frac{1}{s}$, schließt weiter $\frac{1}{s} + \frac{1}{z} = \frac{1}{r}$ und erhält zwei aneinandergehängte Büscheltafeln (Abb. 45): s wird dargestellt auf der Winkel-

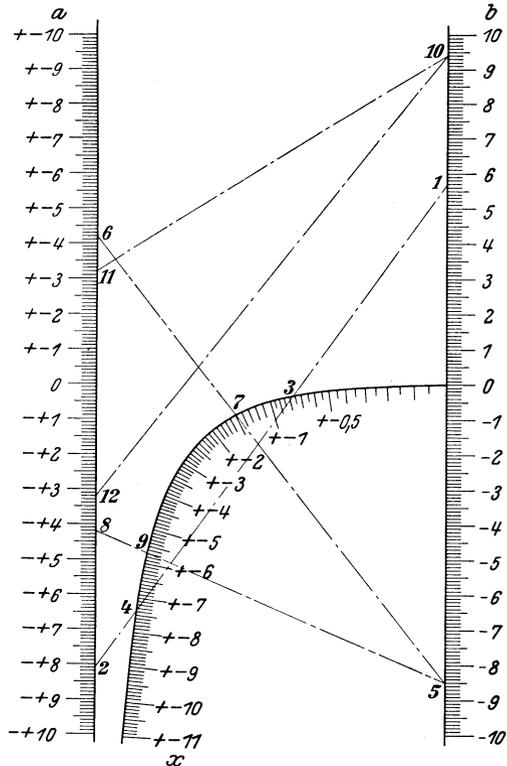


Abb. 44. Quadratische Gleichung $x^2 + ax + b = 0$.

In dem Nomogramm liefern die Ablesegeraden von b nach den beiden Punkten auf der a -Leiter mit der Bezifferung a in ihrem Schnitt mit der x -Leiter die reellen Wurzeln der Gleichung

$$x^2 + ax + b = 0.$$

Es gilt das erste oder zweite Vorzeichen einer Wurzel x , je nachdem das Vorzeichen von a an erster oder an zweiter Stelle neben dem zugehörigen Punkt der a -Leiter steht.

Schneiden beide Ablesegeraden die x -Leiter nicht, so sind die Wurzeln komplex von der Form

$$x_{1,2} = p \pm iq.$$

Beispiele:

1. $x^2 - 8,1x + 5,65 = 0$;
Ablesegerade 1-2 ergibt: $x_1 \approx + 0,77$ (Punkt 3),
 $x_2 \approx + 7,33$ (Punkt 4).

2. $x^2 + 4,2x - 8,5 = 0$;
Ablesegerade 5-6 ergibt: $x_1 \approx + 1,50$ (Punkt 7),
Ablesegerade 5-8 ergibt: $x_2 \approx - 5,68$ (Punkt 9).

3. $x^2 + 3,2x + 9,4 = 0$.

Die Ablesegeraden 10-11 und 10-12 ergeben keinen Schnittpunkt mit der x -Leiter. Die Wurzeln sind komplex.

halbierenden zur x - und zur y -Geraden; diese Winkelhalbierende dient als Seitengerade für eine neue Büscheltafel mit einer zweiten Seitengeraden für z und der Winkelhalbierenden für r . Die xyz -Büscheltafel und die

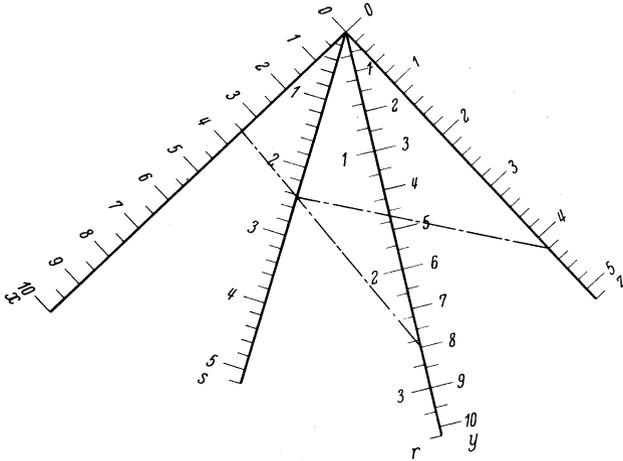


Abb. 45. Büschelnomogramm für $\frac{1}{x} + \frac{1}{y} + \frac{1}{z} = \frac{1}{r}$ mit s -Linie als Zapfenlinie.
Beispiel: $x = 3,5$; $y = 8$; $z = 4,2$ gibt $r \approx 1,55$.

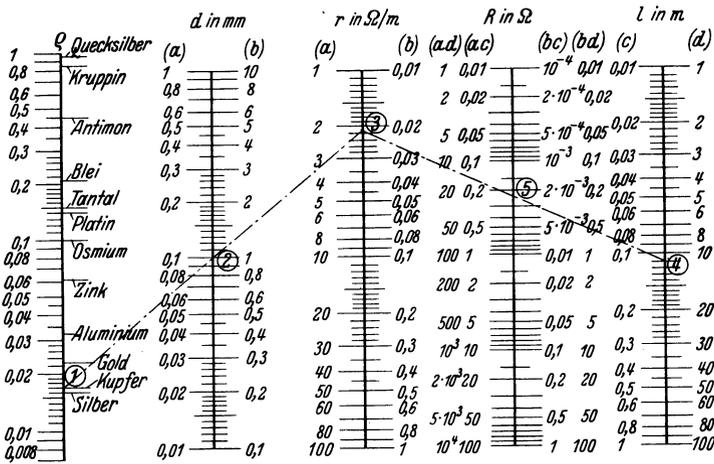


Abb. 46. Widerstand von Drähten. ρ spezifischer Widerstand in $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$, d Durchmesser in mm, $r = \frac{\rho}{\pi d^2}$ Widerstand je m in $\frac{\Omega}{\text{m}}$, l Länge in m, $R = rl$ Widerstand in Ω .

Beispiel: Kupferdraht mit $l = 11$ m, $d = 1$ mm. Ablesegerade 1...2 ergibt $r \approx 0,022 \Omega/m$ (Punkt 3), Ablesegerade 3...4 ergibt $R \approx 0,23 \Omega$ (Punkt 5).

szr -Büscheltafel hängen in der gemeinsamen s -Geraden zusammen, die einmal Ergebnisgerade, dann Ausgangsgerade ist. Man bestimmt

zunächst zu x und y durch eine Ablesegerade den Punkt s . Dann hält man den Punkt s fest und dreht die Ablesegerade um ihn, bis auf der z -Leiter z angezielt und damit auf der r -Leiter r eingeschritten wird. Der Punkt s dient als „Drehpunkt“ oder „Zapfenpunkt“. Die s -Gerade heißt deshalb Zapfenlinie. Den Zahlenwert von s braucht man offenbar gar nicht. Es genügt, wenn die Zapfenlinie gar keine Bezifferung, sondern nur beliebige genügend enge Marken trägt, damit man den Drehpunkt der Ablesegeraden mit dem Auge festhalten kann. Meist legt man noch entweder die z -Leiter oder die r -Leiter auf eine der schon vorhandenen Geraden darauf.

Nomogramme mit Zapfenlinie sind namentlich bei parallelen logarithmischen Leitern beliebt. Z. B. wählt man für den Widerstand $R = \rho \frac{l}{\frac{\pi}{4} d^2}$

eines Drahtes mit kreisförmigem Querschnitt in Abhängigkeit von der Länge l , dem Durchmesser d und dem spezifischen Widerstand ρ als — hier schon an sich bedeutsame, nicht mehr nur rechnerische — Zapfenveränderliche

$$r = \frac{\rho}{\frac{\pi}{4} d^2} \text{ den Widerstand je m, } R = rl.$$

Das gibt eine Parallelentafel für ρ, d, r und eine angehängte für r, l, R (Abb.46).

Es gehören zusammen die Bezifferungen (a) für d und (a) für r , (b) für d und (b) für r . Dann kann (a) für r mit (c) oder mit (d) für l verbunden werden: Bezifferungen (ac) oder (ad) für R ; entsprechend (bc) und (bd) bei Bezifferung (b) für r .

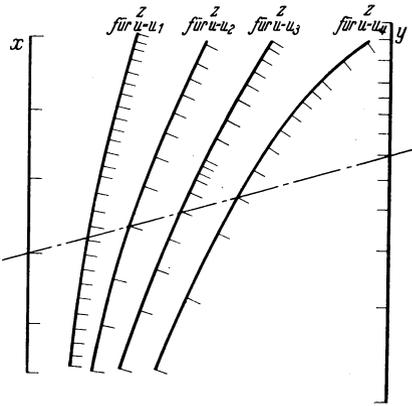


Abb. 47. Verbindung von Leiter- und Netztafel.

9) Verbindungen von Netz- und Leitertafeln. Statt Zapfennomogrammen, die sich natürlich ohne weiteres auch auf mehr als vier Veränderliche ausdehnen lassen, sind auch Verbindungen von Leitertafeln mit Netztafeln anwendbar. Wenn z. B. eine Beziehung $f(x, y, z, u) = 0$ bei festem u durch eine Tafel mit zwei geradlinigen x - und y -Leitern und einer krummlinigen z -Leiter dargestellt wird, braucht man nur (Abb. 47) die Tafeln für verschiedene $u = u_1, u_2, u_3, u_4, \dots$ so zusammenzuzeichnen, daß sich die x - und y -Leitern decken. An jede z -Leiter wird der Wert u darangeschrieben, zu dem sie gehört. Zum Gebrauch sucht man aus der Schar der nach u geordneten Kurven zunächst die für das gerade interessierende u , z. B. $u = u_2$ heraus; auf ihr als spezieller z -Leiter mit z -Bezifferung schneidet die Ablesegerade $x \dots y$ den zu u, x, y gehörigen z -Wert ein.

c) Tafeln mit Ablesekreuz. Ferner kann man für mehr Veränderliche statt der Ablesegeraden andere Ablesekurven und -vorrichtungen nehmen. Während die Ablesegerade schon durch zwei Punkte festgelegt ist, können für eine Ablesekreisschar (auf Pauspapier gezeichnet)

[vgl. S. Gradstein: Nomogramme mit kreisförmigen Weisern. Ztschr. Instrumentenkunde **53**, 172—175 (1933)] oder ein Ablesekreuz drei Punkte beliebig gewählt werden. Es sind also vier Veränderliche erfaßbar. Z. B. gilt für eine Tafel mit rechteckig angeordneten Leitern und Ablesekreuz (Abb. 48) nach Proportionsätzen

$$\frac{u - (a - w)}{b} = \frac{t - (b - v)}{a} \quad \text{oder} \quad a(u + w) - b(v + t) = a^2 - b^2.$$

Bei logarithmischen Leitern führt das zu

$$x^\alpha y^\beta z^\gamma s^\delta = \text{konst.}$$

Freilich ist das Einpassen des Ablesekreuzes auf bekannte x, y, z nicht ganz so einfach wie das Legen einer Ablesegeraden.

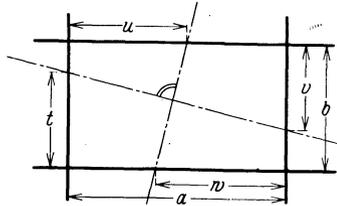


Abb. 48. Tafel mit Ablesekreuz.

In weiterer Verallgemeinerung verschiebt man ein durchsichtiges Deckblatt mit einer ganzen Leiter- oder Kurventafel (Flächenschieber, Wanderkurvenblätter, Gleitkurventafeln oder ähnliches) [vgl. vor allem H. Schwerdt: Lehrbuch der Nomographie. Berlin: Julius Springer 1924; P. Luckey: Einführung in die Nomographie; Nomographie, Math.-Phys. Bibl. Bd. 28 u. 59/60, 2. Aufl. Leipzig u. Berlin: B. G. Teubner 1925 u. 1927].

*) **Sonderschieber.** Ernsthafter Wettbewerb erwächst den Nomogrammen neuerdings durch die Sonder-(rechen-)schieber [Luckey: a. a. O. — F. Bahlecke: Sonderrechenstäbe. RKW-Veröff. 68. Berlin: Beuth-Verlag 1931], die (vgl. S. 24) ganz ähnlich gebaut sind wie der gewöhnliche Rechenschieber, nur mit speziellen Funktionsleitern für den gerade vorliegenden Zweck. Die erforderlichen Rechenschieberkörper aus Karton sind unbedruckt käuflich¹. Man versieht sie selbst mit den nötigen Teilungen. Beispiele bei Luckey und Bahlecke [vgl. auch M. Richter: Ein Rechenschieber zur Auswertung von Messungen mit dem Polarisationsphotometer. Ztschr. techn. Physik **13**, 493—494 (1932)].

III. Praktische Differential- und Integralrechnung².

1. Zeichnerisches Differenzieren.

a) **Ableitung als Steigungsmaß.** Eine beliebige, formelmäßig vielleicht gar nicht bekannte Funktion $y = f(x)$ differenzieren (ableiten) heißt, ihre Änderung bei wachsendem x nach Sinn und Stärke bestimmen

¹ Bezugsquellen: Beuth-Verlag, Berlin; Dr.-Ing. Seehase, Berlin.

² Zu diesem Abschnitt vgl. A. Walther: Einführung in die mathematische Behandlung naturwissenschaftlicher Fragen. Berlin: Julius Springer 1923. — Begriff und Anwendungen des Differentials, 2. Aufl. Leipzig u. Berlin: B. G. Teubner 1931. — A. Witting: Differentialrechnung, Integralrechnung. Sammlung Göschen 87 und 88. — R. Rothe: Höhere Mathematik. Leipzig u. Berlin: B. G. Teubner. —

(„Änderungstendenz“). Man stellt $y = f(x)$ durch eine Kurve in einem rechtwinkligen xy -Koordinatensystem dar (Abb. 49), wobei λ cm als Maßstabseinheit für x und μ cm als Maßstabseinheit für y dienen mögen¹.

Dann zeichnet man für das gerade interessierende x im Punkte $P(x, y)$ an die Kurve durch systematisch probierendes Anlegen des Lineals die Tangente. Sie schmiegt sich der Kurve in P so gut an, wie es für eine Gerade überhaupt möglich ist, und läßt für P den von Punkt zu Punkt wechselnden Anstieg (oder Abfall) der Kurve zutage treten. Um ihn zu messen, geht man von P waagrecht um die x -Einheit 1, d. h. um λ cm, nach rechts bis zum Punkte Q ; von Q senkrecht aufwärts (oder abwärts) bis zum Punkte T der Kurventangente für P reicht, im y -Maßstab gerechnet, das Steigungsmaß oder die Ableitung y' von $y = f(x)$ an der Stelle x . Das rechtwinklige Dreieck mit der waagerechten Kathete 1 und der senkrechten Kathete y' heißt Steigungsdreieck.

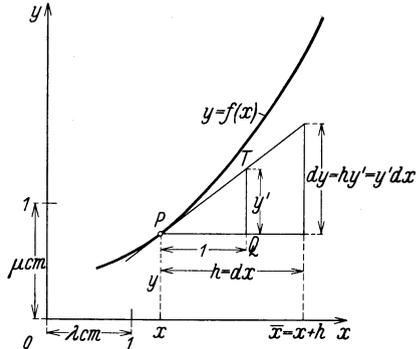


Abb. 49. Definition der Ableitung als Steigungsmaß. Differential.

Bei positivem, aufwärtsführendem y' steigt die Funktion $y = f(x)$ für wachsendes x , bei negativem, abwärtsgehendem y' fällt sie, beides um so stärker, je größer y' absolut genommen (ohne Rücksicht aufs Vorzeichen) ist.

β) Abgeleitete Kurve. Wiederholung des Verfahrens für verschiedene x und Eintragen der y' als Ordinaten in ein xy' -System liefert als Verbindungslinie der zugehörigen Punkte $P'(x, y')$ die abgeleitete Kurve $y' = f'(x)$ zu $y = f(x)$ (Abb. 50). Sie faßt die Aufschlüsse über Art und Stärke des Anstiegs von $y = f(x)$ übersichtlich zusammen. Geht sie z. B. fallend durch die x -Achse, so steigt $y = f(x)$ zunächst ($y' > 0$), hat für $y' = 0$ ein Maximum und fällt dann ($y' < 0$). Umgekehrt liegt ein Minimum von $y = f(x)$ vor, wenn die abgeleitete Kurve die x -Achse steigend durchsetzt (Abb. 50).

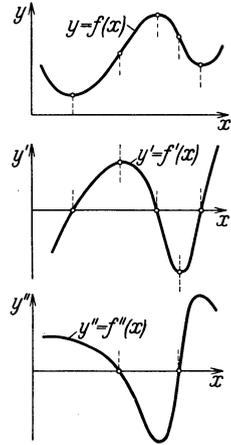


Abb. 50. Urkurve, erste und zweite abgeleitete Kurve. Steigen und Fallen, Wölbung. Maxima und Minima, Wendepunkte.

γ) Zweite Ableitung. Änderungssinn und -stärke von $y' = f'(x)$ wird durch die zweite Ableitung y'' und die zweite abgeleitete Kurve

R. Courant: Vorlesungen über Differential- und Integralrechnung, 2. Aufl. Berlin: Julius Springer 1930 und 1931. — W. Nernst, A. Schoenflies, W. Orthmann: Einführung in die mathematische Behandlung der Naturwissenschaften, 11. Aufl. München u. Berlin: R. Oldenbourg 1931.

¹ Maßstabsfragen gehören zu den wichtigsten Fragen der praktischen Mathematik und sind trotz ihrem an sich ganz elementaren Charakter teilweise recht unangenehm (vgl. z. B. S. 7–8, 19–20, 33–38, 48–49, 60).

$y'' = f''(x)$ beschrieben, die man zu $y' = f'(x)$ entsprechend konstruiert wie $y' = f'(x)$ zu $y = f(x)$ (Abb. 50, vgl. auch S. 52). Für $y = f(x)$ kennzeichnet y'' die Wölbung. Ist z. B. $y'' > 0$, so nimmt y' zu; d. h. ein steigendes Kurvenstück $y = f(x)$ mit $y' > 0$ wird steiler und ein fallendes Kurvenstück $y = f(x)$ mit $y' < 0$ wird flacher, zusammenfassend: $y = f(x)$ ist bei $y'' > 0$ von unten gesehen erhaben (konvex), umgekehrt bei $y'' < 0$ hohl (konkav). $y'' = 0$ gibt, wenn die zweite abgeleitete Kurve $y'' = f''(x)$ durch die x -Achse wirklich hindurchtritt, als Übergangspunkte zwischen Erhabenheit und Hohlheit die Wendepunkte (Abb. 50).

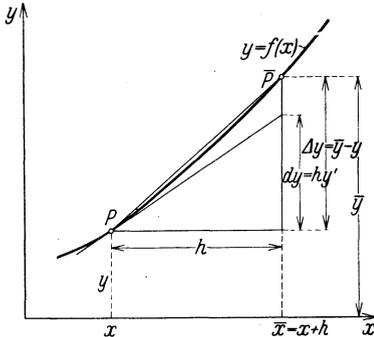


Abb. 51. Differential und Funktionsdifferenz. Sekante und Tangente.

Zeichnerisches Differenzieren und **Beschleunigungsbestimmungen** (graphische Kinematik und graphische Dynamik).

ε) Differential und Differentialquotient. Wenn die x -Einheit zu klein oder zu groß ist, um zeichnerisch bequem dargestellt werden zu können, verwendet man (Abb. 49) statt des waagerechten Schrittes 1 den x -Schritt $h = dx$. Zu ihm gehört als Erhebung das zu h mit dem Proportionalitätsfaktor y' proportionale Differential¹ $dy = h y' = y' dx$ von $y = f(x)$ an der Stelle x zur Spanne h (zum Differential dx von x). Es wird abgemessen; Division durch h liefert die Ableitung y' als Differentialquotienten $y' = \frac{h y'}{h} = \frac{dy}{dx}$.

ζ) Sekante und Tangente. Funktionsdifferenz und Differenzenquotient. Die Kurventangente ist bisher anschaulich-zeichnerisch definiert gedacht. Man legt das Lineal durch den vorher markierten Punkt P und dreht es so lange, bis es sich der Kurve in P möglichst gut anschmiegt und für das Auge nicht mehr eine Kurvensekante mit einem oder mehreren von P verschiedenen Schnittpunkten einschneidet, sondern die Kurve in P berührt. Dieses jedem Zeichner geläufige Verfahren kann auch so aufgefaßt werden (Abb. 51): Man hat zunächst eine Kurvensekante durch die Punkte P zur Abszisse x und \bar{P} zur Abszisse $\bar{x} = x + h$

¹ Das Differential hat keinerlei mystischen Beigeschmack nach „unendlich klein“ od. dgl. [vgl. A. Walther: a. a. O.].

δ) Geschwindigkeit und Beschleunigung. Ist die unabhängige Veränderliche x die Zeit t , so wird das Steigungsmaß y' gewöhnlich \dot{y} geschrieben. Es gibt die Geschwindigkeit der Änderung von y mit t , z. B. die Geschwindigkeit in der Mechanik, wenn y den geradlinig oder krummlinig gemessenen Weg bedeutet, die Reaktionsgeschwindigkeit, wenn y die umgesetzte Menge ist, usw. Die Geschwindigkeit \dot{y} , mit der sich \dot{y} ändert, heißt die Beschleunigung.

ermöglicht also Geschwindigkeits- und Beschleunigungsbestimmungen

und läßt dann $\bar{P} \rightarrow P$ wandern, also $h \rightarrow 0$ streben¹; dadurch ergibt sich als „Grenzlage“ der Sekante die Tangente. Macht man den „Grenzübergang“ $h \rightarrow 0$ rechnerisch nach, so erhält man die bekannten, in den Lehrbüchern (vgl. S. 44, Fußnote²) niedergelegten Differenzierregeln, die gestatten, zu einer formelmäßig gegebenen Funktion $y = f(x)$ auch die Ableitung (das Steigungsmaß) formelmäßig zu bestimmen. Und zwar liest man aus Abb. 51 die auch an sich bedeutsame, z. B. für die Fehlerrechnung (S. 65—69) grundlegende Tatsache ab, daß die „Funktionsdifferenz“ $\Delta y = \bar{y} - y$ angenähert gleich dem Differential $dy = hy'$ ist:

$$\Delta y \approx dy, \text{ um so genauer, je kleiner } h \text{ ist.}$$

Hieraus folgt $\frac{\Delta y}{h} \rightarrow y'$ für $h \rightarrow 0$,

die formelmäßige Definition der Ableitung als Grenzwert des Differenzenquotienten $\frac{\Delta y}{h}$; Steigungsmaß der Tangente = Grenzwert des Steigungsmaßes $\frac{\Delta y}{h}$ der Sekante. Wenn man den Unterschied $\Delta y - dy$ nach Potenzen von h entwickelt, kommt man zum Taylorschen Satz $\bar{y} = y + hy' + \frac{h^2}{2}y'' + \frac{h^3}{6}y''' + \dots$.

η) Differenzierregeln. Die wichtigsten Differenzierregeln sind, wenn $u = u(x)$, $v = v(x)$, $y = y(x)$ Funktionen von x bedeuten:

a) Allgemeine Regeln:

$y = u \pm v$	$y' = u' \pm v'$ (gliedweises Differenzieren von Summen und Differenzen)
$y = cu$	$y' = cu'$ (konstanter Faktor tritt vor)
$y = uv$	$y' = u'v + v'u$ (Produkt)
$y = \frac{u}{v}$	$y' = \frac{u'v - v'u}{v^2}$ (Quotient)
$y = f(x), x = \varphi(y)$	$\frac{dx}{dy} = 1 : \frac{dy}{dx}$ (Umkehrfunktion)
$y = f(u), u = \varphi(x), y = f[\varphi(x)]$	$\frac{dy}{dx} = \frac{dy}{du} \cdot \frac{du}{dx}$ (zusammengesetzte Funktion, Kettenregel).

b) Differenzieren besonderer Funktionen:

$y = x^\alpha$ (α beliebig)	$y' = \alpha x^{\alpha-1}$ (Potenz)
insbesondere	
$y = 1$, allgemeiner c	$y' = 0$
$y = x$	$y' = 1$
$y = x^2$	$y' = 2x$
$y = x^{\frac{1}{2}} = \sqrt{x}$	$y' = \frac{1}{2\sqrt{x}}$

¹ Man soll nacheinander h etwa $1, \frac{1}{2}, \frac{-1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{-1}{5}, \frac{-1}{6}, \frac{-1}{7}, \frac{1}{8}, \frac{1}{9}, \frac{-1}{10}, \dots$ (oder auch nur durch positive Werte abnehmend oder durch negative Werte zunehmend) wählen.

b) Differenzieren besonderer Funktionen (Fortsetzung):

$y = \frac{1}{x}$	$y' = -\frac{1}{x^2}$
$y = e^x$	$y' = e^x$ (natürliche Exponentialfunktion)
$y = a^x = e^{x \ln a}$	$y' = a^x \ln a$ (beliebige Exponentialfunktion)
$y = \ln x$	$y' = \frac{1}{x}$ (natürlicher Logarithmus)
$y = \log x$	$y' = \frac{\log e}{x} \approx \frac{0,4343}{x}$ (Zehnerlogarithmus)
$y = \sin x$	$y' = \cos x$
$y = \cos x$	$y' = -\sin x$
$y = \tan x$	$y' = \frac{1}{\cos^2 x}$

9) Gerade Linie. Eine gerade Linie fällt in ihrer ganzen Erstreckung mit ihrer Tangente zusammen (Abb. 52). Deshalb ist $y' = \text{konst} = a$ und $y = ax + b$ eine „lineare“ Funktion von x . Dabei bedeutet b den Abschnitt auf der y -Achse. Die zu x proportionale Größe ax gibt an, um wieviel sich die gerade Linie von $y = b$ für $x = 0$ bis zu dem y an der Stelle x erhoben hat.

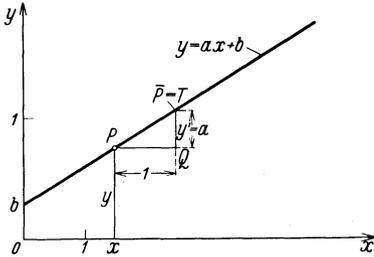


Abb. 52. Gerade Linie $y = ax + b$.

1) Winkel der Kurventangente. In der theoretischen Mathematik wird statt mit dem anschaulich ohne weiteres aufweisbaren Steigungsmaß y'

vielfach mit dem Winkel τ der Kurventangente gegen die x -Achse gearbeitet und $y' = \tan \tau$ behauptet. Diese Beziehung trifft aber nur in dem praktisch seltenen Falle gleicher Maßstäbe für x und y zu. Allgemein ist, weil die waagerechte Spanne 1 die Länge λ cm und die senkrechte Ableitung y' die Länge $\mu y'$ cm hat, $\tan \tau = \frac{\mu y'}{\lambda}$.

x) Vereinfachtes zeichnerisches Differenzieren. Maßstabsfragen. Eine wesentliche Vereinfachung für die Praxis des zeichnerischen Differenzierens besteht darin (Abb. 53), die Tangente in P nicht einzuzichnen, sondern nur anzulegen und die Parallele durch den Punkt $x = -1$ als „Pol“ abzuschleifen; sie schneidet auf der y -Achse y' ein. Statt viele einzelne Steigungsdreiecke an die Kurve anzuhängen, legt man also ein für allemal die waagerechte Kathete 1 des Steigungsdreiecks fest auf die x -Achse zwischen Pol und Ursprung und die wechselnde senkrechte Kathete y' auf die y -Achse. Wenn das xy' -System mit dem xy -System zusammengelegt, also $y' = f'(x)$ im ursprünglichen Koordinatensystem eingezeichnet wird, kann man sogleich waagrecht nach dem Punkte P' der abgeleiteten Kurve zur Abszisse x hinübergehen. Parallelenabschieben durch den Pol $x = -1$ statt $x = -h$ statt $x = -1$ entspricht der waagerechten Spanne h statt 1 und gibt auf der y -Achse $h y'$ statt y' . Unter Beibehaltung des ursprünglichen y -Maßstabes wird also die abgeleitete Kurve in der y -Richtung h fach überhöht bzw. zusammen-

gedrückt. Streckt man die ursprüngliche y -Maßstabseinheit auf das h fache, so kann man wieder $y' = f'(x)$ unmittelbar ablesen. In Formeln:

$$\begin{aligned} \text{Polabstand: } & h [\text{Dim}_x], \\ \text{y-Maßstab: } & 1 \text{ cm entspricht } a [\text{Dim}_y], \\ \text{y'-Maßstab: } & 1 \text{ cm entspricht } \frac{a}{h} \left[\frac{\text{Dim}_y}{\text{Dim}_x} \right]. \end{aligned}$$

Die freie Polwahl und Maßstabsänderung empfiehlt sich, wenn man das Zeichenblatt voll ausnutzen oder umgekehrt die abgeleitete Kurve ganz darauf behalten will. — Wer die Maßstabsfragen scheut, kann natürlich auch in Steigungsdreiecken dy abmessen, $dy:h = y'$ ausrechnen und ins $x y'$ -System eintragen. Aber das ist etwas langweilig.

2) Genauigkeit des zeichnerischen Differenzierens. Für die Genauigkeit des zeichnerischen Differenzierens sind verschiedene Umstände scharf auseinanderzuhalten.

a) Das Tangentenlegen nach Augenmaß an „wohlbestimmte“, gut gezeichnete Kurven $y = f(x)$ ist — im Gegensatz zu einer weitverbreiteten Meinung — bei sorgfältigem Arbeiten sehr genau. An einfachen Beispielen wie $y = x^2$ mit $y' = 2x$ oder $y = \sin x$ mit $y' = \cos x$ verschaffe man sich etwas Zeichenfertigkeit und Übung sowie Erfahrung über die Genauigkeit, die man persönlich erzielt.

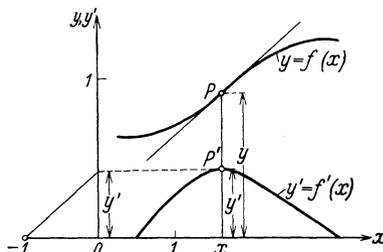


Abb. 53. Vereinfachtes zeichnerisches Differenzieren.

Wenn durch den vorher markierten Berührungspunkt außer der Geraden, die man nach bester Überzeugung für die Tangente hält, zwei weitere „einschließende“ Geraden gelegt werden, die im Zweifelsfalle gerade noch als Tangenten gelten können, schachtelt man die Ableitung in zwei Schranken ein und erhält eine Genauigkeitsschätzung. Besonders steile oder besonders stark und wechselnd gekrümmte Kurventeile werden gegebenenfalls gesondert unter Maßstabsabänderung herausgezeichnet. Das ist möglich, wenn die Kurve als wohlbestimmt durch eine feine Tabelle, eine Berechnungsvorschrift od. dgl. vorausgesetzt wird.

b) Viele, wenn nicht gar die meisten Kurven des Praktikers sind nicht „wohlbestimmt“ in dem geschilderten Sinne. Man kennt z. B. von einer Kurve $y = f(x)$ nur einzelne getrennte Punkte, etwa durch Beobachtungen. Durch diese Punkte lassen sich beliebig viele Kurven hindurchlegen. Statt einer Wellenlinie durch die Meßpunkte selbst ist oft eine Ausgleichkurve (vgl. S. 64—65) zwischen ihnen hindurch zweckmäßiger, derart, daß die Meßpunkte nach beiden Seiten entsprechend den zufälligen Beobachtungsfehlern streuen. Durch Registrierinstrumente werden infolge instrumenteller Unvollkommenheiten häufig Kurven mit Zacken oder Wellen aufgenommen, die dem Problem selbst nicht zukommen. Solche unscharfe, zitterige Kurven sind zunächst nach Augenmaß und bestem Vermögen zu glätten. Ausgleichung und Glättung setzen Takt und Erfahrung voraus. Sie müssen stets mit vorsichtiger Prüfung ihrer Zulässigkeit und mit Kritik verbunden sein.

c) Die Ableitung reagiert als Steigungsmaß auf Kurvenabänderungen weit empfindlicher als die Ordinate. Bei einer Wellenlinie durch Meßpunkte oder mancher Registrierkurve schwankt die Ableitung dauernd zwischen großen positiven und absolut großen negativen Werten hin und her. Bei der Ausgleichkurve oder geglätteten Kurve verläuft sie viel regelmäßiger. Ferner bringen, namentlich an steilen oder stark und wechselnd gekrümmten Stellen, kleine Verbiegungen, ja sogar Strichstärkeänderungen der Kurve große Unterschiede der Ableitung mit sich. Alles in allem: Differenzieren rauht auf. In der hiermit verbundenen gewissen Unsicherheit der Ableitung und noch mehr — bei Weiterdifferenzieren — der zweiten Ableitung

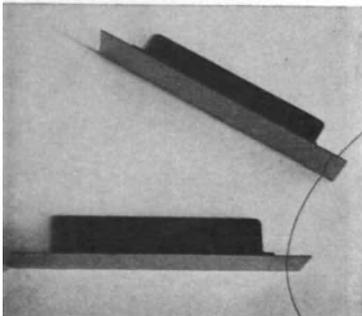


Abb. 54. Spiegellineal nach V. Blaeß.

liegt nicht, wie oft angenommen, ein Nachteil, sondern ein Vorteil des zeichnerischen Differenzierens: man wird sinnfällig davor bewahrt, durch einzelne getrennte y -Beobachtungen, durch zitterige Kurven oder bei flüchtigem Tangentenlegen die Ableitung y' als übermäßig gut bestimmt anzusehen. Das gilt auch, wenn die bekannten y selbst sehr genau sind (wichtig für das numerische Differenzieren, S. 64—65). Je genauer, etwa durch physikalische Überlegungen, der ganze Lauf von $y = f(x)$ festgelegt ist, desto besser läßt sich auch auf y' schließen. Umgekehrt muß man z. B., um über Beschleunigungsänderungen in einer Maschine, die sich als Stöße bemerkbar machen, etwas Zuverlässiges aussagen zu können, die Zeit-Geschwindigkeitskurve oder gar die Zeit-Wegkurve ganz in den Einzelheiten kennen. Auch für die Kritik von Ausgleichung und Glättung ist die Empfindlichkeit der Ableitung gegen Kurvenänderungen wertvoll.

Ziemlich roh ist es, die Tangente in P durch eine Sekante vom selben Punkte P aus, die Ableitung y' also durch einen Differenzenquotienten $\frac{\Delta y}{h}$ zu ersetzen. Allerdings hat man auf Millimeterpapier den Vorteil, die Funktionsdifferenz Δy ohne Einzeichnen der Sekante sofort als Erhebung der Kurve $y = f(x)$ vom Punkte P aus ablesen zu können. Jedenfalls sollte man sich dann aber wenigstens die unter ν), c) angegebene Verfeinerung zunutze machen.

μ) Spiegellineal. Ein zweckmäßiges instrumentelles Hilfsmittel zum zeichnerischen Differenzieren ist das Spiegellineal. Seine brauchbarste Ausführung¹ nach V. Blaeß wird durch ein Rechtwinkelleisen gebildet, dessen eine Schenkelfläche auf der Zeichenebene liegt, während die andere senkrecht dazu steht und poliert die Kurve sich spiegeln läßt (Abb. 54). Das Spiegellineal wird gewöhnlich zum Auffinden der Kurvennormale genommen. Es liegt nach dem physikalischen Spiegelungsgesetz in ihr, wenn sich das Kurvenstück davor ohne Knick in sein Spiegel-

¹ Bezugsquelle: Dipl.-Ing. G. Koehler VDI, Erfurt, Rudolfstraße 57.

bild fortsetzt. Durch eine Aussparung in der liegenden Schenkelfläche kann man gleichzeitig über die stehende Schenkelfläche hinweg den rückwärtigen Teil der Kurve anvisieren und zur Fortsetzung des Spiegelbildes machen, so daß für die Kurvennormale beide Kurventeile vor und hinter dem Spiegellineal berücksichtigt werden. Senkrecht zur Kurvennormale schiebt man dann mit dem Zeichendreieck die Kurventangente ab. Noch vorteilhafter dient das Spiegellineal zum unmittelbaren Zeichnen der Kurventangente, weil die Spiegelung das systematische Probieren beim Tangentensuchen sehr erleichtert. Dies ist wohl das genaueste Verfahren zum graphischen Differenzieren. — Mit dem „Prismenderivator“ nach K. Hoecken [1926, unveröffentlicht], A. Imhof [Schweiz. techn. Ztschr. 3, 204—205 (1928)] und E. v. Harbou [Der „Prismenderivator“ und der „Differentio-Integrator“. Ztschr. angew. Math. Mech. 10, 563—585 (1930)] erhält man nicht das Steigungsmaß der Tangente, sondern das einer kurzen Sehne.

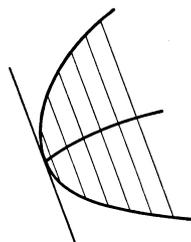


Abb. 55. Tangentenkonstruktion nach Lambert.

v) Hilfskonstruktionen zum Tangentenlegen. Die zahlreich angegebenen Hilfskonstruktionen zur Tangentenbestimmung sind für die Praxis meist zu umständlich, linienreich und zeitraubend, weil man in der Regel nicht nur eine, sondern viele Tangenten (die ganze abgeleitete Kurve) braucht. Die einfachsten sind:

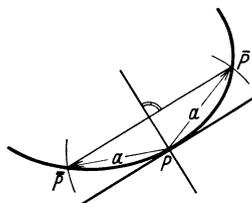


Abb. 56. Angenäherte Normalen- und Tangentenkonstruktion nach Pirani durch gleiche Sehnen.

a) Konstruktion nach Lambert (Abb. 55). Man zieht parallele Sehnen und halbiert sie. Die Verbindungskurve der Halbierungspunkte, „Schwerlinie“ genannt, mündet in den Berührungspunkt der parallelen Tangente. (Für Kegelschnitte ist die Schwerlinie geradlinig, nämlich der zur Sehnenrichtung konjugierte Durchmesser.)

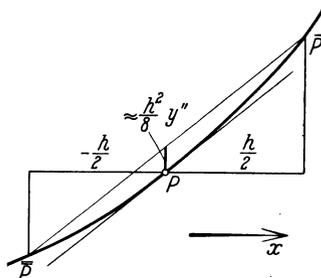


Abb. 57. Angenäherte Tangentenkonstruktion durch gleiche x -Schritte. Angenäherte Konstruktion der zweiten Ableitung nach Barkhausen.

b) Konstruktion nach Pirani durch gleiche Sehnen (Abb. 56) [M. Pirani, I. Runge: Graphische Darstellung in Wissenschaft und Technik, 2. Aufl. Sammlung Götschen 728, S. 24—25]. Mit dem Zirkel markiert man zwei um gleiche, passend lange

Sehnen a beiderseits von P entfernte Punkte \bar{P} und \bar{P} auf der Kurve und zieht durch P die Parallele zu $\bar{P}\bar{P}$. (Weder $\bar{P}P$ noch $P\bar{P}$ noch $\bar{P}\bar{P}$ einzeichnen.) Sie ist angenähert die Kurventangente, das Lot von P auf $\bar{P}\bar{P}$ angenähert die Kurvennormale. (Exakt für Kreis und Gerade; näherungsweise richtig für kreis- und geradenersetzbare Kurvenbögen; brauchbar auch für die sonst unangenehmen flachen Kurvenbögen.)

c) Konstruktion durch gleiche x -Schritte (Abb. 57) [vgl. A. Walther: Ein einfaches Verfahren zur Bildung von Differentialkurven. Ztschr. VDI 75, 1397—1398 (1931)]. Wie bei Pirani, nur geht man statt um gleichlange Sehnen um gleichlange x -Schritte $\frac{h}{2}$ und $-\frac{h}{2}$

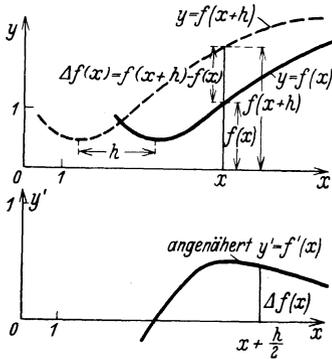


Abb. 58. Angenäherte Konstruktion der abgeleiteten Kurve nach Slaby als Differenzkurve.

von P nach \bar{P} und $\bar{\bar{P}}$. (Bequem auf Millimeterpapier, exakt für eine Parabel mit Achse in y -Richtung, näherungsweise richtig für parabelersetzbare Kurvenbögen.) Man nimmt also das Steigungsmaß der Sehne $\bar{P}\bar{P}$ näherungsweise als Steigungsmaß der Tangente in der Mitte des Intervalls, Mitte verstanden in x -Richtung. Oder man verschiebt nach Slaby die Kurve $y = f(x)$ um h nach links, z. B. mittels Pauspapier (Abb. 58), erhält dadurch die Kurve $y = f(x + h)$ und an der Stelle x die Ordinatendifferenz $\Delta f(x) = f(x + h) - f(x)$. Die Kurve mit dieser Differenz als Ordinate liefert, wenn sie um $\frac{h}{2}$ nach

rechts verschoben wird und die Maßstabseinheit für y' das h fache der Maßstabseinheit für y beträgt, angenähert die abgeleitete Kurve $y' = f'(x)$. Man kann auch $\frac{\Delta f(x)}{h}$ mit dem Rechenschieber ausrechnen und bei gleichem Maßstab für y' wie für y als Ordinate in $x + \frac{h}{2}$ nehmen.

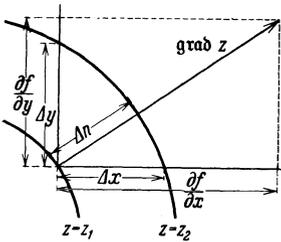


Abb. 59. Gradient.

§) Unmittelbare Bestimmung der zweiten Ableitung. Höchstfehler bei linearer Interpolation. Das senkrechte Stück in P zwischen der Kurve und der Sehne $\bar{P}\bar{P}$, im y -Maßstab gerechnet (Abb. 57), gibt nach Barkhausen, durch das Quadrat der x -Spanne h zwischen \bar{P} und \bar{P} dividiert, angenähert $\frac{1}{8} y''$

im Punkte P (unmittelbare Bestimmung der zweiten Ableitung, exakt für eine kubische Parabel mit Achse in y -Richtung, sonst näherungsweise richtig). Unbequem ist meist die Kleinheit der senkrechten Strecke, sie leistet auch Ungenauigkeiten Vorschub. Oft bringt ja aber schon eine mehr qualitative, ziemlich rohe Kenntnis der zweiten Ableitung Nutzen. — Nach Abb. 57 gibt $\frac{h^2}{8} y''$ näherungsweise den bei Ersatz der Kurve $y = f(x)$ durch die Sehne, d. h. bei linearer Interpolation möglichen Höchstfehler, wobei h die Spanne bedeutet, mit der man die Funktionswerte in einer Zahlentafel kennt.

o) Partielle Ableitungen. Gradient. Bei einer Funktion $z = f(x, y)$ von zwei Veränderlichen x und y bestimmt man die partiellen

Ableitungen $z_x = \frac{\partial f}{\partial x}$ bei festgehaltenem y und $z_y = \frac{\partial f}{\partial y}$ bei festgehaltenem x dadurch, daß man z. B. in einem xz -Koordinatensystem die Kurven $z = f(x, y_1)$, $z = f(x, y_2)$, ... für konstantes $y = y_1, y_2, \dots$ (die Schnittkurven der Fläche $z = f(x, y)$ im xyz -System mit Ebenen $y = \text{konst.}$, vgl. S. 30) zeichnet und graphisch differenziert. Die abgeleiteten Kurven geben z_x für $y = y_1, y_2, \dots$. Statt dessen kann man auch im xy -System die Funktion $z = f(x, y)$ durch Niveaulinien (Höhenlinien) $z = \text{konst.} = z_1, z_2, \dots$ darstellen (Netztafel, vgl. Abb. 29). Geht man (Abb. 59) in der x -Richtung von einer z -Linie z_1 zur nächsten z_2 , so ist die Differenz $z_2 - z_1 = \Delta z$, geteilt durch den x -Schritt Δx , ein Näherungswert für die „Änderungstendenz in x -Richtung“ $\frac{\partial f}{\partial x}$, um so genauer, je feiner die z -Darstellung ist. Analog für die y -Richtung und $\frac{\partial f}{\partial y}$. Legt man $\frac{\partial f}{\partial x}$ in die x -Richtung und $\frac{\partial f}{\partial y}$ in die y -Richtung und bildet aus ihnen nach der Regel vom Kräfteparallelogramm als Diagonale einen „Vektor“, dessen „Komponenten“ $\frac{\partial f}{\partial x}$ und $\frac{\partial f}{\partial y}$ sind, so ist er der „Gradient“ $\text{grad } z$ der Funktion z mit der Länge $\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}$. Er kann näherungsweise auch so gewonnen werden, daß man von der Linie z_1 zur Linie z_2 in der Normalenrichtung um Δn fortschreitet und $\frac{\Delta z}{\Delta n}$ als Vektor in die Normale legt (streng $\frac{\partial z}{\partial n}$ bei Grenzübergang $\Delta n \rightarrow 0$).

Bedeutung des Gradienten: Er gibt durch seine Richtung (Normalenrichtung) die Richtung stärksten Anstiegs der Funktion z und durch seine Länge $\left|\frac{\partial z}{\partial n}\right| = \sqrt{z_x^2 + z_y^2}$ die Intensität. Gewöhnlich nennt man in diesem Zusammenhange die Zahl z im Gegensatz zu dem mit Richtung behafteten Vektor $\text{grad } z$ einen Skalar und die Zuordnung der Zahlen z zu den Punkten x, y ein Skalarfeld. (Beispiel: Temperaturverteilung in einer ebenen Platte od. dgl.) Wenn zwischen den einzelnen Niveaulinien (z. B. Linien konstanter Temperatur) z immer um dieselbe Größe Δz zunimmt, ist der Gradient angenähert umgekehrt proportional dem Linienabstand Δn . Beispiel: $z = \text{elektrisches Potential}$, dann ist der Gradient die negative elektrische Feldstärke \mathcal{E} und dem Betrage nach um so größer, je enger die Potentiallinien liegen. Tiefer werden diese — ohne weiteres auf drei unabhängige Veränderliche x, y, z ausdehnbaren — Dinge in der Vektorrechnung und in der Theorie der Felder untersucht [vgl. A. Haas: Vektoranalysis, 2. Aufl. Berlin u. Leipzig: W. de Gruyter & Co. 1929. — M. Lagally: Vorlesungen über Vektorrechnung. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft 1928].

τ) Vollständiges Differential. Die Zusammenfassung $dz = z_x dx + z_y dy$ nennt man das vollständige Differential der Funktion $z = f(x, y)$. Es gibt als Überlagerung der Änderung $z_x dx$ in x -Richtung, „Änderungstendenz“ z_x mal „Änderungsstrecke“ dx , und der Änderung $z_y dy$ in y -Richtung näherungsweise die Funktionsdifferenz Δz , d. h.

die Änderung von z bei Änderung von x um dx , von y um dy , und zwar um so genauer, je kleiner dx und dy sind (grundlegend für die Fehlerrechnung S. 65—69). Vgl. auch S. 64.

Für $f(x, y) = \text{konst}$ erhält man die praktisch sehr wichtige Regel vom Differenzieren einer Gleichung: $f_x dx + f_y dy = 0$ gibt $y' = \frac{dy}{dx} = -\frac{f_x}{f_y}$.

2. Zeichnerisches Integrieren.

a) Unbestimmtes Integral. Integrationskonstante. Integrieren kann zunächst als Umkehrung des Differenzierens aufgefaßt werden: Man kennt von einer Funktion $y = f(x)$ das Steigungsmaß, dargestellt durch die abgeleitete Kurve $y' = f'(x)$, und will von ihm zur Urkurve, Stammkurve oder Integralkurve $y = f(x)$ selbst zurückgehen. Durch die Forderung, den vorgeschriebenen Anstieg $y' = f'(x)$ zu haben, wird offenbar $y = f(x)$ nur bis auf eine willkürliche additive Konstante, die Integrationskonstante C festgelegt; denn jede aus y durch Auf- oder Abwärtsschieben in der y -Richtung entstehende Kurve $y + C$ behält ja das Steigungsmaß. Man schreibt $\int f'(x) dx$, unbestimmtes Integral von $f'(x)$, für jede Funktion $f(x) + C$ mit dem Steigungsmaß $f'(x)$. Aus einem Schatze von Differenziererergebnissen entstehen durch bloßes Umschreiben ebensoviele Integrierformeln, und dieses Zurückgreifen auf Differenziererergebnisse ist ein Hauptverfahren der formelmäßigen Integralrechnung. Z. B. gestattet die Erinnerung an die Differenzierformel $(x^2)' = 2x$ sofort zu schließen $\int 2x dx = x^2 + C$. Während aber die formelmäßige Bestimmung der Ableitung durch die Differenzierregeln zu jeder formelmäßig bekannten Funktion $y = f(x)$ möglich ist, lassen die umgekehrten Integrierregeln oft im Stich: es sind viele einfache Steigungsmaße $y' = f'(x)$ angebbar, die zu keiner der zunächst in Betracht gezogenen Funktionen $y = f(x)$ den Anstieg beschreiben.

β) Integrierregeln. Die wichtigsten Integrierregeln sind:

a) Allgemeine Regeln:

$$\int (u \pm v) dx = \int u dx \pm \int v dx \quad (\text{gliedweises Integrieren von Summen und Differenzen})$$

$$\int c u dx = c \int u dx \quad (\text{konstanter Faktor tritt vor})$$

$$\int u' v dx = uv - \int u v' dx \quad \text{oder} \quad \int v du = uv - \int u dv \quad (\text{Teilintegration})$$

$$\int f(u) du = \int f[\varphi(x)] \varphi'(x) dx \quad (\text{Substitution einer neuen Veränderlichen}).$$

b) Integrieren besonderer Funktionen:

$$\int x^\alpha dx = \frac{x^{\alpha+1}}{\alpha+1} + C \quad (\text{Potenz, } \alpha \neq -1)$$

$$\int \frac{dx}{x} = \ln x + C \quad (\text{natürlicher Logarithmus})$$

$$\int e^x dx = e^x + C \quad (\text{Exponentialfunktion})$$

$$\left. \begin{aligned} \int \cos x \, dx &= \sin x + C \\ \int \sin x \, dx &= -\cos x + C \end{aligned} \right\} \text{(trigonometrische Funktionen)}$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}} = \arcsin x + C = -\arccos x + K$$

$$\int \frac{dx}{1+x^2} = \arctan x + C.$$

γ) Rückweg von der abgeleiteten Kurve zur Urkurve über den Anstieg.

Integraph. Formelmäßig ist man für das Integrieren auf die Rückerkennung an Differenzierergebnisse angewiesen. Anschaulich folgt aus der Ordinate y' der abgeleiteten Kurve $y' = f'(x)$ durch ein Steigungsdreieck (Herübergehen nach der y' -Achse und Verbinden mit dem Pol $x = -1$) sofort die Richtung der Tangenten aller Stammkurven $y + C$, das Richtungsfeld in der xy -Ebene (Abb. 60). Problematisch aber ist folgendes: Wenn man eine Stammkurve für $x = a$ mit irgendeiner Ordinate y_0 — irgendeiner entsprechend der Willkür der Integrationskonstanten mit ihrer Möglichkeit des Auf- und Abwärtschiebens der Integralkurve — und der zugehörigen Richtung beginnt, muß man „sofort“ stetig zur „nächsten“ Richtung umbrechen, dann von dieser wieder zur nächsten usw. Dieses stetige Umbrechen bildet die Schwierigkeit. Instrumentell wird es geleistet durch den Integraphen

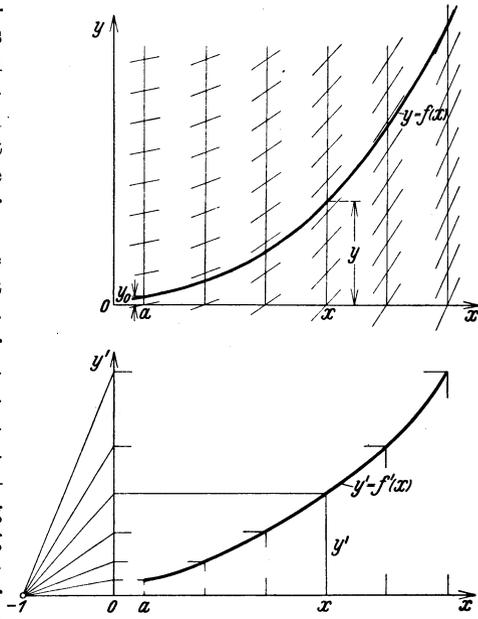


Abb. 60. Rückweg von der abgeleiteten Kurve zur Urkurve lediglich mittels des Anstiegs. Richtungsfeld. Willkür der Integrationskonstanten.

[Ausführungen von Coradi in Zürich und neuerdings von Ott in Kempten; vgl. Fr. A. Willers: Mathematische Instrumente. Sammlung Götschen 922], bei dem man durch einen auf $y' = f'(x)$ geführten Fahrstift die senkrechte Kathete y' eines gelenkigen Steigungsdreiecks mit fester waagerechter Kathete l stetig abändert. Die Hypotenuse stellt sich dann stetig wechselnd in die Tangentenrichtung von y . Eine mit ihr verbundene parallele scharfe Rolle rollt in der Integralkurve und zeichnet sie. Ohne dieses Instrument hingegen können rein zeichnerisch nur einzelne ausgewählte y' herausgegriffen werden. Sie ganz eng aufeinanderfolgen zu lassen, verbietet die damit verbundene Anhäufung kleiner Zeichenfehler. Dann aber weiß man nicht, wo man von der Anfangsrichtung zur nächsten Richtung umbrechen soll, wo von dieser wieder zur nächsten usw. Man könnte in Ermangelung von etwas Besserem jeweils in der Mitte der x -Spanne

zwischen den herausgegriffenen y' umbrechen. Dadurch gewinnt man einen Näherungs-Streckenzug¹ an y , der aus Tangentenstücken von etwas gegen- einander verschobenen Integralkurven zu- sammengesetzt ist. Jedenfalls sieht man, daß der Rückweg von y' zu y lediglich mittels des Anstiegs mangelhaft ist. Zur Tangentenkette einer einzigen Integral- kurve wird der Streckenzug erst durch ge- eignete Wahl der Umbruchstellen (vgl. §).

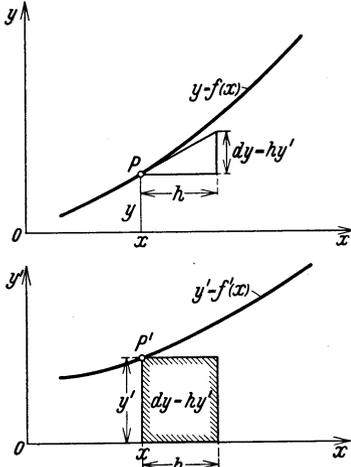


Abb. 61. Differential als Erhebung an der Urkurve, als Rechteck an der abgeleiteten Kurve.

d) Differential als Rechteck an der abgeleiteten Kurve. Bestimmtes Integral. Zu passenden Umbruchstellen verhilft die Ausdeutung (Abb. 61) des Differentials $dy = h y'$, das bisher an der Urkurve $y = f(x)$ als Erhebung von der Waagerechten bis zur Tangente auftrat, als Rechteck an der abgeleiteten Kurve [vgl. A. Walther: Einführung in die mathematische Behandlung naturwissenschaftlicher Fragen. Berlin: Julius Springer 1928]. Denn eine Differentialsumme (Abb. 62)² $\sum dy = \sum h y'$ ist

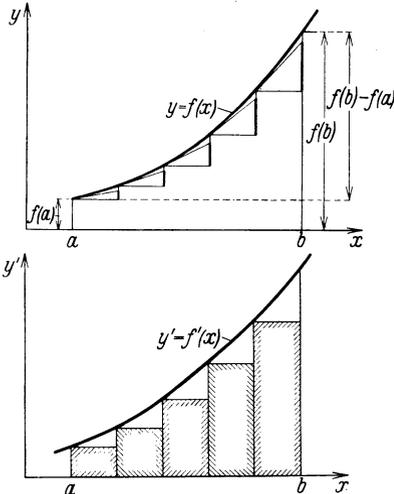


Abb. 62. Differentialsumme als Erhebungssumme an der Urkurve, als Rechtecksumme an der abgeleiteten Kurve. Fläche $\int_a^b f'(x) dx$ der abgeleiteten Kurve = Höhenunterschied $f(b) - f(a)$ der Urkurve.

einmal als Erhebungssumme an $y = f(x)$ beinahe die Gesamterhebung $f(b) - f(a)$ der Urkurve y zwischen a und b , zum anderen als Rechtecksumme an $y' = f'(x)$ beinahe die Fläche unter der abgeleiteten Kurve,

beides um so genauer, je kleiner die verwendeten h sind. Bei Grenzübergang $h \rightarrow 0$ folgt:

Fläche der abgeleiteten Kurve $y' = f'(x)$ zwischen den Ordinaten für $x = a$ und $x = b$

gleich Höhenunterschied $f(b) - f(a)$ der Urkurve $y = f(x)$ zwischen $x = a$ und $x = b$.

Die Urkurve $y = f(x)$ ist also außer dadurch, daß ihr Anstieg durch $y' = f'(x)$ beschrieben wird, noch dadurch gekennzeichnet, daß ihre [von $f(a)$ aus gerechneten] Ordinaten den (von $x = a$ aus genommenen) Flächeninhalt zu $y' = f'(x)$ messen (Fundamental-

¹ Er ist das zeichnerische Gegenbild der rechnerischen sog. Sehmentrapezregel.
² Das Summenzeichen Σ fordert, der dahinterstehenden Größe die verschiedenen möglichen Werte beizulegen und diese zu summieren.

satz der Differential- und Integralrechnung). Man schreibt diese Fläche (in Erinnerung an die Ausschöpfung durch die Rechtecksumme)

$\int_a^b f'(x) dx$ mit stilisiertem S als Summenzeichen und nennt $\int_a^b f'(x) dx$ das bestimmte Integral von $y' = f'(x)$ zwischen den Grenzen a und b . Ferner schreibt man gewöhnlich die in der Integralrechnung gegebene Funktion $y = f(x)$ statt $y' = f'(x)$ und dazu als Stammfunktion $Y = F(x)$ statt $y = f(x)$.

e) Fundamentalsatz der Differential- und Integralrechnung in der formelmäßigen und in der praktischen Mathematik. Die Bedeutung des auf zeichnerisch-anschaulichem Wege mühelos gewonnenen Fundamentalsatzes der Differential- und Integralrechnung wird am klarsten durch seine Anwendungen:

a) In der formelmäßigen Mathematik dient er meist dazu, von \int_a^b zu \int_a^b zu gehen, d. h. den Flächeninhalt $\int_a^b f(x) dx$ zur Kurve $y = f(x)$ durch Vermittlung des Steigungsmaßes zu bestimmen. Der unmittelbare Grenzübergang zur Gewinnung des bestimmten Integrals $\int_a^b f(x) dx$, nämlich die Ausschöpfung durch eine Rechtecksumme, wird ersetzt durch Rückgriff auf den zur Gewinnung des Anstiegs in der Differentialrechnung vorgenommenen Grenzübergang Sekante \rightarrow Tangente. Man verschafft sich durch Rückerinnern an Differenzierergebnisse oder durch die — allerdings teilweise wenig zugkräftigen — Integrierregeln eine Funktion $\int f(x) dx$ [ein unbestimmtes Integral von $y = f(x)$], z. B. $Y = F(x)$, allgemein $F(x) + C$, deren Steigungsmaß (Ableitung) $y = f(x)$ ist. Dann ist der Flächeninhalt die Differenz $F(b) - F(a)$ der Werte von $Y = F(x)$ für $x = b$ und $x = a$, gewöhnlich $[F(x)]_a^b$ oder $F(x)|_a^b$ geschrieben:

$$\int_a^b f(x) dx = \left[\int f(x) dx \right]_a^b.$$

Beispiel: Flächeninhalt zur Kurve $y = 3x^2$ zwischen a und b . Da $3x^2$ beim Differenzieren als Steigungsmaß für $Y = x^3$ auftritt, ist

$$\int_a^b 3x^2 dx = x^3 \Big|_a^b = b^3 - a^3.$$

Für solche Flächeninhalte interessiert man sich deshalb, weil ihre Definition als Grenzwert einer Rechtecksumme bei $h \rightarrow 0$ typisch ist (Abb. 63). Viele Größen wie Arbeit, Entropie, Potential, Volumen, Trägheitsmoment usw. sind zunächst als Produkt $(b - a) \cdot y$ mit konstantem y erklärt. Was wird daraus bei veränderlichem $y = f(x)$? Man zerschneidet die Spanne $b - a$ in Teilstücke $x_{\nu+1} - x_\nu$, baut eine Summe $\sum (x_{\nu+1} - x_\nu) f(x_\nu)$ auf und geht zur Grenze immer feinerer Zerschneidung über, bildet, wie man manchmal sagt, eine „Summe unendlich

vieler unendlich kleiner Größen“; diese aber ist gerade das bestimmte Integral $\int_a^b f(x) dx$.

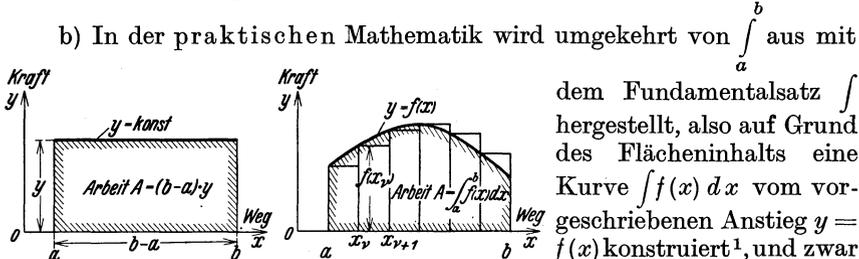


Abb. 63. Bedeutung des bestimmten Integrals. Arbeit einer konstanten Kraft y als Produkt $(b-a) \cdot y$, einer veränderlichen Kraft $y = f(x)$, als bestimmtes Integral $\int_a^b f(x) dx$.

α) den Flächeninhalt auf Millimeterpapier zwischen $x = a$ und $x = b$ aus, trägt ihn als Ordinate für $x = b$ auf und verfährt so für veränderliches b . Die erhaltene Flächeninhaltskurve $Y = F(x)$ ist gleichzeitig eine Stammkurve, deren Anstieg durch $y = f(x)$ beschrieben wird. Oder

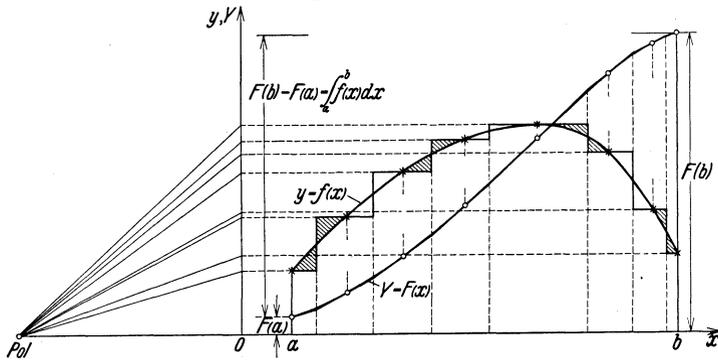


Abb. 64. Zeichnerisches Integrieren.

β) man verwendet statt des Auszählens ein Planimeter (Genauigkeit etwa 3‰, vgl. S. 61—62) oder

γ) Wägen (Vergleich mit einer bekannten Fläche auf demselben Papier, Genauigkeit im allgemeinen schlechter als 1%, hängt sehr von Homogenität und Feuchtigkeit des Papiers ab) oder

¹ Auch in der formelmäßigen Mathematik kommt so etwas vor, wenn man nämlich durch Integrale neue Funktionen definiert. So kann man z. B. den natürlichen Logarithmus $\ln x$, d. h. eine Funktion mit der wider Erwarten nicht als Steigungsmaß einer Potenz vorkommenden Ableitung $\frac{1}{x}$, besonders zwanglos als Flächeninhalt der gleichseitigen Hyperbel von der unteren Grenze 1 bis zur veränderlichen oberen Grenze x einführen [vgl. A. Walther: Einführung ...].

δ) numerisches Integrieren [vgl. die Literaturangaben S. 65, vor allem auch A. Witting: Integralrechnung. Sammlung Göschen 88]. Am empfehlenswertesten schließlich ist

ε) die graphische Integration, welche die Tatsachen über den Flächeninhalt zur geeigneten Wahl der Umbruchstellen beim Wege über den Anstieg von S. 55—56 heranzieht wie folgt:

ζ) **Praktische Regel zum zeichnerischen Integrieren** (Abb. 64). Auf der gegebenen Kurve $y = f(x)$ werden nicht zu nahe beieinander liegende Punkte ausgewählt. Anfangspunkt, Endpunkt, etwaige Gipfel- und Talpunkte müssen vorkommen.

Durch diese Punkte zeichnet man Waagerechte und schaltet nach Augenmaß oder mit Hilfskonstruktionen (s. unten) solche Senkrechte ein, daß paarweise flächengleiche „Zwickel“ entstehen. Die waagerechten Strecken mit den senkrechten Zwischenstücken bilden eine „Treppenkurve“.

Die Treppenkurve wird durch Umkehr der Anstiegsdefinition genau integriert, d. h. ein Streckenzug aus geradlinigen Stücken gezeichnet, für deren jedes das Steigungsmaß vermittels eines Steigungsdreiecks durch ein entsprechendes waagerechtes Stück der Treppenkurve geliefert wird. Die Knickstellen folgen aus den Sprungstellen der Treppenkurve.

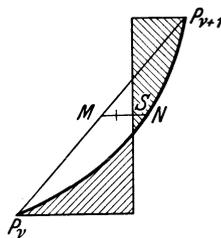


Abb. 65. Näherungsweise Zwickelabgleich.

Der Streckenzug ist die Tangentenkette einer Integralkurve zu $y = f(x)$ und berührt sie senkrecht über oder unter den ausgewählten Punkten.

Begründung: Für die ausgewählten Punkte stimmen die Kurve $y = f(x)$ und die Treppenkurve in Flächeninhalt und Ordinate überein, also die Integralkurve zu $y = f(x)$ und der Streckenzug in Erhebung und Steigungsmaß.

In die Tangentenkette mit Berührungspunkten läßt sich die Integralkurve zu $y = f(x)$ leicht und äußerst genau einzeichnen. Die erste Tangente, deren Berührungspunkt zur Anfangsabszisse a gehört, darf in beliebiger Höhe angesetzt werden (Willkür der Integrationskonstanten). Der Höhenunterschied $F(b) - F(a)$ der Integralkurve $Y = F(x)$ zwischen Anfangsabszisse a und Endabszisse b gibt die Maßzahl der Fläche des

bestimmten Integrals $\int_a^b f(x) dx$.

η) **Zwickelabgleich** nach Augenmaß (recht genau, deshalb durchaus empfehlenswert; das Auge vermag die Gleichheit kleiner benachbarter Flächen überraschend gut zu beurteilen) oder durch Näherungskonstruktion wie folgt: Man verbindet (Abb. 65) zwei auf $y = f(x)$ ausgewählte Punkte P_v und P_{v+1} und drittelt die waagerechte Strecke MN von der Mitte M der Kurvensehne $P_v P_{v+1}$ bis zur Kurve. Dann läuft näherungsweise durch den der Kurve nächsten Teilpunkt S die senkrechte Zwischenstrecke der beiden flächengleichen Zwickel zwischen P_v und P_{v+1} . Streng trifft dies zu, wenn der Kurvenbogen einer Parabel

zweiter Ordnung mit waagerechter Achse angehört, sonst näherungsweise, und zwar sehr genau, weil sich in bezug auf den Flächeninhalt eine beliebige Kurve gut durch Parabelbögen ersetzen läßt. Man kann auch erst die zu $P_\nu P_{\nu+1}$ parallele Tangente abschieben und N auf ihr statt auf der Kurve wählen. Dann ist die Konstruktion streng richtig für einen Parabelbogen zweiter Ordnung mit beliebig gerichteter Achse. — Punkte P_ν nicht zu eng nehmen; ziemlich weite P_ν vermeiden Häufung von Zeichenungenauigkeiten und liefern wegen der Genauigkeit des Zwickelabgleiches vorzügliche Ergebnisse.

9) **Genauigkeit des zeichnerischen Integrierens.** Das zeichnerische Integrieren nach dem Tangentenkettenverfahren mit Zwickelabgleich ist eine der bequemsten und genauesten Operationen der ganzen praktischen Mathematik, von so hoher Genauigkeit, wie sie zeichnerisch überhaupt erreicht werden kann. Das liegt letzten Endes im Wesen der Integration begründet. Während das Differenzieren im Anstieg sozusagen eine mikroskopische Kurveneigenschaft betrachtet (vgl. S. 49—50, sowie die rechnerische Ableitungsdefinition durch Zusammenrücken zweier Kurvenpunkte) und daher kleine Unregelmäßigkeiten stark betont — „Differenzieren rauht auf“ — wirkt das Integrieren „ausbügelnd“. Auch bei sehr schwankenden Kurven hat der Flächeninhalt einen ziemlich ruhigen Verlauf — „Integrieren glättet“. Wichtig ist das zeichnerische Integrieren, außer unmittelbar, namentlich als Hilfsmittel bei dem höheren Problem der praktischen Behandlung von Differentialgleichungen, weil sich dort eine erste rohe Näherungslösung durch Integrieren schrittweise beliebig verbessern läßt [vgl. C. Runge: Graphische Methoden, 2. Aufl. Leipzig u. Berlin: B. G. Teubner 1919. — Fr. A. Willers: Graphische Integration. Sammlung Göschen 801].

t) **Polverschiebung. Maßstabsfragen.** Links- oder Rechtsschieben des Pols nach $x = -k$ statt $x = -1$ bedeutet, daß sämtliche Steigungsmaße der Integralkurve auf das $\frac{1}{k}$ fache gebracht werden. Im ursprünglichen y -Maßstab werden also auch die Ordinaten der Integralkurve (genauer ihre Unterschiede gegenüber der Anfangsordinate) auf das $\frac{1}{k}$ fache abgeändert. Um das Integral Y selbst abzulesen, muß man für Y die Maßstabseinheit $\frac{1}{k}$ mal so groß wählen wie für y , also¹:

Polabstand: k [Dim _{x}],

y -Maßstab: 1 cm entspricht a [Dim _{y}],

Y -Maßstab: 1 cm entspricht $a \cdot k$ [Dim _{x} · Dim _{y}].

Auf- oder Abwärtsschieben des Pols (Abb. 66) nach $x = -1$, $y = -c$ bewirkt Addition der linearen Funktion $c(x - a)$ zur Integralkurve und ist wichtig für die mehrfache Integration (zur Bestimmung von statischen und Trägheitsmomenten), in der graphischen Statik und zum

¹ Manchmal wird empfohlen, den Pol ganz zu vermeiden. Man soll an der Treppenkurve (nach Zwickelabgleich) die Ordinaten und die waagerechten Strecken abmessen, die zugehörigen Rechtecksinhalte ausrechnen und — in passendem Maßstab — als aufeinanderfolgende Erhebungen der Integralkurve verwenden, von der man hierdurch freilich nur Punkte, aber keine Tangenten erhält.

Auffinden der mittleren Ordinate von $y = f(x)$. Man verbindet Anfangs- und Endpunkt der Y -Kurve durch die „Schlußlinie“; die Parallele durch den Pol schneidet auf der y -Achse, von 0 aus gerechnet,

die mittlere Ordinate $y_m = \frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx$ ein, die als Rechteckshöhe

zur Grundlinie $b - a$ genommen denselben Flächeninhalt liefert wie die Kurve $y = f(x)$ zwischen a und b . Die Ordinatenstücke von der Schlußlinie aus gerechnet geben das an beiden Rändern $x = a$ und $x = b$ verschwindende Integral für die auf die Waagerechte der mittleren Ordinate als Abszissenachse bezogene Kurve $y = f(x)$ („Randwertaufgabe“).

Wenn auf der x -Achse nicht x selbst, sondern (mit einer passenden Maßstabseinheit) $\log x$ aufgetragen ist (logarithmische x -Teilung, vgl. S. 20, gedrehtes Exponentialpapier, vgl. S. 6—7), so erhält man wegen $\log x \approx 0,4343 \ln x$ und

$d(\log x) \approx 0,4343 \frac{dx}{x}$ beim Integrieren

$\int y d(\log x) \approx 0,4343 \int \frac{y}{x} dx$, also das

Integral über das Verhältnis $\frac{y}{x}$. Auf

diese Weise kann zu gegebener spezifischer Wärme $c(T)$ für die absolute Temperatur T die Entropie

$S = \int \frac{dQ}{T} = \int \frac{c}{T} dT$ bestimmt werden.

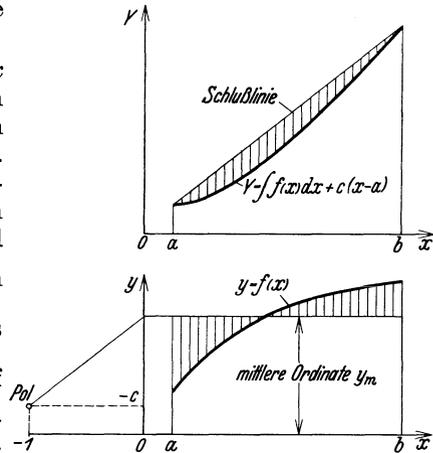


Abb. 66. Beliebige Polwahl. Bestimmung der mittleren Ordinate.

*) **Planimeter.** Als Instrumente zur Integration sind schon erwähnt worden [vgl. Fr. A. Willers: Mathematische Instrumente. Sammlung Göschen 922]: der Integrgraph (zeichnet die ganze Integralkurve, also ein unbestimmtes Integral, wenn ein Fahrstift auf der gegebenen Kurve geführt wird) und das Planimeter (mißt durch Umfahren der Randkurve einer Fläche den eingeschlossenen Flächeninhalt, also das bestimmte Integral).

Man unterscheidet Linearplanimeter und Polarplanimeter. Bei beiden wird der als Fahrstift ausgebildete Endpunkt eines zur Zeichenebene parallelen Fahrstabes von Hand auf dem Umfang der geschlossenen auszuwertenden Figur geführt, der Anfangspunkt hingegen zwangsläufig, aber gelenkig auf einer Leitkurve. Diese ist

bei den Linearplanimetern eine gerade Linie, verwirklicht entweder durch ein Lineal (Schiene) mit Nut (Lineal- oder Schienenplanimeter) oder durch einen Wagen auf zwei schweren Walzen, der nur in seiner eigenen Richtung rollen kann (Rollen- oder Walzenplanimeter),

beim Polarplanimeter (Abb. 67) ein Kreis, verwirklicht durch einen Polstab (Lenkstab, Lenker), der sich um einen durch eine Nadel

(Nadelpol) oder ein schweres Gewicht (Gewichtspol, Kugelpol) festgelegten Pol dreht.

Hauptbestandteil des Planimeters ist die Meßrolle (Laufrolle, Integrierrolle) mit Achse parallel zum Fahrstab, die auf der Zeichenebene abrollt und durch ihre als Differenz Endablesung minus Anfangsablesung zu findende Gesamtabrollung den Flächeninhalt der umfahrenen Figur (bei Pol innerhalb bis auf eine additive Konstante) gibt.

Die Genauigkeit hängt etwas von der Übung ab. Der mittlere Fehler einer Umfahrung nimmt bei Flächeninhalten von 10 bis 100 cm² von etwa 7 bis 12 mm² zu und relativ von 7‰ bis 1,2‰ ab.

Am gebräuchlichsten ist das Polarplanimeter. Schlittenplanimeter sind eine Ausführungsform mit Rollbandtisch für langgestreckte

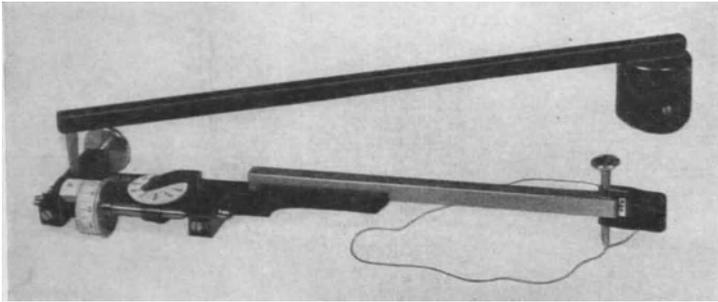


Abb. 67. Polarplanimeter.

Aufzeichnungen von Registrierinstrumenten. Auch Linearplanimeter eignen sich für sehr langgestreckte Figuren. Kompensationsplanimeter ermöglichen die Kompensation einer etwa vorhandenen Achsen-schiefe der Meßrolle. Scheibenplanimeter lassen die Meßrolle nicht auf dem Zeichenpapier wechselnder Beschaffenheit laufen, sondern auf einer besonderen Scheibe von gleichmäßiger Oberfläche und vergrößern zur Erhöhung der Genauigkeit durch ein Vorgelege die Drehung der Meßrolle. Sie sind dann nützlich, wenn die Genauigkeit des gewöhnlichen Planimeters nicht ausreicht, z. B. bei sehr kleinen Figuren. Bei Kugelplanimetern läuft die Meßrolle zur Erhöhung der Genauigkeit auf einem Kugelsegment. Die in Deutschland wenig, in Amerika stark verbreiteten Radialplanimeter dienen zur Bestimmung des Mittelwertes in Polarkoordinaten, wenn für einen periodischen Vorgang die Periode durch den Vollwinkel von 360° und die betreffende Größe durch den veränderlichen Radiusvektor dargestellt wird.

Auf ganz anderem Prinzip als die Planimeter mit Meßrolle beruht das Schneidenplanimeter (Stangenplanimeter, Beilplanimeter); es hat recht gute Genauigkeit.

Potenzplanimeter (Momentenplanimeter, Integratoren) liefern durch Umfahren der Kurve $y = f(x)$ nicht $\int_a^b y dx$ wie das ge-

wöhnliche Planimeter, sondern $\int_a^b y^2 dx$ (statisches Moment, Rauminhalt eines Drehkörpers, z. B. einer Glühlampe, Effektivwert in der Elektrotechnik), $\int_a^b y^3 dx$ (Trägheitsmoment, z. B. von Turbinenschaufeln), $\int_a^b \sqrt{y} dx$ (Flüssigkeits- und Gasmengenmessung, z. B. auch in der Physiologie der Blutgefäße). Grundgedanke: Ersatz des Potenzierens durch Winkelvervielfachung, die durch Zahnräder oder sonstwie herbeigeführt wird [vgl. z. B. H. Adler: Ein Spezialplanimeter zur Bestimmung von Effektivwerten. Elektrotechn. Ztschr. 52, 1387 (1931); Neue Potenzialplanimeter zur Bestimmung von $\oint y^2 dx$ und $\oint \sqrt{y} dx$. Ztschr. Vermess.-Wes. 61, 665—668 (1932)].

λ) **Doppelintegral und Kurvenintegral. Unabhängigkeit vom Wege.** Für das Integrieren bei Funktionen von zwei Veränderlichen sind hervorhebenswert:

a) das Doppelintegral $\iint f(x, y) dx dy$, das den Rauminhalt zur Fläche $z = f(x, y)$ als Grenzwert einer Quadersumme gibt (ähnlich wie $\int_a^b f(x) dx$ der Grenzwert einer Rechtecksumme

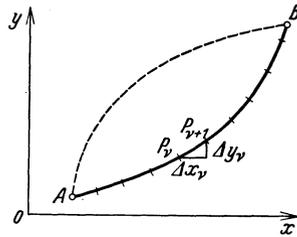


Abb. 68. Erklärung des Kurvenintegrals.

ist); x und y „laufen“ hierbei zwischen Grenzen, die durch die „Grundrißprojektion“ der Fläche in der xy -Ebene bestimmt sind;

b) das Kurvenintegral $\int u dx + v dy$ (Abb. 68) für zwei Funktionen $u = u(x, y)$ und $v = v(x, y)$. Es entsteht, wenn man eine „Integrationskurve“ oder einen „Weg“ zwischen einem Anfangspunkte A und einem Endpunkte B der xy -Ebene durch eine Anzahl Zwischenpunkte unterteilt, in jedem Zwischenpunkte P_n die Werte u_n und v_n der Funktionen u und v sowie die Abszissendifferenz Δx_n und Ordinatendifferenz Δy_n zum nächsten Zwischenpunkte P_{n+1} aufschreibt und die Summe $\sum u_n \Delta x_n + v_n \Delta y_n$ bildet: ihr Grenzwert für immer feinere Unterteilung ist $\int u dx + v dy$.

Beispiele:

1. u und v Kraftkomponenten X und Y in einem Kraftfelde, $\int X dx + Y dy$ ist die Arbeit beim Fortschreiten längs der Integrationskurve,

2. u und v Geschwindigkeitskomponenten in einem Strömungsfelde, das Kurvenintegral definiert die Wirbelstärke (Zirkulation);

3. $\int c_v dT + p dV$ liefert die bei Zustandsänderung eines idealen Gases mit Druck p , Volumen V , absoluter Temperatur T , spezifischer Wärme c_v zu- oder abgeführte Wärmemenge Q .

Im allgemeinen ist $\int u dx + v dy$ nicht nur von Anfangs- und Endpunkt, sondern auch vom Wege abhängig, z. B. die Wärmemenge $\int c_v dT + p dV$ von den Zwischenzuständen. Unabhängigkeit vom

Wege liegt vor, wenn u und v die partiellen Ableitungen $u = \frac{\partial U}{\partial x}$, $v = \frac{\partial U}{\partial y}$ einer Funktion U sind; in der Sprache der Vektorrechnung: wenn der Vektor mit den Komponenten u und v der Gradient (S. 53) eines Skalars U ist. Dann stellt $u dx + v dy$ das vollständige Differential (S. 53—54) von U dar. Hierfür ist notwendig und hinreichend $\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial x}$. Unabhängigkeit vom Wege bedeutet dasselbe wie Verschwinden des Kurvenintegrals $\oint u dx + v dy$ über einen geschlossenen Weg. In der Thermodynamik handelt es sich um einen Kreisprozeß hinsichtlich T , V nebst zugehörigen c_v , p -Werten. Denn (Abb. 68)

$$\int \text{von } A \text{ nach } B \text{ unten} = \int \text{von } A \text{ nach } B \text{ oben}$$

besagt bei umgekehrtem Durchlaufen des oberen Weges dasselbe wie $\oint = 0$.

Beispielsweise ist $dQ = c_v dT + p dV$, wie durch Differenzieren nachprüfbar, kein vollständiges Differential. Man schreibt deshalb besser auch nicht dQ , sondern als Diminutiv dQ . $\int dQ$ ist über einen offenen Weg abhängig vom Wege und über einen geschlossenen Weg (Kreisprozeß) $\neq 0$. Hingegen ist die Entropie $\int \frac{dQ}{T}$ unabhängig vom Wege und $\oint \frac{dQ}{T} = 0$ bei einem Kreisprozeß (Entropieänderung = 0).

Der Begriff des Kurvenintegrals führt, wie man sieht, sehr rasch in ein Zentrum der Anwendung der Mathematik auf naturwissenschaftlich-technische Fragen. Besonders klar und fruchtbar wird er bei vektorieller Betrachtungsweise [vgl. M. Lagally: Vorlesungen über Vektorrechnung. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft 1928. — A. Haas: Vektoranalysis, 2. Aufl. Berlin u. Leipzig: W. de Gruyter & Co. 1929]. In Strömungsfeldern wird außer der Zirkulation auch die Quellstärke durch ein Kurvenintegral beschrieben. Für ein Kraftfeld gibt der Skalar U das Potential usw.

μ) Andeutungen über numerisches Differenzieren und Integrieren, Interpolieren und Glätten. Formelmäßige, graphische und rechnerische Verfahren. Interpolationspolynom und Näherungspolynom. Wenn man in der mathematischen Praxis zu differenzieren oder zu integrieren hat und formelmäßig-analytisch mit den elementaren Funktionen wie Potenz, Exponentialfunktion usw. nicht ohne weiteres durchkommt, greife man zuerst stets zu den zeichnerischen Verfahren. Das graphische Integrieren ist so genau, wie es die Zeichengenauigkeit überhaupt zuläßt (vgl. S. 60). Das graphische Differenzieren ist für gut gezeichnete, glatte Kurven ebenfalls sehr genau (vgl. S. 49—50), unterliegt durch seine Anschaulichkeit beständiger Selbstkontrolle und vermeidet Genauigkeitstäuschungen. Meist reicht das zeichnerische Vorgehen für den Praktiker völlig aus und dringt durch seine Schmiegsamkeit und Sinnfälligkeit besonders leicht und tief in den Kern der Probleme ein. In besonderen Fällen können statt dessen auch rechnerische Methoden angewandt werden, z. B. wenn mehrstellige Genauigkeit verlangt wird und auf Grund der

Ausgangsdaten auch zu erwarten ist. Sie beruhen darauf, daß die Funktion $y = f(x)$ durch ein Polynom ersetzt wird, das mit $y = f(x)$ an gewissen x -Stellen, den Interpolationsstellen oder Stützstellen, übereinstimmt (Interpolationspolynom) oder das $y = f(x)$ in einem gewissen Intervall durchweg „möglichst gut“ (vgl. S. 80—81) annähert (Näherungspolynom). Numerisch differenziert oder numerisch integriert wird die Funktion $y = f(x)$, indem man an ihrer Statt das Ersatzpolynom differenziert oder integriert. Interpolieren heißt, die Funktion $y = f(x)$ selbst mit Hilfe des Ersatzpolynoms auch für andere x als die Stützstellen näherungsweise angeben. Glätten bedeutet: an den bekannten y kleine Änderungen so anzubringen, daß sich durch die abgeänderten y eine möglichst „glatte“ Kurve ohne „unnötige“ Zacken und Wellen legen läßt. Das numerische Glätten sollte ähnlich dem numerischen Differenzieren, wenn irgend möglich, durch eine Zeichnung graphisch kontrolliert werden.

Für Formeln und Rechnungsanordnung vgl. C. Runge, H. König: Vorlesungen über numerisches Rechnen. Berlin: Julius Springer 1924. — H. v. Sanden: Praktische Analysis, 2. Aufl. Leipzig u. Berlin: B. G. Teubner 1923; Mathematisches Praktikum, Teil I. Leipzig u. Berlin: B. G. Teubner 1927. — Fr. A. Willers: Numerische Integration. Sammlung Götschen 864; Methoden der praktischen Analysis. Berlin u. Leipzig: W. de Gruyter & Co. 1928. — E. T. Whittaker, G. Robinson: The calculus of observations, 2. Aufl. London, Glasgow, Bombay: Blackie and son 1926. — M. Lindow: Numerische Infinitesimalrechnung. Berlin u. Bonn: F. Dümmler 1928. — A. Walther: Differenzenrechnung, Kap. 23 in Pascals Repertorium der höheren Analysis, Bd. I₃, 2. Aufl. Leipzig u. Berlin: B. G. Teubner 1929.

IV. Bearbeitung von Beobachtungen.

1. Fehlerrechnen und Fehlerkritik.

a) Höchster Fehler. Absolut- und Relativfehler. Fehler einer Funktion. Fehlerrechnen ist die Kunst, die Genauigkeit von Meß- und Rechenresultaten abzuschätzen.

Gemessen sei eine Größe x . Wenn wir als Ergebnis eine Zahl x_0 aufschreiben, so heißt das wegen der unvermeidlichen Beobachtungsungenauigkeiten im allgemeinen nicht, daß wir mit x_0 genau den „wahren Wert“ X von x treffen. Vielmehr können wir nur sicher sein, daß man sich mit x_0 in einer gewissen Umgebung $X - h \dots X + h$ des wahren Wertes X befindet und daß umgekehrt X zwischen den Schranken $x_0 - h$ und $x_0 + h$ liegt, wobei h der mögliche Höchsterfehler ist. Die Größe x wird, auf einer x -Geraden veranschaulicht (Abb. 69), nicht durch einen Punkt, der X sein müßte, sondern nur auf eine Strecke $x_0 - h \dots x_0 + h$ festgelegt. Oft schreibt man das Ergebnis so, daß h eine halbe Einheit der letzten mitgenommenen Dezimalstelle beträgt.

¹ Ob und in welchem Sinne vom wahren Wert einer beobachteten Größe wegen der molekularen Struktur der Materie, thermischer Schwankungen usw. überhaupt gesprochen werden kann, sei dahingestellt.

Z. B. bedeutet die Angabe 12,3 cm für eine Länge nach der üblichen Abrundungsregel, daß die Länge zwischen 12,25 cm einschließlich und 12,35 cm ausschließlich liegt.

Der Höchstfehler oder kurz Fehler h selbst heißt auch Absolutfehler, sein Quotient durch den wahren Wert X oder — wegen der Unbekanntheit von X — durch den Näherungswert x_0 an X Relativfehler. Gern gibt man den relativen Fehler $\frac{h}{x_0}$, d. h. den Fehler bezogen auf die Größe

selbst, in Prozenten als Prozentualfehler $100 \frac{h}{x_0} \%$ an. Im Beispiel ist der Absolutfehler 0,05 cm, der Relativfehler $\frac{0,05 \text{ cm}}{12,3 \text{ cm}} \approx 0,004$, der

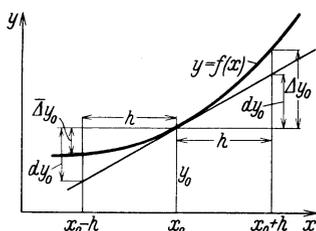


Abb. 69. Höchstfehler einer Funktion $y = f(x)$.

Prozentualfehler 0,4%. Das Wort „absolut“ wird hier im Gegensatz zu „relativ“ gebraucht, nicht in der Bedeutung von „ohne Rücksicht auf Vorzeichen“ (vgl. Fußnote ¹ S. 11). Allerdings wird h , wenn man h nicht im Sinne einer Abweichung versteht und diese einmal negativ nehmen will, immer positiv sein.

Oft ist zu der gemessenen Größe x eine andere Größe y nach bekanntem Gesetz $y = f(x)$, z. B. das Quadrat, der Sinus od. dgl. zu berechnen. Meist begnügt man sich mit der Angabe $y_0 = f(x_0)$. Vollständiger aber muß die Genauigkeit von y geschätzt werden, d. h. es muß angegeben werden, welche Abweichung gegenüber y_0 bei y schlimmstenfalls auf Grund der möglichen Höchstabweichung h bei x zu befürchten ist. Wenn $y = f(x)$ in der Umgebung von x_0, y_0 einsinnig steigt oder fällt, liegt y nach Abb. 69 zwischen $y_0 - \bar{\Delta} y_0$ und $y_0 + \Delta y_0$ oder näherungsweise zwischen $y_0 - d y_0 = y_0 - h y'_0$ und $y_0 + d y_0 = y_0 + h y'_0$ (Ersatz der Funktionsdifferenzen Δy_0 nach vorwärts und $\bar{\Delta} y_0$ nach rückwärts durch das Differential $d y_0 =$ Spanne h mal Ableitung y'_0 , vgl. S. 46—47). Unter Fortlassung des Index ₀ zusammenfassend:

Zum möglichen Höchstfehler $h = dx$ bei x gehört bei einer Funktion $y = f(x)$ näherungsweise der mögliche Höchstfehler $h y' = d y$, zum möglichen Relativfehler $\frac{dx}{x}$ oder Prozentualfehler $100 \frac{dx}{x} \%$ der mögliche Relativfehler $\frac{d y}{y}$ oder Prozentualfehler $100 \frac{d y}{y} \%$.

Näherungsweise heißt: im Sinne des Ersatzes der Funktionsdifferenz durch das Differential, um so genauer, je kleiner h ist. Daß man oft lieber mit dem nur näherungsweise richtigen Differential $d y$ statt mit den Funktionsdifferenzen Δy und $\bar{\Delta} y$ arbeitet, liegt daran, daß $d y$ durch Differenzieren leichter zu finden ist, als man $\Delta y = f(x+h) - f(x)$ und $\bar{\Delta} y = f(x) - f(x-h)$ durch vielleicht mühsames (mehr Dezimalen bei $x \pm h$) Berechnen von $f(x+h)$ und $f(x-h)$ nebst Subtrahieren bekommt.

Offenbar braucht $h = dx$ nicht durchaus der mögliche Höchstfehler zu sein, sondern kann irgendeine beliebige, nicht allzu beträchtliche x -Abweichung gegen x_0 bedeuten. Das Differential dy liefert dann die zugehörige Abweichung von y gegen $y_0 = f(x_0)$, und zwar sowohl der Größe als auch der Richtung nach. Kommt es nur auf den Betrag an, so nimmt man h positiv und rechnet $|dy|$ aus.

Beispiel: Die Stromwärme Q je s, die der elektrische Strom I A im Widerstand $R \Omega$ entwickelt, beträgt bekanntlich $Q = 0,239 I^2 R$ cal. Wenn sich I bei festem R um dI ändert, wird die Änderung von Q näherungsweise $dQ = 0,239 \cdot 2 I R \cdot dI$ und die relative Änderung $\frac{dQ}{Q} = 2 \frac{dI}{I}$. Eine Änderung von I um 10% hat also näherungsweise eine Änderung von Q um 20% im Gefolge, und zwar nimmt Q zu, wenn I steigt, ab, wenn I fällt. Genau müßte man rechnen: $\Delta Q = 0,239 (I + \Delta I)^2 R - 0,239 I^2 R$, also $\frac{\Delta Q}{Q} = 2 \frac{\Delta I}{I} + \frac{(\Delta I)^2}{I^2}$. Es wäre $\frac{\Delta Q}{Q} = +21\%$ bei $\frac{\Delta I}{I} = +10\%$ und $\frac{\Delta Q}{Q} = -19\%$ bei $\frac{\Delta I}{I} = -10\%$. Man sieht hieraus, wie gut das viel einfacher zu berechnende Differential annähert.

β) Sonderfälle. Praktisch am bequemsten werden Relativfehler durch logarithmisches Differenzieren berechnet. Z. B. für die Potenz

$$y = \text{konst } x^\alpha \text{ ist}$$

$$\ln y = \ln \text{konst} + \alpha \ln x,$$

$$\frac{d y}{y} = \alpha \frac{d x}{x}.$$

Der relative Fehler einer Potenz x^α ist das α -fache des relativen Fehlers von x (während der Absolutfehler von x beim Potenzieren auf das $\alpha x^{\alpha-1}$ -fache geht). So ist z. B. die Kreisfläche $F = \frac{\pi}{4} d^2$ maximal auf 2% und das Kugelvolumen $V = \frac{\pi}{6} d^3$ maximal auf 3% fehlerhaft, wenn der Durchmesser d auf 1% bekannt ist. (Die Absolutfehler $\frac{\pi}{4} \cdot 2 d \cdot h$ von F und $\frac{\pi}{6} \cdot 3 d^2 \cdot h$ von V gehen proportional $2 d$ bzw. $3 d^2$) —. Oder: bei adiabatischer Kompression $p V^\kappa = \text{konst}$ von Luft mit $\kappa = 1,4$ zieht wegen $V = \text{konst} \cdot p^{-\frac{1}{\kappa}}$ eine Drucksteigerung von 1% eine Volumenverminderung von $\frac{1}{\kappa} \cdot 1\% \approx 0,7\%$ nach sich.

Bei trigonometrischen Funktionen muß man Fehler in $^\circ, ', ''$ in Bogenmaß umrechnen nach den Formeln $1^\circ \cong \frac{\pi}{180} \approx 1745 \cdot 10^{-5}$, $1' \cong \frac{\pi}{180 \cdot 60} \approx 2909 \cdot 10^{-7}$, $1'' \cong \frac{\pi}{180 \cdot 60^2} \approx 4848 \cdot 10^{-9}$. Z. B. ist in einem rechtwinkligen Dreieck mit fehlerfreier Hypotenuse c und um höchstens ε'' fehlerhaftem Winkel α der mögliche Höchstfehler der Kathete $a = c \sin \alpha$ folgender: $da = c \cos \alpha d\alpha \approx c \cos \alpha \cdot 4848 \cdot 10^{-9} \varepsilon$.

Der Absolutfehler des Logarithmus $y = {}^a \log x = \frac{\ln x}{\ln a}$ von x zur Basis a ist $dy = \frac{1}{\ln a} \cdot \frac{dx}{x}$, also proportional zum relativen Fehler des

Numerus x . Bei konstanter Absolutgenauigkeit des Logarithmus (z. B. Ablesegenauigkeit von 0,1 mm der Strecken auf dem Rechenschieber S. 24—25 oder auf Logarithmenpapier S. 6—7) hat man also konstante relative Genauigkeit des zugehörigen Numerus. So erklärt es sich, daß für die kleineren Zahlen zwischen 1 und 2 auf dem Rechenschieber eine viel feinere Unterteilung da ist als für die größeren Zahlen zwischen 9 und 10.

γ) Mehrere unabhängige Veränderliche. Für eine Funktion $f(x, y, z, \dots)$ von mehreren unabhängigen Veränderlichen x, y, z, \dots wird der mögliche Höchstfehler, der zu den möglichen Höchstfehlern dx bei x, dy bei y, dz bei z, \dots gehört, näherungsweise gefunden, indem man im („vollständigen“): Differential (S. 53—54)

$$df = f_x dx + f_y dy + f_z dz + \dots$$

($f_x = \frac{\partial f}{\partial x}$ partielle Ableitung von f nach x , ähnlich $f_y = \frac{\partial f}{\partial y}$ nach y , weiter $f_z = \frac{\partial f}{\partial z}$ nach z, \dots) alle Summanden mit positivem Vorzeichen nimmt:

$$|f_x dx| + |f_y dy| + |f_z dz| + \dots$$

Denn $f_x dx$, „Änderungstendenz“ f_x mal „Änderungsstrecke“ dx , gibt näherungsweise die Änderung von f auf Grund der Änderung dx bei x . Das vollständige Differential df ist die Gesamtänderung als Summe von Teiländerungen. Schlimmstenfalls können die Änderungen dx, dy, dz, \dots der unabhängigen Veränderlichen so gerichtet sein, teilweise positiv, teilweise negativ, daß alle $f_x dx, f_y dy, f_z dz, \dots$ positives Vorzeichen bekommen. Wenn man die Änderungsrichtungen bei x, y, z, \dots kennt, läßt sich natürlich auch über die Änderung von f , nicht nur über ihren möglichen Höchstwert etwas aussagen.

Der mögliche Relativfehler von f entsteht bei Division durch $|f|$; bei Potenzausdrücken ist wieder logarithmisches Differenzieren vorteilhaft. Z. B. gilt für die Fläche $F = x \cdot y$ eines Rechtecks mit den Seiten x und y

$$\ln F = \ln x + \ln y \quad \text{und} \quad \frac{dF}{F} = \frac{dx}{x} + \frac{dy}{y}.$$

Die relativen Fehler der Längenmessungen von x und y (z. B. höchstens 2% und höchstens $\frac{1}{2}\%$) addieren sich näherungsweise zum relativen Fehler der Flächenbestimmung, höchstens zu $\left|\frac{dx}{x}\right| + \left|\frac{dy}{y}\right|$ (hier $2\frac{1}{2}\%$). Abb. 70 zeigt, daß die Änderung von F auf Grund der Seitenänderungen dx und dy genau genommen noch einen Bestandteil $dx \cdot dy$ aufweist, der aber als Produkt der kleinen Größen dx und dy viel kleiner, „klein von zweiter Ordnung“ ist und deshalb vernachlässigt wird. Auch der mögliche Relativfehler des Verhältnisses $t = \frac{x}{y}$ mit

$$\ln t = \ln x - \ln y, \quad \text{also} \quad \frac{dt}{t} = \frac{dx}{x} - \frac{dy}{y}$$

ist $\left|\frac{dx}{x}\right| + \left|\frac{dy}{y}\right|$. Denn der Zähler x kann um dx zu groß und der Nenner y

um dy zu klein sein. Wenn man weiß, daß x um 2% größer und y um 2% kleiner wird, macht das für $F = x \cdot y$ gar nichts aus, weil sich F näherungsweise um 0% ändert. Hingegen nimmt $t = \frac{x}{y}$ näherungsweise um 4% zu.

In ähnlicher Weise läßt sich in den vielen theoretischen und empirischen Einzelformeln der Praxis der Einfluß von Änderungen oder Fehlern der eingehenden Größen abschätzen.

Eine interessante Anwendung ist auch die Kritik der Bestimmung des Wirkungsgrades η . Dieser läßt sich entweder aus zugeführter Leistung N_1 und abgegebener Leistung N_2 als $\eta = \frac{N_2}{N_1}$ bestimmen oder durch Messung der Verlustleistung N_v als $\eta = \frac{N_1 - N_v}{N_1}$ bzw. $\eta = \frac{N_2}{N_2 + N_v}$.

Man kann nachrechnen, daß es bei hohem Wirkungsgrad η viel genauer ist, N_1 und N_v oder N_2 und N_v zu messen als N_1 und N_2 , selbst bei vergleichsweise hohem Fehler von N_v .

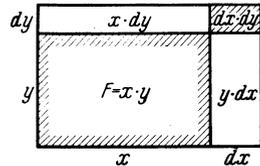


Abb. 70. Änderung der Fläche eines Rechtecks.

2. Rechnen mit kleinen Größen.

Für die Potenz $y = x^\alpha$ gilt:

Funktionsdifferenz $\Delta y \approx$ Differential $dy = \alpha x^{\alpha-1} dx$.

Insbesondere ist $y = 1$ und $\Delta y \approx \alpha dx$ für $x = 1$. Der y -Wert $(1 \pm \varepsilon)^\alpha$ für $x = 1 \pm \varepsilon$ entsteht dadurch, daß am y -Werte 1 für $x = 1$ die Änderung $\Delta y \approx \pm \alpha \varepsilon$ für die x -Änderung $\pm \varepsilon$ angebracht wird (Abb. 71):

$$(1 \pm \varepsilon)^\alpha \approx 1 \pm \alpha \varepsilon.$$

Um eine von 1 wenig abweichende Zahl näherungsweise in die α te Potenz zu erheben, braucht man also nur das α fache des Unterschieds gegen 1 zu 1 hinzuzufügen. $|\alpha|$ darf im Vergleich zu ε „nicht zu groß“ sein.

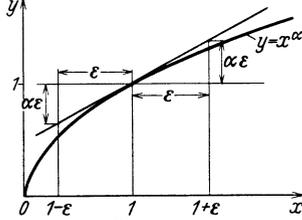


Abb. 71. Änderung der Potenz.

Sonderfälle, die sich auch leicht ganz elementar durchschauen lassen [vgl. A. Walther: Einführung in die mathematische Behandlung naturwissenschaftlicher Fragen. Berlin: Julius Springer 1928]:

$\alpha = 2$, Quadrat:

$$(1 \pm \varepsilon)^2 \approx 1 \pm 2 \varepsilon, \text{ z. B. } 1,03^2 \approx 1,06 \text{ (genauer } 1,0609)$$

$$0,96^2 \approx 0,92 \text{ (genauer } 0,9216).$$

Zum Quadrieren Unterschied gegen 1 verdoppeln. Ergebnis um ε^2 zu klein.

$\alpha = \frac{1}{2}$, Quadratwurzel:

$$\sqrt{1 \pm \varepsilon} \approx 1 \pm \frac{\varepsilon}{2}, \text{ z. B. } \sqrt{0,984} \approx 0,992 \text{ (genauer } 0,99197).$$

Zum Quadratwurzelziehen Unterschied gegen 1 halbieren. Ergebnis etwa um $\frac{1}{8} \varepsilon^2$ zu groß.

$\alpha = -1$, Kehrwert:

$$\frac{1}{1 \pm \varepsilon} \approx 1 \mp \varepsilon, \text{ z. B. } \frac{1}{1,04} \approx 0,96 \text{ (genauer } 0,9615).$$

Zum Bilden des Kehrwertes Unterschied gegen 1 mit umgekehrtem Vorzeichen nehmen. Ergebnis etwa um ε^2 zu klein.

$\alpha = -\frac{1}{2}$, reziproke Quadratwurzel:

$$\frac{1}{\sqrt{1 \pm \varepsilon}} \approx 1 \mp \frac{\varepsilon}{2}, \text{ etwa um } \frac{3}{8} \varepsilon^2 \text{ zu klein, z. B. } \frac{1}{\sqrt{1,024}} \approx 0,988 \text{ (19).}$$

$\alpha = -2$, reziprokes Quadrat:

$$\frac{1}{(1 \pm \varepsilon)^2} \approx 1 \mp 2\varepsilon, \text{ etwa um } 3\varepsilon^2 \text{ zu klein, z. B. } \frac{1}{0,97^2} \approx 1,06 \text{ (28).}$$

Wie die gegen die kleine Größe ε viel kleineren Potenzen $\varepsilon^2, \varepsilon^3, \dots$ näherungsweise vernachlässigt werden, so bei mehreren kleinen Größen $\delta, \varepsilon, \dots$ die Produkte $\delta\varepsilon, \dots$. Das gibt:

$$\text{Produkt } (1 \pm \delta)(1 \pm \varepsilon) \approx 1 \pm \delta \pm \varepsilon,$$

$$\text{Quotient } \frac{1 \pm \delta}{1 \pm \varepsilon} \approx 1 \pm \delta \mp \varepsilon.$$

$$\begin{aligned} \text{Beispiel: } \frac{1,07 \cdot 0,92 \cdot \sqrt{1,04}}{1,05 \cdot 0,88} &\approx 1 + 0,07 - 0,08 + 0,02 \\ &\quad - 0,05 + 0,12 \\ &= 1,08 \text{ (genauer } 1,0865). \end{aligned}$$

Wenn kleine Unterschiede α, β, \dots nicht gegen 1, sondern gegen runde Zahlen a, b, \dots vorliegen, stellt man durch Ausklammern, z. B. $a \pm \alpha = a \left(1 \pm \frac{\alpha}{a}\right)$, relative Unterschiede $\frac{\alpha}{a}, \frac{\beta}{b}, \dots$ her, rechnet mit a, b, \dots im Kopfe oder mit dem Rechenschieber und mit den relativen Unterschieden (am besten in %) wie mit Logarithmen: beim Multiplizieren werden sie addiert, beim Dividieren subtrahiert, beim Potenzieren mit dem Potenzexponenten multipliziert. Namentlich bei Reduktionen auf 760 mm Hg, 0° C usw. ist derartige Überschlagsrechnen recht nützlich und eine wertvolle Ergänzung zum Rechenschieber.

Beispiele:

$$\begin{aligned} 67,8 \cdot \frac{273}{291} \cdot \frac{752}{760} &\approx 70 (1 - 3\%) \frac{273}{273 (1 + 6\frac{1}{2}\%)} \cdot \frac{760 (1 - 1\%)}{760} \\ &\approx 70 (1 - 3\% - 6\frac{1}{2}\% - 1\%) = 70 (1 - 10\frac{1}{2}\%) \\ &\approx 62,6 \text{ (genauer } 62,94). \end{aligned}$$

Mit $\pi = 3,14159 \dots \approx 3 (1 + 4,7\%)$ multipliziert man, indem man mal 3 nimmt und das Produkt um 5% vergrößert; das Ergebnis stimmt auf 3‰₀₀ (ist um 3‰₀₀ zu groß). Z. B. $7,6 \cdot \pi \approx 22,8 + 1,1 = 23,9$.

Das Rechnen mit kleinen Größen ermöglicht auch die unerläßliche beständige Kritik des gewöhnlichen Zahlenrechnens [O. Liesche: Rechenverfahren und Rechenhilfsmittel mit Anwendungen auf die analytische Chemie. Die chemische Analyse, Bd. 30. Stuttgart: F. Enke 1932. — P. Werkmeister: Praktisches Zahlenrechnen. Sammlung Göschen 405. — A. Witting: Abgekürzte Rechnung. Math.-Phys. Bibl. Bd. 47. Leipzig u. Berlin: B. G. Teubner 1922. — V. Happach: Technisches Rechnen. Berlin: Julius Springer 1933. — K. Menninger: Rechenkniffe,

3. Aufl. Frankfurt a. M.: K. Poths 1934]. Wenn z. B. die möglicherweise um 0,1 fehlerhafte Zahl 41,8 mit der fehlerfreien Zahl 1,12 multipliziert werden soll, ist die Angabe $41,8 \cdot 1,12 = 46,816$ sinnlos und täuscht eine gar nicht vorhandene Genauigkeit vor. Wegen $0,1 \approx \frac{1}{4}\%$ von 41,8 ist auch das Ergebnis nur bis auf $\frac{1}{4}\%$ zuverlässig und mit 46,8 anzugeben. Bei dieser Kritik muß man daran denken, daß relative Höchstfehler nach beiden Seiten liegen können und sich deshalb z. B. bei einem Quotienten (anders als die obigen relativen Unterschiede) dem Betrage nach addieren.

Für die praktische Behandlung unendlicher Reihen findet man bei H. v. Sanden [Mathematisches Praktikum, Teil 1. Leipzig u. Berlin: B. G. Teubner 1927] tabellarisch zusammengestellt, in welchen Bereichen man bei vorgeschriebener Genauigkeit Funktionen durch die ersten Glieder ihrer Reihenentwicklungen ersetzen darf.

3. Ausgleichung und mathematische Statistik¹.

a) **Durchschnitt, Streuung, mittlerer Fehler.** Liegen für eine Größe x durch zufällige Meßfehler etwas voneinander abweichende Messungen vor, etwa n Messungen x_1, x_2, \dots, x_n , so ist es üblich und hat sich durch lange Erfahrung bewährt, für den unbekanntem „wahren Wert“ X von x als „besten“ oder „wahrscheinlichsten“ Näherungswert den Durchschnitt² (das arithmetische Mittel)

$$M = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{\nu=1}^n x_\nu}{n} \quad \text{zu nehmen.}$$

¹ Vgl. F. Baur: Korrelationsrechnung, Math.-Phys. Bibl. Bd. 75. Leipzig u. Berlin: B. G. Teubner 1928. — R. Becker, H. Plaut, I. Runge: Anwendungen der mathematischen Statistik auf Probleme der Massenfabrikation. Berlin: Julius Springer 1927. — W. U. Behrens: Mathematische Methoden für Versuchsansteller. Stuttgart: E. Ulmer 1933. — C. V. L. Charlier: Vorlesungen über die Grundzüge der mathematischen Statistik. Lund: Verlag Scientia 1920. — K. Daeyes: Praktische Großzahlforschung. Berlin: VDI-Verlag 1933. — R. A. Fisher: Statistical methods for research workers, 3. Aufl. Edinburgh u. London: Oliver and Boyd 1930. — R. v. Mises: Wahrscheinlichkeitsrechnung. Leipzig u. Wien: Franz Deuticke 1931; Wahrscheinlichkeit, Statistik und Wahrheit. Wien: Julius Springer 1928. — H. C. Plaut: Fabrikationskontrolle auf Grund statistischer Methoden. Berlin: VDI-Verlag 1930. — G. Pólya: Wahrscheinlichkeitsrechnung. Fehlerausgleichung. Statistik. Abderhaldens Handbuch der biologischen Arbeitsmethoden, Abt. V, Teil 2. — H. Richter-Altschäffer: Einführung in die Korrelationsrechnung. Berlin: Institut für landwirtschaftliche Marktforschung 1931; Theorie und Praxis der Korrelationsrechnung. Berlin: Paul Parey 1932. — H. L. Rietz, F. Baur: Handbuch der mathematischen Statistik. Leipzig u. Berlin: B. G. Teubner 1930. — A. M. Ritala: Statistische mittlere Fehler. Helsinki 1933. — C. Runge, H. König: Vorlesungen über numerisches Rechnen. Berlin: Julius Springer 1924. — H. v. Sanden: Mathematisches Praktikum, Teil 1. Leipzig u. Berlin: B. G. Teubner 1927; Praktische Analysis, 2. Aufl. Leipzig u. Berlin: B. G. Teubner 1923. — E. T. Whittaker, G. Robinson: The calculus of observations, 2. Aufl. London, Glasgow, Bombay: Blackie and son 1926. — G. Udny Yule: An introduction to the theory of statistics, 8. Aufl. London: Griffin & Co. 1927.

² Im wissenschaftlichen Sprachgebrauch sind „Durchschnitt“, „durchschnittlich“ für lineare Mittelbildungen, „im Mittel“, „mittlerer“ für quadratische Mittelbildungen (d. h. Durchschnittnehmen der Quadrate und Wurzelziehen) festgelegt und dürfen nicht gleichberechtigt durcheinander gebraucht werden. Nur beim arithmetischen Mittel selbst wird leider das Wort Mittel in anderem Sinne verwandt, ebenso beim Zeitwort „mitteln“ im Sinne von „Durchschnitt nehmen“.

Als Maß für die Gruppierung der Messungen — ob sie sich in engem Bereich zusammendrängen oder weithin streuen — und damit für ihre Güte dienen die Streuung oder mittlere¹ Abweichung (standard deviation) σ und der mittlere Fehler m . Man bildet die Abweichungen $x_1 - M$, $x_2 - M$, ..., $x_n - M$ gegen den Durchschnitt M , quadriert, wodurch man sich vom Vorzeichen frei macht, und erhält das Streuungsquadrat σ^2 als durchschnittliches Abweichungsquadrat:

$$\sigma^2 = \frac{(x_1 - M)^2 + (x_2 - M)^2 + \dots + (x_n - M)^2}{n} = \frac{\sum_{\nu=1}^n (x_\nu - M)^2}{n}.$$

Das Quadrat m^2 des mittleren Fehlers m entsteht, wenn durch $n - 1$ statt durch n dividiert wird:

$$m^2 = \frac{(x_1 - M)^2 + (x_2 - M)^2 + \dots + (x_n - M)^2}{n - 1} = \frac{\sum_{\nu=1}^n (x_\nu - M)^2}{n - 1} = \frac{n}{n - 1} \sigma^2.$$

Die Genauigkeit des Durchschnitts M wird durch den mittleren Fehler des Durchschnitts angegeben; er ist

$$\mu = \frac{m}{\sqrt{n}}.$$

Auch wenn es sich nicht um Messungen handelt, sondern um irgendwelche Beobachtungen, die durch Zufall (fabrikatorische Ungleichmäßigkeiten, biologische Schwankungen od. dgl.) etwas voneinander verschieden sind, erweisen sich M , σ , m und μ zur kurzen Beschreibung als nützlich (mathematische Statistik, vgl. S. 75—78). Bei großem n faßt man dabei gleiche oder näherungsweise gleiche Beobachtungen in „Klassen“ zusammen, deren jede einem gewissen festen x -Spielraum entspricht und durch ein mittleres x gekennzeichnet wird. Dieses mittlere x geht in die Summen mit seiner „Häufigkeit“ y ein, d. h. mit der Anzahl der x in der betreffenden Klasse.

β) Bedeutung und Berechnung der Streuung. Die Streuung σ gibt im Gegensatz zur möglichen Höchstabweichung an, wie weit die Beobachtungen x_ν „im Mittel“ vom Durchschnitt M abweichen. So wird in der Fabrikationskontrolle durch die Angabe $M \pm \sigma$ oder $M \pm m$ der Ausfall der Herstellung beurteilt (vgl. S. 76—77). Bildet man

das durchschnittliche Abweichungsquadrat $\frac{\sum_{\nu=1}^n (x_\nu - A)^2}{n}$ von einem beliebigen Wert A , so erhält es wegen

$$\frac{\sum_{\nu=1}^n (x_\nu - M)^2}{n} = \frac{\sum_{\nu=1}^n (x_\nu - A)^2}{n} - (M - A)^2$$

seinen kleinsten möglichen Wert für $A = M$. Der Durchschnitt M ist also dadurch gekennzeichnet, daß für M als Bezugswert die Beobachtungen

¹ Vgl. Fußnote ² S. 71.

das kleinste überhaupt mögliche durchschnittliche Abweichungsquadrat haben. Daher der Name „Methode der kleinsten Quadrate“ für die auf den Durchschnitt M gestützte Bearbeitung der Beobachtungen.

Nebenbei gewinnt man so die bequemste Berechnungsart für σ^2 : wie man schon zur Berechnung von M am besten zunächst einen runden Näherungswert A für M schätzt, dann die Unterschiede $x_v - A$ bildet, summiert und die Summe Σ_1 durch n geteilt zu A hinzufügt, so nimmt man auch für σ^2 statt der vielstelligen, ganz neu zu berechnenden $(x_v - M)^2$ lieber die bequemen Quadrate $(x_v - A)^2$ der schon vorhandenen $x_v - A$, summiert, teilt die Summe Σ_2 durch n und zieht dann nachträglich $(M - A)^2$ ab. In Formeln:

$$M = A + \frac{\Sigma_1}{n} \quad \text{und} \quad \sigma^2 = \frac{\Sigma_2}{n} - (M - A)^2.$$

γ) Mittlerer Fehler der Einzelbeobachtung. Der mittlere Fehler m hat für die Abweichung von dem — allerdings unbekanntem — wahren Werte X eine ähnliche Bedeutung wie σ in bezug auf M . Das durchschnitt-

liche Quadrat $\frac{\sum_{v=1}^n (x_v - X)^2}{n}$ der Abweichungen in bezug auf X (der „Fehler“) ist wegen der Unbekanntheit von X nicht berechenbar, wird aber durch m^2 in ähnlichem Sinne „am besten“ ersetzt wie X selbst durch M . Daher gibt m „im Mittel“ den Fehler der x_v .

Praktisch können für einigermaßen größere n Streuung σ und mittlerer Fehler m vertauscht werden. Z. B. für $n = 5$ ist

$$m = \sqrt{\frac{5}{4}} \sigma = \sqrt{1 + 25\%} \sigma \approx (1 + 12\%) \sigma,$$

für $n = 10$ schon

$$m = \sqrt{\frac{10}{9}} \sigma \approx \sqrt{1 + 11\%} \sigma \approx (1 + 5\%) \sigma,$$

für $n = 100$ schließlich

$$m = \sqrt{\frac{100}{99}} \sigma \approx \sqrt{1 + 1\%} \sigma \approx (1 + 1/2\%) \sigma \quad (\text{vgl. S. 69}).$$

Weil m ein Gruppierungsmaß für die Beobachtungen selbst ist, spricht man auch vom mittleren Fehler der Einzelbeobachtung(en).

δ) Mittlerer Fehler des Durchschnitts. Der mittlere Fehler μ des Durchschnitts M stellt ein Maß dafür dar, wie weit M „im Mittel“ vom wahren Wert X entfernt ist, wie stark also für mehrere Beobachtungsreihen die Serienmittel um X bzw. um das Generalmittel streuen. Während m das mehr oder weniger Zusammengedrängtsein der Beobachtungen selbst und damit z. B. die Güte der Beobachtungseinrichtungen charakterisiert, kennzeichnet μ die Güte des Gesamtergebnisses M als des Extraktes aus den Beobachtungen, z. B. wieviel Dezimalstellen von M zuverlässig sind. Ist bei jeder Einzelbeobachtung der mittlere Fehler m zu befürchten, so läßt sich durch Bilden des Durchschnitts aus n Einzelbeobachtungen der mittlere Fehler auf das $\frac{1}{\sqrt{n}}$ fache herabdrücken. Man gibt μ auf 1 bis 2 bedeutsame Stellen an. Da μ die Größen-

ordnung der Abweichung von M gegen X hat, bricht man M entsprechend ab. Als Gesamtergebnis der Beobachtungen schreibt man bei physikalischen Messungen $M \pm \mu$ auf (z. B. bei zunächst berechnetem $M = 3,8934$ und $\mu = 0,0127$ als Beobachtungsergebnis $3,89 \pm 0,01$ oder $3,893 \pm 0,013$). Zu beachten: μ sinkt bei wachsendem n nur wie $\frac{1}{\sqrt{n}}$, nicht wie $\frac{1}{n}$, also verhältnismäßig langsam. Um z. B. μ auf den 10. Teil herunterzudrücken, muß man 100mal soviel Beobachtungen machen.

ε) Beispiel für die praktische Berechnung der eingeführten Größen.

x	$x - A$	$(x - A)^2$	$A = 154$
153,7	-0,3	0,09	$n = 8$
152,8	-1,2	1,44	$\Sigma_1: n = -0,3 : 8 \approx -0,04$
154,2	+0,2	0,04	$M = A + \frac{\Sigma_1}{n} \approx 154 - 0,04 = 153,96$
153,7	-0,3	0,09	$\Sigma_2: n = 2,83 : 8 = 0,35375$ +
153,8	-0,2	0,04	$(M - A)^2 \approx 0,04^2 = 0,0016$ -
154,2	+0,2	0,04	$\sigma^2 = \frac{\Sigma_2}{n} - (M - A)^2 \approx 0,3522$
155,0	+1,0	1,00	$\sigma \approx 0,59$
154,3	+0,3	0,09	$m = \sqrt{\frac{n}{n-1}} \sigma \approx \sqrt{\frac{8}{7}} \cdot 0,59 \approx 0,63$
$\Sigma_1 = -0,3$	$\Sigma_2 = 2,83$		$\mu = \frac{m}{\sqrt{n}} \approx \frac{0,63}{\sqrt{7}} \approx 0,22$
			Gesamtergebnis der Messungen: $154,0 \pm 0,2$ oder $153,96 \pm 0,22$

ζ) Durchschnittliche und wahrscheinliche Abweichung. Der Durch-

schnitt $\bar{x} = \frac{\sum_{v=1}^n (x_v - M)}{n}$ der Abweichungen $x_v - M$ selbst von M ist natürlich 0.

Der Durchschnitt $\eta = \frac{\sum_{v=1}^n |x_v - M|}{n}$ der Abweichungen ohne Rücksicht aufs Vorzeichen heißt durchschnittliche (Absolut-) Abweichung oder durchschnittlicher Fehler. Daß man nicht nach Laplace das Nehmen des Absolutbetrages und damit η , sondern nach Gauß das Quadrieren und damit σ bevorzugt, um sich vom Vorzeichen der Abweichungen freizumachen und ein Gruppierungsmaß zu gewinnen, wird durch tiefere Untersuchungen nahegelegt.

Die wahrscheinliche Abweichung, der wahrscheinliche Fehler oder das Quartil Q ist eine Abweichung, die von den absolut genommenen einzelnen Abweichungen gleich häufig („gleich wahrscheinlich“) über- und untertroffen wird. Unterhalb von Q liegt die Hälfte der Absolutbeträge der Abweichungen, oberhalb die andere Hälfte. Oder: zwischen $-Q$ und $+Q$ befindet sich die Hälfte der Abweichungen, unterhalb $-Q$ ein Viertel, oberhalb $+Q$ ein Viertel (daher Quartil = Viertelgrenze).

η) Gaußsche Fehlerverteilung. Genauer als durch die Gruppierungsmaße σ , m , η und Q wird die Verteilung von Beobachtungen in bezug auf M oder X durch die — ursprünglich in der Lehre von den Meßfehlern entwickelte — Gaußsche Fehlerverteilungskurve Abb. 72 beschrieben. Sie gibt als ideale Verteilungsdichte $\varphi(\xi)$ zur Abweichung ξ (die von M oder X aus gerechnet sein kann) die Funktion

$$\varphi(\xi) = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 \xi^2}$$

mit folgender Bedeutung: Die Wahrscheinlichkeit (relative Häufigkeit) des Vorkommens einer Abweichung zwischen den Grenzen ξ_1 und ξ_2

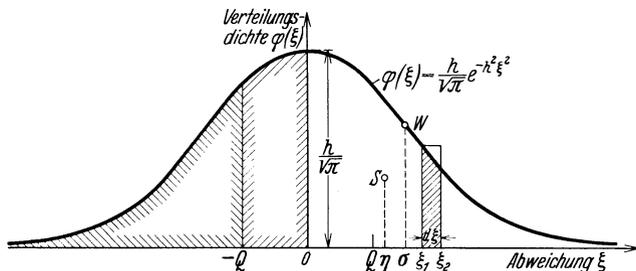


Abb. 72. Gaußsche Fehlerverteilungskurve.

wird durch das entsprechende Flächenstück $\int_{\xi_1}^{\xi_2} \varphi(\xi) d\xi$ an der Gaußschen Kurve geliefert, bei kleiner Spanne $\xi_2 - \xi_1 = d\xi$ näherungsweise durch das Rechteck $\varphi(\xi_1) d\xi$. Der Parameter h heißt die Präzision; h ist groß bei eng zusammengedrängten Beobachtungen (bei hochgipfliger, steil nach beiden Seiten abfallender „Glockenkurve“), klein bei weitverstreuten Beobachtungen (bei tiefgipfliger, flacher Glockenkurve).

Bei der Gaußschen Verteilungsfunktion finden sich offenbar unter anderem folgende erfahrungsgemäß meist vorliegenden Tatsachen richtig wieder: kleine Abweichungen sind häufiger (wahrscheinlicher) als große; positive und negative Abweichungen sind gleich häufig. Im übrigen ist die Gaußsche Kurve der ideale Grenzfall einer empirischen Häufigkeitskurve, die entsteht, wenn man in einem „Kollektiv“ aus zahlreichen, etwa n Beobachtungen zu jedem Beobachtungswert x die zugehörige Häufigkeit y des Vorkommens bestimmt und die relative Häufigkeit $\frac{y}{n}$ als Ordinate zur Abszisse x aufträgt (gegebenenfalls unter Zusammenfassung in Klassen, vgl. S. 72). Und zwar kommt die Gaußsche Kurve für $n \rightarrow \infty$ unter gewissen, hier nicht näher zu erörternden Voraussetzungen zustande. Ihr Nutzen liegt darin, daß mit ihrer Hilfe ein Vergleich der empirisch beobachteten Häufigkeiten mit den theoretisch nach der Wahrscheinlichkeitsrechnung zu erwartenden durchgeführt werden kann. Das geschieht in der mathematischen Statistik¹, die unter dem Namen Großzahlforschung

¹ Schrifttumsnachweis S. 71, Fußnote¹.

in neuester Zeit auch in die technische und industrielle Praxis (Gewinnung und Prüfung von Werkstoffen, Massenfabrikation, Betriebsüberwachung usw.) eindringt. Stets zeichne man zuerst die Häufigkeitskurve, die schon für sich allein oft wertvolle Aufschlüsse gibt (Schiefe, Mehrspitzigkeit od. dgl.). — Schon länger spielt die mathematische Statistik als Variationsstatistik eine große Rolle in der Biologie, hauptsächlich in der Vererbungsforschung. Dort werden die n Exemplare eines Kollektivs, z. B. 500 Früchte, auf ein Merkmal x , z. B. Zuckergehalt, untersucht, und es wird die Häufigkeit y der verschiedenen Werte von x festgestellt. Auch die Mendelschen Regeln gehören hierher.

9) **Beispiel zur mathematischen Statistik.** Zur Qualitätsprüfung einer Stahlsorte wurden $n = 205$ Probestäbe zerrissen und nach der

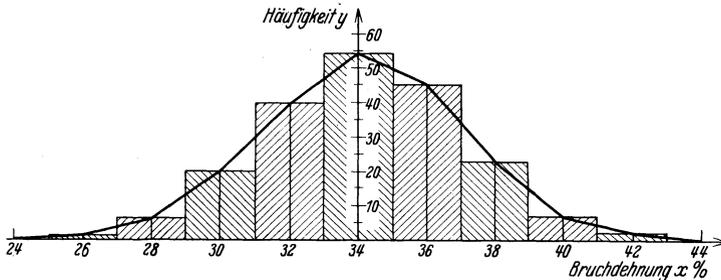


Abb. 73. Häufigkeitsdarstellung durch Streckenzug oder durch Rechteckstreppe.

Bruchdehnung $x\%$ in Klassen mit den Häufigkeiten y eingeteilt (Streckenzug- und Rechteckdarstellung Abb. 73). Die Klasse mit $x = 32$ z. B. umfaßt die 40 Stäbe, deren Bruchdehnung zwischen 31 und 33% liegt. Bei der Berechnung von M und σ gehen (vgl. S. 72) die $x - A$ und $(x - A)^2$ einer Klasse so oft in die Summen Σ_1 und Σ_2 (vgl. S. 73) ein, wie es der Klassenhäufigkeit y entspricht. Man muß also Produkte $y(x - A)$ und $y(x - A)^2 = y(x - A) \cdot (x - A)$ bilden. $x - A$ rechnet man in Klassen und berücksichtigt die Klassengröße 2 erst am Schlusse.

Dehnung x in %	Häufigkeit y	$x - A$ in Klassen	$y(x - A)$	$y(x - A)^2$
24	0	— 5	0	0
26	1	— 4	— 4	16
28	6	— 3	— 18	54
30	27	— 2	— 54	108
32	40	— 1	— 40	40
34	54	0	— 116	0
36	45	1	45	45
38	23	2	46	92
40	7	3	21	63
42	2	4	8	32
44	0	5	0	0
			120	
$n = 205$			$\Sigma_1 = 120 - 116 = 4$	$\Sigma_2 = 450$

$$A = 34\%$$

$$\Sigma_1 : n = 4 : 205 \approx 0,0195 \text{ Klassen} = 0,039\%$$

$$M = A + \frac{\Sigma_1}{n} \approx 34 + 0,039 = 34,039\%$$

$$\frac{\Sigma_2 : n = 450 : 205 \approx 2,1951}{(M - A)^2 \approx 0,0195^2 \approx 0,0004} \quad \begin{array}{l} + \\ - \end{array}$$

$$\sigma^2 = \frac{\Sigma_2}{n} - (M - A)^2 \approx 2,1947$$

$$\sigma \approx 1,482 \text{ Klassen} = 2,964\%$$

$$\mu \approx \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \approx \frac{2,964}{\sqrt{205}} \approx 0,21\%$$

„Erwartungsmäßige“ Dehnung:

(34,04 ± 2,96) % oder (34 ± 3) % beim einzelnen Probestab

(34,04 ± 0,21) % beim Durchschnitt, hier ohne Bedeutung.

t) **Geometrisches an der Gaußschen Fehlerkurve. Fehlerintegral.** Die Streuung σ für den Idealfall der Gaußschen Verteilungskurve

(Abb. 72) ist die Abszisse des rechten Wendepunktes W (Ordinate $\frac{h}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{\sqrt{e}}$

$\approx 0,61 \frac{h}{\sqrt{\pi}}$, wobei $\frac{h}{\sqrt{\pi}}$ die Gipfelhöhe, d. h. die Ordinate für $\xi = 0$ ist)

oder der Trägheitsradius der Gesamtfläche 1 zwischen $\xi = -\infty$ und $\xi = +\infty$. Die durchschnittliche Abweichung η ist die Abszisse des

Schwerpunktes S (Ordinate $\frac{h}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{e^{\pi}} \approx 0,73 \frac{h}{\sqrt{\pi}}$) für das rechte Flächenstück

zwischen $\xi = 0$ und $\xi = +\infty$. Die Ordinate für das Quartil Q halbiert dieses Flächenstück.

Zwischen σ , η , Q und h bestehen die Beziehungen:

$$\eta = \sigma \sqrt{\frac{2}{\pi}} \approx 0,7979 \sigma,$$

$$Q \approx 0,6745 \sigma \approx \frac{2}{3} \sigma,$$

$$h = \frac{1}{\sigma\sqrt{2}} \approx \frac{0,7071}{\sigma}.$$

Sie können¹, indem man σ , η und Q alle drei getrennt empirisch-zahlenmäßig aus den Beobachtungen (η als Durchschnitt der Absolutabweichungen, Q als absolut gleich oft über- und unertroffen) bestimmt, umgekehrt zur Prüfung dienen, ob die empirische Verteilung der Beobachtungen hinreichend genau dem theoretischen Gaußschen Gesetz folgt.

¹ In England und Amerika wird vielfach statt des mittleren Fehlers der wahrscheinliche angegeben, so daß z. B. das Gesamtergebnis $M \pm \frac{2}{3} \mu$ einer Beobachtungsserie genauer aussieht als $M \pm \mu$.

Aus Tafeln [z. B. in H. L. Rietz, F. Baur: Handbuch der mathematischen Statistik. Leipzig u. Berlin: B. G. Teubner 1930] für das Fehlerintegral

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{t^2}{2}} dt,$$

das die Wahrscheinlichkeit einer Abweichung zwischen 0 und dem z fachen $z\sigma$ der Streuung σ darstellt, entnimmt man durch Verdoppeln, welcher Bruchteil der Beobachtungen theoretisch zwischen $M - z\sigma$ und $M + z\sigma$ liegen muß, z. B.

$$38,3\% \text{ zwischen } M - \frac{\sigma}{2} \text{ und } M + \frac{\sigma}{2},$$

$$50\% \text{ zwischen } M - \sigma \text{ und } M + \sigma \quad (z \approx 0,6745),$$

$$68,3\% \text{ zwischen } M - \sigma \text{ und } M + \sigma,$$

$$95,5\% \text{ zwischen } M - 2\sigma \text{ und } M + 2\sigma,$$

$$99,7\% \text{ zwischen } M - 3\sigma \text{ und } M + 3\sigma.$$

Zwischen $M - 3\sigma$ und $M + 3\sigma$ befinden sich also alle Beobachtungen bis auf $3^0/_{00}$. Fallen in einer empirischen Verteilung mehr außerhalb der dreifachen Streuung, so kann man auf grobe Beobachtungsfehler schließen statt der zufälligen, die dem Gaußschen Gesetz zugrunde liegen.

Im Beispiel S. 76—77 trifft man zwischen $M - \sigma \approx 31$ und $M + \sigma \approx 37$ zusammen $40 + 54 + 45 = 139$ Beobachtungen, d. h. 67,7% von 205. In der Fabrikationskontrolle nennt man $z\sigma$ mit passend gewähltem z die Toleranz und rechnet Fabrikate mit Merkmalen außerhalb $M \pm z\sigma$ als Ausschub.

***) Fehlerfortpflanzungsgesetz.** Sind für mehrere „unabhängige“ Größen die Durchschnitte und mittleren Fehler $x \pm m_x$, $y \pm m_y$, $z \pm m_z$, ... bestimmt, so findet sich der mittlere Fehler m_f einer Funktion $f(x, y, z, \dots)$ von x, y, z, \dots nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz von Gauß:

$$m_f^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 m_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 m_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 m_z^2 + \dots,$$

insbesondere für eine lineare Funktion $f(x, y, z, \dots) = ax + by + cz + \dots$ mit konstanten Koeffizienten a, b, c, \dots

$$m_f^2 = a^2 m_x^2 + b^2 m_y^2 + c^2 m_z^2 + \dots$$

Beispiele: 1. Summe $f(x, y) = x + y$:

$$m_{x+y} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2}, \text{ insbesondere } = m \sqrt{2}, \text{ wenn } m_x = m_y = m.$$

Natürlich ist m_{x+y} als Hypotenuse eines rechtwinkligen Dreiecks mit den Katheten m_x und m_y kleiner als $m_x + m_y$, wie man bei Höchstfehlern rechnen müßte. Denn beim mittleren Fehler wird ja berücksichtigt, daß nicht nur die schlimmste Fehleraneinanderlagerung im gleichen Sinne eintritt, sondern daß sich „im Mittel“ bei x und y Fehler teils gleichen, teils entgegengesetzten Sinnes zusammenfügen.

2. Gemessen Rechtecksseiten x und y mit den mittleren Fehlern m_x und m_y , hieraus mittlerer Fehler der berechneten Fläche $F = x \cdot y$:

$m_F = \sqrt{y^2 m_x^2 + x^2 m_y^2}$, insbesondere $= m \cdot d$, wenn $m_x = m_y = m$ und $d = \text{Diagonalenlänge}$,

mittlerer relativer Fehler:

$$\frac{m_F}{F} = \sqrt{\left(\frac{m_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{m_y}{y}\right)^2},$$

z. B. für die relativen mittleren Fehler $\frac{m_x}{x} = 2\%$ und $\frac{m_y}{y} = 1/2\%$

$$\frac{m_F}{F} = \sqrt{4 + \frac{1}{4}} \% \approx 2,06\% \quad (\text{vgl. S. 68}).$$

3. Durchschnitt $M = \frac{x + y + z + \dots}{n}$:

$$\mu = m_M = \sqrt{\left(\frac{1}{n}\right)^2 m_x^2 + \left(\frac{1}{n}\right)^2 m_y^2 + \left(\frac{1}{n}\right)^2 m_z^2 + \dots},$$

also

$$\mu = \sqrt{\left(\frac{1}{n}\right)^2 n m^2} = \frac{m}{\sqrt{n}} \quad \text{bei } m_x = m_y = m_z = \dots = m \quad (\text{vgl. S. 72, 73-74}).$$

Kann man m_f selbständig empirisch bestimmen, so gibt ein Vergleich des empirischen m_f mit dem nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz aus m_x, m_y, m_z, \dots berechneten eine gewisse Probe dafür, ob x, y, z, \dots wirklich „unabhängig“ voneinander sind.

λ) **Mittlerer Relativfehler von Potenzausdrücken.** Besonders häufig kommt der mittlere relative Fehler von Potenzausdrücken $f = k x^\alpha y^\beta z^\gamma \dots$ vor. Durch logarithmisches Differenzieren findet man einerseits

$$\frac{df}{f} = \alpha \frac{dx}{x} + \beta \frac{dy}{y} + \gamma \frac{dz}{z} + \dots,$$

andererseits muß nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz gelten:

$$\left(\frac{m_f}{f}\right)^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 m_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 m_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 m_z^2 + \dots = \left(\frac{\partial \ln f}{\partial x}\right)^2 m_x^2 + \dots$$

oder

$$\left(\frac{m_f}{f}\right)^2 = \alpha^2 \left(\frac{m_x}{x}\right)^2 + \beta^2 \left(\frac{m_y}{y}\right)^2 + \gamma^2 \left(\frac{m_z}{z}\right)^2 + \dots$$

Man hat also nur im logarithmischen Differential $\frac{df}{f}$ alle Relativfehler $\frac{df}{f}, \frac{dx}{x}, \frac{dy}{y}, \frac{dz}{z}, \dots$ selbst durch mittlere Relativfehler $\frac{m_f}{f}, \frac{m_x}{x}, \frac{m_y}{y}, \frac{m_z}{z}, \dots$ zu ersetzen und, wie immer bei mittleren Fehlern, statt der einfachen Addition Addition der Quadrate (natürlich mit quadrierten Koeffizienten $\alpha, \beta, \gamma, \dots$) vorzunehmen.

Beispiel: Der wirtschaftliche Wirkungsgrad eines Verbrennungsmotors ist

$$\eta = \frac{632 N}{B \cdot H},$$

wobei bedeuten:

N die effektive Leistung in PS,

B den Brennstoffverbrauch in kg/h,

H den unteren Heizwert des Brennstoffs in kcal/kg.

N wird mit dem Bremszaum nach der Formel

$$N = \frac{M \cdot n}{716,2}$$

bestimmt. Hierbei ist:

M das Drehmoment in mkg,
 n die Drehzahl je min.

Es sei M im Mittel auf 2% und n auf 1% genau gemessen. B schwankt im Mittel um 5%, und H liegt im Mittel auf $1/2\%$ genau fest. Wie groß ist der mittlere Fehler von η ?

$$\ln N = \ln M + \ln n - \ln 716,2$$

$$\frac{dN}{N} = \frac{dM}{M} + \frac{dn}{n},$$

$$\frac{m(N)}{N} = \sqrt{\left(\frac{m(M)}{M}\right)^2 + \left(\frac{m(n)}{n}\right)^2} = \sqrt{4 + 1} \approx 2,24\%,$$

$$\ln \eta = \ln 632 + \ln N - \ln B - \ln H,$$

$$\frac{d\eta}{\eta} = \frac{dN}{N} - \frac{dB}{B} - \frac{dH}{H},$$

$$\frac{m(\eta)}{\eta} = \sqrt{\left(\frac{m(N)}{N}\right)^2 + \left(\frac{m(B)}{B}\right)^2 + \left(\frac{m(H)}{H}\right)^2} = \sqrt{5 + 25 + \frac{1}{4}} \approx 5,5\%.$$

Wie man sieht, hat fast nur die Ungenauigkeit von B einen Einfluß. Wenn man η konstanter halten will, muß man vor allem die Schwankungen von H herabsetzen.

Solche Berechnung des mittleren Fehlers vertieft sehr die Einsicht in das Zusammenspiel verschiedener physikalischer oder technischer Faktoren, schärft die Kritik und zeigt vor allem auch den Punkt, wo der Hebel für etwaige Verbesserungen angesetzt werden muß. Durch ihren verständnisvollen Gebrauch kann sich der wissenschaftlich arbeitende Chemiker und Ingenieur vom bloßen Techniker unterscheiden.

μ) Indirekte Beobachtungen. Glättung. Beste Annäherung. Über die besprochenen grundlegenden Dinge hinaus behandelt die Ausgleichsrechnung (Methode der kleinsten Quadrate, Theorie der Beobachtungen) [vgl. z. B. W. Weitbrecht: Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate I, II. Sammlung Götschen 302, 641] vor allem die indirekten (sog. vermittelnden) Beobachtungen. Bei ihnen sind z. B. zwei Größen x und y nicht direkt beobachtet, sondern es ist eine Gleichung $ax + by = r$ vorgeschrieben. In dieser sind für a , b , r etwa n (> 2) Beobachtungssätze gemacht. Dadurch entstehen n durch die Beobachtungsfehler etwas voneinander abweichende Bedingungs-gleichungen $a_\nu x + b_\nu y = r_\nu$ ($\nu = 1, 2, \dots, n$), also zuviel für die beiden Unbekannten x und y . Man soll x und y so bestimmen (Ausgleichsgerade in der ab -Ebene), daß die Gesamtheit der Bedingungs-gleichungen „möglichst gut“ befriedigt wird, und die Genauigkeit schätzen [vgl. z. B. C. Runge, H. König: Vorlesungen über numerisches Rechnen. Berlin: Julius Springer 1924]. Ferner gehören hierher die Glättung von Beobachtungen [vgl. H. v. Sanden: Mathematisches Praktikum, Teil I. Leipzig u. Berlin: B. G. Teubner 1927. — E. T. Whittaker,

G. Robinson: The calculus of observations, Kap. 11, 2. Aufl. London, Glasgow, Bombay: Blackie and son 1926. — Vgl. auch S. 65] und die „beste“ Annäherung [C. Runge, H. König: a. a. O.] einer graphisch oder tabellarisch gegebenen Funktion durch formelmäßig bekannte Funktionen (Aufstellung von Faustformeln). Man benutzt hierbei z. B. die sog. Kugelfunktionen.

1) **Korrelationskoeffizient.** Mehr an die mathematische Statistik (Kollektivtheorie, Wahrscheinlichkeitsrechnung) schließt die Frage nach der Strammheit des Zusammenhangs zwischen zwei Größen x und y an, für welche eine größere Anzahl beobachteter Wertepaare x_ν, y_ν ($\nu = 1, 2, \dots, n$) vorliegt, z. B. zwischen Chromgehalt x und Festigkeit y von Stählen. Diese Frage wird durch den in England und Amerika durchweg, in Deutschland noch sehr wenig verbreiteten Korrelationskoeffizienten beantwortet (Schriftumsnachweis S. 71, Fußnote ¹).

Gerade von den Gedanken der Ausgleichsrechnung und mathematischen Statistik wird die Praxis des Chemikers und Ingenieurs in der nächsten Zeit allgemein noch viel mehr Gebrauch als bisher machen müssen, wie es in den angelsächsischen Ländern schon weitgehend geschieht.

Thermodynamik, Gleichgewichts- und Geschwindigkeitslehre.

Von Prof. Dr. phil. H. Mark, Wien.

I. Die Charakterisierung der Stoffe.

Einleitung.

Bei der mathematischen Behandlung der thermischen Erscheinungen haben sich mehrere mögliche Betrachtungsweisen zum Teil gleichzeitig, zum Teil nacheinander ausgebildet.

Die erste Art ist die thermodynamische. Bei ihr geht man von wenigen durch die Erfahrung in weitestem Umfang bestätigten Grundsätzen aus und stellt sie als Hauptsätze an die Spitze eines Gebäudes von deduktiven Schlüssen. Die Ergebnisse thermodynamischer Überlegungen haben die Annehmlichkeit, daß sie ebenso sicher sind, wie die zugrunde gelegten Hauptsätze. Sie sind aber zum Teil recht wenig anschaulich und liefern nur eine Beschreibung, nicht eine Erklärung der betrachteten Vorgänge.

Daher hat sich als zweite Methode die kinetische hinzugesellt. Hier wird jedes einzelne Problem für sich behandelt. Man konstruiert ein „molekulares Modell“ für den zu studierenden Vorgang, wendet auf dieses die Gesetze der Geometrie, der Mechanik und der Elektrodynamik an und versucht auf diese Weise, von den Elementar-

prozessen ausgehend, ein Bild der tatsächlichen makroskopischen Vorgänge zu entwerfen. Hierbei sind oft die mathematischen Schwierigkeiten sehr groß und die Gewißheit, richtige Ergebnisse zu erhalten, hängt von der glücklichen Wahl des Modelles ab: die Ergebnisse sind problematisch, aber anschaulich.

Im Laufe der Jahre ist diese kinetische Methode immer mehr angewendet worden und hat sich zu einem statistischen System der Betrachtungsweise verdichtet, welches bis zu einem gewissen Grad die Sicherheit der thermodynamischen Betrachtungen mit der Anschaulichkeit der kinetischen vereinigt.

Die folgende Darstellung ist in erster Linie für die Bedürfnisse desjenigen gedacht, der sich auf die praktische Verwendung der Wärmelehre vorbereiten will. Eine solche Anwendung hat aber nicht nur die Kenntnis der wichtigsten mathematischen Hilfsmittel zur Voraussetzung, sondern auch ein gewisses Maß von Verständnis für die Bedeutung dieser Hilfsmittel. Aus diesem Grund soll versucht werden, die statistische Betrachtung wenigstens dort heranzuziehen, wo dies bei dem für die ganze Darstellung gebotenen Rahmen ohne Schwierigkeit möglich erscheint.

Ehe man daran geht, die allgemeinen Gesetzmäßigkeiten aufzuzählen, welche die Umsetzungen der Stoffe beherrschen, ist es zweckmäßig, ein Kapitel voranzuschicken, in dem ganz kurz gezeigt wird, wie man die einzelnen Stoffklassen in einem bestimmten gegebenen Zustand charakterisieren kann. Dies geschieht durch die Angabe verschiedener an den betrachteten Körpern meßbarer Größen wie Volumen, Temperatur, spezifische Wärme usw. Bei diesem Bestreben hat sich herausgestellt, daß bestimmte Körperklassen — z. B. die idealen Gase, die realen Gase, die kubischen Krystalle usw. — sich dadurch zusammenfassen lassen, daß bei ihnen zwischen den genannten Zustandsgrößen bestimmte Beziehungen erfüllt sind, welche man die Zustandsgleichungen der betreffenden Körperklasse nennt. Erfüllen die Zustandsgrößen eines gegebenen Stoffes eine bestimmte Zustandsgleichung, dann wird man ihn zu der betreffenden Körperklasse rechnen. Man hat in der Angabe der erwähnten Beziehung meist die Möglichkeit für eine ziemlich weitgehende Kennzeichnung der Substanz in der Hand.

Der eben angedeutete Gedankengang läßt sich am erfolgreichsten bei den einfachsten Stoffen durchführen, nämlich bei den „verdünnten“ Gasen, wo die reine Statistik am stärksten hervortritt und durch die Kräfte zwischen den Teilchen am wenigsten verwischt wird; beim Übergang zu komplizierteren Systemen erweist es sich meist als notwendig, eine immer größere Zahl beschreibender Konstanten in die Gleichungen hineinzunehmen, so daß man hier entweder an die Genauigkeit der Übereinstimmung keine zu großen Anforderungen stellen darf oder einen gegebenen Stoff durch eine ganze Reihe von Zustandsgrößen kennzeichnen muß. Die praktische Bedeutung der Kennzeichnung für den Ingenieur kann zwar hierbei durchaus erhalten bleiben, aber die auf eine übersichtliche Zusammenfassung der Substanzen hinzielende systematische Tendenz tritt dabei immer mehr in den Hintergrund.

A. Die idealen Gase.

1. Das Gesetz von Avogadro.

A. Avogadro stellte 1811 in hypothetischer Form die Behauptung auf:

Bei gleicher Temperatur und gleichem Druck enthalten gleiche Volumina verdünnter Gase die gleiche Zahl von Elementarteilchen.

Es kommt also die Raumbanspruchung eines verdünnten Gases nicht durch die Größe und Form der einzelnen Moleküle zustande, sondern — bei gegebener Temperatur — nur durch ihre Zahl; der Druck auf die Wand eines gegebenen Gefäßes hängt nicht von der Art der darin enthaltenen Teilchen ab, sondern nur von ihrer Anzahl. Wenn man im Sinne der eingangs erwähnten statistischen Betrachtung annimmt, daß die Zwischenräume, welche die einzelnen Moleküle voneinander trennen, sehr groß sind gegenüber dem Eigenvolumen der Molekeln und voraussetzt, daß die Raumerfüllung eines Gases im wesentlichen durch die ungeordneten, von der Temperatur allein abhängigen Bewegungen der einzelnen Teilchen zustande kommt, dann ist die Richtigkeit dieser Annahme ohne weiteres einleuchtend. Man sieht, daß sich die Statistik schon hier qualitativ bewährt. Aus dem Avogadroschen Gesetz folgt sogleich, daß sich die Gewichte gleicher Volumina zweier idealer Gase, unter den gleichen Bedingungen gemessen, wie die Molekulargewichte der betrachteten Substanzen verhalten.

2. Die Gesetze von Boyle und Mariotte, Dalton und Gay-Lussac.

Dem rein vergleichenden, keine direkte und quantitative Aussage enthaltenden Gesetz von Avogadro treten andere Gesetzmäßigkeiten über das Verhalten der idealen Gase an die Seite: Boyle (1660) und Mariotte (1717) stellten fest:

Bei gegebener Temperatur ist das Produkt aus der Maßzahl des Gasdruckes p und der Maßzahl des Gasvolumens v eine konstante Größe.

Als Gleichung geschrieben:

$$(p v)_t = \text{const.} \quad (1)$$

Trägt man den Druck als Ordinate gegen das Volumen als Abszisse auf, dann erhält man gleichseitige Hyperbeln als Isothermen eines idealen Gases.

Die Temperaturabhängigkeit der in der Beziehung (1) auftretenden Konstanten ergibt sich aus den Messungen von Charles (1787), Dalton (1801) und Gay-Lussac (1802). Erwärmt man $v_0 \text{ cm}^3$ eines Gases um t^0 ohne den Druck zu ändern, so erhält man ein vergrößertes Volumen v_t entsprechend der Beziehung

$$(v)_t = v_0 (1 + a t). \quad (2)$$

Man hat hier die Isobare des idealen Gases vor sich, die in einem v/t -Diagramm als gerade Linie erscheint.

In ähnlicher Weise findet man, daß bei konstant gehaltenem Volumen der Druck nach der Gleichung

$$(p)_t = p_0 (1 + \alpha t) \quad (3)$$

ansteigt; auch die Isochore ist daher eine gerade Linie. Der Ausdehnungs- und Spannungskoeffizient α aller idealen Gase ist derselbe und beträgt nach neueren Messungen von Henning und Holborn (1921)

$$\alpha = \frac{1}{273,20}.$$

3. Die Zustandsgleichung der verdünnten Gase.

Wenn man eine bestimmte Menge eines verdünnten Gases von einem Anfangszustand, der durch die Größen p_0, v_0 und t_0 gegeben sei, in einen anderen durch die Größen p, v und t beschriebenen Zustand überführen will, dann läßt sich mit Hilfe der beiden eben erwähnten fundamentalen Gesetzmäßigkeiten dieser Übergang erschöpfend beschreiben. Man denkt sich zunächst das Gas bei dem konstanten Anfangsdruck p_0 auf t^0 erwärmt und dann bei dieser gewünschten Endtemperatur auf den gewünschten Enddruck p gebracht. Für den ersten Schritt — die isobare Erwärmung — gilt

$$v_t = v_0 (1 + \alpha t) \quad (4)$$

für den zweiten — die isotherme Kompression — gilt

$$p \cdot v = p_0 v_t. \quad (5)$$

Aus der Kombination der beiden Beziehungen (4) und (5) ergibt sich dann die gesuchte Verknüpfung zwischen den Variablen des Ausgangs- und des Endzustandes:

$$p \cdot v = p_0 v_t = p_0 v_0 (1 + \alpha t). \quad (6a)$$

Die Konstante α hat hierbei für alle Gase den gleichen Wert.

Nennt man nach Lord Kelvin (1849) die Größe

$$t + 273,20 = T$$

die absolute Temperatur, so geht (6a) in

$$\frac{p v}{T} = \frac{p_0 v_0}{273,20} = \text{const} \quad (6b)$$

über. Die auf der rechten Seite stehende Konstante hängt jetzt nur noch von der Menge des betrachteten Gases ab.

Eine weitere Vereinfachung läßt sich durch Hinzunahme des Avogadro'schen Gesetzes erreichen. Da die gleichen Raumteile aller Gase bei gleicher Temperatur und unter gleichem Druck gleich viele Molekel enthalten, liegt es nahe, die Gleichung (6b) immer auf so viele Molekeln anzuwenden, wie in einem g Mol enthalten sind. Wenn man also die Messungen von Druck, Volumen und Temperatur an einem Mol des gerade interessierenden Gases durchführt, dann wird die in (6b) enthaltene Konstante universell, d. h. von der Natur des gerade gegebenen Gases unabhängig. Man bezeichnet sie mit R und nennt sie die absolute Gaskonstante.

Durch Messungen ist festgestellt worden, daß für alle idealen Gase das Volumen v_0 , welches 1 Mol beim Atmosphärendruck

$$p_0 = 760 \text{ mm Hg}$$

und der absoluten Temperatur

$$T_0 = 273,20^\circ$$

einnimmt,

$$v_0 = 22412 \text{ cm}^3$$

beträgt. Aus diesen Zahlen ergeben sich für R die Werte

$$0,08203 \text{ Literatmosphären pro Grad und pro Mol}$$

$$8,313 \cdot 10^7 \text{ erg pro Grad und pro Mol}$$

$$1,986 \text{ cal pro Grad und pro Mol.}$$

Die Zahl der im Molvolumen vorhandenen Moleküle ist

$$N = 6,06 \times 10^{23}$$

Sie wird Loschmidtsche oder Avogadrosche Zahl genannt. Unter Benützung dieser Beziehungen erhält die Zustandsgleichung der Gase die Form

$$pv = RT. \quad (6c)$$

Alle Gase werden in dem Druck-Temperaturbereich, in welchem sie diese Beziehung erfüllen, ideale Gase genannt; die Erfahrung zeigt, daß (6c) um so besser gültig wird, je verdünnter die beobachteten Systeme sind.

Die Verwendung der Zustandsgleichung sei durch einige Beispiele erläutert:

1. Wieviel Raum nehmen 17 g Stickstoff bei 25° und 750 mm Druck ein?

$$17 \text{ g Stickstoff sind} \quad \dots \quad 1,215 \text{ Mole } N_2$$

$$750 \text{ mm Druck sind} \quad \dots \quad 0,986 \text{ at}$$

$$25^\circ \text{ C sind} \quad \dots \dots \dots 298,20^\circ \text{ absolut.}$$

Ein Mol hat unter den angegebenen Verhältnissen ein Volumen von

$$v = \frac{RT}{p} = \frac{0,08203 \cdot 298,20}{0,986} = 24,80 \text{ l}$$

und 1,214 Mole nehmen daher unter den angegebenen Bedingungen

$$v = 30,12 \text{ l}$$

2. 10 g Argon sind bei 200° C auf ein Volumen von 3000 cm^3 gebracht. Welchen Druck übt das Gas auf die Gefäßwände aus?

$$10 \text{ g Argon sind} \quad \dots \dots 0,25 \text{ Mole A}$$

$$200^\circ \text{ C sind} \quad \dots \dots \dots 473,20^\circ \text{ absolut}$$

$$3000 \text{ cm}^3 \text{ sind} \quad \dots \dots \dots 3 \text{ l.}$$

Ein Mol Argon übt unter den angegebenen Verhältnissen auf seine Wände einen Druck von

$$p = \frac{RT}{v} = \frac{0,08203 \cdot 473,20}{3} = 1,294 \text{ at}$$

aus, 0,25 Mole daher einen Druck von

$$p = 0,324 \text{ at.}$$

3. 20 g Acetylen stehen unter einem Druck von 2,5 at und erfüllen einen Raum von 20 l. Auf welcher Temperatur befindet sich das Gas? Wenn man 1 Mol Acetylen auf 2,5 at komprimiert und ihm ein Volumen von 20 l zur Verfügung stellt, dann ist seine Temperatur

$$T = \frac{2,5 \cdot 20}{0,08203} = 610^{\circ}.$$

20 g Acetylen sind 0,769 Mole, also ist die gesuchte Temperatur

$$T = 793^{\circ} \text{ absolut}$$

oder

$$t = 520^{\circ} \text{ C.}$$

4. 5 cm³ He stehen bei 20⁰ absolut unter einem Druck von 5 at; das Gas soll auf 1 at entspannt werden, indem es in ein Volumen V₂ tritt, das sich bei 300⁰ befindet. Wie groß muß V₂ gewählt sein, um die gewünschte Entspannung zu bewirken?

Antwort: Es muß gelten

$$V_2 = V_1 \frac{T_2}{T_1} \frac{p_1}{p_2} = 300 \text{ cm}^3.$$

Die Gleichung (6c) gilt nicht nur für reine Gase, sondern auch für Gemische. Dalton (1803) hat beobachtet, daß die Summe der Partialdrucke der Komponenten eines Gasgemisches gleich dem Gesamtdruck der Mischung ist

$$P_{ges} = p_1 + p_2 + p_3 \dots$$

oder

$$p_1 : p_2 : p_3 = v_1 : v_2 : v_3 = M_1 : M_2 : M_3.$$

Die Gleichung (6c) ist auf ein Mol also auf *M* g der betrachteten Substanz bezogen. Für *m* g gilt daher

$$p v = \frac{R}{M} \cdot T \cdot m. \quad (6d)$$

Da man leicht *m* g eines Gases auswägen, bei gegebener Temperatur seinen Druck und sein Volumen bestimmen kann und die Gaskonstante *R* ein für allemal kennt, ergibt sich hieraus eine einfache Methode zur Bestimmung des Molekulargewichts gasförmiger Substanzen.

Beispiel. 0,0552 g einer unbekanntenen Substanz nehmen bei einem Druck von 73,0 cm Quecksilber und bei 15⁰ C den Raum von 38,5 cm³ ein. Welche Substanz liegt vor?

$$\begin{array}{l} 15^{\circ} \text{ C sind} \quad \dots \quad 288^{\circ} \text{ absolut} \\ 73 \text{ cm Hg sind} \quad \dots \quad 0,96 \text{ at} \\ 38,5 \text{ cm}^3 \text{ sind} \quad \dots \quad 0,0385 \text{ l} \end{array}$$

Nach Gleichung (6d) gilt

$$M = \frac{R \cdot T \cdot m}{p \cdot v} = \frac{0,082 \cdot 288 \cdot 0,0552}{0,96 \cdot 0,0385} = 36.$$

Die Substanz ist also HCl mit dem theoretischen Molekulargewicht von 36.

Für die praktische Ausführung dieser Molekulargewichtsbestimmungen aus der Dampfdichte sind eine Reihe von Versuchsanordnungen vorgeschlagen worden, bezüglich derer einige Hinweise auf

zusammenfassende Darstellungen und Lehrbücher genügen mögen. [Siehe besonders W. Nernst: Theoretische Chemie, 11.—15. Aufl., S. 291 f. Stuttgart 1926. A. Eucken: Lehrbuch der chemischen Physik, S. 118. Leipzig 1930. J. Eggert: Lehrbuch der physikalischen Chemie, 3. Aufl., S. 16—18. Leipzig 1931.]

Die Zustandsgleichung der idealen Gase hat sich als ein wichtiges und in weitem Bereiche gültiges Gesetz erwiesen. Es soll nun gezeigt werden, daß sie mit den Grundanschauungen der Statistik im besten Einklang steht. Die folgende Ableitung ist zwar durchaus nicht streng, vermittelt aber in übersichtlicher und einfacher Form den in der Einleitung erwähnten Übergang vom mikroskopischen Bild des molekularen Geschehens zu der makroskopischen Gesetzmäßigkeit.

Denkt man sich viele — z. B. N — kleine voneinander unabhängig bewegte Teilchen, die wir als elastische Kugeln annehmen wollen, in ein Gefäß vom Volumen V gebracht, dann werden sie auf die Wände dieses Gefäßes dadurch einen Druck ausüben, daß jedes von ihnen mit einer bestimmten Geschwindigkeit wiederholt an verschiedene Stellen der Wand stößt und dort elastisch reflektiert wird. Wenn die Masse eines einzelnen Teilchens m beträgt und die Komponente seiner Geschwindigkeit senkrecht zu der gerade betrachteten Wand mit u bezeichnet wird, ist der beim Auftreffen auf die Wand übertragene Impuls mu . Da aber das Teilchen nach der elastischen Reflexion an der Wand mit derselben Geschwindigkeit u wieder in den Raum zurückfliegt, ist der gesamte, bei einer Reflexion an der Wand auf diese übertragene Impuls

$$i = 2 m u.$$

Der Druck ist definiert durch die pro s auf den cm^2 der Wandung übertragene Bewegungsgröße. Denkt man sich einen cm^2 der Wand abgegrenzt, so werden alle diejenigen Teilchen diese Fläche in der nächsten s treffen, die von ihr nicht weiter entfernt sind als u cm, denn u ist ja der pro s zurückgelegte Weg. Da in der Volumeinheit $\frac{N}{V}$ Teilchen enthalten sind, treffen in der nächsten s

$$\frac{N}{V} \cdot u$$

auf den abgegrenzten cm^2 der Wand. Jedes Teilchen überträgt den Impuls i , so daß pro s auf die Flächeneinheit der Impuls

$$I = \frac{2 N m u^2}{V}$$

übertragen wird. Weiterhin ist zu bedenken, daß nicht alle Teilchen in derselben Richtung fliegen, daß vielmehr die Geschwindigkeiten der Molekeln sechs verschiedene Richtungen haben können, entsprechend den drei positiven und den drei negativen Richtungen eines rechtwinkligen räumlichen Koordinatenkreuzes. Daher wird sich der Gesamtdruck auf die einzelnen Flächen so verteilen, daß auf ein an einer bestimmten Wandstelle herausgegriffenes Flächenelement nur ein Impuls von

$$\frac{I}{6} = \frac{2}{6} \cdot \frac{N}{V} \cdot m u^2$$

entfällt. Diesen Impuls hat man im Sinne der statistischen Betrachtungsweise mit dem Gasdruck zu identifizieren. Der Gasdruck ist also

$$p = \frac{N m u^2}{3 \cdot V}. \tag{7}$$

Hierin bedeutet N die Zahl der Teilchen in dem betrachteten Volumen und u die mittlere Geschwindigkeit der Moleküle. Vergleicht man (6c) mit (7) so ergibt sich

$$R T = \frac{N m u^2}{3} = \frac{2}{3} N \cdot \frac{m}{2} u^2. \tag{8}$$

Das Produkt $R T$ mißt also die mittlere kinetische Energie aller bewegten Teilchen; sie ist von der speziellen Natur des Gases und von dem Volumen unabhängig und direkt proportional der absoluten Temperatur; Proportionalitätsfaktor ist die Gaskonstante R . Bei kinetischen und statistischen Betrachtungen ist es häufig zweckmäßig, die „Gaskonstante für ein einzelnes Molekül“ zu definieren und die Größe

$$k = \frac{R}{N} = 1,37 \cdot 10^{-16} \text{ erg pro Grad} \\ = 3,28 \cdot 10^{-24} \text{ cal pro Grad}$$

zu bilden; sie wird die Boltzmannsche Konstante genannt und spielt in der kinetischen Theorie und in der Statistik eine wichtige Rolle.

Die mittlere kinetische Energie ε , welche in den drei Freiheitsgraden der reinen Translationsbewegung enthalten ist, wird durch

$$\varepsilon = \frac{1}{2} m u^2 = \frac{3}{2} k T$$

gegeben. Auf jeden einzelnen Freiheitsgrad entfällt daher

$$\varepsilon \text{ pro Freiheitsgrad} = \frac{1}{2} k T.$$

Tabelle I. Die mittleren Geschwindigkeiten einiger wichtiger Gase und Dämpfe.

Substanz	u in cm/s	Temperatur in °C
Argon	38080	0
Ammoniak	58270	0
Benzol	27220	100
Chlor	28560	0
Helium	120400	0
Jod	15150	—
Kohlendioxyd	36250	0
Kohlenoxyd	45450	0
Luft	44670	0
Quecksilber	17000	300
Sauerstoff	42510	0
Schwefelwasserstoff	41190	0
Stickstoff	45430	0
Wasserstoff	169200	0

Die Gleichung (8) gestattet ferner, eine spezifisch mikroskopische Größe, nämlich die mittlere Geschwindigkeit der Moleküle eines Gases bei gegebener Temperatur zu berechnen. Man erhält

$$u = \sqrt{\frac{3 k T}{m}}. \tag{9}$$

Setzt man hier für die Masse des Wasserstoffatoms den Wert

$$m = 1,663 \cdot 10^{-24} \text{ g}$$

ein, so erhält man für verschiedene der wichtigsten Gase die in der Tabelle I enthaltenen Zahlen.

In der Tat lieferten direkte Messungen von Stern (1920) z. B. für die mittlere Geschwindigkeit der Atome des Silberdampfes bei 1200° C einen Wert von $u = 5,6 \cdot 10^4 \text{ cm/s}^{-1}$. Die Gleichung (9) liefert, wenn

man das Atomgewicht für Silber und die Versuchstemperatur einsetzt:

$$u = 5,86 \cdot 10^4 \text{ cm/s}^{-1}.$$

Man sieht, daß die Übereinstimmung sehr befriedigend ist, daß also das den thermodynamischen Erscheinungen zugrunde gelegte mikroskopische Bild der direkten experimentellen Prüfung gut Stand hält.

Die Einführung einer mittleren Geschwindigkeit bedeutet eine gewisse Vernachlässigung, da in Wirklichkeit natürlich jedes einzelne Molekül eine bestimmte, von diesem Mittelwert abweichende Geschwindigkeit besitzt. Es entsteht die Frage, in welcher Weise sich die tatsächlichen Geschwindigkeiten um den mit der absoluten Temperatur durch die Beziehung (9) verknüpften Mittelwert verteilen. Die Antwort darauf gibt das Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilungsgesetz, welches besagt, daß unter N Molekülen eines Gases die Anzahl dN derjenigen, die eine Geschwindigkeit zwischen w und $w + dw$ besitzen, durch den Ausdruck

$$dN = \sqrt{\frac{54}{\pi}} \cdot N \cdot \frac{w^2}{u^3} \cdot e^{-\frac{3w^2}{2u^2}} dw \quad (10)$$

gegeben ist. Hierbei bedeutet u die aus Gleichung (9) sich ergebende mittlere Geschwindigkeit (genauer „mittlere arithmetische“ Geschwindigkeit \bar{u}_a).

Tabelle 2 gibt nach J. Eggert einen Überblick über die Geschwindigkeitsverteilung der Stickstoffmoleküle bei Zimmertemperatur nach dem Maxwell'schen Gesetz und die Abb. 1 zeigt die Verhältnisse graphisch; man sieht, daß eine gewisse wahrscheinlichste Geschwindigkeit c_w existiert, die von der arithmetisch und geometrisch gefundenen mittleren Geschwindigkeit ein wenig nach unten abweicht. Das Verhältnis der drei Mittelwerte ist:

$$u_w : \bar{u}_a : \bar{u}_g = 0,82 : 0,92 : 1.$$

Ebenso wie der Mittelwert hat sich auch der ganze Verlauf der Maxwell'schen Verteilungskurve experimentell durch Versuche von Stern und Eldrige an Ag und Cd-Dampf bestens bestätigen lassen.

Beispiel. In einem Glaskolben von 5 l Inhalt befinden sich 4 g H_2S bei einer Temperatur von 0°C . Wieviele Moleküle haben Geschwindigkeiten zwischen $4,4$ und $4,6 \cdot 10^4 \text{ cm/s}$ und welchen Partialdruck übt diese Gruppe von Molekülen auf die Gefäßwand aus?

Die mittlere Geschwindigkeit u (genauer \bar{u}_a) der H_2S -Moleküle beträgt bei 273° abs. etwa $1,4 \cdot 10^4 \text{ cm/s}$; die Zahl der in dem Gefäß vorhandenen Molekülen N ist $4,0 \cdot 10^{22}$; daher ist nach (10)

$$dN = 4,2 \cdot 4,0 \cdot 10^{22} \cdot 7 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-5} \cdot 2 \cdot 10^3 = 2,2 \cdot 10^{23} \cdot e^{-5} \sim 1 \cdot 10^{18}.$$

Der von ihnen ausgeübte Partialdruck beträgt

$$\begin{aligned} p &= \frac{Nm w^2}{3v} = \frac{11 \cdot 10^3}{15 \cdot 10^3} \cdot \frac{10^{18} \cdot 34 \cdot 1,65 \cdot 10^{-24} \cdot 20 \cdot 10^8}{3 \cdot 5 \cdot 10^3} = \\ &= 1 \cdot 10^1 \text{ dyn/cm}^2 = 10^{-5} \text{ at.} \end{aligned}$$

Tabelle 2. Die Geschwindigkeitsverteilung der Stickstoffmoleküle bei Zimmertemperatur nach dem Gesetz von Maxwell.

Bereich von w (cm/s^{-1})	Häufigkeit (%)
$0 < w < 10^4$	1
$1 \cdot 10^4 < w < 3 \cdot 10^4$	25
$3 \cdot 10^4 < w < 5 \cdot 10^4$	42
$5 \cdot 10^4 < w < 7 \cdot 10^4$	24
$7 \cdot 10^4 < w < 9 \cdot 10^4$	7
$9 \cdot 10^4 < w < \infty$	1
	[100]

Die e -Funktion, welche man nach Gleichung (10) zur Beantwortung dieser Frage braucht, kann man entweder durch Logarithmieren bestimmen

$$\log \text{nat } a = 2,303 \log^{10} a$$

oder man schlägt sie in den Funktionstafeln von Jancke-Emde nach, wo sie direkt tabuliert ist.

Die Moleküle eines Gases stoßen infolge der ungeordneten Bewegung, die sie ausführen, nicht nur an die Wände, sondern auch gegeneinander. Bei der Betrachtung einer großen Menge einzelner Moleküle läßt sich daher eine mittlere Stoßzahl und eine mittlere freie Weglänge definieren. Legt man die bereits bekannte mittlere Geschwindigkeit und den aus anderen Messungen zur Verfügung stehenden Molekülradius r zugrunde, so erhält man: Die Zahl z der Stöße, die ein Molekül pro s erleidet, beträgt

$$z = \sqrt{2} \pi n r^2 \bar{u}_a,$$

wenn n die Anzahl der Moleküle pro cm^3 und \bar{u}_a die arithmetisch gemittelte Geschwindigkeit ist.

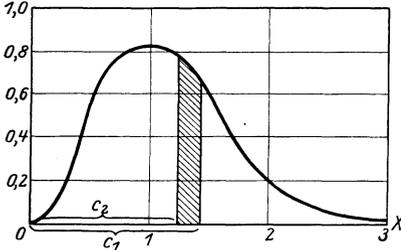


Abb. 1. Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung.

Die Gesamtzahl aller Stöße pro s und cm^3 ist

$$Z = \frac{z n}{2} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot n^2 r^2 \bar{u}_a. \quad (11)$$

Beispiel. Wie oft stößt ein Heliummolekül mit anderen zusammen, wenn 2 mg dieses Gases bei Zimmertemperatur in einer Capillare von $0,8 \text{ cm}^3$ eingeschlossen sind?

$$Z \sim 5,6 \cdot 10^9.$$

Wobei r mit $0,5 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$ angenommen wurde.

Die mittlere freie Weglänge \bar{e} ergibt sich als derjenige Weg, der zwischen zwei Zusammenstößen zurückgelegt wird, direkt aus dem Verhältnis von Geschwindigkeit und Stoßzahl

$$\bar{e} = \frac{\bar{u}_a}{Z} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi n r^2}. \quad (12)$$

Man sieht, daß die freie Weglänge der Dichte (dem Druck) sowie dem Molekülquerschnitt umgekehrt proportional ist. Auch die mittleren freien Weglängen konnten experimentell direkt bestimmt werden und ergeben sich in Übereinstimmung mit der Gleichung (12).

Beispiel. Welchen Weg legt im Mittel ein Quecksilberatom innerhalb des Dampfes einer Quecksilbervakuumpumpe zurück? Druck etwa 4 mm Hg.

$$\bar{e} \sim 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$$

für r wurde $1,55 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$ angenommen.

Aus dem Bild der unregelmäßig durcheinander fliegenden, voneinander statistisch unabhängigen Teilchen lassen sich noch zwei weitere, für die technischen Gasreaktionen, die Wärmeübertragung durch Gase

und andere Prozesse wichtige Größen ableiten: die innere Reibung und die Wärmeleitfähigkeit.

Für die innere Reibung ergibt sich aus der kinetischen Gastheorie unter Berücksichtigung der Maxwell'schen Verteilung zu

$$\eta = k \frac{m \bar{u}_a}{\pi r^2}. \quad (13)$$

k ist eine Konstante, die bei den meisten Gasen zwischen 0,34 und 0,50 liegt.

Die Wärmeleitfähigkeit errechnet sich zu:

$$\lambda = \eta \cdot c_v. \quad (13a)$$

Darin ist c_v die spezifische Wärme bei konstantem Volumen.

Sowohl die innere Reibung als die Wärmeleitfähigkeit sind im Gebiet der idealen Gase unabhängig von der Dichte und wegen (13) und (9) proportional der Wurzel aus der absoluten Temperatur.

Die Gleichung (8) liefert den Energieinhalt E eines idealen Gases bei gegebener Temperatur. Sie kann dazu benutzt werden, um die sehr wichtige Größe der spezifischen Wärme eines idealen Gases zu berechnen. Man versteht hierunter diejenige Wärmemenge, welche notwendig ist, um 1 g eines gegebenen Körpers von 15 auf 16° C zu bringen und unter der Molwärme die gleiche Energiemenge für ein Mol der betrachteten Substanz. Man hat hier entsprechend den experimentellen Möglichkeiten noch zu unterscheiden zwischen der spezifischen Wärme bei konstantem Volumen und der bei konstantem Druck.

Der Energieinhalt eines einatomigen Gases von N Molekeln mit der mittleren Geschwindigkeit u wird gemessen durch

$$E = N \cdot \frac{m}{2} \cdot u^2.$$

Daraus ergibt sich unter Benutzung von (8)

$$E = \frac{3}{2} R T$$

und daher die Molwärme bei konstantem Volumen zu

$$C_v = \left(\frac{dE}{dT} \right)_v = \frac{3}{2} R. \quad (14)$$

¹ Bei etwa 100°.

Tabelle 3. C_p - und C_v -Werte einiger wichtiger Gase bei Zimmertemperatur.

Substanz	C_p in cal/Mol	C_v in cal/Mol	Differenz $C_p - C_v$
He.	5,00	3,00	2,00
A	5,07	2,98	2,09
H ₂	6,87	4,84	2,03
CO ₂	8,89	5,92	1,97
Cl ₂	8,19	5,90	2,29
H ₂ S	8,92	—	—
Methan.	8,31	6,41	1,90
Chlormethyl.	8,92	—	—
HCl	6,82	5,03	1,79
NH ₃	8,72	6,65	2,07
Acetylen	10,46	8,12	2,34
H ₂ O	6,83 ¹	—	—
CO.	7,01	—	—
Luft	6,99	—	—
Benzol	25,8 ¹	—	—
Chloroform	17,2 ¹	—	—
Äthylalkohol	20,9 ¹	—	—

Man erhält daher für alle idealen einatomigen Gase die gleiche Molwärme von
2,98 cal pro Grad.

Auch diese Folgerung der Gastheorie hat sich experimentell auf das beste bestätigt, wie die Tabelle 3 zeigt.

Beispiel. Welche Wärmemenge ist notwendig, um ein Zimmer von $4 \times 5 \times 3$ m von 12° auf 18° zu erwärmen?

Die Temperaturdifferenz beträgt 6° . Der Rauminhalt ist $60\,000\,000$ cm³ oder $6 \cdot 10^4$ l. Das Zimmer enthält also etwa $n = 2671$ Mole Luft.

Die benötigte Wärmemenge ist daher

$$Q = \frac{3}{2} \cdot R \cdot n \cdot \Delta T$$

$$\sim 48\,000 \text{ cal.}$$

Die Beziehung (14) verlangt, daß die spezifische Wärme einatomiger Gase von der Temperatur unabhängig sein soll, was auch in der Tabelle 4. Mittlere Molwärme von HCl bei verschiedenen Temperaturen nach A. Eucken.

T	\bar{C}_v beob.	\bar{C}_v ber.
290—1955	5,810	5,64
290—2115	5,90	5,70
290—2135	5,92	5,71
290—2318	5,94	5,75

Tat der Fall ist. Bei mehratomigen Gasen resultiert allerdings ein wesentlich anderes Verhalten. Hier kann die zugeführte Energie nicht nur in den drei kinetischen Freiheitsgraden der Translationsbewegung aufgespeichert werden, sondern auch noch in den Schwingungen und Rotationen der mehratomigen Moleküle. Diese periodischen Bewegungsarten der Molekeln unterliegen aber den Gesetzen der Quantentheorie, was zur Folge hat, daß bei höherer Temperatur eine größere Zahl von Schwingungs- und Rotationsmöglichkeiten existiert als bei niedriger.

All das bewirkt, daß sowohl C_v als auch C_p bei mehratomigen Gasen größer sind als die entsprechenden Werte bei einatomigen und daß die Molwärmen temperaturabhängig werden. Die Zunahme mit steigender Temperatur wird um so stärker, je mehr Freiheitsgrade der Schwingung und Rotation in der Molekel auftreten. Die Tabelle 4 gibt die mittlere Molwärme von HCl als Funktion der Temperatur wieder; die in ihr enthaltenen Zahlen sind nach der Gleichung

$$\bar{C}_v = 4,965 + 0,7 \cdot 10^{-5} \cdot (T + 290) + K$$

$K =$ Konstante, die durch die Wärmekapazität der Apparatur gegeben ist, berechnet.

Ähnliche Beziehungen gelten auch für andere Gase; einige Ansätze zur Berechnung der spezifischen Wärme bei konstantem Druck für höhere Temperaturen seien aufgeführt:

$$\begin{aligned} \text{N}_2 & \dots \dots c_p = 0,2491 + 0,0000095 t \\ \text{H}_2\text{O} & \dots \dots c_p = 0,4574 + 0,0000462 t \\ \text{CO}_2 & \dots \dots c_p = 0,1971 + 0,000128 t + 1 \cdot 10^{-8} t^2. \end{aligned}$$

Die Ansätze gelten für Atmosphärendruck.

B. Die realen Gase und die Flüssigkeiten.

Die Erfahrung zeigt, daß beim Übergang zu stark komprimierten Gasen die Gleichung (6c) (S. 85) nicht mehr mit genügender Exaktheit gewahrt bleibt. Es ergeben sich Abweichungen, die um so merklicher werden, je höher die Drucke sind. Deswegen ist die Beziehung (6c) als ein Grenzgesetz aufzufassen; diejenigen Gase, welche ihm genügen, werden als die „idealen“ bezeichnet. Im Gegensatz dazu nennt man ein Gas, das sich im Zustand so hoher Kompression befindet, daß es der Beziehung (6c) nicht mehr genügt, ein reales Gas. Van der Waals hat als erster gezeigt, wie man sich die Abweichungen von den Forderungen der idealen Gasgleichung im Sinne der kinetisch-statistischen Anschauung verständlich machen kann. Betrachtet man nämlich die einzelnen Teilchen eines Gases nicht mehr als punktförmige und statistisch voneinander völlig unabhängige Gebilde, sondern gibt ihnen ein gewisses Eigenvolumen und bestimmte Kräfte, so erhält man an Stelle der Beziehung (6c) eine etwas kompliziertere Gleichung, der, wie sich in der Tat herausstellt, die in der Natur vorkommenden Gase über einen erheblich weiteren Temperatur- und Druckbereich genügen.

1. Die Volumenkorrektur.

Zunächst ist leicht einzusehen, wie sich das Vorhandensein eines bestimmten Eigenvolumens der Moleküle auswirkt. Der Buchstabe v in der Zustandsgleichung mißt das einem Mol des betrachteten Gases tatsächlich zur Verfügung stehende Volumen und ist bei den idealen Gasen mit dem Gefäßvolumen zu identifizieren. Wenn aber die Moleküle des Gases selbst eine bestimmte Volumensbeanspruchung zeigen, dann ist das den Teilchenschwerpunkten für ihre statistischen Bewegungen zur Verfügung stehende „wahre“ oder „freie“ Volumen nicht mehr v , sondern um einen bestimmten Betrag kleiner. Dementsprechend wurde von van der Waals an Stelle von v in die Zustandsgleichung ein Faktor

$$v_{\text{frei}} = v - b$$

eingesetzt, wobei b das durch die Moleküle selbst erfüllte Volumen anzeigt.

Eine genauere statistische Analyse ergibt, daß b in erster Näherung gleich dem vierfachen Eigenvolumen der Moleküle zu setzen ist. Dieser hohe Wert rührt daher, daß ein Molekül nicht nur sein eigenes Volumen beansprucht, sondern infolge seiner kinetischen Energie einen etwas größeren Raumteil für die Bewegung der anderen Moleküle blockiert. Bei genauer Überlegung findet man, daß b keine wahre Konstante, sondern eine schwach temperaturabhängige Größe ist.

2. Die Druckkorrektur.

Die Erfahrung hat gezeigt, daß ein reales Gas bei zunehmendem Druck sein Volumen stärker verkleinert als es die Zustandsgleichung (6c) verlangt. Es scheint also unter einem Druck zu stehen, der höher

ist, als der von außen einwirkende. Dieser Binnendruck läßt sich, wie van der Waals gezeigt hat, auf die gegenseitige Anziehung der Moleküle zurückführen und ist in erster Näherung durch

$$p_i = \frac{a}{v^2}$$

gegeben. Die Konstante a bildet hierbei ein Maß für die zwischenmolekularen Kräfte und ist ebenso wie b eine neue, das Gas charakterisierende Größe.

Mit diesen beiden Korrekturen verfeinert sich die Zustandsgleichung (6c) zu der van der Waalsschen Zustandsgleichung

Tabelle 5. Die van der Waalsschen Konstanten einiger wichtiger Gase.

	$a \cdot 10^5$	$b \cdot 10^6$
Helium	6,8	1058
Argon	268	1437
Neon	42	763
Krypton	462	1776
Xenon	816	2279
Wasserstoff	48	1188
Stickstoff	268	1719
Sauerstoff	276	1441
Schwefeldioxyd	1338	2516
Kohlensäure	717	1907
Stickstoffdioxyd	1053	1975
Cl ₂	1157	2259
(CN) ₂	1446	2900
HCl	731	1822
HBr	887	1978
Äthan	1189	3120
Äthylen	777	2228
Acetylen	875	2293
Äthylchlorid	2234	3966
Anilin	5282	6113

$$(v - b) \left(p + \frac{a}{v^2} \right) = R T, \quad (15)$$

die das Verhalten der meisten Gase über größere Bereiche der Zustandsvariablen recht gut wiedergibt. Während im Gültigkeitsbereich der idealen Gasgleichung eine einzige (universelle) Konstante — nämlich R — ausreicht, um das Verhalten der Gase zu charakterisieren, erweisen sich noch zwei weitere Konstanten als notwendig, um über einen größeren Druck- und Temperaturbereich das Verhalten eines bestimmten Gases richtig wiederzugeben. Es ist klar, daß diese vergrößerte Anzahl von Konstanten eine bessere Anpassung an die tatsächlichen Verhältnisse gestattet. In der van der Waalsschen Zustandsgleichung bringt die Einführung der neuen Parameter zugleich eine gedanklich tiefere Erfassung der tatsächlichen Verhältnisse zum Aus-

druck, da jeder der beiden neu eingeführten Größen eine bestimmte physikalische Bedeutung zukommt. Durch Druck-, Volum- und Temperaturmessung sind die a - und b -Werte zahlreicher Gase bestimmt worden; Tabelle 5 enthält einige Beispiele hierfür.

Wünscht man den Gültigkeitsbereich der Zustandsgleichung bis zu sehr hohen Drucken und Temperaturen auszudehnen, dann genügt erfahrungsgemäß auch die van der Waalssche Form nicht mehr. Es stellt sich dann heraus, daß die „Konstanten“ a und b vom Volumen bzw. von der Temperatur abhängig werden. Man muß dann diese beiden Größen durch neue Ausdrücke mit neuen Konstanten ersetzen und kommt auf diese Weise zu weiteren, zum Teil recht komplizierten Zustandsgleichungen, die dann einen noch größeren Bereich der Zustandsvariablen brauchbar wiedergeben. Leider geht hierbei die physikalische Bedeutung der neu auftretenden Konstanten allmählich verloren. Man ist also zwar befähigt, durch vielkonstantige Beziehungen das Verhalten eines gegebenen Gases über einen sehr weiten Bereich recht exakt wieder-

zugeben, was für technische Zwecke häufig von Bedeutung sein kann, muß aber auf unmittelbare physikalische Anschaulichkeit der dabei verwendeten Beziehungen allmählich verzichten. Deshalb mag es genügen, hier mit der Erörterung der van der Waalsschen Zustandsgleichung abzuschließen und bezüglich genauerer Zustandsgleichungen auf die schon erwähnten ausführlicheren Lehrbücher der physikalischen Chemie zu verweisen.

Um zu zeigen, wie man die van der Waalssche Zustandsgleichung benutzen kann, seien einige Beispiele angeführt.

Beispiel 1. Das spezifische Volumen (Volumen eines g) des Sauerstoffs beträgt bei 0°C und 1 at Druck 770 cm^3 ; durch welche Drucksteigerung kann es isotherm auf 1 cm^3 gebracht werden?

$$P \sim 4000\text{ at.}$$

Beispiel 2. 1 kg Kohlensäure befindet sich bei Zimmertemperatur in einer Stahlflasche von 10 l Inhalt. Welcher Druck lastet auf den Wänden der Stahlflasche?

$$P \sim 130\text{ at.}$$

Beispiel 3. In einem Tankwagen auf einem Fabrikhof befindet sich Schwefeldioxyd; die Temperatur ist -5° , das Volumen des Druckkessels ist 10 m^3 ; ein an ihm angebrachtes Manometer zeigt 4,3 at. Das Gas soll für eine Reaktion verwendet werden; wieviel kg SO_2 enthält der Kessel?

$$M \sim 130\text{ kg.}$$

3. Der Verflüssigungsvorgang und das Theorem der übereinstimmenden Zustände.

Auf S. 83 ist erwähnt worden, daß die Isothermen der idealen Gasgleichung gleichseitige Hyperbeln sind, deren Asymptoten die p - und v -Achse bilden. Die Isothermen der van der Waalsschen Zustandsgleichung für Kohlendioxyd sind in Abb. 2 aufgezeichnet. Man erhält sie, wenn man für a und b die in der Tabelle 5 enthaltenen Werte einsetzt.

An diesen Isothermen ist auffällig, daß sie für tiefere T -Werte ein charakteristisches Maximum und Minimum zeigen. In diesem s-förmigen Verlauf der $p v$ -Kurven kommt der Verflüssigungsvorgang des realen Gases zum Ausdruck. Wenn man Kohlendioxyd bei 0° auf etwa 47 at komprimiert, so daß ein Molvolumen von etwa $0,31$ erreicht wird, dann gelingt es zunächst nicht, den Gasdruck weiter zu verstärken. Vielmehr verläuft die tatsächliche $p v$ -Kurve bei weiterer Verkleinerung des Volumens von jetzt ab der v -Achse parallel (in der Abb. 2 gestrichelt gezeichnet), wodurch der isobar-isotherme Verflüssigungsprozeß des Kohlendioxyds bildlich ausgedrückt wird. Dieser Prozeß ist erst vollendet, wenn man ein Molvolumen von 75 cm^3 erreicht hat. In diesem Augenblick ist das gesamte vorhandene Gas verflüssigt und eine weitere Volumverkleinerung wird von einer außerordentlich starken Druckzunahme begleitet, weil das flüssige Kohlendioxyd praktisch inkompressibel ist.

In Abb. 2 sieht man, daß bei genügend hoher Temperatur der den Kondensationsprozeß beinhaltende s-förmige Teil der Isotherme fehlt. In diesem Gebiet ist das betrachtete Gas nicht zu verflüssigen, auch dann nicht, wenn man beliebig hohe Drucke verwendet.

Die van der Waalssche Gleichung läßt sich nach Potenzen von v geordnet schreiben:

$$v^3 + \frac{b + R T}{p} v^2 + \frac{a}{p} v - \frac{a b}{p} = 0;$$

sie ist hinsichtlich des Volumens dritten Grades und liefert daher für bestimmte Zahlenwerte des Druckes und der Temperatur im allgemeinen drei Volumwerte. Diese können entweder alle drei reell sein, wie es bei den Schnittpunkten der gestrichelten Isobare mit der 0° -Isotherme der Fall ist, oder es können zwei imaginär und einer reell sein, wie dies bei den glatten Isothermen der Fall ist oder es können endlich die drei v -Werte in einen Punkt zusammenfallen.

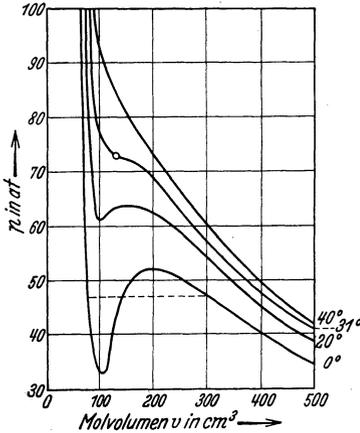


Abb. 2. Isothermen der van der Waalsschen Zustandsgleichung.

Dies letztere ist in der Abb. 2 bei der 31° Isotherme der Fall, die in ihrem Verlauf einen Wendepunkt aufweist. Seine Lage

$$v = \varphi_0, \quad p = \pi_0, \quad T = \vartheta_0$$

ist nach den algebraischen Gesetzmäßigkeiten unschwer zu bestimmen; man erhält

$$\varphi_0 = 3b, \quad \pi_0 = \frac{a}{27b^2}, \quad \vartheta_0 = \frac{8a}{27bR}. \quad (16)$$

Physikalisch bedeutet dies, daß bei den in Beziehung (16) angegebenen Zustandsgrößen eine Überführung der Substanz aus dem gasförmigen in den flüssigen Zustand ohne Auftreten einer Verflüssigungszone durchführbar ist. Man nennt diesen ausgezeichneten Punkt in der Isothermenschar den kritischen Punkt der betrachteten Substanz und die ihn definierenden Größen φ_0, π_0 und ϑ_0 die kritischen Daten. Die Tabelle 6 enthält für einige wichtige Gase diese kritischen Daten.

Man kann nun an Stelle der bisher gebrauchten Konstanten a, b und R in die Zustandsgleichung mittels der Beziehungen

$$a = 3\pi_0\varphi_0^2, \quad b = \frac{1}{3}\varphi_0, \quad R = \frac{8}{3}\frac{\pi_0\varphi_0}{\vartheta_0}$$

auch die kritischen Daten selbst einführen und erhält wiederum eine dreikonstantige Zustandsgleichung, die physikalisch natürlich den gleichen Inhalt besitzt wie die Beziehung (15) selbst.

In der neuen Form läßt sich die van der Waalssche Zustandsgleichung dadurch besonders einfach schreiben, daß man als neue Zustandsvariablen die Größen

$$\varphi = \frac{v}{\varphi_0}, \quad \pi = \frac{p}{\pi_0} \quad \text{und} \quad \vartheta = \frac{T}{\vartheta_0}$$

Tabelle 6. Die kritischen Daten einiger wichtiger Stoffe.

	Kritische Temperatur	Kritischer Druck	Kritisches Volumen	Kritische Dichte
Sauerstoff	— 118	50	—	0,44
Stickstoff	— 146	35	—	0,32
Wasserstoff	— 240	12,8	—	0,033
Kohlensäure	31,0	72,85	0,0043	0,46
Kohlenoxyd	— 138,7	34,60	—	0,31
Schwefeldioxyd	157,15	77,65	—	0,51
Ammoniak	132,9	112,3	—	0,23
Methan	— 82,85	45,6	—	0,16
Äthan	32,1	48,85	—	—
Äthylen	10,1	51,0	0,00569	0,21
Acetylen	35,5	61,65	—	0,23
Pentan	153,2	35,67	—	—
Chloräthyl	187,2	51,72	—	—
Benzol	288,68	49,55	0,01146	0,3045
Wasser	374	217,5	—	0,329

verwendet. Das heißt: man mißt den Druck, das Volumen und die Temperatur des betrachteten Gases in Vielfachen oder Bruchteilen seiner kritischen Daten. Wenn man diese reduzierten Zustandsvariablen in die Beziehung (15) einführt, erhält man die Zustandsgleichung in der Form

$$\left(\pi + \frac{3}{\varphi^2}\right) (3\varphi - 1) = 8\vartheta. \quad (17)$$

Dies besagt: Wenn man Druck, Volumen und Temperatur eines realen Gases in Vielfachen seiner kritischen Daten mißt, dann findet man, daß alle Substanzen der gemeinsamen Beziehung (17) genügen.

Dieses Theorem der übereinstimmenden Zustände ist in der Folgezeit wiederholt experimentell geprüft worden. Es hat sich hierbei als eine sehr brauchbare Regel bewährt, die um so besser gilt, je ähnlicher die zu vergleichenden Substanzen einander sind. Beim Vergleich sehr verschiedener Stoffe, z. B. Benzol und Helium aber versagt es.

4. Einige Regeln über das Verhalten der Flüssigkeiten.

Man kann aus diesem Prinzip einige Beziehungen ableiten, die zwar nicht als exakte Naturgesetze anzusprechen sind, aber doch immerhin recht brauchbare Regeln darstellen und die sich bei der praktischen Anwendung häufig ganz gut bewähren. Da sie gelegentlich bei der Berechnung von Dampfdrucken, Siedepunkten usw. nützliche Dienste leisten können, seien sie hier kurz zusammengestellt.

a) Die Troutonsche Regel

besagt, daß der Quotient aus der molaren Verdampfungswärme¹ (beim Siedepunkt) und aus der absoluten Siedetemperatur für alle Substanzen annähernd ein und denselben Wert ergibt; es ist

$$\frac{\lambda_m}{T_s} = 21,5. \quad (18)$$

¹ Das ist die Wärmemenge, welche nötig ist, um 1 Mol Substanz zu verdampfen.

Diese Aussage ist nichts anderes als eine genauere Fassung der rein gefühlsmäßigen Abschätzung, daß ein Stoff um so höher sieden wird, je größer seine Verdampfungswärme ist. Dort, wo im flüssigen Zustand

Tabelle 7. Einige Beispiele zur Troutonschen Regel.

Substanz	Molare Verdampfungswärme	Siedetemperatur T_s (absolut)	Konstante von Trouton
Helium	24	4	6,0
Wasserstoff	230	20	11,5
Sauerstoff	1620	90	16,9
Kohlensäure	4000	195	20,5
Schwefelwasserstoff	4500	213	21,5
Ammoniak	5400	240	22,7
Aceton	7270	329	22,2
Benzol	7450	353	21,2
Quecksilber	14000	630	22,2

besondere Erscheinungen — Assoziation, Polymerisation oder besonders tiefer Siedepunkt — vorliegen, versagt naturgemäß diese Regel; die Tabelle 7 gibt einen Begriff von ihrem Anwendungsbereich.

b) Die Regel von Eötvös

ist in der folgenden Beziehung enthalten:

$$w_m = \sigma \cdot v^{2/3} = k (\vartheta_k - T). \quad (19)$$

Hierin bedeutet:

σ die Oberflächenspannung,

ϑ_k die kritische Temperatur,

v das Molvolumen, $v^{2/3}$ also die molare Oberfläche,

$w_m = \sigma \cdot v^{2/3}$ ist also die Energie, welche notwendig ist, um so viel freie Oberfläche zu bilden als ein Würfel besitzt, der gerade ein Mol der Substanz enthält; man nennt sie die molare Oberflächenenergie; sie ist der molaren Verdampfungswärme analog.

Tabelle 8. Einige Beispiele zur Regel von Guldberg.

Substanz	Kritische Temperatur ϑ_k (absolut)	Siedetemperatur T_s (absolut)	Guldbergsche Konstante
Äthan	308	185	0,61
Äthylalkohol	514	351	0,68
H ₂ O	647	373	0,58
HCl	324	190	0,59
SO ₂	430	263	0,61
CO ₂	305	195	0,64
N ₂	126	77	0,61
H ₂	32	20	0,62

Auch diese Beziehung ist so lange gut erfüllt, als keine Anomalien, wie Assoziation oder Schwarmbildung vorkommen.

c) Die Regel von Guldberg

besagt, daß für die meisten Stoffe das Verhältnis aus ihrer Siedetemperatur und ihrer kritischen Temperatur

konstant ist, und zwar etwa 0,64 beträgt. Die Tabelle 8 zeigt, daß auch diese Regel häufig recht gut erfüllt ist, daß aber auch hier wiederum charakteristische Ausnahmen vorkommen.

d) Die Sugdensche Regel.

Eine weitere Regel besagt, daß für jede Substanz die Beziehung

$$\sigma^{1/4} \cdot v = P \quad (20)$$

gilt, wobei

σ = Oberflächenenergie,

v = Molvolumen und

P = eine temperaturunabhängige Konstante ist, welche für die gegebene Substanz charakteristisch ist.

Sugden (1924) hat sie als Parachor bezeichnet und gezeigt, daß sich sehr häufig der Parachor eines Moleküls additiv aus den Parachoren seiner einzelnen Atome und aus gewissen für die Molekulargestalt charakteristischen Inkrementen zusammensetzen läßt. Näheres in den ausführlichen Lehrbüchern.

5. Die Molwärmen der Flüssigkeiten.

Über die spezifischen Wärmen bzw. über die Molwärmen der Flüssigkeiten lassen sich auch nicht annähernd so genaue Vorhersagen machen wie dies bei den idealen Gasen auf statistischer Grundlage möglich war. Denn im Innern einer Flüssigkeit bestehen unbekannt und mathematisch schwer zu erfassende Assoziationen und Schwarmbildungen, welche den Wärmeinhalte in sehr unübersichtlicher Weise beeinflussen. Nur bei den einatomigen Flüssigkeiten läßt sich ein Verhalten feststellen, das dem der Festkörper (vgl. S. 104) ähnelt. Hier wurde gefunden, daß die spezifische Wärme in der Gegend von $\frac{6}{2} R$ liegt, woraus man schließen kann, daß zu den drei im Gas allein vorhandenen kinetischen Freiheitsgraden in der Flüssigkeit noch drei weitere potentielle Freiheitsgrade treten, die ihren Grund in den Kräften haben, welche die Flüssigkeit in sich zusammenhalten. Über einen weiteren Bereich erwies sich aber dieser Ansatz nicht als gültig.

6. Dampfdruck und Oberflächenform.

Aus (18) und (19) folgt, daß die Oberflächenenergie mit der Verdampfungswärme in einer gewissen Beziehung steht, was auch leicht verständlich ist, da ja beide Größen von den Kräften abhängen, die die Flüssigkeit in sich zusammenhalten. Daher übt auch die Form eines gegebenen Flüssigkeitsvolumens einen Einfluß auf diese beiden Energiebeträge aus.

Der Dampfdruck sehr kleiner, nach außen konvexer Tröpfchen ist größer als der einer ausgedehnten ebenen Flüssigkeitsoberfläche, weil ja in einem solchen Tröpfchen, wie man aus der Abb. 3 entnehmen kann, die Zahl derjenigen Moleküle, die ein einzelnes an der Oberfläche befindliches Teilchen mit merklichen Kräften festhalten, kleiner sein muß als bei einer unendlich ausgedehnten ebenen Flüssigkeitsoberfläche. In der Tat konnte W. Thomson

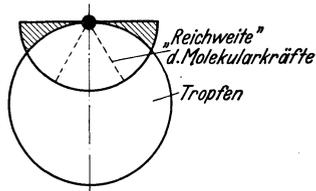


Abb. 3. In dem schraffierten Bereich sind bei ebener Oberfläche Moleküle enthalten, die auf das hervorgehobene Kräfte ausüben, bei Tropfenform aber nicht.

(1871) zeigen, daß für den Dampfdruck p' einer Flüssigkeit in Tröpfchenform die Beziehung

$$p' = p + \frac{2 \varrho_d}{\varrho_f} \cdot \frac{\sigma}{r} \quad (21)$$

gilt. Hierbei bedeutet

p den normalen Dampfdruck,

r den Radius des Tröpfchens,

σ die Oberflächenspannung und

ϱ_d bzw. ϱ_f die Dichte des Dampfes bzw. der Flüssigkeit.

Kleine Tröpfchen zeigen also einen höheren Dampfdruck als größere, eine Tatsache, die in der Sammelkrystallisation und ähnlichen Erscheinungen ihren Ausdruck findet.

C. Die Festkörper.

Der Sprachgebrauch umfaßt mit dem Worte „Festkörper“ zwei Arten von Objekten, welche physikalisch voneinander prinzipiell verschieden sind; den krystallisierten und den amorphen Festkörper. In dem vorliegenden Abschnitt soll nur von dem krystallisierten Festkörper die Rede sein; was über den amorphen festen Aggregatzustand zu sagen ist, wird später ausgeführt werden.

Wenn man sich — wie bei den Gasen — die Frage vorlegt, wie man einen gegebenen Festkörper möglichst vollständig charakterisieren kann, so stößt man auf größere Schwierigkeiten wie dort. Was nämlich den idealen Gasen eine Ausnahmstellung verleiht und ihre mathematische Beschreibung so besonders einfach macht, ist das starke Hervortreten der Statistik gegenüber den in dem System herrschenden Kräften. Beim Festkörper hat man den entgegengesetzten Fall. Hier sind es in erster Linie die Kräfte, welche das Zusammenhalten der Substanz bedingen und ihr eine definierte Form und ganz bestimmte Eigenschaften aufzwingen. Erst wenn man die durch die Wärmebewegung hervorgerufenen unregelmäßigen Schwingungen der einzelnen Atome oder Moleküle in Betracht zieht, muß man auch hier zur Verwendung statistischer Methoden greifen.

Der krystallisierte Festkörper ist dadurch besonders charakterisiert, daß in ihm die Atome oder Moleküle, aus welchen die betrachtete Substanz besteht, in den Punkten eines dreidimensionalen Raumgitters liegen und der erste Schritt bei der Beschreibung der Festkörper wird der sein, die allgemeinen Eigenschaften starrer Punktgitter zu untersuchen. Hierbei ergeben sich bereits einige grundlegende Gesetzmäßigkeiten, denen alle Festkörper gehorchen und die in dem System der geometrischen Krystallographie des Diskontinuums eine abgerundete und geschlossene Darstellung gefunden haben.

Wenn man sich nicht mit diesen geometrischen Ergebnissen begnügen will, sondern sich auch für das thermische und mechanische Verhalten der Festkörper interessiert, genügt die Betrachtung starrer Punktgitter nicht mehr. Man muß vielmehr die Tatsache berücksichtigen, daß jeder einzelne Gitterpunkt um seine Ruhelage Schwingungen ausführt, in

welchen der Wärmeinhalt des Festkörpers aufgespeichert ist. Wenn man diesen Schwingungen harmonischen Charakter zuerteilt, dann kann man aus ihnen unter Zuhilfenahme statistischer Methoden die spezifischen Wärmen der Festkörper berechnen und kommt in gute Übereinstimmung mit der experimentellen Erfahrung.

Ein weiterer Schritt der Verfeinerung erweist sich als nötig, wenn man die Wärmeausdehnung eines Festkörpers beschreiben und eine Art Zustandsgleichung für ihn aufstellen will. Dann muß man nämlich auch noch die Ungleichförmigkeit der Gitterschwingungen berücksichtigen, die in der speziellen Form der Potentialverteilung ihren Grund haben. Da es sehr viele möglichen Punktgitter gibt, können Beziehungen, die der Zustandsgleichung (12) analog sind, hier nur immer für eine ganz bestimmte Klasse von Krystallen aufgestellt werden.

Die Erfahrung hat gezeigt, daß man gewisse Gruppen von Eigenschaften der Krystalle recht gut mit der Vorstellung eines schwingenden Raumgitters erfassen kann, andere aber gar nicht. Diese Tatsache hat Darwin, Smekal, Zwicky u. a. dazu geführt, anzunehmen, daß die in der Natur vorkommenden Krystalle in Wirklichkeit nicht geschlossene Raumgitterbereiche sind, sondern aus vielen kleinen Mosaikkristallen bestehen, deren jeder zwar in sich ein geschlossenes Gitter bildet, aber gegen seine Nachbarn etwas verdreht oder verlagert ist, so daß in dem ganzen Gefüge unregelmäßige (vielleicht auch regelmäßige) Löcher, Fugen oder Spalten entstehen, die für sehr viele Erscheinungen verantwortlich gemacht werden müssen.

Diese kurzen Ausführungen zeigen, daß man bei der Beschreibung der Festkörper am besten in drei Schritten vorgeht:

1. Starre Punktgitter (Krystallstrukturtheorie, Mischkrystalle usw.);
2. Hinzunahme der Wärmebewegung (spezifische Wärmen, Zustandsgleichung des Festkörpers);
3. Mosaikstruktur (Leitfähigkeit, Plastizität, Festigkeit).

1. Krystallstruktur.

Für den krystallisierten Zustand sind einige Eigenschaften ganz besonders charakteristisch; sie haben schon früh das Interesse der Forschung auf sich gezogen und zunächst zu einer rationellen Einteilung, später aber zu einer umfassenden Theorie der Krystalle geführt. Diese auffallenden Eigenschaften der Krystalle sind:

- a) die ebenen Begrenzungsflächen;
- b) die Konstanz der zwischen diesen Flächen befindlichen Winkel;
- c) die Anisotropie der Krystalle;
- d) die Symmetrie der Krystalle.

Besonders die letztere Eigenschaft hat als Einteilungsprinzip bei der Aufstellung einer rationellen Systematik gedient. Die erwähnten Eigenschaften in ihrer Gesamtheit haben sich zunächst qualitativ und bei der weiteren Verfolgung auch quantitativ durch die Annahme erklären lassen, daß die Krystalle reelle homogene Diskontinua sind, in welchen die den makroskopischen Festkörper aufbauenden Atome oder

Moleküle raumgittermäßig angeordnet sind. Die Abb. 4 zeigt als Beispiel das Raumgitter des Diamanten, in welchem die einzelnen C-Atome die von den Mittelpunkten der Tetraeder angegebenen Lagen einnehmen.

Die Raumgittertheorie erklärt zunächst qualitativ ohne weiteres das Vorhandensein ebener Begrenzungsflächen und konstanter Winkel zwischen diesen Flächen sowie die Existenz gleichartiger und verschiedener Richtungen an Krystallen, also deren Symmetrie und Anisotropie.

Für die Systematik ergibt sich die Aufgabe alle im dreidimensionalen Raum möglichen Punktgitter aufzusuchen und übersichtlich zu ordnen. Je

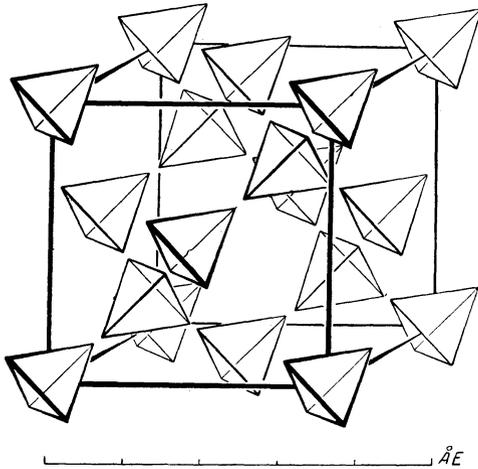


Abb. 4. Raumgitter des Diamanten.

nach der Feinheit der bei der Untersuchung verwendeten Hilfsmittel wird diese Übersicht einfacher oder komplizierter ausfallen. Wenn man nur Längen- und Winkelmessungen an einem Krystall durchführen kann, dann genügen als Rahmen für seine Klassifizierung die 6 bzw. 7 Krystallsysteme, die mit Hilfe der für sie charakteristischen Koordinatensysteme eine bequeme Beschreibung aller Flächen und Richtungen eines gegebenen Krystallindividuums gestatten.

Zieht man neben den rein geometrischen Messungen auch noch makroskopisch-physikalische Beobachtungsmethoden heran, wie die Messung der Doppelbrechung, der Pyro- oder Piezoelektrizität usw., dann kann man über die Symmetrie der untersuchten Objekte nähere Aussagen machen und kommt zu der feineren Einteilung in die 32 Krystallklassen. In ihnen liegt eine Systematik vor, die auf die Gesamtheit der makroskopisch erkennbaren Symmetrien eines Raumgitters gegründet ist.

Nimmt man auch noch die röntgenographische Krystallanalyse als Beobachtungsmittel hinzu, dann kann man einen Krystall soweit charakterisieren, daß man ihn einer der 230 Raumgruppen zuteilen vermag. Zur Durchführung dieser feinsten Klassifizierung der kristallographischen Systematik ist die Kenntnis aller Symmetrieelemente (auch der „mikroskopischen“) des Gitters eine notwendige Voraussetzung.

Unter makroskopischen Symmetrieelementen sind hierbei verstanden:

Drehachsen, Spiegelebenen und Drehspiegelebenen,

unter mikroskopischen Symmetrieelementen:

Schraubenachsen und Gleitspiegelebenen.

Wenn man die gesamte Symmetrie eines gegebenen Gitters kennt, dann kann man unter Umständen sehr genaue Angaben über den Bau derjenigen Moleküle machen, die das Gitter bilden. Da man sich die Kenntnis der mikroskopischen Symmetrieelemente nur durch röntgenoptische Messungen verschaffen kann, ist die Beugung der Röntgenstrahlen an Krystallgittern in der letzten Zeit ein sehr wichtiges Hilfsmittel zur Erforschung des Krystall- und Molekülbaues geworden.

Rein geometrisch-optische Überlegungen zeigen, daß Röntgenstrahlen an einer Krystallfläche nicht unter jedem beliebigen Winkel reflektiert werden, wie dies beim sichtbaren Licht der Fall ist, sondern nur unter ganz bestimmten Glanzwinkeln φ , deren Größe von der Wellenlänge λ des verwendeten Röntgenlichtes und von dem Abstand d aufeinander folgender Gitterebenen abhängt. Starke, d. h. experimentell beobachtbare Reflexion findet nur unter solchen Winkeln statt, die zusammen mit der Wellenlänge λ und dem Netzebenenabstand d das Bragg'sche Gesetz

$$n\lambda = 2d \sin \varphi \quad (22)$$

$$n = \text{ganze Zahl}$$

(Ordnung der Reflexion)

erfüllen. Wenn man bei bekannter Wellenlänge λ eine Reihe von reflektierten Strahlen vermißt und aus ihrer Lage die entsprechenden Interferenzwinkel φ berechnet, hat man die Möglichkeit, mit Hilfe von (22) eine Reihe von Netzebenenabständen zu bestimmen, aus denen man dann mit geeigneten geometrischen Verfahren das ganze Gitter konstruieren kann.

Die systematische Untersuchung zahlreicher Krystalle mit Hilfe dieser Methode hat zu einigen allgemeinen Gesetzen über die Bauprinzipie krystalliner Körper und die Existenz von Mischkrystallen geführt. Im besonderen hat man hierbei die absolute Größe zahlreicher Atome, Ionen und Moleküle kennengelernt. Es zeigt sich, daß die gleichen Ionen oder Atome im Krystallgitter immer wieder einen annähernd gleichen Raum beanspruchen, gleichgültig, mit welchem Partner sie chemisch verbunden sind. Erst bei sehr genauer Messung haben sich systematische Abweichungen erkennen lassen, die ihrerseits wieder für die spezielle Art der chemischen Bindung charakteristisch sind.

Einen Einblick in die wichtigsten Ergebnisse dieser Forschungsrichtung vermittelt Tabelle 9; sie enthält eine Reihe von Ionenradien,

Tabelle 9. Einige besonders wichtige Ionenradien bzw. Atomabstände.

Ion	Radius in Å	Gebundene Atome	Abstand in Å
Li +	0,4	C — H	1,0—1,1
Na +	0,5	C — C aliph	1,54
K +	0,8	C — C arom	1,42
Rb +	0,9	C = C	1,35
Cs +	1,65	C ≡ C	1,19
Mg ++	0,78	C — O	1,49
Ca ++	1,06	C = O	1,25
Sr ++	1,27	C — N	1,35
Ba ++	1,43	C = N	1,25
Se +++	0,83	C ≡ N	1,15
Al +++	0,57	C — Cl	1,86
Ti +++++	0,64	C — Br	1,95
F -	1,33	C — I	2,12
Cl -	1,81	C = S	1,60
Br -	1,96	O — O	1,61
I -	2,20	O = O	1,20
O -	1,32	O — H	0,97
		N — H	1,07
		N — O	1,38
		N = O	1,17
		N ≡ N	1,10

die aus der Strukturanalyse anorganischer Salze abgeleitet worden sind, und eine Reihe von Atomabständen, die sich aus dem Studium organischer Verbindungen ergeben haben. Die letzteren Werte zeigen besonders schön, daß bestimmten Hauptvalenzverknüpfungen im festen Zustand immer die gleichen Abstände der beiden miteinander verbundenen Atome zukommen, eine Regel, die sich bei strukturehemischen Fragen häufig als wirksames Hilfsmittel verwenden läßt.

Neben diesem allgemeinen Ergebnis sind sehr viele Angaben über die Größe und Form einzelner Molekel und Komplexionen gesammelt worden, bezüglich derer aber auf die ausführlicheren Lehrbücher verwiesen werden muß.

Schon die erste — recht grobe — Beschreibung eines Krystalls durch ein starres Punktgitter hat somit zu einer großen Menge wichtiger und interessanter Aussagen geführt, die mit der Erfahrung in bestem Einklang stehen und daher die Gittertheorie als völlig gesichert erscheinen lassen.

2. Die Zustandsgleichung des festen Körpers.

In Wirklichkeit bestehen die in der Natur vorliegenden Krystalle nicht aus dreidimensionalen starren Punktgittern, sondern jedes einzelne Atom oder Ion führt um seine Ruhelage ganz bestimmte Schwingungen aus, die — ähnlich wie die translatorische Bewegungsenergie eines Gases — ganz unregelmäßig erfolgen und mit der absoluten Temperatur des Körpers verknüpft sind; sie sind für die thermischen Eigenschaften der betrachteten Objekte maßgebend.

Bei der Schilderung der Entwicklung dieses Gebietes ist es zweckmäßig, auf die Ausführungen auf S. 88 zurückzugreifen. Versucht man, das dort in Gleichung (9) festgehaltene Ergebnis auf die Festkörper zu übertragen, so hat man zunächst zu bedenken, daß ein an eine Gleichgewichtslage elastisch gebundener Massenpunkt sechs Freiheitsgrade besitzt, nämlich drei, welche wie beim idealen Gas seiner kinetischen Energie zukommen, und drei, die seiner potentiellen Energie entsprechen. Macht man die nach der klassischen Theorie exakt zu begründende Voraussetzung, daß sich die in dem Körper aufgespeicherte Energie gleichmäßig auf die vorhandenen Freiheitsgrade verteilt, so würde folgen, daß ein einatomiger Festkörper eine Molwärme von

$$C_v = 6 \cdot \frac{R}{2} = 3R \quad (23)$$

besitzt. Diese Behauptung bildet den Inhalt des Dulong-Petitschen Gesetzes: Die Atomwärme fester Körper beträgt im Mittel 6,4 cal pro Grad. Wie die Tabelle 10 zeigt, ist das Gesetz im Bereich normaler Temperaturen für sehr viele Festkörper gut erfüllt. Es gibt aber auch ganz deutliche und charakteristische Ausnahmen, deren genaueres Studium zu einer sehr bedeutsamen Erweiterung der Theorie geführt hat. In einigen Fällen, die ebenfalls in die Tabelle eingetragen sind, ist nämlich die spezifische Wärme sehr viel kleiner als 6, ein Umstand, der lange Zeit der Theorie große Schwierigkeiten bereitete.

Erst Einstein und später Nernst-Lindemann, Debye und Born gelang es, hier durch die Anwendung der Quantentheorie eine entscheidende Wendung zu erzielen. Die Energie eines einzelnen Teilchens im idealen Gaszustand ist gegeben durch

$$\varepsilon = \frac{m}{2} \cdot \bar{u}^2. \quad (24)$$

In der statistischen Behandlung der idealen Gase ist zunächst die Frage nach der mittleren Geschwindigkeit der voneinander unabhängigen Teilchen und später — bei genauerer Behandlung — die nach dem Verteilungsgesetz der Geschwindigkeiten aufgetaucht und durch die Gleichungen (9) und (10) auch beantwortet worden. In einem Krystall-

gitter hat man aber nicht voneinander unabhängige, frei bewegliche Teilchen vor sich, sondern Gebilde, die an eine Ruhelage gebunden sind und um diese elastische Schwingungen ausführen. Betrachtet man zunächst diese Schwingungen als harmonisch, d. h. setzt man die rücktreibende Kraft der Entfernung aus der Ruhelage proportional, so ergibt die Quantentheorie für die Energie eines schwingenden Teilchens

$$\varepsilon = h \nu. \quad (25)$$

Hierin bedeutet h die Plancksche Konstante.

$$h = 6,548 \cdot 10^{-27} \text{ erg. s.}$$

und ν ist die monochromatische Frequenz des betrachteten Oszillators. So wie früher die mittlere Geschwindigkeit und die Verteilungsfunktion der Geschwindigkeiten für das ideale Gas charakteristisch war, so ist jetzt die mittlere Frequenz bzw. das Verteilungsgesetz der Frequenzen für die thermischen Eigenschaften des Festkörpers ausschlaggebend.

Der erste von Einstein (1907) unternommene Schritt bestand darin, einem bestimmten Festkörper eine mittlere „charakteristische“ Frequenz $\bar{\nu}$ zuzuordnen und mit ihrer Hilfe die Molwärme wiederzugeben. Durch die Anwendung der Quantentheorie erhält man für einatomige kubische Krystalle den Ausdruck

$$C_v = 3 R \cdot E \left(\frac{h \bar{\nu}}{k T} \right), \quad (26)$$

wobei

$$E \left(\frac{h \bar{\nu}}{k T} \right) = \left(\frac{h \bar{\nu}}{k T} \right)^2 \frac{e^{\frac{h \bar{\nu}}{k T}}}{\left(e^{\frac{h \bar{\nu}}{k T}} - 1 \right)^2}$$

Tabelle 10. Atomwärmen einiger Festkörper.

Substanz	Atomwärme	Temperatur absolut
Ag	1,58	35
	2,81	51
	4,07	77
	6,00	273
	6,64	589
Diamant. .	0,00	35
	0,01	51
	0,02	77
	1,24	273
	4,42	589
	5,45	1169
Li	5,6	291
Mg	6,1	291
K.	7,0	291
Fe	6,1	291
Sn	5,9	291
Wo	6,1	291
Pb	6,4	291
Th	6,0	291

ist. Während also beim idealen Gas die spezifische Wärme von individuellen Größen nicht mehr abhängig ist, sondern nur die Gaskonstante enthält, braucht man auch beim einfachsten Festkörper eine mittlere Frequenz zur Charakterisierung der Substanz. Die Einsteinsche Beziehung (26) hat sich in erster Näherung bei der Erfassung der Abweichungen vom Dulong-Petitschen Gesetz gut bewährt. Die Tabelle 11

Tabelle 11. Charakteristische Frequenzen $\bar{\nu}$ (nach Einstein) und Maximalfrequenzen ν_m (nach Debye) für einige Festkörper.

In die Tabelle sind die Werte für $\bar{\Theta} = \frac{h \bar{\nu}}{k}$ und $\Theta_m = \frac{h \nu_m}{k}$ eingetragen.

Substanz	$\bar{\Theta}$ aus C_v	Θ_m aus der Schallgeschwindigkeit	Θ_m aus C_v
Diamant. .	1200	—	1860
Fe	—	484	453
Al	283	413	398
Cu	236	341	315
Ag	154	220	215
Pb	67	75	88

enthält einige charakteristische Frequenzen für verschiedene Körper. Wenn $\bar{\nu}$ kleiner ist als etwa 10^{13} , dann gehorcht der betrachtete Krystall bei Zimmertemperatur noch einigermaßen dem Dulong-Petitschen Gesetz, wenn aber $\bar{\nu}$ diesen Wert merklich überschreitet, dann ergeben sich die in der Tabelle angedeuteten Ausnahmen.

Beispiel. Wieviel kcal sind nötig, um 12 g Al von 196° absolut auf 204° absolut zu erwärmen.

Man berechne zunächst die Molwärme des Al bei einer mittleren Temperatur von 200° mit Hilfe von (26), dann rechne man auf 12 g um und setze in die Gleichung

$$E = C_v \Delta T$$

ein.

$$C_v \sim 4,45 \text{ cal/Mol und Grad}$$

$$E \sim 15,8 \text{ cal.}$$

Die Einführung einer einzigen mittleren Frequenz bedeutet natürlich eine sehr starke Idealisierung der tatsächlichen Verhältnisse. Es haben daher kurze Zeit später Nernst und Lindemann besseren Anschluß an die Erfahrung dadurch zu erhalten versucht, daß sie zwei charakteristische Frequenzen einführten, ein Vorgehen, daß als Übergang zur exakteren, endgültigen Behandlung durch Debye einerseits, Born und Karman andererseits gelten kann. Erst diese Forscher haben die Frage nach dem Verteilungsgesetz der Eigenschwingungen eines Krystallgitters ins Auge gefaßt und in etwas verschiedener Weise mit einem im wesentlichen gleichen Endergebnis beantwortet. Bei der genauen Überlegung stellt sich, ähnlich wie bei dem Maxwell'schen Verteilungsgesetz, heraus, daß bestimmte Frequenzen im Gitter besonders bevorzugt sind und häufiger vorkommen als andere in ihrer Umgebung gelegene. Bei einer bestimmten Grenzfrequenz bricht das elastische Spektrum des Festkörpers plötzlich ab, so daß als charakteristische Konstante an Stelle der mittleren Frequenz $\bar{\nu}$ von Einstein, die

Debyesche Maximalfrequenz ν_m tritt. Die Formel für die Molwärme lautet jetzt

$$C_v = 3 \cdot R \cdot D \left(\frac{h \nu_m}{k T} \right) \quad (27)$$

$$D(x) = \frac{1}{x^3} \int_0^x \frac{x^3 dx}{e^x - 1}.$$

In der Tabelle 11 sind neben den mittleren Frequenzen $\bar{\nu}$ auch die ν_{\max} in der dritten Spalte eingetragen. Mit Hilfe der Formel (27) läßt sich ein noch erheblich besserer Anschluß an das Experiment erreichen als mit Gleichung (26).

Wenn man außer den Molwärmern noch andere thermische Eigenschaften eines Festkörpers, z. B. seinen Ausdehnungskoeffizienten theoretisch wiedergeben will, dann genügt die bisher skizzierte Näherung nicht mehr, sondern man muß, um diese Eigenschaft mitzuerfassen, berücksichtigen, daß die Gitterpunkte anharmonische Oszillatoren sind, daß also die rücktreibende Kraft zwar im Anfang proportional der Entfernung aus der Ruhelage zunimmt, später aber stärker ansteigt. Man muß dann eine neue, für den gegebenen Körper charakteristische Konstante einführen, um das Maß dieser Ungleichförmigkeit anzugeben. Die Beziehungen, welche sich bei der Verfolgung dieser Gedankengänge ergeben, sind ziemlich kompliziert und gelten wiederum nur für den einfachsten Fall eines einatomigen kubischen Gitters.

Es ist also beim Festkörper nicht möglich, eine der Zustandsgleichung der idealen oder realen Gase analoge, allgemein gültige Beziehung zu formulieren, sondern man kann nur für einen bestimmten Gittertyp etwas aussagen und auch hier nur über relativ kleine Bereiche der Zustandsvariablen.

3. Leitfähigkeit, Plastizität und Festigkeit.

Die Erfahrung hat gezeigt, daß eine ganze Reihe wesentlicher Krystalleigenschaften auch durch die eben kurz skizzierte verfeinerte Betrachtung nicht einmal annähernd wiedergegeben werden können. Zwei ganz verschiedene Erscheinungen: die Schärfe der Röntgenreflexe (Darwin, Ehrenberg, Mark) und die Zerreißfestigkeit (Joffé, Polanyi, Masing, Smekal) von Ionenkrystallen führten vielmehr bei ihrer genaueren experimentellen Erforschung zu der Annahme, daß die allermeisten, in der Natur vorkommenden Krystalle nicht einheitlich sind, sondern aus vielen kleinen gegeneinander nur ganz wenig verdrehten Gitterblöcken bestehen, welche durch Spalten und Risse voneinander getrennt sind. Die Existenz dieser Spalten und Löcher wurde in den letzten Jahren von verschiedenen Forschern (besonders von Smekal und Zwicky) für zahlreiche charakteristische Eigenschaften verantwortlich gemacht. Neben den beiden schon erwähnten Effekten scheinen auch die Leitfähigkeit, die Plastizität und die Diffusionserscheinungen in Festkörpern in sehr wesentlicher Weise von diesen Lockerstellen im Gitter beeinflußt zu werden (Hevesy, Tubandt).

II. Die Hauptsätze der Thermodynamik.

Einleitung.

Die bisherigen Bemühungen sind darauf gerichtet gewesen, einen gegebenen Körper — Gas, Flüssigkeit oder Krystall — in einem ganz bestimmten Zustand zu beschreiben und diesen Zustand durch gewisse Konstanten festzulegen. Für den Chemiker sind aber nicht die Zustände der Körper, sondern ihre Umsetzungen das eigentliche Ziel der Betrachtungen. Es sollen daher diejenigen allgemeinen Gesetzmäßigkeiten aufgezählt werden, die man im Laufe der Entwicklung dieses Gebietes für die Umsetzungen und Veränderungen der Stoffe aufgefunden hat.

A. Der erste Hauptsatz.

1. Die Formulierung des ersten Hauptsatzes.

Wenn man ein Stückchen Natrium auf Wasser wirft, so beobachtet man zwei Erscheinungen:

1. Die Entwicklung von Wasserstoff.
2. Eine recht beträchtliche Entwicklung von Wärme.

Die chemische Umsetzung, die sich vollzieht, wird durch die Formel



ausgedrückt. Die auf den beiden Seiten dieser Gleichung stehenden Systeme unterscheiden sich nicht nur dadurch, wie die einzelnen vorkommenden Atome verschiedenartig miteinander verbunden sind, sondern auch noch durch ihren Gesamtenergieinhalt U . Dieser nimmt im Laufe der Reaktion ab, und gerade diese Energieabgabe ermöglicht die beiden oben erwähnten — die Reaktion begleitenden — Erscheinungen. Im folgenden soll die Abnahme der Gesamtenergie eines Systems mit ΔU oder schlechthin mit dem Buchstaben U bezeichnet werden. Dabei muß bedacht werden, daß es sich jetzt nicht mehr um eine Größe handelt, welche dem betrachteten Körper in einem bestimmten Zustand zukommt, sondern um eine solche, die dem Ablauf eines bestimmten Prozesses zugeordnet ist.

Bei der Reaktion entwickelt sich aus 2 Molen H_2O ein Mol Wasserstoff in gasförmigem Zustand. Wenn man diese Entwicklung in einem mit Wasser gefüllten umgestülpten Glaszylinder vor sich gehen läßt, um den Wasserstoff in reiner Form zu erhalten, dann ist es notwendig, daß das Gas das Wasser verdrängt. Da auf diesem der Atmosphärendruck lastet, muß bei der Entwicklung eines Mols Wasserstoff eine gewisse mechanische Arbeit geleistet werden, die mit dem Symbol ΔA oder wiederum einfacher mit A bezeichnet wird. Wenn der äußere Druck p und das entwickelte Volumen Wasserstoff v beträgt, dann ist diese Arbeit gegeben durch

$$A = p \cdot v. \quad (28)$$

Häufig bleibt der äußere Druck während des ganzen Prozesses nicht konstant, sondern ändert sich allmählich mit steigendem Volumen. Es ergibt sich dann an Stelle von (28) die Beziehung

$$A = \int_{v_0}^{v_1} p \, dv. \quad (29)$$

Eine Folge der Energieabgabe des betrachteten Systems ist also die Leistung äußerer mechanischer Arbeit; sie ist aber im allgemeinen nicht die einzige Folge. Wenn man in das Wasser, welches die Entwicklung des Wasserstoffs bewirkt, ein Thermometer bringt, so beobachtet man eine Temperaturerhöhung; bei genauer Messung würde sich herausstellen, daß pro 2 Mol umgesetzten Na 88,2 kcal durch die Reaktion geliefert werden. Diese vom System nach außen abgegebene Wärmemenge bezeichnen wir mit $-\Delta Q$ oder wieder einfacher mit $-Q$, so daß die von außen dem System zugeführte Wärme das positive Vorzeichen erhält.

Die drei soeben aufgezählten Größen U , A und Q sind in der Natur sichtlich miteinander auf das engste verbunden, denn sie begleiten einen und denselben Vorgang und sind daher nur verschiedene Äußerungen des gleichen Geschehens; es ist somit eine wichtige Frage: Welche mathematische Beziehung drückt die Verwandtschaft dieser drei Größen aus?

Diese Frage ist leicht zu beantworten, denn nach dem eben Gesagten muß die Energieabgabe U des Systems sowohl die nach außen geleistete Arbeit A als auch die nach außen abgegebene Wärmemenge $-Q$ decken, d. h.

$$U = A - Q. \quad (30)$$

Die Gleichung (30) enthält den ersten Hauptsatz der Thermodynamik. Er besagt, daß die Energieänderung eines Systems immer gleich sein muß der von ihm geleisteten Arbeit plus der von ihm abgegebenen Wärmemenge. Er stellt also einen Ausdruck des Gesetzes von der Erhaltung der Energie dar; gleichzeitig aber geht aus (30) hervor, daß die Energieänderung U zwei verschiedene, voneinander im übrigen unabhängige äußere Ausdruckformen haben kann: Arbeit und Wärme. Ein gegebenes U — d. h. eine gegebene Energieänderung des gesamten betrachteten Systems — kann sich, je nach den Versuchsbedingungen, in einer verschiedenartigen Aufteilung in A und Q äußern; die beiden Energiegrößen A und Q sind also einander äquivalent. Den Proportionalitätsfaktor (das mechanische Wärmeäquivalent) hat als erster J. Robert Mayer (1842) und später Joule (1850) bestimmt; nach neueren Messungen beträgt er:

$$\begin{aligned} 1 \text{ cal} &= 4,186 \cdot 10^7 \text{ erg.} \\ 1 \text{ cal} &= 0,4266 \text{ mkg.} \end{aligned}$$

Es sollen einige einfache Anwendungen des ersten Hauptsatzes betrachtet und dabei gleichzeitig noch die statistische Bedeutung der in ihm enthaltenen Größen dem Verständnis etwas nähergebracht werden. Da in der Gleichung (30) Größen stehen, welche einer Zustandsänderung des betrachteten Systems entsprechen, findet man oft den ersten Hauptsatz in der Form von Differentialen geschrieben.

2. Einige Anwendungen des ersten Hauptsatzes.

Wir betrachten als erste Anwendung die Erwärmung eines idealen Gases, und zwar das eine Mal bei konstantem Volumen, das andere Mal bei konstantem Druck.

Für den ersten Fall gilt

$$dQ = dU + p dV. \quad (31)$$

Die von außen — etwa mit Hilfe eines Bunsenbrenners — dem Gasvolumen zugeführte Wärmemenge dQ ist gleich der Zunahme seiner inneren Energie dU plus der nach außen von dem Gas geleisteten Arbeit $p dV$. Da das Volumen konstant bleiben soll, entfällt der zweite Summand rechts und wir erhalten:

$$dQ = dU = C_v dT, \quad (32)$$

da ja die innere Energie eines idealen Gases nach Gleichung (14) auf S. 91 direkt proportional der Molwärme ist. Hier wird also die zugeführte Wärmemenge nur dazu verwendet, um die unregelmäßige Molekularbewegung zu beschleunigen; es resultiert eine Temperaturerhöhung des Gases und mit ihr eine Erhöhung der mittleren Molekülgeschwindigkeit. Es gilt:

$$C_v = \frac{dU}{dT} = \frac{dQ}{dT}. \quad (33)$$

Bei konstantem Druck gilt wieder:

$$dQ = dU + p dV.$$

Jetzt ist aber dV nicht gleich Null, sondern ein Teil der dem Gasvolumen zugeführten Wärmemenge wird zur Leistung äußerer Arbeit — etwa zum Wegdrücken eines Stempels — verwendet; die Molwärme bei konstantem Druck C_p ist nunmehr gegeben durch:

$$C_p = \frac{dQ}{dT} = \frac{dU}{dT} + p \frac{dV}{dT}, \quad (34)$$

sie ist also größer als die Molwärme bei konstantem Volumen, und zwar um den Betrag:

$$p \frac{dV}{dT}.$$

Aus der Zustandsgleichung des idealen Gases läßt sich dieser Ausdruck sehr leicht berechnen; man braucht nur diese Gleichung bei konstantem Druck nach T zu differenzieren und erhält dann

$$p \frac{dV}{dT} = R;$$

somit ergibt sich durch Subtraktion von (33) und (34)

$$C_p - C_v = R. \quad (35)$$

Die Tabelle 3 (S. 91) zeigt, daß die wichtige Beziehung (35) von dem Experiment bestens bestätigt wird.

Daß die Molwärme eines idealen Gases bei konstantem Druck größer sein muß, als bei konstantem Volumen, läßt sich auch statistisch leicht einsehen. Durch die zugeführte Wärmemenge werden zunächst die Wände des Gefäßes erwärmt, d. h. die Gitterpunkte des Festkörpers, aus welchen

sie bestehen, führen Schwingungen von zunehmender Frequenz aus. Daher werden Gasatome, welche an diesen Wänden reflektiert werden, nicht rein elastisch zurückgeworfen, sondern sie erhalten von den erwärmten und intensiver schwingenden Wandatomen noch Energie mit hinzu, die sie in den Gasraum mitnehmen. Sie kehren daher erwärmt, mit gesteigerter kinetischer Energie in ihn zurück. Wenn aber eine Wand beweglich ist, dann wird an dieser Wand jeder Stoß eines Gasmoleküls mit gegebener Energie dazu führen, daß es langsamer in den Gasraum zurückkehrt, als wenn die Wand fest wäre; denn die Wand ist vor dem Molekül zurückgewichen und hat es daher nicht mit derselben Geschwindigkeit wieder in den Gasraum zurückgeschleudert, mit der es auf sie aufgetroffen war: Das Molekül hat an die Wand Energie abgegeben; sie wurde in äußere Arbeit des beweglichen Stempels verwandelt.

Die Größe R mißt also die Ausdehnungsarbeit, die ein ideales Gas pro Mol und Grad leistet, ein Umstand, der ja auch aus der Form der Zustandsgleichung unmittelbar hervorgeht.

Es sei hier angefügt, daß reale Gase eine merkliche Abhängigkeit der spezifischen Wärme vom Druck zeigen. In der Tat folgt eine solche auch aus der Zustandsgleichung von van der Waals und aus anderen, sich der Erfahrung zum Teil noch besser anschmiegenden exakteren Zustandsgleichungen (Reinganum, Wohl). Beim Wasserdampf z. B. läßt sich die spezifische Wärme bei konstantem Druck als Funktion der Temperatur und des Druckes sehr exakt durch die von Knoblauch, Raisch und Hausen ermittelte Gleichung:

$$C_p = 0,3391 + 0,000197 T - \frac{12,8}{T - 256,4} + \\ + \frac{20,33}{T - 588,97 - 0,3754 p} + \frac{6310,3}{18,165 + p}$$

wiedergeben.

Ähnliche Beziehungen gelten auch für andere mehratomige Gase wie NH_3 , CO_2 usw. Die Tabelle 12 enthält einige Zahlen über Druck- und Temperaturabhängigkeit der Molwärmen mehrerer technisch wichtiger Gase.

Die Beziehung (35) kann man direkt dem ersten Hauptsatz gegenüberstellen

$$U = A - Q \\ - C_v = R - C_p.$$

Der Energieänderung entspricht die Molwärme bei konstantem Volumen, da beide nur von der mittleren Geschwindigkeit der Molekeln abhängen. Der nach außen geleisteten Arbeit entspricht die Gaskonstante R für ein Mol oder die Boltzmannsche Konstante k für ein einzelnes Molekül. Der von außen zugeführten Wärmemenge entspricht die Molwärme bei konstantem Druck: diese Wärmemenge kann eben unter gegebenen Verhältnissen dazu verwendet werden, um beides zu bewirken:

die unsichtbare Vergrößerung der Molekülgeschwindigkeit und damit des Energieinhalts U und

die sichtbar werdende Leistung makroskopischer äußerer Arbeit A .

Als zweite Anwendung sei die isotherme Kompression eines idealen Gases betrachtet. Hier ist dU gleich Null, da ja die Temperatur konstant bleiben soll. Der erste Hauptsatz vereinfacht sich daher zu:

$$dQ = dA.$$

Tabelle 12. Temperatur- und Druckabhängigkeit der spezifischen Wärmen und Molwärmen einiger wichtiger Gase.

Substanz	Temperatur in °C	C_p in cal/g	C_p in cal/Mol	p in at
Luft . . .	— 181	0,2500	7,24	1
	— 76	0,2433	7,04	1
	20	0,2409	6,974	1
	100	0,2430	7,035	1
	— 120	0,470	13,6	40
	— 50	0,274	7,93	40
	— 120	0,777	22,5	70
H_2	— 50	0,312	9,03	70
	— 181	2,648	5,338	1
	— 76	3,162	6,375	1
O_2	16	3,408	6,871	1
	— 181	0,228	7,31	1
	— 76	0,214	6,87	1
CO_2 . . .	20	0,218	6,99	1
	—28 bis +7	0,184	8,10	1
	15—100	0,202	8,89	1
	11—214	0,217	9,55	1
Benzol . .	34—115	0,299	23,3	1
	116—218	0,332	29,3	1
	350	0,375	38,9	1
NH_3	24—216	0,512	8,72	1
	309	0,605	10,3	1
	422	0,65	11,0	1
	523	0,69	11,8	1

Die ganze Kompressionsarbeit wird nach außen als Wärme abgegeben. Das läßt sich experimentell z. B. dadurch erreichen, daß man einen Zylinder mit verschiebbarem Stempel in einen Thermostaten bringt und dann das Gas mit Hilfe des Stempels so langsam komprimiert, daß immer Temperaturgleichheit besteht. Diejenigen Molekel, welche auf den Stempel treffen, werden mit einer etwas vergrößerten Geschwindigkeit in das Gas zurückkehren, da sie ja von dem Impuls des Stempels einen kleinen Bruchteil erhalten haben und daher das Gas

erwärmen; sie stoßen aber bald auf eine der festen Begrenzungswände und geben dort ihre überschüssige Energie an die Wand und durch ihre Vermittlung an die umgebende Flüssigkeit ab, so daß man bei genügend langsamem Zusammendrücken und genügender Größe des Behälters voraussetzen kann, daß die Temperatur überall die gleiche bleibt. Das Gas vermittelt nur die Verwandlung der Kompressionsarbeit in Wärme. Die hierbei zu leistende (oder bei der Dilatation zu gewinnende) Arbeit berechnet man mit Hilfe der Zustandsgleichung in folgender Weise; es ist

$$dA = p dV = \frac{RT}{V} dV.$$

A selbst ist gegeben durch

$$A = \int_{v_0}^{v_1} \frac{RT}{V} dV,$$

oder weil T konstant bleibt, wird

$$A = RT \int_{v_0}^{v_1} \frac{dV}{V} = RT \ln \frac{v_1}{v_0}, \tag{36}$$

wenn v_1 das Anfangsvolumen und v_0 das Endvolumen mißt.

Die Beziehung (36) gestattet es, die für technische Prozesse sehr wichtige Umwandlung von zugeführter Wärme in Kompressions- oder Dilatationsarbeit zu berechnen; als Beispiel hierfür diene die folgende Aufgabe:

Welche Wärmemenge Q wird entwickelt, wenn man 18 kg Wasserdampf bei 120° auf den vierten Teil seines Volumens isotherm komprimiert?

$$Q \sim 10^6 \text{ cal.}$$

Als dritte Anwendung sei der andere Grenzfall von Kompressionserscheinungen betrachtet, wenn das Gas keine Wärme nach außen abgeben kann, wenn es sich z. B. in einem wärmeisolierenden Behälter befindet oder wenn der Prozeß so schnell verläuft, daß die für den Austausch nötige Wärmeleitung nicht funktionieren kann. Man nennt solche Vorgänge adiabatisch; für sie gilt

$$dA = dU.$$

Für ein ideales Gas läßt sich schreiben:

$$p dV = C_v dT.$$

Hieraus folgt unter Berücksichtigung der Zustandsgleichung

$$\frac{RT}{V} \cdot dV = C_v dT; \quad \frac{RdV}{V} = C_v \frac{dT}{T}.$$

Durch Integration:

$$R \ln \frac{v_1}{v_0} = C_v \ln \frac{T_0}{T_1}.$$

Da ferner gilt

$$R = C_p - C_v,$$

erhält man

$$\frac{C_p - C_v}{C_v} \cdot \ln \frac{v_1}{v_0} = \ln \frac{T_0}{T_1}.$$

Setzt man hierin

$$\frac{C_p}{C_v} = \gamma, \tag{37}$$

so ergibt sich

$$T_1 v_1^{\gamma-1} = T_0 v_0^{\gamma-1}$$

oder

$$p_1 v_1^\gamma = p_0 v_0^\gamma.$$

Man kann also der Zustandsgleichung für isotherme Prozesse

$$pv = \text{const}$$

diejenige für adiabatische Vorgänge

$$pv^\gamma = \text{const}$$

an die Seite stellen.

Für γ ergibt sich aus (37) bei einatomigen Gasen der Wert:

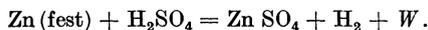
$$\gamma = 1,66.$$

Die Erfahrung zeigt, daß auch diese von der Theorie geforderte Beziehung sehr gut vom Experiment bestätigt wird.

Beispiel. Es werden 2 kg Wasserdampf adiabatisch in einem Kolben von 10 l auf 2 l komprimiert; die Anfangstemperatur ist 50° . Welches ist die Endtemperatur?

$$T \sim 520^\circ.$$

Weiterhin soll der erste Hauptsatz auf die Herstellung von H_2 durch die Einwirkung von H_2SO_4 auf Zn angewendet werden:



Wenn sich der Prozeß bei Zimmertemperatur in offenen Gefäßen, d. h. unter konstantem Druck abspielt, beobachtet man die Entwicklung von 1 Mol Wasserstoffgas und die Abgabe von 34200 cal. Die gesamte Energieänderung des Systems ist

$$U_p = +Q + A^1$$

(Q = entwickelte Wärme, A = geleistete Arbeit),

sie beträgt:

$$U_p = 34\,200 + 582 = 34\,782 \text{ cal.}$$

Es wäre also falsch, die im Calorimeter gemessene Wärmetönung W mit der Energieänderung des Systems zu identifizieren, man muß vielmehr immer — das fordert der erste Hauptsatz — die gleichzeitig geleistete oder verbrauchte äußere Arbeit mit in Rechnung setzen.

Endlich seien noch einige wichtige Anwendungen des ersten Hauptsatzes auf die Vorgänge der Änderung des Aggregatzustandes beim Schmelzen und Verdampfen erwähnt.

Wenn man einen Festkörper erwärmt, so nehmen die Schwingungen der einzelnen Atome oder Moleküle allmählich so große Amplituden an, daß die Ordnung im Gitter zerstört wird und der feste Zusammenhalt aufhört — der Krystall schmilzt. Auch bei diesem Prozeß tritt die von außen zugeführte Wärmemenge in zwei verschiedenen Formen in Erscheinung: einmal als Vergrößerung der inneren Energie, dann durch Leistung äußerer Arbeit, die durch die Volumänderung beim Schmelzen hervorgerufen wird. Allerdings ist diese Änderung meist sehr klein; so beträgt z. B. die Schmelzwärme für Eis

$$Q = 144 \text{ cal pro Mol,}$$

während die Volumänderung, die hier im Gegensatz zu den meisten anderen Körpern negativ ist, nur etwa 9%, das ist

$$\Delta V = 1,6 \text{ cm}^3 \text{ pro Mol}$$

beträgt, so daß die äußere Arbeit bei Atmosphärendruck

$$A = p \Delta V = -0,036 \text{ cal pro Mol}$$

wird.

Anders ist dies natürlich beim Verdampfungsvorgang, wo bei Atmosphärendruck pro Mol 22400 cm³ Dampf entwickelt werden, wodurch beim Wasser eine Arbeit von

$$p(V_{\text{gas}} - V_{\text{fl}}) = 728,4 \text{ cal}$$

geleistet wird. Diese Größe spielt neben der Verdampfungswärme des Wassers von

$$Q = 9714 \text{ cal}$$

immerhin eine Rolle.

¹ Das positive Vorzeichen rührt daher, daß die Wärmemenge an das Calorimeter abgegeben wird, also das umgekehrte Vorzeichen hat, wie die in (3) enthaltene Größe.

Um den ersten Hauptsatz auf den Schmelzvorgang anzuwenden, denken wir uns mit Kirchhoff den Schmelzprozeß in zwei verschiedenen Weisen durchgeführt:

1. Die Substanz wird bei einer Temperatur T geschmolzen (verdampft): zuzuführende Wärmemenge ist Q .

Hierauf wird die Schmelze (das Gas) auf die Temperatur $T + dT$ erwärmt: zuzuführende Wärmemenge ist $C_{fl} dT$ bzw. $C_g dT$.

2. Der äußere Druck wird zunächst so weit gesteigert, daß der Schmelzpunkt von T auf $T + dT$ ansteigt.

Die zuzuführende Arbeit ist wegen der kleinen Volumänderung zu vernachlässigen.

Hierauf wird der Festkörper unter dem neuen Druck auf die Temperatur $T + dT$ gebracht und geschmolzen: zuzuführende Wärmemenge ist $Q + dQ + C_f dT$.

Nach dem ersten Hauptsatz müssen die den beiden Wegen entsprechenden Wärmemengen einander gleich sein; es folgt also

$$Q + C_{fl} dT = Q + dQ + C_f dT$$

oder

$$\frac{dQ}{dT} = C_{fl} - C_f.$$

Die Temperaturabhängigkeit der molaren Schmelzwärme ist durch die Differenz der spezifischen Wärmen im festen und flüssigen Zustand gegeben.

Für den Verdampfungsprozeß gilt eine völlig gleichartige Überlegung, die zur Beziehung

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{dT} &= C_{p\ gas} - C_{p\ fl} \\ Q &= \int (C_{p\ gas} - C_{p\ fl}) dT \end{aligned} \quad (38)$$

führt, worin jetzt Q die molare Verdampfungswärme ist und $C_{p\ gas}$ und $C_{p\ fl}$ die Molwärme des Gases und der Flüssigkeit bei konstantem Druck bedeuten. Der Kirchhoffsche Satz gilt aber noch allgemeiner und kann auf jede Änderung eines gegebenen Systems angewandt werden; die Wärmemenge Q braucht nicht von außen zugeführt zu werden, sie kann auch in dem betrachteten System entstehen, also eine chemische Wärmetönung sein; auch dann gilt

$$\frac{dQ_v}{dT} = C_{v_1} - C_{v_2} \quad \text{bzw.} \quad \frac{dQ_p}{dT} = C_{p_1} - C_{p_2}.$$

Q_v , C_{v_1} und C_{v_2} sind die Wärmetönung der Reaktion und die Molwärmen der Reaktionsteilnehmer vor und nach der Umsetzung bei konstantem Volumen.

Q_p , C_{p_1} und C_{p_2} sind die entsprechenden Größen bei konstantem Druck.

Diese Anwendungen mögen genügen, um zu zeigen, eine wie große Bedeutung der erste Hauptsatz für die Betrachtung thermischer und chemischer Prozesse besitzt. Er stellt eine besondere Formulierung des Prinzips von der Erhaltung der Energie dar. Er fordert Äquivalenz von Wärme und mechanischer Arbeit — eine Aussage, welche im Sinne der kinetischen Gastheorie selbstverständlich ist.

Der erste Hauptsatz stellt nur eine für jede Umsetzung notwendige energetische Bedingung auf; vorausgesetzt ist, daß sich die betrachtete Veränderung in dem System auch tatsächlich abspielt. Ob sie dies aber tut und in welcher Richtung unter gegebenen Verhältnissen ein Prozeß verläuft, darüber gibt der erste Hauptsatz keinerlei Auskunft. Hier greifen vielmehr der zweite und dritte Hauptsatz ergänzend ein.

B. Der zweite Hauptsatz.

1. Die Formulierung des zweiten Hauptsatzes.

Die Erfahrung lehrt, daß in der Natur häufig beim Ablauf thermodynamischer Prozesse gewisse Richtungen bevorzugt sind. Bringt man ein Stück Na auf Wasser, so entwickelt sich unter Wärmebildung Wasserstoff und es entsteht eine Lösung von NaOH in H_2O ; niemals jedoch wurde beobachtet, daß man durch Einpressen von Wasserstoff in eine verdünnte Lösung von NaOH unter gleichzeitiger Abkühlung metallisches Na erhalten hätte. Ebenso wenig hat man beobachten können, daß ein Gas, welches sich in zwei durch einen Hahn miteinander verbundenen Kolben befinden, von selbst ganz in den einen dieser beiden Kolben sich angesammelt hätte, während das Gas immer, wenn es sich zu Beginn des Versuchs nur in einem Kolben befunden hat, beim Öffnen des Hahnes sofort auch in den anderen Kolben strömt. Diese Reihe von nicht umkehrbaren oder irreversiblen Prozesse ließe sich ohne Schwierigkeiten beliebig verlängern, ja man kann sagen, daß es in der Natur fast nur irreversible Prozesse gibt, denn immer dort, wo mechanische Arbeit in Wärme verwandelt wird — also bei allen Reibungsvorgängen — tritt die Nichtumkehrbarkeit zutage. Nur ganz reibungsfreie Vorgänge — wie die Planetenbewegung, die Elektronenbewegungen im Innern der Atome oder bis zu einem gewissen Grad auch sehr gut konstruierte Pendel — nähern sich dem Ideal des reversiblen Prozesses mehr oder weniger vollständig.

Bei den meisten Vorgängen ist in der Natur eine bestimmte Richtung bevorzugt, nämlich die, in welcher sie „von selbst“ verlaufen. Es entsteht die wichtige Frage nach dem Gesetz, welches den Ablauf solcher irreversibler Vorgänge regelt.

Der erste Hauptsatz ist zur Beantwortung dieser Frage nicht fähig. Er enthält nur eine bilanzmäßige Aussage darüber, daß die gesamte Energie eines abgeschlossenen Systems im Verlaufe der sich in ihm abspielenden Vorgänge unter allen Umständen konstant bleiben, ohne etwas Näheres darüber auszusagen, ob und in welcher Richtung die einzelnen Prozesse verlaufen werden. Einer so allgemeinen Gesetzmäßigkeit, wie es die hier gesuchte wohl sein muß, kann man natürlich sehr verschiedene Seiten abgewinnen und es sind daher im Laufe der Zeit verschiedene Formulierungen für den zweiten Hauptsatz gefunden worden, die alle denselben prinzipiellen Inhalt unter etwas verschiedenen Gesichtswinkeln ausdrücken.

Carnot (1824) und Clausius (1850) haben als erste das Bedürfnis empfunden, die Irreversibilität gewisser Vorgänge als Gesetz zu formulieren; sie lehnen sich dementsprechend in ihrer Ausdrucksweise sehr eng an die Erfahrung an und behaupten, daß der folgende empirische Satz gilt:

„Wärme kann nie von selbst (d. h. ohne dauernde Änderungen in der Umgebung) von einem kälteren zu einem wärmeren Körper übergehen.“

Der Wärmeübergang von warm zu kalt — ein in der Natur unzählige Male beobachteter „von selbst“ verlaufender Vorgang — wird dadurch als ein typisch irreversibler Prozeß hingestellt.

Wesentlich allgemeiner ist die folgende auf Planck zurückgehende Formulierung:

„Es ist unmöglich, eine periodisch arbeitende Maschine zu konstruieren, die nichts anderes bewirkt, als die Hebung einer Last und die gleichzeitige Abkühlung eines Wärmebehälters.“

Eine solche Maschine, die Arbeit unbegrenzt aus Wärme erzeugen könnte, hat Wi. Ostwald ein *perpetuum mobile* zweiter Art genannt; die obige Formulierung des zweiten Hauptsatzes kann man daher auch als den Satz von der Unmöglichkeit eines *perpetuum mobile* zweiter Art bezeichnen, ebenso wie der erste Hauptsatz die Existenz eines *perpetuum mobile* erster Art — welches Arbeit aus Nichts erzeugen kann — verbietet.

Eine etwas abstraktere Formulierung des zweiten Hauptsatzes, die aber für seine statistische Deutung von größter Wichtigkeit war, stammt von Clausius und lautet:

„Für jedes abgeschlossene System existiert eine gewisse Zustandsgröße S , die bei allen irreversiblen Vorgängen zunimmt, bei allen reversiblen konstant bleibt, niemals aber abnehmen kann, ohne daß in anderen Systemen irgendwelche Änderungen zurückbleiben.“

Clausius hat diese Größe die Entropie des Systems genannt; sie ist ebenso wie die Gesamtenergie von dem gegebenen Zustand abhängig und stellt ein Maß für die Arbeitsfähigkeit des betrachteten Systems dar. Nach Boltzmann (1866) ist sie mit der statistischen Wahrscheinlichkeit des betrachteten Systems eng verknüpft; es gilt nämlich die Beziehung

$$S = k \ln W, \quad (39)$$

worin W die statistische oder thermodynamische Wahrscheinlichkeit des betrachteten Zustands bedeutet.

Die Gleichung (39) leitet zur Boltzmannschen Formulierung des zweiten Hauptsatzes über:

„Jedes sich selbst überlassene System strebt nach den Zuständen größerer statistischer Wahrscheinlichkeit.“

Diese statistische Formulierung geht am tiefsten auf den Mechanismus der thermodynamischen Prozesse ein und liefert auf atomistischer Grundlage eine Erklärung für das Vorkommen irreversibler Prozesse in der Natur. Alle anderen erwähnten Ausdrucksweisen hingegen enthalten nur unmittelbar aus der Erfahrung abgeleitete allgemeine Sätze.

Die weiteren Ausführungen sollen an die Formulierung von Planck angeknüpft werden. Ihr Inhalt soll an einem Kreisprozeß erläutert werden, der zum ersten Male von Carnot erdacht worden und für die formelmäßige Erfassung der Ergebnisse von grundlegender Bedeutung ist.

2. Der Kreisprozeß von Carnot.

Man denke sich eine beliebige Substanz — am einfachsten ein ideales Gas — die bei der Temperatur T_2 das Volumen v_2 einnehmen möge. In einem Diagramm (Abb. 5), dessen Koordinatenachsen die Maßstäbe v und T tragen, läßt sich dieser Zustand — der Ausgangszustand — durch den Punkt T_2, v_2 kennzeichnen; er sei der Ausgangspunkt des nun folgenden Kreisprozesses. Dieser besteht aus vier Schritten:

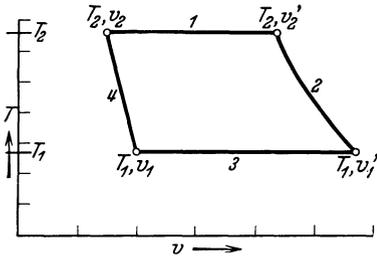


Abb. 5. v, T -Diagramm des Carnotschen Kreisprozesses.

1. Man entnimmt einem zur Verfügung stehenden Wärmebehälter B_2 , der auf der Temperatur T_2 gehalten ist, eine bestimmte Wärmemenge Q_2 und läßt sich mit ihrer Hilfe das Gas isotherm ausdehnen, bis es das Volumen v_2' erreicht. Im Diagramm (Abb. 5) wird dieser Vorgang durch eine der v -Achse parallele Linie dargestellt, die im Punkt T_2, v_2 beginnt und im Punkt T_2, v_2' endet. Hierbei wird die dem Thermostaten entlehnte Wärmemenge quantitativ in Arbeit verwandelt, deren Größe durch

$$A_2 = Q_2 = + R T_2 \ln \frac{v_2'}{v_2} \quad (40)$$

gegeben ist.

2. Jetzt entfernt man das Gas aus dem Thermostaten und läßt es unter Arbeitsleistung sich weiter ausdehnen, aber nunmehr nicht isotherm, sondern adiabatisch, so daß es sich auf die Temperatur T_1 abkühlt. Dabei vergrößert es sein Volumen auf v_1' . Im Diagramm erhalten wir die mit 2 bezeichneten Adiabate, die im Punkt T_2, v_2' beginnt und im Punkt T_1, v_1' endet. Die dabei dem Gas entzogene innere Energie ist $C_v (T_2 - T_1)$.

3. Nunmehr werde das Gas bei der Temperatur T_1 vom Volumen v_1' auf das Volumen v_1 isotherm komprimiert, wobei die Wärmemenge Q_1 entsteht, die man an ein zweites Wärmereservoir B_1 abführt, das sich auf der Temperatur T_1 befindet. Die Strecke 3 gibt diesen Prozeß im Diagramm wieder; Q_1 wird gegeben durch

$$Q_1 = - R T_1 \ln \frac{v_1'}{v_1}. \quad (41)$$

4. Schließlich gibt man dem Gas die bei dem Vorgang 2 entzogene Energie $C_v (T_2 - T_1)$ wieder zurück, indem man es adiabatisch soweit komprimiert, daß es wiederum den Punkt T_2, v_2 erreicht. Die Linie 4 ist das Abbild dieses letzten Teilvorganges, nach welchem das System wiederum in seinen Ausgangszustand zurückgekehrt und der Kreis-

prozeß geschlossen ist. Alle Teilvorgänge denkt man sich streng reversibel durchgeführt, was im Gedankenexperiment zulässig ist, in Wirklichkeit aber (z. B. von einer Wärmekraftmaschine) niemals erreicht werden kann.

Nun fragt man nach der Energiebilanz des ganzen Vorganges. Zunächst sieht man unmittelbar, daß sich die den beiden Strecken 2 und 4 entsprechenden Energiebeträge aus der gesamten Bilanz wegheben, denn die Molwärme des betrachteten Körpers ist ja eine konstante, vom Kreisprozeß selbst unbeeinflussbare Größe: Was im Verlauf von 2 dem Gas an Energie entnommen wird, erhält es im Verlauf von 4 wiederum zurück. Durch 1 wird eine bestimmte Wärmemenge bei der Temperatur T_2 dem Behälter B_2 entnommen, durch 3 eine andere — kleinere — Wärmemenge bei der Temperatur T_1 an den Behälter B_1 abgeliefert. Die Differenz dieser beiden Wärmemengen wird durch den ganzen Prozeß in Arbeit verwandelt. Es findet also in Summa ein Wärmetransport von B_2 nach B_1 statt. Dabei wird die Arbeit

$$A = Q_2 - Q_1$$

geleistet. Für sie ergibt sich der Wert

$$A = Q_2 - Q_1 = R T_2 \ln \frac{v_2'}{v_2} - R T_1 \ln \frac{v_1'}{v_1}. \quad (41a)$$

Da die beiden Strecken 2 und 4 Adiabaten sind, muß gelten

$$T_2 \cdot v_2'^{\gamma-1} = T_1 \cdot v_1'^{\gamma-1}$$

und

$$T_2 \cdot v_2^{\gamma-1} = T_1 \cdot v_1^{\gamma-1},$$

woraus für die vier im Diagramm enthaltenen Volumina folgt

$$\frac{v_2'}{v_2} = \frac{v_1'}{v_1}.$$

Verwendet man diese Beziehung, so geht (41a) über in

$$A = R (T_2 - T_1) \ln \frac{v_2'}{v_2},$$

oder unter Verwendung von (40)

$$A = Q_2 \frac{T_2 - T_1}{T_2}. \quad (42)$$

Die fundamentale Beziehung (42) besagt, daß nicht die ganze dem Behälter B_2 entzogene Wärmemenge Q_2 in mechanische Arbeit verwandelt werden konnte, sondern nur ein Teil, und zwar ist dieser Teil gegeben durch den Nutzarbeitskoeffizienten η

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2}.$$

Aus einer bei der Temperatur T_2 gegebenen Wärmemenge läßt sich um so mehr Arbeit gewinnen, je tiefer man die Endtemperatur T_1 wählt. Die Arbeitsausbeute ist um so größer, je größer die während des Prozesses erreichbare Temperaturdifferenz $T_2 - T_1$ werden kann.

Die Wärmemenge

$$Q_1 = R T_1 \ln \frac{v_1'}{v_1}$$

fließt an den Behälter B_1 zurück und geht daher für die Verwandlung in Arbeit verloren. Nur im Falle $T_1 = 0$ würde Q_1 gleich Null werden;

d. h. nur wenn der Kreisprozeß beim absoluten Nullpunkt enden könnte, ließe sich eine quantitative Überführung von Wärme in Arbeit erreichen; man kann sich leicht davon überzeugen, daß dies auch unmittelbar aus (42) hervorgeht.

Die soeben abgeleiteten Gleichungen gelten nur für den idealen Fall völlig reibungslos verlaufender Prozesse; in Wirklichkeit gilt nicht die Beziehung (42), sondern

$$A < Q_2 \cdot \frac{T_2 - T_1}{T_2}. \quad (42a)$$

Im Sinne der statistischen Betrachtungsweise bedeutet die Gleichung (42) folgendes: Während des Teilvorganges 1 wird der Stempel des das Gas enthaltenden Kolbens dadurch hinausgedrückt, daß die einzelnen Molekeln Geschwindigkeitskomponenten haben, die senkrecht auf der Kolbenwand wirken und ihren Impuls an die Wand abgeben. Die hierbei verschwindende Energie der einzelnen Teilchen wird durch die aus dem Behälter B_2 zufließende Wärmemenge Q_2 immer wieder regeneriert, so daß die Geschwindigkeitsverteilung die der Temperatur T_2 entsprechende bleibt. Während des Teilvorganges 2 ist das Wärmereservoir B_2 nicht mehr vorhanden und das sich weiter ausdehnende Gas kühlt sich auf T_1 ab. Wenn man dann bei der Temperatur T_1 das Gas durch Hineindrücken des Stempels wieder komprimiert, um zum Volumen v_1 zu kommen, kann man nicht verhindern, daß die von dem zurückgehenden Kolben auf die einzelnen Molekeln übertragene Energie nach allen Richtungen verteilt wird und schließlich als erhöhter Wärmeinhalt des Gases in Erscheinung tritt. Man muß daher — wenn man bei der Temperatur T_1 bleiben will — während des Kompressionsvorganges eine gewisse Wärmemenge Q_1 wieder an das andere Reservoir zurückgeben und kann nicht die ganze Wärmemenge Q_2 in Arbeit verwandeln. Der statistische Charakter aller makroskopisch thermodynamischen Prozesse erzwingt in der Gleichung (42) den Faktor η . Nur wenn die Endtemperatur T_1 gleich Null ist, wenn also alle Moleküle ruhen, tritt beim Komprimieren keine Erwärmung auf und die quantitative Überführung von Wärme in Arbeit wird möglich.

Wählt man die beiden Temperaturen T_2 und T_1 sehr nahe beisammen, so kann man den zweiten Hauptsatz auch in der Form

$$dA = Q \frac{dT}{T} \quad (43)$$

schreiben.

Da nun nach dem ersten Hauptsatz ganz allgemein und daher auch für reversible Prozesse die Beziehung

$$A - U = Q$$

gilt, erhält man als Kombination beider Hauptsätze die wichtige Gibbs-Helmholtzsche Gleichung

$$A - U = T \frac{dA}{dT}. \quad (44)$$

Sie besagt folgendes: Wenn bei einem reversiblen Prozeß die Abnahme der gesamten Energie U ist und die nach außen geleistete Arbeit A

beträgt, dann ist die Differenz dieser beiden Größen durch den mit Temperatur T multiplizierten Temperaturkoeffizienten der maximalen Arbeit bestimmt.

Es ist schon bei der Besprechung des ersten Hauptsatzes erwähnt worden, daß man die von dem System abgegebene gesamte Energie U in zweierlei Arten beobachten kann: als U_v bei konstantem Volumen und als U_p bei konstantem Druck. Entsprechend hat man auch die Gibbs-Helmholtzsche Gleichung in den zwei Formen

$$A - U_v = T \left(\frac{dA}{dT} \right)_v$$

$$A - U_p = T \left(\frac{dA}{dT} \right)_p$$

zu schreiben.

Um den Inhalt dieser wichtigen Beziehung möglichst deutlich in Worten zu fassen, schreibt man sie noch etwas um und bringt sie in die Form:

$$U_v = A - T \left(\frac{dA}{dT} \right)_v.$$

Nun läßt sie sich folgendermaßen lesen: Wenn sich in einem System bei konstantem Volumen und konstanter Temperatur ein reversibler Prozeß abspielt, bei dem die Gesamtenergie des betrachteten Systems um U_v abnimmt, so läßt sich aus dieser abgegebenen Energie nur ein Teil, nämlich der Betrag A nach Belieben in mechanische Arbeit verwandeln; der Rest, Q oder $T \left(\frac{dA}{dT} \right)_v$, muß in irgendeiner Form wieder als Wärme abgegeben werden und steht für die Umwandlung in mechanische Arbeitsleistung nicht zur Verfügung. Der atomistisch-statistische Charakter aller thermodynamischen Prozesse bedingt — wie oben schon angedeutet worden ist — die in der Gleichung (44) ausgedrückte Unmöglichkeit, die ganze Energieabgabe des Systems beliebig in Arbeit verwandeln zu können. Dieser Tatsache hat Helmholtz Rechnung getragen, als er in zutreffender Weise A (häufig auch F) die freie und Q die gebundene Energie nannte.

Ehe wir uns den Anwendungen der fundamentalen Gleichung (44) zuwenden, wollen wir noch die Antwort auf die dem zweiten Hauptsatz zugrunde liegende Frage nach der Richtung des Ablaufs thermodynamischer Prozesse zu formulieren versuchen. Die statistische Interpretation des zweiten Hauptsatzes führt zu der Behauptung, daß ein gegebenes System nach dem Zustand immer größerer Wahrscheinlichkeit strebt, daß also seine Entropie stets zunimmt; die Verbindung zur Statistik liefert hierbei die Gleichung (39); die Verbindung zur Thermodynamik stellt die Tatsache her, daß die reversibel zu- oder abgeführte Wärmemenge Q mit der Entropie in naher Beziehung steht; es ist nämlich

$$S = \frac{Q}{T} = \frac{dA}{dT}.$$

Man kann daher die Gleichung (44) auch in die Form

$$U = A - TS \tag{45}$$

schreiben. Da nun bei jedem von selbst verlaufenden reversiblen Prozeß die Größe $T\Delta S$ zunehmen soll, ergibt sich aus (45), daß die mit ihr verbundene Größe ΔA abnehmen muß. Man hat daher in der Zunahme der Entropie ganz allgemein, in der Abnahme der freien Energie für isotherme reversible Prozesse ein Kriterium dafür, in welcher Richtung ein Vorgang ablaufen wird.

Immer dann, wenn die freie Energie abnimmt, geht der Vorgang „von selbst“ vor sich. Wenn die freie Energie ein Minimum erreicht hat, d. h. wenn ihre Änderung Null wird

$$\delta A = 0, \quad (46)$$

befindet man sich im Gleichgewicht. Die Bedingung (46) wird als Gleichgewichtsbedingung im folgenden wiederholt benützt werden.

Die Entropie S stellt sich nach den eben gemachten Ausführungen als neue, einem bestimmten Zustand des betrachteten Systems zugehörige

Tabelle 13. Entropiewerte für einige wichtige Stoffe. Die Angaben gelten für 25° und 760 mm Druck.

Substanz	Entropie in cal/Grad pro Mol
H ₂ , gasförmig	31,9
N ₂ , gasförmig	45,8
O ₂ , gasförmig	49,0
Cl ₂ , gasförmig	53,5
Br ₂ , gasförmig	59,1
CH ₄ , gasförmig	44,5
NH ₃ , gasförmig	45,8
H ₂ O, gasförmig	44,8
CO, gasförmig	47,3
CO ₂ , gasförmig	50,2
Li, fest	7,6
C, fest, Diamant	0,54
C, fest, Graphit	1,39
α -Fe, fest	6,49
Ag, fest	10,2
MgO, fest	6,6
NaCl, fest	17,2
Na ₂ SO ₄ , fest	40,7
n-Hexan, flüssig	71,1
Benzol, flüssig	41,9
Methanol, flüssig	30,3
Äthanol, flüssig	38,4
Essigsäure, flüssig . . .	38,2

Konstante dar, die zu seiner Charakterisierung ebenso beiträgt, wie etwa seine Temperatur, sein Volumen, seine Energie usw. Sie ist also eine Zustandsfunktion und nach (45) von derselben Dimension wie die Energie. Man mißt sie ebenso wie diese in cal/Grad pro Mol. Die Tabelle 13 enthält die Entropiewerte einiger wichtiger Stoffe, welche (vgl. S. 271) zur Berechnung von Gleichgewichtskonstanten Verwendung finden.

Wenn man die über den zweiten Hauptsatz hier gegebene gedrängte Übersicht kurz zusammenfassen will, so kann man dies ungefähr in der folgenden Form tun: Die gesamte Erfahrung lehrt, daß in der Natur gewisse Richtungen beim Ablauf thermodynamischer Vorgänge bevorzugt sind. Wenn man unsere Kenntnis in eine möglichst allgemeine Form bringt, so wird man auf den Satz von der Unmöglichkeit eines perpetuum mobile zweiter Art und auf den Satz von der Zunahme der Entropie bei allen von selbst verlaufenden Prozessen geführt.

Der Inhalt beider Sätze ist nur eine verschiedene Ausdrucksform für dieselbe Grundtatsache: der atomistisch-statistische Charakter aller thermodynamischen Vorgänge bewirkt, daß man eine bestimmte Energieabgabe nicht beliebig in mechanische Arbeit umsetzen kann, sondern immer einen gewissen Teil wieder als Wärme in Kauf nehmen muß.

3. Die Gleichung von Clausius und Clapeyron.

Die Gleichung (44) bildet zunächst nur einen allgemeinen Rahmen, denn weder die Größe U noch die Arbeit A sind im allgemeinen einer direkten Messung zugänglich; sie soll jetzt für zwei bestimmte, in der physikalischen Chemie besonders wichtige Vorgänge spezialisiert werden: für den isothermen und reversiblen Schmelz- und Verdampfungsprozeß.

Ein Mol eines Festkörpers wird durch Zuführung der molaren Schmelzwärme ρ in eine Flüssigkeit und ein Mol solcher Schmelze durch Zuführung der molaren Verdampfungswärme λ in gesättigten Dampf verwandelt. Hierbei findet im allgemeinen eine Volumänderung

$$v_{fl} - v_{fest} \quad \text{bzw.} \quad v_{gas} - v_{fl}$$

statt, die eine Leistung mechanischer Arbeit zur Folge hat.

$$A = p(v_{fl} - v_{fest}) \quad \text{bzw.} \quad A = p(v_{gas} - v_{fl}).$$

Das Arbeitsdifferential dA ist daher für diesen speziellen Fall gegeben durch

$$dA = dp(v_{fl} - v_{fest}) \quad \text{bzw.} \quad dA = dp(v_{gas} - v_{fl}).$$

Die andere allgemeine und noch nicht ausgefüllte Größe in Gleichung (44) ist U ; sie wird in den hier betrachteten Fällen mit der molaren Schmelz- bzw. der Verdampfungswärme identisch.

Durch die Spezialisierung auf den Fall einer isothermen Aggregatzustandsänderung geht die Gleichung (44) über in

$$\rho = T \frac{dp}{dT} (v_{fl} - v_{fest}) \quad (47)$$

für den Schmelzvorgang und in

$$\lambda = T \frac{dp}{dT} (v_{gas} - v_{fl}) \quad (48)$$

für den Verdampfungsprozeß.

Die experimentelle Prüfung der Richtigkeit der beiden Beziehungen (47) und (48) und weitere Beispiele über die praktische Verwendung dieser nach Clausius und Clapeyron benannten Gleichung enthält der nächste Abschnitt. Hier sei nur noch auf die weitere mathematische Behandlung des Verdampfungsprozesses etwas näher eingegangen, weil diese Betrachtungsweise am direktesten zu den Gedankengängen führt, welche Nernst zur Aufstellung des dritten Hauptsatzes geführt haben.

Bei dem Verdampfungsprozeß kann man im allgemeinen v_{fl} gegen v_{gas} vernachlässigen, wenn man bedenkt, daß z. B. ein Mol Wasser im gasförmigen Zustand 22,41 einnimmt, während es im flüssigen Zustand nicht ganz 20 cm³ Raum beansprucht. Dann geht (48) in

$$\lambda = T \frac{dp}{dT} \cdot v_{gas} \quad (49)$$

über. Wenn man noch voraussetzt, daß der Dampf sich in so verdünntem Zustand befindet, daß man auf ihn die Zustandsgleichung der idealen Gase anwenden kann, dann läßt sich für v der Ausdruck

$$v = \frac{RT}{p}$$

einsetzen und man erhält

$$\lambda = T \frac{dp}{dT} \cdot \frac{RT}{p}.$$

Hier sind jetzt nunmehr zwei Variable enthalten, die unabhängig veränderliche T und die abhängig veränderliche Variable p ; man kann daher diese Differentialgleichung nach T integrieren und bekommt schließlich:

$$\ln p = \int \frac{\lambda}{R T^2} dT + \text{const.} \quad (50)$$

Diese wichtige Gleichung verknüpft den Dampfdruck mit der Verdampfungswärme und würde prinzipiell die theoretische Bestimmung des Dampfdruckes gestatten, wenn die Verdampfungswärme als Funktion der Temperatur und der Wert der Integrationskonstanten bekannt wäre. Über die Temperaturabhängigkeit der Verdampfungswärme gibt die Erfahrung und der bereits erwähnte Kirchhoffsche Satz (S. 115) genügend Aufklärung. Über die Größe und Art der Integrationskonstanten aber kann die Thermodynamik in dem bisher geschilderten Umfang keine Auskunft geben.

Auf die gleiche Schwierigkeit stößt man, wenn man versucht, die Gibbs-Helmholtzsche Gleichung (S. 120) zu integrieren. Bei der Ableitung der Gleichung von Clausius-Clapeyron konnte man von der Beziehung (43) ausgehen, weil hier — beim Schmelzen und Verdampfen — von außen Wärme zugeführt werden muß, um den gewünschten Prozeß in Gang zu bringen. Bei einer chemischen Reaktion findet jedoch eine spontane Energieänderung des gesamten Systems statt, und man ist daher genötigt, bei der theoretischen Verfolgung von Vorgängen mit Wärmetönung auf die Gleichung (44) zurückzugreifen, in der neben A die Energieänderung U explizite vorkommt. Auch hier konzentriert sich das Interesse wieder auf die Frage: Wieviel Arbeit kann man bei dieser chemischen Umsetzung gewinnen, wenn man etwa eine homogene Gasreaktion mit der Wärmetönung U_p isotherm und isobar verlaufen läßt?

Wie später noch genauer abgeleitet werden wird (S. 137), ist die maximale Arbeit, die man bei einer solchen Reaktion erzielen kann, mit der Gleichgewichtskonstante K_p durch die Beziehung

$$A = -RT \ln K_p \quad (51)$$

verknüpft; setzt man dies in die Gibbs-Helmholtzsche Gleichung ein, so erhält man nach einer kurzen, rein analytischen Umformung

$$\frac{dA}{dT} = - \int_0^T \frac{c_1 - c_2}{T} dT + \left(\frac{dA}{dT} \right)_{T=0}$$

oder

$$A = U_0 - T \int_0^T \frac{c_1 - c_2}{T} dT + \text{const. } T. \quad (52)$$

Hierin bedeuten c_1 und c_2 die Molwärmern des Systems vor und nach der Umsetzung, sie kommen durch Anwendung des Kirchhoffschen Satzes in die Gleichung hinein; U_0 ist die Wärmetönung der Reaktion beim absoluten Nullpunkt.

Mit Hilfe von (51) und (52) könnte man die Gleichgewichtskonstante jeder chemischen Reaktion aus der Reaktionswärme und aus den Mol-

wärmen der Teilnehmer berechnen, wenn man über die Integrationskonstante etwas wüßte. Ebenso wie bei der Dampfdruckgleichung ist aber die klassische Thermodynamik auch hier nicht imstande, irgendwelche Aufklärung zu geben. An dieser Stelle greift nun ein von Nernst (1906) formuliertes Theorem ein, welches die angeschnittene Frage ganz allgemein löst und daher mit Recht als dritter Hauptsatz der Thermodynamik bezeichnet wird.

C. Der dritte Hauptsatz.

Ebenso wie der erste und zweite Hauptsatz stellt auch der dritte den mathematischen Ausdruck eines sehr allgemeinen Erfahrungsmaterials dar; zu seiner Formulierung gelangte Nernst auf Grund der folgenden Überlegung. Die Gibbs-Helmholtzsche Gleichung

$$A - U = T \frac{dA}{dT}$$

ist bei gegebenem U eine Differentialgleichung, als deren abhängige Veränderliche man A auffassen kann; sowohl U als auch A sind Funktionen der unabhängigen veränderlichen Größe T . Die Integration dieser Differentialgleichung gestattet nicht die eindeutige Zuordnung der gesuchten Funktion $A(T)$ zu einer gegebenen Funktion $U(T)$, denn es bleibt nach den Gesetzen der Analytik die Integrationskonstante als Temperaturfunktion noch unbestimmt. Mit anderen Worten: Wenn für eine chemische Reaktion bei gegebener Temperatur die Wärmetönung gegeben ist, dann läßt sich die chemische Affinität A noch nicht eindeutig berechnen.

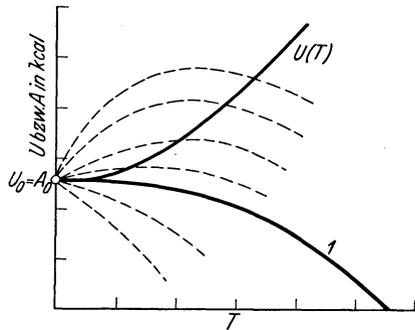


Abb. 6. Die Integration der Gibbs-Helmholtzschen Gleichung graphisch dargestellt.

Dieser analytische Sachverhalt wird besonders deutlich, wenn man sich mit Nernst die Verhältnisse graphisch darstellt. In der Abb. 6 ist als ausgezogene Linie zunächst U als Funktion von T gezeichnet. Die Änderung der gesamten Energie nimmt im allgemeinen mit steigender Temperatur zu und schneidet die U -Achse in einem bestimmten Punkt

$$U = U_0.$$

Die Gibbs-Helmholtzsche Gleichung besagt, daß an dieser Stelle auf alle Fälle

$$A_0 = U_0$$

sein muß, sonst aber liefert sie keine eindeutigen Werte für die Funktion $A(T)$, sondern verknüpft als Differentialgleichung eben nur die Richtung $\frac{dA}{dT}$ in jedem Punkt mit A und U . So sind in der Figur

mehrere Funktionen $A(T)$ gestrichelt eingezeichnet. Alle diese Kurven gehen bei der Temperatur

$$T = 0$$

durch den Punkt

$$A = A_0 = U_0$$

hindurch und sind mit der Gleichung (44) verträglich.

Es erwächst nun die wichtige Aufgabe, aus den vielen mit dem ersten und zweiten Hauptsatz verträglichen A -Kurven diejenige herauszugreifen, welche von der Erfahrung gefordert wird. Dies besorgt der dritte Hauptsatz durch die Behauptung, daß die richtige A -Kurve diejenige sei, welche an der Stelle

$$T = 0$$

nicht nur den Wert

$$A = A_0$$

annimmt, sondern auch noch die Bedingung

$$\frac{dA}{dT} = \frac{dU}{dT} = 0 \quad (53)$$

erfüllt. Daß hierdurch in der Tat die störende Vieldeutigkeit behoben wird, läßt sich unmittelbar aus der Abb. 6 entnehmen. Denn aus allen möglichen A -Kurven sondert die Forderung (53) in eindeutiger Weise die eine mit I bezeichnete als die mit der Erfahrung übereinstimmende aus; nur sie mündet horizontal in die Ordinatenachse ein. Auch vom analytischen Standpunkt löst die Bedingung (53) das Problem, denn sie stellt gerade die Randbedingung der Differentialgleichung (44) dar, welche zur Erzielung einer eindeutigen Lösung notwendig und hinreichend ist.

Aus dem Nernstschen Theorem folgt auch die sehr häufig gemachte Beobachtung, daß das Berthelotsche Prinzip, welches ganz allgemein die Gleichheit von A und U verlangt, in der Tat bei tiefer Temperatur mit guter Annäherung erfüllt ist, denn wegen (53) laufen die beiden Kurven $U(T)$ und $A(T)$ eine erhebliche Strecke einander parallel und unterscheiden sich erst bei höheren Temperaturen merklich voneinander.

Der dritte Hauptsatz gilt zunächst nur für kondensierte Systeme (s. S. 129); hier lehrt die Erfahrung in weitem Umfang, daß der Energieinhalt bei tiefer Temperatur praktisch von der Temperatur unabhängig wird, wie dies schon in dem auf S. 107 besprochenen T^3 -Gesetz von Debye zum Ausdruck kommt. Durch geeignete Überlegungen läßt sich aber der dritte Hauptsatz auch auf das Dampfdruckgleichgewicht, sowie auf homogene Gasreaktionen anwenden. Diese Anwendungen sind außerordentlich vielfältig und es wird in dem folgenden Kapitel über Gleichgewichte noch häufig von ihm Gebrauch gemacht werden müssen; hier seien nur noch einige Worte über seine statistische Bedeutung eingefügt.

Die Forderung

$$\lim \left(\frac{dA}{dT} \right)_{T=0} = 0$$

besagt wegen (45) (S. 121), daß die Entropieänderung aller Prozesse beim absoluten Nullpunkt gegen Null konvergiert, eine Aussage, die im Sinne

der statistischen Betrachtungsweise sehr wohl verständlich ist. Wenn die ungeordneten Schwingungen in einem Festkörper allmählich ganz aufhören, dann gibt es überhaupt nur einen Zustand, nämlich den des idealen starren dreidimensionalen Punktgitters; er ist der allein mögliche, so daß seine Wahrscheinlichkeit gleich Eins wird, was wiederum wegen Gleichung (39) (S. 117) dazu führt, daß die Entropie verschwindet. In der Tat ist bei Abwesenheit jeglicher ungeordneten und unkontrollierbaren Bewegungen der Begriff der Entropie nicht mehr sinnvoll und es ließe sich (wie z. B. beim freien Fall) die ganze durch den Vorgang frei werdende Energie U quantitativ in Arbeit A umsetzen.

III. Gleichgewichtslehre.

A. Die Phasenregel.

(Siehe auch S. 184 f.)

Unter Phase im physikalisch-chemischen Sinne soll im folgenden mit Gibbs jeder Teil des betrachteten Systems verstanden werden, der in sich homogen ist und von den anderen Teilen des Systems durch räumlich definierte Grenzen getrennt bleibt. Bringt man z. B. in einen geschlossenen, evakuierten Kolben, der zur Hälfte mit Wasser gefüllt ist, soviel NaCl, daß Sättigung eintritt und außerdem noch krystallisiertes NaCl als Bodenkörper verbleibt, so hat dieses System drei Phasen:

1. den festen Kochsalzkrystall am Boden des Gefäßes,
2. die gesättigte Lösung von NaCl in Wasser und
3. die gasförmige Phase, welche aus Wasserdampf und einer Spur NaCl-Dampf besteht.

Jede Phase besitzt eine für sie charakteristische Zustandsgleichung, deren analytische Form allerdings nur für die Gasphasen und vielleicht für ganz einfache feste Phasen bekannt ist, deren unabhängige Variablen aber jedenfalls für jede betrachtete Phase der Druck p , die Temperatur T und die Konzentrationen c_i der einzelnen Bestandteile in der betrachteten Phase sein müssen, so daß man jede dieser Zustandsgleichungen formal schreiben kann

$$F = F(p, T, c_1, c_2, \dots, c_K) = 0. \quad (54)$$

Unter Komponente soll im folgenden jeder chemisch einheitliche Bestandteil des Systems verstanden werden, dessen Menge nicht von den Mengen anderer Bestandteile des Systems abhängig ist. Nach Nernst ist die Zahl der Komponenten gleich der Mindestzahl von Atom- oder Molekelarten, die zum Aufbau aller Phasen des betrachteten Systems notwendig sind. Im früheren Beispiel wären die Molekel H_2O und NaCl die Komponenten des Systems. Prinzipiell wird — wenn auch in außerordentlich großer Verdünnung — jede Komponente in jeder Phase vorhanden sein, da ja absolute Unlöslichkeit oder Unmischbarkeit nicht besteht und alle Körper einen, wenn auch noch so kleinen Dampfdruck aufweisen.

Besteht ein System mit P Phasen aus K Komponenten, so wird jede Phase eine Zustandsgleichung von der allgemeinen Form

$$F(p, T, c_1, c_2 \dots c_K) = 0$$

haben, denn für jede Phase sind die Konzentrationen aller Komponenten mit maßgebend. Das ganze System wird also durch P Zustandsgleichungen von der Form (54) beschrieben, die miteinander nicht in Widerspruch stehen dürfen; wir haben daher P Gleichungen mit $K + 2$ Variablen vor uns, da ja zu den Konzentrationen c_1 bis c_K noch die beiden unabhängigen Variablen p und T hinzukommen. Wenn

$$P = K + 2$$

Phasen vorhanden sind, dann lassen sich aus dem System der Gleichungen (54) alle Variablen bestimmen und das System ist durch Druck, Temperatur und die Konzentrationen der einzelnen Komponenten eindeutig festgelegt. Wenn mehr Variable vorhanden sind als Bestimmungsgleichungen, dann ist das System unbestimmt, enthält also noch Freiheitsgrade, und zwar gerade so viel als der Überschuß der unabhängigen Variablen über die vorhandenen Bestimmungsgleichungen beträgt

$$(K + 2) - P = F$$

oder

$$P + F = K + 2, \quad (55)$$

wenn wir mit F die Zahl der Freiheitsgrade bezeichnen.

Die Gleichung (55) formuliert die Gibbssche Phasenregel; die aus der bloßen Existenz einer Zustandsgleichung für jede einzelne Phase abgeleitet wurde und daher ganz allgemeine Gültigkeit besitzt.

B. Polymorphie-Erscheinungen: der Umwandlungspunkt.

Es soll zuerst die Koexistenz einer bestimmten Atom- oder Molekelsorte in zwei verschiedenen festen Phasen betrachtet werden, z. B. das Gleichgewicht zwischen weißem und grauem Zinn, wovon das erstere tetragonal, das letztere kubisch kristallisiert, oder das Gleichgewicht zwischen rhombischem und monoklinem Schwefel, oder das zwischen Calcit und Aragonit. Welche Aussagen lassen sich aus den bisher mitgeteilten thermodynamischen Gesetzen über eine solches Gleichgewicht machen?

Die Phasenregel besagt zunächst, daß das System keinen Freiheitsgrad besitzt, daß also bei gegebenem Druck die beiden Modifikationen nur bei einer ganz bestimmten Temperatur nebeneinander bestehen können. Denn die Zahl der vorliegenden Komponenten ist Eins, weil eine Atom- bzw. Molekülsorte Sn, S usw. genügt, um das betrachtete System aufzubauen. Da zwei feste Modifikationen nebeneinander bestehen und der Dampfdruck der gegebenen Stoffe zwar klein aber doch endlich ist, erhält man für die Zahl der vorhandenen Freiheitsgrade

$$F = K + 2 - P = 1 + 2 - 3 = 0.$$

Bei einem bestimmten gegebenen Außendruck p kann also das vorliegende System nur bei einer ganz bestimmten Temperatur verwirklicht sein; erhöht man diese Temperatur auch nur ein wenig, so muß eine Phase ganz verschwinden. Da die gasförmige Phase prinzipiell immer vorhanden ist, verschwindet eine der beiden festen Phasen. In der Tat zeigt die Erfahrung, daß sich bei Temperatursteigerung eine der beiden Modifikationen gänzlich in die andere umwandelt, und zwar in die, welche bei der höheren Temperatur stabil ist. Durch das Verschwinden der einen Phase verwandelt sich das System in eines mit nur 2 Phasen, nämlich in ein normales Dampfdruckgleichgewicht, das im Abschnitt D (S. 133) zu betrachten sein wird.

Die Phasenregel fordert für die Koexistenz zweier fester Phasen einen scharfen Umwandlungspunkt, was auch von der Erfahrung im weitesten Umfang bestätigt wird.

Das Experiment lehrt, daß bei der isothermen, reversiblen Überführung der einen Modifikation in die andere eine bestimmte Änderung der Gesamtenergie erfolgt. Sie beträgt z. B. bei der Umwandlung von rhombischem in monoklinen Schwefel bei 96° etwa $100 \text{ cal pro Mol S}$. Mit Hilfe des dritten Hauptsatzes ist es nunmehr grundsätzlich möglich, aus dieser (gemessenen) Umwandlungswärme U die Affinität A der Umwandlung zu berechnen und somit auch den Umwandlungspunkt nur aus thermischen Daten theoretisch zu bestimmen. Denn derjenige Punkt der Temperaturachse, an welchem $A = 0$ wird, kennzeichnet die Stelle, an der die freie Energie A des Umwandlungsvorganges verschwindet. Hier haben die beiden Modifikationen die gleiche freie Energie, stehen also miteinander im thermodynamischen Gleichgewicht.

Das Diagramm der Abb. 7 gibt die Verhältnisse bei der Umwandlung der beiden Modifikationen des Zinns wieder. Die Umwandlungswärme ist vom Umwandlungspunkt bei normalem Druck ($T = 292^\circ \text{ abs.}$) mit Hilfe der spezifischen Wärmen beider Modifikationen bis zu sehr tiefen Temperaturen herab berechnet worden; der Verlauf der spezifischen Wärmen ist für Sn bis etwa 20° absolut durch Messungen von F. Lange (1914) experimentell bekannt. Es ergibt sich für U als Funktion der Temperatur der in Abb. 7 gezeichnete Verlauf; für den absoluten Nullpunkt erhält man den extrapolierten Wert

$$U_0 = A_0 = 386 \text{ cal pro Mol Sn.}$$

Bis zum Umwandlungspunkt bei Atmosphärendruck steigt sie auf
 $U = 535 \text{ cal pro Mol Sn}$
 an.

Um den dritten Hauptsatz zur Berechnung von A verwenden zu können, muß auf die Gibbs-Helmholtzsche Gleichung zurückgegriffen

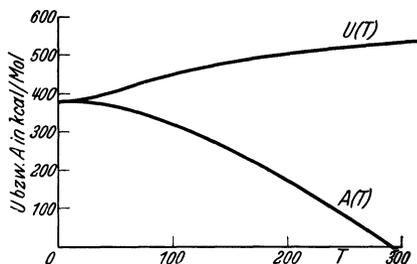


Abb. 7. $U(T)$ und $A(T)$ für die Umwandlung von weißem in graues Zinn; konstruiert nach Gleichung (58), S. 130.

und die Integration durchgeführt werden. Für die Umwandlungswärme U kann man nach dem Kirchhoffschen Satz (S. 115) setzen:

$$U(T) = U_0 + \int_0^T (c_{v_1} - c_{v_2}) dT, \quad (56)$$

worin c_{v_1} und c_{v_2} die Molwärmen des grauen und weißen Zinns bedeuten, welche als Funktion der Temperatur bis zu etwa 20° absolut bekannt sind. Setzt man $U(T)$ nach (56) in die Gibbs-Helmholtzsche Gleichung ein, so läßt sich die Integration durchführen und man erhält den gewünschten Ausdruck für A in der Form

$$A = U_0 - T \int_0^T \frac{dT}{T^2} \int_0^T (c_{v_1} - c_{v_2}) dT + T \text{ const.} \quad (57)$$

Eine Berechnung von A ist zunächst noch unmöglich, weil die Konstante unbekannt bleibt. Mit Hilfe des dritten Hauptsatzes

$$\lim_{T=0} \frac{dA}{dT} = 0$$

folgt aber sogleich, daß

$$\text{const} = 0$$

sein muß, denn nach (57) ist

$$\frac{dA}{dT} = -J - T \frac{dJ}{dT} + \text{const}$$

J = das Integral aus Gleichung (57).

Dieser Ausdruck ist jetzt im Grenzwert für $T = 0$ zu bilden und gleich Null zu setzen, um daraus den Wert für die Integrationskonstante zu berechnen.

Nun ist der Wert des Integrals selbst für $\lim T = 0$ unendlich klein; denn die Werte für c_v gehen bei kondensierten Systemen nach Debye mit der dritten Potenz der Temperatur gegen Null; ihr Integral nach T — das innere Integral in Gleichung (57) — geht also mit der vierten Potenz gegen Null; für das äußere Integral verbleibt daher ein Ausdruck von der Ordnung $T^2 dT$, der wiederum integriert die dritte Ordnung von T ergibt; J geht also bei abnehmender Temperatur mit T^3 gegen Null. Im Grenzwert werden sowohl J als auch $T \frac{dJ}{dT}$ sehr rasch unendlich klein und der dritte Hauptsatz liefert für die Integrationskonstante den Wert Null. Durch Hinzunahme dieser Tatsache kann man die Gleichung (57) schreiben:

$$A = U_0 - T \int_0^T \frac{dT}{T^2} \int_0^T (c_{v_1} - c_{v_2}) dT, \quad (58)$$

da U_0 gegeben ist und die Molwärmen als Temperaturfunktion experimentell bekannt sind, stellt (58) eine Formel dar, mit Hilfe derer man die A -Kurve Punkt für Punkt konstruieren kann. Dies ist in Abb. 7 gesehen.

Zunächst sieht man, daß sich vom absoluten Nullpunkt bis etwa 20° absolut die U - und A -Kurven sehr eng aneinander schmiegen; bis

zu dieser Temperatur gilt also das Berthelotsche Prinzip „streng“. Später nimmt die A -Kurve rasch ab, d. h. es ist nicht mehr die ganze bei der Umwandlung freiwerdende Energie zur Überführung in mechanische Arbeit verfügbar, sondern ein Teil bleibt als Energieinhalt der neu entstehenden festen Phase in einer unverwertbaren Form übrig. Bei $T = 295^\circ$ schneidet die A -Kurve die Abszissenachse; an dieser Stelle ist die Änderung der freien Energie bei der Umwandlung Null und es besteht Gleichgewicht zwischen beiden Phasen. Wie man sieht, liegt dieser theoretisch bestimmte Umwandlungspunkt sehr nahe an dem tatsächlich beobachteten, so daß hier ein Beispiel für eine vorzügliche experimentelle Bestätigung des dritten Hauptsatzes vorliegt.

Ein anderes, sehr interessantes Beispiel für die Umwandlung zweier fester Phasen ineinander bildet das System



Für Zimmertemperatur folgt aus Messungen von Roth und Wallasch (1911) für die Umwandlungswärme der Wert:

$$U = 160 \text{ cal pro Mol.}$$

Nernst (1911) hat die Molwärmen beider Modifikationen bis zu sehr tiefer Temperatur gemessen, so daß man über alle Angaben verfügt, welche notwendig sind, um das U - T -Diagramm bzw. A - T -Diagramm graphisch angeben zu können. Die Abb. 8 zeigt den charakteristischen Verlauf beider Kurven.

Die U -Kurve sinkt im Gebiet zwischen 50 und 500° abs. etwa auf ein Drittel ihres Wertes ab und bleibt dann ziemlich konstant; die A -Kurve läuft bis etwa 200° beinahe parallel der T -Achse und steigt dann etwa linear an; sie schneidet die T -Achse überhaupt nicht, woraus hervorgeht, daß es bei Atmosphärendruck — denn dafür gilt das angegebene Diagramm — keine Gleichgewichtstemperatur gibt. Wir haben einen Fall von Monotropie vor uns.

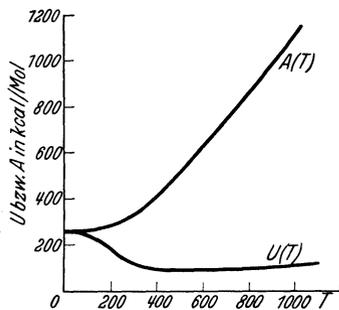


Abb. 8. $U(T)$ und $A(T)$ für die Umwandlung von Diamant in Graphit; konstruiert nach Gleichung (58), S. 130.

Bei höherem Druck ändern sich allerdings die Verhältnisse wegen der gegen den äußeren Druck zu leistenden Arbeit ganz erheblich und man erhält A -Kurven, welche die Abszissenachse schneiden und einen Umwandlungspunkt liefern, bei dem die beiden Modifikationen koexistieren können. F. Simon (1926) berechnete auf diese Art die Gleichgewichtsdrucke bei verschiedenen Temperaturen zu:

p in at	8400	13000	23000	34000	45000
T	300	600	1000	1500	2000

Diese beiden Beispiele mögen genügen, um zu zeigen, was man durch die Anwendung der Thermodynamik über Polymorphieerscheinungen im Prinzip aussagen kann.

C. Der Schmelzvorgang.

Auch bei Betrachtung des Schmelzvorganges hat man es mit einer Komponente zu tun, welche beim Schmelzpunkt in drei Phasen vorkommt, einer festen, einer flüssigen und einer gasförmigen. Aus der Phasenregel folgt, daß man ein System ohne Freiheitsgrad vor sich hat: feste, flüssige und gasförmige Phasen eines Stoffes können bei gegebenem Druck nur bei einer ganz bestimmten Temperatur, eben beim Schmelzpunkt, im Gleichgewicht sein.

Tabelle 14. Die Schmelzwärmen einiger wichtiger Stoffe.

Substanz	Schmelzpunkt in °C	Schmelzwärme	
		in cal pro g	in kcal pro Mol
Al	657	82	2,22
Pb	327	5,86	1,21
Cr	1550	32	1,66
Au	1063	15,9	3,14
H ₂	—	15	0,030
O ₂	— 219	3,3	0,106
N ₂	— 210	6,1	0,170
NH ₃	— 75	108,1	1,84
H ₂ O	0	79,06	1,44
CO ₂	— 56,3	43,8	1,93
Benzol. . . .	5,4	30,4	2,37
Anilin	— 7,03	20,95	1,95
Anthracen	216,5	38,7	6,89
BaCl ₂	959	27,8	5,8
PbCl ₂	485	20,9	5,81
CaCl ₂	773	54,6	6,06
KCl	772	86,0	6,41

Um das Nernstsche Wärmetheorem auf den Schmelzvorgang anzuwenden und aus der Schmelzwärme den Schmelzpunkt zu bestimmen, müßte man die Molwärme des festen und des flüssigen Zustandes bis zu sehr tiefen Temperaturen kennen; sie sind bisher aber noch in keinem Fall experimentell bestimmt worden, weil das starke Unterkühlen von Schmelzen im allgemeinen viel schwieriger ist als das der festen Modifikationen.

Auch der Schmelzvorgang ist von einer Energieänderung des betrachteten Systems begleitet; man muß je nach der Richtung des Prozesses die Schmelzwärme entweder zu- oder abführen. Einen Begriff von der Größe dieser Energieänderung

gibt Tabelle 14. Sie enthält einige besonders häufig benötigte Zahlen.

Die Druckabhängigkeit des Schmelzpunktes geht aus der Clausius-Clapeyronschen Gleichung (47) auf S. 123 hervor; der Druckkoeffizient ist

$$\frac{dT}{dp} = \frac{T(v_H - v_f)}{q} \quad (59)$$

Man liest aus dieser Beziehung sofort ab, daß der Schmelzpunkt immer dann durch den Druck erhöht wird, wenn die Dichte im festen Zustand größer ist als im geschmolzenen; dann ist nämlich der Zähler des Bruches auf der rechten Seite der Gleichung (59) positiv und da der Nenner stets positiv ist, erhält man auch für den Druckkoeffizienten das positive Vorzeichen. Wenn andererseits das spezifische Volumen der festen Phase größer ist als das der Flüssigkeit, wie z. B. beim Wasser, dann wird der Schmelzpunkt durch Druck herabgesetzt. Setzt man in Gleichung (59) für q , v_H und v_f die für Wasser gültigen experimentellen Werte ein, so erhält man für $\frac{dT}{dp}$ die Zahl $-0,0075^\circ$ pro at, was mit dem gemessenen Wert vorzüglich übereinstimmt.

Die Druckabhängigkeit des Schmelzpunktes gestattet es zuweilen, Enantiomorphieerscheinungen aufzudecken, welche bei gewöhnlichem

Druck nicht beobachtet werden können. Wenn die aus der Gleichung (58) folgende Umwandlungstemperatur über dem Schmelzpunkt liegt, läßt sich praktisch der Gleichgewichtspunkt der beiden festen Phasen nicht erreichen. Durch Arbeiten bei verändertem Druck kann es aber unter Umständen gelingen, den Schmelzpunkt so weit hinaufzusetzen, daß er höher liegt als der Umwandlungspunkt der beiden Modifikationen und daher experimentell zugänglich wird.

Beim Schwefel liegt der umgekehrte Fall vor: bei normalem Druck ist *S* enantiotrop, bei 1400 at aber konnte Tammann (1899) zeigen, daß nur rhombischer *S* existenzfähig ist. Alle anderen Modifikationen lassen sich unter diesen Verhältnissen nicht herstellen.

Als besonders charakteristisch ist noch hervorzuheben, daß zwar Festkörper immer schmelzen, wenn ihre Temperatur über den Schmelzpunkt gebracht wird, daß aber Schmelzen unter Umständen sehr lange und sehr tief unterkühlt werden können, ohne daß sie gefrieren. Diese Erscheinungen haben mit den Gleichgewichten selbst nichts zu tun, sondern hängen mit Geschwindigkeitsfragen zusammen. Damit Krystallisation stattfinden kann, ist es notwendig, daß sich Keime von gewisser Größe in der Schmelze ausbilden. Bei ganz langsamem und vorsichtigem Abkühlen ohne Erschütterungen ist aber häufig die Keimbildungsgeschwindigkeit so gering, daß man zu sehr deutlichen Unterkühlungen kommen kann. Durch Erschütterungen oder Umrühren läßt sich aber meist die Krystallisation sofort hervorrufen.

D. Der Verdampfungsvorgang und die Dampfdruckkurve.

Bei der Betrachtung des Verdampfungsvorganges mit einer Komponente verlangt die Phasenregel einen Freiheitsgrad; Dampf und Flüssigkeit sind nicht nur bei einer Temperatur koexistent, sondern zu jeder gegebenen Temperatur erhält man einen bestimmten Gleichgewichtsdruck des gesättigten Dampfes. Im Gegensatz zum Schmelz- oder Umwandlungspunkt erhalten wir hier eine Dampfdruckkurve, welche die Veränderlichkeit des Sättigungsdrucks mit der Temperatur ausdrückt.

Die quantitative Form dieser Abhängigkeit des Dampfdrucks von der Temperatur und von der Verdampfungswärme liefert als Differentialgleichung die Beziehung von Clausius-Clapeyron, deren Integral

$$\ln p = \int_0^T \frac{\lambda}{RT^2} dT + \text{const} \quad (60)$$

wiederum, wie das Integral der Gibbs-Helmholtzschen Gleichung eine unbekannt und aus der klassischen Thermodynamik nicht bestimmbar Integrationskonstante enthält. Man muß daher wiederum den dritten Hauptsatz heranziehen, wenn man zu einer endgültigen Dampfdruckformel kommen will.

Zunächst drückt man nach dem Kirchhoffschen Satz λ mit Hilfe der Molwärmen als Funktion der Temperatur aus

$$\lambda = \lambda_0 + \int_0^T (c_{p\text{gas}} - c_{p\text{fl}}) dT. \quad (61)$$

Tabelle 15 enthält die Verdampfungswärmen einiger wichtiger Stoffe nebst ihrem Siedepunkt. Wenn es sich um einen Sublimationsprozeß handelt, hat man an Stelle von $c_{p\text{fl}}$ den Wert für $c_{p\text{fest}}$ einzusetzen. λ_0 bedeutet die molare Verdampfungs- bzw. Sublimationswärme beim

Tabelle 15. Die Verdampfungswärmen einiger wichtiger Stoffe.

Substanz	Siedepunkt in °C	Verdampfungswärme	
		in cal pro g	in kcal pro Mol
Br ₂ . . .	58	45,6	7,28
Cd . . .	425	200,0	22,5
Cl ₂ . . .	— 22	67,4	4,78
J ₂ . . .	174	24	6,0
Hg . . .	358	67,8	13,6
NH ₃ . . .	— 33,4	321,3	5,46
H ₂ O . . .	100	538,3	9,69
SO ₂ . . .	— 11,16	95,3	6,11
CO ₂ (fest) . . .	— 78	142,4	6,26
KCl . . .	1417	—	40,5
KBr . . .	1376	—	38,2
KJ . . .	1330	—	37,2

absoluten Nullpunkt, die natürlich einer direkten Messung nicht zugänglich ist. Um jetzt die Integration der Dampfdruckformel durchzuführen, müßte man c_{fl} bzw. c_{fest} und $c_{p\text{gas}}$ ebenso als Temperaturfunktion bis zu sehr tiefen Temperaturen herab kennen, wie man bei der Auswertung von Gleichung (58) auf S. 130 c_v und c_p gekannt hat. Beim Betrachten eines Sublimationsgleichgewichtes ist dies zwar für den kondensierten festen Zustand der Fall, man kennt aber weder die Molwärmen unterkühlter Flüssigkeiten noch die Molwärmen von Dämpfen bis herab zu sehr tiefen Temperaturen. Daher ist man nicht in der Lage, hier in ähnlich

allgemeiner und exakter Weise vorzugehen, wie bei der Behandlung kondensierter Systeme (vgl. S. 130). Für gewisse einfache Spezialfälle kann man aber trotzdem zu exakten Folgerungen kommen.

Bei der Berechnung des Sublimationsdruckes verfestigter einatomiger Gase (He, A, Hg usw.) erhält man für die Molwärme des gasförmigen Anteils

$$C_p = \frac{5}{2} R;$$

und daher:

$$\ln p = -\frac{\lambda_0}{RT} + 2,5 \ln T - \frac{1}{R} \int_0^T \frac{dT}{T^2} \int_0^T c_{p\text{fest}} dT + i. \quad (62)$$

Da wiederum $c_{p\text{fest}}$ als Temperaturfunktion durch Messungen oder durch die Debyesche Formel bekannt ist, läßt sich das Integral Punkt für Punkt konstruieren, so daß man bis auf die Konstante i den Dampfdruck als Temperaturfunktion theoretisch aus rein thermischen Angaben berechnen kann.

Nach dem Nernstschen Wärmetheorem ist i eine für jede Substanz charakteristische Konstante, die nicht mehr davon abhängig ist, welches spezielle Gleichgewicht man betrachtet (z. B. Sublimationsdruck oder Reaktionsgleichgewicht), sondern deren Bestimmung für eine gegebene Substanz ein für allemal aus einem bestimmten Gleichgewicht erfolgen

kann. Nernst hat diese Größe wegen ihrer Bedeutung für die Berechnung chemischer Gleichgewichte als die chemische Konstante bezeichnet. Sie ergibt sich z. B. beim A durch Vergleich der nach (62) berechneten Werte mit den tatsächlichen Dampfdrücken zu

$$i = 1,82 \pm 0,09$$

oder wenn man mit dekadischen Logarithmen rechnet

$$j = 0,79 \pm 0,04.$$

Wenn man Dampfdruckgleichgewichte berechnen will, an denen mehratomige Molekeln beteiligt sind, empfiehlt es sich, mit einer Näherungsformel zu arbeiten, die Nernst aufgestellt hat, und in der die oben erwähnten Schwierigkeiten bezüglich der Kenntnis der Molwärmern durch glücklich gewählte spezielle Konstanten beseitigt werden. Diese Näherungsgleichung lautet bei Benützung dekadischer Logarithmen:

$$\log p \text{ (in at)} = -\frac{\lambda_0}{4,57 T} + 1,75 \log T - \frac{\epsilon}{4,57 T} + \Sigma j'. \quad (63)$$

Die individuelle und experimentell zu bestimmende Konstante ϵ bringt den Einfluß der Molwärme im festen Zustand zum Ausdruck. Der Faktor 1,75 hat sich als empirischer universeller Zahlenwert zur Erfassung des Beitrages der Molwärmern des gasförmigen Anteils gut bewährt; $\Sigma j'$ bezeichnet man als die Summe der konventionellen chemischen Konstanten.

In Abb. 9 ist als Beispiel die theoretische Dampfdruckkurve des Wassers wiedergegeben, wie sie sich aus der Gleichung (63) berechnen läßt; gleichzeitig sind einige beobachtete Punkte eingetragen. Man sieht, daß sich zwischen Theorie und Experiment eine ganz ausgezeichnete Übereinstimmung konstatieren läßt.

Tabelle 16 enthält die Werte der chemischen Konstanten j und j' für einige wichtige Substanzen; wir werden sie später bei der Berechnung der Gasgleichgewichte noch gebrauchen.

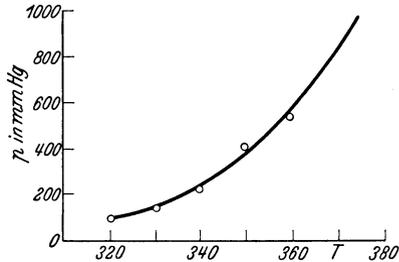


Abb. 9. Dampfdruckkurve des Wassers (die Punkte sind die gefundenen Werte).

Tabelle 16. Einige wichtige chemische (j) und konventionelle (j') chemische Konstanten.

Substanz	Molekular- bzw. Atomgewicht	j	j'
H ₂	2,016	— 1,11	1,6
A	39,88	0,79	—
Hg	200,6	1,85	—
Na	23,00	0,97	—
K	39,10	1,13	—
Methan	16,032	— 1,94	2,5
N ₂	14,01	—	2,6
O ₂	16,00	—	2,8
CO	28,00	—	3,5
CO ₂	44,00	0,73	—
N ₂ O	44,00	0,68	—
H ₂ O	18,01	— 1,91	—
NH ₃	17,01	— 1,66	—
F ₂	38,0	0,29	—
Cl ₂	70,92	1,45	3,1
Br ₂	159,84	2,49	—
J ₂	253,84	2,99	—
HF	20,01	— 1,10	—
HCl	36,47	— 0,419	—
HBr	80,93	0,197	—
HJ	127,93	0,609	—

E. Gleichgewichte bei homogenen Gasreaktionen.

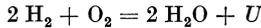
In der homogenen Gasreaktion



liegt ein System von zwei Komponenten vor, die nur eine Phase — die gasförmige — bilden. Nach der Phasenregel hat man daher drei Freiheitsgrade zu erwarten. Das bedeutet, daß bei gegebener Temperatur noch die beiden Konzentrationen c_A und c_B frei wählbar sind. Erst wenn man für sie bestimmte Werte einsetzt, ist auch die Konzentration c_{AB} — die Ausbeute an dem Reaktionsprodukt — eindeutig bestimmt. Es existiert eine Funktion $F(c_A, c_B, c_{AB}, T)$, so daß beim Einsetzen der Gleichgewichtswerte für T , c_A , c_B und c_{AB} der Zahlenwert dieser Funktion gleich Null wird.

1. Das Massenwirkungsgesetz.

Um die für homogene Gasgleichgewichte charakteristische Funktion zu finden, wird die Beziehung von van 't Hoff benutzt, der als erster diese Frage vom thermodynamischen Standpunkt aus erschöpfend behandelt hat. Die Reaktion



möge sich bei 1000° abspielen, und zwar in der Weise, daß zunächst in zwei großen Gasometern die beiden Gase H_2 und O_2 bei der Reaktionstemperatur vorrätig gehalten werden.

Diesen Reservoiren entnehmen wir zwei Mole H_2 und ein Mol O_2 und bringen sie in zwei transportable Behälter, die mit verschiebbaren Stempeln versehen sind, so daß man die Gase in sie hineinsaugen und aus ihnen wieder auspressen kann. Wenn man die drei Mole Gas in die Transportgefäße hineinexpandieren läßt, gewinnt man die Arbeit

$$A_1 = + 3 p V = + 3 R T,$$

wenn $T = 1000^\circ$, V das Molvolumen ist und alle beteiligten Gase so verdünnt sind, daß die idealen Gasgesetze ihre Gültigkeit behalten.

Nun läßt man die beiden Gase, deren Anfangspartialdruck P_{H_2} und P_{O_2} betragen möge, solange ausdehnen, bis sie die dem Gleichgewicht entsprechenden Gleichgewichtsdrucke p_{H_2} und p_{O_2} angenommen haben; hierbei wird an Arbeit A_2 gewonnen

$$A_2 = + 2 R T \ln \frac{P_{\text{H}_2}}{p_{\text{H}_2}} + R T \ln \frac{P_{\text{O}_2}}{p_{\text{O}_2}}.$$

Die beiden Gase sind nun auf den richtigen Gleichgewichtsdruck gebracht und können durch „halbdurchlässige“ Membranen isotherm und reversibel in einen Kasten, den sog. „Gleichgewichtskasten“ gebracht werden, in dem sich die Reaktion abspielen soll. Um dies zu erreichen, muß man eine gewisse Arbeit A_3 leisten, nämlich drei Mole Gas in den Kasten hineinpressen

$$A_3 = - 3 R T.$$

Durch das Zusammenbringen der beiden Gase im Gleichgewichtskasten entsteht H_2O . Die dem Gleichgewicht entsprechende Menge H_2O -Dampf

dilatiert aus dem Kasten in einen dritten Transportbehälter, der wiederum durch eine nur H_2O -Dampf durchlassende Membran an das Gleichgewichtsgefäß angeschlossen ist; der Arbeitsgewinn ist hierbei:

$$A_4 = + 2 R T.$$

In dem Transportgefäß wird der Wasserdampf vom Gleichgewichtsdruck p_{H_2O} auf den Enddruck P_{H_2O} komprimiert, wobei die Arbeit

$$A_5 = - 2 R T \ln \frac{p_{H_2O}}{P_{H_2O}}$$

aufgewandt werden muß. Schließlich bringt man den Dampf ohne Druckänderung in den Gasometer für H_2O , wobei man die Arbeit

$$A_6 = - 2 R T$$

zu leisten hat.

Durch diese sechs aufeinanderfolgenden isothermen und reversiblen Teilprozesse hat man zwei Mole Wasser aus zwei Molen H_2 und einem Mol O_2 gebildet; die hierbei maximal zu gewinnende Arbeit ist

$$A = A_1 + A_2 + \dots = R T \left[\ln \frac{P_{H_2}^2 \cdot P_{O_2}}{P_{H_2O}} + \ln \frac{p_{H_2O}}{p_{H_2} \cdot p_{O_2}} \right]. \quad (65)$$

Nun ist A die maximale Arbeit einer isothermen Reaktion und muß als solche bei gegebener Temperatur ganz unabhängig vom Weg einen Wert besitzen, der nur vom Anfangs- und Endzustand abhängt; d. h. nur von den Werten der Drucke P_{H_2} , P_{O_2} und P_{H_2O} . Wenn man die gleichen Werte für die P -Drucke wählt, dann muß man dasselbe A bekommen, ganz gleichgültig, wie man die p -Drucke in dem Reaktionskasten herstellt. Diese Forderung des zweiten Hauptsatzes läßt sich aber nur erfüllen, wenn an

$$\frac{p_{H_2}^2 \cdot p_{O_2}}{p_{H_2O}} = K_p \quad (66)$$

setzt; denn dann wird durch die Konstante K_p der Einfluß der einzelnen Partialdrucke auf die maximale Arbeit der Reaktion ausgeschaltet.

Die Gleichung (66) stellt das Massenwirkungsgesetz dar. Aus seiner thermodynamischer Ableitung folgt, daß es eine Konsequenz des zweiten Hauptsatzes ist und nur solange streng gilt, als für alle Reaktionsteilnehmer die Gesetze der idealen Gase gültig bleiben. Da sich seine Aussage nur auf eine bestimmte Temperatur bezieht, wird es auch zuweilen die Reaktionsisotherme genannt.

Die bei der isothermen Leitung einer homogenen Gasreaktion zu gewinnende maximale Arbeit ist identisch mit der Änderung der freien Energie, die diesen Prozeß begleitet, und nach dem zweiten Hauptsatz maßgebend für den Ablauf des Vorganges; nach van 't Hoff kann man sie daher als Ausdruck für die Affinität benutzen, auf Grund derer die betrachtete Reaktion überhaupt abläuft; sie ist nach Gleichung (65)

$$A = R T \left(\ln \frac{P_{H_2}^2 \cdot P_{O_2}}{P_{H_2O}} - \ln K_p \right). \quad (67)$$

Da hierin die willkürlich gewählten Anfangs- und Enddrucke mit der Reaktion selbst nichts zu tun haben, kann man sie alle beliebig wählen,

also z. B. gleich Eins setzen. Dadurch fällt der erste Summand in der Klammer weg und man erhält für die sog. Normal-Affinität einer isotherm, isochor geleiteten homogenen Gasreaktion den Ausdruck

$$A = -RT \ln K_p. \quad (68)$$

Tabelle 17. Die maximalen Arbeiten, die bei der Bildung einiger wichtiger Verbindungen gewonnen werden können.

System	Temperatur in ° C	Maximale Arbeit A in kcal/Mol
AgBr, fest	25	22,9
AgJ fest	25	16,3
MgO, fest	25	137,0
CaO, fest	25	145,0
Al ₂ O ₃ , fest	25	359,1
Fe ₂ O ₃ , fest	25	178,5
H ₂ O, flüssig	25	56,6
NH ₃ , flüssig	25	2,6
NH ₃ , gasförmig	25	3,9
CO ₂ , gasförmig	25	93,8
CH ₄ , gasförmig	25	12,8
Methanol, flüssig	25	42,9
Äthanol, flüssig	25	41,7
Glykol, flüssig	25	80,2
Essigsäure, flüssig	25	94,3
Glucose, fest	25	216,0

M. Berthelot hatte lange vor dieser exakten Definition der Affinität die Vermutung geäußert, daß alle exothermen chemischen Reaktionen „von selbst“ verlaufen, alle (endothermen) mit negativer Wärmetönung aber nicht. Die Erfahrung hat diesen Satz zwar in sehr vielen Fällen bestätigt, widersprach ihm aber in anderen wieder so deutlich, daß man das „Berthelotsche Prinzip“ nur als eine Näherungsregel ansehen kann, die erst im dritten Hauptsatz ihre exakte Formulierung gefunden hat. In den Tabellen 17 und 18 sind für einige wichtige Reaktionen die Affinitäten und die gesamten Energieänderungen (Wärmetönungen) angegeben.

Tabelle 18. Die (gesamten) Bildungswärmen U einiger wichtiger Verbindungen.

Substanz	Temperatur in ° C	U in kcal/Mol
HCl, gasförmig	19	22,0
HBr, gasförmig	18—20	27,84
HJ, gasförmig	—	— 6,04
H ₂ O, flüssig	0	68,31
H ₂ S, gasförmig	—	2,73
NH ₃ , gasförmig	18	11,89
N ₂ H, aq	—	— 55,2
CH ₄ , gasförmig	—	21,75 ¹
Äthan, gasförmig	—	28,56 ¹
Acetylen, gasförmig	—	— 47,77 ¹
SO ₂ , gasförmig	—	71,1

2. Die Temperaturabhängigkeit homogener Gasgleichgewichte.

Die nächste wichtige Frage betrifft die Temperaturabhängigkeit des chemischen Gleichgewichts. Die bisherige Ableitung ist nur für isotherme, reversibel geleitete Gasreaktionen gültig; wir müssen sie daher noch erweitern und sehen,

welche Aussage die Thermodynamik über die Temperaturabhängigkeit von K_p gestattet.

Der geeignete Weg dazu ergibt sich aus der Verknüpfung von K_p mit A durch die Gleichung (68); setzt man den dortigen Wert für A in die Helmholtzsche Gleichung ein, so erhält man die gewünschte Beziehung zwischen K_p , U und T , allerdings wieder nur in der Form einer Differentialgleichung, deren Integration die schon bei der Dampf-

¹ Aus C (amorph).

druckkurve angetroffenen Schwierigkeiten bereitet. Durch Differentiation von (68) erhalten wir:

$$\frac{dA}{dT} = -R \ln K_p - RT \frac{d \ln K_p}{dT}.$$

In die Gibbs-Helmholtzsche Gleichung eingesetzt, ergibt sich:

$$-RT \ln K_p - RT^2 \frac{d \ln K_p}{dT} = -RT \ln K_p - U_p$$

oder nach Wegheben des auf den beiden Seiten stehenden gleichen Summanden

$$\frac{d \ln K_p}{dT} = \frac{U_p}{RT^2} \quad (69a)$$

bzw. für Reaktionen, die bei konstantem Volumen verlaufen

$$\frac{d \ln K_c}{dT} = \frac{U_v}{RT^2}. \quad (69b)$$

Die Gleichungen (69a) und (69b) entsprechen genau der differentiellen Form der Dampfdruckgleichung (S. 123) und verknüpfen die Reaktionskonstanten K_c und K_p mit der Wärmetönung der betrachteten Reaktion; die Beziehung (69b) wird — weil sie für konstantes Volumen gilt — Reaktionsisochore genannt.

Die Integration von (69a) gestattet unter Zuhilfenahme des dritten Hauptsatzes die Berechnung der Gleichgewichtskonstanten eines homogenen Gasgleichgewichtes aus seiner Wärmetönung, wenn diese als Funktion der Temperatur bis zu tiefen Temperaturen herab bekannt ist. Ebenso wie bei der Berechnung des Dampfdrucks aus der Verdampfungswärme erhalten wir aus der klassischen Thermodynamik die Gleichung:

$$\ln K_p = \int_0^T \frac{U_p(T)}{RT^2} dT + \text{const},$$

wobei die Konstante unbestimmt bleibt. Das Nernstsche Theorem verlangt wiederum, daß für jeden Stoff diese Konstante einen ganz bestimmten Wert besitzen muß, gleichgültig, mit welchen anderen Körpern er in das betrachtete Gleichgewicht eingeht. Diese für die Berechnung der Gasgleichgewichte verwendeten Konstanten müssen mit den aus dem Dampfdruck sich ergebenden übereinstimmen. Hat man für jede Substanz ein für allemal diese chemische Konstante bestimmt, dann kann man — bei Kenntnis der spezifischen Wärmen bis zu sehr tiefen Temperaturen — sämtliche Gasgleichgewichte berechnen.

Den weiteren Überlegungen steht zunächst als Schwierigkeit noch entgegen, daß der dritte Hauptsatz in seiner strengen Form nur für kondensierte Systeme (S. 128) Gültigkeit hat. Zur Überwindung dieser Schwierigkeit denkt man sich die Reaktion bei so tiefer Temperatur durchgeführt, daß sämtliche anwesenden Komponenten in fester Form auftreten und mit ihrem Dampf im Gleichgewicht stehen. Der betrachtete Prozeß muß — wegen des Gleichgewichtes zwischen den festen und der gasförmigen Phase — im Gasraum und im festen

Zustand die gleiche Affinität besitzen. Für die Reaktion zwischen den festen Phasen ist die Affinität durch

$$A = U_{0\text{ fest}} - T \int_0^T \frac{dT}{T^2} \int_0^T (c_{v_1} - c_{v_2}) dT$$

gegeben, während sie im Gasraum nach (67) den Wert

$$A = RT \left[\ln \frac{P_{H_2}^2 \cdot P_{O_2}}{P_{H_2O}} - \ln K_p \right]$$

annimmt; durch Gleichsetzen dieser beiden Ausdrücke erhält man:

$$U_{0\text{ fest}} - T \int_0^T \frac{dT}{T^2} \int_0^T (c_{v_1} - c_{v_2}) dT = RT \left[\ln \frac{P_{H_2}^2 \cdot P_{O_2}}{P_{H_2O}} - \ln K_p \right];$$

die P -Werte sind jetzt nicht willkürlich wählbar, sondern müssen aus den Dampfdruckformeln der beteiligten Substanzen entnommen werden. Sie hängen daher mit den Verdampfungswärmen der einzelnen Komponenten, mit ihren Molwärmern und ihren chemischen Konstanten zusammen. Führt man all diese Substitutionen durch, so erhält man für die Abhängigkeit der Reaktionskonstanten K_p von der Temperatur den Ausdruck:

$$\begin{aligned} \ln K_p = & -\frac{U_{0p}}{RT} + \frac{(C_{p0^1} - C_{p0^2})_{\text{Gas}}}{R} \cdot \ln T + \\ & + \frac{1}{R} \int_0^T \frac{dT}{T^2} \int_0^T [(C_p - C_{p0})_1 - (C_p - C_{p0})_2] dT + \sum i. \end{aligned} \quad (70)$$

Hierin sind:

U_{0p} die (fiktive) Wärmetönung der Reaktion im Gasraum beim absoluten Nullpunkt,

C_{p1} und C_{p2} sind die temperaturabhängigen Teile der Molwärmern für die Anfangs- und Endprodukte,

C_{p0^1} und C_{p0^2} die entsprechenden temperaturunabhängigen Glieder und i die chemischen Konstanten der einzelnen Teilnehmer.

Da im allgemeinen die Molwärmern der gasförmigen Teilnehmer bis zu tiefen Temperaturen nicht bekannt sind, kann man diese Gleichung nur dann auswerten, wenn ausschließlich einatomige Gase an der Reaktion beteiligt sind (vgl. die Auswertung der exakten Dampfdruckformel für den entsprechend einfachen Fall).

Betrachtet man z. B. die chemische Dissoziation von Atomen in Ionen und Elektronen, so schreibt man die Gleichung (70) in dekadischen Logarithmen

$$\log K_p = -\frac{U_0}{4,57 T} + 2,5 \log T + j_1 - j_2 - j_3, \quad (71)$$

worin j_1 , j_2 und j_3 die chemischen Konstanten des Atoms, Ions und Elektrons bedeuten. Die beiden ersten sind sich wahrscheinlich so ähnlich, daß man sie gegeneinander ohne weiteres wegheben kann, für die letzte Größe ergibt sich aus theoretischen Abschätzungen der Wert von

$$j_3 = -6,6.$$

Wendet man die Formel (71) unter Zuhilfenahme dieser Zahl an, so ergeben sich Ionisationswerte, die nach Eggert (1919) mit astrophysikalischen Tatsachen in sehr guter Übereinstimmung stehen. Die einfache Form (71) der Temperaturfunktion einer Gleichgewichtskonstante, wie sie sich aus dem dritten Hauptsatz ergibt, steht also mit der Erfahrung in gutem Einklang.

3. Die Näherungsgleichung von Nernst.

Für den allgemeinen Gebrauch hat sich wiederum sehr gut eine Näherungsformel bewährt, die Nernst aufgestellt hat und mit Hilfe derer man sich bei Kenntnis der Wärmetönung recht gut über die Lage eines Gleichgewichts orientieren kann; sie lautet:

$$\log K_p = -\frac{U_p}{4,57 T} + \sum \nu 1,75 \log T + \sum \nu j'. \quad (72)$$

Hier ist zunächst an Stelle der Wärmetönung beim absoluten Nullpunkt die Wärmetönung bei normaler Temperatur gesetzt; ferner sind die Molwärmen durch den empirischen Ausdruck $\sum \nu \cdot 1,57 \log T$ vertreten, wobei $\sum \nu$ so gebildet wird, daß man alle auf der linken Seite der Reaktionsgleichung stehenden, nur gasförmig vorkommenden Moleküle mit Plus, die auf der rechten Seite stehenden mit Minus einsetzt und die Differenz bildet. Bei der Knallgasreaktion ist z. B. $\sum \nu$ gleich Eins. Endlich sind für die chemischen Konstanten die konventionellen chemischen Konstanten gesetzt, wobei man wiederum die algebraische Summe der verschwindenden und entstehenden gasförmigen Molekeln als Faktor zu verwenden hat.

Trotz dieser Vernachlässigungen liefert die Gleichung (72) meist sehr gute Übereinstimmung mit den experimentell gefundenen Gleichgewichtswerten, besonders wenn man Reaktionen betrachtet, bei denen

$$\sum \nu = 0$$

ist.

Tabelle 19. Beobachtete und berechnete K_p -Werte für einige Reaktionen, bei welchen $\sum \nu = 0$ ist. Die Berechnung erfolgte nach Gleichung (72).

Reaktion	U_p	$\sum \nu j'$	300°		1000°	
			log K_p beob.	log K_p ber.	log K_p beob.	log K_p ber.
$J_2 + H_2 = 2 HJ$	2760	-0,7	-2,88	-2,7	-1,34	1,3
$CO + H_2O = CO_2 + H_2$.	10420	+2,3	—	-5,3	-0,17	0,03
$Br_2 + H_2 = 2 HBr$	24200	-1,6	-18,55	-19,25	etwa -6,5	-6,9
$2 NO = O_2 + N_2$	43200	+1,6	—	etwa -30	—	-7,85
$Cl_2 + H_2 = 2 HCl$	44000	-1,3	-33,2	-33,38	-10,43	-10,93

Tabelle 19, welche den Darstellungen von Eucken [Lehrbuch der chemischen Physik, 1. Aufl., S. 289; 1930], entnommen ist, gibt eine Übersicht hierüber. Wenn $\sum \nu$ nicht gleich Null ist, werden die Resultate der Näherungsgleichung immer weniger verlässlich und man muß sowohl die Molwärmen als auch die chemischen Konstanten mit größerer

Genauigkeit in Rechnung setzen als dies in (72) geschehen ist. In der Tabelle 20 sind die für verschiedene Temperaturen gemessenen und theoretisch nach (72) berechneten Werte für das Gleichgewicht der Joddampfdissoziation gegenübergestellt; man sieht, daß die Übereinstimmung ganz vorzüglich ist.

Tabelle 20. K_p -Werte für die Joddampfdissoziation.

T absolut	$\log K_p$ beobachtet	$\log K_p$ nach (72) berechnet
1073	- 1,95	- 1,95
1173	- 1,33	- 1,28
1273	- 0,79	- 0,78
1373	- 0,31	- 0,31
1473	+ 0,09	+ 0,09

Die klassische Thermodynamik gestattet unter Hinzunahme des dritten Hauptsatzes grundsätzlich und in sehr vielen wichtigen Fällen auch praktisch die Gleichgewichte homogener Gasreaktionen aus rein thermischen Größen, aus der Wärmetönung, den Molwärmern und den chemischen Konstanten zu berechnen.

thermischen Größen, aus der Wärmetönung, den Molwärmern und den chemischen Konstanten zu berechnen.

F. Gleichgewichte in verdünnten Lösungen.

Aus der Analogie, die zwischen dem Zustand eines idealen Gases und dem eines Stoffes in verdünnter Lösung nach van't Hoff besteht, kann man den Schluß ziehen, daß das Massenwirkungsgesetz und die Reaktionsisochore auch in verdünnten Lösungen ihre Gültigkeit bewahren.

Nach der Phasenregel besitzt die gesättigte Lösung eines Stoffes, z. B. von Zucker in Wasser, bei Anwesenheit von festem Bodenkörper einen Freiheitsgrad. Bei Veränderung der Temperatur geht von der festen Phase mehr in Lösung und die Konzentration nimmt zu: Für jede Temperatur existiert eine bestimmte Sättigungskonzentration. Da es sich hierbei aber fast stets um konzentrierte Lösungen handelt, ist man nicht in der Lage, diese Sättigungsgleichgewichte in ähnlicher Weise zu berechnen, wie es für den Dampfdruck flüssiger oder fester Körper möglich war.

Hingegen ist die Frage nach dem Dampfdruck von Lösungen einer theoretischen Behandlung zugänglich, wenn man sich auf die Betrachtung verdünnter Lösungen beschränkt. In diesen kann man nach van't Hoff die Teilchen des gelösten Stoffes in ähnlicher Weise als voneinander unabhängig betrachten, wie die Moleküle eines idealen Gases. Das Lösungsmittel hebt den Zusammenhalt des hineingebrachten Festkörpers auf und dispergiert ihn molekular; auf die kinetische Energie der einzelnen gelösten Teilchen hat es aber keinen Einfluß; diese ist ebenso wie beim idealen Gas nur von der Temperatur abhängig. Denkt man sich in die Lösung eine Wand hineingebracht, durch welche die Moleküle des Lösungsmittels frei hindurch gehen können, während die Teilchen des gelösten Stoffes von ihr aufgehalten werden, so üben die letzteren wegen ihrer Wärmebewegung auf diese Wand ebenso einen Druck aus, wie die Moleküle eines eingeschlossenen Gases auf die Wand ihres Gefäßes. Nach van't Hoff ist dieser osmotische Druck einer Lösung ebenso wie der Gasdruck durch den Ausdruck

$$p = \frac{RT}{v} \quad (73a)$$

oder
gegeben, wenn

$$p = c \cdot R T \quad (73b)$$

$$c = \frac{1}{v}$$

die molare Konzentration (Zahl der Mole im l) bedeutet. Da c durch

$$c = \frac{G}{M \cdot V},$$

G = Zahl der Gramme der gelösten Substanz,

M = Molekulargewicht,

V = Gesamtvolumen der Lösung

ausgedrückt wird, hat man die Möglichkeit, durch Messung des osmotischen Druckes einer Lösung von bekannter Konzentration das Molekulargewicht der gelösten Substanz zu bestimmen. Diese Methode ist von der allergrößten Wichtigkeit für die präparative Chemie geworden, da man die meisten Substanzen in verdünnte Lösung bringen und deren osmotischen Druck experimentell bestimmen kann. Diese letztere Aufgabe allerdings löst man meist nicht direkt, sondern auf einem Umweg; man mißt nämlich nicht den osmotischen Druck selbst, sondern man bestimmt die Dampfdruckveränderung der Lösung gegenüber dem reinen Lösungsmittel.

Da die Auflösung eines Festkörpers — wenn sie sich überhaupt vollzieht — stets ein von selbst verlaufender irreversibler Vorgang ist, muß sie sich unter Abnahme der freien Energie des Systems abspielen; da nach den Gleichungen der S. 123 der Dampfdruck einer Flüssigkeit aber unmittelbar mit der freien Energie verknüpft ist, bedeutet dies, daß über einer verdünnten Lösung der Dampfdruck im allgemeinen kleiner sein muß als über dem reinen Lösungsmittel.

In Abb. 10 stellt a den Dampfdruck des reinen Lösungsmittels, b den der Lösung als Funktion der Temperatur dar. Der Siedepunkt ist derjenige Punkt der Dampfdruckkurve, an welchem der gesättigte Dampf gerade den Druck von einer Atmosphäre angenommen hat; er wird also in dem Diagramm durch den Schnittpunkt der beiden Kurven mit der 1-at-Linie bestimmt. Man sieht, daß die Lösung einen höheren Siedepunkt haben muß. Demgegenüber bewirkt die Dampfdruckerniedrigung eine Herabsetzung des Schmelzpunktes. In der Siedepunkterhöhung und in der Gefrierpunktserniedrigung liegen experimentell leicht zugängliche Größen zur Bestimmung des osmotischen Drucks vor. Sie werden häufig zu Molekulargewichtsbestimmungen benutzt.

Durch eine einfache thermodynamische Betrachtung findet man, daß bei kleinen Konzentrationen der osmotische Druck P direkt proportional der Siedepunkterhöhung gesetzt werden kann, und zwar gilt

$$P = \frac{41,3 \cdot \varrho \cdot q}{T_s} \cdot \Delta T \text{ at.} \quad (74)$$

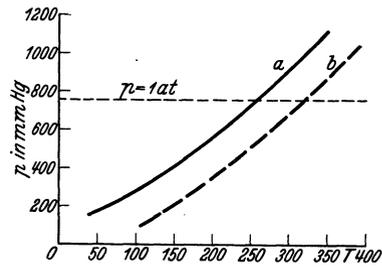


Abb. 10. Dampfdruckkurve der Lösung (gestrichelt); Dampfdruckkurve des reinen Lösungsmittels (ausgezogen).

Hierin bedeutet:

ρ die Dichte des reinen Lösungsmittels,

q die Verdampfungswärme für 1 g des reinen Lösungsmittels und

T_s die Siedetemperatur des reinen Lösungsmittels.

ΔT ist die experimentell gemessene Erhöhung des Siedepunktes in Celsiusgraden. Da nach (73b) der osmotische Druck der molekularen Konzentration proportional ist, folgt für die Bestimmung des Molekulargewichtes nach der Methode der Siedepunktserhöhung

$$\Delta T = \frac{1,986 \cdot T_s^2}{\rho \cdot q} \cdot c = K' \frac{G}{M V},$$

so daß das Molekulargewicht

$$M = \frac{G}{\Delta T \cdot V} \cdot K' \quad (75)$$

wird. Darin sind G die eingewogene Menge in g, V das Volumen des verwendeten Lösungsmittels und ΔT die gemessene Siedepunktserhöhung. K' ist eine für jedes Lösungsmittel aus dessen thermischen Eigenschaften gemäß der Beziehung (74) bestimmbare Konstante. Mit Hilfe von (75) kann man in verdünnten Lösungen eine Bestimmung des Molekulargewichtes durchführen. Eine analoge Gleichung gilt für die Berechnung des Molekulargewichtes aus der Erniedrigung des Gefrierpunktes.

Von großer praktischer Bedeutung ist die Anwendung des Massenwirkungsgesetzes auf verdünnte Lösungen binärer Elektrolyte. Nach den grundlegenden Vorstellungen von Arrhenius sind solche Körper in wäßriger Lösung in Ionen dissoziiert. Zwischen den freien Ionen einerseits und den assoziierten Molekülen andererseits besteht ein Gleichgewicht:

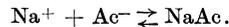


Tabelle 21. Löslichkeitsprodukte einiger wichtiger Elektrolyte.

Substanz	Temperatur in °C	$P = c_{\text{Anion}} \cdot c_{\text{Kation}}$
AgCl . . .	18	$1,1 \cdot 10^{-10}$
AgBr . . .	18	$4,1 \cdot 10^{-13}$
CaCO ₃ . . .	0	$1,2 \cdot 10^{-8}$
SrCO ₃ . . .	25	$1,6 \cdot 10^{-9}$
BaCO ₃ . . .	16	$1,9 \cdot 10^{-9}$
PbCO ₃ . . .	18	$3,3 \cdot 10^{-14}$
CaSO ₄ . . .	18	$6,1 \cdot 10^{-5}$
SrSO ₄ . . .	17	$2,8 \cdot 10^{-7}$
BaSO ₄ . . .	18	$9,4 \cdot 10^{-11}$
PbSO ₄ . . .	18	$6,1 \cdot 10^{-9}$
CaF ₂ . . .	18	$3,4 \cdot 10^{-11}$
FeS . . .	18	$1,5 \cdot 10^{-19}$
Hg ₂ Cl ₂ . . .	25	$3,5 \cdot 10^{-18}$
Ca-Oxalat .	18	$1,8 \cdot 10^{-9}$
Pb-Oxalat .	18	$2,7 \cdot 10^{-11}$

Wendet man hierauf das Massenwirkungsgesetz an, so ergibt sich für eine bestimmte Temperatur die Bedingung:

$$\frac{c_{\text{Na}^+} \cdot c_{\text{Ac}^-}}{c_{\text{NaAc}}} = K. \quad (76)$$

Aus (76) lassen sich alle für die analytische und präparative Chemie wichtigen Gesetze über die Ausfällung und Auflösung von Elektrolyten ableiten.

Die Gleichung besagt, daß die Menge des undissoziierten Bestandteils durch das Produkt der Ionenkonzentrationen gegeben ist. Wenn die Zahl der undissoziierten Molekülen einen be-

stimmten Wert erreicht hat, welcher der Sättigung der Lösung entspricht, wird die Löslichkeitsgrenze erreicht und es fällt festes Salz aus. Diesem Punkt entspricht ein ganz bestimmter Wert des Ionenproduktes im Zähler;

man nennt ihn das Löslichkeitsprodukt der an dem Gleichgewicht beteiligten Ionen. Es charakterisiert die Löslichkeit des betrachteten Salzes und kann dementsprechend für verschiedene Körper einen sehr verschiedenen Wert annehmen. Die Tabelle 21 enthält die Löslichkeitsprodukte einiger wichtiger Salze.

Beispiel [nach J. Eggert: Lehrbuch der physikalischen Chemie, 3. Aufl., S. 407. 1931]: Die Löslichkeitsprodukte von TlCl und TlCNS betragen

$$P_1 = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ für das Chlorid und}$$

$$P_2 = 2,2 \cdot 10^{-4} \text{ für das Rhodanid.}$$

Bringt man gesättigte Lösungen beider Salze zusammen, so fällen sie sich gegenseitig aus, da beide das Tl^+ -Ion gemeinsam haben. In der Lösung beider Elektrolyte sei jetzt C'_1 die Konzentration der Cl -Ionen und C'_2 die Konzentration der CNS -Ionen. Demgemäß ist $C'_1 + C'_2$ die gesamte aus beiden Salzen stammende Konzentration der Tl -Ionen. Das Massenwirkungsgesetz fordert die beiden Bedingungen:

$$C'_1 (C'_1 + C'_2) = P_1 \text{ und } C'_2 (C'_1 + C'_2) = P_2.$$

Aus ihnen berechnet sich

$$C'_1 = 1,18 \cdot 10^{-2}; C'_2 = 1,0 \cdot 10^{-2}.$$

Experimentell ergibt sich:

$$C'_1 = 1,19 \cdot 10^{-2}; C'_2 = 1,07 \cdot 10^{-2}.$$

Man entnimmt, daß das Massenwirkungsgesetz hier mit befriedigender Genauigkeit bestätigt ist.

G. Heterogene chemische Gleichgewichte.

Für die CO_2 -Abspaltung aus CaCO_3 gilt die Reaktionsgleichung:



Es liegen zwei voneinander unabhängige Komponenten, nämlich die Molekeln CaO und CO_2 vor, die in drei Phasen — zwei festen, einer gasförmigen — bestehen; nach der Phasenregel besitzt daher das System einen Freiheitsgrad, d. h. es hat einen mit der Temperatur veränderlichen Dissoziationsdruck. Für eine bestimmte Temperatur nimmt er einen ganz bestimmten Wert an, dessen Berechnung aus rein thermischen Daten (spezifische Wärmen der Teilnehmer, Dissoziationswärme) nach dem Nernstschen Wärmetheorem grundsätzlich möglich wäre.

Hält man die Temperatur konstant und steigert den Druck ein wenig über den Sättigungswert, dann drückt man das gasförmige CO_2 ganz in das vorhandene CaO hinein und die eine Phase, nämlich das Calciumoxyd verschwindet vollständig aus dem Gleichgewicht. Hält man andererseits bei konstanter Temperatur den CO_2 -Partialdruck unterhalb des Sättigungswertes, dann dissoziiert alles vorhandene CaCO_3 und es verschwindet die andere feste Phase (CaCO_3) gänzlich aus dem Gleichgewicht.

Zu dem gleichen Ergebnis kommt man, wenn man das Massenwirkungsgesetz auf die Gasphase dieses Systems anwendet. In dieser Phase sind

die drei Partialdrucke p_{CO_2} , p_{CaO} und p_{CaCO_3} zu berücksichtigen. Für die Gasphase gilt — genügend niedrigen Druck vorausgesetzt — das Massenwirkungsgesetz in der Form

$$\frac{p_{CO_2} \cdot p_{CaO}}{p_{CaCO_3}} = K_p. \quad (77)$$

Bei Abwesenheit der festen Bodenkörper wäre durch diese Gleichung bei einer gegebenen Temperatur die Ausbeute an $CaCO_3$ durch die Partialdrucke der beiden, diesen Stoff aufbauenden Komponenten CaO und CO_2 bestimmt; p_{CO_2} und p_{CaO} aber wären willkürlich wählbar. Die Anwesenheit der beiden festen Phasen CaO und $CaCO_3$ verändert die Verhältnisse insofern, als p_{CaO} und p_{CaCO_3} nicht mehr beliebige Werte annehmen können, sondern durch die Dampfdrucke von CaO und $CaCO_3$ bei der gerade ins Auge gefaßten Temperatur eindeutig bestimmt sind. Wenn aber diese beiden Größen in der Gleichung (77) ganz bestimmte Werte annehmen müssen, dann ist auch p_{CO_2} festgelegt, d. h. bei Anwesenheit zweier fester Phasen folgt aus dem Massenwirkungsgesetz ein bestimmter Dissoziationsdruck für das betrachtete heterogene Gleichgewicht, genau so, wie es die Phasenregel verlangt.

Andere wichtige Beispiele für das Vorhandensein bestimmter Zersetzungs- oder Dissoziationsdrucke sind in den folgenden Reaktionsgleichungen enthalten:

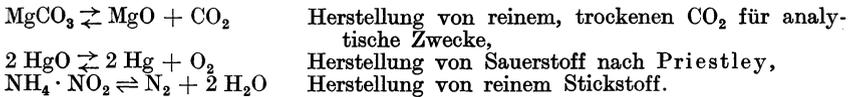
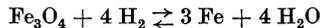


Tabelle 22 enthält die Sättigungsdrucke für einige wichtige Verbindungen bei verschiedenen Temperaturen.

Bei der Reduktion von Metalloxyden mit Wasserstoff:



liegen drei Komponenten in drei Phasen vor, so daß zwei Freiheitsgrade zur Verfügung stehen; für die Gasphase gilt das Massenwirkungsgesetz in der Form:

$$\frac{p_{Fe_3O_4} \cdot p_{H_2}^4}{p_{Fe}^3 \cdot p_{H_2O}^4} = K_p.$$

Durch die Anwesenheit der festen Bodenkörper sind p_{Fe} und $p_{Fe_3O_4}$ festgelegt; unbestimmt bleibt also nur mehr das Verhältnis

$$\frac{p_{H_2}}{p_{H_2O}}.$$

Auch diese Forderung des Massenwirkungsgesetzes konnte durch Preuner experimentell bestätigt werden.

Beim Vorliegen eines homogenen Mischkrystals, der aus den beiden festen Phasen besteht, hat man nur eine feste Phase in Rechnung zu setzen und es erhöht sich nach der Phasenregel die Zahl der vorhandenen Freiheitsgrade um Eins. Dasselbe ist auch aus der Anwendung des Massenwirkungsgesetzes auf die Gasphase sofort ersichtlich; denn der Mischkrystal fordert nicht mehr einen bestimmten festen CaO - bzw.

Tabelle 22. Sättigungsdrucke einiger wichtiger Verbindungen in mm Hg oder in Atmosphären.

Substanz	Temperatur in °C	p in mm Hg oder in at	Substanz	Temperatur in °C	p in mm Hg oder in at
Wasser	0	4,58 mm Hg	Schwefeldioxyd	— 61,71	38,2 mm Hg
„	20	17,54 „ „	„	— 35,89	206,3 „ „
„	50	92,51 „ „	„	— 10	762,5 „ „
„	80	355,1 „ „	„	0	1,5 at
„	120	1,96 at	„	20	3,30 „
„	150	4,7 „	„	100	27,82 „
„	200	15,3 „	Methan	— 182	92,6 mm Hg
„	300	84,8 „	„	— 150	1720 „ „
Chlor	— 153,9	0,0015 mm Hg	„	— 110	21,4 at
„	— 100	12,4 „ „	„	— 84	43,85 „
„	— 40	595,0 „ „	n-Hexan	— 50	1,61 mm Hg
„	— 20	1,84 at	„	— 20	14,10 „ „
„	0	3,66 „	„	0	45,45 „ „
„	20	6,62 „	„	50	400,9 „ „
„	90	34,50 „	„	100	2,41 at
Natrium	350	0,08 mm Hg	Äthylen	— 150	14,9 mm Hg
„	500	3,59 „ „	„	— 120	260,5 „ „
„	882	760,0 „ „	„	— 10	1,0 at
Phosphor	20	0,0253 „ „	„	0	40,2 „
„	100	3,66 „ „	„	10	50,1 „
„	200	110 „ „	Methanol	— 60,4	0,212 mm Hg
„	280	760 „ „	„	— 10	15,5 „ „
Zink	257	0,00012 „ „	„	0	29,6 „ „
„	490	1,07 „ „	„	50	406,0 „ „
„	720	81,42 „ „	„	80	1,76 at
„	905	760 „ „	„	130	8,2 „
Stickstoff	— 216	21,8 „ „	Äthylalkohol	— 40	0,406 mm Hg
„	— 201	329 „ „	„	— 10	5,2 „ „
„	— 192,5	1086 „ „	„	0	12,0 „ „
„	— 173,5	7,37 at	„	20	43,8 „ „
„	— 147,1	33,46 „	„	50	222,2 „ „
Quecksilber	0	0,000207 mm Hg	„	100	2,23 at
„	100	0,2793 „ „	„	200	16,84 „
„	200	17,22 „ „	Essigsäure	0	3,30 mm Hg
„	300	245,85 „ „	„	50	56,56 „ „
Blei	800	0,08 „ „	„	100	4,7 „ „
„	1275	73,0 „ „	„	200	7,67 at
„	1410	266 „ „	„	300	42,16 „
„	2100	11,7 at	Benzol	— 56	0,173 mm Hg
Kohlenoxyd	— 207	100 mm Hg	„	— 35,1	1,38 „ „
„	— 191	772 „ „	„	0	24,24 „ „
„	— 168	6,3 at	„	24,22	91,42 „ „
Kohlendioxyd	— 163	0,00282 mm Hg	„	80,15	760,0 „ „
„	— 103	76,7 „ „	Naphthalin	0	0,006 „ „
„	— 78,4	761,4 „ „	„	10	0,021 „ „
„	0,1	34,3 at	„	20	0,054 „ „
„	30,1	70,7 „ „	„	30	0,133 „ „
Ammoniak	— 70	0,1078 „ „	„	40	0,320 „ „
„	— 40	0,7083 „ „	„	100	18,5 „ „
„	— 10	2,870 „ „	„	200	496,54 „ „
„	0	4,238 „ „	„	300	4,75 at
„	30	11,512 „ „			
„	60	25,8 „ „			
„	70	32,687 „ „			

CaCO_3 -Partialdruck für den Gasraum, weil ja bei ihm diese beiden Partialdrucke vom Mischungsverhältnis abhängig sind, genau so, wie der Dampfdruck einer Lösung von der Konzentration des gelösten Stoffes abhängt (vgl. S. 143). Durch den Dampfdruck des Mischkrystals ist nur das Verhältnis zwischen p_{CaO} und p_{CaCO_3} festgelegt, so daß dem System ein Freiheitsgrad mehr zur Verfügung gestellt wird.

Die Anwendung der Lehre über die heterogenen Gleichgewichte nimmt in der Technik der Metallverhüttung und der Aufarbeitung von Salzmischungen eine hervorragende Stellung ein; hier mögen die angeführten Beispiele genügen, bezüglich weiterer sei auf die speziellen Ausführungen über „Phasenlehre“ (S. 184 f.) und auf die schon eingangs erwähnten Lehrbücher verwiesen.

H. Gleichgewichte an Phasengrenzen; das Adsorptionsgleichgewicht.

Die Erfahrung zeigt, daß Körper von großer spezifischer Oberfläche die Fähigkeit haben, Gase oder Dämpfe in mehr oder weniger großen Anteilen an ihrer Oberfläche zu verdichten. Sie sind dadurch imstande, unter Umständen sehr große Mengen einer gasförmigen Substanz festzuhalten, ohne sie chemisch irgendwie zu verändern. Meist hat man es in der Hand, durch Erwärmen den adsorbierten Stoff unverändert und quantitativ wieder zu gewinnen. In der Technik der Gasreinigung, Gastrennung und der Wiedergewinnung von Lösungsmitteln spielen Adsorptionsvorgänge eine überaus wichtige Rolle (s. hierzu Bd. III, S. 534.).

Nimmt man bei der Betrachtung der Adsorptionsvorgänge an, daß zwei Molekülarten vorliegen, die miteinander im Gleichgewicht stehen und in einer gasförmigen Phase vorhanden sind — „normale“ Molekeln von der Konzentration c_{gas} und „adsorbierte“ Molekeln von der Konzentration c_{ads} —, so kommt die Wirkung des Adsorbens formal darin zum Ausdruck, daß es eine zweite zum Aufbau des Systems notwendige Komponente — die adsorbierten Moleküle — erzeugt, ohne eine neue, die Freiheitsgrade herabsetzende Phase zu liefern.

Diese Betrachtungsweise ist berechtigt, da zahlreiche, eingehende Arbeiten gezeigt haben, daß sich adsorbierte Gase tatsächlich in einem Zustand befinden, der dem gasförmigen durchaus entspricht und von ihm nur durch eine außerordentlich hohe Dichte unterschieden ist. Dies gilt allerdings nur solange, als die Konzentration im Adsorptionsraum nicht zu groß ist, d. h. nur im Gebiet der „verdünnten Adsorption“. Im Gebiet der Sättigung machen sich ebenso wie bei der Zustandsgleichung komprimierter Gase die zwischenmolekularen Kräfte in sehr unübersichtlicher Weise geltend und verhindern das Entwerfen einfacher und anschaulicher Bilder.

Im Gebiet der verdünnten Adsorption aber kann man das Massenwirkungsgesetz anwenden in der Form

$$\frac{c_{\text{gas}}}{c_{\text{ads}}} = K. \quad (78)$$

Für eine bestimmte Temperatur ist die durch (78) charakterisierte adsorbierte Menge proportional dem äußeren Gasdruck. So wie man das Massenwirkungsgesetz ganz allgemein die Reaktionsisotherme genannt hat, bezeichnet man (78) als Adsorptionsisotherme. Die experimentelle Erfahrung zeigt, daß in der Tat sehr häufig die Forderung des proportionalen Anstiegens der adsorbierten Menge mit der Außenkonzentration im Gebiet der verdünnten Adsorption gut erfüllt ist. Bei hohen Konzentrationen allerdings neigt sich die Isotherme immer mehr gegen die Abszissenachse und bringt den immer mehr sich einstellenden Zustand der Sättigung zum Ausdruck (Abb. 11).

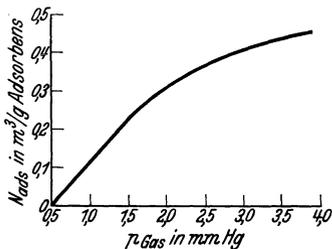


Abb. 11.
Schematische Darstellung einer Adsorptionsisotherme.

J. Die kinetisch-statistische Betrachtung von Gleichgewichten.

Um das Massenwirkungsgesetz für eine homogene Gasreaktion kinetisch abzuleiten, soll der einfachste Fall einer „bimolekularen Assoziation“ betrachtet werden:



wie er z. B. im Falle der Joddampfdissoziation vorliegt. Nimmt man an, daß zwei Atome A und B nur dann miteinander unter Bildung von AB reagieren können, wenn sie zusammenstoßen, so ist die Geschwindigkeit k_1 der Reaktion, welche das in der Gleichung (79) ausgedrückte Gleichgewicht von links nach rechts verschiebt, proportional der Zahl der Zusammenstöße zwischen A und B und daher in verdünnten Systemen proportional dem Produkt der Konzentrationen dieser beiden Atomarten:

$$k_1 = a \cdot c_A \cdot c_B. \quad (80)$$

Die Gegenreaktion, welche das Gleichgewicht von rechts nach links verschiebt, ist offenbar der spontane Zerfall der gebildeten Moleküle AB . Er ist jedenfalls der Konzentration der vorhandenen Moleküle proportional:

$$k_2 = b \cdot c_{AB}. \quad (81)$$

Gleichgewicht wird herrschen, wenn die Geschwindigkeit der Reaktion von links nach rechts, die wir durch k_1 messen, gleich der Geschwindigkeit ist, mit der die Reaktion von rechts nach links verläuft und die durch k_2 gegeben ist. Es folgt als Gleichgewichtsbedingung

$$k_1 = k_2$$

oder

$$\frac{c_A \cdot c_B}{c_{AB}} = \frac{b}{a} = K. \quad (82)$$

Man wird auch auf kinetischem Wege bei Betrachtung einer Reaktion vom Typus (79) auf das Massenwirkungsgesetz geführt.

Um auch noch die zweite, in der kinetischen Betrachtungsweise enthaltene Möglichkeit — die Zurückführung der Gleichgewichtskonstante K auf molekulare Größen — auszuschöpfen, muß man die Proportionalitätsfaktoren a und b aus den Vorstellungen über den Mechanismus der Reaktion mit Atom- und Molekülkonstanten in Verbindung bringen. a ist nach den Erörterungen, die zu (80) führen, nichts anderes als der Proportionalitätsfaktor des Stoßzahlansatzes aus der kinetischen Gas-theorie und nach (11) auf S. 90 gegeben durch

$$a = 2 \sqrt{2} \cdot \pi \cdot r^2 \sqrt{\frac{k T}{m}},$$

wenn m die Molekelmasse und r den Molekülradius bedeutet. b ist die Zerfallswahrscheinlichkeit der gebildeten Moleküle. Um sie zu berechnen, nimmt man mit Arrhenius und Trautz an, daß sich die Wahrscheinlichkeit für den spontanen Zerfall eines bereits gebildeten Moleküles nach dem Boltzmannschen Prinzip bestimmen läßt

$$b = \nu \cdot e^{-\frac{\varepsilon_0}{k T}},$$

wobei ν eine Konstante ist und ε_0 die Dissoziationsenergie darstellt, also diejenige Energie, die ein Molekül AB in sich aufgenommen haben muß, um zerfallen zu können. Durch diese kinetische Interpretation von a und b nimmt die Gleichgewichtskonstante des Massenwirkungsgesetzes die Form

$$K = \frac{\nu}{2 r^2 \sqrt{\frac{2 \pi k T}{m}}} e^{-\frac{\varepsilon_0}{k T}} \quad (83)$$

oder

$$\ln K = -\frac{\varepsilon_0}{k T} - \frac{1}{2} \ln T + \ln \frac{\nu}{2 r^2 \sqrt{\frac{2 \pi k}{m}}} \quad (83a)$$

an.

Die Temperaturabhängigkeit wird im wesentlichen durch den Exponentialfaktor bestimmt, was in Übereinstimmung steht mit den Ergebnissen, zu welchen die Integration der Reaktionsisochore geführt hat. Ein Vergleich der beiden Beziehungen (71) s. S. 140 und (83a) ermöglicht es, eine vollständige Korrespondenz der thermodynamischen und kinetischen Glieder in dem Ausdruck für die Reaktionskonstante K_p herzustellen.

Zur kinetischen Ableitung der Dampfdruckformel soll wiederum die Geschwindigkeit der beiden Reaktionen berechnet werden, die gemeinsam das Gleichgewicht herstellen. Die Zahl der pro s von 1 cm^2 Oberfläche verdampfenden Teilchen kann man mit

$$N_1 = \nu^3 \cdot \left(\frac{2 \pi m}{k T}\right)^2 e^{-\frac{\lambda_0}{k T}} \quad (84)$$

ansetzen, wobei λ_0 die Verdampfungswärme pro Atom oder Molekül bedeutet. ν hängt — wie man durch eine eingehende Betrachtung zeigen

kann — mit der Schwingungsfrequenz der Molekeln im Festkörper zusammen. Die Zahl der pro s sich auf 1 cm^2 der Oberfläche aus dem Gasraum niederschlagenden Molekeln ist wiederum durch den Stoßzahlansatz bestimmt und wird gegeben durch

$$N_2 = c_{gas} \sqrt{\frac{kT}{2\pi m}}. \quad (85)$$

Gleichsetzen von (84) und (85) liefert die das Dampfdruckgleichgewicht beherrschende Dampfdruckformel

$$c_{gas} = \frac{(2\pi\nu)^3}{\sqrt{\frac{2\pi kT^3}{m}}} e^{-\frac{\lambda_0}{kT}}.$$

Auch hier lassen sich wieder durch Vergleich mit der Beziehung (62) auf S. 134 die thermodynamischen Größen kinetisch interpretieren.

Ein ganz allgemein gültiger Satz der statistischen Mechanik besagt folgendes: wenn eine Molekelart sich auf zwei mögliche Zustände verteilen kann, ist das Gleichgewicht immer dann hergestellt, wenn sich die Molekülzahlen in den beiden Zuständen 1 und 2 so verhalten, wie die in ihnen zur Verfügung stehenden Volumina¹ v_1 und v_2 multipliziert mit $e^{-\frac{\varepsilon_1}{kT}}$ bzw. $e^{-\frac{\varepsilon_2}{kT}}$, wobei ε_1 und ε_2 die mittleren Energien sind, die einem einzelnen Molekül dem Zustand 1 bzw. dem Zustand 2 zukommen. Es ist

$$N_1 : N_2 = v_1 e^{-\frac{\varepsilon_1}{kT}} : v_2 e^{-\frac{\varepsilon_2}{kT}}.$$

Wendet man diesen Satz auf die verdünnte Adsorption an, so ergibt sich sofort

$$N_{gas} : N_{ads} = v_{gas} : v_{ads} \cdot e^{-\frac{\lambda}{kT}}. \quad (86)$$

Hierin bedeuten:

N_{gas} und N_{ads} die Molekülzahlen im gasförmig-freien und im adsorbierten Zustand,

v_{gas} das zur Verfügung stehende Gasvolumen,

v_{ads} das Adsorptionsvolumen und

λ die Adsorptionswärme je Molekül.

Da nun $\frac{N_{gas}}{v_{gas}}$ gleich der Konzentration im Gasraum c_{gas} gesetzt werden kann, erhält man:

$$N_{ads} = v_{ads} \cdot e^{-\frac{\lambda}{kT}} \cdot c_{gas},$$

was mit der auf S. 148 abgeleiteten Gleichung für die Adsorptionsisotherme im verdünnten Gebiet übereinstimmt. Wenn man sich bereits dem Gebiet der Sättigung nähert, dann ist offenbar der den adsorbierten Molekülen zur Verfügung stehende Raum nicht mehr durch das ganze Adsorptionsvolumen v_{ads} gegeben, sondern man muß den von den schon

¹ Im strengen Sinne muß es hier nicht Volumina, sondern Phasenvolumina heißen; das vorliegende Beispiel ist aber so gewählt, daß die obige anschauliche Formulierung zu Recht besteht.

adsorbierten Molekeln eingenommenen Platz abziehen. An Stelle von (86) resultiert dann nach Langmuir und Herzfeld

$$N_{gas} : N_{ads} = v_{gas} : (v_{ads} - N_{ads} \cdot \sigma) e^{-\frac{\lambda}{kT}},$$

worin σ den von einem adsorbierten Molekül beanspruchten Oberflächenanteil bedeutet.

Die Adsorptionsisotherme für das Gebiet der nicht mehr ganz verdünnten Adsorption lautet dann

$$N_{ads} = \frac{c_{gas} v_{ads} \cdot e^{-\frac{\lambda}{kT}}}{\sigma \cdot c_{gas} e^{-\frac{\lambda}{kT}} + 1}.$$

In der Tat ist diese Gleichung der analytische Ausdruck für eine Sättigungskurve, welche große Ähnlichkeit mit der in Abb. 11 auf S. 149 dargestellten experimentellen Adsorptionsisotherme besitzt.

IV. Chemische Kinetik.

Es kommt häufig vor, daß sich Systeme sehr lange Zeit in Zuständen befinden, die vom Gleichgewichtszustand sehr weit entfernt sind, ohne daß sich das Gleichgewicht einstellt, weil die Geschwindigkeit, mit welcher diese Einstellung erfolgt, außerordentlich klein ist. So kann man H_2 und O_2 bei gewöhnlicher Temperatur beliebig lange in einem geschlossenen Gefäß aufbewahren, ohne daß die Bildung von Wasser eintritt, obwohl das Gleichgewicht praktisch vollständig zugunsten des Reaktionsproduktes verschoben ist. Dies rührt daher, daß die Reaktionsgeschwindigkeit der Vereinigung bei normaler Temperatur zu klein ist, um die Einstellung des Gleichgewichts in erreichbaren Zeiten zu ermöglichen.

Nimmt man an, daß zwei Moleküle nur dann miteinander reagieren können, wenn sie zusammenstoßen, so begegnet man zunächst einem gewissen Widerspruch zwischen Erwartung und Experiment. Aus der Formel für die Stoßzahl folgt, daß die Zahl der Zusammenstöße, die ein einzelnes H_2 -Molekül mit O_2 -Molekülen ausführt, in der s schon bei normalem Druck und Zimmertemperatur ganz außerordentlich groß ist (sie beträgt etwa 10^{19}), so daß die Reaktion explosionsartig vor sich gehen müßte, wenn jeder Zusammenstoß auch zu einer Umsetzung führen würde. Da die Erfahrung mit aller Deutlichkeit zeigt, daß dies nicht der Fall ist, muß man schließen, daß bei weitem nicht jeder Zusammenstoß zwischen einem H_2 - und O_2 -Molekül zur Bildung von Wasser führt, daß vielmehr nur wenige, besonders ausgezeichnete Molekeln reaktionsberechtigt sind.

Arrhenius und Trautz haben daher die Vorstellung eingeführt, daß der Zusammenstoß zweier Molekeln zwar eine notwendige, nicht aber eine hinreichende Bedingung für das Eintreten der Reaktion sei. Um das letztere zu verwirklichen, ist es vielmehr noch nötig, daß die aufeinander treffenden Molekeln eine bestimmte minimale Energie —

die sog. Aktivierungsenergie — mit sich führen. Für die Reaktionsgeschwindigkeit kommen dann nicht alle Zusammenstöße in dem betrachteten Gasvolumen in Betracht, sondern nur diejenigen, bei welchen die Aktivierungswärme in den zusammenstoßenden Molekeln enthalten ist. Für das System:



erhalten wir für die Reaktion von links nach rechts (Hinreaktion) die Geschwindigkeit

$$k_1 = a \cdot c_A \cdot c_B,$$

wenn c_A und c_B die Konzentrationen der beiden Teilnehmer sind und a mit dem Stoßzahlansatz nach Gleichung (11) auf S. 90 zusammenhängt:

$$a = 2 \sqrt{2\pi} r^2 \sqrt{\frac{kT}{m}} \cdot e^{-\frac{\varepsilon_1}{kT}}. \quad (88)$$

Für den Zerfall resultiert die schon auf S. 149 angeschriebene Beziehung

$$k_2 = b \cdot c_{AB},$$

wobei b mit Atomkonstanten verknüpft ist durch

$$b = b_0 e^{-\frac{\varepsilon_2}{kT}}. \quad (89)$$

Der für die Gleichgewichtskonstante maßgebende Exponentialfaktor enthält zufolge der Reaktionsisochore die Wärmetönung der Reaktion als Zähler des Exponenten. Durch Vergleich mit den beiden Ausdrücken für k_1 und k_2 ergibt sich also, daß die Wärmetönung einer Reaktion gegeben ist durch die Differenz der Aktivierungswärmen für die Hin- bzw. die Rückreaktionen

$$\lambda = \varepsilon_2 - \varepsilon_1. \quad (90)$$

Diese Verhältnisse kann man sich auch recht anschaulich mit Hilfe der Abb. 12 klar machen. Als Ordinate sei der Energiegehalt des Systems $A + B$ aufgetragen, links der beiden getrennten Atome, rechts der des gebildeten Moleküls. Die Vertikaldifferenz zwischen den beiden horizontalen Linien, welche die soeben erwähnten Zustände kennzeichnen, mißt die gesamte Energieänderung im Verlauf der Reaktion, d. h. die Wärmetönung. Daß zur Erzwingung des tatsächlichen Ablaufes eine Aktivierungswärme nötig ist, kommt in Abb. 12 dadurch zum Ausdruck, daß sich zwischen dem Ausgangs- und Endzustand ein Energieberg befindet, der von denjenigen Molekeln, welche von 1 nach 2 oder von 2 nach 1 gelangen wollen, überwunden werden muß. Er ist in der Abb. 12 als punktierte Linie eingezeichnet. Die Vertikalabstände von 1 bzw. von 2 bis zum Gipfel dieses Berges sind die Aktivierungswärmen für die Hin- bzw. Rückreaktion. Aus der Abb. 12 ergibt sich unmittelbar der Inhalt der Gleichung (90).

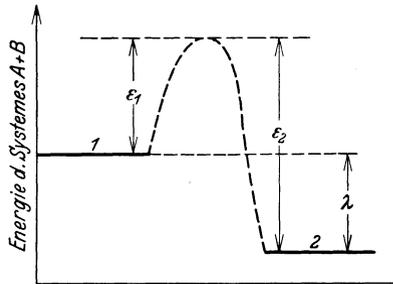


Abb. 12. Schematische Darstellung des Energieberges, der den Anfangs- und Endzustand voneinander trennt.

Nach diesen allgemeinen Sätzen über den Zusammenhang der Aktivierungswärmen mit der Wärmetönung, sei jetzt dazu übergegangen, ganz kurz die Kinetik der wichtigsten Reaktionstypen näher zu betrachten.

Die historische Entwicklung hat es mit sich gebracht, daß man die Reaktionen in schematischer Weise ordnete. Als Einteilungsprinzip verwendet man die sog. „Ordnung“ der Reaktion, das ist die Art der Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit von der Konzentration der beteiligten Moleküle. Wenn sich auch durch die genaueren Untersuchungen der letzten Jahre herausgestellt hat, daß diese Einteilung insofern nicht ganz scharf ist, als ein und dieselbe Reaktion bei verschiedenen Drucken verschiedene Ordnungen annehmen kann, so erhält man doch mit ihrer Hilfe einen ersten raschen Überblick über die entgegengesetzten Erscheinungen und es ist daher wohl zweckmäßig, auch hier die Darstellung nach dieser alten und bewährten Einteilung anzuordnen.

A. Die monomolekulare Reaktion.

Als einfachster Fall ist in diesem Sinne eine Reaktion anzusehen, bei welcher die Geschwindigkeit nur von der Konzentration einer einzigen Molekülart abhängt; die Zahl der pro s reagierenden Teilchen soll proportional sein der Zahl der gerade vorhandenen Teilchen dieser Sorte

$$-\frac{dN}{dt} = k_1(N_a - N) \quad (91)$$

N_a = Zahl der Teilchen zu Beginn des Versuches.

Auf den Elementarprozeß übertragen, bedeutet diese Aussage, daß jedes der betrachteten Teilchen den Keim des Zerfalls bereits irgendwie in sich trägt und innerhalb einer bestimmten Zeit — der sog. mittleren Lebensdauer — „von selbst“ zerfällt. Wäre nämlich ein bestimmter, den Zerfall erst hervorrufender äußerer Anlaß, z. B. ein Zusammenstoß mit der Wand oder mit einem anderen Molekül erforderlich, dann würde die Zerfallsgeschwindigkeit eben noch von der Konzentration des anderen Partners oder von der Größe der Wand abhängen und man hätte keine wahre monomolekulare homogene Reaktion vor sich. Ein besonders typisches Beispiel für eine streng monomolekulare Reaktion gibt uns der radioaktive Zerfall, dessen experimenteller Verlauf sehr genau der Gleichung (91) entspricht.

Durch Integration von (91) ergibt sich

$$\ln(N_a - N) = -k_1 t + \text{const.}$$

Da für $t = 0$ die Zahl der bereits zerfallenen Teilchen auch gleich Null sein muß, folgt für die Bestimmung der Konstanten die Beziehung

$$\ln N_a = \text{const.}$$

Bei ihrer Mitverwendung erhält man für die Gleichung des radioaktiven Zerfalls oder allgemein der rein monomolekularen Reaktion

$$N = N_a(1 - e^{-k_1 t}). \quad (92)$$

Sie besagt, daß von dem Anfangszustand

$$N = 0$$

beginnend, die Reaktion mit allmählich abnehmender Geschwindigkeit dem Endzustand

$$N = N_a$$

asymptotisch zustrebt. In Abb. 13 ist dieser zeitliche Verlauf durch eine graphische Darstellung anschaulich gemacht. Fragt man nach derjenigen Zeit, nach welcher gerade die Hälfte aller vorhandenen Moleküle zerfallen sind — nach der sog. Halbwertszeit der Reaktion — dann muß man in (92) $N = \frac{N_a}{2}$ setzen und erhält

$$e^{-k_1 t_{1/2}} = \frac{1}{2}$$

$$t_{1/2} = \frac{1}{k_1} \ln 2.$$

Zur Bestimmung der Reaktionskonstante k_1 erhält man durch einfaches Umformen von (92) die Beziehung

$$k_1 = k_{mon} = \frac{1}{t} \ln \frac{N_a}{N_a - N}. \quad (93)$$

Wenn man von einer bekannten Molekelzahl N_a (bekannter Druck oder Konzentration) ausgeht und zu mehreren Zeiten t die entsprechenden, noch vorhandenen Molekelzahlen $(N_a - N)$ analytisch bestimmt, kann man die Größe k_1 berechnen. Nur wenn sie eine „wahre Konstante“ ist, d. h. wenn sich die Zeiten und die abreagierten Mengen gerade richtig in Gleichung (93) hineinfügen, hat man die Berechtigung, den vorliegenden Prozeß als monomolekulare Reaktion zu bezeichnen.

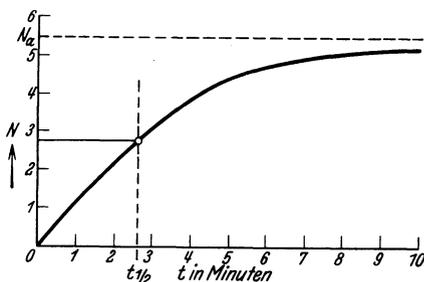
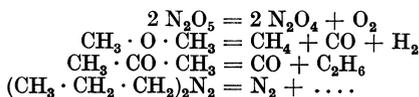


Abb. 13. Verlauf der Umsetzung bei einer monomolekularen Reaktion.

Es gibt nicht viele homogene Gasreaktionen, die sich mit Sicherheit in diese Klasse einordnen lassen. Erst in den letzten Jahren sind auf Grund sehr sorgfältiger Untersuchungen z. B. die folgenden Reaktionen als homogen und monomolekular erkannt worden:



Inversion von Rohrzucker bei Anwesenheit von H^+ -Ionen.

Wenn man noch etwas über die modellmäßige Bedeutung der Reaktionskonstante k_{mon} zu wissen wünscht, ist es zweckmäßig, auf die Gleichung (89) S. 153 zurückzugehen. b ist dort der Proportionalitätsfaktor, welcher aus der Gesamtheit aller vorhandenen Teilchen die zerfallsberechtigten aussondert; im Sinne des dort Gesagten wird man daher hier für k_1 anzusetzen haben:

$$k_1 = k_{mon} = k^* \cdot e^{-\frac{\epsilon_1}{kT}}, \quad (94)$$

wobei ε_1 wiederum die Aktivierungsenergie und k^* eine von der Konstitution des Moleküls abhängige Konstante bedeutet.

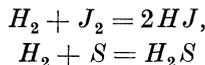
Den Elementarvorgang beim Ablauf einer monomolekularen Reaktion hat man sich im Sinne dieser Betrachtungsweise je nach dem gerade vorliegenden Prozeß verschiedenartig vorzustellen; zwei Beispiele mögen dies näher erläutern:

Der radioaktive Zerfall von Polonium: Jedes Atom trägt bereits die für den spontanen Zerfall notwendige Aktivierungsenergie in sich; es muß aber eine bestimmte Zeit verstreichen, ehe im Innern des Kerns die für den Zerfall notwendigen Umgruppierungen vollzogen sind. Ein weiterer Eingriff von außen ist nicht mehr nötig und nach Ablauf dieser Zeit, der „mittleren Lebensdauer“, zerfällt das Teilchen von selbst.

Der Zerfall des Azopropans. Bei normaler Temperatur besitzt kein — oder praktisch kein — Molekül die zum Zerfall notwendige Energie. Bei hoher Temperatur jedoch werden durch die Zusammenstöße energiereichere Molekeln gebildet. Da das Molekül ziemlich groß ist, kann es in seinen zahlreichen Freiheitsgraden ziemlich viel Energie aufspeichern, die ihm durch die unregelmäßigen Zusammenstöße mit den anderen Molekeln allmählich und in kleinen Portionen bald zugeführt, bald wieder entzogen wird. Hat ein Molekül in dieser Weise allmählich eine bestimmte Energie ε_1 in sich aufgenommen, so ist dies für den Zerfall eine zwar notwendige aber noch nicht hinreichende Bedingung. Denn nach Aufnahme von ε_1 muß im Innern des Moleküls durch Oszillationen oder Rotationen die Energie erst allmählich derjenigen Stelle zufließen, die für den Zerfall besonders empfindlich ist (d. i. die Bindung C—N). Es wird nach der Aufnahme der genügenden Energiemenge noch eine bestimmte Zeit — die „mittlere Lebensdauer“ des angeregten Moleküls — verstreichen, ehe es wirklich zerfällt. Der Zerfall selbst erfolgt spontan, d. h. ohne einen bestimmten meßbaren äußeren Anlaß: Man kann im Laufe der Zusammenstöße mit den anderen Molekeln nicht einen bestimmten Zusammenstoß herausgreifen, der schließlich den Ausschlag gegeben und das Molekül zum Zerfall gebracht hat.

B. Die bimolekulare Reaktion.

Wesentlich häufiger trifft man den Fall, daß die Geschwindigkeit einer Reaktion proportional dem Produkt der Konzentrationen zweier Teilnehmer zu setzen ist. Als einfachstes Beispiel hierfür kann die Hinreaktion der Gleichung (87) S. 153 gelten; als bimolekular haben sich erwiesen:



und andere Reaktionen.

Es gilt $k_2 = k_{bim} = a \cdot c_A \cdot c_B$.

Wenn man die Anfangsmengen der beiden an der Reaktion beteiligten Stoffe mit N_a und N_b , die des entstandenen Reaktionsproduktes mit N bezeichnet, so ergibt sich

$$+ \frac{dN}{dt} = k_2 (N_a - N) (N_b - N).$$

Wählt man $N_a = N_b$,
so erhält man als Differentialgleichung für die bimolekulare Reaktion den Ansatz

$$+ \frac{dN}{dt} = k_2 (N_a - N)^2. \quad (95)$$

Die Integration ergibt

$$- \frac{1}{(N_a - N)} = k_2 t + \text{const.}$$

Die Konstante wird wiederum aus der Bedingung bestimmt, daß für

$$t = 0 \\ N = 0$$

sein muß. Man erhält schließlich für das zeitliche Fortschreiten der Reaktion

$$N = N_a \left(1 - \frac{1}{1 + k_2 N_a \cdot t} \right) \quad (96)$$

oder für die Konstante einer bimolekularen Reaktion

$$k_2 = k_{bim} = \frac{1}{N_a t} \left(\frac{N_a}{N_a - N} - 1 \right). \quad (97)$$

Wenn die experimentell gemessene Menge N mit den entsprechenden Zeiten t und mit der Anfangsmenge N_a in eine Gleichung von der Form (97) hineinpaßt, ist man berechtigt, für die vorliegende Reaktion den bimolekularen Verlauf anzunehmen.

Zum Zwecke einer molekularkinetischen Untersuchung geht man am besten davon aus, daß in der Konstanten k_{bim} zunächst der Stoßzahlansatz enthalten ist, der die für die Reaktion notwendige Bedingung des Zusammenstoßes in die Gleichung (95) hineinbringt. Wiederum können die Moleküle nur in einem ganz bestimmten Energie- (oder Quanten-) Zustand miteinander reagieren, so daß man sowohl für den einen als auch für den anderen Partner eine Aktivierungsenergie anzusetzen hat. Dadurch erhält die Konstante die Form

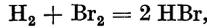
$$k_{bim} = 2 \sqrt{2\pi} r_1 r_2 \cdot \sqrt{\frac{kT(m_1 + m_2)}{m_1 m_2}} e^{-\frac{\varepsilon_1}{kT}} \cdot e^{-\frac{\varepsilon_2}{kT}} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2. \quad (98)$$

Hier beziehen sich die Größen mit dem Index 1 auf die eine, die mit dem Index 2 auf die andere reagierende Molekülart; die Faktoren σ_1 und σ_2 sind hinzugefügt, weil die Erfahrung gezeigt hat, daß man gelegentlich damit rechnen muß, daß bei dem Zusammenstoß nicht die ganze Oberfläche des Moleküls für die Reaktion zur Verfügung steht, sondern nur gewisse „empfindliche Bezirke“. Bei großen organischen Molekeln entspricht ein solches Lokalisieren der Reaktionsfähigkeit durchaus den qualitativen Anschauungen der organischen Chemie, die sich auch bezüglich der Reaktionsfähigkeit solcher Moleküle bestens bewährt haben. Die beiden Energiewerte ε_1 und ε_2 kann man zu einer gesamten für den Reaktionsvorgang notwendigen Aktivierungswärme

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$$

zusammenfassen, die sich dann direkt aus der Temperaturabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeitskonstante bestimmen läßt.

Die bisherige Erfahrung (Polanyi, Bonhoeffer) hat gezeigt, daß nur freie Atome (H, Cl, Na usw.) oder freie Radikale (CH_3 usw.) ohne Aktivierungswärme bimolekular reagieren. Beim Zusammenstoß solcher Teilchen erwies sich innerhalb der Fehlergrenze jeder Stoß als erfolgreich. Wenn aber die reagierenden Atome schon vor der Reaktion an einem Molekülverband beteiligt sind, wie z. B. bei der HBr-Bildung (Bodenstein)



so ist immer eine Aktivierungswärme erforderlich. Vor dem Übergang des Systems in den neuen Zustand ist offenbar eine Auflockerung der bestehenden Bindungen notwendig. Die Tabelle 23 enthält für einige

Tabelle 23. Übersicht über einige wichtige bimolekulare Reaktionen.

Umsetzung	ϵ in cal
$\text{H}_2 + \text{J}_2 = 2 \text{HJ}$. . .	40000
$2 \text{O}_3 = 3 \text{O}_2$. . .	27770
$2 \text{N}_2\text{O} = 2 \text{N}_2 + \text{O}_2$.	58500
$2 \text{Cl}_2\text{O} = 2 \text{Cl}_2 + \text{O}_2$.	21000
$\text{H}_2\text{S} = \text{H}_2 + \text{S}$. . .	52400
$\text{CH}_3 \cdot \text{CHO} = \text{CH}_4 + \text{CO}$.	45500

besonders gut untersuchte Reaktionen die Aktivierungswärmen ϵ in cal.

Ihre Berechnung aus der Reaktionsgeschwindigkeit erfolgt meist so, daß man die Reaktionsgeschwindigkeit bei verschiedenen, nicht zu nahe beisammen liegenden Temperaturen mißt und den $\ln k_2$ gegen $\frac{1}{T}$ aufträgt. Logarithmiert man nämlich die Gleichung (98), so erhält man

$$\log k_2 = -\frac{\epsilon}{kT} + \frac{1}{2} \log T + \log \text{const.} \quad (99)$$

Das zweite Glied ändert sich mit steigender Temperatur nur sehr langsam, so daß man es bei genügend großem Wert von ϵ ebenso wie $\log \text{const}$ als Konstante betrachten kann. Diese Vernachlässigung, die keinen allzu großen Fehler mit sich bringt, hat zur Folge, daß (99) in die Gleichung einer Geraden vom Typus

$$\log k_2 = -\frac{\epsilon}{k} \cdot x + b$$

$$x = \frac{1}{T}$$

übergeht. In einem logarithmischen Diagramm erhält man daher eine gerade Linie, deren Neigung unmittelbar die Aktivierungswärme liefert, während der Abschnitt auf der Ordinatenachse mit dem Wert des Stoßzahlansatzes und mit den eventuell zu berücksichtigenden empfindlichen Regionen zusammenhängt.

Bei einer bimolekularen Reaktion ist der Eintritt der gewünschten Umsetzung immer mit einem ganz bestimmten Zusammenstoß ursächlich verknüpft. Zwischen dem letzten Zusammenstoß und dem Moment der Elementarreaktion ist keine Latenzzeit eingeschaltet, die ihren Grund in Umgruppierungen oder Energieschwankungen innerhalb des betrachteten Gebildes haben könnte. Es ist daher verständlich, daß der bimolekulare Reaktionstyp gerade bei einfachen, aus wenigen Atomen aufgebauten Molekeln besonders bevorzugt ist. Hier kann unmittelbar während oder ganz kurz nach dem Zusammenstoß die zugeführte Energie

den Zerfall bewirken. Besonders gut untersuchte Beispiele für bimolekular verlaufende Reaktionen sind bereits in der Tabelle S. 158 aufgezählt worden.

Man erkennt nun, daß sich eine scharfe Grenze zwischen mono- und bimolekularen Reaktionen nicht ziehen läßt. In beiden Fällen erfolgt die Zulieferung der für die Reaktion notwendigen Energie durch die unregelmäßigen Zusammenstöße der Moleküle, die in ihrer Gesamtheit die Maxwell-Boltzmannsche Energieverteilung in dem betrachteten Gas aufrechterhalten. Es können zwei extreme Fälle eintreten:

a) Die Zeit zwischen zwei Zusammenstößen ist sehr klein gegenüber der Zeit der Energieumgruppierung im Innern des Moleküls. Das wird zur Folge haben, daß ein Molekül, welches bereits genug Energie in sich aufgenommen hat, um zerfallen zu können, doch noch sehr häufig von anderen Molekeln mehr oder weniger stark gestoßen wird, ehe es schließlich zerfällt. Einen solchen Vorgang wird man als monomolekular empfinden, weil sich nicht ein bestimmter den Zerfall unmittelbar bewirkender Zusammenstoß erkennen läßt.

b) Wenn aber die Zeit zwischen zwei Zusammenstößen vergleichbar oder gar größer ist als die der Umgruppierungen im Innern des Moleküls, wird nach jedem genügend energiereichen Zusammenstoß auch Zerfall eintreten und man wird den Eindruck einer bimolekularen Umsetzung gewinnen.

Eine Reaktion kann daher bei hohem Druck — häufige Zusammenstöße — monomolekular, bei tieferem bimolekular erscheinen, wenn die Aktivierungsenergie durch die Zusammenstöße nachgeliefert wird.

Die Erfahrung bestätigt diese Erwartung auf das beste. Es gibt verschiedene Reaktionen, die bei hohem Druck monomolekular verlaufen, bei niedrigem aber bimolekular werden. Die Tabelle 24 enthält einige Belege für diese Behauptung.

Tabelle 24. Druckabhängigkeit der „monomolekularen“ Reaktionskonstanten.

Reaktion	Aktivierungswärme in cal	Bemerkung
$2 \text{N}_2\text{O}_5 = 2 \text{N}_2\text{O}_4 + \text{O}_2$. . .	24 700	Bleibt auch noch bei 0,01 mm monomolekular.
Zerfall von Aceton	68 500	Ist auch bei den kleinsten Drucken noch monomolekular.
Zerfall von Propionaldehyd .	54 000	Wird unterhalb 80 mm bimolekular.
Zerfall von Dimethyläther .	58 500	Ebenso unterhalb 350 mm.
Zerfall von Diäthyläther . .	53 000	Ebenso unterhalb 150 mm.

Zu den wichtigsten bimolekularen Reaktionen zählt die Esterverseifung, deren bequem meßbarer Verlauf zu einer großen Reihe von Untersuchungen geführt hat (Wegscheider, Goldschmidt, Kailan). Die Tabelle 25 enthält einige Reaktionskonstanten, die sich auf diesen Reaktionstyp beziehen.

Tabelle 25. Einige Angaben über Veresterungs- und Verseifungsgeschwindigkeiten.

Reaktion	Konstante	Ordnung der Reaktion	Bemerkung	Beobachter
Verseifung von Äthylacetat	100*	} 2 (t = 20°)	In alkalischer Lösung	Olsson
Methylacetat	154,6			„
Äthylformiat	21 300			„
i-Amylacetat	0,732			„
Veresterung von Benzoesäure mit Äthylalkohol . . .	0,0400	} 1 (t = 25°)	In saurer Lösung	Kailan
„ Äthylenglykol . . .	0,0318			„
„ Glycerin	0,0087			„
Veresterung von Glycerin mit o-Nitrobenzoesäure	0,00181	} 1 (t = 25°)	In saurer Lösung	Kailan
„ m-Nitrobenzoesäure	0,0195			„
„ p-Nitrobenzoesäure	0,0243			„

C. Reaktionen anderer Ordnungen.

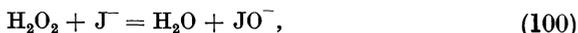
Sehr selten trifft man auf trimolekulare Reaktionen, bei denen sich die Geschwindigkeit als proportional dem Produkt dreier Konzentrationen erweist; ein von Lunge und Berl und von Bodenstein besonders sorgfältig untersuchter Fall ist die Reaktion



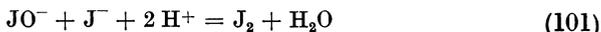
Daß der trimolekulare Verlauf nicht häufig vorkommt, kann verständlich erscheinen, da die Wahrscheinlichkeit für Dreierstöße erheblich geringer ist als die für den Zusammenstoß zweier voneinander unabhängiger Teilchen.

Häufig wird man beim Studium vom Reaktionsverlauf auf Verhältnisse geführt, die ein mehr oder weniger kompliziertes Ineinandergreifen mehrerer Reaktionen erkennen lassen. Solche gekoppelte Reaktionen tun sich meist dadurch kund, daß man überhaupt keine Reaktionskonstante mit ganzzahliger Ordnung ausrechnen kann. Man findet vielmehr häufig, daß man einen gebrochenen, zwischen Null und drei liegenden Exponenten wählen müßte, um aus der formalen Reaktionsgleichung eine „Konstante“ auszurechnen. Mit einem solchen formalen Befund wird man sich im allgemeinen nicht begnügen, sondern versuchen, durch Zerlegung der gesamten Reaktion in einzelne Teilprozesse der Kinetik des zusammengesetzten Vorganges näher zu kommen.

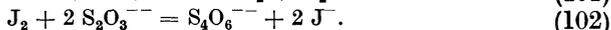
Als besonders interessante und gut untersuchte gekoppelte Reaktion sei hier die Jodionenkatalyse der Hydroperoxyd-Thiosulfatreaktion genannt. Ihre erste Stufe ist nach Abel



anschließend daran verläuft unmeßbar schnell die Stufe



und



Hierdurch ist die Konzentration der Jodionen wieder regeneriert. Geschwindigkeitsbestimmend ist (100).

D. Die Kinetik heterogener Reaktionen.

Die homogenen Gasreaktionen sind zwar für theoretische Betrachtungen besonders geeignet, weil sich die Verhältnisse bei ihnen relativ gut übersehen lassen; in der Praxis aber sind sie fast völlig in den Hintergrund gedrängt durch die heterogenen Reaktionen, d. h. durch chemische Prozesse, bei denen neben dem reagierenden Gas- oder Flüssigkeitsgemisch noch feste Körper mitspielen. Da heute beinahe jede technisch in größerem Maße durchgeführte Umsetzung mit Hilfe eines Katalysators erfolgt, ist die Anwesenheit eines die Heterogenität bewirkenden festen Stoffes in der Praxis fast immer gegeben. Für die Kinetik solcher Reaktionen sind verschiedene Teilprozesse maßgebend, deren jeder für sich eine bestimmte Geschwindigkeit besitzt und die in ihrer Gesamtheit den Ablauf der Umsetzung bestimmen.

a) Da der chemische Umsatz nur an der Oberfläche des Kontaktes, meist sogar nur an bestimmten ausgezeichneten oder aktiven Stellen abläuft, ist als erster geschwindigkeitsbestimmender Vorgang die Diffusion der Ausgangsprodukte an die aktiven Stellen in Betracht zu ziehen (s. S. 162).

b) Der zweite geschwindigkeitsbestimmende Prozeß einer heterogenen Reaktion ist die Umsetzung an den aktiven Stellen des Katalysators. Sie kann wieder von verschiedener Ordnung sein, je nachdem, ob Zusammenstöße zwischen mehreren Partnern notwendig sind oder nicht.

Über den gegenwärtigen Stand unserer Kenntnisse bezüglich dieses wichtigsten Teilvorganges wird in dem Abschnitt über Katalyse noch ausführlich zu berichten sein. Es möge daher an dieser Stelle genügen, darauf hinzuweisen, daß Katalysatoren im allgemeinen die Aktivierungsenergie einer gegebenen Reaktion herabzusetzen vermögen und dadurch die Zahl der erfolgreichen Zusammenstöße erhöhen (vgl. S. 166 f.).

Die reagierenden Molekel werden an der Oberfläche des Kontaktes in einen aktiven Zustand versetzt. Im Sinne der Abb. 14 bedeutet dies, daß die für den Elementarprozeß notwendige Aktivierungsenergie ε_1 nicht auf einmal aufgebracht werden muß, sondern daß bei der Überwindung des Berges eine Unterteilung der zu leistenden Arbeit möglich wird. Zwischen dem Tal 1 und dem Gipfel g befindet sich, wie die Abb. 14 andeutet, eine Mulde, die als Raststelle benutzt werden kann. Der Katalysator bringt zunächst das eine der reagierenden Moleküle durch den Adsorptionsvorgang, auf Grund dessen er es festhält, in diese Mulde (Aktivierungsenergie ε'_1). In diesem Zustand erfolgt an der Kontaktfläche der Zusammenstoß mit den anderen Reaktionsteilnehmern und durch ihn die endgültige Überwindung des Energieberges (Aktivierungsenergie ε'_1).

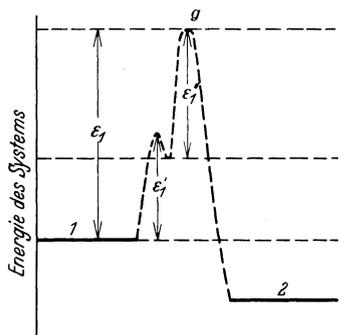


Abb. 14. Schematische Darstellung der Energieverhältnisse bei einer katalysierten Reaktion.

c) Schließlich hängt die Geschwindigkeit der gesamten Umsetzung noch davon ab, wie rasch das gebildete Reaktionsprodukt die aktiven Stellen des Katalysators verläßt, um den Reaktionsteilnehmern Platz zu machen. Hier handelt es sich um einen Desorptionsprozeß mit anschließender Wegdiffusion der Reaktionsprodukte, also an sich wiederum um einen zusammengesetzten Vorgang.

Entscheidend für die Geschwindigkeit der gesamten Umsetzung ist stets der langsamste Teilvorgang. Wenn z. B. Hin- und Abdiffusion der Reaktionsteilnehmer an die aktiven Stellen außerordentlich rasch erfolgt, die Umsetzung selbst jedoch erheblich langsamer verläuft, bestimmt die Aktivierungswärme der katalysierten Reaktionen und die Zahl der aktiven Stellen den Gesamtverlauf. Die aktiven Stellen sind in einem solchen Falle wegen der raschen Hindiffusion stets mit reaktionsbereiten Molekeln gesättigt, so daß die Konzentration der Reaktionsteilnehmer im Gasraum oder in der Lösung zeitlich keine Rolle mehr spielt. Maßgebend für die Umsetzung ist nur die Zahl der vorhandenen aktiven Zentren und die mittlere Lebensdauer der reagierenden Moleküle an ihnen. Diese hängt mit der Aktivierungswärme ε durch eine Beziehung von der Form

$$\tau \sim e^{-\frac{\varepsilon}{kT}}$$

zusammen (vgl. ausführlicher S. 166 f.).

Durch Übertragung der auf S. 161 angedeuteten Überlegungen hat man die Möglichkeit, in solchen Fällen durch die Messung der Reaktionsgeschwindigkeiten als Funktion der Temperatur, die Aktivierungswärme und die Zahl der aktiven Stellen gesondert zu bestimmen.

Wenn die eigentlich chemischen Prozesse an der Kontaktfläche außerordentlich rasch verlaufen — also durch eine kleine Aktivierungswärme ausgezeichnet sind —, der Hin- und Abtransport der Reaktionsteilnehmer aber nur sehr träge vor sich geht, sind die Diffusionsprozesse für die Geschwindigkeit des gesamten Vorganges entscheidend. Man erhält eine ganze andere Art der Temperaturabhängigkeit als man sie z. B. nach den Ausführungen der S. 157 erwarten würde.

Auf jeden Fall muß man bei der Betrachtung einer heterogenen Reaktion diese Verhältnisse im Auge behalten und erst nach sorgfältiger Trennung des gesamten Verlaufs in die maßgebenden Einzelprozesse kann man Aussagen über den Mechanismus einer solchen Umsetzung machen.

E. Diffusion und Wärmeleitung.

Bei der Besprechung der Existenz nicht umkehrbarer Vorgänge (S. 116) ist schon angedeutet worden, daß der Druckausgleich innerhalb eines Gasraumes oder der Wärmeübergang von warm zu kalt ein typisch irreversibler Prozeß ist. Das gleiche gilt für den Konzentrationsausgleich in einer Lösung. In all diesen Fällen ist das Gleichgewicht erst erreicht, wenn sich überall der gleiche Zustand eingestellt hat. Alle Rührwerke, Verteiler, Wärmeaustauscher und ähnliche in der Technik in größtem Umfang verwendete Apparaturen zielen darauf hin, Konzentrations-,

Druck- oder Wärmedifferenzen möglichst rasch und vollständig auszugleichen. Hier wird meist die in den Apparat hervorgebrachte Strömung oder Konvektion zur Unterstützung und Beschleunigung des reinen Konzentrationsausgleiches durch Diffusion herangezogen.

Zur Auffindung der für die Diffusion maßgebenden Gesetzmäßigkeit verfährt man folgendermaßen: Man denke sich eine Lösung so in ein Glasrohr gebracht, daß in dem Rohr ein Konzentrationsgefälle besteht und lege die x -Achse eines Koordinatensystems parallel der Rohrachse (Abb. 15). Gesucht wird die Konzentrationsänderung dc in dem neben x gelegenen Rohrabschnitt in der Zeit dt .

Solange das Konzentrationsgefälle längs des Rohres linear bleibt, ist keinerlei Änderung zu erwarten. Aus der Abb. 15 ist ersichtlich, daß in der Zeiteinheit von links ebensoviel Teilchen nach dx zuströmen als durch die rechte Begrenzungsfläche abfließen. Der Neigungswinkel der Konzentration bei I ist derselbe wie der bei I' . Man hat den Fall eines Wasserbehälters vor sich, in den man auf der einen Seite durch eine geneigte Rinne Wasser zuführt, dem man aber auf der anderen Seite durch eine Rinne von gleicher Neigung die gleiche Menge pro Zeiteinheit wieder entzieht. Die Konzentration in dem betrachteten Gefäß bleibt konstant. Ihre zeitliche Änderung ist Null:

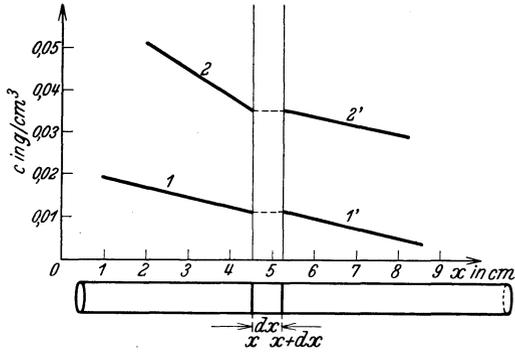


Abb. 15. Zur Ableitung der Diffusionsgleichung.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = 0.$$

Eine Änderung in diesem Verhalten kann erst eintreten, wenn das Konzentrationsgefälle im Rohr nicht linear ist. Wie man aus der Abb. 15 wiederum leicht entnehmen kann, strömt dann durch die linke Begrenzungsfläche aus 2 mehr zu als durch die rechte nach 2' abfließen kann, und es muß sich allmählich die Konzentration in dem Bereich dx erhöhen. Die zeitliche Konzentrationszunahme ist offenbar direkt proportional dem Unterschied im Gefälle links und rechts von dx , d. h. die zeitliche Änderung der Konzentration an der Stelle x ist der Änderung des Konzentrationsgefälles an dieser Stelle proportional

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}. \tag{103}$$

Den Proportionalitätsfaktor D der Differentialgleichung (103) bezeichnet man als den Diffusionskoeffizienten. Er ist ein Maß für die absolute Geschwindigkeit des betrachteten Druck- oder Konzentrationsausgleiches und gibt unmittelbar an, wie rasch sich die Konzentration

an einer bestimmten Stelle ändert, wenn man der diesen Ausgleich hervorrufenden „Krümmung“ der Konzentration¹ den Wert Eins erteilt.

Die Beziehung (103) verknüpft die zeitliche und örtliche Änderung der Konzentration miteinander und mit dem Diffusionskoeffizienten. Wenn man die Konzentration selbst als Funktion des Ortes und der Zeit zu kennen wünscht — was bei den meisten Diffusionsberechnungen als Ziel hinzustellen ist — ist man genötigt, die Integrale der Gleichung (103) aufzusuchen. Wenn sich alle Teilchen zur Zeit $t=0$ am Anfang unseres Rohres ($x=0$) befunden haben, dann ist die Wahrscheinlichkeit, nach der Zeit t ein Teilchen zwischen x und $x + dx$ anzutreffen, durch den Ausdruck

$$dW = \sqrt{\frac{\pi}{Dt}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4Dt}} dx \quad (104)$$

gegeben (lineare Diffusion). Diese Wahrscheinlichkeit nimmt mit zunehmendem Wert von x wegen des Exponentialfaktors sehr rasch ab, was einleuchtend ist, da bei gegebener Zeit die Wahrscheinlichkeit für die Zurücklegung einer großen Strecke kleiner sein muß, als die für das Überwinden einer kleinen. Bei der speziellen Berechnung von Diffusionsprozessen muß man stets die durch den Versuch gegebenen Anfangskonzentrationen, Form des Gefäßes usw. sorgfältig im Auge behalten, da die Form des Integrals der Diffusionsgleichung (103) von diesen Bedingungen sehr abhängig ist.

Mit Hilfe von (104) oder anderer entsprechender (zwei- oder dreidimensionaler) Beziehungen kann man experimentell den Diffusionskoeffizienten für zahlreiche Vorgänge bestimmen. Man braucht nur an verschiedenen Stellen x zu verschiedenen Zeiten t die Konzentrationen in dem betrachteten Gefäß zu messen² und berechnet dann mit Hilfe von (104) die Unbekannte D . Wenn sich dabei herausstellt, daß für ganz verschiedene x - und t -Werte die gemessenen Konzentrationen zu dem gleichen Wert von D führen, kann man daraus die Berechtigung ableiten, den vorliegenden Prozeß als einen reinen Diffusionsvorgang anzusprechen.

Tabelle 26. Einige wichtigere Diffusionskoeffizienten.

System	Druck in mm Hg	Temperatur in °C	Diffusionskoeffizient in cm/s	System	Temperatur in °C	Diffusionskoeffizient in cm/Tag
Äther in Luft .	760	19,9	0,0893	Pb in Hg . . .	15,6	1,37
Benzol in Luft .	760	19,9	0,0877	Cd in Hg . . .	15,0	1,56
CS ₂ in Luft . .	760	19,9	0,1015	Au in Pb . . .	500	3,19
CO ₂ in Luft . .	760	0	0,142	Rohrzucker in		
H ₂ in Luft . . .	755	12,5	0,739	H ₂ O	18,5	0,31
H ₂ O in Luft . .	760	92,4	0,345	NaCl in H ₂ O . .	15,0	0,94
He in A	754,8	15	0,706	LiCl in H ₂ O . .	18,0	1,000
Essigsäure in H ₂	760	0	0,404	KCl in H ₂ O . .	18,0	1,389

¹ Das ist der zweite Differentialquotient $\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$.

² Hierbei ist natürlich auf Temperaturkonstanz und Erschütterungsfreiheit der größte Wert zu legen.

Tabelle 26 gibt eine Übersicht über die Diffusionskoeffizienten verschiedener Vorgänge. Man sieht, daß sie sich in ihrer Größe je nach dem betrachteten Prozeß ganz erheblich voneinander unterscheiden können.

Kinetisch hat man sich das Zustandekommen der Diffusion so vorzustellen:

Die an der Stelle x des Rohres befindlichen Gasmoleküle (oder die Moleküle der gelösten Substanz) werden sowohl von links als auch von rechts Stöße erfahren. Wenn die Konzentration an den beiden Begrenzungen von dx die gleiche ist, was bei einem linearen Konzentrationsgefälle zutrifft, dann ist die Zahl der Stöße, die ein herausgegriffenes Molekül von rechts erfährt, gleich der, die es von links erleidet. Es wird daher im Mittel an seiner Stelle bleiben und das betrachtete Gebiet dx nicht verlassen. Die Konzentration oder der Druck in diesem Gebiet bleibt daher konstant. Wenn aber das Konzentrationsgefälle nicht linear ist, dann ist die Zahl der von der einen Seite pro s auf ein herausgegriffenes Molekül erfolgenden Stöße größer als die von der anderen Seite und das betrachtete Teilchen erhält eine Geschwindigkeit, deren Richtung parallel der Änderung des Geschwindigkeitsgefälles, also parallel der Größe

$$\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

liegt.

Kinetisch betrachtet wird die Diffusion daher hervorgerufen durch die unregelmäßigen Zusammenstöße der Moleküle eines Gases oder der Moleküle eines gelösten Stoffes und hängt daher ebenso wie die Stoßzahl mit der Größe der Teilchen und ihrer mittleren kinetischen Energie zusammen. Einstein hat gezeigt, daß man in dieser Weise den Diffusionskoeffizienten einer Lösung, die aus kugelförmigen Teilchen vom Radius r besteht, durch die Beziehung

$$D = \frac{kT}{6\pi\eta r} \quad (105)$$

kinetisch deuten kann. Hierin mißt η die innere Reibung des verwendeten Lösungsmittels.

Für andere Teilchenformen erhält man entsprechende Beziehungen, die sich von (105) durch einen anderen Zahlenfaktor unterscheiden. An Stelle des Radius r treten dann z. B. die Halbachsen eines Ellipsoides oder andere die Teilchenform kennzeichnende Parameter.

Wenn man sicher ist, kugelförmige Teilchen vor sich zu haben, läßt sich nach (105) ihr Radius aus Diffusionsmessungen bei Kenntnis der Zähigkeit des reinen Lösungsmittels bestimmen. Dies hat sich als eine wichtige Methode zur Teilchengrößenbestimmung erwiesen. Tabelle 27 zeigt, daß in der Tat bei der Anwendung dieser Beziehung

Tabelle 27. Radius des Äthylbenzoatmoleküls aus Diffusionsmessungen nach E. Dummer.

Lösungsmittel	Innere Reibung η	Molekülradius r in Å
Benzotrichlorid . .	0,0236	1,69
Nitrobenzol . . .	0,0218	1,8
Methylalkohol . .	0,00658	2,1
Äthylacetat . . .	0,00466	2,46
Aceton	0,00336	2,56

auf die Diffusion organischer Moleküle recht brauchbare Werte für r erhalten werden. Man sieht, daß sich z. B. der Radius für ein Molekül Äthylbenzoat in der Größenordnung von etwa 2 Å ergibt. Wenn man verschiedene Lösungsmittel verwendet, erhält man zwar nicht genau die gleichen Zahlen, die Größenordnung bleibt aber recht gut erhalten. Auch die von der Beziehung (105) geforderte Temperaturabhängigkeit

Tabelle 28. Temperatureinfluß auf die Bestimmung von r aus Diffusionsmessungen nach E. Cohen.

T (absolut)	Innere Reibung η	Molekül- radius r
273,1	0,026557	2,15
283,1	0,021471	2,15
288,1	0,019524	2,16
298,1	0,016374	2,17
308,1	0,013985	2,18
328,1	0,011326	2,21

des Diffusionskoeffizienten konnte von Cohen gut bestätigt werden. Er fand für die Diffusion von Tetrabromäthan in Tetrachloräthan die in Tabelle 28 aufgenommenen Werte. Man sieht, daß der nach (105) errechnete Molekülradius ziemlich konstant bleibt und wieder in der richtigen Größenordnung liegt.

Die gleichen Überlegungen, welche soeben für den Druckausgleich in einem Gas oder für den Konzentrationsausgleich in einer Lösung abgeleitet worden sind, gelten auch für die Wärmeleitung. Hier interessiert die Temperatur als

Funktion des Ortes und der Zeit. Man erhält auf Grund analoger Überlegungen die Differentialgleichung

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}.$$

λ bezeichnet man als Wärmeleitfähigkeit der untersuchten Substanz. Für die Temperaturverteilung erhält man auch wiederum Beziehungen von der Form (104). Bei gegebenen Anfangs- und Randbedingungen läßt sich daraus die raumzeitliche Verteilung der Temperatur berechnen.

Die Katalyse¹.

Von Prof. Dr. phil. H. Mark, Wien.

I. Das Wesen katalytischer Vorgänge.

Katalysierte Reaktionen sind bei zahlreichen chemischen Vorgängen, z. B. bei der alkoholischen Gärung, beim Seifensieden usw. seit langer Zeit unbewußt benutzt worden. Berzelius hat 1815 den Begriff Katalyse geschaffen und eine Reihe von damals bereits bekannten Vorgängen unter diesem Gesichtspunkt zusammengefaßt. Eine ausgezeichnete Darstellung der historischen Entwicklung der Katalyse geben A. Mittasch und R. Theiss in dem Werke: Von Davy (Döbereiner) bis Deacon (1932).

Nach Mittasch versteht man unter Katalyse „die Geschwindigkeitsänderung, sowie die Auslösung oder Lenkung von thermodynamisch

¹ Mitbearbeitet von E. Berl und K. Winnacker.

möglichen Prozessen, hervorgerufen durch die Anwesenheit von Stoffen, welche selbst chemisch nicht oder nur ganz unwesentlich verändert werden“. Eine Substanz, die eine derartige Wirkung ausübt, nennt man Katalysator.

Man spricht von homogener Katalyse, wenn der Katalysator im reagierenden System gelöst oder gasförmig in reagierenden Gasen zur Wirkung gelangt. Ein Beispiel einer homogenen Katalyse stellt die Esterverseifung unter dem Einfluß von H^+ oder OH^- -Ionen dar. Als heterogene Katalyse bezeichnet man Vorgänge, bei denen Reaktionsteilnehmer und Katalysatoren in mehreren Phasen vorliegen, z. B. die Oxydation des Schwefeldioxyds im Bleikammerprozeß (gasförmig-flüssig), oder die Oxydation des Schwefeldioxyds im Kontaktprozeß (gasförmig-fest). Katalysatoren, die in festem Zustand Reaktionen zwischen gasförmigen Stoffen katalysieren, werden als Kontakte bezeichnet. Mit Rücksicht auf ihre besondere Bedeutung für technische Prozesse soll an dieser Stelle im wesentlichen von heterogener Katalyse die Rede sein. Die homogene Katalyse spielt bei biologischen Vorgängen — Atmung, Gärung, Stoffwechselforgängen — eine ungemein große Rolle. Ihre Behandlung ginge aber über den Rahmen dieses Werkes hinaus.

Das eingehende Studium vieler katalytischer Prozesse hat die Auffassung gestärkt, daß neben den Vorgängen der Diffusion und Adsorption die chemische Affinität für Reaktionen am Katalysator maßgeblich ist. Zwischen bestimmten Teilen des Katalysators und den Reaktionsteilnehmern spielen sich vielfach Zwischenreaktionen ab. Die dabei entstehenden Zwischenprodukte können lockere Additionsverbindungen sein. Bei einzelnen katalytischen Reaktionen ist es gelungen, chemisch definierte Zwischenprodukte zu erfassen. So entsteht im Verlauf der Bleikammerreaktion als Zwischenprodukt die Nitrosylschwefelsäure, die ebenso wie die aus ihr sowie aus NO_2 , SO_2 und H_2O entstehende violette Säure, die an sich träge Reaktion zwischen SO_2 und Sauerstoff beschleunigt. Sollen solche Zwischengebilde die Reaktion beschleunigen, so müssen sie unter den Reaktionsbedingungen labil sein. Da geringe Katalysatormengen unverhältnismäßig große Mengen der Reaktionsteilnehmer katalytisch beeinflussen sollen, müssen die Zwischenreaktionen am Katalysator mit großer Geschwindigkeit verlaufen. Die Zwischenprodukte müssen sehr rasch entstehen und gleichzeitig unbeständig genug sein, um den Katalysator möglichst schnell für weitere Reaktionen freizugeben. So hat sich z. B. gezeigt, daß die Nitrosylschwefelsäure, wenn sie in 100%iger Schwefelsäure gelöst und infolgedessen sehr wenig hydrolysiert ist, die Schwefelsäurebildung wenig oder gar nicht beschleunigt. Wählt man als Lösungskonzentrationen für Nitrosylschwefelsäure solche, bei denen die Hydrolyse der Nitrosylschwefelsäure weiter fortgeschritten ist, z. B. 57—67%ige H_2SO_4 , so erreicht ihre katalytische Wirkung ein Maximum. Bei größeren Verdünnungen der Lösesäure, wobei Nitrosylschwefelsäure vollständig hydrolysiert ist, bleibt diese beschleunigende Wirkung wiederum aus [vgl. E. Berl u. H. H. Saenger: *Ztschr. anorgan. allg. Chem.* **202**, 113 (1931), sowie E. Berl, H. Hillebrand u. K. Winnacker: *Ztschr. anorgan. allg. Chem.* **214**, 369 (1933)].

Bei Gasreaktionen, die durch feste Katalysatoren beschleunigt werden, können im allgemeinen keine definierten Zwischenprodukte erfaßt werden. Die beschleunigende Wirkung des Kontaktes kann in den meisten Fällen mit Adsorption und Capillarkondensation allein nicht erklärt werden. Auch hier sind chemische Kräfte wirksam. Zum Beispiel besteht die Katalyse der Ammoniakbildung aus Stickstoff und Wasserstoff an Eisen wahrscheinlich darin [W. Frankenburg: Ztschr. Elektrochem. 39, 45, 97, 269 (1933)], daß an dem durch Beimischung von Al_2O_3 und Alkali aktivierten α -Eisen die Dissoziation des Stickstoffs und die Bildung unbeständiger Eisennitride stattfindet. Allgemein besteht die Wirkung des Katalysators in einer spezifischen Auflockerung bestimmter, für die Reaktion maßgebender Bindungen. Da die chemische Natur des Katalysators für den Charakter dieses aufgelockerten Zwischenproduktes bestimmend ist, wird es erklärlich, warum verschiedene Katalysatoren im gleichen System die Reaktion zu verschiedenen Endprodukten hinführen können (s. Reaktionslenkung S. 175).

Die Zahl der Reaktionen, die bei solchen Zwischenreaktionskatalysen durchlaufen wird, ist oft sehr groß, so daß das Studium der Elementar-

prozesse sehr erschwert ist. In den letzten Jahren ist durch die Arbeiten von Dohse, Frankenburg, Hinshelwood, Mark, Schwab, Taylor u. a. der Mechanismus der heterogenen Katalyse gasförmig-fest teilweise aufgeklärt worden.

Der Vorgang beginnt mit der Adsorption der gasförmigen Reaktionsteilnehmer an der Kontakt-oberfläche. Diese Adsorption ist zunächst durch schwache Kräfte bewirkt und steht mit den chemischen, reaktionsbeschleunigenden

Tabelle 1.
Spezifische Oberflächen einiger wichtiger Trägersubstanzen.

Substanz	Oberfläche in m^2/g
Silicagel	100—300
Bimsstein	1
Säureteerkohle nach Berl	900—1200
Medizinalkohle	500
Phosphorsäure-A-Kohle	400
Bauxit	10
Chlorzinkkohle	250
Erlenholzkohle	50

Vorgängen am Katalysator kaum in Zusammenhang. Die spezifisch katalytische Reaktion findet nur an wenigen aktiven Stellen statt. Da aber diesen spezifischen Reaktionen die Adsorption an der Gesamtoberfläche vorausgeht, ist deren Größe für die Wirkung des Kontaktes von Bedeutung. Kälberer und Schuster [Ztschr. physikal. Chem. A 141, 270 (1929)] haben durch Adsorption von Argon und anderen inerten Gasen die Oberflächen einiger technisch wichtiger Träger-substanzen untersucht. Tabelle 1 zeigt, daß diese Oberflächen zuweilen sehr groß sein können und nahe an die der molekularen Dispersion herankommen. Die primären Adsorptionsvorgänge sind mit geringer Wärmetönung verbunden (2—10 cal/Mol). Sie haben eine Verdichtung der Gase an der Kontakt-oberfläche zur Folge. Diese durch Adsorption verdichteten Gasschichten stellen das Reservoir dar, aus dem mit gesteigerter Geschwindigkeit die Moleküle an die aktiven Stellen gelangen.

Die an den aktiven Stellen stattfindenden Vorgänge sind für die verschiedenen Kontakte und die von ihnen katalysierten Reaktionen

sehr verschieden. Sicher ist, daß das physikalisch adsorbierte Molekül an der aktiven Stelle durch wesentlich stärkere Kraftwirkungen festgehalten wird. Hierbei erfährt es je nach der chemischen Natur des Katalysators eine Veränderung. Durch Veränderung der Atomabstände, durch Verstärkung der Atomschwingungen, oder auch durch vollkommene Aufgabe seiner Existenz infolge Bildung definierter Zwischenprodukte wird sein Energieinhalt erhöht. Aus dem physikalisch adsorbierten Molekül ist durch Reaktion mit den aktiven Stellen ein aktiviertes Molekül geworden.

Taylor [s. unter anderem Ztschr. Elektrochem. 35, 542 (1929)] und seinen Mitarbeitern ist es gelungen, die normale und aktivierte Adsorption getrennt voneinander zu messen und zu unterscheiden.

Tabelle 2 zeigt einige von Taylor gemessene Werte für normale und aktivierte Adsorption. Es wird ersichtlich, wie die Adsorptionsvorgänge, die zeitlich nacheinander verlaufen, sich auch in ihrer Wärmetönung unterscheiden. Die aktivierte Adsorption, die nur an aktiven Stellen stattfindet, liefert die 2—10fache Wärmetönung.

Tabelle 2. Einige normale und anormale Adsorptionswärmen in cal/Mol adsorbierte Substanz.

Adsorbens	Adsorptiv	Normale Adsorptionswärme	Anormale Adsorptionswärme
Kohle	Sauerstoff	4—5000	bis 60000
Ni	Äthylen	3—5000	„ 15000
Bauxit	Äthylalkohol	7500	„ 13000
„	Propylalkohol	12500	—
„	Isopropylalkohol	13000	„ 25000
„	Butylalkohol	15000	—

Die aktivierte Adsorption, die nur an aktiven Stellen stattfindet, liefert die 2—10fache Wärmetönung.

In der unmittelbaren Umgebung der aktiven Zentren findet die eigentliche Umsetzung der aktiviert adsorbierten Teilchen statt. Bei Zersetzungsreaktionen lassen sich die Verhältnisse am besten durch eine „mittlere Lebensdauer“ der aktiviert adsorbierten Molekeln beschreiben, nach Ablauf derer der Zerfall erfolgt. Die Geschwindigkeit einer solchen Reaktion hängt davon ab, ob die Nachlieferung nach den aktiven Zentren rascher vor sich geht, als der Zerfall dortselbst. Sie ist daher vom Druck, von der Temperatur, von zugemischtem Gasen und von sonstigen Umständen im weitesten Maße abhängig.

Noch komplizierter können sich die Verhältnisse gestalten, wenn man die Vereinigung zweier Molekeln studieren will. Hierbei kann es möglich sein, daß nur einer der beiden Teilnehmer aktiviert zu sein braucht und mit jedem anderen Molekül, das aus dem Gasraum oder aus dem Adsorptionsraum auf die aktive Stelle stößt, reagiert; es kann auch vorkommen, daß noch eine bestimmte zusätzliche Aktivität der zweiten Ausgangskomponente nötig ist, und es kann schließlich der Fall eintreten, daß auch rein geometrische und sterische Faktoren die Stoßausbeute beeinflussen. In dieser Hinsicht verhalten sich die einzelnen Reaktionen ganz verschieden und nur ein genaues Studium der Kinetik selbst kann es ermöglichen, in jedem speziellen Falle ein detailliertes Bild von den Vorgängen an den aktiven Stellen zu entwerfen.

Wichtig ist im Sinne des früher Gesagten, daß diese Vorgänge mit großer Geschwindigkeit verlaufen. Die an den aktiven Stellen

entstehenden aktivierten Zwischenprodukte müssen labil genug sein, um mit großer Geschwindigkeit in das endgültige Reaktionsprodukt übergehen zu können. Die weitere Reaktion ist dann nur noch davon abhängig, mit welcher Geschwindigkeit das Reaktionsprodukt die aktive Stelle für neue Umsetzungen freimacht. Dieser letzte Vorgang der Reaktionsfolge ist ein Desorptionsprozeß, im Verlauf dessen das Reaktionsprodukt von der aktiven Stelle auf die inaktive Oberfläche übergeht, von dieser verdampft und nach Maßgabe der im Reaktionsraum herrschenden Diffusionsgeschwindigkeit weggeführt wird.

Die beschriebene Reaktionsfolge ist in Abb. 1 schematisch dargestellt. Die Moleküle A und B , die zu Beginn das Energieniveau 1 einnehmen, werden durch unspezifische Adsorption an der inaktiven Gesamtoberfläche auf das Niveau 2 gehoben¹. Durch Aktivierung an aktiven Stellen

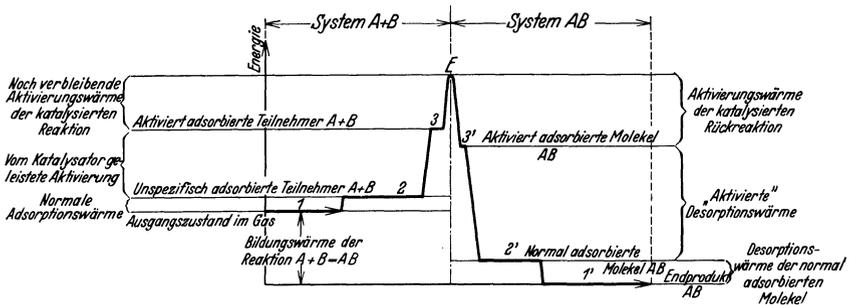


Abb. 1. Schema der Reaktionsfolge bei Anwendung eines Katalysators.

(Bildung von Zwischenprodukten) wird die Stufe 3 erreicht. Zur Überwindung des Energieberges E muß Energie durch Wärmezufuhr vom System aufgenommen werden. Das Reaktionsprodukt AB gibt die Aktivierungswärme wieder ab und geht durch die beschriebenen Desorptionsvorgänge über $3'$ und $2'$ in den stabilen Zustand $1'$ über. Die Energiedifferenz $1-1'$ stellt die eigentliche Wärmetönung der Reaktion dar. Aus der schematischen Darstellung ist ersichtlich, daß die Wirkung des Katalysators in einer Verringerung der Aktivierungswärme besteht. Bei Abwesenheit eines Katalysators muß zur Auslösung der Reaktion der Energieberg $1-E$ überwunden werden, während bei Anwendung des Kontaktes nur die Stufe $3-E$ durch gesteigerte Wärmebewegung der Moleküle bestritten werden muß. Eine Verschiebung des Gleichgewichts ist aber durch die Verwendung des Kontaktes nicht zu erreichen. Der Kontakt kann nur thermodynamisch mögliche Reaktionen auslösen. Das thermodynamische Gleichgewicht ist ja durch die Wärmetönung $1-1'$ gegeben, die durch die Reaktionsfolge am Kontakt unverändert bleibt. Die Wirkung des Katalysators besteht in einer Vergrößerung der Reaktionsgeschwindigkeit. Da aus thermodynamischen Gründen die Gleichgewichtskonstante gleich dem Verhältnis aus der Geschwindig-

¹ An Stelle der Niveaus 2 , 3 , $3'$ und $2'$ wären eigentlich kleine Mulden zu zeichnen, deren Tiefe die Stabilität der Zwischenverbindungen angibt.

keitskonstante der Hin- und Rückreaktion ist, folgt aus der Konstanz des Gleichgewichtes, daß ein jeder Kontakt Hin- und Rückreaktion in gleicher Weise beschleunigt. So beschleunigt z. B. der Platinkontakt sowohl die Oxydation des Schwefeldioxyds als auch den Zerfall des Schwefeltrioxyds.

II. Der Katalysator.

Versucht man auf Grund der gewonnenen Erkenntnisse über die Eignung eines Kontaktes für eine bestimmte Reaktion eine Voraussage zu machen, so muß man auch heute noch feststellen, daß man dabei in den meisten Fällen auf Experiment und Erfahrung angewiesen ist. Bei allen großtechnischen Prozessen sind die geeigneten Katalysatoren, die zum Teil vorzügliche Leistungsfähigkeit aufweisen, empirisch durch eine große Zahl von Versuchen gefunden worden. Erst dann, wenn der geeignete Kontakt gefunden war, ist es in manchen Fällen gelungen, den Mechanismus seiner katalytischen Wirksamkeit aufzuklären. Auf Grund des gesammelten experimentellen Materials ist man heute in der Lage, für bestimmte Gruppen von Reaktionen Stoffe anzugeben, die als Kontaktsubstanzen geeignet erscheinen. Bei dieser Auswahl leistet die Theorie der Zwischenreaktionskatalyse gute Dienste. Sie ermöglicht es, einen Kontakt auszuwählen, der auf Grund seiner Affinität zu den Reaktionsteilnehmern das richtige Maß an Stabilität und Labilität der Zwischenprodukte liefert.

Die Deutung des katalytischen Reaktionsverlaufes ist besonders schwierig, wenn es sich dabei um die Wirkung von Mischkatalysatoren handelt. Es hat sich herausgestellt, daß ein reaktionsträger Kontakt unter Umständen durch geringe Beimengungen von bestimmten Aktivatoren in seiner Wirksamkeit um ein Vielfaches gesteigert werden kann. Z. B. wird der Eisenkontakt der Ammoniakkatalyse erst durch Beimengung von Tonerde brauchbar, wobei Tonerde die Vereinigung von Stickstoff und Wasserstoff überhaupt nicht katalysiert. Durch die Entdeckung dieser Mischkatalysatoren ist die Erklärung des Mechanismus der Kontaktkatalyse noch schwieriger geworden.

Die Auswahl des geeigneten Kontaktes muß sich grundsätzlich auf zwei Fragen aufbauen:

1. Welche Substanz ist qualitativ geeignet, ein Maximum des Umsatzes zu erreichen?

2. In welche Form muß diese Substanz gebracht werden, damit sie bei gleichen chemischen Eigenschaften das Maximum der Wirksamkeit erreicht und diese Wirksamkeit während möglichst langer Reaktionsdauer beibehält?

In der Tabelle 3 sind eine Zahl technisch wichtiger Reaktionen und die bei ihnen zur Anwendung kommenden Kontakte zusammengestellt.

Übersieht man darüber hinaus das umfangreiche Schrifttum, so kann man bestimmte Gruppeneigenschaften der Kontakte feststellen, die für eine gewollte Reaktion erforderlich sind. Z. B. sind für Oxydations-

Tabelle 3. Übersicht über die Verwendung von Katalysatoren¹.

Reaktionsart	Katalysatoren
1. Oxydationsreaktionen.	
Verwendet werden hauptsächlich diejenigen Metalle und ihre Oxyde, die in mehreren Oxydationsstufen vorkommen, wie Cr, V, Fe, Cu, Mo, W, U.	
a) Oxydation mit freiem Sauerstoff.	
$2 \text{H}_2 + \text{O}_2 = 2 \text{H}_2\text{O}$ $\text{SO}_2 + 1/2 \text{O}_2 = \text{SO}_3$ in der Gasphase	Pt, Pd, Os, Ir, Ag, Rh, Au Pt rein oder auf Trägern (Asbest, Bimsstein, Silicagel, festen Salzen, wie MgSO_4), CuO, Fe_2O_3 (Kiesabbrand), Cr_2O_3 , V_2O_5 , AgVO_3 und Mischungen derselben
$2 \text{HCl} + 1/2 \text{O}_2 = \text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O}$ $\text{H}_2\text{S} + \text{O}_2 = 2 \text{S} + \text{H}_2\text{O}$ $\text{CO} + 1/2 \text{O}_2 = \text{CO}_2$ $2 \text{CH}_4 + \text{O}_2 = 2 \text{CO} + 2 \text{H}_2$ $4 \text{NH}_3 + 5 \text{O}_2 = 4 \text{NO} + 6 \text{H}_2\text{O}$	CuCl ₂ (CuCl ₂ + NaCl) Aktive Kohle, Fe(OH) ₃ CuO, MnO ₂ (Hopcalit) Fe, Co, Ni, Pt, Ag, Cu und ihre Oxyde Pt, Fe_2O_3 + Bi ₂ O ₃ , ThO ₂ (seltene Erden), MnO ₂ , Fe, Co, Ni und ihre Oxyde organische Metallverbindungen (z. B. Stearate des Mn, Zn, Na, K, Al, Mg) V_2O_5 , Phosphate und Borate
Paraffin → Fettsäuren in der flüssigen Phase in der Gasphase Naphthalin → Phthalsäure in der flüssigen Phase in der Gasphase Anthracen → Anthrachinon $\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow \text{CH}_2\text{O}$ $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} \rightarrow \text{CH}_3 \cdot \text{CHO}$ Aldehyde → Säuren	Hg in starker Schwefelsäure V_2O_5 V_2O_5 , MoO ₃ { Cu, Ag, V_2O_5 , UO ₂ , MoO ₃ Mn, Cu und ihre Oxyde, Mn- und Fe-Verbindungen, Ni-Acetat Ag Cu, Bimsstein, Asbest
b) Oxydation mit gebundenem Sauerstoff.	
$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + \text{H}_2$ $\text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + 4 \text{H}_2$ $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3 \text{H}_2$ $4 \text{P} + 10 \text{H}_2\text{O} = 2 \text{P}_2\text{O}_5 + 10 \text{H}_2$	Oxyde von Fe, Co, Zn, Ni und Mischungen derselben Oxyde von Ni, Co und CaO Oxyde von Fe, Cr, V, Mg, Ce Fe_2O_3 (Bauxit), Cu, aktive Kohle
2. Hydrierungsreaktionen.	
$\text{N}_2 + 3 \text{H}_2 = 2 \text{NH}_3$ Hydrierung der C=C-Bindung, z. B. Fetthärtung	Fe + verschiedene Zusätze, z. B. Al ₂ O ₃ + Alkali Ni, Co, Fe, Cu, Pd, Pt, Mo (unempfindlich gegen Gifte sind dessen Oxyde und Sulfide)
Benzol → Cyclohexan Naphthalin → Tetralin Naphthalin → Dekalin Anthracen → Oktracen Phenanthren → Oktanthren Phenol → Cyclohexanol	Ni Ni, Cu Ni, Fe, Pd, Pt { Ni Ni, Cu

¹ Siehe hierzu unter anderen Sabatier: Die Katalyse. Leipzig 1927. — Frankenburger: Die Katalyse in Ullmann, Bd. 6, S. 436. 1930. — Hilditch: Die Katalyse in der angewandten Chemie. Leipzig 1932.

Tabelle 3 (Fortsetzung).

Reaktionsart	Katalysatoren
Phenole \rightarrow aromatische Kohlenwasserstoffe $\text{CO} + 2 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$ $\text{CO} + \text{H}_2 \rightarrow$ höhere Alkohole	Sulfide des Mo, W und Co, MoO_3 ZnO , Cr_2O_3 , CuO Oxyde des Fe, Mn, Zn, Cr, Ce, Mo, Ti, Cu, Carbide der Eisenmetalle Ni, Fe, Co, Ce, Th, Mn Cr_2O_3 , Ag, Au, Pd, Ni, Cu, Fe
$\text{CO} + \text{H}_2 \rightarrow$ Kohlenwasserstoffe Nitrobenzol + $\text{H}_2 \rightarrow$ Anilin Dehydrierung wird durch die gleichen Katalysatoren meistens durch Variation der Temperatur ausgelöst.	

3. Wasserabspaltung.

Essigsäure \rightarrow Essigsäureanhydrid $2 \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5\text{OC}_2\text{H}_5 + \text{H}_2\text{O}$ Alkohol \rightarrow Äthylen	Phosphate der Elemente der 2. und 3. Gruppe, CuO , WO_3 , V_2O_5 H_2SO_4 , aromatische Sulfosäuren Al_2O_3 , ThO_2 , Tonscherben, Schwefelsäure
$\text{HCONH}_2 \rightarrow \text{HCN} + \text{H}_2\text{O}$ $\text{CO} + \text{NH}_3 \rightarrow \text{HCN} + \text{H}_2\text{O}$	Fe, Mn, Ni, Al, Cu Ce, Ti, Al, Th, Zr und Oxyde und Gemische derselben, alkalisierte Kohle, $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O}$

4. Krackreaktionen

(auch mit gleichzeitiger Hydrierung).

AlCl_3 , BF_3 , Schmelzen von Sn, Bi, Fe_2O_3 , aktive Kohle, Mo, V, W (auch ihre Oxyde und Sulfide)
--

5. Übertragung von Halogenen.

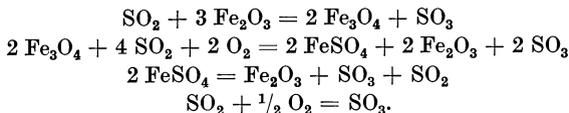
$\text{SO}_2 + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{SO}_2\text{Cl}_2$ $\text{CO} + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{COCl}_2$ $\text{C}_2\text{H}_2 + 2 \text{Cl}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_4$ $\text{C}_2\text{H}_4 + \text{HCl} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$ $\text{C}_6\text{H}_6 + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{C}_6\text{H}_5\text{Cl} + \text{HCl}$ Allgemein für Chlorierung ,, ,, Bromierung ,, ,, Jodierung	Aktive Kohle, Graphit Aktive Kohle SbCl_5 , Fe + Schwefelchlorür, FeCl_3 , Fe_2O_3 BiCl_3 + Asbest Fe + FeCl_3 , AlCl_3 J_2 , S, aktive Kohle, AlCl_3 , FeCl_3 Wasserfreie Bromide, Chloride AlJ_3 , P, FeJ_3
---	--

6. Einige Aufbaureaktionen.

$\text{C}_2\text{H}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow$ Acetaldehyd in der flüssigen Phase in der Gasphase $2 \text{C}_2\text{H}_2 + 3 \text{H}_2\text{O} \rightarrow$ Aceton + $\text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$ Benzol + $\text{CO} \rightarrow$ Benzaldehyd Phthalsäureanhydrid + Benzol \rightarrow Anthrachinon Phthalsäure \rightarrow Benzoesäure + CO_2 Äthylen + $\text{H}_2\text{O} \rightarrow$ Äthylalkohol Höhere Olefine + $\text{H}_2\text{O} \rightarrow$ höhere Alkohole	Hg_2SO_4 in H_2SO_4 MoO_3 , $\text{ZnO} + \text{Cr}_2\text{O}_3$ Fe_2O_3 , ThO_2 , ZnO , Raseneisenerz AlCl_3 , Cu_2Cl_2 AlCl_3 $\text{CdO} + \text{Al}_2\text{O}_3$ (H_2O -Dampf) } H_2SO_4 , Al_2O_3
---	--

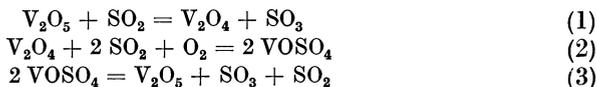
reaktionen vorzugsweise solche Stoffe als Kontakte geeignet, die mehrere Wertigkeitsstufen aufweisen, wie: Fe, Cu, Cr, V, W, Ce, Th u. a. Ihre Teilnahme am Reaktionsvorgang besteht offensichtlich darin, daß sie zwischen zwei möglichen Oxydationsstufen pendeln und dabei den

Sauerstoff auf den eigentlichen Reaktionsteilnehmer übertragen. B. Neumann [Ztschr. Elektrochem. 35, 42 (1929)] hat z. B. für die Röstgaskatalyse des Fe_2O_3 folgendes Reaktionsschema aufgestellt:



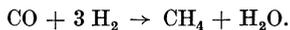
Wenn eine derartige Reaktionsfolge mit stöchiometrischen Zwischenprodukten auch nicht in allen Teilen sichergestellt ist, hat sie doch den Vorteil, Stoffe aufsuchen zu können, die eine ähnliche Reaktion eingehen. Neumann hat weiterhin gezeigt, daß die Hypothese der Zwischenreaktionskatalyse auch gestattet, über geeignete Aktivatoren etwas auszusagen.

Die Röstgaskatalyse des V_2O_5 hat Neumann wie folgt formuliert:

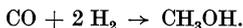


Die Wirkung des Vanadinkontaktes wird durch Zumischung von Silber erheblich gesteigert, während Silber allein ziemlich unwirksam ist. Sieverts z. B. [Ztschr. physikal. Chem. 68, 115 (1909)] hat gezeigt, daß Ag beträchtliche Mengen Sauerstoff zu adsorbieren vermag. Die aktivierende Wirkung des Silbers besteht nun wahrscheinlich darin, daß es den adsorbierten Sauerstoff auf das nach Gleichung (1) reduzierte V_2O_4 überträgt und dessen Rückoxydation zum Vanadylsulfat gemäß Gleichung (2) beschleunigt. Die Reduktionsgeschwindigkeit des Vorganges $\text{V}(5) \rightarrow \text{V}(4)$ ist sehr groß. Kontakte, welche diesen Vorgang beeinflussen, brauchen demnach nicht angewendet zu werden. Dagegen ist der Übergang von $\text{V}(4)$ zu $\text{V}(5)$ an sich langsam verlaufend. Die Anwesenheit von Ag beschleunigt ihn sehr stark. — Die Röstgaskatalyse des Fe_2O_3 und Cr_2O_3 wird durch Zusatz von SnO_2 beschleunigt. Nach Neumann beruht diese Wirkung darauf, daß das zweiwertige Zinn als starkes Reduktionsmittel die Reduktion des Fe_2O_3 (bzw. Cr_2O_3) bewirkt. In diesem Fall ist der Übergang: $\text{Fe}(3) \rightarrow \text{Fe}(2)$ langsam verlaufend. Zusatz von Zinnsalz beschleunigt ihn. Der Vorgang $\text{Fe}(2) \rightarrow \text{Fe}(3)$ geht sehr schnell vor sich und bedarf daher keines Beschleunigers. In beiden Fällen besteht die Wirkung des Aktivators darin, daß er von den Reaktionen am Katalysator diejenige beschleunigt, die die langsamste ist und infolgedessen die Geschwindigkeit der gesamten Reaktion bestimmt.

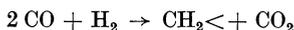
Zuweilen ist es möglich, durch Auswahl eines Katalysators oder geeigneter Beimischungen Reaktionen des gleichen Systems bei einer gewünschten Zwischenstufe aufzuhalten, oder in eine bestimmte Richtung zu lenken. Das Schulbeispiel einer derartigen Reaktionslenkung stellt die Kohlenoxydreduktion mit Wasserstoff dar. Verwendet man Nickel, das als sehr wirksamer Hydrierungskontakt bekannt ist, so führt die Reaktion unmittelbar zum Methan:



Nach dem Verfahren der I. G. Farbenindustrie A. G. ist es gelungen, bei der Drucksynthese durch Anwendung eines Zinkoxyd-Chromoxyd-kontaktes die Reduktion bei der Stufe des Methanols aufzuhalten:



Verwendet man bei der Drucksynthese alkalisiertes Eisen als Kontakt, so entsteht an Stelle des Methanols ein Gemisch von höheren Alkoholen, Aldehyden und Säuren, Synthol genannt, das man durch Wasserabspaltung in das sauerstofffreie Synthol überführen kann. Durch die Arbeiten von Fischer und Tropsch ist gezeigt worden, daß man unter Normaldruck durch Anwendung von Fe-, Co-, Ni- und Mn-Kontakten aus Wassergas nahezu reine Kohlenwasserstoffe herstellen kann. Es ist ein interessantes Beispiel der Reaktionslenkung, daß man nach Berl und Jüngling [Ztschr. angew. Chem. 43, 435 (1930)] den an das Kohlenoxyd gebundenen Sauerstoff mit Hilfe eines Fe-Kontaktes als CO_2 :



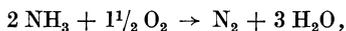
mit Hilfe eines Kobaltkontaktes als H_2O entfernen kann:



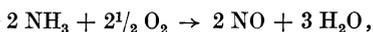
Ist es gelungen, durch experimentelle Untersuchungen einen Kontakt geeigneter chemischer Zusammensetzung auszuwählen, so besteht die zweite Aufgabe darin, ihn „hochzuzüchten“. Es muß durch Vervollkommnung der Herstellungsbedingungen und durch Auswahl geeigneter Trägersubstanz dafür gesorgt werden, die Wirksamkeit bei gleichbleibenden chemischen Eigenschaften zu steigern und vor allen Dingen für eine Dauerleistung des Kontaktes Sorge zu tragen.

Für die Wirksamkeit des Kontaktes ist zunächst die Größe der gesamten Oberfläche maßgebend, da sich an ihr die physikalische Adsorption der Reaktionsteilnehmer vollziehen muß. Seit langem schon war man deshalb bestrebt, den Kontakt in möglichst feinverteilte großoberflächliche Form zu bringen. Man erreicht dies z. B. dadurch, daß man die Substanz durch Fällungen oder Reduzieren in voluminöse Form bringt. Da beim Reduzieren oder Oxydieren des Kontaktes leicht ein Zusammenwachsen der Primärteilchen unter Verkleinerung der Oberfläche stattfindet, hat man es in der Hand, durch Anwendung niedriger Arbeitstemperaturen eine möglichst große Oberfläche zu erzielen. Will man die Reaktion bei einer bestimmten Stufe aufhalten und deswegen einen nicht allzu aktiven Kontakt erzeugen, so kann man entweder kompaktes Material verwenden oder die Herstellung des Kontaktes bei höheren Temperaturen vornehmen. Ein Beispiel hierfür ist der Kupferkontakt zur Herstellung von Formaldehyd durch Oxydation von Methanol. Durch Anwendung von kompaktem Kupfer ist es hier möglich, die Reaktion mit guter Ausbeute bei der Stufe Formaldehyd aufzuhalten.

Bei der Oxydation des Ammoniaks ergibt Platinschwarz den fast vollständigen Umsatz nach



während kompaktes Platin (Draht, Band, Spiegel usw.) nach



also im gewollten Sinne wirkt. Die Oberfläche des Kontaktes kann man auch dadurch vergrößern, daß man ihn auf eine Trägersubstanz aufträgt, die an und für sich unwirksam ist. Als solche werden A-Kohle, Silicagel, Bimsstein, Tonscherben, feste Salze u. a. verwendet. Man kann z. B. großoberflächige Metalloxydkontakte dadurch erzeugen, daß man die Trägersubstanz mit der Metallnitratlösung tränkt und das Nitrat durch Erhitzen auf dem Träger in das Oxyd überführt.

Da, wie früher beschrieben, der eigentliche katalytische Vorgang nur an ausgezeichneten aktiven Stellen der Kontaktoberfläche stattfindet, besteht das Bestreben, die Zahl solcher aktiver Stellen möglichst zu vergrößern.

Die Struktur von Kontaktflächen und die Natur der aktiven Stellen ist von Taylor [Ztschr. Elektrochem. **35**, 542 (1929)], G. M. Schwab, E. Pietsch u. E. Josephi [Ztschr. physikal. Chem. B **13**, 13 (1931)], Smekal [Ztschr. Elektrochem. **35**, 557 (1929)] u. a. untersucht worden. Es ist gezeigt worden, daß aktive Stellen hauptsächlich an den Ecken und Kanten der Krystalle zu suchen sind. An diesen Ecken und Kanten sind die das Gitter aufbauenden Atome weniger fest eingebaut. Sie verfügen deswegen über größere freie Energie. Schwab weist darauf hin, daß die Katalyse eine topochemische Reaktion ist, und auf bestimmte Teile der Oberfläche beschränkt bleibt. Smekal hat gezeigt, daß aktive Stellen bevorzugt an den Störungsstellen und Unregelmäßigkeiten im Krystallbau auftreten. Diese Anschauung von der Diskontinuität der Oberfläche wird durch die Tatsache bestärkt, daß die Wirksamkeit des Kontaktes oft durch Spuren von Fremdkörpern und Verunreinigungen erheblich gesteigert, aber auch durch geringe Beimengungen vergiftet werden kann. Bei der Kontaktherstellung muß deshalb durch Auswahl geeigneter Herstellungsbedingungen und durch Zumischung günstig wirkender Aktivatoren für die Vermehrung aktiver Stellen Sorge getragen werden. Sehr aufschlußreich erscheinen in diesem Zusammenhang die Arbeiten von Frohlich [Ind. engin. Chem. **20**, 694 (1928)] und seinen Mitarbeitern, die durch röntgenographischer Studien gezeigt haben, daß bei Mischungen zweier Substanzen Mischkrystallbildung und diskrete Gitterzustände beobachtet werden, wenn diese Kontakte eine Reaktion mit besonders günstiger Ausbeute in bestimmter Richtung katalysieren, z. B. fallen Maxima und Minima der Gitterabstände mit einer spezifischen Kontaktwirkung zusammen. In diesem Falle ist erwiesen worden, daß der Aktivator mit der Kontaktsubstanz Krystallzustände einnimmt, denen eine spezifische Kontaktwirkung zukommt.

Ein weiteres Augenmerk ist bei der Herstellung der Kontakte auf ihre Festigkeit zu richten. Zuweilen werden Kontakte in hohen Reaktionsräumen aufeinandergeschüttet. In solchen Fällen muß darauf geachtet werden, daß der Kontakt eine gewisse mechanische Festigkeit besitzt, damit nicht durch Zerreiben des Materials eine allzu dichte Packung und Erschwerung des Gasdurchtritts bewirkt wird. Versucht man die mechanische Festigkeit des Materials durch Verwendung von Trägersubstanzen zu erhöhen, so ist darauf zu achten, daß diese nicht bei der Reaktionstemperatur zusammensintern und den Gasdurchtritt ebenfalls hemmen.

Verwendet man einen Kontakt mit vielen aktiven Stellen, so besteht die Gefahr, daß dort, wo der Umsatz der Reaktionsteilnehmer besonders bevorzugt wird, eine lokale Überhitzung stattfindet, ohne daß die dort freiwerdende Wärmemenge durch das Trägermaterial ausreichend abgeleitet wird. Mit fortschreitender Reaktionsdauer tritt an diesen Stellen eine Änderung im Krystallbau auf, die zur Vernichtung der aktiven Stellen führt. Man beobachtet in solchen Fällen, daß ein zu Beginn höchst-aktiver Kontakt in seiner Wirkung allmählich nachläßt und eine konstante, aber unzulängliche Wirksamkeit erreicht, nachdem die Mehrzahl der aktiven Stellen zerstört und damit die Leistungsfähigkeit auf ein Minimum herabgesunken ist. Dieser Wertverminderung des Kontaktes kann man dadurch entgegenwirken, daß man den mit vielen aktiven Stellen ausgezeichneten Stoff in eine temperaturbeständige Trägersubstanz einbettet. Ein Beispiel hierfür bietet der von der I. G. Farbenindustrie A.G. (Bosch und Mittasch) ausgebildete Ammoniakkontakt. Die wirksame Substanz des Katalysators ist das α -Eisen. Da die exotherme Vereinigung von Stickstoff und Wasserstoff an den aktiven Stellen des α -Eisens Überhitzungen hervorruft, die die im Reaktionsraum herrschenden Temperaturen weit übersteigen, tritt an den aktiven Stellen ein Zusammensintern und eine Umwandlung des α -Eisens in die γ -Form ein. Aus reinem α -Eisen bestehende Kontakte lassen deshalb schnell in ihrer Wirkung nach. Durch Einbetten des α -Eisens in die temperaturbeständige Tonerde, gelingt es, das Zusammensintern der aktiven Stellen zu verhindern. Der Aktivator hat in diesem Falle den Zweck, die Beständigkeit des Kontaktes zu steigern.

Die Diskontinuität der Kontaktfläche, d. h. das Vorhandensein ausgezeichneter, für die Katalyse besonders aktiver Stellen, ist die Ursache dafür, daß gerade die wirksamsten Kontakte am empfindlichsten gegen sog. Kontaktgifte sind. Man versteht darunter Verunreinigungen, die dem reagierenden System (in den meisten hier beobachteten Fällen Gasgemische) meist von seiner Herstellung her anhaften, und selbst in ganz geringen Mengen die Wirksamkeit eines Kontaktes in kürzester Zeit zunichte machen. Z. B. wird das den Knallgasumsatz katalysierende Platin durch geringe Mengen Schwefel oder Schwefelverbindungen in kürzester Zeit vergiftet. Der bei der Ammoniaksynthese angewendete Katalysator ist außerordentlich empfindlich gegen Vergiftung durch Schwefelverbindungen und Kohlenoxyd. Bei den großtechnischen Kontaktprozessen spielt deswegen die Reinigung der Reaktionsgase eine große Rolle. Da der gleiche Kontakt mit großen Mengen Reaktionsgas in Berührung kommt, ohne daß seine Wirkung nachlassen soll, müssen für die verwendeten Gase höchst wirksame Reinigungsverfahren geschaffen und ständig mit den empfindlichsten Analysemethoden überwacht werden.

Ein anderer Weg, diese Giftwirkung unschädlich zu machen, liegt darin, durch Auswahl anderer Kontaktsubstanzen oder durch geeignete Zusätze bei gleicher Wirksamkeit die Empfindlichkeit der Kontakte herabzusetzen. Bei der Röstgaskatalyse erweist sich der ehemals verwendete Pt-Kontakt als sehr empfindlich gegen Arsenverbindungen, die

immer im technischen Röstgas vorhanden sind. Durch Vorschalten von Kiesabbrand, der sehr unempfindlich, aber auch wenig arbeitsfähig ist, hat man erreicht, daß an dem an sich unwirksameren Kontakt die Giftwirkung des Arsens vernichtet und zugleich ein Teil der Umsetzung vorgenommen wird. Das giftfreie Kontaktgas gelangt nach erfolgter Abscheidung des bereits gebildeten Schwefelsäureanhydrids und nach vorgenommener Feinfiltration über geeignetes Material, z. B. Hochofenschlacke, an den Platinkontakt, wo der weitere Umsatz bis zu 95% der Theorie stattfindet. Später ist es gelungen, in dem Silbervanadat, bzw. anderen Vanadinkontakten, hochwirksame, giftunempfindliche Systeme aufzufinden, die heute das Platin fast überall aus dem Kontaktverfahren verdrängt haben.

In der Erdölhydrierung hat man die Leistungsfähigkeit und Betriebsdauer der Kontakte dadurch gesteigert, daß man an Stelle der Metalle, die stets sehr empfindlich sind, ihre Oxyde bzw. Sulfide verwendet.

Bei der Anwendung der Kontakte im Reaktionsraum ist es wichtig, durch geeignete Führung des Gasstroms die Ausbildung ruhender Gas-schichten an der Kontaktoberfläche zu verhindern. Gelänge es auch, die Reaktion an den aktiven Stellen des Kontaktes stark zu beschleunigen, ohne daß die Verdampfung des Reaktionsproduktes von der Oberfläche und die Nachlieferung der Reaktionsteilnehmer mit genügender Geschwindigkeit geschieht, so wäre für den Gesamtvorgang an Geschwindigkeit nichts gewonnen, da ja nur die langsamste Reaktion die Gesamtgeschwindigkeit bestimmt. Man muß in diesen Fällen die natürliche Diffusion durch große Strömungsgeschwindigkeit und durch Wirbelung verstärken. Findet die Reaktion an einer Grenzfläche gasförmig-flüssig statt, so muß die Berührungsfläche durch Versprühen der Flüssigkeit oder durch Anwendung von Füllkörpern in dem Reaktionsraum (s. Bd. III, S. 500f.) vergrößert werden. Im Bleikammerverfahren z. B. hat man die Leistung des Kammerraums durch Einbauen von Sprühkreiseln, durch Anbringung von Walzen und Füllkörpern auf ein Vielfaches steigern können.

Der Forderung nach größtmöglicher Oberfläche des Katalysators nähert man sich am meisten, wenn man ihn in kolloidale Form bringt. Es ist wiederholt versucht worden, auf diesem Wege Oberflächenentwicklungen zu erhalten, die denen der biologischen Katalysatoren, den Enzymen und Fermenten, ähnlich sind. Diese sind vor den technisch verwendeten Katalysatoren durch ihre große Selektivität ausgezeichnet. Es gibt z. B. kein Ferment, das sowohl die Spaltung von Kohlehydraten, als auch von Proteinen bewirkt. Die die Maltose spaltende Maltase läßt den Rohrzucker und mit ihm alle β -Glucoside unverändert. L. Zechmeister [Naturwiss. 20, 639 (1932)] hat gezeigt, daß nicht nur der stereochemische Aufbau, sondern auch die Molekülgröße und Kettenlänge diese spezifische Wirkung bestimmen.

Bredig [vgl. etwa Ztschr. physikal. Chem. 31, 258 (1899)] hat durch elektrische Zerstäubung Metallsole hergestellt. Auf diese Weise hergestelltes kolloidales Platin erweist sich als vorzüglicher Hydrierungskontakt. Ebenso wie das natürliche Ferment — die Katalase — spaltet kolloidales Platin Wasserstoffsperoxyd. Wie bei den natürlichen

Fermenten läßt sich diese katalytische Wirkung durch Spuren von Giften, wie Blausäure und Kohlenoxyd, vernichten.

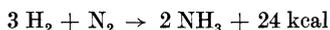
Derartig kolloidal dispergierte Kontakte, die in der Art ihrer Wirkung der homogenen Katalyse sehr nahekommen, liegen bei den negativen Katalysatoren vor; mit denen man das Klopfen der Vergasermotore verhindert (S. 336f.). Midgley [Ind. Engin. Chem. 14, 589 (1922)] hat dem klopfenden Benzin Bleitetraäthyl: $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$ zugesetzt. In Deutschland hat man nach einem Verfahren der I. G. Farbenindustrie A. G. die außerordentlich giftige Bleiverbindung durch Eisenpentacarbonyl $\text{Fe}(\text{CO})_5$ ersetzt. Diese metallorganischen Verbindungen werden im Zylinder des Motors durch Steigerung der Temperatur in hochdisperses Metall und organische Reste gespalten. Ihre Wirkung kommt in einer Erhöhung der Selbstentzündungstemperatur und einer Hemmung der Verbrennungsgeschwindigkeit zum Ausdruck. Im Sinne Wi. Ostwalds besteht diese Wirkung darin, daß der negative Katalysator den positiven Katalysator zerstört oder sich ausbildende Reaktionsketten abbricht. Die im Oxydationsraum entstehenden, den Verbrennungsprozeß autokatalytisch beschleunigenden Peroxyde werden durch das hochdisperse Schwermetall, z. B. Pb oder Fe, zersetzt. Berl und Winnacker [s. Ztschr. physikal. Chem. A 148, 261 (1930)] haben gezeigt, daß an Stelle der metallorganischen Verbindungen auch hochdisperse Metallnebel, sowie Metallsole, in denen das Metall in dem Kraftstoff kolloidal gelöst ist, die Verbrennung in gleicher Weise hemmen. Die gleichen kolloidalen Metalle verhindern auch die Autoxydation des Benzaldehyds. Es ergab sich hier eine bemerkenswerte mengenmäßige Beziehung zwischen positivem und negativem Katalysator und deren Wirksamkeit. Während kolloidal dispergiertes metallisches Eisen die Oxydation des Benzaldehyds verhindert, wird diese durch Eisen-2-Salze stark beschleunigt. Die durch Zusatz von kolloidal dispergiertem Eisen gehemmte Oxydation kann durch Zusatz von Eisen-2-Salz schrittweise wieder ausgelöst werden. Die ursprüngliche Oxydationsgeschwindigkeit wird wieder erreicht, wenn metallisches Eisen und Eisen-2-Salz in annähernd stöchiometrischem Verhältnis zueinander stehen.

Anschließend sei an Hand einiger technisch wichtiger Beispiele die Durchführung katalytischer Prozesse erläutert.

III. Einige technische Anwendungen der Katalyse.

A. Die katalytische Herstellung von Ammoniak.

Die Reaktion:



ist durch die grundlegenden Arbeiten von Haber und Nernst (1904 bis 1908) auf ihre technische Durchführbarkeit geprüft worden. Aus der positiven Wärmetönung ergibt sich, daß die NH_3 -Konzentration im Gleichgewicht um so geringer wird, je höher die Temperatur ist. Die Gleichgewichte bei verschiedenen Temperaturen und Drucken sind von beiden

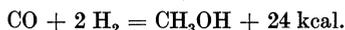
Autoren gemessen worden. Da der Vorgang mit Volumenkontraktion verbunden ist, muß durch Druckerhöhung die Ammoniakausbeute gesteigert werden. Nernst hat mit Jellinek und Jost zum ersten Male Gleichgewichte bei erhöhten Drucken gemessen und festgestellt, daß z. B. bei 685° und 50 atü 0,896 Vol.-% NH₃ im Gleichgewicht vorhanden sind. Als Kontakt wurde Platinfolie, feinverteiltes Fe und elektrolytisch abgeschiedenes Mangan benutzt. Haber fand 1908, daß bei 175 at und 550° 8% NH₃ erhalten werden können. Als Katalysator dienten Osmium und kohlenstoffhaltiges Uran. Für die technische Durchführung der Synthese, die mit den Namen Bosch, Mittasch und Lappe unlösbar verbunden ist, fand Mittasch in einer großen Zahl von Versuchen den geeigneten Kontakt, der aus Eisen mit Zusätzen von Tonerde und Alkalien besteht. Dieser Kontakt bewirkt eine so erhebliche Beschleunigung der Reaktionsgeschwindigkeit, daß schon bei 500° in kürzester Zeit die Gleichgewichtslage erreicht wird. Haber und Bosch wendeten in dem von der Badischen Anilin- und Sodafabrik ausgebildeten Verfahren einen Betriebsdruck von 200 at an. Später wurden im Casale-Fauser Verfahren die Drucke auf 300—800 at, im Claude-Verfahren bis auf 1000 at gesteigert. Neben diesen genannten Katalysatoren wird eine große Zahl von Kontakten zur Anwendung empfohlen. Trotz verschiedenster Ausgangsmaterialien — im Mont Cenis-Verfahren werden z. B. ammoniakalische Eisencyanide als Kontakt empfohlen — hat sich ergeben, daß die eigentliche katalytische Wirkung dem α -Eisen zukommt, das in Al₂O₃ eingebettet ist (s. S. 177).

Alle anderen Eisenkontakte wandeln sich im Verlauf der Reaktion in die α -Eisenmodifikation um.

Über die Kinetik der Ammoniak-katalyse herrschen zur Zeit folgende Anschauungen [s. hierzu Frankenburger: Ztschr. Elektrochem. **39**, 45, 97, 269 (1933)]. Die Vereinigung kann nur erfolgen, wenn sowohl der Wasserstoff, als auch der Stickstoff aktiviert werden. Nicht angeregte Stickstoffmoleküle liefern selbst mit atomarem Wasserstoff kein Ammoniak. Die Aktivierung des Stickstoffs scheint über die Bildung labiler Eisennitride zu verlaufen. Der an aktiven Stellen dissoziierte Wasserstoff bildet mit den Nitriden Metallimide, die durch molekularen Wasserstoff hydriert und dann in Metall und Ammoniak gespalten werden. Die große Giftempfindlichkeit des Kontaktes — Schwefel, Phosphor, Arsen, Kohlenoxyd, H₂O zerstören die Wirksamkeit des Katalysators schnell — erfordert eine sorgfältige Reinigung des Kontaktgases.

B. Die Reduktion des Kohlenoxyds.

Im engen Anschluß an die Ammoniak-katalyse hat sich die Methanolsynthese entwickelt:

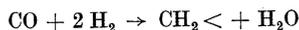


Der Vergleich mit der Reaktionsgleichung der Ammoniak-synthese zeigt die Übereinstimmung der Reaktionsbedingungen. Beide Vorgänge sind stark exotherm und verlaufen unter Volumenverminderung. Die günstigste Gleichgewichtskonzentration liegt bei tiefen Temperaturen, bei denen die

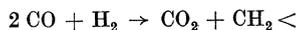
Reaktionsgeschwindigkeit durch Anwendung von Katalysatoren gesteigert werden muß. Auch die Methanolbildung wird durch Anwendung von Druck begünstigt. Als Kontakte werden schwer reduzierbare Metalloxyde, Cr_2O_3 , ZnO , sowie Zinkchromat angewendet, die bei Temperaturen zwischen 300—400° und 150—200 at eine rasche Einstellung des Gleichgewichtes bewirken. Als störend hat sich die Anwesenheit der Metalle der Eisengruppe erwiesen, sofern diese Metalle unter den Reaktionsbedingungen reduziert werden.

Die Reduktion des Kohlenoxyds kann durch Anwendung geeigneter Kontaksubstanzen in Richtung anderer Reaktionsprodukte gelenkt werden. Bei Anwendung von Nickel erhält man nach Sabatier Methan. Nach einem Verfahren der I. G. Farbenindustrie A. G. erhält man bei Anwendung von alkalisierten Fe-Kontakten unter Druck ein Gemisch vorzugsweise höherer Alkohole, Synthol genannt. Durch Wasserabspaltung gehen diese beim Erhitzen in ungesättigte Kohlenwasserstoffe, Synthin genannt, über.

Während bei diesen Reaktionen unter Anwendung von Druck teilweise Reduktion, teilweise Einlagerung von Wasserstoff in das entstehende Molekül stattfindet, so daß die Produkte sehr sauerstoffhaltig sind, ist es F. Fischer und Tropsch gelungen, bei Normaldruck nahezu sauerstofffreie Produkte herzustellen. Bei Anwendung von Kontakten, die z. B. Co, Fe, Th, Ni, Mn enthalten, entstehen größtenteils aliphatische Kohlenwasserstoffe. Man hat es hier mit Reaktionen vom Typus:



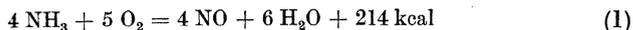
oder



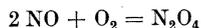
zu tun, bei denen die Geschwindigkeit der weiteren Hydrierung des Methylens $\text{CH}_2 <$ zu Methan geringer ist, als die der Polymerisation zu höher molekularen Verbindungen (s. hierzu auch S. 286).

C. Die katalytische Ammoniakoxydation.

Die Reaktion:

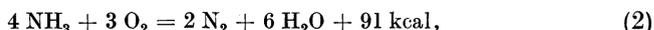


verläuft bei 700° mit hinreichender Geschwindigkeit. Die technische Durchführung des Verfahrens, das schon 1862 von Kuhlmann angegeben wurde, ist von Wi. Ostwald und Brauer, Frank und Caro und der I. G. Farbenindustrie A. G. weiter ausgebildet worden. Da die Reaktion mit nur unwesentlicher Volumenänderung verbunden ist, hat Druckänderung auf die Lage des Gleichgewichtes der Ammoniakverbrennung keinen Einfluß. Hingegen ist versucht worden, die Oxydation des Stickoxyds und die Absorption des Stickstoffperoxyds durch Drucksteigerung zu beschleunigen, da die trimolekulare Reaktion



außerordentlich stark druckabhängig ist. Ist der verwendete Kontakt zu wirksam und strömt das Gasgemisch zu langsam am Kontakt

vorbei, so verläuft die Reaktion gemäß folgender Gleichung unter Bildung von Stickstoff:

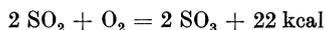


da dieser Umsatz durch größere freie Energie ausgezeichnet ist. Man verwendet deshalb sehr hohe Strömungsgeschwindigkeiten. Das Gasgemisch, das Luft im Überschuß enthält, wird bei Temperaturen zwischen 700—800° so schnell durch den Kontaktraum geführt, daß die Berührungzeit 0,001 s nicht überschreitet. Als Kontakt verwendet man massives Platin als Draht, Drahtnetz, Band und auf Trägersubstanzen eingebrannt. Feinverteiltes Platin führt durch seine gesteigerte Aktivität zur Bildung von Stickstoff gemäß Gleichung (2). Weiterhin werden Mischungen von Fe_2O_3 mit Bi_2O_3 (97% Fe_2O_3), sowie CuO und PbO_2 empfohlen. Das Platin ist sehr giftempfindlich. Bei sorgfältiger Reinigung erhält man bei großer Lebensdauer des Kontaktes über 97% Ausbeute.

D. Die Herstellung der Schwefelsäure.

1. Nach dem Kontaktverfahren.

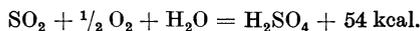
Das Gleichgewicht der Reaktion:



ist von Knietzsch [Ber. Dtsch. chem. Ges. 34, 4069 (1901)], sowie Bodenstein und Pohl [Ztschr. Elektrochem. 11, 373 (1905)] u. a. gemessen worden. Um eine maximale Ausbeute zu erreichen, darf man die Temperatur von 450° nicht überschreiten. Druckerhöhung sollte die Ausbeute steigern, ist jedoch im Hinblick auf die günstige Lage des Gleichgewichtes bei Normaldruck nicht erforderlich. Platin als Kontaktsubstanz gestattet bei 450° eine Ausbeute von 98% zu erreichen, ist aber sehr empfindlich gegen Vergiftungen durch mitgeführten Flugstaub, sowie Arsen- und Selenoxyd. Die unempfindlichen Kontakte, wie z. B. die Oxyde des Eisens und des Chroms, wirken erst bei 650° mit hinreichender Geschwindigkeit, so daß man eine geringere Ausbeute, weniger als 60%, in Kauf nehmen muß. In letzter Zeit ist das Platin nahezu überall durch Vanadinkontakte (insbesondere Silbervanadinat und Vanadinpermutite) verdrängt worden, die bei gleicher katalytischer Wirksamkeit wesentlich unempfindlicher gegen Kontaktgifte sind. Der Prozeß wird in großen zylindrischen Kontaktöfen durchgeführt. Er erfordert keine Wärmezufuhr. Die Frischgase werden durch die heißen Abgase vorgewärmt.

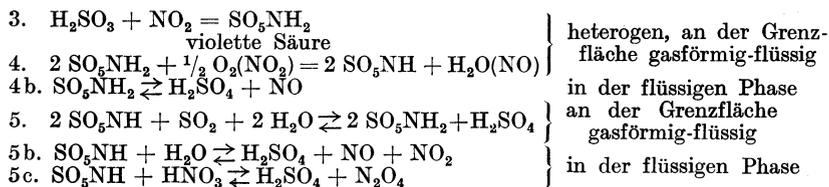
2. Nach dem Bleikammerverfahren.

Im Bleikammerprozeß wird die träge Schwefeldioxydoxydation durch die katalytische Wirkung der Oxyde des Stickstoffs beschleunigt. Die Reaktion verläuft hauptsächlich im heterogenen System gasförmig-flüssig. Die komplizierte Reaktionsfolge ist von Lunge und Berl wie folgt festgelegt worden:



1. $2 \text{NO} + \text{O}_2 = 2 \text{NO}_2$
2. $\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{SO}_3$

trimolekular in der Gasphase
heterogen, an der Grenzfläche gasförmig-flüssig



Die Reaktionen 4b, 5b und 5c verlaufen in der flüssigen Phase mit großer Geschwindigkeit. Die Reaktionen 2, 3, 4 und 5 sind heterogen, ihre Geschwindigkeit ist in hohem Maße von der Größe der Phasengrenzfläche flüssig-gasförmig abhängig. Um die Geschwindigkeit der Reaktion zu steigern, hat man versucht, diese Grenzfläche durch Einbauen von Sprühkreislern, Walzenkästen und Füllkörpern zu vergrößern. Man hat dadurch eine sehr erhebliche Steigerung der Leistung gegenüber den nach dem alten System arbeitenden Kammern erreicht (s. Tabelle 4).

Entsprechend dem voranstehenden Reaktionsschema wird die Gesamtgeschwindigkeit nicht allein durch diese Grenzflächenreaktionen bestimmt. Vielmehr ist die Reaktion 1, die als trimolekularer Umsatz in der homogenen Gasphase träge verläuft, in erster Linie geschwindigkeitsbestimmend. Berl und Althoff [Ztschr. anorgan. allg. Chem. **215**, 225 (1933)] haben durch Anwendung von Druck gezeigt, daß man die Reaktionsgeschwindigkeit auf diese Weise auf ein Vielfaches steigern kann. Drucksteigerung verhindert die Hydrolyse der katalysierenden Nitrosylschwefelsäure (Gleichung 5b) und den Zerfall der violetten Säure (Gleichung 4b), so daß die Reaktion im wesentlichen zwischen der Oxydation der violetten Säure zu Nitrosylschwefelsäure (Gleichung 4) und deren Reduktion zu violetter Säure (Gleichung 5) pendelt, ohne daß NO in größeren Mengen entsteht. Der Druck begünstigt auch die an der Phasengrenzfläche stattfindenden Reaktionen infolge Erhöhung der Löslichkeit (Gesetz von Henry) und beschleunigt die Reaktion 1. Als Summe aller dieser Einflüsse beobachtet man eine ungefähr quadratische Steigerung der Leistung mit dem Druck:

$$\frac{\text{Ausbeute}}{\text{m}^3/\text{Tag}} = 15,7 \cdot p^2.$$

(Diese Beziehung gilt einigermaßen streng nur für die gewählte Versuchsanordnung.)

Tabelle 4. Leistungen verschiedener Systeme.

System	Leistung in kg 78,2% ige H_2SO_4 (60° Bé) je m^3/Tag	Stickstoffverbrauch in kg HNO_3 (36° Bé) je 100 kg H_2SO_4
Alte Kammern	2—4	1,1
Älteres Intensivsystem mit Zwischentürmen	7,5	1,0
Neuere Intensivsysteme	10—30	0,75—1,2
Opl-Türme	30	0,94
Petersen-Türme	50	0,8
Schmiedel-Klenke-Walzenkasten	50	—
Drucksystem 13 at	3000 (erzielt)	0,9
Drucksystem 25,3 at	10000 (errechnet)	—

E. Die Hydrierung organischer Verbindungen.

Besondere Bedeutung hat die Hydrierung der ungesättigten Fettsäuren in der Fetthärtung erhalten. Die Hydrierung erfolgt meist in der flüssigen Phase. Als Katalysatoren haben sich besonders Nickel und seine Verbindungen, wie Oxyde und Formiate, bewährt, daneben werden Pt, Co, Cu und Fe in zahlreichen Patentschriften empfohlen. Der Katalysator wird entweder als Pulver in der zu hydrierenden Flüssigkeit aufgeschwemmt, auf einen Träger, wie Kieselgur, Kohlen u. a. aufgebracht oder aber aus seinen Salzen durch direkte Druckhydrierung im Öl bei 230—240° hergestellt. Auf Trägersubstanzen aufgebrachte Kontakte sind unempfindlicher gegen Überhitzungen, welche die Wirkung des kolloidalen Nickels leicht zerstören. Man arbeitet in Rührautoklaven unter wenigen Atmosphären Druck bei Temperaturen zwischen 100 bis 160°. Übersteigt die Temperatur 200°, so greift der Wasserstoff außer der Doppelbindung auch die Carboxylgruppe der Fettsäuren an. Man erhält an Stelle gehärteter Fettsäuren höhere Alkohole, die als Emulgatoren Verwendung finden. Durch Anwendung „vergifteter Katalysatoren“ erhält man ungesättigte Alkohole, da unter Umständen die Carboxylgruppe leichter reduziert wird als die Doppelbindung —C=C— [Schrauth: Ztschr. angew. Chem. 46, 410 (1933)].

Die Hydrierung aromatischer Stoffe hat für die Industrie der Lacke und Lösungsmittel große Bedeutung. Z. B. wird Phenol zu Cyclohexanol, Naphthalin zu Tetralin und Dekalin hydriert. Auch hier arbeitet man in flüssiger Phase bei 150—200° und 10—15 at mit Nickelpräparaten als Katalysatoren. Bei allen mit Nickel als Katalysator durchgeführten Hydrierungen sind Schwefelverbindungen starke Kontaktgifte.

Durch die krackende Hydrierung des Erdöls unter Druck, wie sie von der I. G. Farbenindustrie A. G. in größtem Maßstabe durchgeführt wird, hat das Studium und die Anwendung der Hydrierungskontakte großtechnische Bedeutung erlangt. Man verwendet als Kontakte meistens Sulfide des Molybdäns, Nickels und Kobalts, die bei größter Reaktionsgeschwindigkeit gegen die sulfidischen Verunreinigungen des Rohöls und des Braunkohlenteers nahezu unempfindlich sind.

Phasenlehre.

Von Dr. phil. Dr.-Ing. e. h. E. Jänecke, ord. Hon.-Professor, Heidelberg.

Literatur: D'Ans, J.: Die Lösungsgleichgewichte der Systeme der Salze ozeanischer Salzablagerungen, 1933. — Aten, A. H. W.: Phasenlehre von H. W. Bakhuis Roozeboom, Bd. 2, 3. 1918. — Bakhuis Roozeboom, H. W.: Phasenlehre, Bd. 1. 1901; Bd. 2, 1. 1904. — Bancroft, W. D.: The Phase Rule, 1897. — Benrath: Physikalische Chemie, Bd. 2. 1925. — Blasdale: Saturated salt solutions, 1927. — Boeke, H. E.: Grundlagen der physikalisch-chemischen Petrographie, 1915. — Bruni, G.: Feste Lösungen, 1901 und 1908. — Büchner, E. H.: Phasenlehre, 1918. — Clibbens, D. A.: The Phase Rule, 1920. — Findlay, A.: Phase Rule, 1904. Fifth edition, 1923. — Phasenlehre (deutsch), 1925. — Gibbs, J. W.: Thermodynamische Studien, 1892. — van't Hoff, J. H.: Doppel-

salze, 1897. — Ozeanische Salzablagerungen, Bd. 1. 1905; Bd. 2. 1909. — Jänecke, E.: Gesättigte Salzlösungen, 1908. — Entstehung der Kalisalzlager, 2. Aufl. 1923. — Kremann, R.: Anwendung physikalisch-chemischer Theorien, 1911. — Kuenen, J. P.: Verdampfung und Verflüssigung von Gemischen, 1906. — Marc, R.: Chemische Gleichgewichtslehre, 1911. — Ostwald, Wilh.: Allgemeine Chemie, Bd. 2, 2. 1902. — Rivett, A. C. D.: The Phase Rule, 1923. — Rothmund, V.: Löslichkeit, 1907. — Schreinemakers, F. A. H.: Phasenlehre, Bd. 3, 1, 1911; Bd. 3, 2, 1913. — Tammann, G.: Krystallisieren und Schmelzen, 1903. — Aggregatzustände, 1923. — Heterogene Gleichgewichte, 1924.

I. Allgemeines.

1. Geschichtliches.

In mathematischer Beziehung sind die Gleichgewichte der Phasenlehre, wenigstens soweit es sich um die einfacheren handelt, weitgehend bekannt. Die ersten Untersuchungen, die zur Aufstellung der grundlegenden Phasenregel führten, rühren von dem Amerikaner J. Willard Gibbs (1894) her. Sie fanden jedoch wegen ihrer abstrakten Form anfangs wenig Beachtung. Als Schöpfer der eigentlichen Phasenlehre ist H. W. Bakhuis Roozeboom anzusehen, der die Lehren von Gibbs aufgriff, weiter ausbaute und auf praktische Untersuchungen anwendete. Die mathematische Behandlung von Ein- und Zweistoffmischungen ist in vorzüglicher Weise niedergelegt von van der Waals, zusammengefaßt von Kohnstamm in dem Werk über Thermodynamik. Der feste Zustand findet hierbei allerdings geringere Beachtung. Bei den Zweistoffmischungen sind mathematisch in der Hauptsache die Gleichgewichte flüssig-dampfförmig behandelt. Hierbei werden für die verschiedenen Temperaturen mathematische Funktionen benutzt, die Druck und Volumen oder freie Energie und Volumen als unabhängige Veränderliche enthalten. Dreistoffmischungen sind ausführlich von Schreinemakers mathematisch unter Benutzung des sog. thermodynamischen Potentials behandelt, das Druck und Temperaturen als unabhängige Veränderliche enthält. In anderen Teilen ist das Gebiet der Phasenlehre von van Laar mathematisch weiter ausgebaut, der meistens das thermodynamische Potential benutzt und eindringlich auf die Notwendigkeit hinweist, für die Untersuchungen Zustandsgleichungen heranzuziehen. Ergänzt werden die Untersuchungen durch andere Forscher auf diesem Gebiet, in Deutschland hauptsächlich durch Tammann und Jänecke. Wenngleich die rein mathematischen Grundlagen weitgehend bekannt sind, so ist es doch wichtig, daß bei sehr vielen Untersuchungen auf formelmäßige streng mathematische Betrachtungen verzichtet werden kann. Es ist möglich, die Phasenlehre lediglich unter Benutzung rein graphischer Darstellungen zu behandeln. Bei komplizierten Fällen muß man überhaupt von vornherein auf streng mathematische Behandlung mit Funktionsbeziehungen verzichten. Es lassen sich graphisch recht komplizierte heterogene Gleichgewichte untersuchen, deren genaue mathematische Behandlung zur Zeit unmöglich ist.

Bei der graphischen Wiedergabe der Versuchsergebnisse bedient man sich häufig nicht nur ebener, sondern auch räumlicher Darstellungen.

Solche sind typisch für phasentheoretische Untersuchungen und haben den Vorzug, frei von Annahmen, Hypothesen und Theorien zu sein. Die in solchen Kurven, Flächen, Körpern usw. dargestellten Ergebnisse enthalten die mathematischen Beziehungen der Gleichgewichte, die oft nicht weiter bekannt sind, anschaulich dargestellt. Mathematische Gleichungen, die solche Gleichgewichte wiedergeben würden, können schon in einfachen Fällen manchmal so kompliziert sein, daß graphische Darstellungen vorzuziehen sind. Einige Forscher haben geglaubt, es genüge, daß Phasengleichgewichte lediglich im Einklang mit der Phasenregel wären. Ein Gleichgewicht, das dieser Bedingung genügt, wäre auch möglich. Diese Ansicht ist verfehlt, denn es gibt viele Gleichgewichte, die der Phasenregel nicht widersprechen und doch aus anderen Gründen unmöglich sind. Die Phasenregel ist zwar die Grundlage der Phasenlehre, aber nicht ihr einziger Inhalt.

2. Die Phasenregel

(s. auch S. 127f.).

Die Phasenregel verbindet durch eine Gleichung die Zahl der in einem System vorkommenden Phasen, unabhängigen Bestandteile und Freiheitsgrade miteinander. Von diesen Begriffen ist der der Phase der wichtigste. Phasen sind, wie der Name sagt, Zustände, und zwar Aggregatzustände. Es gibt demnach feste, flüssige und gasförmige Phasen. Der Begriff „Phase“ ist also hier ein anderer als dort, wo man sich auf zeitliche Zustände bezieht. Die Kolloide haben auch einen gewissen Aggregatzustand. Bei ihrer eigentümlichen Form spielt aber bei Gleichgewichten die Oberfläche eine große Rolle. Die Phasenregel gilt für Kolloide nur mit Einschränkungen. In einem heterogenen Systeme kann die Zahl der beim Gleichgewicht auftretenden festen Phasen sehr groß sein, die der flüssigen Phasen zwei, selten drei oder gar vier betragen, an gasförmigen ist stets nur eine möglich.

Das Kennzeichen einer Phase ist ihre Homogenität. Jede Phase muß in ihrem mikroskopisch kleinsten Teile physikalisch und chemisch gleich sein. Eine Phase braucht nicht, wie z. B. eine chemische Verbindung, in ihren molekularen Dimensionen einheitlich zu sein. So stellt ein Gasgemisch, eine Lösung oder ein Mischkrystall eine einzige Phase dar, da jede mikroskopisch kleine Gasblase, jeder kleine Flüssigkeitstropfen oder jeder winzig kleine Krystall genau gleiche Zusammensetzung hat. Wollte man aber bis auf die Größe der Moleküle oder gar noch tiefer hinuntergehen, so würde naturgemäß eine Verschiedenheit in der Zusammensetzung einzelner Teile bestehen. Der Begriff einer einheitlichen Phase ist also bedeutend umfassender als der einer chemischen Verbindung.

Der zweite wichtige Begriff der Phasenlehre ist der der unabhängigen Bestandteile, der Komponenten. Es sind das die Bestandteile, welche die Phasen aufbauen und in dem System nicht durch Mischung anderer, schon vorhandener Komponenten, hergestellt werden können. Bei der Wahl der unabhängigen Bestandteile ist zweierlei zu beachten. Erstens muß durch Veränderung ihrer Menge jede mögliche Änderung

in der Zusammensetzung der Phasen des Systems ausgedrückt werden können, und zweitens müssen diese Änderungen voneinander unabhängig sein. Es muß also als Zahl der unabhängigen Bestandteile die kleinstmögliche gewählt werden. In den meisten Fällen ist die Angabe der Zahl dieser Komponenten einfach. Bei allen Systemen z. B., die sich aus einem Salz und Wasser aufbauen, können unter normalen Verhältnissen die verschiedenen Phasen: Dampf, Lösung, das anhydrische Salz, Hydrate durch die Mischung von Wasser und Salz hergestellt werden. Wasserstoff und Sauerstoff sind in jeder Phase immer derartig enthalten, daß ihre Mengen sich zu Wasser ergänzen, ähnlich die Bestandteile der Salze. In diesem Falle hat man deswegen zwei unabhängige Bestandteile: Wasser und Salz. Hier sind die chemischen Verbindungen Salz und Wasser, und nicht die Elemente, die unabhängigen Bestandteile. Bei hohen Temperaturen treten aber in einem System von Wasser und Salz Zersetzungen auf, indem diese beiden Stoffe sich in andere Bestandteile, z. B. ihre Elemente, zerlegen. Bei einem Gleichgewicht können alsdann die anwesenden Phasen die Elemente auch in anderem Verhältnis enthalten, als es dem Wasser und dem Salz entspricht. Deswegen sind die Elemente jetzt als die unabhängigen Bestandteile des Systems anzusprechen. Ein einfaches System ähnlicher Art ist z. B. $\text{H}_2\text{O} + \text{Cl}_2$, bei höherer Temperatur kann eine Umsetzung eintreten: $2 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{Cl}_2 = 4 \text{HCl} + \text{O}_2$. Die auftretenden Phasen Gas und Flüssigkeit enthalten hier nicht mehr Wasserstoff und Sauerstoff im Verhältnis des Wassers. Unabhängige Bestandteile sind daher Wasserstoff, Sauerstoff und Chlor.

3. Beweis der Phasenregel.

Auf einen exakten Beweis der Phasenregel, der sich auf die Thermodynamik gründet, kann hier verzichtet werden. Ihre Ableitung kann in einfacher Weise folgendermaßen geschehen.

Es seien miteinander im Gleichgewicht P -Phasen. Innerhalb jeder Phase wird das Gleichgewicht bestimmt durch die Variablen Druck und Temperatur und das Potential der K Komponenten. Im Gleichgewicht muß das Potential in allen Phasen das gleiche sein. Auf dieses Potential selbst braucht hier nicht genauer eingegangen zu werden. Für jede Phase sind diese Veränderlichen verbunden durch eine sog. Zustandsgleichung. Da P Phasen vorhanden sind, gibt es P Zustandsgleichungen zwischen $K + 2$ unabhängigen Variablen. Hieraus folgt, daß $F = K + 2 - P$ Variablen übrig bleiben, die aus den Gleichungen nicht berechnet werden können, also frei bleiben. Erst wenn über sie verfügt ist, liegen alle Werte für das System fest. Man sagt deswegen dann, das System hat F Freiheitsgrade. Es ist also $P + F = K + 2$. Hieraus folgt auch ein wichtiger Satz der Phasenlehre, daß das Phasengleichgewicht lediglich von der Anwesenheit und nicht von der Menge der einzelnen Phasen abhängig ist.

Die Einteilung der verschiedenen Systeme erfolgt bei dem heterogenen Gleichgewicht am besten nach der Zahl der unabhängigen Bestandteile.

Man unterscheidet alsdann Ein-, Zwei-, Drei-, Vier- und Mehrstoffsysteme, je nachdem $K = 1, 2, 3$ usw. ist. Nach dem Werte der Freiheiten ($F = 0, 1, 2$) bezeichnet man die Systeme als invariant, monovariant, bivariant.

Von den Größen, die außer der Konzentration bei Phasengleichgewichten wichtig sind: innere Energie, Entropie, thermodynamisches Potential, Volumen, Temperatur und Druck, sind nur die letzten drei ihren absoluten Werten nach anzugeben, während für die anderen nur ihre Änderungen, nicht aber ihre absoluten Werte gemessen werden können. Man hat deswegen hierfür bestimmte Nullwerte willkürlich festgesetzt. In den meisten Fällen beschränkt man sich darauf, bei Zwei- und Mehrstoffsystemen die Beziehungen von Volumen, Temperatur und Druck neben den Konzentrationen festzustellen. Untersuchungen, die sich auf die Veränderungen von Druck und Temperaturen beziehen, sind, besonders bei Mehrstoffmischungen, weit zahlreicher als solche die das Volumen betreffen. Am häufigsten sind die Veränderungen der Phasengleichgewichte mit der Temperatur untersucht worden.

II. Einstoffsysteme.

1. Einfache Stoffe. Druck-Temperatur.

In einem Einstoffsystem ($K = 1$) lautet die Phasenregel $P + F = 3$. Für das invariante Gleichgewicht ($F = 0$), das also keine Freiheit mehr besitzt, und durch konstante Werte ausgezeichnet ist, ist jetzt $P = 3$. Im Druck-Temperatur-Diagramm wird dieses Gleichgewicht dreier Phasen durch einen Punkt dargestellt, der deshalb Tripelpunkt genannt wird. Zu diesem invarianten Gleichgewichte gehören ganz bestimmte Werte für Druck und Temperatur und Volumen der drei im Gleichgewicht befindlichen Phasen. In einem Diagramm, das Volumen und Temperatur anzeigt, wird das invariante Gleichgewicht durch eine Gerade angezeigt, auf der bei konstanter Temperatur die Werte für die Volumina von fest, flüssig, gasförmig liegen. Da bei einem Gleichgewicht dreier Phasen natürlich auch je zwei miteinander im Gleichgewicht sein müssen, ist der invariante Tripelpunkt auch ein bestimmter Gleichgewichtspunkt der monovarianten Gleichgewichte zwischen je zwei Phasen flüssig-gasförmig, fest-gasförmig und fest-flüssig. Monovariante Gleichgewichte, die bei verschiedenen Temperaturen und Drucken bestehen, müssen also in einem Druck-Temperatur-Diagramm durch eine Kurve ausgedrückt werden. Es gehen deswegen von dem Tripelpunkt im P - T -Diagramm drei Kurven aus, die sich auf diese drei Zweiphasengleichgewichte beziehen. Ihre Lage veranlaßt eine Teilung der P - T -Fläche in die Gebiete für die feste, flüssige oder gasförmige Phase, wobei „fest“ in dem Gebiet der niederen Temperaturen und das „gasförmig“ im Gebiet der niederen Drucke liegt.

Hieraus folgt die Verteilung, wie sie in den Abb. 1—6 angegeben ist. Für alle Stoffe, die sich beim Erhitzen nicht zersetzen, also einen Schmelzpunkt haben, lassen sich Zustandsbilder mit den Beziehungen

zu Druck und Temperatur mit einem Tripelpunkt konstruieren. Die Lage dieses Punktes ist besonders wichtig. Von ihr hängt das Verhalten unter den verschiedenen Bedingungen in hohem Maße ab. In den Abb. 1—6 sind einige Beispiele schematisch gezeichnet.

1. Bei Metallen (Abb. 1, Silber) liegt der Tripelpunkt meistens bei hohen Temperaturen. Der Dampfdruck ist beim Schmelzen oft noch recht niedrig. Beim Silber beispielsweise liegt der Tripelpunkt bei 963° . Der Dampfdruck ist hier noch recht klein, erst oberhalb 1300° erreicht flüssiges Silber den Dampfdruck von 1 mm und bei etwa 2000° den einer Atmosphäre.

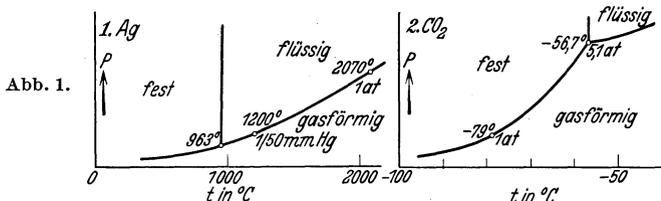


Abb. 1.

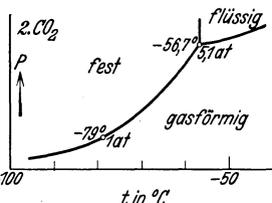


Abb. 2.

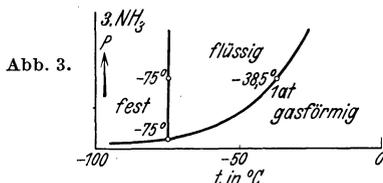


Abb. 3.

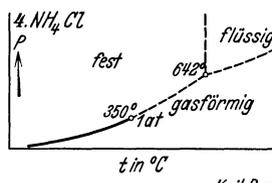


Abb. 4.

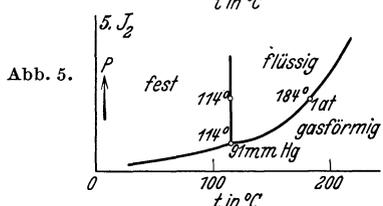


Abb. 5.

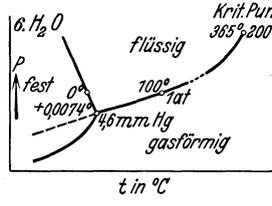


Abb. 6.

Abb. 1—6. P-T-Zustandsbilder einiger einfacher Stoffe.

2. Ein für gewöhnlich gasförmiger Stoff, wie das Kohlendioxyd, hat, wie Abb. 2 zeigt, einen Tripelpunkt, der bei niedriger Temperatur liegt ($-56,7^{\circ}$). Der Dampfdruck des festen Kohlendioxyds beträgt an diesem Punkt 5,1 at, so daß flüssiges Kohlendioxyd nur unter einem höheren Druck als 5,1 at bestehen kann. Die sich auf das monovariante Gleichgewicht beziehende Grenzkurve fest-gasförmig zeigt bei -79° den Dampfdruck von 1 at. Bei dieser Temperatur sublimiert also festes Kohlendioxyd an der Luft.

3. Ein anderes Gas, Ammoniak, hat, wie Abb. 3 zeigt, ebenfalls eine niedere Temperatur (-75°) beim Tripelpunkt, jedoch ist der Dampfdruck alsdann gering (45 mm). Festes Ammoniak läßt sich an der Luft bei -75° schmelzen, flüssiges Ammoniak bei $-38,5^{\circ}$ unter Atmosphärendruck destillieren.

4. Hochschmelzende Stoffe haben manchmal einen höheren Tripelpunktsdruck als den einer Atmosphäre. Die Abb. 4 zeigt z. B. für

Ammoniumchlorid an, daß der Dampfdruck des schmelzenden NH_4Cl erheblich größer als eine Atmosphäre (35 at) ist. Das Schmelzen kann demnach nur in Druckgefäßen erfolgen. Die Sublimation des festen Ammoniumchlorids bei Atmosphärendruck erfolgt bei 350° . Derartige Stoffe gibt es in größerer Anzahl. Beim Erhitzen an der Luft schmelzen sie nicht, sondern sublimieren.

5. Bei bestimmten Stoffen, deren Tripelpunkt nicht sehr weit von einer Atmosphäre entfernt ist, wie beim Jod (vgl. Abb. 5), Campher oder Eisenchlorid kann beim Erhitzen der Anschein erweckt werden, als ob eine Verflüssigung unter Atmosphärendruck unmöglich wäre. So schmilzt Jod bei 114° (90 mm Dampfdruck) und siedet, nachdem es geschmolzen ist, unter Atmosphärendruck bei 184° . Trotzdem läßt sich Jod an der Luft sublimieren. Das liegt daran, daß beim Erhitzen infolge der Vermischung mit Luft der Dampfdruck einer Atmosphäre vom Jod nicht erreicht wird, sondern ein anderer niederer Druck entsprechend dem Partialdruck, den das Jod je nach den Versuchsbedingungen bekommt. Ist dieser Partialdruck geringer als 90 mm, so findet beim Erwärmen an der Luft Sublimation statt.

Von besonderer Bedeutung ist das Verhalten des Wassers, wie es in der Abb. 6 schematisch gezeichnet ist. Der Tripelpunkt liegt bei $+0,0074^\circ\text{C}$ und 4,6 mm. In bezug auf das Schmelzen unter Druck wird das Wasser auf S. 198 noch behandelt werden.

Es seien noch folgende Werte einiger Stoffe für Druck und Temperatur im Tripelpunkt angeführt.

Tabelle 1. Tripelpunkte.

A. 1. Dampfdruck geringer als 1 at; Elemente.

	N	Cl	Br	J	S	Se	Zn	Cd	Ag	C
Druck in mm Hg	96,4	8,9	45	90	0,032	0,0055	0,15	0,1	0,002	—
Temperatur, $^\circ\text{C}$	—211	—103	—7	114	119	213	419	303	962	~ 4000
Siedepunkt bei 1 at, $^\circ\text{C}$. . .	—196	—34	59	185	445	688	906	766	1955	~ 5200
Kritischer Druck (at)	33,5	75	—	—	—	—	—	—	—	—
Kritische Temperatur	—147	+144	302	512	1040	—	—	—	—	~ 7500

A. 2. Verbindungen.

	CO	N_2O	NO	N_2O_4	NH_3	HCN	HCl	FeCl_3	Campher
Druck in mm Hg	117	170	168	146	45	131	103	624	354
Temperatur, $^\circ\text{C}$	—205	—163	—161	—10,8	—78	—15	—114	317	175
Siedepunkt bei 1 at, $^\circ\text{C}$. . .	—191	—88	—150	21	—33	26	—85	—	204
Kritischer Druck	35	72	71	—	112	—	83	—	—
Kritische Temperatur	—139	37	—93	—	133	—	52	—	—

B. Dampfdruck größer als 1 at.

	As	C ₂ H ₂	CO ₂	NH ₄ Cl	AlCl ₃	PH ₄ Cl	P
Druck (at)	35,8	1,25	5,1	34,5	1,8	43	43,1
Temperatur	818+	—81	—56	520	198	26	589,5
Sublimationstemperatur bei 1 at	616	—84	—79	340	180		
Kritischer Druck		62	73			73	80
Kritische Temperatur.		36	31			49	673

Die Tabelle 1 enthält unter A Angaben über einige Stoffe, deren Tripelpunkte niedriger als eine Atmosphäre sind und unter B solche, die höher sind. Außerdem sind die Siede- (bei A) und Sublimations-temperaturen (bei B) für Atmosphärendruck beigefügt. Für einige Stoffe sind die kritischen Daten hinzugefügt.

2. Druck-Temperatur-Volumen.

Für das monovariante Gleichgewicht zweier Phasen gilt, wie für alle monovarianten Gleichgewichte, die Clausius-Clapeyronsche Gleichung $T \frac{dp}{dt} = \frac{q}{\Delta v}$ (s. S. 123). Die Form der Kurve, welche die

Beziehungen zwischen Druck und Temperatur angibt, hängt also von der Wärmetönung beim Übergang der Phasen ineinander (q) und von der Volumenänderung (Δv) hierbei ab. Die Wärmetönung beim Übergang eines Stoffes von fest in flüssig und gasförmig ist stets negativ. Ferner findet stets eine Volumenvergrößerung beim Übergang von fest in gasförmig und von flüssig in gasförmig, dagegen nicht immer von fest in flüssig statt. Auf den Grenzkurven fest-gasförmig und flüssig-gasförmig, den Sublimations- und Siedekurven, steigt deswegen der Druck mit steigender Temperatur. Auch für die Grenzkurve fest-flüssig, die Schmelzkurve, ist dieses die Regel, doch gibt es Ausnahmen, bei denen das Schmelzen unter Kontraktion erfolgt (s. S. 193).

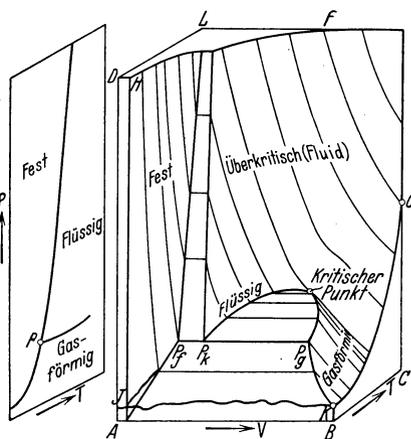


Abb. 7. Das P-T-V-Zustandsbild bei einem normalen Körper.

In der Abb. 7 ist das Verhalten, welches für Einstoffsysteme als das normale anzusehen ist, in bezug auf die drei Variablen: Druck, Temperatur und Volumen räumlich dargestellt. Sämtliche Beziehungen zwischen den drei Variablen: Druck, Temperatur und Volumen sind für einen bestimmten Stoff, der nur in einer festen Form vorkommt, in dieser räumlichen Darstellung zusammengefaßt. Im „Tripelpunkte“ sind Temperatur und Druck aller drei Phasen gleich. Das spezifische Volumen

des Flüssigen liegt in diesem Falle zwischen dem des Festen und Gasförmigen. Der „Tripelpunkt“ stellt sich also als Projektion einer Geraden in der Abb. 7 auf die P - T -Ebene dar. Die Abbildung zeigt, wie sich mit wachsender Temperatur beim Gleichgewicht flüssig-gasförmig die Volumina nähern, und im kritischen Punkte gleich werden. Das Gebiet, das zu noch höheren Drucken und Temperaturen gehört, heißt überkritisch oder fluid. Durch Druckerniedrigung gelangt man aus diesem Gebiet ohne plötzlichen Übergang in das gasförmige, durch Temperaturerniedrigung in das flüssige Gebiet. Außerdem gibt es noch zwei in der Abbildung von der invarianten Geraden ausgehende Gebiete der Zweiphasengleichgewichte fest-flüssig und fest-gasförmig, die in der räumlichen Darstellung der Abbildung durch Flächen dargestellt werden, die, seitlich projiziert, ebene Kurven des P - T -Gleichgewichtes sind.

Bivariate oder divariante Gleichgewichte ($F = 2$) sind bei einem System eines unabhängigen Bestandteils nach der Phasenregel bei Anwesenheit einer Phase vorhanden. Es lassen sich, natürlich in den gegebenen Grenzen, zwei der Größen Druck, Temperatur und Volumen ändern, ohne daß der Zustand fest, flüssig oder gasförmig zu einem andern wird. Sind Stoffe in Druck- und Temperaturverhältnisse gebracht, die ihren Aggregatzuständen nicht entsprechen (z. B. Wasser unter 0°), so befinden sie sich im metastabilen Zustande. Dieser ist gekennzeichnet durch höheren Dampfdruck, als er dem stabilen Gleichgewichte bei derselben Temperatur entspricht. Das stabile Gleichgewicht stellt sich bei metastabilen Gleichgewichten durch Impfung oder Erschütterung oft plötzlich ein.

Über den Verlauf der Schmelzkurve bei hohen Drucken und eine eventuelle Annahme eines kritischen Punktes fest-flüssig werden verschiedene Ansichten geäußert. Diese Kurve, die entsprechend der Gleichung $\frac{dp}{dT} = \frac{q}{T \cdot \Delta v}$ von der Volumenänderung und der Wärmetönung beim Schmelzen abhängt, sollte nach Wi. Ostwald bei Drucksteigerung, ähnlich der Kurve gasförmig-flüssig, bei einem anderen kritischen Punkte fest-flüssig aufhören, indem beide Größen (Volumenänderung und Wärmetönung) gleichzeitig zu Null würden. Tammann stellte dagegen die Hypothese auf, daß jede der beiden Größen für sich Null werden könnte. Dieses führte ihn dann dazu, für das feste Gebiet ein geschlossenes Flächenstück anzunehmen. Nach den Ergebnissen vieler Versuche und entsprechend den theoretischen Untersuchungen von van Laar ist jedoch anzunehmen, daß ein kritischer Punkt fest-flüssig niemals besteht. Die Grenzen setzen sich bis zu den höchsten Drucken fort. Die Kurven werden langsam steiler und die Krümmung geringer, indem sie einem konstanten Werte zustreben.

Die Abb. 8 zeigt eine Auswahl der von Bridgman untersuchten Schmelzkurven beim Schmelzen unter allseitigen Drucken bis zu 12000 kg auf den cm^2 . Es handelt sich um Stoffe, deren Schmelzpunkte mit wachsendem Druck steigt. Aus Rücksicht auf das Material, das hohe Drucke nur bei nicht zu hohen Temperaturen aushält, wurden die Stoffe so gewählt, daß sich Schmelztemperaturen unter 200° ergaben. Die Kurven haben alle gleichartiges Aussehen. Die Temperatursteigerung ist

bei einigen, z. B. SiCl_4 , größer als bei anderen. Eine Maximaltemperatur ist nicht erkenntlich. Die größte Steigerung zeigen die Schmelzkurven für Na, K oder CO_2 . Die Tabelle 2 gibt einige Zahlenwerte. Es erscheint sicher, daß alle Stoffe schließlich bei höheren Drucken normalen Verlauf der Schmelzkurve zeigen, auch solche, die in mehreren Formen vorkommen oder anfangs in der Nähe des Tripelpunktes anderen Verlauf der Schmelzkurve haben, wie Wasser, Wismut oder Gallium.

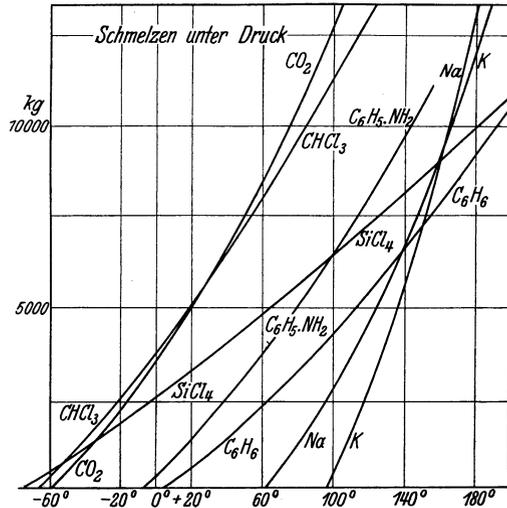


Abb. 8. Schmelzen einiger Stoffe unter Druck.

Tabelle 2. Schmelztemperaturen beim Schmelzen unter Druck.

	1 kg/cm ²	5000 kg/cm ²	10000 kg/cm ²	12000 kg/cm ²
K	62,5	126,0	167,0	179,6
Na	97,6	135,8	166,7	177,5
P (gelb)	44,2	170,5	191,9	
			(6000 kg/cm ²)	
Bi	271,0	251,9	228,8	218,3
CO_2	- 56,6	+ 21,4	75,4	93,4
SiCl_4	- 67 (?)	67,9	183,8	205,4
				(11000 kg/cm ²)
C_6H_6	5,4	114,6	190,5	204,2
				(11000 kg/cm ²)
CH_2Cl	61,0	+ 18,2	83,7	107,9
$\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$	- 6,2	+ 79,0	143,2	165,3
$\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$	5,6	105,5	184,5	198,6
$\text{NH}(\text{C}_6\text{H}_5)_2$	54,0	163,6	212,9	—
			(8000 kg/cm ²)	
CH_3Br	7,78	113,3	194,0	209,1
				(11000 kg/cm ²)
$\text{C}_6\text{H}_5\text{Br}$	- 45,5	+ 29,7	84,5	103,6
$\text{C}_6\text{H}_5\text{COC}_6\text{H}_5$	47,00	161,3	213,7	
			(8000 kg/cm ²)	
p-Nitrophenol	112,4	198,4		
		(4000 kg/cm ²)		
p-Toluidin	43,6	150,0	204,6	
			(8000 kg/cm ²)	
Methyloxalat	54,24	149,6	196,8	
			(8000 kg/cm ²)	

Werden Ebenen für konstante Werte von Druck, Temperatur oder Volumen durch den P - T - V -Körper gelegt, so ergeben sich Schnittfiguren, welche für die angenommenen konstanten Werte das Verhalten wiedergeben. In Abb. 7 sind solche Schnitte für konstante Temperaturen angedeutet, die hierfür zu den Beziehungen von Druck und Volumen führen. Das Gleichgewicht: flüssig und dampfförmig ist bekanntlich durch die van der Waals'sche Zustandsgleichung $(v-b) \left(p + \frac{a}{v^2} \right) = RT$ (s. S. 93) mit großer Genauigkeit wiedergegeben besonders dann, wenn die „Konstante“ b noch als eine einfache Funktion des Volumens behandelt wird.

Von den Ebenen, die für konstante Werte des Volumens durch das Modell gelegt werden, sind diejenigen von Interesse, die zwischen den Werten des Volumens von flüssig und gasförmig beim Tripelpunkt liegen. Bei diesen Volumina sind bis zu einer gewissen Temperatur beide Phasen flüssig und dampfförmig vorhanden. Bei Temperatursteigerung, hervorgerufen durch Wärmezufuhr, ergeben sich schließlich nur Flüssigkeiten oder Gas, je nachdem das gewählte Volumen kleiner oder größer als das kritische Volumen ist. Dieses ist z. B. von Bedeutung bei der Füllung von Stahlflaschen mit verflüssigten Gasen. Ist das vorhandene Dampfvolumen zu gering, so kann es bei Temperatursteigerung vollständig verschwinden und bei weiterer Erhöhung der Temperatur zu gefährlichen Drucken durch die die Flaschen jetzt vollständig anfüllenden Flüssigkeit führen.

Zu beachten sind die Veränderungen der Umsetzungen, die vor sich gehen, wenn bei Einstoffsystemen gleichzeitig drei Phasen zugegen sind. Es ergibt sich, daß bei Wärmezufuhr bei konstantem Volumen oder Volumenänderung bei konstanter Temperatur oder Wärmeänderung bei konstanten Drucken oder auch Volumenänderung bei konstantem Wärmeinhalt stets eine Reaktion zwischen allen drei Phasen stattfindet. Die bei diesen Vorgängen hauptsächlich eintretende Umsetzung zwischen zwei Phasen zieht immer eine solche nach sich, bei der die dritte beteiligt ist. Wird z. B. bei konstantem Volumen einem System aus Festem, Flüssigem und Gasförmigem Wärme zugeführt, so würde diese verbraucht werden können, indem das Feste schmilzt. Hierbei müßte aber das Volumen größer werden. Um dieses also bei gleicher Größe zu erhalten, muß sich etwas Gas verflüssigen. Es folgt hieraus, daß festes und gasförmiges sich in das flüssige verwandeln: $S + G = L$, also eine Umsetzung zwischen allen drei Phasen stattfindet. Ähnliches ergibt sich für die anderen angegebenen Vorgänge bei Anwesenheit aller drei Phasen.

3. Stoffe mit mehreren Modifikationen.

Für Stoffe, die in mehreren festen Modifikationen vorkommen, lassen sich Tripelpunkte verschiedener Art finden: mit nur festen Phasen, mit zwei festen Phasen und Dampf, mit zwei festen Phasen und Flüssigkeit und endlich mit einer festen Phase, Flüssigkeit und Gas im Gleichgewichte. Es können einige dieser Tripelpunkte bei einem einheitlichen Körper auch mehrfach auftreten.

Über das Verhalten derartiger Stoffe bei höheren Drucken ist folgendes zu sagen. Es gibt eine Anzahl polymorpher Körper, deren Verhalten unter Druck durch die Abb. 9 wieder gegeben wird. In diesen Fällen hat jede der verschiedenen festen Formen ein Zustandsfeld, das nur einem anderen Felde anliegt. Die bei niederen Temperaturen beständigen Formen lassen sich als solche nicht schmelzen. Sie müssen

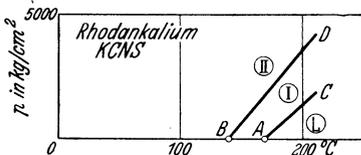


Abb. 9. P-T-Zustandsbild eines Stoffes mit zwei Modifikationen, einfachster Fall.

bei Wärmezufuhr bei allen Drucken erst in die bei höheren Temperaturen stabilen übergehen. Ein anderes Verhalten wird man bei einer Reihe von

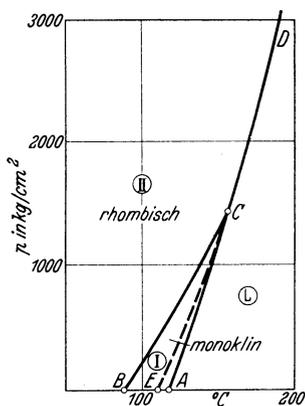


Abb. 10. P-T-Zustandsbild von Schwefel.

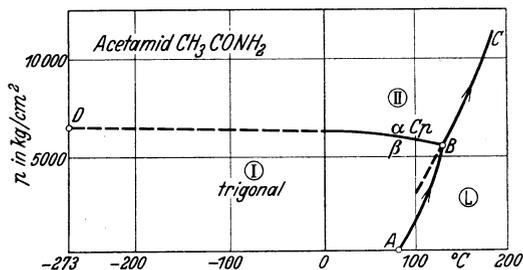


Abb. 11. P-T-Zustandsbild eines Stoffes, bei dem eine Form nur unter Druck beständig ist.

Tabelle 3. Polymorphe Körper mit zwei bei gewöhnlichem Druck beständigen Formen, ohne Tripelpunkte bei höheren Drucken.

	t °	p (kg/cm²)		t °	p (kg/cm²)
S	A	119	C ₂ Cl ₆	A	185
	B	95,4		B	71
	C	151		C	42,7
	D	190,1		D	136,3
	E	112,8		E	191,3
NH ₄ J	A	-17,6	K ₂ S	A	146,4
	B	200		B	206,4
NH ₄ Br	A	137,8	TiNO ₃	A	205
	B	202,0		B	144,6
NH ₄ Cl	A	184,3		C	75,0
	B	205,0		D	200,7
KCNS	A	171,2		E	149,1
	B	140,0	CsNO ₃	A	153,7
	C	203,3		B	207,1
	D	208,3	RbNO ₃	A	219
		B		164,4	
		C		218,6	

Körpern antreffen, von denen Schwefel ein Typus ist (Abb. 10). Hier läßt sich die zweite Form bei höheren Drucken durch Wärmezufuhr schmelzen, bei niederen muß bei stabilen Verhältnissen erst die Umwandlung in die andere Modifikation erfolgen. Es wäre möglich, daß auch der Kohlenstoff in seinen beiden Formen Diamant und Graphit diesem Typus angehört, wobei der Punkt des Gleichgewichtes beider festen Phasen mit Schmelze bei sehr hohen Drucken und Temperaturen zu erwarten wäre. Diamant müßte sich unter Wärmeaufnahme in Graphit verwandeln. Nach neueren Bestimmungen der Verbrennungswärme ist dieses aber nicht der Fall. Das System Diamant-Graphit gehört deswegen wahrscheinlich dem folgenden Typus an.

Tabelle 4. Polymorphe Körper mit zwei Formen, von denen die eine nur unter Druck beständig ist.

	t °	p (kg/cm ²)		t °	p (kg/cm ²)
Orthokresol			Phenol, C ₆ H ₅ OH		
 A	30,8	1	A	40,87	1
B	103,2	6100	B	64	2085
C	175,9	12000	C	209,2	12000
D	—273	~ 6000	D	0	1327
Acetamid, CH ₃ CONH ₂			Essigsäure, CH ₃ COOH		
A	81,5	1	A	16,68	1
B	127,0	5390	B	55,7	2100
C	173,5	11000	C	156,6	11000
D	—273	~ 6500	D	0	1074
KClO ₃			Benzol, C ₆ H ₆		
A	0	5680	A	5,43	1
B	200	7730	B	216	12500
C	—273	~ 4500			

Ein neuartiges Verhalten, auch mit einem Tripelpunkt fest-fest-flüssig, bei höheren Drucken ist für einige organische Verbindungen festgestellt. Als Beispiel ist das Verhalten von Acetamid in Abb. 11 wiedergegeben. Hier-

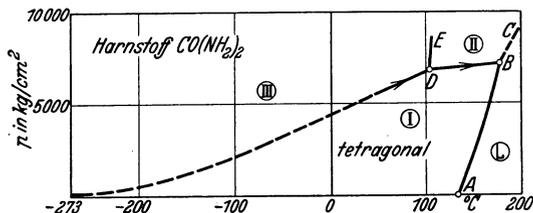


Abb. 12. Harnstoff. P-T-Zustandsbild. Drei Formen.

bei ist die zweite Modifikation nur unter Druck beständig. Sie konnte deswegen auch erst durch diese Untersuchungen aufgefunden werden. Die Tabelle 4 gibt einige Beispiele für das in Abb. 11 dargestellte Verhalten. Als Beispiel eines Stoffes mit mehr als zwei Modifikationen ist in Abb. 12 das Zustandsdiagramm des Harnstoffs wiedergegeben. Weitere Beispiele s. Tabelle 5. Aus den dort angegebenen Zahlenwerten lassen sich die Zustandsbilder konstruieren und die Gebiete abgrenzen. In verschiedenen Fällen sind die Gebiete bis zum absoluten Nullpunkt ähnlich Acetamid in Abb. 11 und Harnstoff in Abb. 12 extrapoliert.

Tabelle 5. Polymorphe Körper mit mehr als zwei Modifikationen und nur unter Druck beständige Formen.

	t°	p (kg/cm ²)		t°	p (kg/cm ²)
Silberjodid, AgJ			Tetrabromkohlenstoff, CBr ₄		
A	144,6	1	E	172,2	2750
B	99,4	2810	F	179,9	5000
C	212,3	6500	Harnstoff, CO(NH ₂) ₂		
D	-273	~ 3300	A	132,7	1
Tetrachlorkohlenstoff, CCl ₄			B	~ 1740	7100
A	-22,6	1	D	1023	6750
B	-46	1	E	~ 104	8000
C	211,9	9000	Urethan, CONH ₂ OC ₂ H ₅		
D	107,5	8700	A	47,9	1
E	178,4	12000	B	66,2	2350
F	-273	~ 4000	C	76,8	4230
Tetrabromkohlenstoff, CBr ₄			D	25,5	3400
A	94	1	E	156,7	12000
B	46,2	1	F	-273	~ 2000
C	139	550			
D	112,6	2180			

Interessante Umwandlungskurven zeigen HgJ₂, AgNO₃ und Cu₂J₂. Die Umwandlungstemperatur von HgJ₂ steigt anfangs mit dem Druck, erreicht eine Maximaltemperatur und bleibt dann dauernd rückläufig. Die Umwandlungstemperaturen von AgNO₃ und Cu₂J₂ sind von Anfang an rückläufig. Quecksilberjodid zeigt also in bezug auf die Umwandlung mit dem Druck das Verhalten, welches Tammann für das Schmelzen der Stoffe allgemein annahm. Hiermit wird irrthümlicherweise manchmal das Schmelzen unter Druck verglichen, das man bei einigen inkongruent schmelzenden Hydraten (Na₂SO₄ · 10 H₂O — NaCl · 2 H₂O — Carnallit, KCl · MgCl₂ · 6 H₂O) beobachtet hat. Doch handelt es sich hierbei um Mehrstoffsysteme und damit um etwas ganz anderes, nämlich um die Verschiebung des Gleichgewichtes zwischen zwei verschiedenen Salzen (Hydrat und Anhydrid) und Mutterlauge. Vergleichbar wäre der Vorgang nur dann, wenn das Schmelzen der Hydrate wie man sagt kongruent wäre, unter Bildung einer Flüssigkeit gleicher Zusammensetzung, wovon weiter unten noch ausführlich die Rede sein wird.

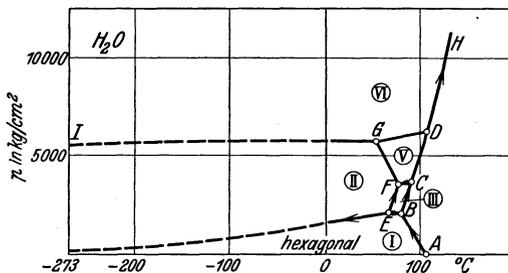


Abb. 13. P-T-Zustandsbild von H₂O.

Von ganz besonderem Interesse ist das Wasser, dessen Verhalten in Abb. 13 und 14 dargestellt ist. Es zeigt die Besonderheit, daß der Schmelzpunkt des festen Eises durch Druck erniedrigt wird. Wie die Abbildung zeigt, gibt es nach den Untersuchungen von Bridgman und Tammann

fünf verschiedene Eisarten. In der Numerierung fehlt *IV*, was sich dadurch erklärt, daß ursprünglich noch eine andere Modifikation angenommen wurde, die aber später nicht bestätigt wurde. Die Schmelzkurve hat den Verlauf *ABDFG*, wobei der Druck zunimmt. Die Untersuchung ist bis zu 20000 kg/cm^2 ausgedehnt. Die Modifikation *II* zeigt keinen Schmelzpunkt, sondern verwandelt sich beim Erwärmen unter entsprechendem Druck in andere Modifikationen, die schmelzen können. Abb. 13 ist nach tiefen Temperaturen hin ergänzt, wie es die gemachten Untersuchungen wahrscheinlich machen. Hierdurch wird

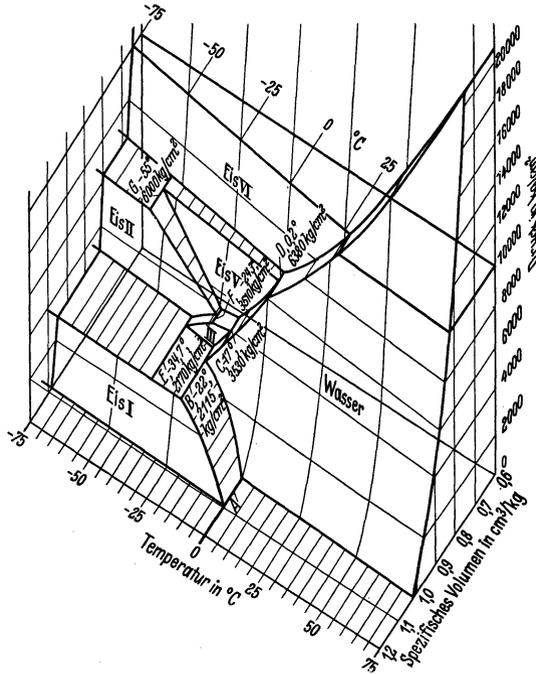


Abb. 14. *P-T-V*-Zustandsbild von H₂O.

auch das Gebiet für die Modifikation *V*, gerade wie *III*, allseitig begrenzt von anderen Gebieten. Bei niederen Temperaturen gibt es daher nur noch drei Modifikationen. Der beobachtete Verlauf der Grenze der beiden Modifikationen *I* und *II* läßt es möglich erscheinen, daß beim absoluten Nullpunkt auch noch die Modifikation *I* verschwindet. Die Schmelzkurve von Eis *VI* deutet darauf hin, daß diese Modifikation bis zu den höchsten Drucken bestehen bleibt, die damit das vorher auseinandergesetzte normale Verhalten beim Schmelzen zeigt, wonach die Schmelztemperatur mit dem Druck ständig ansteigt. In der Abb. 14 sind noch die Volumenverhältnisse außer dem Druck und der Temperatur vermerkt. Die bei höheren Drucken stabilen Modifikationen haben stets geringeres Volumen. Die Tabelle 6 gibt für Wasser und eine Anzahl anderer polymorpher Körper die gefundenen Zahlenwerte an.

Tabelle 6. Polymorphe Körper mit mehr als vier verschiedenen Formen.

	t °	p (kg/cm ²)		t °	p (kg/cm ²)
Wasser, H ₂ O			Campher	6 Formen	
A	0	1	Kaliumnitrat,		
B	-22,0	2115	KNO ₃		
C	-17,0	3530	A	127,7	1
D	+ 0,16	6380	B	128,3	115
E	-34,7	2170	C	21,3	2930
F	-24,3	3510	D	207,9	4000
G	~ -55	6000	E	214,5	9000
	76,35	20670	F	339	1
	-273	~ 5500	Ammoniumnitrat		
Ammoniumbi-			NH ₄ NO ₃		
sulfat, NH ₄ H ₂ SO ₄			A	168	1
A	147	1	B	125,5	1
E	126,2	1860	C	82,7	1
F	176,9	5660	D	32,0	1
G	193,8	10000	E	-18,0	1
Kaliumbisulfat,			F	202	1000
KHSO ₄			G	63,3	860
A	210	1	H	186,7	9020
B	180,5	1	J	169,2	9160
C	164,2	1	K	201,6	11000
E	198,6	1830	L	192,5	12000
F	218,4	3000	M	-273	~ 2000
G	118,2	2900			

Bei Stoffen mit zwei Formen, die beide im Gleichgewicht mit der gasförmigen Phase vorkommen können, unterscheidet man oft zwischen enantiotropen und monotropen Stoffen. Bei monotropen Stoffen ist eine Form herstellbar (z. B. der gelbe Phosphor), die stets der anderen Form gegenüber metastabil ist und sich von selbst oder unter Beschleunigung durch Katalysatoren in die stabile Form verwandelt. Bei den enantiotropen Stoffen hat jede der beiden festen Formen im Druck-Temperatur-Diagramm ein Flächengebiet, in dem es stabil ist. Der Übergang der bei niederen Temperaturen stabilen Form in die bei höheren stabile Form vollzieht sich immer unter Wärmeaufnahme. In dem Gebiet der bei höheren Temperaturen stabilen Form können sich metastabile Gebiete befinden, so daß hier auch metastabil die bei tieferen Temperaturen stabile feste Form auftreten kann. Dadurch erklärt sich die Erscheinung, daß ein Stoff zwei Schmelzpunkte besitzen kann, z. B. Schwefel, rhombisch 114°, monoklin 120°. Das Schmelzen des rhombischen Schwefels ist ein metastabiler Vorgang, da sich dieser schon bei 95,5° in den stabilen monoklinen verwandelt. Die Umwandlungsgeschwindigkeit ist jedoch so gering, daß rhombischer Schwefel bis zum Schmelzpunkt bestehen kann. Ebenso wie die Schmelztemperatur wird die Umwandlungstemperatur enantiotroper Stoffe in bezug auf die Veränderung mit dem Druck durch die Clausius-Clapeyronsche Gleichung (s. S. 123) beherrscht. Manchmal ist die Umwandlungstemperatur experimentell nicht auffindbar, weil sie bei einer zu tiefen Temperatur

liegt. Ein solcher Stoff kann monotrop erscheinen, der Wärmehalt der beiden festen Formen, gemessen z. B. an der Verbrennungswärme, gibt jedoch über den wahren Sachverhalt Auskunft.

Die Umwandlungstemperatur der in zwei Formen vorkommenden Stoffe kann auf verschiedene Art festgestellt werden: eine optische Feststellung ist besonders einfach dann, wenn die Farben der beiden Formen verschieden sind (z. B. Quecksilberjodid unter 126° rot, darüber gelb oder Silberjodid, unter 145° blaßgelb, darüber goldgelb). Sonst benutzt man das Polarisationsmikroskop mit einer Erhitzungsvorrichtung. Die rein thermische Methode besteht in der Aufnahme von Abkühlungs- oder Erwärmungskurven oder der Bestimmung des Volumens beim Erwärmen oder Abkühlen (s. S. 250). Bei Untersuchung der Änderungen unter Druck wird meistens die Volumänderung bei konstanter Temperatur studiert. Auch elektrische Methoden sind zur Bestimmung der Umwandlungstemperatur, ebenso wie Löslichkeitsbestimmungen anwendbar. Ferner kann die Bestimmung der Dampfspannung benutzt werden, da sie sich auch bei solchen Temperaturen un stetig ändert, wenn eine feste Form in eine andere übergeht.

4. In der Natur vorkommende Phasengleichgewichte.

Ein großartiges Beispiel eines Gleichgewichts eines Stoffes in zwei Phasen findet sich in der Natur in dem Gletschereis. Die Gletscher enthalten, Winter und Sommer, immer Eis und Wasser bei ihrer Schmelztemperatur unter dem vorhandenen Druck im Gleichgewicht miteinander. Im Sommer schmilzt durch die oberflächliche Erwärmung eine gewisse Menge des Gletschereises. Hätte der Gletscher nicht bereits die Schmelztemperatur, so würde er sich durch die eindringende Wärme auf diese einstellen. Im Winter wird der Gletscher von Schnee bedeckt und damit vor der Kälte geschützt. Nur oberflächlich wird er kälter als 0° . Aber auch im Winter liefert bekanntlich ein Gletscher Schmelzwasser. Einen Teil der zum Schmelzen erforderlichen Wärme liefert die Erde. Es läßt sich aus der geothermischen Tiefenstufe (30° für 1000 m Tiefe) und der Wärmeleitfähigkeit der Erde berechnen, daß jährlich durch die Erdwärme eine Eisschicht von 9 mm Dicke zum Schmelzen kommt. Die ständig unten zugeführte Wärme bewirkt es, daß sich der Gletscher auf die Schmelztemperatur des Eises bei dem vorhandenen Druck einstellt. Außer der Erdwärme bewirkt auch die Bewegung des Gletschers nach unten, die sich in Wärme umsetzt, die Fallwärme, ein Schmelzen des Eises. Bei einem größeren Gletscher wird hierdurch jährlich eine etwa 15 mm dicke Eisschicht geschmolzen. Von großer Wichtigkeit ist es, daß der Schmelzpunkt des Eises, wie auseinandergesetzt wurde, mit steigendem Druck sinkt. Bei Druckerhöhung kann Eis zum Schmelzen kommen und umgekehrt durch Verminderung des Druckes Wasser frieren, wenn die Temperatur dieselbe bleibt. Die Druckschwankung bewirkt die Regelation des Eises und eine Vergrößerung des Kernes des Gletschereises, das, wie bekannt, am Austritt des Gletschers von erheblicher Größe ist.

5. Anwendung in Wissenschaft und Technik.

Um konstante Temperaturen zu erhalten, wird vielfach der Schmelzpunkt einheitlicher Stoffe benutzt, wobei deren Reinheit naturgemäß Vorbedingung ist. Auch die Siedetemperaturen (z. B. Schwefel 444°) werden oftmals als Temperaturfixpunkte benutzt, wobei natürlich der Druck beim Sieden zu beachten ist. Neuerdings werden niedrigsiedende Flüssigkeiten nach Stock häufig zu genauen Temperaturmessungen benutzt. Gemessen wird hierbei der Dampfdruck kondensierter Gase. Da für diese die zugehörige Siedetemperatur genau bekannt ist, läßt sie sich unter Benutzung von Tabellen leicht angeben. Durch Anwendung verschiedener für gewöhnlich gasförmiger Stoffe, kann die Temperatur in weitem Umfange genau festgestellt werden. Diese auf Dampfdruckmessungen flüssiger Stoffe beruhenden Thermometer treten in Konkurrenz mit den elektrischen Widerstandsthermometern, die sonst für tiefe Temperaturen Verwendung finden.

Das durch das P - T -Diagramm des Wassers angegebene Verhalten oberhalb des kritischen Punktes findet neuerdings Anwendung bei der Benutzung der Hochdruckkessel (Benson-Kessel s. Bd. II, S. 221). Hierbei will man vermeiden, daß ein Sieden von Wasser eintritt, wodurch das Kesselmaterial bei den angewandten hohen Temperaturen besonders stark angegriffen wird. Deshalb wird Wasser in entsprechenden Druckrohren unter höheren Druck als dem kritischen (200 at) gebracht und auf höhere Temperatur als die kritische (365°) erhitzt. Das überkritische H_2O wird dann in einem Druckkessel auf den Arbeitsdruck (etwa 40 at) entspannt, wobei unter kontinuierlichem Übergang der gewünschte hochgespannte Dampf erhalten wird. Nach erfolgter Arbeitsleistung wird das entstandene Wasser wieder im Kreislauf verwendet. Das die Rohre besonders stark angreifende Sieden ist so vollständig vermieden. Die Arbeitsleistung erfolgt vielfach auch zweifach in Hochdruck- und Niederdruckturbinen (s. hierzu Bd. II, S. 16).

III. Zweistoffsysteme.

1. Das Modell von Roozeboom.

Für Zweistoffsysteme ergibt die Phasenregel $P + F = 4$. Für $F = 0$ ist also $P = 4$. Bei Anwesenheit von vier Phasen ist demnach das System invariant, d. h. Druck, Temperatur, die spezifischen Volumina und Konzentrationen der Phasen in bezug auf die beiden Bestandteile sind konstante Größen. Da ein Zweistoffsystem insgesamt auch mehr als vier Phasen haben kann, z. B. zwei Flüssigkeiten statt einer oder drei und mehr verschiedene feste Phasen statt zwei, so kann es in solchen Fällen auch verschiedene invariante Gleichgewichte mit vier Phasen geben. Andererseits haben zwei Stoffe, die in festem Zustande vollständige Mischbarkeit zeigen, nur eine feste Phase, mit der flüssigen und gasförmigen also insgesamt höchstens drei Phasen. In diesem Falle kann daher kein invariantes Gleichgewicht auftreten.

In einem P - T -Diagramm führt die notwendige Unveränderlichkeit von P und T für das invariante Gleichgewicht zu einem Punkte, dem

sog. Quadrupelpunkt. Zunächst soll das Verhalten eines Zweistoffsystems auseinandergesetzt werden unter Benutzung des von Roozeboom angegebenen Modells mit den Beziehungen von Druck-Temperatur-

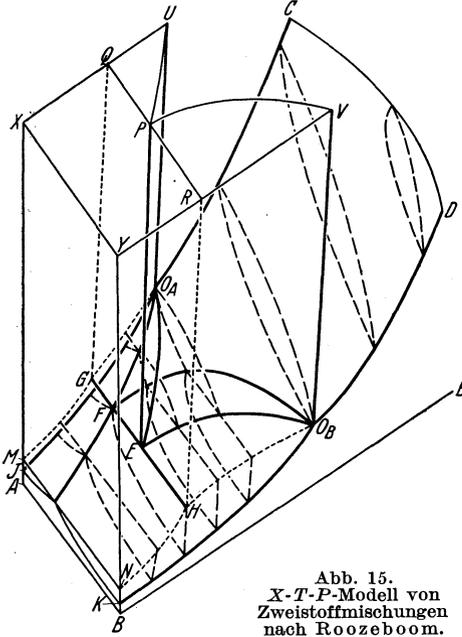


Abb. 15.
X-T-P-Modell von
Zweistoffmischungen
nach Roozeboom.

Konzentration zueinander. Dieses ist in Abb. 15 abgebildet. Es gilt für den Fall, daß Stoff *A* einen größeren Dampfdruck und einen niedrigeren Schmelzpunkt als *B* hat, kann aber leicht auf andere Verhältnisse übertragen werden. Das wichtigste Gleichgewicht in diesem Zweistoffsystem ist das invariante Vierphasengleichgewicht. Für dieses muß der Druck höher und die Schmelztemperatur niedriger sein als der der Komponenten. In dem Modell stellt die Ordinate den Druck und die Abszisse die Temperatur dar, während das Mischungsverhältnis durch die Entfernung der vorderen von der hinteren Seitenfläche zum Ausdruck gebracht wird. Das Zustandsdiagramm des Stoffes *A* ist durch die Kurven $O_A J$, $O_a C$ und $O_A U$ und das von *B*

durch $O_B K$, $O_B D$ und $O_B V$ angegeben. Im invarianten Gleichgewichte, das durch die Gerade $GFEH$ angezeigt wird, stellt der Punkt *F* die Zusammensetzung des Gases und *E* die der Flüssigkeit dar. Man erkennt aus dem Modell, wie sich die zweiblättrige Fläche flüssig-gasförmig mit sinkender Temperatur keilförmig bis zur Geraden EF vorschiebt, wie die Körper für die beiden Gleichgewichte fest-flüssig auf den beiden Flächen $GE O_A$ und $HE O_B$ aufliegen und wie die Körper für fest-gasförmig unter die drei Flächen $MNHG$, GFO_A und $HFOB$ zu liegen kommen. Für jede der einzelnen Phasen: Gas, Flüssigkeit und Fest hat man räumliche Gebiete, die von den Flächen abgegrenzt werden, die sich auf je zwei Phasen beziehen. Das Gebiet des Flüssigen geht oberhalb einer kritischen Kurve, der sog. Faltenpunktkurve CD kontinuierlich in das des Gasförmigen über. Um die Abbildung deutlicher zu machen, sind bei bestimmten Temperaturen einige senkrechte Durchschnitte gezeichnet.

Von besonderem Interesse sind die monovarianten Gleichgewichte für drei Phasen, die in der körperlichen Darstellung durch Flächen besonderer Art dargestellt sind. Bei den Dreiphasengleichgewichten fest-flüssig-gasförmig gehören immer drei Kurven zusammen: $O_A G$ (fest *A*), $O_A F$ (gasförmig) mit $O_A E$ (flüssig) oder $O_B H$ (fest *B*), $A_B E$ (flüssig) und $O_B F$ (gasförmig). Bei den Gleichgewichten fest-fest-gasförmig gehören zu-

sammen die Dämpfe der Zusammensetzung LF mit den festen Stoffen $A(GM)$ und $B(HN)$. In einer Projektion auf die P - T -Fläche ergeben diese drei zusammengehörige räumliche Kurven stets eine ebene Kurve. Es gibt drei Kurven, die in dem Punkte, der das invariante Gleichgewicht aller vier Phasen darstellt, endigen. In der Abb. 16 sind in einer P - T -Darstellung diese Gleichgewichte schematisch gezeichnet. Von Bedeutung ist besonders die von O_B ausgehende Kurve dadurch, daß sie häufig ein Druckmaximum besitzt. Die Gleichgewichte zwischen zwei Phasen miteinander sind einfacher; sie sollen zunächst behandelt werden.

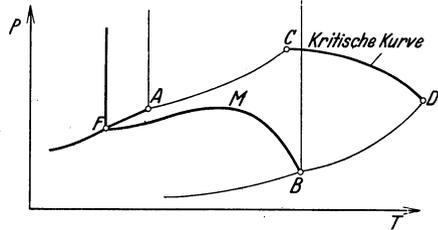


Abb. 16. P - T -Zustandsbild einfacher Zweistoffmischungen.

2. Das Gleichgewicht flüssig-gasförmig im Zweistoffsystem.

Nach der Phasenregel ist das Gleichgewicht für das Zweistoffsystem flüssig-gasförmig bivariant. Von den Faktoren, die das Gleichgewicht bedingen, lassen sich also zwei variieren. Das Gleichgewicht ist vollständig bestimmt, wenn Druck und Temperatur bestimmte Werte haben, womit dann auch die Konzentrationen für Flüssigkeit und für Dampf festgelegt sind. Zur Veranschaulichung sei als Beispiel die Abb. 17 für eine konstante Temperatur gewählt.

Das Gleichgewicht flüssig-gasförmig hat alsdann noch eine Freiheit, ist also monovariant. Werden auch konstante Werte des Druckes angenommen, so ist auch die Zusammensetzung des Flüssigen und Gasförmigen festgelegt: eine Mischung H aus x Molen B und $(1-x)$ Molen A hat bei bestimmtem Druck bestimmte Zusammensetzung (F und G) für flüssig und gasförmig. Bei Veränderung des Druckes verschiebt sich die Zusammensetzung des Gasförmigen

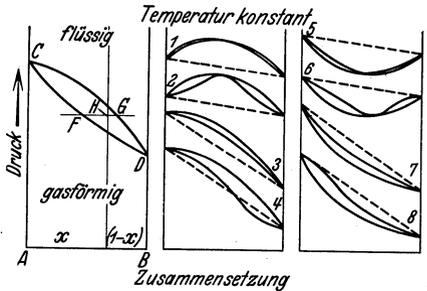


Abb. 17. Abb. 18. Abb. 19. Dampfdrucke der Gemische zweier Flüssigkeiten bei konstanter Temperatur.

und Flüssigen von F und G bis zu den Dampfdruckpunkten C und D der reinen Komponenten. Es ergeben sich zwei Kurven, die von C nach D verlaufen, von denen sich die untere auf den gasförmigen, die obere auf den flüssigen Zustand bezieht. Diese einfache Lage der Kurven mit Steigerung des Druckes von einer zur anderen Komponente ist in dem räumlichen Modell angenommen. Sie kann aber auch derart sein, daß von C und D beide Kurven gleichzeitig steigen oder fallen. Dadurch bilden sich Maxima oder Minima der Dampfdrucke aus.

Die Phasenregel für sich sagt nur etwas über die Existenz dieser Kurven aus, nicht über die Art derselben bei verschiedenen Substanzen. Um hierüber genaueres zu erkennen, müssen die van der Waalsschen Zustandsgleichungen für Gemische herangezogen werden. Es zeigt sich hierbei, daß die verschiedenen Kurvenformen abhängig von der Wärmetönung sind, die beim Mischen der beiden flüssigen Stoffe bei gleichem Druck und gleicher Temperatur auftritt, sowie von den absoluten Werten der Dampfdrucke der Komponenten. In Abb. 18 sind einige Kurvenarten gezeichnet, die ganz oberhalb der Verbindungsgraden der Dampfdrucke der Komponenten liegen. Derartige Kurven heißen positive Flüssigkeitskurven. Sie finden sich bei Stoffen, die in flüssigem Zustande bei der Mischung miteinander Wärme absorbieren. Ein Maximum (1 und 2)

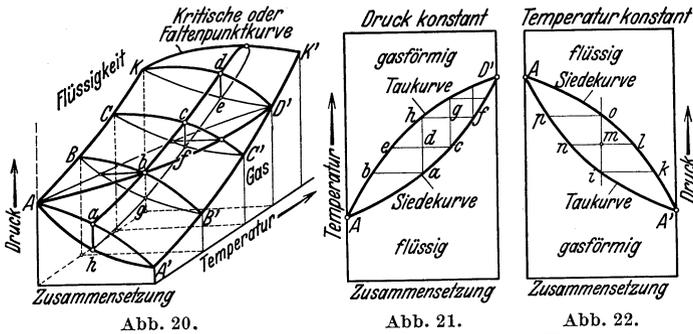


Abb. 20—22. Verdampfen zweier Flüssigkeiten bei konstanter Temperatur und Sieden bei konstantem Druck.

tritt bei geringer Druckverschiedenheit der Komponenten auf oder bei ziemlich großer negativer Mischungswärme. Negative Flüssigkeitskurven, wie sie in der Abb. 19 dargestellt sind, liegen ganz unterhalb der Verbindungsgeraden. Sie finden sich bei Stoffen, bei deren Mischung Wärme frei wird oder die Verbindungen miteinander bilden. Mit der Temperatur verschieben sich die Dampfdruckkurven nach oben oder unten. In dem angegebenen Modell von Roozeboom würden sich Kurven mit maximalen oder minimalen Dampfdrücken zu entsprechenden Flächen zusammenfügen. Es ergeben sich für einzelne Systeme Gemische mit konstantem Siedepunkt.

Die Darstellung der Beziehung des Druckes bei konstanten Temperaturen führt leicht zu einer Darstellung der Beziehungen bei konstantem Druck und Veränderlichkeit der Temperatur. Bei Benutzung des Modelles ist eine Fläche im Abstand des gewählten Druckes zu legen, wodurch sich als Schnittfiguren die gewünschten Beziehungen ergeben. In Abb. 20 ist dies noch einmal unter Bezugnahme auf den entsprechenden Teil des Modelles von Roozeboom wiedergegeben. Die Abbildungen für konstanten Druck und konstante Temperatur stehen in der durch die Abb. 21 und 22 angegebenen Beziehungen zueinander. Je höher die Siedetemperatur bei konstantem Druck, desto niedriger der Dampfdruck bei konstanter Temperatur und umgekehrt. Die

Abb. 23—28 umfassen noch einige typische Siedeerscheinungen. Besonders zu beachten sind die Kurven für Br—J, deren Einschnürung auf teilweise Bildung einer Verbindung hindeutet. Ganz deutlich ist die Bildung von Verbindungen in den Systemen $\text{SO}_3\text{—H}_2\text{O}$ (H_2SO_4) und $\text{FeCl}_3\text{—NH}_4\text{Cl}$ ($\text{FeCl}_3 \cdot \text{NH}_4\text{Cl}$).

Die Abb. 29 und 30 beziehen sich auf Dampfdrucke bei konstanter Temperatur. Die rechte Abbildung gibt die übliche Darstellung. Links ist im Quadrat dargestellt die Beziehung zwischen dem Mischungsverhältnis im Dampf und in der Flüssigkeit. Die Diagonale wird für $\text{H}_2\text{O—C}_2\text{H}_5\text{OH}$ und $\text{H}_2\text{O—HNO}_3$ in *b* und *d* durchschnitten, entsprechend den gleichen Punkten in der Abbildung rechts. Hier werden Dampf und Flüssigkeiten identisch.

Aus den beiden Kurven, die sich auf die Flüssigkeit und den Dampf beziehen, lassen sich auch leicht die Kurven für den Partialdruck der Komponente konstruieren. Für zwei typische Fälle ist dies in Abb. 31

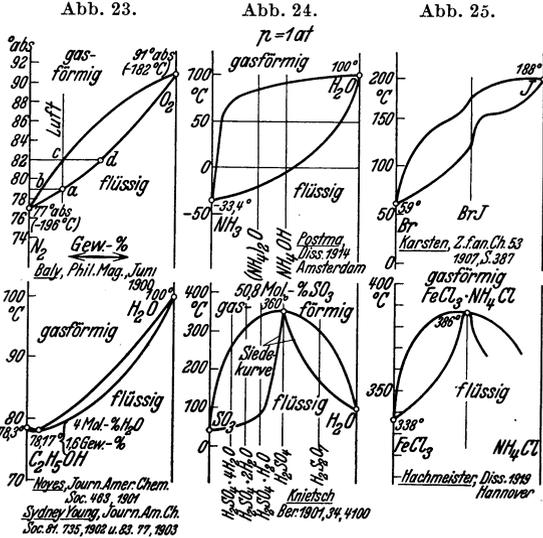


Abb. 23—28. Sieden bei Atmosphärendruck: $\text{N}_2\text{—O}_2$; $\text{NH}_3\text{—H}_2\text{O}$; Br—J ; $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH—H}_2\text{O}$; $\text{SO}_3\text{—H}_2\text{O}$; $\text{FeCl}_3\text{—NH}_4\text{Cl}$.

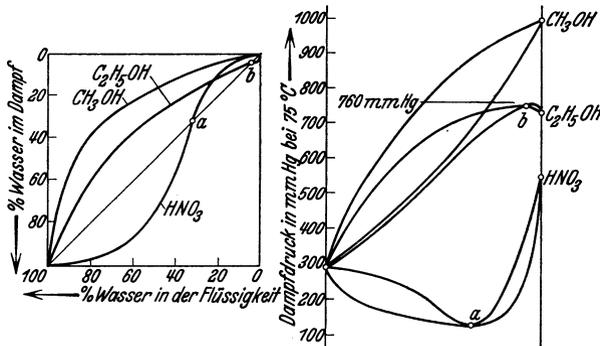


Abb. 29—30. Beziehungen von Dampfzusammensetzung zur Zusammensetzung der Flüssigkeit bei 75°.

und 32 angegeben. Besonders leicht ist der Partialdruck der Komponenten für den Punkt aufzufinden, in dem Flüssigkeit und Dampf identisch

werden. Es ist in diesem Falle nur der Gesamtdruck in diesem Punkte im Verhältnis der Zusammensetzung zu teilen, um die Partialdrucke beider Komponenten bei diesem Mischungsverhältnis zu erhalten. Notwendig ist in dieser Darstellung die Angabe des Mischungsverhältnisses in Mol.-%. Manche Forscher beschränken sich überhaupt auf Angabe der Partialdrucke. Da die andere Darstellung aber mehr gibt, kann dieses nicht empfohlen werden.

Die kritischen Erscheinungen von Zweistoffmischungen lassen sich mit Hilfe der kritischen oder Faltenpunktskurven am leichtesten

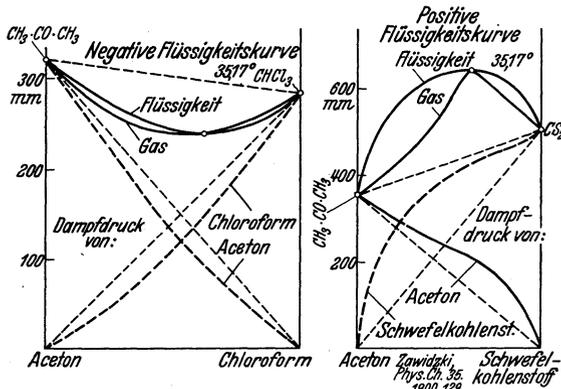


Abb. 31.

Abb. 32.

Abb. 31—32. Negative und positive Dampfdruckkurven der Gemische zweier Stoffe.

verstehen. Es ist das die Kurve, die die kritischen Punkte der beiden einfachen Systeme in dem Modell miteinander verbindet. Die Form der Kurve hängt von der Form der Dampfdruckkurven ab und kann sehr verschieden sein. In einfachen Fällen weicht die Kurve wenig von einer Geraden ab (N_2-O_2 , NH_3-H_2O , CO_2-SO_2). Es gibt aber auch Kurven mit stark gekrümmter

Form, sowohl mit einem Temperaturminimum ($CO_2-C_2H_6$, $N_2O-C_2H_6$, $C_2H_2-C_2H_6$) als auch mit einem Druckmaximum (O_2-CO_2 , CO_2-N_2O). Systeme mit Temperaturmaxima der kritischen Erscheinungen sind nur unvollständig beobachtet worden. Sie sind an das Vorkommen von Dampfdruckminima geknüpft.

Ebenen parallel zu den Seitenflächen durch das Roozeboomsche Modell gelegt, ergeben Gemische konstanter Zusammensetzung und führen in der $P-T$ -Darstellung zu zwei im kritischen Gebiet zusammenlaufenden Kurven, die sich auf das Flüssige und Gasförmige beziehen. Aus diesen lassen sich die Erscheinungen der sog. retrograden Kondensation oder Verdampfung erklären, die darin bestehen, daß bei Druck- oder Temperaturänderung in gleicher Richtung ein homogenes System zunächst heterogen und dann wieder homogen wird.

3. Das Sieden in einer Kolonne oder Säule

(s. auch Bd. III, S. 417).

Die Gleichgewichte „flüssig-gasförmig“ bei konstantem Druck wie sie im vorstehenden dargestellt sind, erklären in einfacher Weise die Wirkung einer Kolonne, wie sie zur Zerlegung von Flüssigkeitsgemischen beim Arbeiten im Großbetrieb in Anwendung ist. Das Wesen einer

Kolonne oder Säule besteht darin, daß ein ständiges Sieden in einem horizontal mehrfach unterteilten säulenartigen Apparat derart stattfindet, daß die Temperaturen auf den Kolonnenböden verschieden sind und von unten nach oben abnehmen. Zur Erklärung der Wirkung ist das Gleichgewicht flüssig-gasförmig bei konstantem Druck näher zu untersuchen. In den Abb. 33—36 ist dargelegt, wie sich die Mengen Gas und Flüssigkeit bei einem bestimmten Druck unter verschiedenen Bedingungen verteilen. Wenn für ein Flüssigkeitsdampfgemisch die Temperatur verändert wird, so daß stets Gleichgewicht herrscht, dadurch, daß das Volumen soweit geändert wird, daß der Druck konstant bleibt,

so verteilen sich Flüssigkeit und Gas ihren Mengen nach in der Art, wie es die Abb. 33 zeigt. Eine Mischung bestimmter Zusammensetzung, dargestellt durch den senkrechten Strich, zerlegt sich bei verschiedenen Temperaturen ihren Mengen nach in der Art, wie es die Größe der Kreise angibt. Sind bei einer Temperatur gleichzeitig Gas und Flüssigkeit anwesend, so läßt sich ihre Menge nach dem sog. Hebelgesetz berechnen, wie dieses unter der Abbildung vermerkt ist. Wenn die Zusammensetzung der Gesamtmenge des Gases und der Flüssigkeit bekannt ist, so verhält sich deren Menge so, wie es durch die Hebelbeziehungen unter der Abb. 33 angedeutet ist. Die Mengen Flüssigkeit und Gas sind umgekehrt proportional den Längen der Hebelarme. Hierbei ist aber zu beachten, daß bei einer Darstellung nach Mol.-% auch mit Molekulargewichten als Einheit und nicht mit absoluten Gewichten zu rechnen ist.

Bei einer fraktionierten Destillation führt man in Abständen die Dämpfe eines Gemisches ab und kondensiert sie als solche wieder. Dieses Verfahren ist durch die Abb. 34 wiedergegeben. Das sich hierbei bildende Gasgemenge auf der oberen Kurve ist durch die kleinen Kreise dargestellt. Die Flüssigkeit durchläuft jetzt in ihrer Darstellung die untere Kurve vollständig bis zum Siedepunkt der am höchsten siedenden Komponente. Ebenso bewegen sich die Dämpfe ihrer Zusammensetzung nach auf der Dampfkurve bis zur höchsten Temperatur. Insgesamt müssen natürlich die einzelnen Dampfaktionen, die zu Flüssigkeiten kondensiert wurden, die Zusammensetzung des Ausgangsgemisches haben. Dieses ist entsprechend dem Hebelgesetz unter der Abbildung angedeutet. Das umgekehrte Verhalten der fraktionierten Kondensation ist dargestellt durch

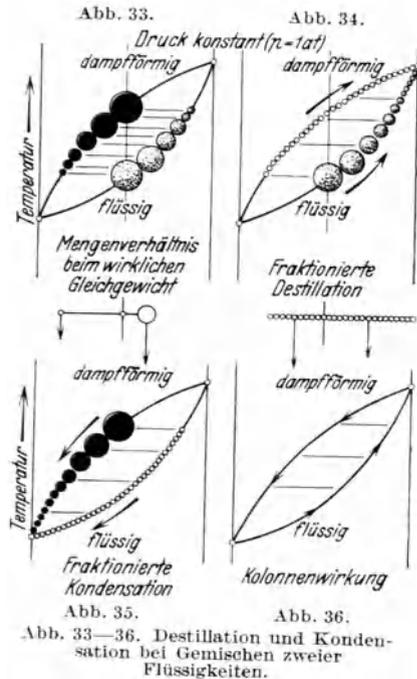


Abb. 35. In diesem Falle hat das zuletzt auftretende Gas die Zusammensetzung des am leichtesten siedenden Bestandteils. In der Kolonne endlich vollzieht sich in jedem Kolonnenboden eine Trennung von Gas und Flüssigkeit entsprechend der dort herrschenden Temperatur. Insgesamt ergibt sich dadurch bei der höchsten Temperatur eine Flüssigkeit von der Zusammensetzung des am schwersten siedenden Bestandteils, die also unten in der Kolonne abläuft, und bei der tiefsten Temperatur, also oben in der Kolonne, ein Gas von der Zusammensetzung des am leichtesten siedenden Bestandteils. In einer ideal wirkenden Kolonne bekommt man also eine vollständige Trennung der Bestandteile. Hierzu ist allerdings zu bemerken, daß in den Fällen mit maximalen oder minimalen Siedepunkten die Trennung nur bis zu den Gemischen dieser Zusammensetzungen geht. Die Zuführung der Flüssigkeit, die zerlegt werden soll, erfolgt stets am besten an einer Stelle, wo in der Kolonne die Temperatur herrscht, bei der diese Flüssigkeit zu sieden beginnt.

4. Gleichgewicht fest-flüssig mit einem Eutektikum.

Von den Gleichgewichten in Zweistoffsystemen ist das zwischen fest und flüssig am meisten untersucht worden. Im einfachsten Falle gibt es nur zwei verschiedene feste Phasen, und zwar die beiden reinen Komponenten. Diese Annahme liegt auch dem Modell von Roozeboom zugrunde. Für die nächsten Betrachtungen soll der Druck des Systems konstant und so groß angenommen werden, daß gasförmige Phasen zunächst nicht mehr in Frage kommen. Hat man zwei Phasen flüssig und fest₁ oder flüssig und fest₂, so gibt es eine Reihe von Temperaturen, bei denen diese Gleichgewichte möglich sind. Es können aber auch alle drei Phasen gleichzeitig im Gleichgewichte vorkommen, wobei das System invariant wird. Danach gibt es eine bestimmte Temperatur, bei der die beiden festen Phasen mit bestimmt zusammengesetzter Flüssigkeit im Gleichgewichte sind. Diese Mischung heißt, da sie nach dem Erstarren ein inniges Gefüge hat, die eutektische Mischung. Um etwas Genaueres über die Gleichgewichtskurven für die Flüssigkeit zu erfahren, muß man die thermodynamischen Beziehungen und die Zustandsgleichung für binäre Mischungen heranziehen. Nach van Laar wird die Sättigungs- oder Löslichkeitskurve bestimmt durch die Schmelzwärme und Schmelztemperatur der reinen Bestandteile, sowie durch die Mischungswärme der flüssigen Komponenten. Wird letztere vernachlässigt, so hat man die einfache Formel der idealen Schmelzkurve

$$-1(x) = Q/2 T_0 (T_0/T - 1),$$

wobei sich x auf die Zusammensetzung in Mol.- bzw. Atom-%, T auf die variable Temperatur, T_0 die Schmelztemperatur und Q die Schmelzwärme der betreffenden Komponente bezieht. Das Schmelzdiagramm ist dann durch Abb. 38 dargestellt. Die Abbildung gibt gleichzeitig das Sieden für den normalen Fall an. Aus obiger Formel folgt für kleine Werte für x die bekannte van't Hoff'sche Formel für die Gefrierpunktniedrigung [wobei $-1(x)$ gleich x]: $T_0 - T = 2 T_0 T/Q \cdot x \cong 2 T_0^2/Q x$.

Sehr viele Stoffe mischen sich in dieser Art unter Bildung eines Eutektikums. Es gibt hierfür viele Beispiele: bei Metallmischungen, bei Mischungen zweier Salze, organischer Stoffe anderer Systeme.

Bei den bisherigen Darstellungen ist stets das Mischungsverhältnis der Komponenten in Prozenten gewählt. Die Abb. 37 enthält das System

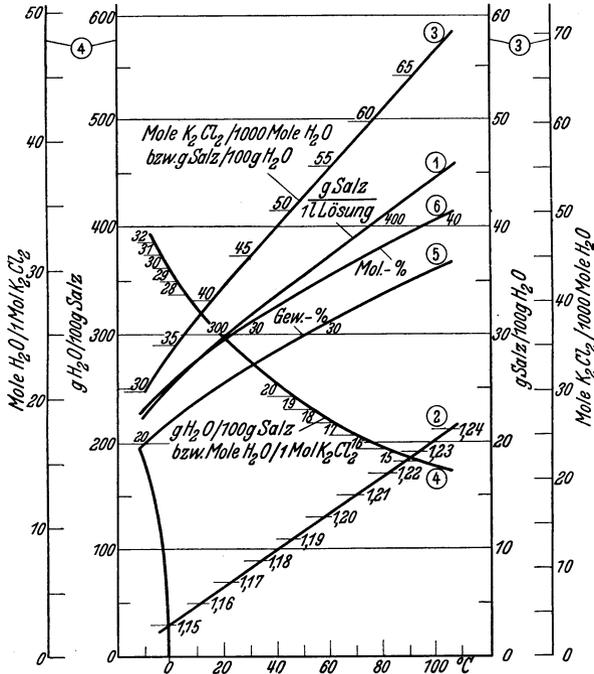


Abb. 37. Verschiedene Darstellungen der Löslichkeiten.

$KCl-H_2O$, also ein System aus Wasser und Salz. In diesem Fall ist das Mischungsverhältnis (die Konzentration) in verschiedener Art angegeben: in Gew.-% (V) und Mol.-% (VI), in g und Mole Wasser auf 100 g oder Mole Salze (IV), in g und Mole Salz auf 100 g oder Mole Wasser (III) und endlich noch in g Salz im l Lösung (I). Diese in der Technik häufigste Darstellung erfordert noch eine Angabe der spezifischen Gewichte (II), die ebenfalls in der Abbildung vermerkt ist. Alle diese Darstellungen werden benutzt. Einige werden noch genauer behandelt werden.

5. Das Gleichgewicht fest-flüssig-dampfförmig.

Die angegebenen Schmelzkurven beziehen sich auf so hohen Druck, daß dabei die Bildung dampfförmiger Gemische nicht mehr möglich ist. Es wird in vielen Fällen praktisch nicht oder nur sehr schwer möglich sein, den Dampfdruck so zu erniedrigen, daß auch dampfförmige Gemische auftreten. Geht man aber mit dem Druck so weit herunter, daß sich

Dampf bilden kann, der als dritte Phase zu dem festen und gasförmigen hinzukommt, so kommt man zu den monovarianten Gleichgewichten fest-flüssig-gasförmig, wie es Roozebooms Modell angibt.

In der Abb. 43 ist für zwei Stoffe NH_4Cl und HgCl_2 , die bereits bei ziemlich niedrigen Temperaturen meßbare Dampfdrucke haben und nur unter Druck schmelzen, das Verhalten angegeben. Das P - T - X -Modell, das sich nach den Versuchsergebnissen konstruieren läßt, ist auf die X - T -Ebene projiziert. Es gibt in diesem System oberhalb 225°

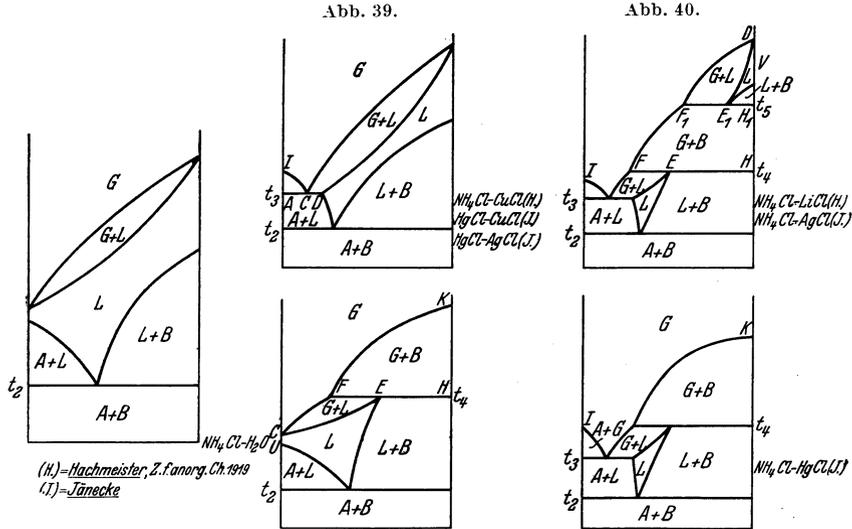


Abb. 38—42. Änderung der Gleichgewichte fest-flüssig-gasförmig zweier Stoffe mit der Temperatur.

Gleichgewichte zwischen fest-flüssig-dampfförmig, wobei bei Anwesenheit von festem HgCl_2 und NH_4Cl die beiden zusammengehörenden Flüssigkeits- und Dampfcurven die von den Schmelzpunkten nach unten bis zu eutektischen Geraden verlaufenden Kurven sind. Bei höheren Temperaturen sind die Versuche in Druckgefäßen anzustellen. Oberhalb der Tripelpunkt drucken der Komponenten ein Sieden der flüssigen Gemische statt. Unterhalb der eutektischen Temperatur sublimieren die Gemische bei niederen Drücken, wie es die Abbildung zeigt. Die Gleichgewichte, die sich für den Dampfdruck von einer Atmosphäre bei den verschiedenen Temperaturen ergeben, sind in der Abbildung besonders vermerkt.

Die Abb. 38—42 enthalten, schematisch wiedergegeben, das Verhalten von Salzpaaren, bei denen das eine Salz (NH_4Cl oder HgCl_2) bei Atmosphärendruck sublimiert, da deren Tripelpunkt druck höher als 1 at ist. Für die in Abb. 40 dargestellten Systeme mit LiCl und AgCl sind die Siedecurven und Schmelzkurven in zwei Teile zerfallen, bei den zuerst wiedergegebenen Systemen sind sie kontinuierlich.

Bei Systemen aus Wasser und Salzen kommt es sehr häufig vor, daß der eine Bestandteil (z. B. Salz) beim Schmelzen nur sehr geringen Dampfdruck besitzt. In solchen Fällen muß die Dreiphasenlinie: festes Salz, gesättigte Lösung, Dampf im P - T -Diagramm einen maximalen Dampfdruck bei einer Temperatur aufweisen, die dem Schmelzpunkt des Salzes naheliegt. In der Abb. 44 ist für Lösungen von NH_4NO_3 in Wasser der Dampfdruck der gesättigten Lösung in bezug auf die Temperatur wiedergegeben. Die Sättigungskurve erstreckt sich bis zum reinen Ammonitrat und hat bei 125° einen Maximaldruck von 0,258 at.

Die sehr interessanten kritischen und retrograden Erscheinungen, die bei Gemischen zweier Stoffe auftreten können,

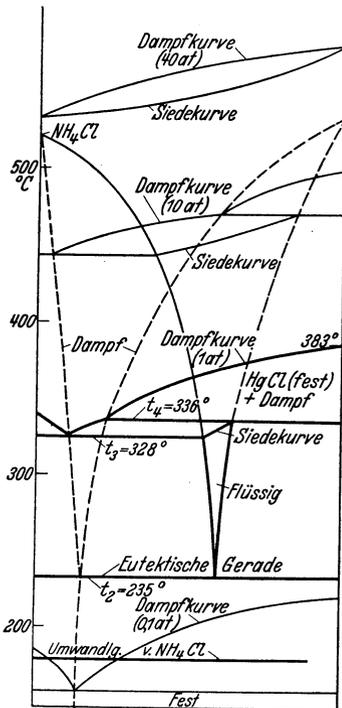


Abb. 43. NH_4Cl — HgCl bei verschiedenen Drucken und Temperaturen.

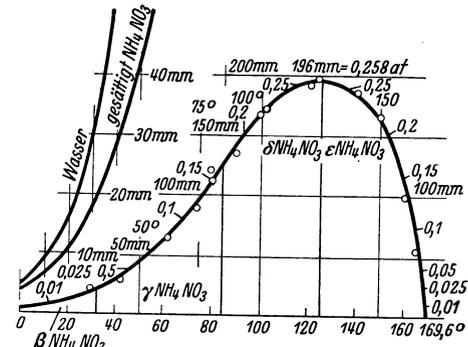


Abb. 44. P - T -Zustandsbild von H_2O — NH_4NO_3 .

bei denen der eine eine höhere Schmelztemperatur hat als die kritische Temperatur des anderen ist, sind von Smits theoretisch und praktisch (Äther-Anthrachinon) untersucht worden. Sie finden sich bei solchen binären Systemen, in denen der kritische Punkt der einen Komponente tiefer liegt als der Schmelzpunkt der anderen. In diesem Falle durchschneiden sich die kritische Kurve und die Löslichkeitskurve. Auf ein weiteres Eingehen muß hier verzichtet werden.

6. Bildung zweier Flüssigkeiten bei Zweistoffsystemen.

Mischen sich zwei Stoffe im flüssigen Zustande nur in beschränktem Maße (z. B. Zink mit Blei oder Äther mit Wasser), so gibt es im Zweistoffsysteme fünf Phasen: fest₁-fest₂-flüssig₁-flüssig₂-gasförmig. Dieses kann die Bildung zweier verschiedener invarianter Gleichgewichte veranlassen. Die Abb. 45 gibt Auskunft über das Verhalten, wenn der Druck so hoch gewählt wird, daß gasförmige Zustände nicht in Betracht kommen. Die

Abbildung, bei der die Temperatur Ordinate ist, gilt etwa für zwei sich in flüssigem Zustande nicht völlig mischende Metalle. Die beiden invarianten Temperaturen entsprechen den Gleichgewichten zwischen Flüssigkeit *G* und den beiden festen Stoffen bei der Temperatur von *FGH* und den Gleichgewichten zwischen festem *B* und den beiden Flüssigkeiten *C* und *D* der Temperatur von *CDE*.

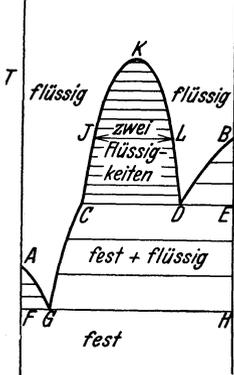


Abb. 45.
Zweistoffsystem mit
zwei Flüssigkeiten.

Im Gegensatz zu den früher erörterten mit vollständiger Mischbarkeit der flüssigen Mischungen, das durch Abb. 38 dargestellt ist, besteht außerdem das Gebiet *CDK*, das sich auf die gleichzeitige Anwesenheit zweier Flüssigkeiten bezieht. Das Gleichgewicht zwischen zwei Flüssigkeiten ohne Bodenkörper ist bei bestimmtem Druck monovariant. Die Gleichgewichte flüssig-flüssig sind daher bei verschiedenen Temperaturen möglich. Sie sind in der Abbildung durch die Kurven *CJK* und *DLK* dargestellt. Bei der kritischen Temperatur *K* sind beide Flüssigkeiten zu einer geworden, so daß es bei höheren Temperaturen nur noch eine Flüssigkeit im System gibt. Die Abb. 46—48 geben das Verhalten wieder bei Berücksichtigung der gasförmigen Phase. Die Abb. 46 stellt die Beziehung dar im

Verhältnis zur Temperatur für Gemische aus Phenol und Wasser. Der zugehörige Dampf ist stets reicher an Phenol als die beiden Flüssigkeiten. Anders ist es bei dem System aus Äther und Wasser nach Abb. 47, wo der Dampf seiner Zusammensetzung nach zwischen den beiden Flüssigkeiten liegt. In der Abb. 48 ist ein System angegeben mit einem

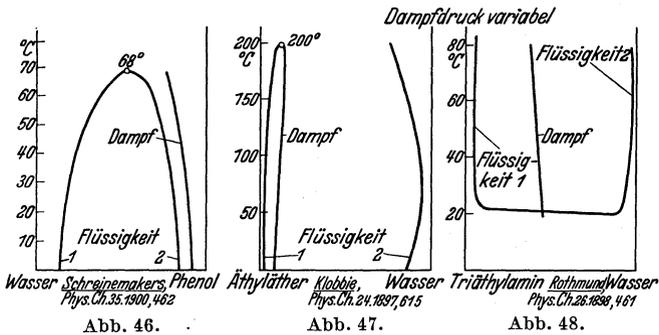


Abb. 46—48. Entmischung dreier Flüssigkeitsgemische mit der Temperatur.

unteren kritischen Punkt. Der Dampf der Gemische von Triäthylamin und Wasser liegt wie bei Äther-Wasser seiner Zusammensetzung nach zwischen den beiden Flüssigkeiten. Bei den Gleichgewichten steigt der zugehörige Dampfdruck mit der Temperatur.

Sehr anschaulich ist die Darstellung der Gleichgewichte für konstante Temperaturen und veränderlichen Druck. Da das System der drei Phasen im binären System monovariant ist, hat der Dampfdruck bei

jeder Temperatur eine bestimmte Größe. Die Abb. 49 und 50 geben in dieser Art das Verhalten beschränkt mischbarer Flüssigkeiten wieder. Das System Wasser-Phenol ist noch dadurch ausgezeichnet, daß es eine Flüssigkeit (B) gibt, die mit ihrem zugehörigen Dampf gleiche Zusammensetzung hat. Die Abb. 51 und 52 beziehen sich auf die gleichen Systeme in anderer graphischer Darstellung. Diese wird benutzt, um Zusammensetzung von Flüssigkeiten und von Dampf für konstante Temperaturen in Beziehung zueinander anzugeben. Ein Punkt der Kurve entspricht einem bestimmten Mischungsverhältnis des Dampfes (Ordinate) und der Flüssigkeit (Abszisse). Eine waagerechte Gerade bedeutet, daß der Dampf für die beiden im Gleichgewicht befindlichen Flüssigkeiten die gleiche Zusammensetzung hat. Es ist durch eine S-förmige Kurve noch angegeben, wie im metastabilen und labilen Gebiet Flüssigkeit und Dampf zusammengehören könnten. Das höchst interessante Verhalten der beschränkten Mischbarkeit zweier Flüssigkeiten ist theoretisch sehr eingehend untersucht worden. Es sind Modelle der Beziehungen zwischen Druck, Temperatur und Zusammensetzung ($P-T-X$) konstruiert, aus denen sich das Verhalten sehr anschaulich ablesen läßt.

Die teilweise Mischbarkeit organischer Flüssigkeiten ist eine ziemlich häufig zu beobachtende Erscheinung. In der Abb. 53 sind 20 Flüssigkeiten im Kreise vermerkt. Diese sind: 1. Hexan; 2. Äther; 3. Aceton; 4. Isobutylalkohol; 5. Terpentinöl; 6. Paraffinöl; 7. Benzol; 8. Pyridin; 9. Wasser; 10. Toluidin; 11. Anilin; 12. Phenol; 13. Nitromethan; 14. Furfurol; 15. Nitrobenzol; 16. Glycerin; 17. Schwefelkohlenstoff; 18. Chloroform; 19. Tetrachlorkohlenstoff; 20. Formamid. Diejenigen Punkte, die durch

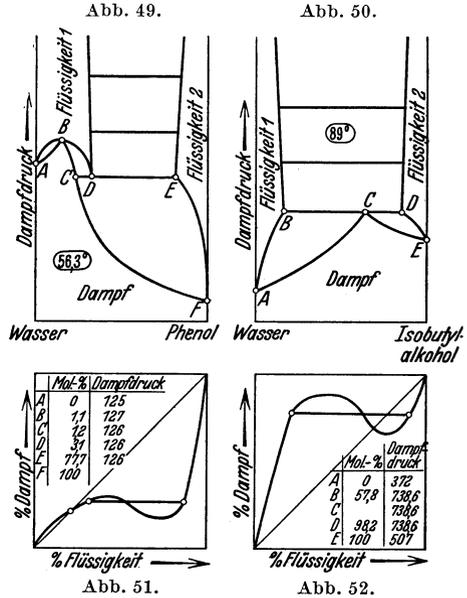


Abb. 49—52. Doppelte Darstellung der Beziehungen zwischen Flüssigkeit und Dampf bei Entmischungen.

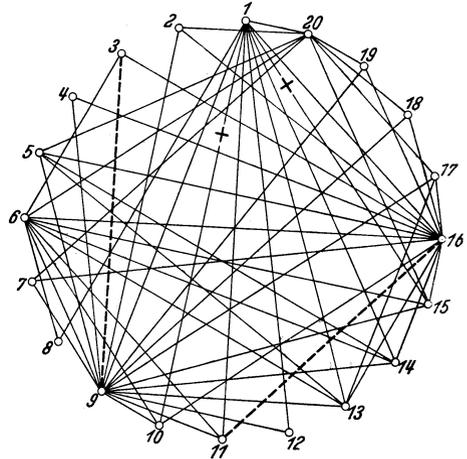


Abb. 53. Bildung zweier Flüssigkeiten bei 20 verschiedenen Flüssigkeiten.

Gerade verbunden sind, sollen andeuten, daß bei gewöhnlicher Temperatur nur teilweise Mischbarkeit besteht. Bei den mit einem Kreuz vermerkten Geraden muß die Temperatur unter Zimmertemperatur erniedrigt werden, bei den gestrichelten Geraden muß ein Salz hinzugesetzt werden, damit Entmischung auftritt. Die Abbildung enthält etwa 50 binäre Flüssigkeitsgemische, die nur teilweise mischbar sind. Die Salze, die den Gemischen 3—9 zugesetzt wurden, sind beispielsweise K_2CO_3 oder K_3PO_4 . Bei 11—16 ist NH_4Cl das hinzuzusetzende Salz.

7. Gleichgewichte fest-flüssig in Zweistoffsystemen mit Mischkristallen und Verbindungen.

Bei den weiteren Untersuchungen dieser Gleichgewichte soll die Dampfphase vernachlässigt werden. In vielen Fällen ist es überhaupt

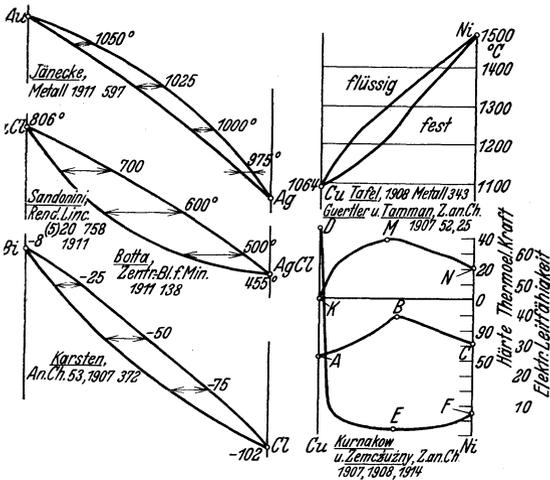


Abb. 54. Abb. 55. Schmelzerscheinungen zweier Stoffe, die in jedem Verhältnis Mischkristalle bilden.

schwer, den Druck so gering zu machen, daß sich Dampf bildet. Hat man zwischen den beiden festen Phasen eine ununterbrochene Reihe von Mischkristallen (z. B. bei Silber-Gold, Natriumchlorid - Kaliumchlorid, Brom-Chlor), so ist vom Standpunkt der Phasenregel das Verhalten durchaus mit dem Sieden von Flüssigkeiten bei konstantem Druck zu vergleichen. Beide Phasen erstrecken sich ihrer Zusammensetzung nach ununterbrochen von dem einen Bestandteil zum andern

(Abb. 54). Eine nähere Untersuchung mit Hilfe des thermodynamischen Potentials unter Benutzung von Zustandsgleichungen hat gezeigt, daß Kurven mit einem Schmelzpunktmaximum nicht vorkommen. Es gibt daher nur zwei verschiedene Fälle: Kurven mit Minimum der Temperatur und ohne solches. Aus den Kurven folgt das Verhalten beim Schmelzen und Erstarren, das demnach dem beim Verdampfen durchaus ähnlich ist. Daraus geht hervor, daß die Phasenlehre manchmal ganz verschiedene Erscheinungen unter denselben Gesichtspunkt bringt.

Isomorphe Mischungen zeigen in vielen Fällen, besonders wenn ein Minimum der Schmelztemperatur besteht, Entmischungsercheinungen in den erstarrten Gemischen, die theoretisch eingehend von van Laar untersucht wurden. Die einheitlichen Mischkristalle zerfallen bei Temperaturenniedrigung in zwei Mischkristalle, die den beiden Komponenten

nahe stehen. Dies kann so weit gehen, daß bereits bei gewöhnlicher Temperatur praktisch nur die reinen Komponenten bestehen. Bilden sich im Zweistoffsysteme zwei Arten von Mischkrystallen, so ist ein invariantes Gleichgewicht dieser Flüssigkeit (und Gase) möglich, wobei zwei Fälle zu unterscheiden sind. Entweder bildet sich ein sog. Übergangspunkt (z. B. Cadmium-Quecksilber oder Silbernitrat-Natriumnitrat) oder aber ein eutektischer Punkt (z. B. Kupfer-Silber), wobei die festen Phasen Mischkrystalle und nicht die reinen Komponenten sind. Die Fälle sind schematisch dargestellt in den Abb. 56 und 57 sowie 58 und 59. Die schraffierten Teile zeigen die Gebiete an, innerhalb derer homogene Mischkrystalle möglich sind. Das Verhalten beim Schmelzen und Erstarren kann aus den Abbildungen leicht abgeleitet werden. Bei der oberen Abbildung ist das Verhalten einer Mischung etwa von der Zusammensetzung HJK von besonderem Interesse. Diese ist oberhalb H flüssig und unterhalb K fest. Zwischen HJ besteht Gleichgewicht zwischen der Flüssigkeit HE und Mischkrystallen β . Innerhalb JK herrscht Gleichgewicht zwischen der Flüssigkeit auf EA und Mischkrystallen α . Nur bei der invarianten Temperatur EJC kann eine Flüssigkeit (C) mit einem bestimmten Mischkrystall β der Zusammensetzung (D) und einem anderen α (C) im Gleichgewicht sein. Dieses bedingt folgendes Verhalten beim Erstarren: Nach der ersten Ausscheidung von Mischkrystallen β verändern sich diese und die Flüssigkeit bis D und E , dann tritt bei konstanter Temperatur unter Aufzehrung von β (D) der Mischkrystall α (C) auf und erst wenn alles β (D) verschwunden ist, ändern sich α (C) und Flüssigkeit E mit sinkender Temperatur so lange, bis der Mischkrystall α die Zusammensetzung K erlangt hat, wonach die Mischung vollständig fest geworden ist. Ein zu rasches Abkühlen verhindert die Einstellung vollständiger Gleichgewichte. In den erstarrten Schmelzen finden sich alsdann Bestandteile, die bei vollständigem Gleichgewicht nicht auftreten können. Von besonderem Interesse sind auch noch die Kurven CF und DG , welche die Gebiete der Mischkrystalle begrenzen. Sie zeigen, daß auch hier im festen Zustande bestimmte Gemische Entmischung zeigen. Legierungen solcher Zusammensetzung haben technisch oft große Bedeutung, weil sie vergütbar sind, wenn die Temperaturen der Entmischungskurven langsam durchlaufen werden. Sie sind nicht geradlinig wie in den Abb. 56 und 57, sondern zeigen bei höheren Temperaturen meist eine stärkere Krümmung.

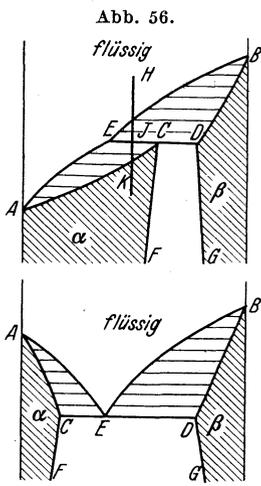


Abb. 56—57. Die beiden Fälle der Bildung von zwei Arten Mischkrystalle.

Den Fall eines Eutektikums beim Auftreten von Mischkrystallen zeigen Abb. 57 und 59. Das Verhalten ist zum Teil gleich dem beim Auftreten einer ununterbrochenen Reihe von Mischkrystallen. Zum Teil ist es gleich dem früher auseinandergesetzten mit einfachem Eutektikum

ohne Mischkristalle. Die Grenzkurven der Entmischung im festen Zustande sind auch hier von Bedeutung. Wird die Mischkristallbildung verschwindend klein, so geht dieses System vollständig in das mit einfachem Eutektikum ohne Mischkristalle (Abb. 62) über. Die Abb. 61 gibt noch das Verhalten zweier Stoffe wieder, die sich flüssig nur in beschränktem Umfang mischen (vgl. Abb. 45), dabei aber Mischkristalle bilden. Die metastabilen Zustände fest-fest und flüssig-flüssig sind punktiert gezeichnet.

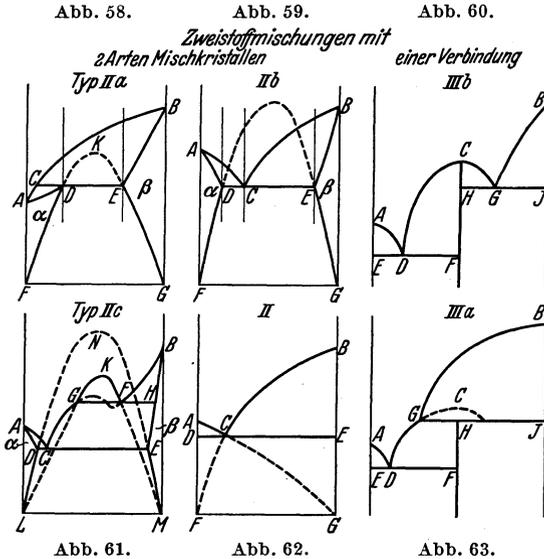


Abb. 58—63. Die verschiedenen Arten von Zweistoffmischungen in bezug auf die Gleichgewichte fest-Flüssig.

im anderen Falle zwei Eutektika (D und G). Die kongruent schmelzende Verbindung hat den Schmelzpunkt C . In diesem Falle kann die Abbildung durch eine Senkrechte CDG in zwei Teile zerlegt werden, die für sich zu betrachten sind und zwei Systeme mit Eutektikum ergeben. Dies ist aber nur der Anschaulichkeit wegen zulässig, da das System $A-B$ als ein Ganzes, zu dem die Verbindung hinzu gehört, aufzufassen ist. Je geringer die Dissoziation der Verbindung beim Schmelzen ist, um so ausgeprägter ist das Schmelzpunktmaximum. Die Bildung derartiger Verbindungen kann in einem System sich wiederholen. In den folgenden Abbildungen sind einige Beispiele angegeben, bei denen die eine Komponente Wasser ist. So bilden sich zwischen HNO_3 und H_2O (Abb. 65) die Verbindungen im Molekülverhältnis $1:3$ und $1:1$. Zwischen SO_3 und H_2O (Abb. 64) gibt es die Verbindung $\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_7$, H_2SO_4 und die Hydrate von H_2SO_4 mit $1 \text{ H}_2\text{O}$, $3 \text{ H}_2\text{O}$ und $4 \text{ H}_2\text{O}$. Alle diese schmelzen kongruent. Die Bildung der Verbindung mit $3 \text{ H}_2\text{O}$ kann auch unterbleiben, wodurch ein Eutektikum zwischen den Nachbarhydraten auftritt. Abb. 67 zeigt das System $\text{FeCl}_3-\text{H}_2\text{O}$ mit seinen vielen Hydraten an, die auch sämtlich

einen kongruenten Schmelzpunkt haben. Sie zeigt, von welcher Kompliziertheit die gesättigten Lösungen von Salzen infolge der Bildung von Hydraten sein können. Während bei sehr vielen Salzlösungen die Sättigungskurven bis zum Schmelzpunkt fortlaufen, ist dieses bei einigen anderen Salzen, besonders Sulfaten anders. Ein solches Verhalten ist in Abb. 66 abgebildet. Die Lösungen von Na_2SO_4 werden mit wachsender Temperatur schließlich bei der Bildung der monoklinen Form rückläufig und führen zu kritischen Erscheinungen in Gegenwart von Wasser. In diesem Falle bildet sich außerdem eine inkongruent schmelzende Verbindung mit 10 H_2O (Glaubersalz) und eine in Lösung stets metastabile mit 7 H_2O .

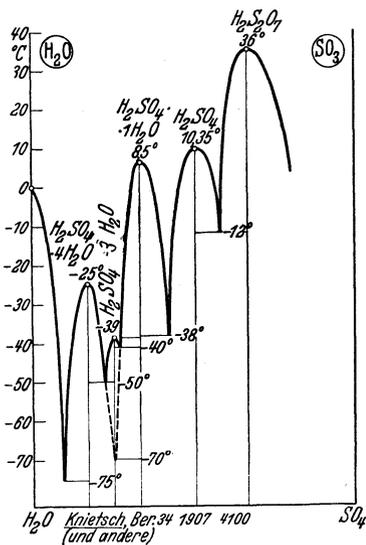


Abb. 64.

Abb. 64—65. $\text{H}_2\text{SO}_4\text{—H}_2\text{O}$; $\text{HNO}_3\text{—H}_2\text{O}$.

Vielfach ist es von Interesse, außer den Schmelzerscheinungen auch die Bildung von Dampf zu berücksichtigen. Besonders bei Systemen mit Wasser ist dieses von Bedeutung. In den Abb. 68—80 ist für ver-

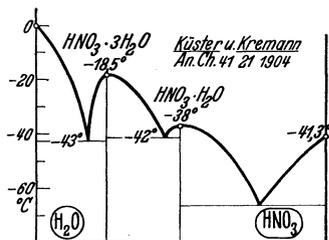


Abb. 65.

schiedene Beispiele der Dampfdruck vermerkt und die Zusammensetzung des Dampfes dargestellt. Auf der linken Seite gehören immer zwei Abbildungen zusammen. ① und ② gehören zu Systemen mit einfachem Eutektikum. ③ bis ⑥ gehören zu solchen mit kongruent und inkongruent schmelzenden Hydraten. Durch die Abbildungen sind sieben Schnitte bei konstanten Temperaturen gelegt, für welche auf der rechten Seite der Abbildung das Verhalten in bezug auf Druck und Zusammensetzung vermerkt ist. Es sind das die sieben möglichen Fälle, die sich für die Isothermen ergeben.

Das Auftreten von Mischkrystallen beobachtet man bei Metalllegierungen häufiger als bei Systemen aus Salzen. Hierdurch wird vielfach das Verhalten von Zweistoffmischungen kompliziert. Von großer Wichtigkeit ist dieses z. B. bei den Eisen-Kohlenstofflegierungen, deren Verhalten durch die Abb. 81 wiedergegeben ist. Es kann sich hier durch Zerlegung eines einheitlichen Mischkrystals ein sog. Eutektoid (Perlit) bilden, das verschiedene Übergangsformen mit dem Misch-

krystall (Austenit) zeigt, die besondere Bedeutung haben (Martensit, Troostit, Osmondit).

Dieses System ist nicht nur technisch von größter Bedeutung, sondern auch wissenschaftlich höchst interessant. Es kann als bewiesen gelten, daß sich zwei Systeme überlagern: das stabile Eisen-Kohlenstoffsystem, dargestellt in der Abbildung durch die punktierten Linien und das metastabile Eisen-Zementitsystem. Das metastabile System läßt sich verhältnismäßig leicht in das andere System umwandeln. Die Kurven FH und GJ sollen sich auf die primäre Ausscheidung von Kohlenstoff bzw.

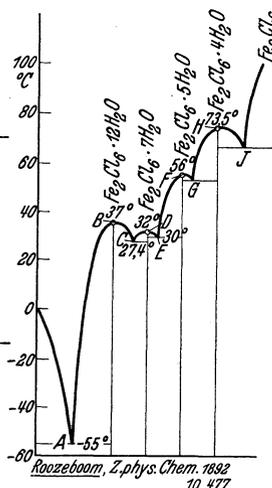
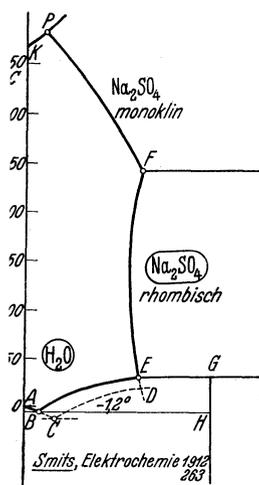


Abb. 66.

Abb. 67.

Abb. 66—67. $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{—H}_2\text{O}$; $\text{FeCl}_3\text{—H}_2\text{O}$.

Zementit beziehen. Die Kohlenstoffkurve ist nicht genau bekannt. Das Eutektikum mit dem Namen Ledeburit enthält nach dem Erstarren Zementit und ist das gewöhnliche Gußeisen. Wie bei Legierungen häufig, bilden sich Mischkristalle, in diesem Fall durch Aufnahme von Kohlenstoff in der γ -Form des Eisens. Das Gebiet wird mit wachsender Temperatur größer. Die anderen Formen des Eisens nehmen Kohlenstoff in viel geringerem Umfang zu Mischkristallen auf. Die γ -Form ist ausgezeichnet durch flächenzentrierte Anordnung der

Atome im „Gitter“. Dieses ergibt die dichteste, kubische Kugelpackung der Fe-Atome. Die drei anderen Formen zeigen das sog. innenzentrierte Gitter. Die β -Form, die sich hauptsächlich durch die Änderung der magnetischen Eigenschaften beim Übergang in die γ -Form äußert, wird vielfach nicht als besondere Modifikation betrachtet. Wie die Abbildung zeigt, führt die Umwandlung der Eisen-Kohlenstoff-Mischkristalle zu einer besonderen wichtigen Mischung, dem Perlit. Wegen ihrer Ähnlichkeit mit einem Eutektikum bezeichnet man derartige Mischungen als eutektoid. Diese Mischung mit 0,8% C kann Übergangserscheinungen zeigen, die besondere Namen erhalten haben. Die Härte der Mischkristalle und sonstige wichtige Eigenschaften lassen sich in weitem Umfang dadurch ändern, daß man durch entsprechende Abkühlung oder Erwärmung gewisse Zustände fixiert. Durch Zusätze dritter Metalle können sie noch weiter beeinflußt werden. Bei Legierungen des Eisens mit anderen Metallen ist es stets von größter Bedeutung, ob sich Mischkristalle bilden oder nicht. Gerade Eisen bildet in weitem Umfang Mischkristalle mit anderen Metallen. Dieses ist mit ein Grund für seine große Bedeutung.

Von Interesse ist es, daß beide Formen des Eisens sich derart verhalten. Mit Cr bildet z. B. die δ -Form mit Ni die γ -Form eine lückenlose

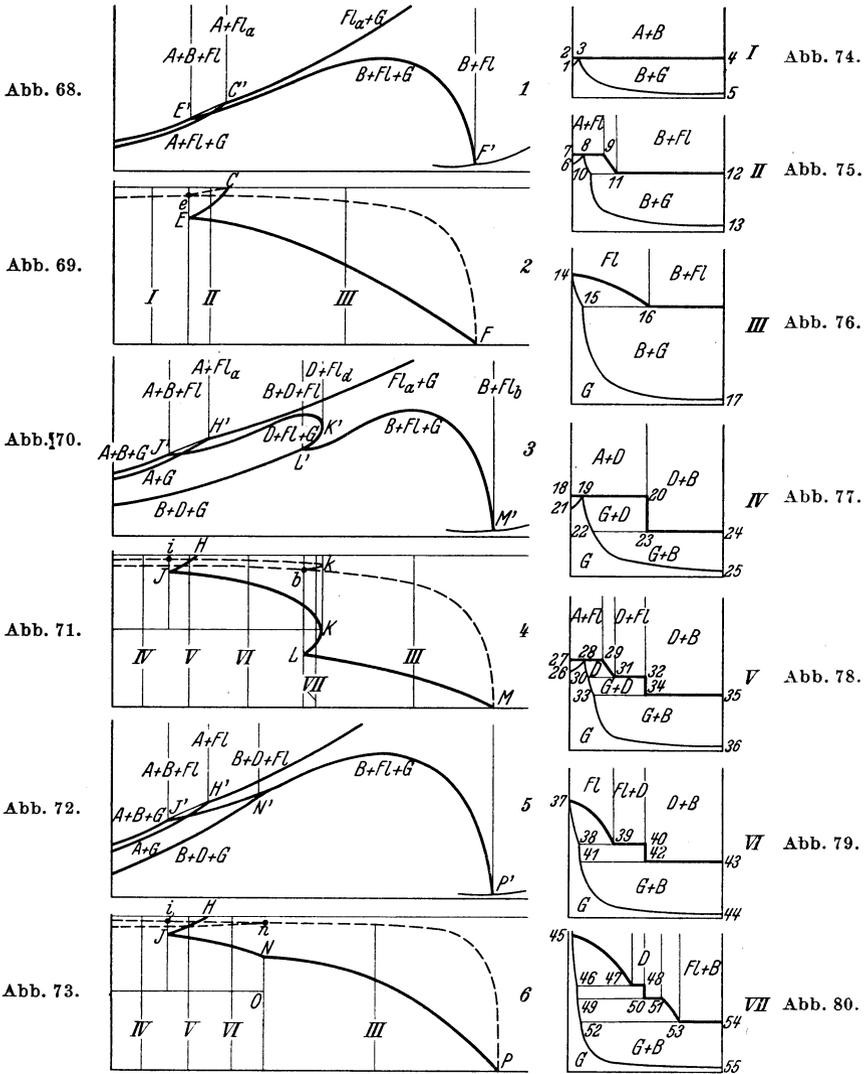


Abb. 68—73. Die verschiedenen $X-T$ - und $P-T$ -Diagramme zweier Stoffe, ohne, mit kongruent schmelzender und mit inkongruent schmelzender Verbindung.

Abb. 74—80. $P-X$ -Zustandsbilder.

Reihe von Mischkristallen. Man hat von vielen Systemen des Eisens mit anderen Metallen die Zustandsbilder festgestellt. Ein weiteres Eingehen hierauf ist aber bei dem großen Umfang des Gegenstandes nicht möglich.

In verschiedenen Fällen wurden in binären Systemen auch die Dampfdrucke untersucht und die Zusammensetzung des Dampfes bei Systemen aus Fest und Flüssig. So bei dem System Jod mit Chlor mit den Verbindungen JCl_3 , JCl_4 und JCl_5 oder bei Wasser mit Schwefeldioxyd mit

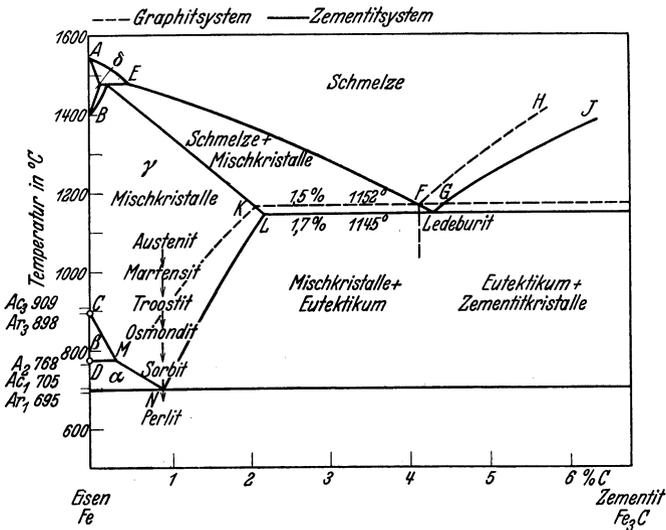


Abb. 81. Fe-C-Zustandsbild.

der Verbindung $SO_2 \cdot 6 H_2O$, die bei $12,1^\circ$ und einem Dampfdruck von 177,3 cm unter Bildung zweier Flüssigkeiten schmilzt. Ähnlich verhalten sich andere sog. Gashydrate.

8. Das Gleichgewicht fest-gasförmig

ist im Zweistoffsystem bei Anwesenheit von zwei festen Phasen monovariant. Der einfachste Fall bei einer Zweistoffmischung ist der, daß nur die beiden Komponenten als feste Phase vorkommen. Dieses ist auch dem Modell von Roozeboom (S. 201) zugrunde gelegt. Diese Gleichgewichte sind in einem P - T -Zustandsbilde durch Kurven wiedergegeben. Wählt man eine konstante Temperatur, so ist auch der Druck konstant, wählt man einen konstanten Druck (z. B. Atmosphärendruck), so ist auch die Temperatur konstant. Ist von den beiden Komponenten die eine nicht flüchtig, so besteht der Dampf des Gemisches der beiden festen Stoffe nur aus der flüchtigen Komponente und hat deren Dampfdruck bei der betreffenden Temperatur.

Das Verhalten wird anders, wenn zwischen den Komponenten Verbindungen auftreten. Es hat besonderes Interesse, wenn, wie z. B. bei Salzhydraten, Ammoniakaten, nur die eine Komponente flüchtig ist. In solchen Fällen läßt sich durch isothermen Abbau, indem der Dampfdruck mit abnehmendem Gehalt an NH_3 oder H_2O ermittelt wird, vielfach feststellen, welche Zusammensetzung Verbindungen zwischen den

Komponenten haben. Dieses ist dann von Bedeutung, wenn diese Verbindungen sonst nicht leicht herzustellen sind. Solange zwei feste Phasen zugegen sind, ist bei konstanter Temperatur der Druck in dem System konstant. Geht man also von einer Verbindung der beiden Komponenten aus, die die flüchtige Komponente als Doppelverbindung (Hydrat, Ammoniakat) gebunden enthält, und verfolgt den Dampfdruck in bezug auf die Zusammensetzung, so herrscht immer der gleiche Druck, solange dieselben beiden Bodenkörper vorhanden sind. Wird aber durch systematische Entfernung des Gases die Zusammensetzung an der flüchtigen Komponente geringer, so muß sich sprunghaft der Druck an der Stelle ändern, wo einer der Bodenkörper verschwindet und ein neuer auftritt. In einer graphischen Darstellung erhält man so ein treppenförmiges Bild des Dampfdrucks in Beziehung zur Zusammensetzung. Auf diese Weise sind viele Systeme untersucht worden. Es ist z. B. nachgewiesen, daß sich aus $\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$ nacheinander die Hydrate mit 3 H_2O und 1 H_2O bilden. Wird die Untersuchung bei verschiedenen Temperaturen ausgeführt, so läßt sich auf diese Weise ein vollständiges Druck-Temperatur-($P-T$)-Diagramm aufstellen. Die Abb. 74—80 auf S. 219 beziehen sich auf solche Gleichgewichte.

9. Das Kohlenstoff-Sauerstoff-Gleichgewicht fest-gasförmig.

Von großer Bedeutung für viele technische Prozesse ist das Gleichgewicht zwischen festem Kohlenstoff und seinen Oxydationsprodukten.

Bei Anwesenheit von zwei Phasen fest und gasförmig hat das System noch zwei Freiheiten. Dieses bedeutet, daß sich in der graphischen Darstellung bei einem bestimmten Druck noch eine Kurve für die Veränderlichkeit des Gases mit der Temperatur ergibt. In der Abb. 82 ist für verschiedene Drücke die Zusammensetzung des Gases in seiner Veränderlichkeit mit der Temperatur wiedergegeben. In der Abbildung steigt die Temperatur in der Richtung von rechts nach links. Alle Kurven sind gleichartig und besagen, daß bei niedriger Temperatur das Gleichgewichtsgas, das man vielleicht „Muttermgas“ in Analogie mit dem Ausdruck „Mutterlauge“ nennen könnte, sich der Zusammensetzung des Kohlendioxyds nähert, während es bei

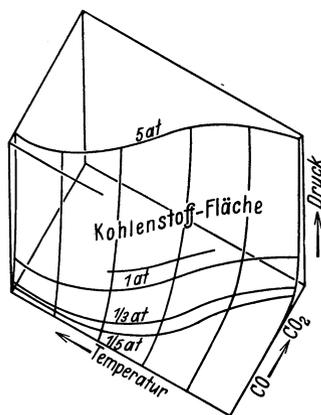


Abb. 82. $P-T$ -Gleichgewicht
 $\text{C} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons 2 \text{CO}$.

höherer Temperatur die Zusammensetzung des Kohlenoxyds hat. Die Abbildung gilt für Drücke bis 5 at. Es bildet sich eine Kohlenstofffläche, welche die Gleichgewichte zwischen den Gasgemischen und festem Kohlenstoff bei Veränderung von Druck und Temperatur wiedergibt. Das Gebiet, das vor dieser Fläche liegt, stellt Gemische dar, die homogenen Gleichgewichten zwischen Kohlendioxyd mit entsprechender Menge

Kohlenoxyd entsprechen. Die Gemische, die auf der anderen Seite der Fläche liegen, bestehen im Gleichgewicht aus festem Kohlenstoff und dem zugehörigen „Muttergas“. Stellt man also solche Gemische durch Vermischen von CO_2 und CO her, so müßte solange C „ausfallen“, bis das an diesem „gesättigte“ Gas entstanden ist. Dieses geschieht in Wirklichkeit auch meistens. Manchmal unterbleibt es aber, weil die Geschwindigkeit, mit der sich das Gleichgewicht einstellt, zu gering ist. Man kann solche Gasmischungen als „übersättigt“ bezeichnen in Analogie mit „übersättigten Lösungen“. Stellte sich das Gleichgewicht immer rasch ein, so würde uns das Kohlenoxyd im wesentlichen nur bei höheren Temperaturen bekannt sein.

IV. Dreistoffmischungen.

1. Graphische Darstellung

(s. S. 12).

Es gibt eine Fülle von Untersuchungen von Dreistoffmischungen, von denen hier nur das Wichtigste erwähnt werden kann. Um die Ergebnisse anschaulich wiederzugeben, bedient man sich verschiedener

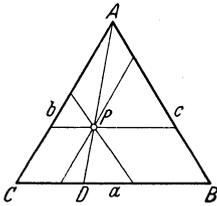


Abb. 83. Darstellung der Mischungsverhältnisse dreier Stoffe.

graphischer Methoden. Zunächst ist die Darstellungsform der Mischungsverhältnisse dreier Stoffe von Bedeutung. Hierbei wird vielfach ein reguläres Dreieck, wie es die Abb. 83 angibt, benutzt, wobei die drei Bestandteile gleichartig behandelt werden. Durch Veränderung der Werte der schiefwinkeligen Koordination eines Punktes im Dreieck kann jede beliebige Mischung dreier Stoffe dargestellt werden. Will man Versuchsergebnisse für verschiedene Temperaturen darstellen, so bedient man sich eines dreiseitigen

Prismas. Wählt man die Temperatur als räumliche Ordinate, so ergibt sich ein reguläres dreiseitiges Prisma. Ein jeder horizontale dreieckige Querschnitt entspricht einer bestimmten Temperatur (s. S. 223).

2. Sieden und Schmelzen im einfachsten Falle.

In der Abb. 84 ist auf diese Weise das Verhalten von Dreistoffgemischen im einfachsten Falle dargestellt. Der untere Teil stellt das Schmelzen und Erstarren von Dreistoffgemischen dar. Von den drei binären Eutektika D , E und F erstrecken sich eutektische Kurven bis zu einem ternären Eutektikum G . Dieses entspricht einem invarianten Gleichgewicht, da zu den drei festen Stoffen und Flüssigkeit noch der Dampf, dessen Zusammensetzung nicht mit angegeben ist, als fünfte Phase hinzugenommen werden muß. Diese Art des Schmelzens ist vielfach bei Legierungen sowie bei anderen anorganischen und organischen Stoffen beobachtet worden. Es ist vom Druck nur wenig abhängig. Im

Gegensatz hierzu sind die Siedeerscheinungen stark vom Druck abhängig. In dem oberen Teil der Abb. 84 sind diese für zwei verschiedene Drucke für den einfachsten Fall angegeben. Bei jedem Drucke stellen je zwei Flächen, die für den Dampf und die Flüssigkeit gelten, die Beziehungen flüssig-gasförmig zueinander dar. Jedem Punkt einer Fläche entspricht bei der zugehörigen Temperatur ein bestimmter Punkt der anderen. Aus der räumlichen Darstellung ist das Verhalten beim Sieden von ternären Flüssigkeitsgemischen abzuleiten. Gibt es in den binären Gemischen Maxima oder Minima der Siedetemperaturen, so ändern sich die Flächen für flüssig und dampfförmig. Im besonderen können auch einheitliche siedende ternäre Gemische auftreten, welche durch Punkte dargestellt werden, in denen sich die beiden Dampf- und Flüssigkeitsflächen berühren.

Das Verhalten von Dreistoffmischungen im Gleichgewicht fest-flüssig ist häufig sehr viel komplizierter als es in Abb. 84 angegeben ist. In vielen Fällen ist Wasser der eine Bestandteil. Es sind dann Löslichkeitsuntersuchungen von zwei Stoffen bei konstanten Temperaturen durchzuführen und die Ergebnisse zu einem räumlichen Gesamtbild mit der Temperatur als Ordinate zusammenzufügen. Bei Untersuchungen anderer nicht wäßriger Salzsysteme oder von Metallgemischen bedient man sich meist Gemische bestimmt gewählter Zusammensetzung und untersucht deren Verhalten beim Schmelzen oder Erstarren.

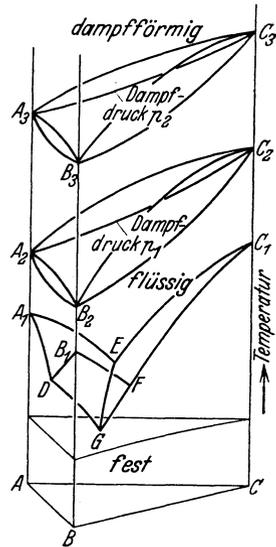


Abb. 84.
Dreistoffmischungen.
Einfachstes Verhalten bei
Änderung der Temperatur.

und untersucht deren

3. Bildung zweier Flüssigkeiten.

Diese kann in Dreistoffmischungen in verschiedener Weise erfolgen. Wird zu einem Gemisch zweier Flüssigkeiten, die sich nur beschränkt mischen, eine dritte hinzugefügt, die sich mit jeder der beiden anderen in jedem Verhältnis mischt, so gibt es, wie die Abb. 87 zeigt, in dem Dreistoffsystem ein geschlossenes Gebiet innerhalb dessen sich Gemische befinden, die sich bei der gewählten Temperatur in zwei Flüssigkeiten zerlegen. Die Abb. 87 zeigt, welche Flüssigkeiten zusammengehören ($h-i$, $f-g$, $d-e$, $b-c$), wenn die Menge der dritten Flüssigkeit zunimmt. Es gibt schließlich einen kritischen Punkt (a), in dem die beiden Zweige der verschiedenen Flüssigkeiten zusammenfließen. Ein derartiges Verhalten findet sich sehr häufig; Beispiele sind z. B. Alkohol-Äther-Wasser bei gewöhnlicher Temperatur oder Blei-Zink-Silber bei Temperaturen oberhalb des Schmelzpunktes von Blei. Das Verhalten in dem letzteren System hat technische Bedeutung für die Gewinnung von Silber. Es ist unter dem Namen Parkesieren bekannt.

Zwei Flüssigkeiten können auch auftreten, obwohl die drei Komponenten für sich unbeschränkt mischbar sind. Dieses ist z. B. der Fall bei gewissen Salzlösungen in Wasser-Alkohol-Gemischen. Meistens tritt auch hier (Abb. 89) das Salz als Bodenkörper bei allen Gemischen von Wasser-Alkohol auf, wobei die Löslichkeit in den alkoholreichen Gemischen oft erheblich geringer als in den wasserhaltigen ist. Es kann aber

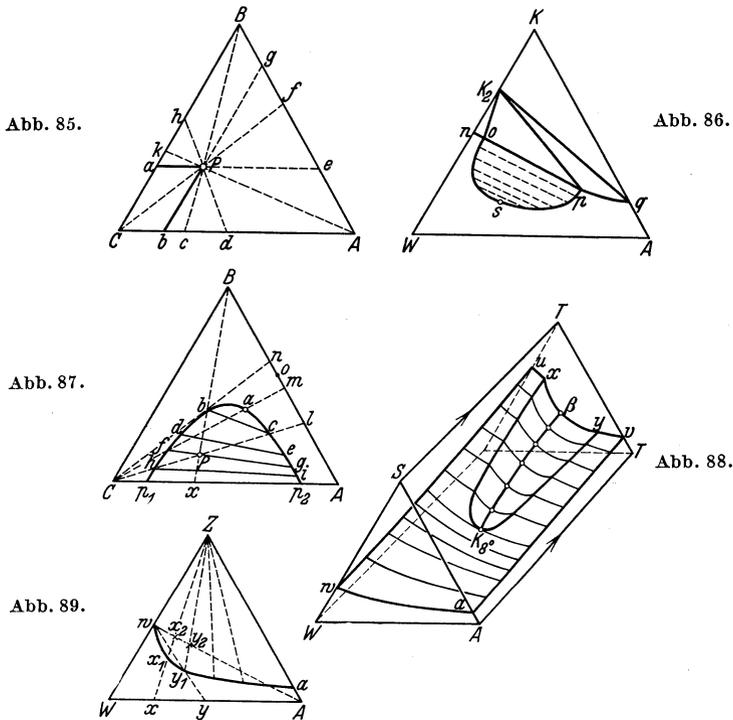


Abb. 85—89. Dreistoffmischungen. Entmischungen.

auch der Fall auftreten, daß bei Zusatz von Salz zu einem Alkohol-Wasser-Gemisch eine Schichtenbildung auftritt. Die Abb. 86 gilt beispielsweise für Lösungen von Kaliumhydroxyd in Alkohol-Wasser-Gemischen. Es tritt $\text{KOH} \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ als Bodenkörper auf. Die Löslichkeitskurve wird unterbrochen durch ein Gebiet, in dem sich zwei Flüssigkeiten bilden. Der Zusammenhang der beiden dann auftretenden Flüssigkeiten ist in der Abb. 86 angedeutet. Es gibt also zwei bestimmte Flüssigkeiten, die beide gleichzeitig mit festem $\text{KOH} \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ bei der angegebenen Temperatur im Gleichgewicht sind. Abb. 88 zeigt, wie sich bei bestimmten Salzen, z. B. Ammonsulfat mit der Temperatur die Entmischung ändern kann. Oberhalb einer gewissen Temperatur hört die Bildung zweier Flüssigkeiten auf.

Aus der sternförmigen Abb. 53 (S. 213), die sich auf Entmischung zweier Flüssigkeiten bezieht, läßt sich leicht ableiten, daß es eine ganze

Anzahl Flüssigkeiten gibt, die zu dreien vermischt drei sich übereinanderschichtende, im Gleichgewicht befindliche Flüssigkeiten bilden. Dies sind besonders Flüssigkeiten mit Wasser und Glycerin, daneben auch aus Formamid-Nitrobenzol mit Paraffinöl oder Hexan (dieses unterhalb Zimmertemperatur). Alle Dreiecke, die aus den in Abb. 53 gezogenen Geraden konstruiert werden können, beziehen sich auf solche Systeme mit drei Flüssigkeitsschichten übereinander.

4. Hydrate und Anhydride einer Komponente als Bodenkörper.

Die Abb. 90 gibt den Fall der Löslichkeit eines Salzes in Wasser-Alkohol an, bei dem sich ein krystallwasserhaltiges Salz bilden kann. Dieses tritt bis zu einem gewissen Gehalt auch in alkoholischen Lösungen als Bodenkörper auf, alsdann aber tritt das wasserfreie Salz an seine Stelle. Dieses Verhalten findet sich mehrfach bei krystallwasserhaltigen Salzen. Die Bildung solcher krystallwasserhaltiger Salze kann zur Konzentrierung von Wasser-Alkohol benutzt werden (Kupfervitriol). Auch in Gemischen von Säuren mit Wasser wird beim Auflösen von Salzen oft ähnliches beobachtet. In den rein wäßrigen Lösungen sind Hydrate Bodenkörper, in den sauren Lösungen Anhydride oder krystallwasserärmere Salze.

5. Wäßrige Lösungen zweier Salze.

In ganz besonders großem Umfange liegen Untersuchungen über die Lösung zweier Salze in Wasser vor. Es soll das grundsätzlich Wichtigste hier erörtert werden. Treten bei bestimmter Temperatur die beiden Salze in wäßriger Lösung als Bodenkörper auf, so sind zwei Fälle zu unterscheiden, die durch die Abb. 92 und 94 angegeben sind. Das Verhalten ist aus den Abbildungen leicht abzulesen, wenn durch die Eckpunkte Geraden nach den Löslichkeitspunkten der reinen Salze und durch den sog. Zweisalzpunkt *P* gezogen werden. Der erste Fall, der weniger häufig vorkommt (Abb. 92), besagt, daß auf Zusatz des zweiten festen Salzes zur gesättigten Lösung *a* des ersten verdünnte Lösungen entstehen. Es ist in solchen Fällen daher möglich, nachdem das zweite Salz zu der gesättigten Lösung des ersten hinzugesetzt wurde, noch eine gewisse Menge des ersten zur Lösung zu bringen. Die von den Sättigungspunkten der binären Gemische ausgehenden Kurven nennt man alsdann Löslichkeitskurven. Ein solches eigentümliches Verhalten zeigen z. B. die gemischten Lösungen gewisser Nitrate, z. B. von Kalium und Natrium oder Kalium und Calcium.

Im Gegensatz hierzu steht das Verhalten im häufig vorkommenden zweiten Fall (Abb. 94). Wird hier der gesättigten Lösung des ersten Salzes das zweite hinzugesetzt, so werden Gemische erhalten, die in dem Sättigungsbilde durch Punkte in dem Ausscheidungsgebiet des ersten Salzes dargestellt werden. Das erste Salz wird daher bei Zusatz des zweiten zur gesättigten Lösung ausgeschieden. Dieses Aussalzen eines Stoffes aus seinen Lösungen durch Zusatz eines zweiten Stoffes wird in

der Praxis oftmals angewendet. In diesem Falle heißen die Kurven Verdrängungskurven.

Außer den reinen Komponenten können in Lösungen zweier Salze auch Hydrate oder Doppelsalze, weniger häufig Mischkristalle, auftreten. In der Abb. 91 ist ein Fall angegeben, bei dem neben dem Anhydrid Na_2SO_4 das Hydrat (Glaubersalz) als Bodenkörper auftritt. Das andere

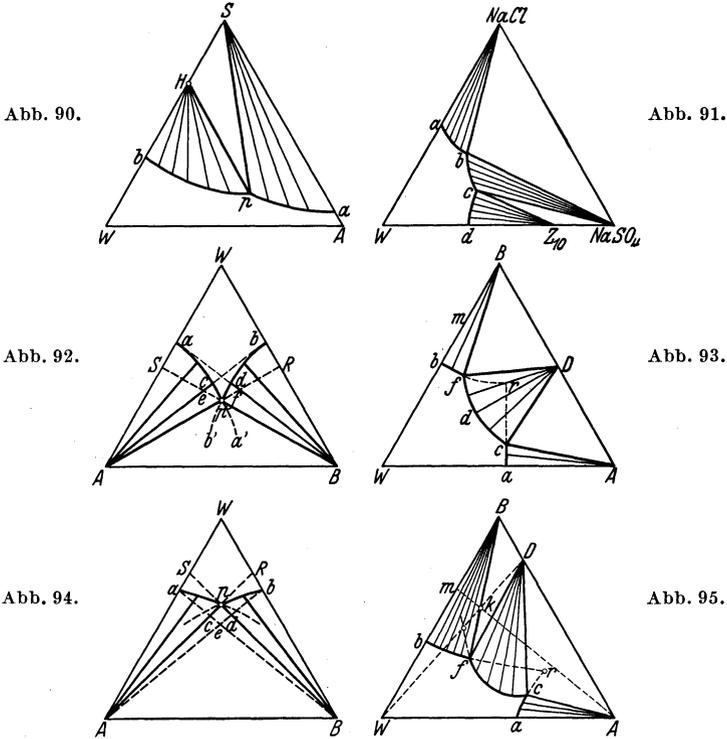


Abb. 90—95. Dreistoffmischungen. Verschiedenes Verhalten wäßriger Lösungen.

Salz ist Kochsalz. Bei Temperaturen unter 32° , wofür dieses Löslichkeitsbild gilt, läßt sich durch Zusatz von festem Kochsalz das Glaubersalz in wasserfreien Thenardit überführen.

Beim Auftreten von Doppelsalzen als Bodenkörper gesättigter Lösungen gibt es sehr viele Möglichkeiten. Zwei der wichtigsten sind in den Abb. 93 und 95 wiedergegeben worden. Die erste bezieht sich auf sog. kongruentes Lösen eines Doppelsalzes, wobei sich aus Wasser und Doppelsalz gesättigte Lösungen herstellen lassen. Abb. 95 gibt den Fall wieder, bei dem sich das Doppelsalz, mit Wasser zusammengebracht, zersetzt. Erst in Lösungen, welche eines der beiden Salze im Überschuß enthalten, kann das Doppelsalz als Bodenkörper auftreten. Kongruent lösliche Doppelsalze, wie sie durch Abb. 93 dargestellt

werden, sind z. B. die Alaune. Sie lassen sich ohne weiteres aus Wasser umkrystallisieren, die inkongruent löslichen jedoch nur bei Anwendung bestimmter Lösungen, die ein Salz im Überschuß enthalten. Typische Beispiele hierfür sind Carnallit oder Ammonsulfatsalpeter. Beide können als Bodenkörper nur in Lösungen mit starkem Überschuß des einen

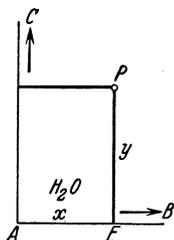


Abb. 96. Löslichkeitsdarstellung zweier Salze im rechtwinkligen Quadranten.

Salzes Magnesiumchlorid bzw. Ammonnitrat als Bodenkörper auftreten.

Neben der Darstellung der sehr zahlreichen Untersuchungen von zwei Salzen durch ein reguläres Dreieck verwendete man besonders früher eine Darstellung mittels rechtwinkliger Koordinaten, wie es die Abb. 96 anzeigt. Bei Benutzung dieser wie auch der übrigen Darstellungen kann man sich auf absolute Gewichte oder auch Mole beziehen.

Die besonders in neuerer Zeit viel benutzte Darstellung der Löslichkeit durch ein Rechteck ist in der Abb. 97 angegeben. Sie ist besonders wichtig, weil sie die Grundlage darstellt für die beste Darstellung der Sättigung reziproker Salzpaare. Die Abb. 98 gibt als Beispiel die Löslichkeit der gemischten Lösungen von Kochsalz und Natronsalpeter bis zu 100° wieder. Die in den Feldern von NaCl und NaNO₃ liegenden Kurven beziehen sich auf die Löslichkeit bei den betreffenden Temperaturen. Die Abb. 98 zeigt, in wie großem Maße bei höherer Temperatur die Lösungen an NaNO₃ reicher sind als an NaCl, wenn beide als Bodenkörper auftreten. Dadurch ist man in der Lage, den Salpeter bevorzugt

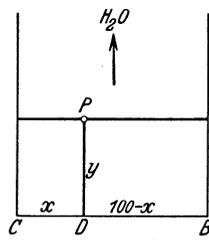


Abb. 97. Löslichkeitsdarstellung zweier Salze im Rechteck.

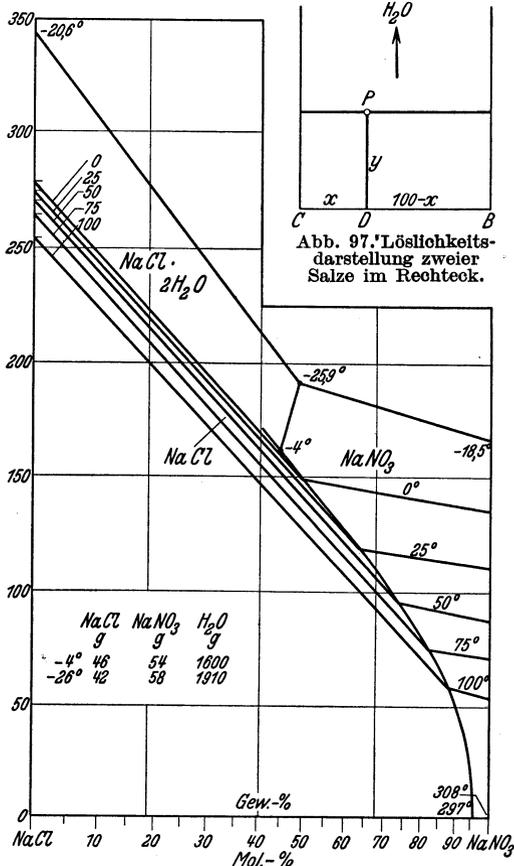
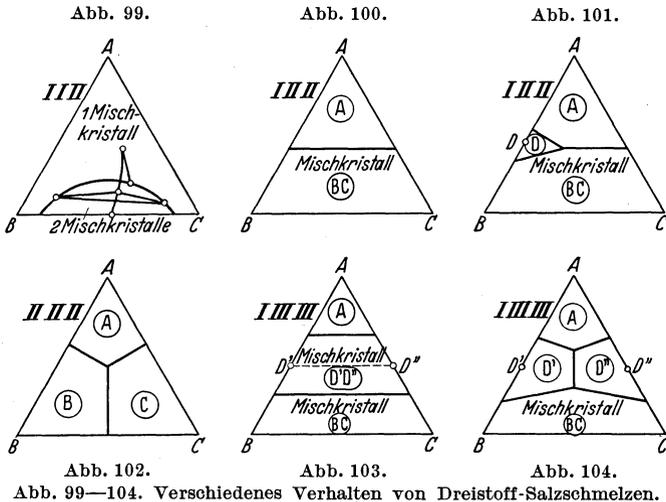


Abb. 98. NaCl—NaNO₃—H₂O. Darstellung der Löslichkeit im Rechteck.

aus Mischungen beider Salze herauszulösen, wie es im größten Umfang in Chile geschieht.

6. Gleichgewichte fest-flüssig in Systemen ohne Wasser.

Zu den Dreistoffmischungen gehören auch die sog. Gemische dreier organischer Körper oder dreier gleichioniger Salze, sowie die Gemische reziproker Salzpaare bei Abwesenheit von Wasser. Ist bei Dreistoffmischungen das Verhalten der drei binären Grenzsyste­me bekannt, so läßt sich vielfach auch das Verhalten der Dreistoffmischungen übersehen. Zweckmäßig teilt man die Dreistoffmischungen nach der Anzahl



der auftretenden festen Phasen ein. Wenn alle drei binären Grenzsyste­me vollständige Mischbarkeit in festem Zustand zeigen, also nur eine feste Phase bilden (*I*), so daß man das ternäre System (*I I I*) schreiben kann, so sind auch die Mischungen aller drei Komponenten im festen Zustand vollständig mischbar. Das Verhalten läßt sich in diesem Falle durch eine ähnliche Abbildung wiedergeben wie die, welche sich auf das Sieden bei Dreistoffmischungen bezieht. Das Gebiet „fest und flüssig“ tritt an die Stelle des „flüssigen und gasförmigen“. Auch wenn zwei der drei binären Systeme vollständige Mischbarkeit zeigen, das dritte aber ein Eutektikum aufweist (*II*), wobei das ternäre System also geschrieben werden kann (*I I II*), tritt nur eine Art von Bodenkörper auf (Abb. 99). Diese Mischkrystalle umfassen aber nicht das ganze Gebiet der Mischungen. Zwei Arten Bodenkörper bilden sich im ternären System, bei denen zwei der binären Grenzsyste­me Eutektika bilden und das dritte eine kontinuierliche Reihe Mischkrystalle (Abb. 100). Außer dem sehr häufigen Fall, daß alle drei Grenzsyste­me binäre Eutektika bilden und das ternäre System (jetzt also *II II II*) ein ternäres Eutektikum aufweist, wie schon früher auseinandergesetzt wurde (Abb. 102), können drei

verschiedene Bodenkörper auch in anderen Fällen auftreten. Bildet z. B. wie bei dem System KCl—NaCl—BaCl_2 eines der binären Systeme (KCl—NaCl) eine lückenlose Reihe von Mischkrystallen, das zweite NaCl—BaCl_2 ein Eutektikum und das dritte (KCl—BaCl_2) eine Verbindung ($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{KCl}$), so gibt es in dem ternären System drei verschiedene Arten von Bodenkörper, nämlich Mischkrystalle (KCl—NaCl), ein einfaches Salz BaCl_2 und ein Doppelsalz ($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{KCl}$). Die Abb. 101 gibt das Verhalten schematisch wieder. Auch bei anderem Verhalten der Grenzsysteeme können drei anderseitige Bodenkörper auftreten als vorher. Wenn z. B. in zwei der binären Systeme gleichartige Verbindungen, die unter sich Mischkrystalle und Mischkrystalle in dem dritten Grenzsysteem bilden, bestehen, so treten im ternären System diese Mischkrystalle des binären Grenzsysteems neben den Mischkrystallen der Doppelsalze und dem dritten Salz als Bodenkörper auf. Die drei Bodenkörper sind also ganz verschieden von den drei Bodenkörpern der vorher erwähnten Systeme (Abb. 103).

In vielen Fällen sind die binären Grenzsysteeme durch ein oder mehrere Doppelsalze ausgezeichnet. Dadurch vermehrt sich auch die Zahl der Bodenkörper in dem System bei den Gleichgewichten mit Schmelzen. Es können sich in solchen Fällen sehr verschiedenartige Gemische beim Zusammenschmelzen der Salze bilden. In Fällen, wo die binären Grenzsysteeme mehrfache Verbindungen bilden, finden sich im ternären System auch vielfach Fälle mit Verbindungen aller drei Salze. Es ergeben sich alsdann Systeme ähnlich den zahlreichen wäßrigen Systemen mit wasserhaltigen Doppelsalzen. Die Untersuchung dieser Systeme bietet noch ein großes Feld. Ein System (*I III III*) mit zwei Doppelsalzen, die als solche auch im ternären Systeme vorkommen, ist schematisch in Abb. 104 wiedergegeben.

Zu den Dreistoffmischungen gehören auch die reziproken Salzpaare, obwohl sie vier Salze umfassen; denn die Umsetzung von drei Salzen ergibt das vierte. Die Darstellung des Mischungsverhältnisses erfolgt, wie es die Abb. 105 zeigt, in einem Quadrat. Eine bestimmte Mischung P mit den Koordinaten y und x hat eine Zusammensetzung, wie sie durch die Formel $M_x M'_{(100-x)} S_y S'_{(100-y)}$ ausgedrückt wird, wenn M , M' und S , S' die positiven und negativen Bestandteile der Salze sind. Die beiden Abb. 106 und 107 stellen für zwei reziproke Salzpaare die Schmelzerscheinungen dar. Abb. 106 zeigt, daß die Gebiete von AgCl und HgJ_2 aneinanderstoßen. Diese beiden Salze, die gleichzeitig als Bodenkörper auftreten können, sind das sog. stabile Salzpaar. Die beiden anderen Salze (labiles Salzpaar) können zusammengeschmolzen nicht bestehen bleiben, da sie, wie die Abb. 106 zeigt, nicht gleichzeitig Bodenkörper sein können. Es findet daher beim Schmelzen eine Umsetzung statt, die von dem Mischungsverhältnis der Salze abhängt. Ein kompliziertes System zeigt die Abb. 107. Es bildet sich außer den beiden binären Verbindungen $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2$ und

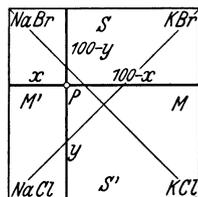


Abb. 105.
Quadratische Darstellung des Mischungsverhältnisses reziproker Salzpaare.

$K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$ noch das „tetragene“ Doppelsalz $KCl \cdot MgSO_4$. Die Abb. 107 zeigt das Verhalten aller Gemische des reziproken Salzpaars

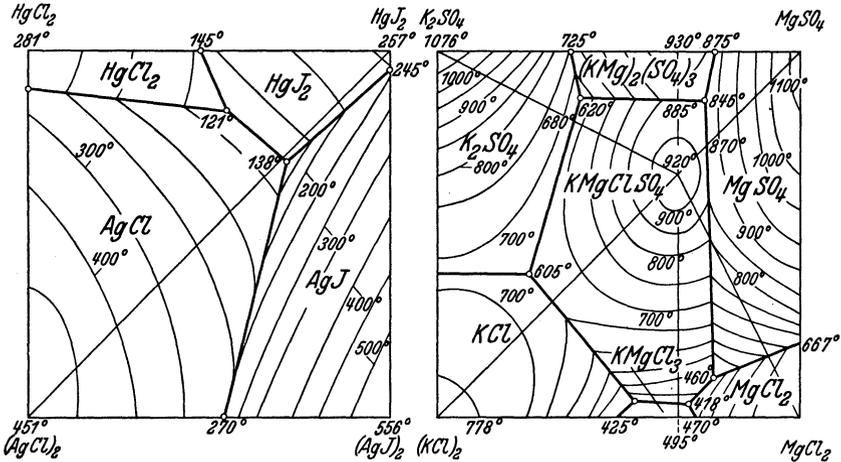


Abb. 106—107. Schmelzdiagramme von $(Ag_2 \cdot Hg)(Cl_2 \cdot J_2)$ und $(K_2 \cdot Mg)(Cl_2 \cdot SO_4)$.

beim Schmelzen und Erstarren. Benutzt man die Temperatur als räumliche Ordinate senkrecht zu dem Quadrat, so lassen sich die Erstarrungsvorgänge durch eine körperliche Darstellung in einem quadratischen Prisma sehr anschaulich wiedergeben. In Abb. 108 ist eine Darstellung wiedergegeben, bei der Wasser als ein „Salz“ eines reziproken Salzpaars behandelt ist, entsprechend der Umsetzung $NaNO_3 + H_2O = NaOH + HNO_3$.

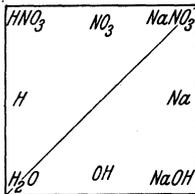


Abb. 108. Das Quadrat als Darstellung wässriger, alkalischer und saurer Lösungen eines Salzes.

7. Die Gleichgewichte fest-gasförmig

haben bei Dreistoffmischungen technisch und wissenschaftlich erhebliches Interesse. In technischer Hinsicht sind zu nennen die Gleichgewichte von Metallen und ihren Oxyden, wenn Kohlenstoff oder Schwefel die dritte Komponente ist. Besonders bei hüttenmännischen Prozessen sind derartige Gleichgewichte von größter Bedeutung. Die Gleichgewichte fest-gasförmig sind in vieler Beziehung den Gleichgewichten fest-flüssig ähnlich. Auch hier treten „Bodenkörper“ auf, die sich mit der Zusammensetzung der „Mutterlauge“, hier die verschiedenen zusammengesetzten Gasgemische, ändern. Im Gegensatz zu den Gleichgewichten fest-flüssig sind diese Gleichgewichte in hohem Maße von dem Druck abhängig. Es genügt daher nicht, nur die „Löslichkeitsbeziehungen“ anzugeben, d. h. die Zusammensetzung der Gase in bezug zu den mit ihnen im Gleichgewicht befindlichen festen Körpern, sondern es muß auch noch der Druck, unter dem sich das Gleichgewicht befindet, vermerkt werden.

8. Dreistoffmischungen. Die Gleichgewichte zwischen Gas, Kohlenstoff, Metalloxyden und Metallen.

Von besonderem technischen Interesse sind die Reduktionsgleichgewichte zwischen Metalloxyd mit Kohlenstoff einerseits, Metall und Kohlenstoffoxyden andererseits, die durch die Gleichung ausgedrückt werden können.

$x \text{ MeO} + \text{C} \rightleftharpoons \text{Me} + (\text{CO}_x)_g$ (s. auch S. 276). Hierbei liegt der Wert von x zwischen 1 und 2, das entstandene Gas ist also ein bestimmtes Gemisch von Kohlenoxyd und Kohlendioxyd. Ist im Gas außerdem auch Metall enthalten, was bei leichter flüchtigen Metallen und bei höheren Temperaturen eintritt, so lautet die Gleichung: $x \text{ MeO} + \text{C} \rightleftharpoons (1 - y) \text{Me} + (\text{CO}_x \text{Me}_y)_g$. Diese Reaktionen, die ausgesprochen auf Phasengleichgewichten beruhen, führen zur Gewinnung von Metall aus Oxyd und Kohle und sind deswegen von besonderer Bedeutung. Als Phasengleichgewichte sind sie vielfach nicht richtig verstanden (z. B. beim Zink).

Von Wichtigkeit sind die Vierphasengleichgewichte, bei denen als Phasen vorhanden sind: fester Kohlenstoff, festes Oxyd, festes oder flüssiges Metall und Gas. Wegen der Anwesenheit von vier Phasen ist das Gleichgewicht monovariant. Es gehört zu jeder Temperatur ein bestimmter Druck, deren Zusammenhang durch die Clausius-Clapeyronsche Gleichung ausgedrückt ist (S. 191).

Da beim Gleichgewichte Kohlenstoff und seine Oxyde beteiligt sind, so nimmt mit steigender Temperatur der Gehalt des Kohlenoxyds im Gas zu, außerdem aber steigt auch der Gehalt an Metall.

In der Abb. 109 ist das Verhalten für Zink oberhalb der Temperaturen skizziert, bei denen festes Zink nicht mehr auftreten kann. Das „Muttergas“ APB mit den drei Stoffen Metall, Metalloxyd und Kohlenstoff als „Bodenkörper“, liegt, da es hauptsächlich aus einem Gemisch von $\text{CO}-\text{CO}_2$ besteht, außerhalb des Dreiecks, das diese drei durch Punkte dargestellten Stoffe: Metall, Oxyd, Kohlenstoff miteinander bilden. Da es wenig Metall enthält, liegt das Gas nahe der Kante $\text{C}-\text{O}$. Man könnte es in Analogie mit inkongruent gesättigten Lösungen ein inkongruent gesättigtes Gas nennen. Mit steigender Temperatur nimmt bei steigendem Gleichgewichtsdruck entsprechend der Pfeilrichtung der Gehalt des Gases an Kohlenoxyd und Zink zu. Ebenso steigt der Dampfdruck und die Temperatur auf der Kurve APB in Richtung des

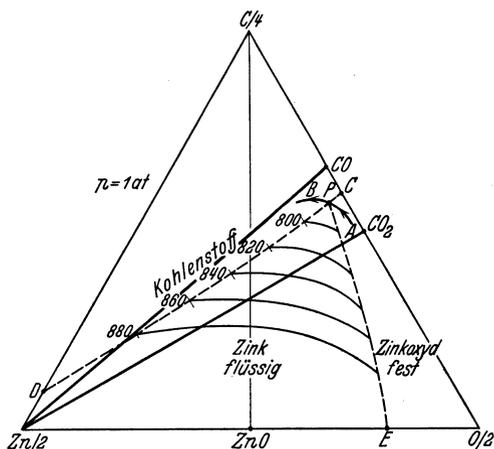


Abb. 109. Gasgleichgewichte im System Zn—C—O.

Pfeiles. Der Punkt P soll sich auf Atmosphärendruck und die experimentell gefundene Gleichgewichtstemperatur von etwa 775° beziehen. Aus dieser Temperatur und dem Dampfdruck des flüssigen Zinks (130 mm Quecksilbersäule bei 775°) ergibt sich für das Gas, bezogen auf die Äquivalente $C/4$, $Zn/2$, $O/2$, die ungefähre Zusammensetzung $57 C/4$, $3^{1/2} Zn/2$ und $39^{1/2} O/2$ entsprechend der Lage von P . Es läßt sich jetzt die Darstellung auf die Gleichgewichte bei 1 at Druck beziehen. Bei diesem Druck gibt es drei Kurven PC , PD und PE mit je zwei und drei Flächengebiete, die sich auf je einen „Bodenkörper“ beziehen. Für das Gebiet des flüssigen Zinks kann auch durch Interpolation, da die Siedetemperatur des Zinks bei Atmosphärendruck etwa 900° beträgt, angegeben

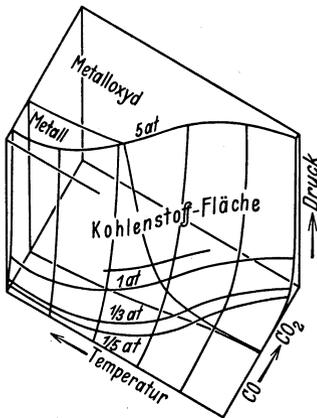
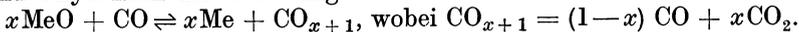


Abb. 110. Das Gleichgewicht $xMeO + CO \rightleftharpoons xMe + CO_{x-1}$ in Beziehung zu Druck und Temperatur.

und Zinkoxyd müßte, wenn beim Erhitzen bei Atmosphärendruck die Temperatur von 775° erreicht ist, solange das Gas der Zusammensetzung P abgeben, bis von den beiden festen Körpern das in geringerer Menge vorhandene (ZnO) verschwunden ist. Infolge der Entstehung des Gases hat sich flüssiges Zink gebildet, das nun, gemischt mit CO und CO_2 , verdampft, wobei die Gaszusammensetzung die Kurve PD durchläuft. Da die Gleichgewichte zwischen festen Stoffen und Gas sich nur langsam einstellen, verläuft die Gewinnung des Zinks in der Praxis erst bei erheblich höheren als den Gleichgewichtstemperaturen.

Das Verhalten anderer Oxyde zu Kohlenstoff ist ähnlich, auch dann, wenn statt flüssigem Metall festes auftritt, was bei Temperaturen unterhalb des Schmelzpunktes des Metalles der Fall ist. Die Betrachtung ist erheblich einfacher, wenn das Gas praktisch kein Metall enthält, was vielfach zutrifft. Alsdann fällt die Kurve APB der Abb. 109 vollständig auf die Kante $C-O$. Das Gleichgewicht wird beherrscht von dem Gleichgewicht $2 CO \rightleftharpoons C + CO_2$. Außerdem besteht ein solches zwischen Metall und Oxyd nach der Gleichung



werden, welche Zusammensetzung bei den betreffenden Temperaturen des Gleichgewichts mit flüssigem Zink der Dampf hat. Die Lage der Punkte D und E ist willkürlich angenommen, von ihnen liegt D praktisch im Eckpunkte für Zn . In ähnlicher Weise wie für konstanten Druck ließe sich auch eine Abbildung konstruieren, die für konstante Temperaturen und variablen Druck gälte. Auch hier erhält man Felder für die drei „Bodenkörper“, wobei der Druck nach den Punkten, die diese darstellen, dauernd abnimmt: für flüssiges Zink bei 775° z. B. etwa $1/5$ at. Aus der Abbildung ergibt sich phasentheoretisch auch das Verhalten, das bei der Gewinnung des Zinks vor sich gehen würde, wenn stets Phasengleichgewichte herrschten. Das Gemisch von festem Kohlenstoff

Nach dem Massenwirkungsgesetz ist alsdann für eine konstante Temperatur $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}} = \frac{x}{1-x} = K$. Das Gleichgewicht ist unabhängig vom Druck, das Gasgemisch hat konstante Zusammensetzung und ist nur noch von der Temperatur abhängig. In einem räumlichen Modell läßt sich dieses, wie die Abb. 110 zeigt, ausdrücken. Dasselbe umfaßt die Veränderlichkeiten von Temperatur und Druck mit dem Mischungsverhältnis des Gases. Man erkennt wie der „Kohlenstoffkörper“ in zwei Teile: einen Metall- und einen Oxydkörper anfällt. Das Modell gibt über den Verlauf der Reaktion Aufschluß. Wird für ein Gemisch aus Oxyd und Kohlenstoff der Druck, die Temperatur oder die Gaszusammensetzung derart, daß die darstellenden Punkte die Grenzfläche erreichen, so bildet sich Metall aus Oxyd.

Treten mehrere Oxyde in einem System auf oder bilden sich andere Verbindungen, so ist das Verhalten oft sehr kompliziert, wie beim Eisen und seinen verschiedenen Oxyden. In solchen Fällen ist festzustellen, welche Verbindungen gleichzeitig miteinander als „Bodenkörper“ bestimmter „Muttergase“ vorkommen können. In der Darstellung der Gleichgewichte zwischen fest-gasförmig besteht vielfach eine gewisse Ähnlichkeit mit derjenigen gesättigter Lösungen, was das Verständnis wesentlich erleichtert. Natürlich besteht stets der große Unterschied, daß Gleichgewichte, bei denen Gase beteiligt sind, in hohem Maße vom Druck abhängig sind.

Auch die wichtigen Gleichgewichte von schwefel- und sauerstoffhaltigen Verbindungen mit Gas sind in ähnlicher Weise zu behandeln. Hier wird das Verhalten häufig durch das Auftreten von Verbindungen sehr kompliziert. Das die Gleichgewichte darstellende Dreieck ist in jedem speziellen Falle in kleinere zu zerlegen, welche das gleichzeitige Vorkommen dreier „Bodenkörper“ anzeigen. Alle vorkommenden Verbindungen werden durch Punkte auf der Kante oder im Innern des großen Dreiecks dargestellt und sind Eckpunkte der kleinen Dreiecke. Es liegen nicht viele systematische Untersuchungen über diese Systeme vor. Eine besondere Schwierigkeit besteht darin, wirkliche Gleichgewichte zwischen den Gasen und festen Stoffen zu erreichen.

Das System Fe—C—O läßt sich so behandeln, daß man zunächst von den festen Stoffen nur die Oxyde und Eisen berücksichtigt. Es gibt dann verschiedene monovariante Gleichgewichte zwischen diesen Oxyden, Eisen, Kohlenstoff und Gas. FeO besitzt eine untere Existenzgrenze bei 550°. Es kommt als stabiler Körper also erst oberhalb dieser Temperatur in Frage. Weiter bildet Fe oberhalb des Perlitpunktes (720 bis 725°) Mischkristalle mit Kohlenstoff (Austenit). Dadurch wird das Gleichgewicht verändert. Es tritt ein Gebiet für diese Mischkristalle zu den übrigen hinzu. Von besonderer Bedeutung ist das invariante Gleichgewicht aus Eisenoxyd, Gas, Eisen, Austenit und Kohlenstoff, ferner das monovariante Gleichgewicht Eisen, Austenit, Eisenoxyd, Gas. Dieses Gleichgewicht erstreckt sich bis zu der Umwandlungstemperatur des reinen α -Eisens von 900°, da bei Überschreitung dieser Temperatur α -Eisen vollständig durch γ -Eisen bzw. Austenit abgelöst wird.

Wird jetzt noch der metastabile Zementit (Fe_3C) berücksichtigt, so ergeben sich neue monovariante Gleichgewichte $\text{Fe}_3\text{C}-\text{FeO}-\text{C}-\text{Gas}$ und $\text{Fe}_3\text{C}-\text{Fe}-\text{C}-\text{Gas}$. Auch ein metastabiles monovariantes Gleichgewicht Austenit, Fe, FeO, Fe_3C , Gas tritt hinzu. Dies kompliziert das System natürlich erheblich. Es ist hier nicht der Ort, auf dieses komplizierte System weiter einzugehen.

V. Vierstoffmischungen.

1. Graphische Darstellung.

Wenn die Anzahl der Komponenten wächst, werden die Untersuchungen naturgemäß komplizierter. Es wächst die Zahl der Größen, die miteinander in Beziehung zu bringen sind. Eine vollständige Behandlung, bei der alle Beziehungen zwischen Druck, Temperatur, Volumen,

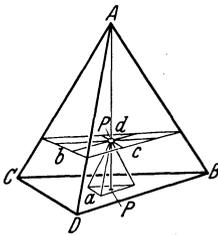


Abb. 111.

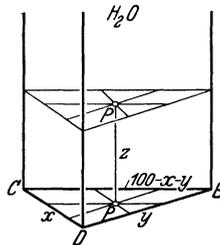


Abb. 112.

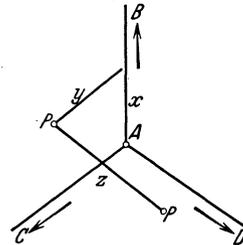


Abb. 113.

Abb. 111—113. Wäßrige Lösungen dreier gleichioniger Salze, dargestellt durch ein Tetraeder, durch ein dreiseitiges Prisma, durch ein dreiseitiges Achsenkreuz.

Zusammensetzung der verschiedenen Phasen angegeben sind, ist sehr kompliziert und müßte in Teildarstellungen aufgelöst werden. Da aber in der Hauptsache nur Untersuchungen von Vierstoffmischungen vorliegen, bei denen die Gleichgewichte fest-flüssig ohne Berücksichtigung des Gasförmigen beobachtet wurden, so lassen sich die Angaben auf die Beziehungen zwischen Temperatur und Zusammensetzung der Komponenten beschränken. Von besonderer Wichtigkeit ist für Untersuchungen von Vier- und Mehrstoffmischungen eine gute Darstellung des Mischungsverhältnisses der angewandten Stoffe. Manche Untersuchungen derartig komplizierter Systeme werden hierdurch bis zu gewissem Grade überhaupt erst möglich.

Die Darstellung des Mischungsverhältnisses von Vierstoffmischungen ist in den Abb. 111—113 wiedergegeben. Bei gleicher Bewertung der vier Komponenten benutzt man ein reguläres Tetraeder, wie die Abb. 111 zeigt. Die Zusammensetzung einer bestimmten Mischung ist durch einen bestimmten Punkt eindeutig wiedergegeben. Die vier Bestandteile A, B, C und D können in Gewichtseinheiten oder in den Einheiten ihrer Atom- (bzw. Molekular-) Gewichte aber auch ihrer Äquivalentgewichte eingeführt werden. Ist eine der vier Komponenten Wasser, so bedient man sich mit Vorteil der Abb. 112, in der der Wassergehalt Ordinate ist.

Das Wasser, angegeben in g oder Molen, wird bezogen auf 100 g oder 100 Mole Salzgemisch, dessen Mischungsverhältnis das reguläre Dreieck umfaßt. Die Abb. 113 gibt die ältere Darstellung gleicher Untersuchung der Lösung dreier gleichioniger Salze in Wasser wieder. Die Mengen x , y und z der drei Salze B , C und D , bezogen auf eine Einheitsmenge Wasser, werden, wie es die Abbildung zeigt, in Richtung der Achsen

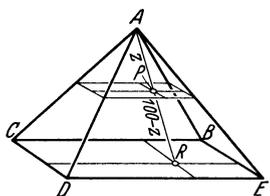


Abb. 114.

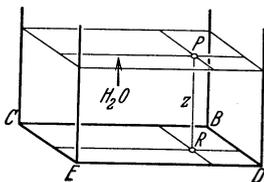


Abb. 115.

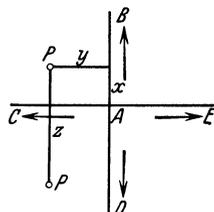


Abb. 116.

Abb. 114—116. Wäßrige Lösungen reziproker Salzpaare, dargestellt durch eine vierseitige Pyramide, durch ein vierseitiges Prisma, durch ein vierseitiges Achsenkreuz.

aufgetragen. Der Punkt P gibt alsdann das Gemisch wieder. Die drei Achsen sind in der Abbildung als Projektionen von Geraden aufzufassen, die sich vom Koordinationspunkt an unter 60° in den Raum erstrecken. Der Punkt P der Abb. 113 ist dementsprechend die Projektion eines Punktes im Innern eines auf der Spitze stehenden Tetraeders.

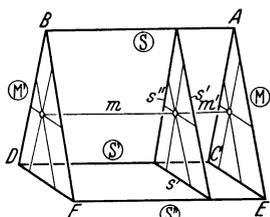


Abb. 117.

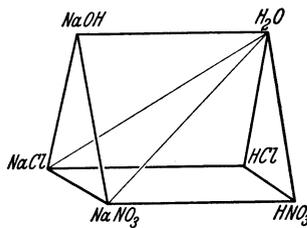


Abb. 118.

Abb. 117—118. Doppelternäre Salzgemische im dreiseitigen Prisma. Dreiseitiges Prisma als Darstellung wäßriger, alkalischer und saurer Lösung eines Gemisches zweier Salze.

Da reziproke Salzpaare auch Dreistoffmischungen sind, gehören ihre wäßrigen Lösungen zu den Vierstoffgemischen. Für die Darstellung der Mischungsverhältnisse bedient man sich räumlicher Bilder, die den vorhergehenden ähnlich und in den Abb. 114—116 wiedergegeben sind. Bei der Darstellung durch eine vierseitige Pyramide entspricht die Spitze dem reinen Wasser und die quadratische Grundfläche dem Mischungsverhältnis der Salze. Der Punkt P stellt ein Gemisch dar aus z Molen Salzgemisch, ausgedrückt in der früher angegebenen Weise und $(100 - z)$ Molen Wasser. Zweckmäßiger ist die Darstellung der Abb. 115, wo der Wassergehalt z sich auf 100 Mol Salzgemisch bezieht, so daß sich für ein Gemisch, dargestellt durch einen Punkt eine Formel $z \text{H}_2\text{O} \ x \text{M} \ (100 - x) \text{M}'y \text{S} \ (100 - y) \text{S}'$ ergibt. Bei der Darstellung durch das Achsenkreuz der Abb. 116 sind die vier Salze auf eine Einheitsmenge Wasser zu beziehen

(meist 100 oder 1000 Mole). Das Mischungsverhältnis kann immer auf drei Salze in Äquivalente umgerechnet werden. Diese Werte x, y, z sind dann in der Richtung vom Koordinatenanfangspunkt an abzutragen wie es die Abbildung zeigt. Auch in diesem Falle erstrecken sich, wie bei der einen ähnlichen früheren Abbildung die vier Achsen in den Raum, und zwar diesmal unter 45° , so daß die Abbildung eine Projektion darstellt.

Zu den Vierstoffmischungen gehören auch die Salzgemische von sechs Salzen, die von Jänecke doppelternär bezeichnet werden. Ihr Mischungsverhältnis wird durch ein gleichseitiges dreiseitiges Prisma (Abb. 117) ausgedrückt unter Bezug auf Äquivalente. Man benutzt die Formel $xM(100-x)M'ySzS'(100-y-z)S''$ oder $yMzS'(100-y-z)M''xS(100-x)S'$. Faßt man H_2O als Salz auf, so lassen sich auch basische und saure Lösungen zweier Salze durch ein solches Prisma wiedergeben, wie es die Abb. 118 für $H_2O-NaOH-HCl-NaCl-HNO_3-NaNO_3$ zeigt.

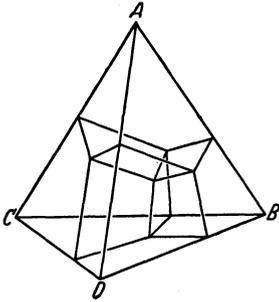


Abb. 119. Tetraeder als Darstellung des Gleichgewichtes von vier Stoffen.

2. Die Gleichgewichte fest-flüssig

sind, wenn nur die reinen Komponenten als Bodenkörper vorkommen, die einfachsten Gleichgewichte dieser Art. Solche Fälle finden sich bei einfachen Legierungen von vier Stoffen, z. B. bei der sog. Woodschen Legierung aus Sn, Pb, Bi, Cd oder bei Lösungen dreier Salze in Wasser, die weder Mischkristalle noch Doppelsalze oder Hydrate bilden. Die Abb. 119 gibt das Verhalten schematisch wieder. Die vier Stoffe bilden paarweise miteinander binäre, zu je drei ternäre Eutektika und in P ein quaternäres Eutektikum mit den tiefsten Schmelzpunkten des ganzen Systems.

Auch bei doppelternären Salzgemischen können Systeme vorkommen, in denen nur die sechs verschiedenen Salze bei den Gleichgewichten fest-flüssig in festem Zustande vorkommen. In diesen einfachsten Fällen ergibt sich ein Schmelzdiagramm, wie es die Abb. 120 zeigt. Jedes Salz hat im Prisma ein bestimmtes räumliches Gebiet, wobei sechs Körper entstehen, die zusammen das Tetraeder ausfüllen. Jedes enthält Gemische, die geschmolzen, ein Salz als Bodenkörper enthalten.

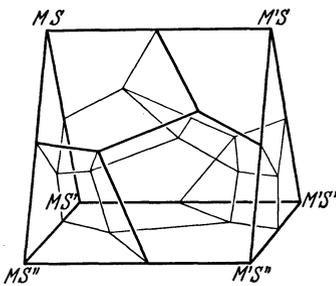
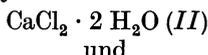


Abb. 120. Einfachstes Schmelzbild doppelternärer Salzgemischen.

3. Lösungen von drei gleichionigen Salzen in Wasser.

Das Verhalten von Lösungen dreier gleichioniger Salze soll in einigen Beispielen auseinandergesetzt werden. Die Abb. 121 und 122 geben die

Sättigung der drei Chloride von Na, Ba und Cu in Wasser bei 30° wieder. Für die Darstellung ist das Tetraeder gewählt und in zwei verschiedenen Projektionen dargestellt. In der ersten Abbildung projiziert sich das Tetraeder als ein gleichseitiges Dreieck, in der zweiten als Quadrat. Durch diese doppelte Darstellung ist die Zusammensetzung der Gemische auf der Geradenachse ohne Angabe in einer Tabelle vollständig festgelegt. Das Verhalten ist besonders einfach. Als Bodenkörper finden sich NaCl (I) und die Hydrate



deren Lage in den Abbildungen durch Ba_2 und Ca_2 angezeigt ist. I, II und III sind die zugehörigen Sättigungsflächen.

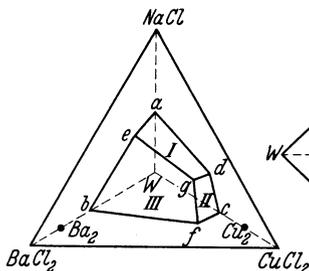


Abb. 121.

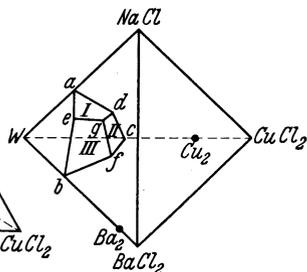


Abb. 122.

Abb. 121—122. Löslichkeit von NaCl—BaCl₂—CuCl₂ bei 30°.

Für die Darstellung der Löslichkeit dreier gleichioniger Salze ist in allen Fällen ein dreiseitiges Prisma zweckmäßig, wobei meist aus der Projektion bereits das wesentlichste abgelesen werden kann.

In der Abb. 123 ist beispielsweise die Löslichkeit der drei Natriumsalze NaCl, Na₂CO₃ und Na₂SO₄ für vier verschiedene Temperaturen dargestellt (20°, 35°, 50°, 75°). Die Abb. 123 müßte noch durch die Angabe des Wassergehaltes entweder in Form einer Tabelle oder durch eine graphische Darstellung ergänzt werden. Die Abbildung zeigt sehr deutlich, wie sich das Gebiet des Doppelsalzes mit der Temperatur vergrößert. Bei 25° tritt es nur in den Lösungen auf, die gleichzeitig alle drei Salze enthalten. Mit wachsender Temperatur erscheint das Doppelsalz auch in den kochsalzfreien Lösungen, indem sich das Gebiet sehr stark vergrößert. Bei 20° treten die Hydrate Na₂CO₃ · 10 H₂O und Na₂SO₄ · 10 H₂O auf.

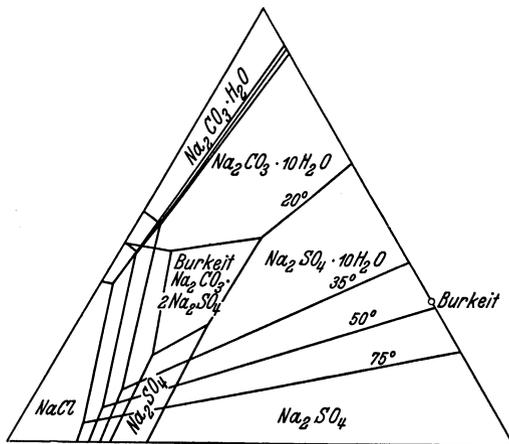


Abb. 123. NaCl—Na₂CO₃—Na₂SO₄—H₂O bei 20°, 35°, 50°, 75°. Verteilung der Gebiete im regulären Dreieck.

Die Abb. 124 und 125 geben die Löslichkeit der Gemische der Natriumsalze von Kochsalz, Natriumnitrat und Natriumsulfat wieder, eine Untersuchung, die für die Gewinnung von Chilesalpeter von größter Bedeutung ist.

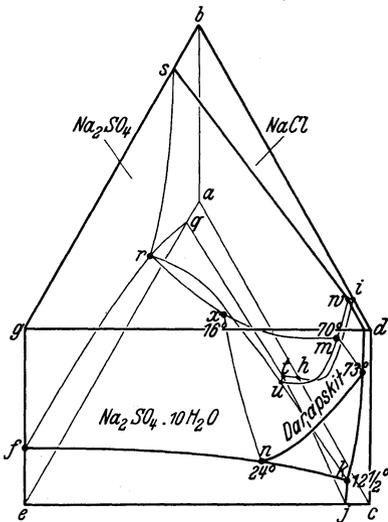


Abb. 124. Löslichkeit von NaCl—NaNO₃—Na₂SO₄ zwischen 0 und 100°.

Abb. 124 gibt, perspektivisch dargestellt, die Art der Bodenkörper in bezug auf die Temperatur wieder, während Abb. 125 die Veränderlichkeit des Wassergehaltes mit der Temperatur anzeigt. Zusammen genommen geben beide Abbildungen die Löslichkeit aller Gemische bis 100° an. Das untersuchte vorhandene Doppelsalz ist der Darapskit: NaNO₃·Na₂SO₄·H₂O. Eine Darstellung, die den Wassergehalt, die Temperatur und das Mischungsverhältnis dreier Salze gleichzeitig umfaßt, müßte vierdimensional sein. Die räumliche Darstellung der Abb. 124 und die ebene Darstellung der Abb. 125 sind mathematisch als Projektionen eines solchen vierdimensionalen Gebildes

in den Raum bzw. auf eine Ebene aufzufassen. Die Abbildungen zeigen, daß bereits Systeme verhältnismäßig einfacher Natur wie das angegebene mit nur einem Doppelsalz erheblich kompliziert sein können.

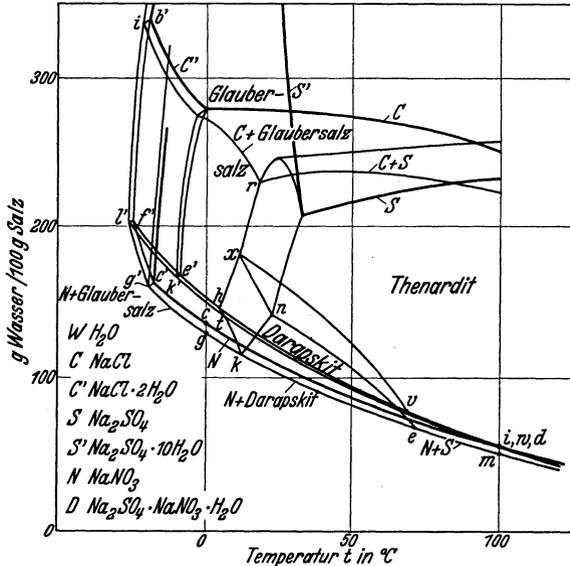


Abb. 125. Wassergehalt der gesättigten Lösungen von NaCl—NaNO₃—Na₂SO₄ in Beziehung zur Temperatur.

4. Lösungen reziproker Salzpaare in Wasser.

Die Untersuchungen der Lösungen reziproker Salzpaare hat besondere Bedeutung wegen der Möglichkeit der Umsetzung der Salze miteinander. Alle doppelten Umsetzungen, die sich in wäßrigen Lösungen vollziehen, sind nach den Grundsätzen des Gleichgewichts zwischen fest-flüssig zu behandeln. In vielen Fällen, die in der analytischen Chemie Bedeutung haben, sind die Umsetzungen derart, daß von den vier Salzen eines besonders schwerlöslich ist. Dies führt dazu, daß sich die Löslichkeitsbestimmungen, die von Interesse sind, nur auf ein kleines Gebiet beschränken. In den graphischen Darstellungen umfaßt in solchen Fällen das eine schwerlösliche Salz fast das ganze Gebiet der Löslichkeitsdarstellungen.

In vielen Fällen treten außer den vier Salzen des Salzpaars neben Hydraten verschiedener Art auch Doppelsalze auf. Es sind das meist nur die Doppelsalze, die auch in den Lösungen zweier gleich-ioniger Salze sich bilden. Es gibt aber auch Fälle, wo sich sog. tetragene Doppelsalze bilden, die alle vier Ionen des Systems enthalten, doch sind diese verhältnismäßig selten. Aus der großen Zahl der Untersuchungen seien die folgenden herausgegriffen. Für die Darstellung der Löslichkeit wird neuerdings immer mehr die Darstellung von Jänecke im Quadrat benutzt, aber auch die ältere von Löwenherz, der sich auch van'tHoff und Meyerhoffer noch bedient, wird noch manchmal benutzt, weshalb es nötig ist, auch diese auseinanderzusetzen. Den einfachsten Fall dieser Art stellt Abb. 126 dar. Sie bezieht sich auf die Löslichkeit von $(\text{Na}_2, \text{Mg}) (\text{Cl}_2, \text{SO}_4)$ bei 0° . Als Bodenkörper treten NaCl und die Hydrate der drei anderen Salze auf.

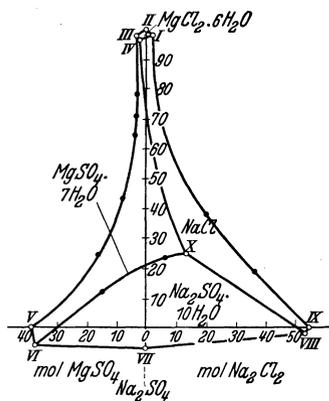


Abb. 126. $(\text{Na}_2, \text{Mg}) (\text{Cl}_2, \text{SO}_4) - \text{H}_2\text{O}$ bei 0° .

In den Abb. 127 und 128 sind zwei Darstellungen gegeben, wo in den Lösungen nur ein Doppelsalz auftritt, die einfachen Salze aber Hydrate und Anhydride bilden. Die Darstellung ist ebenso wie bei Abb. 127 nach dem Achsenkreuz der Abb. 116 gemacht, bezogen auf 1000 Mole H_2O als Einheitsmenge des Lösungsmittels. In dem System $(\text{Na}_2, \text{K}_2) (\text{Cl}_2, \text{CO}_3) - \text{H}_2\text{O}$ bei 25° findet eine deutliche Zerlegung in zwei Teilen statt, die durch die Lösung des stabilen Salzpaars $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{H}_2\text{O} - \text{KCl}$ getrennt sind. Außer den in der Abbildung angegebenen anhydrischen Salzen und Hydraten tritt das Doppelsalz $\text{NaKCO}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ als Bodenkörper auf. Die Abbildung zeigt, daß man aus NaCl , K_2CO_3 und Wasser KCl als Bodenkörper gewinnen kann, dessen Gebiet in der Löslichkeitsdarstellung den größten Umfang hat. Das andere Beispiel $(\text{Na}_2, \text{Mg}) (\text{Cl}_2, \text{SO}_4) - \text{H}_2\text{O}$ ist in gleicher Weise dargestellt. Auch hier bei 25° tritt nur ein Doppelsalz $\text{MgSO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$ neben Hydraten und Anhydriden

auf. In diesem Fall ist das stabile Salzpaar NaCl und $\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$, aber es sind Lösungen, die gleichzeitig an beiden gesättigt sind, nur bei starkem Überschuß von MgCl_2 möglich.

Aus diesem Grunde ist die Umsetzung zu den gewollten Salzen auch nicht so einfach wie in

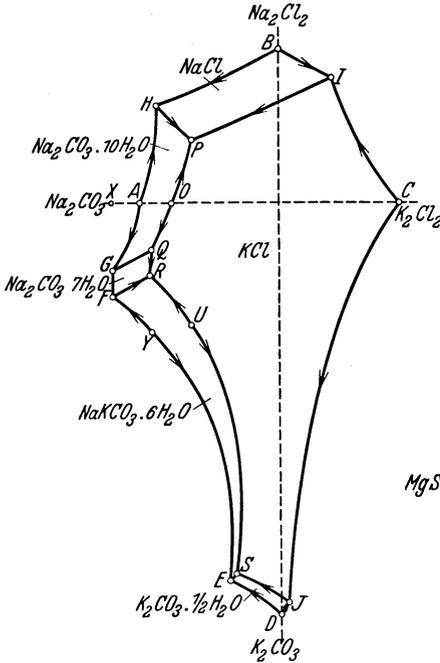


Abb. 127. $(\text{Na}_2, \text{K}_2)(\text{Cl}_2, \text{CO}_3) - \text{H}_2\text{O}$ bei 25° .

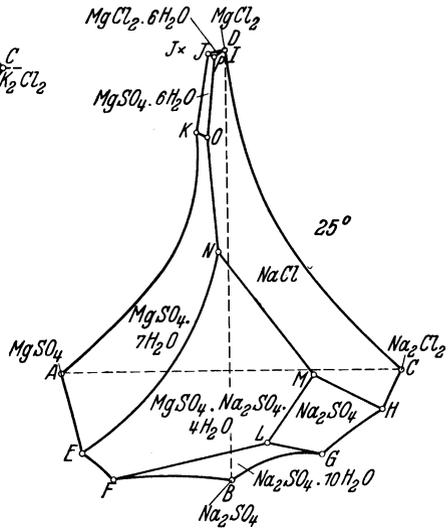


Abb. 128. $(\text{Na}_2, \text{Mg})(\text{Cl}_2, \text{SO}_4) - \text{H}_2\text{O}$ bei 25° .

dem vorhergehenden Falle. Die Abb. 128 zeigt gegenüber Abb. 126, wie sich die Löslichkeit bei Temperatursteigerung von 0 auf 25° ändert.

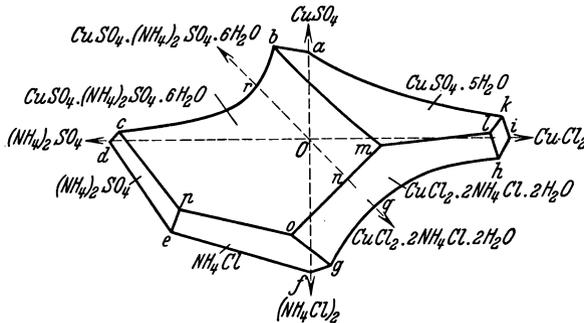


Abb. 129. $(\text{Cu}, [\text{NH}_4]_2)(\text{Cl}_2, \text{SO}_4) - \text{H}_2\text{O}$ bei 30° .

Abb. 129 stellt das System $(\text{Cu}, [\text{NH}_4]_2)(\text{Cl}_2, \text{SO}_4) - \text{H}_2\text{O}$ bei 30° dar, bezogen auf die vierseitige Pyramide der Abb. 114. Abb. 129 ist als Projektion auf die Grundfläche dargestellt. Diese Darstellung ist ähnlich

der mittels eines vierseitigen Achsenkreuzes. In dem Systeme bilden sich zwei Doppelsalze, deren Löslichkeit derart ist, daß sich das ganze System in zwei Teile zerlegen läßt. Das am schwersten lösliche Salz ist das Doppelsulfat. Dieses ist, wie die Abbildung zeigt, sowohl aus CuSO_4 und NH_4Cl als auch aus $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ und CuCl_2 zu erhalten.

Die zweifellos beste Darstellung für die Lösungen reziproker Salzpaare ist die mit Hilfe eines quadratischen Prismas, die neuerdings auch am meisten angewendet wird. Die Darstellung zerlegt die Angaben über die Löslichkeit in der Art, daß das Mischungsverhältnis der Salze durch einen Punkt des Grundquadrates ausgedrückt wird, und die Menge Wasser, die nötig ist, um gerade keinen Bodenkörper mehr zu haben, als Ordinate gewählt wird. Bei Angabe des Mischungsverhältnisses der Salze muß man, um zu einem Quadrat zu kommen, immer mit den Molekulargewichten rechnen. Es ist vorzuziehen, die Wassermenge ebenfalls in Molen auf 1 oder 100 Mole Salzgemisch auszudrücken. Man kann aber auch mit g auf Mole Salzgemisch, ja sogar mit g auf 100 g Salzgemisch rechnen. Bei der Darstellung des Sättigungsverhältnisses für verschiedene Temperaturen erhält man verschiedene räumliche Gebilde, die das vierseitige Prisma nach oben begrenzen. In den meisten Fällen liegen die Flächen, die für höhere Temperaturen die Löslichkeit darstellen, unter der für niedere, doch gibt es hiervon auch Ausnahmen. Oft beschränkt man sich darauf, die Projektion des räumlichen Gebildes auf das Grundquadrat zweier Darstellungen zu bringen und die Angaben der Löslichkeit nach Art der Darstellung gebirgiger Landschaften als Höhenkurven einzutragen. Für jede Temperatur erhält man eine quadratische Darstellung, aus der man leicht die Löslichkeit für alle Mischungen entnehmen kann. Manchmal ist es auch von Nutzen, eine neue Darstellung zu geben, indem man das für die verschiedenen Temperaturen geltende Quadrat räumlich übereinander zu einem vierseitigen Prisma zusammenfügt. Diese Darstellung läßt sich zweckmäßig mit einer ebenen verbinden, bei der Temperatur und Wassergehalt berücksichtigt sind. Beide Darstellungen geben zusammengenommen ein vollständiges Bild der Löslichkeit bei verschiedenen Temperaturen und machen es auch möglich, bequem Interpolationen auszuführen. Es sollen hier nur einige charakteristische Beispiele angeführt werden.

Abb. 130 gibt in räumlicher Darstellung das Verhalten von $(\text{Na}, \text{NH}_4)(\text{Cl}, \text{NO}_3) - \text{H}_2\text{O}$ bei 25° . Sie stellt den einfachen Fall dar, daß nur die vier Salze des reziproken Salzpaares Bodenkörper sind. Die Projektion des räumlichen Gebildes ist unten noch einmal dargestellt worden und

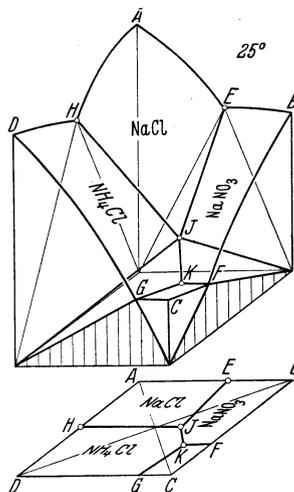


Abb. 130.
(Na, NH_4)(Cl, NO_3) H_2O bei 25° . Perspektivische Darstellung im vierseitigen Prisma.

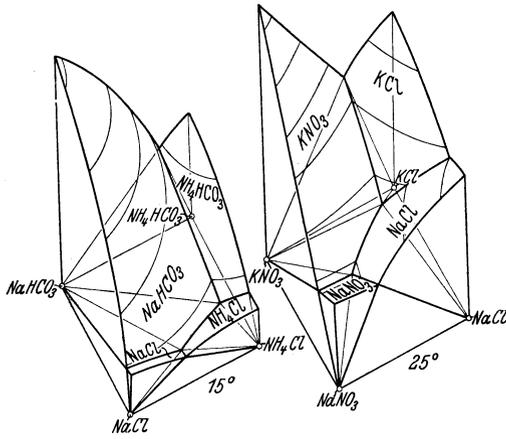


Abb. 131. (Na, NH₄) (Cl, HCO₃)—H₂O bei 15°.
Abb. 132. (Na, NH₄) (Cl, NO₃) · H₂O bei 25°.

Abb. 135.

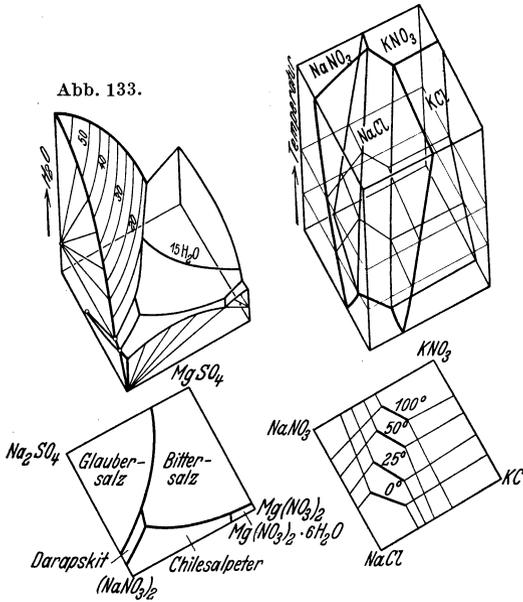


Abb. 133—136. (Na₂, Mg) (SO₄, [NO₃]₂)—H₂O bei 25°.
Abb. 134. (Na, K) (Cl, NO₃)—H₂O von 0—100°. Projektionen auf die quadratischen Grundflächen.

zeigt die Verteilung der Bodenkörper in dem Quadrat. Dieses ist, perspektivisch dargestellt, ein Parallelogramm. Ganz ähnlich sind die in Abb. 131 und 132 angegebenen Systeme, die mit der Bildung von Ammoniaksoda und von Konversionssalpeter zusammenhängen. Auch hier treten nur die einfachen Salze als Bodenkörper auf (s. S. 239). Die Abb. 133 und 134 geben die Löslichkeitsbeziehungen in einem anderen Fall wieder (s. das Quadrat der Abbildung 134 und die Projektion der darüberstehenden perspektivischen Darstellung der Abb. 133).

Die Abb. 135 und 136 beziehen sich auf die sog. Konversion des Chilesalpeters gemäß: $\text{NaNO}_3 + \text{KCl} = \text{KNO}_3 + \text{NaCl}$. In diesem Falle ist der Wassergehalt der Lösungen bei der Darstellung unberücksichtigt geblieben und nur die Verteilung der Gebiete auf das Quadrat für die verschiedenen Temperaturen angegeben. Die obere Abb. 135 zeigt wieder eine perspektivische Darstellung, in diesem Falle jedoch mit der Temperatur und nicht mit dem Wassergehalt als Ordinate. Sie zeigt, daß NaCl—KNO₃ das stabile Salzpaar ist und außerdem, daß bei hoher Temperatur das Feld für KNO₃ und bei tiefer

Temperatur dasjenige für NaCl klein ist. Dadurch erklärt es sich, daß durch Erhitzen und Abkühlen die abwechselnde Gewinnung dieser

beiden Salze aus den beiden anderen NaNO_3 und KCl möglich ist (s. auch S. 256).

Das Verhalten reziproker Salzpaare in bezug auf ihre Löslichkeit in Wasser wird um so komplizierter, je mehr Salze als Bodenkörper auftreten können. Für die Kaliindustrie besonders wichtig ist das Verhalten des Salzpaars $\text{MgCl}_2 + \text{K}_2\text{SO}_4 \rightleftharpoons 2 \text{KCl} + \text{MgSO}_4$. In diesem

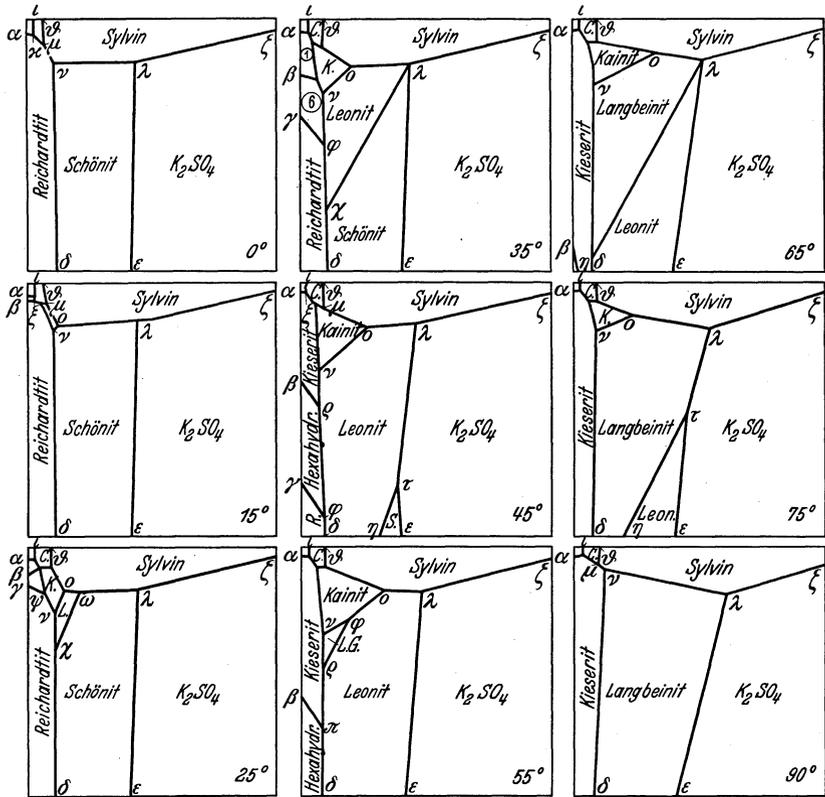


Abb. 137—145. $(\text{K}_2, \text{Mg})(\text{Cl}_2, \text{SO}_4)\text{-H}_2\text{O}$ von 0—90°.

System tritt eine große Anzahl von Salzen auf und eine Umsetzung nach einfachen Gleichungen findet bei keiner Temperatur statt. Die Quadrate der Abb. 137—145 zeigen, in welcher Art sich die Bodenkörper mit wachsender Temperatur in bezug auf ihre Lage und Art verändern. In diesem System gibt es auch ein tetragenes Doppelsalz, Kainit $\text{KClMgSO}_4 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$. Die meisten Salze sind nicht bei allen Temperaturen als Bodenkörper beständig. Die stark wasserhaltigen werden bei Temperatursteigerung durch die Salze mit weniger Krystallwasser oder ohne solches abgelöst. Verschiedene haben gleichzeitig eine untere und obere Bildungstemperatur. Aus diesen Quadraten und der

Darstellung des Zusammenhanges zwischen Wassergehalt und Temperatur für die gleichzeitig an drei Salzen gesättigten Lösungen läßt sich das gesamte Löslichkeitsbild ablesen. Die Abbildungen geben die Erklärung für wichtige Prozesse, die in der Kaliindustrie zur Herstellung von Kali-magnesia oder Kaliumsulfat dienen.

5. Bildung mehrerer Flüssigkeiten.

Wenn in den binären oder ternären Grenzsyste-men eines Vierstoff-systemes Entmischungen auftreten, so kommen solche natürlich auch

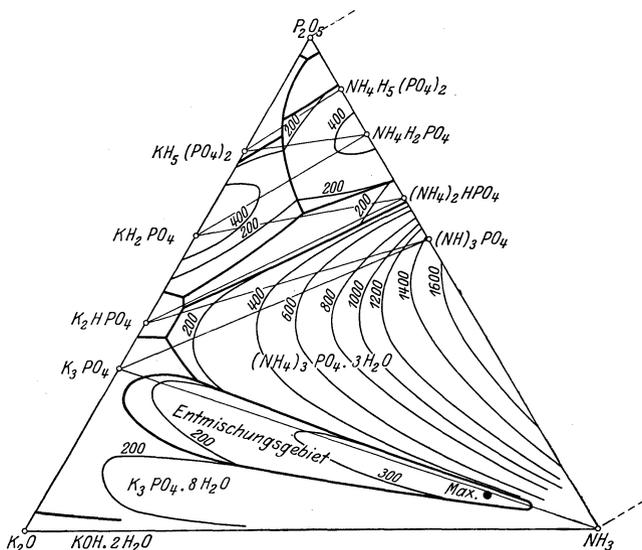


Abb. 146. $K_2O-NH_3-P_2O_5$ bei 0° .

in der Vierstoffmischung vor. Es können auch Systeme mit sogar drei oder vier sich nicht mischenden Flüssigkeiten auftreten.

Während Entmischungen bei organischen Lösungsmitteln häufig sind, findet man solche bei rein anorganischen Stoffen ziemlich selten. Die Abb. 146 zeigt ein solches kompliziertes System aus $NH_3-K_2O-P_2O_5$ und Wasser bei 0° . Die Darstellung ist die Projektion eines dreiseitigen Prismas mit dem Gehalt an Wasser als Ordinate. Der Wassergehalt der gesättigten Lösung ist durch Kurven auf 100 g des Gemisches bezogen wiedergegeben. Es bilden sich verschiedene Felder für die Bodenkörper, die für die eingezeichneten Salze gelten. Neben KH_2PO_4 und $NH_4H_2PO_4$ treten Mischkristalle auf. Besonders eigentümlich ist das Entmischungsgebiet zwischen NH_3 und K_3PO_4 . In dem gezeichneten Oval bilden sich bei entsprechendem Gehalt an Wasser zwei Flüssigkeiten aus, die miteinander im Gleichgewichte sind. An den Grenzen des Gebietes kann außerdem noch ein festes Bodensalz auftreten.

VI. Fünf- und Mehrstoffmischungen.

1. Allgemeines.

Für eine systematische Untersuchung von Fünfstoffmischungen braucht man eine Darstellung des Mischungsverhältnisses. Dieses Mischungsverhältnis wird umfaßt durch vier Veränderliche, so daß die Darstellung vierdimensional werden müßte. Von dieser Darstellung lassen sich ihre Projektionen in den dreidimensionalen Räumen wiedergeben. Wegen der Kompliziertheit liegt keine systematische Untersuchung vor, dagegen gibt es eine Anzahl spezieller Untersuchungen, die sich auf wäßrige Lösungen beziehen, und auch technisches Interesse haben.

2. Wäßrige Lösungen.

Bei wäßrigen Lösungen von vier gleichionigen Salzen oder von doppelternären Salzpaaren greift man auf die Darstellung der Mischungsverhältnisse der Salze zurück und bringt für konstante Temperaturen die Gebiete zur Darstellung, die sich auf die Lösungen der verschiedenen Salze als Bodenkörper beziehen. Auf diese Art erhält man in den einfachsten Fällen körperliche Darstellungen, ähnlich wie Gemische von vier Stoffen oder von doppelternären Salzpaaren ohne Wasser dargestellt wurden. Es ergeben sich Löslichkeitsverhältnisse, die durch gleichartige Abbildungen wie für die Schmelzverhältnisse von Vierstoffmischungen (S. 236) dargestellt werden können. Allerdings muß hier noch die Angabe des Wassergehalts hinzukommen, die nicht in der Darstellung enthalten ist. Bei Veränderung der Temperatur verändern sich die Werte für die Zusammensetzung sowohl in bezug auf das Salzgemisch als auf den Wassergehalt. Eine vollständige Darstellung für verschiedene Temperaturen ergibt demnach zwei zusammengehörige Darstellungen. Die eine ist eine körperliche Darstellung im Tetraeder oder dreiseitigen Prisma und bezieht sich auf die Veränderungen im Mischungsverhältnis der Stoffe ohne Wasser. Die andere ist eine ebene Darstellung zwischen Temperatur und Wassergehalt. Gerade diese Trennung ist besonders bedeutsam. Die zweite ebene Darstellung umfaßt gewissermaßen die reine Löslichkeitsveränderung mit der Temperatur, indem sie die Veränderlichkeit des Wassergehalts der gesättigten Lösung mit der Temperatur wiedergibt. Sie umfaßt Kurven, die sich auf verschiedene Salze oder Salzgemische als Bodenkörper beziehen. Der Verlauf solcher Löslichkeitskurven kann für ein bestimmtes Salzgemisch ein sehr kompliziertes Bild geben. Entsprechend den Gesetzen der Phasenlehre gibt es Dreisalzkurven, die in Viersalzpunkten zusammenlaufen können. Das Auftreten solcher Gleichgewichte mit gleichzeitig vier Salzen als Bodenkörper ist stets an eine bestimmte Temperatur gebunden. Bei diesen Temperaturen können sich die Paragenesen, d. h. die Art der Verteilung der Salze ändern. Hierbei treten an Stelle bestimmter Bodenkörper andere. Solches kann auch technisch von größter Bedeutung sein. Noch wichtiger sind aber solche Viersalzpunkte, wo bei Über-

schreitung der Gleichgewichtstemperatur Salze verschwinden oder neue Salze auftreten. Hierauf soll bei der Erörterung der ozeanischen Salze kurz eingegangen werden.

In technischer Hinsicht sind solche komplizierte Gemische auch oft dadurch von Bedeutung, daß die Hygroskopität mit der Anzahl der Bestandteile wächst. In der Düngemittelindustrie hat man deswegen die verschiedensten Mittel angewendet, um diese unangenehme Eigenschaft möglichst zu verringern.

3. Ozeanische Salze.

Die wirtschaftlich und technisch bedeutendste Untersuchung eines Fünfstoffsystemes ist die der ozeanischen Salze, die von van't Hoff

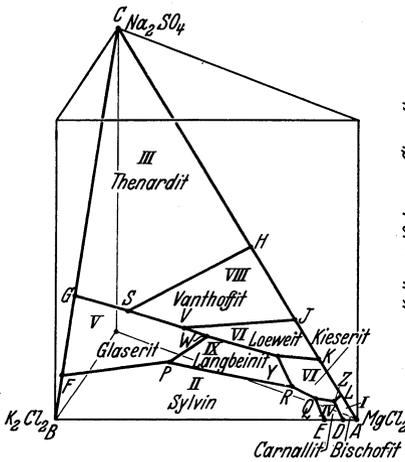


Abb. 147.

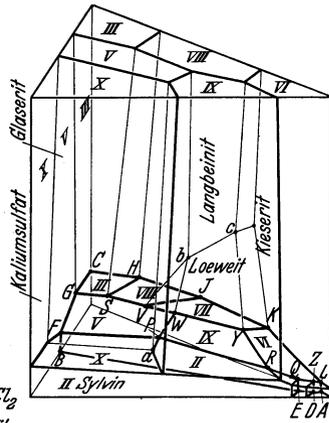


Abb. 148.

Abb. 147—148. $(\text{Na}_2 \cdot \text{K}_2 \cdot \text{Mg})(\text{Cl}_2 \cdot \text{SO}_4) - \text{H}_2\text{O}$ bei 55° .

und seinen Schülern durchgeführt wurde. Als Darstellungsform der Ergebnisse wird neuerdings nicht die alte von van't Hoff benutzte Darstellung, sondern die von Jänecke angegebene, hier auseinandergesetzt benutzt. Mit ihrer Hilfe ist es möglich, einen vollständigen Überblick über die Löslichkeitsverhältnisse bei allen Temperaturen zu bekommen. Es kann an dieser Stelle nur das Wichtigste erwähnt werden. Die Untersuchung bezieht sich auf die Salze, die im Meerwasser vorkommen. Werden die selteneren außer acht gelassen, so handelt es sich um Salze, die zu dem System $(\text{Na}_2 \cdot \text{K}_2 \cdot \text{Mg})(\text{Cl}_2 \cdot \text{SO}_4)$ gehören. Die Sättigung an diesen Salzen für eine bestimmte Temperatur läßt sich alsdann in einem Prisma wiedergeben, wobei, wie erwähnt, der Wassergehalt außer acht gelassen wird. In der Abb. 149 ist dieses für 55° geschehen. Diese zeigt, daß elf verschiedene Salze Bodenkörper sein können. Außer den sechs einfachen Salzen sind es Doppelsalze, und zwar als einziges Chlorid der Carnallit und außerdem die Sulfate: Vanthoffit, Glaserit, Loewit und Langbeinit. Für die Darstellung charakteristisch ist der „Kochsalzkörper“,

der begrenzt ist von Flächen, die bis auf das Kaliumsulfat alle vorkommenden Salze umfassen. Steinsalz kann also mit allen Salzen außer Kaliumsulfat gleichzeitig Bodenkörper sein. Diese Tatsache ist von größter Bedeutung. Wird das Sättigungsbild, wie es die Abb. 148 zeigt, soweit die gleichzeitig an Kochsalz gesättigten Lösungen in Frage kommen, auf die diagonale Ebene Na_2SO_4 — $(\text{KCl})_2$ — MgCl_2 projiziert, so erhält man eine ebene Darstellung, wie es die Abb. 147 angibt. Diese ist eine quantitativ richtige Wiedergabe der Löslichkeitsverhältnisse bei 55° ,

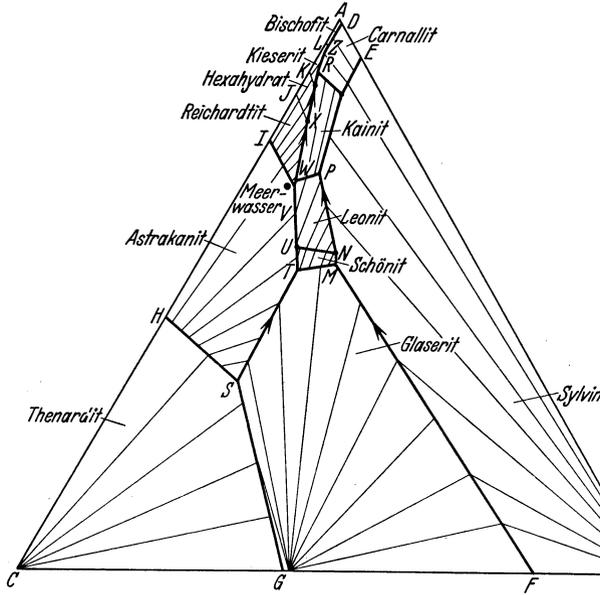


Abb. 149. $(\text{Na}_2\text{SO}_4$ — KCl — $\text{MgCl}_2)$ — H_2O an NaCl gesättigte Lösungen bei 25° .

wobei es sich um die Bodenkörper handelt, die neben Kochsalz auftreten können. Der Gehalt an Na ist nicht mit dargestellt und muß besonders angegeben werden. Diese Darstellung im Dreieck hat es möglich gemacht, für die komplizierten Verhältnisse auch bei Änderung der Temperatur einen vollständigen quantitativ richtigen Überblick zu bekommen. In der Abb. 149 ist zunächst angegeben, wie für eine bestimmte Temperatur die Krystallisationsbahnen verlaufen. Sie bezieht sich auf 25° und ist noch komplizierter als die für 55° geltende Abbildung. Die Geraden, die von den Punkten auslaufen, die den betreffenden Salzen entsprechen, zeigen die Richtung an, in welcher sich unter Salzausscheidung die gesättigten Lösungen verändern. Auf den Grenzkurven sind außer Kochsalz gleichzeitig zwei Salze Bodenkörper. Die Pfeile zeigen an, in welcher Richtung sich auf ihnen bei isothermem Verdunsten die Mutterlauge ändern. Außerdem gibt es Dreisalzlösungen, von denen die eine (Z) beim isothermen Eindunsten gleichzeitig außer Kochsalz drei Salze zur Ausscheidung bringt. Es ist die sog. Endlauge, die aus jeder beliebig zusammengesetzten gesättigten Lösung schließlich erhalten wird.

Mit Änderung der Temperatur ändert sich das Dreieckbild. Die Abb. 150 zeigt, wie zwischen 0° und 25° die Sättigungsverhältnisse sind. Für 0° ist die Darstellung des Sättigungsbildes wesentlich einfacher als für 25° . Diese Darstellung kann auch auf höhere Temperaturen ausgedehnt werden. Nimmt man das Löslichkeitsbild zwischen Wassergehalt

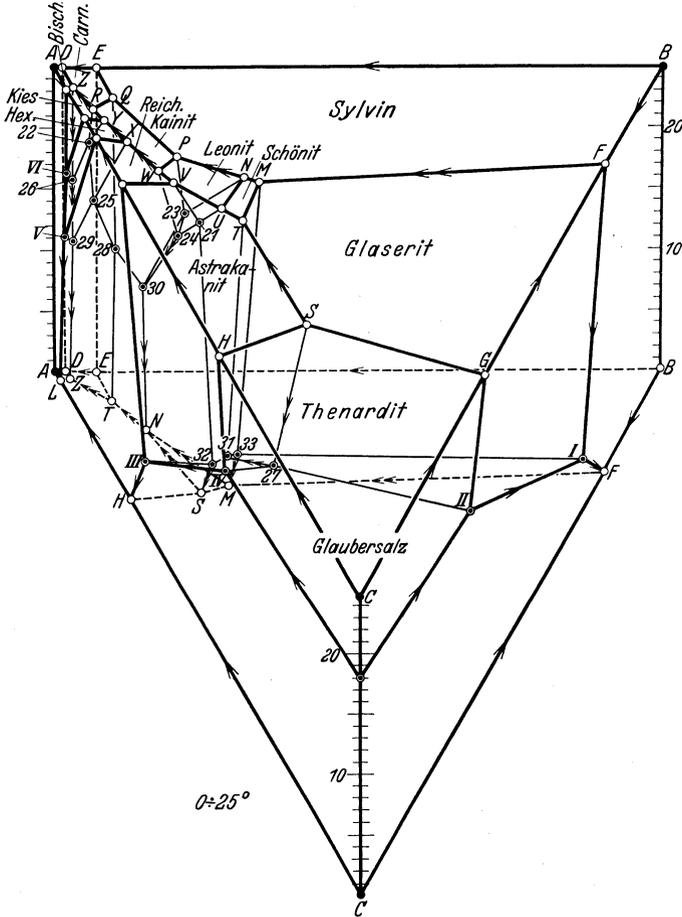


Abb. 150. Veränderung der Löslichkeit der ozeanischen Salze zwischen 0 und 25° . Darstellung nach Jänecke.

der gesättigten Lösungen und Temperatur hinzu, so ist es alsdann möglich, sämtliche Sättigungsverhältnisse dieses komplizierten Systems anzugeben. Genau untersucht wurden die Verhältnisse bei 0° , 25° , 55° , 83° und 110° . Es wurde aus den gefundenen Zahlenwerten ein vollständiges Bild bis über 110° hinaus konstruiert. Diese Darstellung gibt die theoretische Unterlage für viele Prozesse der Kaliindustrie. Allerdings ist vielfach die Praxis der Theorie vorausgeeilt.

4. Die Entstehung der Salzlager

ist zweifellos auf das Eindunsten von Meerwasser zurückzuführen. Nachdem so viel Wasser in einem abgeschlossenen großen Becken verdunstet war, daß sich Salz ausscheiden konnte, hat sich unter Veränderung der Mutterlaugen Salz auf Salz gehäuft. Die Art der Salze ist aus den Sättigungsbeziehungen abzuleiten. Als Zeitraum, während dessen Verlauf im Staßfurter Gebiet Salze zur Ausscheidung gelangten, nimmt man etwa 100000 Jahre an. Nach diesen Ausscheidungen, die natürlich lokal und zeitlich verschieden sein dürften, wurden die gebildeten Salzlager in den der Salzabscheidung folgenden Zeitperioden durch Salzion zugedeckt und dadurch der Wiederauflösung entzogen. Allerdings wurden sie verändert, und zwar nicht nur, wie andere Nichtsalzformationen, durch tektonische Veränderung, sondern auch durch partielles Schmelzen. Gerade dieses Schmelzen der krystallwasserhaltigen Salze unter Bildung wasserfreier oder wasserärmerer ist quantitativ genau aus den Sättigungsbeziehungen abzulesen. Die so veränderten Salze werden jetzt abgebaut. Die Übereinstimmung von Theorie und praktischen Befunden ist ausgezeichnet. Selbstverständlich hat die Natur nicht überall gleichartig gearbeitet.

VII. Praktische Anwendung der Phasenlehre¹.

Die Feststellung von Phasengleichgewichten durch Bestimmung der Umwandlungspunkte ist im wesentlichen auf physikalische Methoden angewiesen. Für die Auswahl der anzuwendenden Methoden bestehen vielfache Möglichkeiten. Sie führen nicht immer zu gleich wertvollen Ergebnissen, so daß die Wahl der Methode von großer Bedeutung ist.

Von den vielen Methoden, die zur Feststellung der im vorstehenden Abschnitt beschriebenen Phasendiagramme herangezogen worden sind, sollen nur einige erwähnt werden. Weiterhin sollen Beispiele die Bedeutung der Phasenlehre für technische Prozesse zeigen.

A. Bestimmung des Umwandlungspunktes durch dilatometrische Messung.

Da die Umwandlung zweier Phasen ineinander fast immer von einer Änderung des spezifischen Volumens begleitet ist, benutzt man zur Feststellung der Gleichgewichtslage die Temperaturabhängigkeit. Erwärmt man z. B. rhombischen Schwefel in einem Gefäß, in dem der Schwefel von einer Flüssigkeit umgeben ist, mit der er keinerlei Verbindung eingeht, und mißt die Ausdehnung in einer graduierten Meßcapillare, so beobachtet man zunächst eine gleichmäßige Volumenzunahme nach AC (Abb. 151). Im Umwandlungspunkt ($95,6^\circ$ bei Atmosphärendruck), bei dem der rhombische Schwefel (spez. Gew. von 2,07) in den monoklinen Schwefel (spez. Gew. 1,96) übergeht,

¹ Bearbeitet von K. Winnacker und E. Berl.

tritt eine plötzliche Volumensteigerung auf (*CD*). Ist die Umwandlung beendet, so mißt man längs *CD* die lineare Ausdehnung des monoklinen Schwefels. Mißt man diese

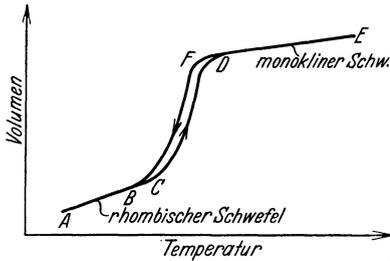


Abb. 151. Umwandlung des Schwefels.

Volumenänderung bei steigender und fallender Temperatur, so findet man, daß sich die Kurven nicht völlig decken. Bei steigender Temperatur liegt dieser gemessene Umwandlungspunkt vielfach etwas höher, bei fallender Temperatur etwas niedriger als der theoretische Umwandlungspunkt. Es ist in solchen Fällen darauf zu achten, daß die Erwärmung und Abkühlung gleichmäßig, z. B. 1^o pro min, erfolgt.

B. Die thermische Analyse.

Erwärmt man ein bei konstanter Temperatur im Phasengleichgewicht befindliches System mehrerer Phasen, so ändert sich die Temperatur solange bei dem Umwandlungspunkt nicht, bis der Übergang in die stabile Phase vollständig vollzogen ist. In diesem Falle kann bei gleichmäßiger Wärmezufuhr der Temperaturverlauf im System zur Erkennung eines Phasenumwandlungspunktes dienen. Umgekehrt wird diese Erscheinung vielfach benutzt, um bestimmte Temperaturfixpunkte festzulegen, z. B. Thermolemente und Thermometer zu eichen. Kühlt man eine über ihren Schmelzpunkt erhitzte Metallschmelze, die aus einer chemisch einheitlichen Substanz *A* besteht, langsam ab, so bleibt das Thermometer beim Schmelzpunkt stehen, bis alles Metall erstarrt ist. Erst dann kühlt sich das erstarrte Metall weiter ab. Setzt man dem Metall *A* einen geringen Anteil des Metalles *B* zu, das mit *A* keinerlei Verbindung eingeht, so wird der Haltepunkt des

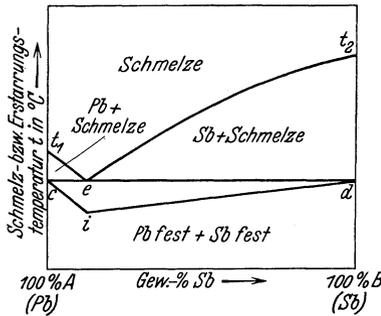


Abb. 152. Schmelzdiagramm Blei-Antimon.

Thermometers *t*₁ (Abb. 152) längs *t*₁*e* erniedrigt, während sich nach wie vor reines *A* abscheidet. Mit steigenden Mengen *B* beginnt im Punkte *e* auch die Abscheidung von *B*. Eine ähnliche Schmelzpunktdropression beobachtet man, wenn man zu reinem *B* steigende Mengen *A* zusetzt. Längs *t*₁ — *e* scheidet sich reines *B* ab. In *e*, dem eutektischen Punkt, scheiden sich *A* und *B* gleichzeitig ab, ohne daß eine chemische Verbindung zwischen beiden entsteht.

Die Schmelzpunktniedrigung *dt* beträgt nach van't Hoff

$$\frac{dt}{dx} = \frac{RT^2}{W}$$

Darin ist: x = die zugesetzte Menge B , W = die Schmelzwärme von A ,
 T = die absolute Schmelz- R = die Gaskonstante.
 temperatur von A ,

Diese Formel ist nur für sehr kleine Mengen von B richtig, t_1 e und t_2 e sind Kurven und keine Geraden.

In Abb. 153 sind einige Temperaturzeitkurven für die Abkühlung einer Schmelze A mit Zusatz von steigenden Mengen B dargestellt. Man sieht, daß der Haltepunkt bei der reinen Substanz A am genauesten zu erkennen ist. Bei steigendem Zusatz B tritt vor allen Dingen dann, wenn geringe Mengen Metall angewandt werden, eine Abflachung dieses Überganges auf. Zuweilen lassen sich auch Systeme weit über ihren Umwandlungspunkt hinaus unterkühlen bzw. überhitzen. Über die Feststellung idealisierter Abkühlungskurven sei auf Kremann [Ahrens Vorträge, Bd. 14, S. 228. 1909] verwiesen.

Kühlt man von diesem Haltepunkt weiter ab, so fällt die Temperatur, indem sich reines A abscheidet. Schließlich beobachtet man bei d , der eutektischen Temperatur, einen zweiten Haltepunkt, in dem sich nunmehr A und B gemeinsam ausscheiden. Liegen alle die auf diese Weise gefundenen Punkte auf einer eutektischen Geraden, so liegt nur eine Lösung beider Stoffe ineinander vor. In diesem Falle bilden die Stoffe A und B keine chemische Verbindung miteinander. In Abb. 154 ist die Haltezeit bei der eutektischen Temperatur unter der eutektischen Geraden aufgetragen. Diese Haltezeit ist gleich Null beim Schmelzpunkt der reinen Substanzen, sie ist am größten bei deren eutektischem Punkt. Es sind also zwei Darstellungen gleichzeitig angegeben, in dem die Temperatur bzw. die Zeit Ordinaten sind.

In Abb. 154 ist das System Magnesium-Aluminium dargestellt, das von Grube [Ztschr. anorgan. allg. Chem. 45, 225 (1905)]¹ mit Hilfe der thermischen Analyse aufgestellt worden ist. Beim Punkte C liefern Magnesium und Aluminium eine chemische Verbindung der Zusammensetzung Al_3Mg_4 . Infolgedessen erhält man eine dreiteilige Schmelzkurve mit zwei Eutektika B und D . Trägt man die Haltezeit der Abkühlungskurven wiederum unter der eutektischen Temperatur B und D auf, so entstehen zwei eutektische Horizontale. Die festen Legierungen bestehen im Feld $CBfe$ aus Aluminium mit Mischkristallen der Zusammensetzung B (Mg-Gehalt

¹ Nach Messungen von D. Hanson u. M. Gaylor [Journ. Inst. Metals 21, 201 (1920)] treten im System Al-Mg zwei chemische Verbindungen der Zusammensetzung Al_3Mg_2 und Al_2Mg_3 auf. Das Grundsätzliche der obigen Darstellung wird hierdurch nicht geändert.

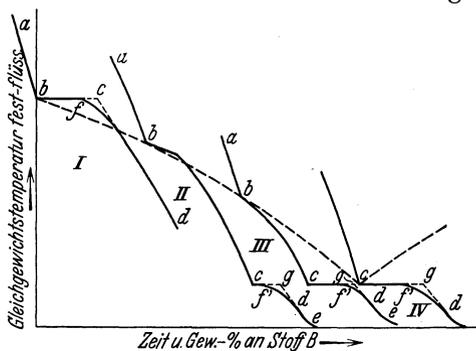
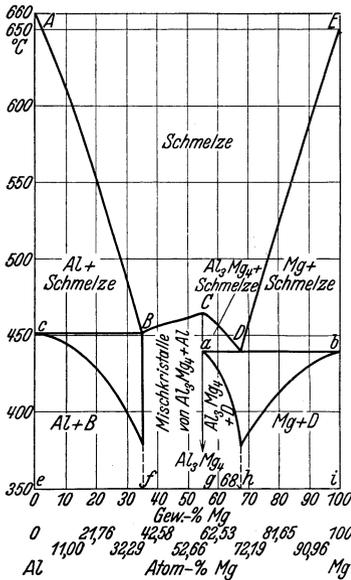


Abb. 153. Temperaturzeitkurven eines Schmelzdiagrammes.

0—35%). Im Feld $BCgF$ (33—55%) enthält die Legierung Mischkrystalle der Zusammensetzung B ($Al_3Mg_4 + Al$). Im Feld $CDhg$ bestehen die primär ausgeschiedenen Krystalle Al_3Mg_4 neben der eutektischen Mischung $Mg + Al_3Mg_4$. Im Feld $Dbih$ existiert primär ausgeschiedenes Mg neben dem Eutektikum C .



Die Legierungen, die die Verbindung Al_3Mg_4 enthalten, sind sehr brüchig und haben schlechte mechanische Eigenschaften. Die Legierungen im Bereich von 35—55% Mg sind sehr hart und zeigen große Polierfähigkeit. Sie liefern tadellos spiegelnde Flächen (vgl. D.R.P. 110178 Zeiß, Herstellung von Spiegeln mit großem Reflexionsvermögen für ultraviolette Licht). Die magnesiumreichen Legierungen mit 68 bis 100% Mg haben bisher keine technische Verwendung gefunden. Von großer Bedeutung sind die magnesiumarmen Legierungen von 0—35% Mg . Ihre Härte wächst mit steigendem Magnesiumgehalt. Sie sind unter dem Namen Magnalium bekannt (D.R.P. 105502 Mach). Besondere Bedeutung haben die von Wilm [Metallurgie 1911, 225] eingeführten Duraluminiumlegierungen erlangt.

Sie enthalten:

0,5% Mg 3,5—5,5% Cu 0,5—0,8%, Rest Aluminium.

Duraluminium ist vergütbar. Durch Abschrecken bei 500° wird es gehärtet. Bemerkenswerterweise tritt die eigentliche Härtung erst einige Stunden später ein. Man kann deshalb beim Härten eingetretene Formfehler durch nachträgliches Richten in der ersten Stunde korrigieren.

C. Die optische Untersuchung von Phasengleichgewichten.

Bei Umwandlungstemperaturen einfacher Stoffe gestaltet sich die Ermittlung des Umwandlungspunktes besonders einfach, wenn der Übergang von einer Phase in die andere von einer Farbänderung begleitet ist. Z. B. geht das gelbe Quecksilberjodid beim Umwandlungspunkt in die rote Verbindung über. Änderungen in der Kristallstruktur werden mit dem Mikroskop untersucht. Bei der Erforschung der Metalle und Legierungen hat die metallographische Untersuchung mit dem Metallmikroskop gute Dienste geleistet [s. Goerens, Metallographie].

D. Phasengleichgewicht in Salzlösungen.

1. Das System Natriumsulfat-Glaubersalz.

Ein wichtiges Hilfsmittel zur Aufstellung von Phasendiagrammen ist die Bestimmung der Löslichkeit. Diese Methode hat bei der Unter-

suchung wäßriger Salzlösungen weitgehend Anwendung gefunden. Die Bestimmung der Löslichkeit kann im einfachsten Falle so erfolgen, daß die feingepulverte Substanz mit dem Lösungsmittel in einen Thermostaten gebracht wird. Das Reaktionsgefäß wird solange intensiv gedreht oder geschüttelt, bis Sättigung eingetreten ist. Man pipettiert dann einen Teil der Lösung ab und bestimmt die Menge und Zusammensetzung des darin gelösten Salzes.

Die Angabe der Löslichkeit kann in verschiedener Art erfolgen, z. B.

$$\begin{array}{ll} \text{g Salz auf 100 g Lösung (Gew.-%),} & \text{g Wasser auf 100 g Salz,} \\ \text{g Salz auf 100 cm}^3 \text{ H}_2\text{O,} & \text{g Salz auf 1 l Lösung.} \end{array}$$

Sehr gebräuchlich ist bei der Aufstellung von Phasendiagrammen nach van't Hoff die Angabe Mole Salz je 1000 Mole Wasser. Neuerdings wird besonders bei kompliziert zusammengesetzten Lösungen die Darstellung von Jänecke vorgezogen.

Beispiel: Das System $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{—Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{ H}_2\text{O}$.

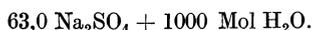
Natriumsulfat kristallisiert bei 0° mit 10 Mol Kristallwasser. Die Löslichkeit des Glaubersalzes ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{ H}_2\text{O}$) nimmt mit steigender Temperatur zu.

Bei höherer Temperatur nimmt die Löslichkeit nicht weiter zu. Zugleich scheidet sich aus der gesättigten Lösung nicht mehr das Dekahydrat, sondern wasserfreies Na_2SO_4 ab. Die Löslichkeit des wasserfreien Na_2SO_4 sinkt mit steigender Temperatur (s. Abb. 155).

Trägt man diese Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit graphisch auf, so schneiden sich die Kurven bei $32,8^\circ\text{C}$. In diesem Punkt ist das System invariant, da Na_2SO_4 , $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{ H}_2\text{O}$ gesättigte Lösung und Wasserdampf sich im Gleichgewicht befinden. Bei fallender Temperatur scheidet sich aus gesättigter Lösung das Dekahydrat, bei steigender Temperatur wasserfreies Na_2SO_4 ab.

Vergleicht man die Zusammensetzung der Mutterlauge in diesem Umwandlungspunkt (33,20% Na_2SO_4 + 66,80% H_2O) mit der Zusammensetzung des Dekahydrats (44,09% Na_2SO_4 + 55,91% H_2O), so ergibt sich, daß das Glaubersalz inkongruent schmilzt (s. S. 226). Die Schmelze hat eine andere Konzentration als die feste Phase vor dem Schmelzen.

Aus 100 Mol $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{ H}_2\text{O}$ entsteht, da alles Wasser in die Mutterlauge geht, eine Schmelze mit der Zusammensetzung:



Für das entstehende wasserfreie Na_2SO_4 ergibt sich nach dem Schmelzen:

$$\begin{array}{l} x \text{ Na}_2\text{SO}_4 = 100 (\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{ H}_2\text{O}) - (63 \text{ Na}_2\text{SO}_4 + 1000 \text{ H}_2\text{O}). \\ x = 37 \text{ Mol Na}_2\text{SO}_4. \end{array}$$

Die Umsetzung erfolgt formelmäßig nach der Gleichung:



In Gewichtseinheiten ausgedrückt bedeutet das:

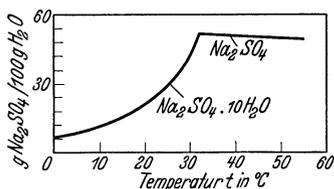


Abb. 155. Schmelzdiagramm Glaubersalz-Natriumsulfat.

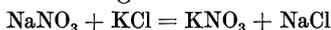
Schmilzt man 32,22 kg Glaubersalz, so fallen 5,26 kg wasserfreies Na_2SO_4 aus; gleichzeitig entstehen 26,98 kg Mutterlauge.

Aus Abb. 156 ist weiter zu entnehmen, daß durch Abkühlung dieser 26,98 kg Mutterlauge von $32,38^\circ$ auf 0° 19,51 kg $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ ausfallen, während 7,44 kg Lauge mit 4,49% Na_2SO_4 zurückbleiben.

2. Reziproke Salzpaare.

Allgemeines.

Eine wichtige Gruppe technischer Prozesse der anorganischen Chemie gründet sich auf die Umsetzung reziproker Salzpaare. Es sind das Salzpaare, die durch eine Gleichung wie etwa



verknüpft werden können. In diesem Falle treten keine Doppelsalze auf. Die Salze, die auf der rechten Seite der Gleichung stehen, bezeichnet man als das beständige oder stabile Salzpaar. Das heißt, stellt man eine gesättigte Lösung entsprechend der Zusammensetzung von $\text{NaNO}_3 + \text{KCl}$ her und kühlt diese ab, so bildet sich das Salzpaar $\text{NaCl} + \text{KNO}_3$.

Bei der technischen Gewinnung von Salzen auf dem Wege über die doppelte Umsetzung reziproker Salzpaare können zwei Fälle unterschieden werden:

- I. Das zu gewinnende Salz gehört zum labilen Salzpaar.
- II. Das zu gewinnende Salz gehört zum stabilen Salzpaar.

a) Zu gewinnendes labiles Salzpaar.

Das System $2 \text{NaCl} + \text{MgSO}_4 = \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{MgCl}_2$ (Glaubersalz-Herstellung).

Das stabile Salzpaar ist in diesem Falle $2 \text{NaCl} + \text{MgSO}_4$. Mischt man die beiden Salze bei 0° , so scheidet sich das Salz $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ aus. Eine äquivalente Menge MgCl_2 bleibt in Lösung. Man geht in diesem Falle von dem stabilen Salzpaar aus. Es werden zweckmäßig nicht äquivalente Mengen dieses Salzpaares angewendet. Sie richten sich nach der Zusammensetzung der bei der jeweiligen Arbeitstemperatur gesättigten Lösung.

Die Phasengleichgewichte dieses Systems für eine Temperatur von 25° sind auf S. 240, Abb. 128 wiedergegeben. Das Diagramm besteht bei einer Temperatur von 25° aus 7 Feldern, zu denen folgende festen Phasen gehören:

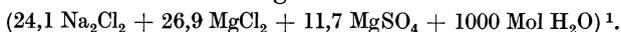
- | | |
|---|---|
| 1. NaCl | 5. $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$ (Astrakanit) |
| 2. $\text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ | 6. $\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ |
| 3. Wasserfreies Na_2SO_4 | 7. $\text{MgSO}_4 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$. |
| 4. $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ | |

Einen sehr großen Raum nimmt die Darstellung für das Doppelsalz Astrakanit, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$, ein. Bei 25° sind die Kristallisationsfelder des Paares $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{MgCl}_2$ recht klein. Wesentlich einfacher gestaltet sich das Diagramm bei 0° (Abb. 126, S. 239).

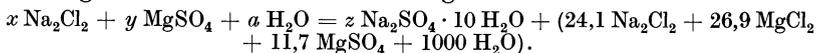
Die Zahl der sich abscheidenden festen Phasen ist auf 4 zurückgegangen:

- | | |
|---|---|
| 1. NaCl | 3. $\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ |
| 2. $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ | 4. $\text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$. |

Die Felder des wasserfreien Na_2SO_4 und des Doppelsalzes, des Astrakanits, sind gänzlich verschwunden, während das Feld des Glaubersalzes sehr stark gewachsen ist. Aus den beiden Diagrammen ergibt sich die Möglichkeit der Glaubersalzherstellung durch Abkühlen der NaCl und MgSO_4 enthaltenden Salze. Im Punkte x steht die NaCl, MgCl_2 und MgSO_4 enthaltende Sole mit festem Glaubersalz im Gleichgewicht. Diese Mutterlauge x hat die Zusammensetzung:



Daraus berechnet sich diejenige Menge von Na_2Cl_2 , MgCl_2 und H_2O , die zu einem Teil Mutterlauge obiger Zusammensetzung und zu Glaubersalz umgesetzt werden können wie folgt:



Man erhält:



Auf 8,12 kg Glaubersalz entstehen: 23,3 kg Mutterlauge obiger Zusammensetzung. Bei dieser vom stabilen Salzpaar ausgehenden Herstellung verwendet man keine äquivalenten Mengen der Ausgangsprodukte. Die Zusammensetzung der Ausgangslauge richtet sich in diesen Fällen nach der Zusammensetzung der Lösung.

Das auf diese Art hergestellte Natriumsulfat ist säure- und eisenfrei und eignet sich besonders zur Herstellung hochwertiger Gläser und zum Verschneiden von Farbstoffen. Während diese Fabrikation, die technisch bei -4° und darunter ausgeführt wird, früher nur im Winter durchgeführt wurde, hat die Kaliindustrie sich heute durch Aufstellung großer Kältemaschinen von der Witterung und den Jahreszeiten unabhängig gemacht. Im technischen Betriebe werden ungefähr 165 g Glaubersalz je m^3 Lauge erhalten.

b) Zu gewinnendes stabiles Salzpaar.

α) Das System $\text{NaNO}_3 + \text{KCl} = \text{KNO}_3 + \text{NaCl}$ (Konversionsaltpeter-Herstellung).

Die zu gewinnende Substanz, das Kaliumnitrat, gehört zum stabilen Salzpaar. KNO_3 und NaCl sind gleichzeitig als Bodenkörper möglich in und bilden kongruent gesättigte Lösungen. Das Phasendiagramm ist Abb. 135—136, S. 242 dargestellt. An Hand der schematischen Skizze (Abb. 156) (nicht maßstäblich) kann der Vorgang der Gewinnung von KNO_3 wie folgt dargestellt werden: Es sind die Isothermen der Löslichkeit für 20° und 100° für ein Gemisch von $\text{NaCl} + \text{KNO}_3$ dargestellt. Geht man von einem äquimolaren Gemisch $\text{NaCl} + \text{KNO}_3$ (M) aus, das gerade in soviel Wasser gelöst wird, daß bei 20° kein Bodenkörper entsteht, so

¹ Nach Althammer: Die graphische und rechnerische Behandlung von Salzlösungen, 1924.

erhält man die Lösung 1. Beim Erhitzen auf 100° und bei weiterem Eindampfen geht der Wassergehalt längs 1—2 zurück. Da aber bei 100° NaCl nicht mehr in dem Maße löslich ist, wie es der Lösung 2 entsprechen würde, fällt NaCl als Bodenkörper aus. Hierbei entsteht die Mutterlauge der Zusammensetzung 3. Kühlt man die Mutterlauge 3 ab, so scheidet sich KNO₃ aus, unter Entstehung der Mutterlauge 5. Der Mutterlauge 5 wird so viel neues NaNO₃ und KCl im äquimolaren Verhältnis *M* zugesetzt, daß eine Lösung 6 entsteht, die beim Erhitzen auf 100° unter Abscheidung von NaCl wiederum die Mutterlauge 3 liefert. Der Vorgang beruht im wesentlichen auf der Tatsache, daß die Löslichkeit des Kochsalzes nur sehr wenig, die des Kaliumnitrates sehr stark mit steigender Temperatur wächst.

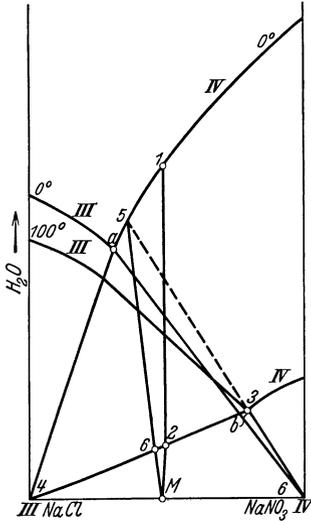
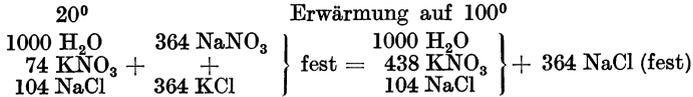


Abb. 156. Diagramm $\text{NaNO}_3 + \text{KCl} = \text{KNO}_3 + \text{NaCl}$.

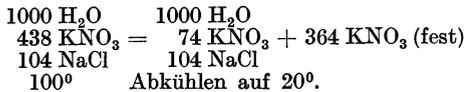
erhält man die Lösung 1. Beim Erhitzen auf 100° und bei weiterem Eindampfen geht der Wassergehalt längs 1—2 zurück. Da aber bei 100° NaCl nicht mehr in dem Maße löslich ist, wie es der Lösung 2 entsprechen würde, fällt NaCl als Bodenkörper aus. Hierbei entsteht die Mutterlauge der Zusammensetzung 3. Kühlt man die Mutterlauge 3 ab, so scheidet sich KNO₃ aus, unter Entstehung der Mutterlauge 5. Der Mutterlauge 5 wird so viel neues NaNO₃ und KCl im äquimolaren Verhältnis *M* zugesetzt, daß eine Lösung 6 entsteht, die beim Erhitzen auf 100° unter Abscheidung von NaCl wiederum die Mutterlauge 3 liefert. Der Vorgang beruht im wesentlichen auf der Tatsache, daß die Löslichkeit des Kochsalzes nur sehr wenig, die des Kaliumnitrates sehr stark mit steigender Temperatur wächst. Kubierschky [Die Deutsche Kaliindustrie. Halle 1907] gibt für den Verlauf des Vorganges folgende Zahlen an:

Eine gesättigte Lösung enthält:
 bei 20° 1000 H₂O; 74 KNO₃; 104 NaCl
 bei 100° 1000 H₂O; 438 KNO₃; 104 NaCl

Mutterlauge 5:



Mutterlauge 3:



Die Mutterlauge 3 und 5 kehren dauernd in den Prozeß zurück und können jahrelang verwendet werden. Da jedoch die Ausgangsmaterialien nicht rein sind, reichern sich in den Mutterlauge Bestandteile an, die die Verwendung des Produktes beeinträchtigen. MgCl₂ wird durch Zusatz von Na₂CO₃ entfernt. Beimengungen durch KClO₄ werden durch Umkrystallisieren des Kaliumnitrates entfernt. Die erhaltenen Produkte NaCl und KNO₃ werden durch mehrmaliges Abdecken zuerst mit Mutterlauge, später mit frischem Wasser von ihren Verunreinigungen befreit.

β) Das System $\text{NaCl} + \text{NH}_4\text{HCO}_3 = \text{NaHCO}_3 + \text{NH}_4\text{Cl}$ (Ammoniak-soda-Herstellung).

Von den Salzpaaren ist das System $\text{NaHCO}_3 + \text{NH}_4\text{Cl}$ stabil. $\text{NaHCO}_3 + \text{NH}_4\text{Cl}$ bilden inkongruente Lösungen, d. h. in Berührung mit Wasser scheidet sich außer diesem Salzpaar auch NH_4HCO_3 ab. Das System ist von Fedotieff [Ztschr. physikal. Chem. 49, 162 (1904)] u. a. phasen-

theoretisch mit Hilfe von Löslichkeitsbestimmungen untersucht worden. Nach Fedotieff enthält die an NaHCO_3 , NH_4HCO_3 (als Bodenkörper) und NH_4Cl gesättigte Lösung je 1000 g H_2O :

$$\text{bei } 0^\circ \text{ in Mol: } 0,59 \text{ NaHCO}_3 + 0,96 \text{ NaCl} + 4,92 \text{ NH}_4\text{Cl}, \quad (1)$$

$$\text{bei } 15^\circ \text{ in Mol: } 0,93 \text{ NaHCO}_3 + 0,51 \text{ NaCl} + 6,28 \text{ NH}_4\text{Cl}. \quad (2)$$

Fedotieff hat durch Extrapolation festgestellt, daß der Kochsalzgehalt bei 32° auf Null schwindet, daß demnach von 32° ab festes $\text{NaHCO}_3 + \text{NH}_4\text{Cl}$ kein NH_4HCO_3 mehr abscheidet.

Technisch wird der Prozeß bei 30° durchgeführt, da das ausfallende NaHCO_3 bei dieser Temperatur grobkrystallin ist und sich leicht reinigen läßt. Um unter diesen Umständen trotzdem die unerwünschte Abscheidung von NH_4HCO_3 neben NaHCO_3 zu verhindern, muß ein Überschuß an NaCl angewandt werden. Diesen Überschuß hat Meyerhoffer [Mitteilungen zur Förderung des Gewerbefleißes, 1905] nach den Ergebnissen von Fedotieff für eine Temperatur von 15° wie folgt berechnet:

Läßt man bei 15° 7 Mol NH_4HCO_3 auf 7 Mol NaCl in 1000 g H_2O aufeinander einwirken, so entsteht eine Lösung der Zusammensetzung 2. Als Bodenkörper scheiden sich ab:



Um die Abscheidung der 0,51 Mol NH_4HCO_3 zu vermeiden, müßte man auf 7 Mol NH_4HCO_3 7 und weitere 0,51 Mol NH_4HCO_3 , insgesamt also 7,51 Mol zusetzen. Da die Lösung unverändert bleibt, sind jetzt im Bodenkörper $5,56 + 0,51 = 6,07$ Mol NaHCO_3 neben $0,21 + 0,51 = 0,72$ NH_4Cl vorhanden. Um die unerwünschten 0,72 Mol NH_4Cl im Bodenkörper noch zu vermeiden, muß man die Menge des sich zu NH_4Cl und NaHCO_3 umsetzenden NH_4HCO_3 und NaCl um je 0,72 Mol vermindern.

Man erhält dann aus $7,0 - 0,72 = 6,28$ Mol NH_4HCO_3 und $7,51 - 0,72 = 6,79$ Mol NaCl , demnach **5,35 Mol festes reines NaHCO_3** und die Mutterlauge (2) mit 1000 g $\text{H}_2\text{O} + 0,93$ Mol $\text{NaHCO}_3 + 0,51$ Mol $\text{NaCl} + 6,28$ Mol NH_4Cl .

Aus dieser Berechnung ergibt sich die theoretische Forderung, daß bei der Durchführung des Solvay-Prozesses NaCl und NH_4HCO_3 nicht in äquimolaren Mengen, sondern im Verhältnis 1,08 : 1 angewendet werden müssen. Eine geringere Menge NaCl würde die gleichzeitige Abscheidung von NH_4HCO_3 neben NaHCO_3 zur Folge haben. Höherer NaCl -Überschuß hat die Abscheidung von NH_4Cl zur Folge.

Unter diesen Bedingungen liefert dieser Vorgang eine Ausbeute von NaHCO_3 , die sich auf 78,8%, bezogen auf Mole NaCl , und 85,2%, bezogen auf Mol NH_4HCO_3 beläuft.

Da bei der praktischen Durchführung die Löslichkeit des Kochsalzes durch das Einleiten von NH_3 herabgesetzt wird, werden diese Ausbeuten nicht erreicht. Man gewinnt nach Schreib [Ztschr. angew. Chem. 2, 283 (1888)] etwa 67—70% des eingesetzten Na als NaHCO_3 .

Vorgänge bei der Verbrennung, Spaltung und Bildung von Brennstoffen.

Von Dr.-Ing. K. Winnacker, Frankfurt a. M.-Höchst und
Prof. Dr. E. Berl, Darmstadt-Pittsburgh.

Im Hinblick auf die vielseitigen Anforderungen, die an den Vorgang der Verbrennung als Quelle von Wärme, Licht und kinetischer Energie gestellt werden, ist es notwendig, nicht nur die verschiedenen natürlichen und künstlichen Brennstoffe hinsichtlich der Größe ihrer verfügbaren Wärmemenge zu untersuchen, sondern auch den Mechanismus dieser Energieentfaltung, ferner Verbrennungsgeschwindigkeit und Verbrennungstemperatur in den Bereich der Betrachtungen zu ziehen.

I. Thermodynamik der Verbrennungs- und Spaltungsvorgänge.

A. Die Verbrennungs- und Bildungswärme.

1. Begriffsbestimmung.

Nach dem ersten Hauptsatz der Wärmelehre ist bei einem jeden Vorgang, wenn er sich in einem abgeschlossenen System abspielt, die vom System nach außen abgegebene Wärme Q gleich der Änderung der Gesamtenergie U , vermindert um die vom System geleistete äußere Arbeit A :

$$-Q = U - A; \quad (1)$$

Q wird mit negativem Vorzeichen eingesetzt, wenn die Wärmemenge vom System abgegeben wird. Für einen isotherm verlaufenden Verbrennungsvorgang, bei dem die Arbeit gegen den Atmosphärendruck geleistet wird, und bei dem U_1 der Energieinhalt des Brennstoffes vor der Verbrennung und U_2 der Energieinhalt der Reaktionsprodukte nach der Verbrennung ist, wird deshalb:

$$U_1 - U_2 = A - Q; \quad (2)$$

Q ist in diesem Falle gleich der Wärmetönung oder gleich der Verbrennungswärme. Bei konstantem Volumen wird die äußere Arbeit $A = 0$ und damit:

$$U_1 - U_2 = Q_v = H_v; \quad (3)$$

H_v ist der Heizwert des Brennstoffes bei Verbrennung in konstantem Volumen.

Für die Mehrzahl aller Verbrennungsvorgänge, die in den Feuerungen in Verbindung mit der Atmosphäre vor sich gehen, ist der Heizwert bei konstantem Druck — H_p — von Bedeutung. Es gilt:

$$H_p = H_v - p \cdot (v_2 - v_1); \quad (4)$$

wenn v_1 das Volumen vor der Verbrennung und v_2 das Volumen nach der Verbrennung ist. Bei der Reaktion:

$$n_1 \cdot A + n_2 \cdot B = n_3 \cdot C + n_4 \cdot D$$

sei ν die Summe der reagierenden Volumina, wobei die Volumina der linken Seite positiv, die der rechten Seite negativ gezählt werden:

$$\nu = n_1 + n_2 - (n_3 + n_4).$$

Für die Raumzunahme ΔV gilt dann:

$$\Delta V = -\nu \cdot V \quad (V = 22,4 \text{ l/760 mm}). \quad (5)$$

Aus Gleichung (4) und (5) erhält man:

$$H_p = H_v + p \cdot \nu \cdot V.$$

Da $P \cdot V = R \cdot T$, so wird

$$H_p = H_v + \nu \cdot R_{cal} \cdot T. \quad (6)$$

Beispiel: 1. Für die Reaktion $H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O$

$$1 \text{ Vol} + \frac{1}{2} \text{ Vol} = 1 \text{ Vol}$$

ist unter der Voraussetzung, daß das Wasser dampfförmig bleibt, $\nu = +\frac{1}{2}$; für T abs. = 293 gilt nach Gleichung (6):

$$H_p = H_v + \frac{1}{2} \cdot 1,985 \cdot 293$$

$$H_p = H_v + 291 \text{ kcal.}$$

2. Für die Reaktion $C + O_2 = 2 CO$ wird $\nu = -1$; für T abs. = 293 erhält man aus Gleichung (6):

$$H_p = H_v - 581 \text{ kcal.}$$

Verläuft ein Verbrennungsvorgang unter Volumenkontraktion, so ist $H_p > H_v$; verläuft er unter Dilatation, so wird $H_p < H_v$.

2. Die Änderung der Wärmetönung mit der Temperatur.

Die Wärmetönung einer Reaktion wird im allgemeinen für Normalbedingungen ($0^\circ C$, 760 mm) angegeben. Nimmt man an, daß die in den Ausgangsstoffen gebundene chemische Energie in ihrer Größe temperaturunabhängig ist, so tritt eine Änderung in der absoluten Größe der Verbrennungswärme mit der Temperatur dann auf, wenn sich bei Veränderung der Temperatur die spezifischen Wärmen der Ausgangs- und Endprodukte relativ zueinander verändern. In einem Calorimeter wird bei konstantem Volumen die Wärmetönung der Reaktion:

$$n_1 \cdot A + n_2 \cdot B = n_3 \cdot C + n_4 \cdot D$$

gemessen. Nach dem Zünden werden die Endprodukte im Calorimeter durch die umgebende Flüssigkeit wieder auf die Anfangstemperatur gekühlt. Der chemische Energieinhalt des Systems H_{v_0} wird im Calorimeter nur dann gemessen, wenn die Wärmehalte der Ausgangsstoffe gleich den Wärmehalten der Verbrennungsprodukte sind. Da aber bei verschiedenen Temperaturen die spezifischen Wärmen der Reaktionspartner vielfach eine ungleichmäßige Änderung erfahren, ergibt sich

eine Temperaturabhängigkeit von H_v , die berechnet werden kann, wenn die spezifischen Wärmen in dem zu beobachtenden Temperaturintervall bekannt sind.

Sind m_1, m_2, m_3 und m_4 die Molekulargewichte und c_1, c_2, c_3 und c_4 die zugehörigen mittleren spezifischen Wärmen, so ist:

$$\frac{dH_v}{dT} = n_1 \cdot m_1 \cdot c_1 + n_2 \cdot m_2 \cdot c_2 - (n_3 \cdot m_3 \cdot c_3 + n_4 \cdot m_4 \cdot c_4)$$

oder

$$\frac{dH_v}{dT} = \sum n (m \cdot c_v).$$

Die Änderung der Wärmetönung H_v mit der Temperatur ist gleich der algebraischen Summe der Wärmeinhalte je Grad der Ausgangsstoffe, vermindert um die algebraische Summe der Wärmeinhalte je Grad der entstehenden Stoffe.

Da $H_p = H_v + \nu \cdot R \cdot T$ ist, so gilt:

$$\frac{dH_p}{dT} = \sum n \cdot (m \cdot c_v + \nu \cdot R)$$

und da $c_p - c_v = R$ ist, und $\nu =$ Summe der reagierenden Stoffe, vermindert um die Summe der Reaktionsprodukte, so gilt:

$$\frac{d \cdot H_p}{d \cdot T} = \sum n \cdot (m \cdot c_p).$$

Beispiel: Es soll die Temperaturabhängigkeit der Verbrennungswärme H_p für die mittlere Temperatur $T = 273$ berechnet werden für die Reaktion



$$c_{p,m}^{273} \text{H}_2 = 6,94$$

$$c_{p,m}^{273} \text{O}_2 = 6,99$$

$$c_{p,m}^{273} \text{H}_2\text{O}_{(\text{Dampf})} = 8,34$$

$$\frac{dH_p}{dT} = 2 \cdot 6,94 + 6,99 - 2 \cdot 8,34$$

$$\frac{dH_p}{dT} = + 4,19 \text{ kcal.}$$

Die Änderung der Verbrennungswärme mit steigender Temperatur beträgt im Bereich von 273^0 abs. $+ 4,19$ kcal je Grad.

Aus dem Beispiel ist ersichtlich, daß diese Temperaturabhängigkeit bei großen Wärmetönungen unbedeutend ist. Bei Umwandlungen polymorpher Stoffe z. B. und allgemein bei Reaktionen mit kleinen Wärmetönungen kann die Vernachlässigung dieser Korrektur zu erheblichen Fehlern Anlaß geben. Eine größere Korrektur entsteht naturgemäß dann, wenn Reaktionen bei weit von 0^0 entfernten Temperaturen betrachtet werden.

3. Berechnung der Verbrennungswärme.

Die Verbrennungswärme technischer Brennstoffe wird in kcal je m^3 oder kcal je kg angegeben.

Die Bestimmung der Verbrennungswärme erfolgt für feste und hochsiedende flüssige Brennstoffe in der Calorimeterbombe, für gasförmige und niedrigsiedende Brennstoffe im Junkers-Calorimeter [s. hierzu Berl-Lunge: Chemisch-technische Untersuchungsmethoden, Bd. 2, S. 81. 1932]. Die erstgenannte Methode liefert den Heizwert bei konstantem Volumen H_v , die Bestimmung im Junkers-Calorimeter liefert H_p . Die Heizwerte von Brennstoffgemischen, wie sie die Mehrzahl aller technischen Brennstoffe darstellen, lassen sich additiv unter Berücksichtigung der prozentualen Anteile berechnen, wenn die Heizwerte der Komponenten bekannt sind. Diese Berechnung gibt bei gasförmigen Brennstoffen des öfteren zu Fehlern Anlaß, wenn sie sich auf die Ergebnisse der Gasanalyse stützt. Die übliche Gasanalyse liefert den Gehalt an ungesättigten bzw. gesättigten Kohlenwasserstoffen als Summe, ohne Rücksicht auf deren Molekulargewicht. Wie aus Tabelle 2 hervorgeht, unterscheiden sich Kohlenwasserstoffe der gleichen homologen Reihe beträchtlich hinsichtlich ihrer Verbrennungswärme. Setzt man für die als Methan bestimmten gesättigten Kohlenwasserstoffe dessen Heizwert ein, wenn z. B. größere Mengen Propan im Gas enthalten sind, so entstehen erhebliche Fehler. Ein Gleiches gilt für die homologen ungesättigten und aromatischen Kohlenwasserstoffe. Bei Brennstoffen, die entweder vor der Verbrennung Wasser in Gestalt von Feuchtigkeit enthalten, oder bei der Verbrennung Wasser bilden, ist der Heizwert verschieden, je nachdem, ob dieses Wasser in den Verbrennungsprodukten dampfförmig oder flüssig vorliegt. Im ersten Falle muß die der Wassermenge entsprechende Verdampfungswärme von 637 kcal je kg bei 0°, 760 mm (bzw. 617 kcal je kg bei 20° C) von der Verbrennungswärme in Abzug gebracht werden. Man unterscheidet demnach zwischen dem oberen und dem unteren Heizwert H_o bzw. H_u . Ist die im Brennstoff vorhandene Menge Wasser, zuzüglich der bei der Verbrennung entstehenden, W kg, so gilt:

$$H_o = H_u + 0,637 W.$$

Die Heizwerte chemischer Verbindungen mit kompliziertem Aufbau, wie sie z. B. in den Kohlen vorliegen, können aus denen der Elemente nicht berechnet werden, da die Bildungswärmen nicht bekannt sind. Je nachdem, ob die Bildung aus den Elementen exotherm oder endotherm verläuft (s. hierzu Tabelle 1), erhält man bei der Berechnung des Heizwertes einen zu hohen oder niedrigen Wert.

Zur annähernden Berechnung des Heizwertes aus der Elementaranalyse ist die von Dulong aufgestellte Formel gebräuchlich, die jedoch auf Genauigkeit keinerlei Anspruch hat:

$$H_o = 8140 c + 34100 \left(h - \frac{0}{8} \right) + 2220 \cdot s$$

$$H_u = 8140 c + 28700 \left(h - \frac{0}{8} \right) + 2220 \cdot s - 637 W.$$

Darin sind: c = Kohlenstoffgehalt des Brennstoffes in Gewichtseinheiten; h = Wasserstoffgehalt des Brennstoffes in Gewichtseinheiten; o = Sauerstoffgehalt des Brennstoffes in Gewichtseinheiten; s = Schwefelgehalt des Brennstoffes in Gewichtseinheiten; W = Feuchtigkeits- + Verbrennungswasser.

Tabelle 1. Thermodynamische Daten von Wasserstoff, Graphit und einigen Kohlenstoffverbindungen.

Formel	Name	Molekulargewicht bzw. Atomgewicht	Verbrennungswärme kcal/Mol	Bildungswärme kcal/Mol	Freie Energie A_{298} kcal/Mol	Entropie S	Molarwärme c_p
H ₂	Wasserstoff (gasf.)	2,02	57,84	—	—	2 × 15,6	—
C	(fl.)	2,02	68,33	—	—	44,8	6,5 + 0,0009 T
	Graphit	12,00	(in CO) 26,15 (in CO ₂) 94,25	—	0	1,3 (Gas.) 33,1 47,3	1,1 + 0,004 T
CO	Kohlenoxyd	28,00	68,10	68,10	—	—	—
CO ₂	Kohlendioxyd	44,00	—	94,25	—	—	—
CH ₄	Methan	16,04	212,8	18,1	—	—	—
C ₂ H ₆	Äthan	30,06	370,4	23,1	—	—	—
C ₃ H ₈	Propan	44,08	529,2	26,1	—	—	—
C ₄ H ₁₀	Butan	58,10	683,4	35,3	—	—	—
C ₅ H ₁₂	Pentan	72,1	839,5	40,5	—	—	—
C ₆ H ₁₄	Hexan	86,1	992,4	51	—	—	—
C ₇ H ₁₆	Heptan	100,1	1149,9	57	—	71,1 (fl.)	—
C ₈ H ₁₈	Okтан	114,1	1305	62,7	—	78,9 (fl.)	—
C ₁₀ H ₂₂	Dekan	142,2	1610	85,5	—	86,0 (fl.)	—
C ₂ H ₂	Acetylen	26,02	310,1	—	50,84	—	7,4 + 0,01 T
C ₂ H ₄	Äthylen	28,04	333,4	—	12,3	—	6,0 + 0,015 T (g.)
C ₆ H ₆	Benzol	78,05	782,3	—	30,64 (g.)	41,9 (fl.)	6,5 + 0,052 T (g.)
C ₈ H ₈	Toluol	92,06	934,4	—	26,50 (fl.)	52,4 (fl.)	7,8 + 0,064 T (g.)
C ₈ H ₁₀	Xylol	106,08	1085	+ 10,5	27,3 (fl.)	59,3 (fl.)	9,1 + 0,076 T (g.)
C ₁₀ H ₈	Naphthalin	128,06	1234,2	—	45,9 (fl.)	51,7 (fl.)	5,7 + 0,078 T (g.)
C ₁₀ H ₁₀	Diphenyl	154,08	1493	—	57,9 (fl.)	59,8 (fl.)	—
C ₁₄ H ₁₀	Anthracen	178,08	1695	—	64,8 (fest)	49,6 (fest)	5,0 + 0,100 T (g.)
C ₁₄ H ₁₂	Phenanthren	178,08	1693	—	60,00 (fest)	50,6 (fest)	—
C ₆ H ₁₂	Cyclohexan	84,08	939,1	+ 36,4	36,8 (fl.)	49,2 (fl.)	—
C ₆ H ₁₀	Cyclohexen	82,08	912,5	+ 5,4	18,2 (fl.)	—	—
C ₃ H ₅ OH	Äthylalkohol	46,05	325,1 (g.)	+ 68,39	40,20 (fl.)	—	—
CH ₃ OH	Methylalkohol	32,03	170,7 (g.)	+ 60,2	39,96 (fl.)	—	2,0 + 0,03 T (g.)
CH ₃ CO·CH ₃	Aceton	58,05	427,3 (fl.)	—	37,7 (fl.)	—	—
C ₂ H ₅ OC ₂ H ₅	Äthyläther	64,08	3	—	28,3 (fl.)	—	—

* Für Paraffine: $c_p = 4,0 + 1,3 n + 0,012 n T$; $n =$ Kohlenstoffzahl.

Tabelle 2. Thermische Eigenschaften einiger Brennstoffe.

Formel	Name	Molekulargewicht	H_o in kcal/kg	H_u in kcal/kg	Spez. Volumen in l/kg Brennstoff	H_o in kcal/m ³ *	H_u in kcal/m ³ *	Luftbedarf in m ³ /kg Brennstoff	Luftbedarf in m ³ /m ³ Brennstoff
H ₂	Wasserstoff	2,02	33700	28 800	11200	3020	2570	26,7	2,38
C	Graphit	12,00	2140 (in CO)	2 140	—	—	—	4,4	—
			7850 (in CO ₂)	7 850	—	—	—	8,8	—
CO	Kohlenoxyd	28,00	2430	2 430	800	3030	3 030	19,0	2,38
CH ₄	Methan	16,04	13200	11 900	1395	9470	8540	13,3	9,52
C ₂ H ₆	Äthan	30,06	12300	11 300	745	16800	15300	12,5	16,7
C ₃ H ₈	Propan	44,08	12000	11 000	508	23700	21800	12,1	23,8
C ₄ H ₁₀	Butan	58,10	11700	10850	386	29400	27400	11,9	30,9
C ₅ H ₁₂	Pentan	72,1	11650	10700	311	37400	34600	11,85	38,1
C ₆ H ₁₄	Hexan	86,1	11500	10600	260	44300	41000	11,8	45,4
C ₇ H ₁₆	Heptan	100,1	11490	10640	224	51300	47400	11,75	52,4
C ₈ H ₁₈	Octan	114,1	11400	10500	196	57000	52800	11,7	59,5
C ₁₀ H ₂₂	Decan	142,2	11300	10500	158	71500	66500	11,6	73,9
C ₂ H ₂	Acetylen	26,02	11900	11500	862	13800	13400	10,25	11,9
C ₂ H ₄	Äthylen	28,04	11850	11200	800	14800	13900	11,45	14,3
C ₆ H ₆	Benzol	78,05	10000	9600	287	34800	33500	10,25	35,7
C ₇ H ₈	Toluol	92,06	10150	9680	243	41800	39800	10,4	42,8
C ₈ H ₁₀	Xylol	106,08	10300	9710	211	48000	45000	10,55	50,0
C ₁₀ H ₈	Naphthalin	128,06	9620	9300	175	55000	53000	10,0	57,2
C ₁₀ H ₁₀	Diphenyl	154,08	9700	9330	145	67000	64200	8,65	59,6
C ₁₄ H ₁₀	Anthracen	178,08	9500	9200	126	76000	73500	9,8	78,5
C ₁₄ H ₁₀	Phenanthren	178,08	9500	9200	126	76000	73500	9,8	78,5
C ₆ H ₁₂	Cyclohexan	84,08	11200	10390	266	41200	38100	11,4	42,8
C ₆ H ₁₀	Cyclohexen	82,08	11100	10450	273	40700	38400	11,0	40,4
C ₂ H ₅ OH	Äthylalkohol	46,05	7050	6360	486	14500	13100	6,95	14,3
CH ₃ OH	Methylalkohol	32,03	5330	4320	700	7620	6180	5,00	7,15
CH ₃ ·CO·CH ₃	Aceton	58,05	7350	6810	386	19000	17650	7,35	19,0

Der Wasserstoffgehalt wird aus der Elementaranalyse errechnet zu:

$$h = \frac{\text{Gesamtwassermenge} - \text{Feuchtigkeit}}{9}$$

Man macht die Annahme, daß aller Sauerstoff an den Wasserstoff gebunden ist, und setzt als Lieferant von Wärme nur den disponiblen Wasserstoff in Rechnung:

$$h \text{ disp.} = h - \frac{0}{8}$$

Neben der Dulongschen Formel besteht die sog. Verbandsformel:

$$H_u = 8100 c + 29000 \left(h - \frac{0}{8} \right) + 2500 s - 617 W.$$

Diese Gleichung bedeutet gegenüber der von Dulong entwickelten keinen wesentlichen Unterschied.

* m³ bei 0° und 760 mm Hg. Der Berechnung ist ein Molvolumen von 22,41 zugrunde gelegt.

Wärmetönungen von Reaktionen, die im Calorimeter nicht gemessen werden können, wie z. B. Bildungswärmen, errechnet man auf Grund des Gesetzes von den konstanten Wärmesummen nach Heß aus der Differenz der Verbrennungswärmen der Elemente weniger Verbrennungswärme der Verbindung.

Beispiel:

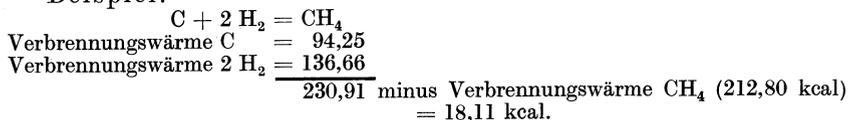


Tabelle 3. Spaltungswärmen unpolarer Bindungen in kcal/Mol.

Bindung	Spaltungswärme	Bindung	Spaltungswärme
Aliphatisch		Aromatisch	
C—H	92	C—H	101
C—F	125	C—F	131
C—Cl	73	C—Cl	96
C—Br	59	C—J	45
C—J	44	C—O	109
C—O	92	C—N	85
C=O	188	C—O	—
C=O (in CO ₂)	203	Carom.—Carom.	96
C—N	70	Carom.—Caliph.	80
C≡N	212		
C—C	71		
C=C	125		
C≡C	166		
Sonstige Bindungen			
		Dissoziation	
CO	257	H ₂	100
NO	191	O ₂	162
NO ₂	145	N ₂	131,5
NO	165	Cl ₂	28,5
Nitrogruppe	164		
ClO	60		
SO ₂	149	Sublimationswärme	
SO ₃	134	des Kohlenstoffs	150
OH ₂ O	120		
NH(NH ₃)	98		

Die Bildung des Methans aus Kohlenstoff und Wasserstoff erfolgt unter Freiwerden von 18,11 kcal je Mol Methan.

Eine wichtige Handhabung für die Berechnungen von Wärmetönungen liefern die Spaltungswärmen, die von A. von Weinberg [s. unter anderem Ber. 56, 463 (1923)] und Fajans [Ber. 55, 2826 (1922)] für die wichtigsten in organischen Verbindungen auftretenden Bindungen bestimmt worden sind. Tabelle 3 enthält die von Grimm und Wolff [Handbuch der Physik von Geiger-Scheel, Bd. 24, S. 536. 1926] zusammengestellten Spaltungs- und Dissoziationswärmen.

Beispiel: Nach Tabelle 3 errechnet sich die Bildungswärme des Methans wie folgt:

Es müssen aufgewandt werden:

$$\begin{array}{r} 1 \times \text{Sublimationswärme C} = 150 \text{ kcal} \\ 2 \times \text{Dissoziationswärme H}_2 = 200 \text{ kcal} \\ \hline - 350 \text{ kcal} \end{array}$$

Es werden gewonnen:

$$\begin{array}{r} 4 \times \text{Bildung der C—H-Bindung} = + 368 \text{ kcal} \\ \text{Bildungswärme} = + 18 \text{ kcal} \end{array}$$

Für annähernde Berechnung von Wärmetönungen, für die calorimetrische Messungen nicht zur Verfügung stehen, liefert diese Rechnungsweise zufriedenstellende Näherungswerte.

B. Die Verbrennungstemperatur.

1. Die theoretische Verbrennungstemperatur.

Die mit einem Brennstoff theoretisch erreichbare Höchsttemperatur errechnet sich unter der Annahme, daß die gesamte, bei der Verbrennung freiwerdende Wärme unter Vermeidung jeglichen Verlustes durch unvollkommene Verbrennung, Dissoziation der Verbrennungsprodukte, sowie Wärmeabgabe durch Leitung oder Strahlung, lediglich zur Erwärmung der Verbrennungsgase dient.

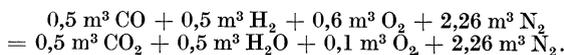
$$\text{Verbrennungstemperatur } t_{th} = \frac{\text{Unterer Heizwert + Wärmehalt von Brennstoff und Luft vor der Verbrennung}}{\text{Wärmehalt der Verbrennungsgase nach der Verbrennung}} \quad (7)$$

Hat der Brennstoff vor der Verbrennung Raumtemperatur, wie das für feste Brennstoffe bei Verbrennung ohne Luftvorwärmung der Fall ist, so kann der Wärmehalt vor der Verbrennung gegenüber dem Heizwert vernachlässigt werden. Gleichung (1) vereinfacht sich zu:

$$t_{th} = \frac{H_u}{\Sigma g \cdot c_{p_m}}; \quad (8)$$

darin ist: g = g Einzelbestandteile der Verbrennungsgase; c_{p_m} = mittlere spezifische Wärme unter konstantem Druck bei der Verbrennungstemperatur. Die mittleren spezifischen Wärmen der in Frage kommenden Gase sind in Tabelle 4, 5 und 6¹ zusammengestellt.

Beispiel: Verbrennung von theoretischem Wassergas mit Luft. Luftüberschußzahl = 1,2 (s. S. 310)



Für die angenommene Verbrennungstemperatur von 2000⁰ werden die mittleren spezifischen Wärmen je m³ den Tabellen 4—6¹ entnommen.

$$\begin{aligned} c_{p_m} \text{ CO}_2 & \quad 2000^0 & = 0,577 \\ c_{p_m} \text{ O}_2, \text{ N}_2 & \quad 2000^0 & = 0,345 \\ c_{p_m} \text{ H}_2\text{O} & \quad 2000^0 & = 0,469 \end{aligned}$$

$$t_{th} = \frac{2810}{0,5 \cdot 0,577 + 0,5 \cdot 0,469 + 2,36 \cdot 0,345}$$

$$t_{th} = 2080^0 \text{ C.}$$

Eine genauere und vereinfachte Rechnung erhält man, wenn man die Summe der mittleren spezifischen Wärmen nach Pollitzer [Ztschr. angew. Chem. 35, 683 (1922)] im $J-t$ -Diagramm aufträgt (Abb. 1). Stellt man die in den Tabellen 4—6 neben den mittleren spezifischen Wärmen aufgeführten Summen der Wärmehalte in Abhängigkeit von der Temperatur dar, so schneidet die den Heizwert des Gases darstellende

¹ Entnommen aus Schüle: Technische Thermodynamik, Bd. I, 5. Aufl. Berlin: Julius Springer 1930.

Tabelle 4. Wasserdampf (im Gaszustand).

t °C	U		S	J	c_{v_m}		C_{v_m}		c_v	C_v	c_{p_m}		C_{p_m}		c_p	C_p	$\frac{c_p}{c_v}$
	Innere Energie kcal				Mittlere spez. Wärme kcal/1°		Wahre spez. Wärme kcal/1°				Mittlere spez. Wärme kcal/1°		Wahre spez. Wärme kcal/1°				
	1 m ³ 0° 760	1 kg	1 m ³ 0° 760	1 kg	1 m ³ 0° 760	1 kg	1 m ³ 0° 760	1 kg	1 m ³ 0° 760	1 kg	1 m ³ 0° 760	1 kg	1 m ³ 0° 760	1 kg	1 m ³ 0° 760	1 kg	1 m ³ 0° 760
0	0	0	0	0	0,276	0,342	6,18	0,276	0,343	6,18	0,365	0,453	8,17	0,365	0,453	8,17	1,322
100	28,0	34,8	36,9	45,9	0,280	0,348	6,27	0,284	0,352	6,34	0,369	0,459	8,26	0,371	0,462	8,32	1,314
200	56,6	70,4	74,4	92,6	0,283	0,352	6,35	0,290	0,361	6,50	0,372	0,463	8,34	0,378	0,471	8,49	1,306
300	86,1	106	113	140	0,287	0,357	6,43	0,298	0,371	6,67	0,376	0,468	8,42	0,386	0,481	8,66	1,298
400	116	144	152	188	0,290	0,360	6,50	0,306	0,380	6,84	0,379	0,471	8,49	0,394	0,490	8,82	1,290
500	147	183	191	238	0,294	0,366	6,58	0,313	0,389	7,00	0,383	0,476	8,57	0,401	0,499	8,99	1,284
600	179	222	232	288	0,298	0,370	6,66	0,320	0,398	7,17	0,387	0,480	8,65	0,409	0,508	9,16	1,277
700	211	262	273	339	0,301	0,374	6,74	0,328	0,407	7,34	0,390	0,485	8,73	0,416	0,517	9,32	1,271
800	244	302	315	391	0,305	0,377	6,82	0,335	0,417	7,50	0,394	0,489	8,81	0,423	0,527	9,49	1,264
900	277	344	357	445	0,308	0,383	6,90	0,342	0,427	7,67	0,397	0,493	8,90	0,432	0,537	9,66	1,258
1000	312	388	401	499	0,312	0,388	6,99	0,354	0,440	7,94	0,401	0,499	8,98	0,443	0,550	9,93	1,251
1100	348	433	445	554	0,316	0,392	7,09	0,365	0,454	8,18	0,405	0,503	9,08	0,454	0,564	10,17	1,243
1200	385	478	491	610	0,321	0,398	7,19	0,373	0,471	8,35	0,409	0,508	9,17	0,467	0,581	10,34	1,234
1300	422	525	537	667	0,324	0,404	7,26	0,396	0,493	8,87	0,413	0,513	9,25	0,485	0,603	10,86	1,224
1400	461	572	585	727	0,329	0,410	7,37	0,421	0,522	9,43	0,418	0,520	9,36	0,510	0,632	11,42	1,211
1500	504	626	637	793	0,336	0,418	7,53	0,446	0,553	9,99	0,425	0,528	9,52	0,535	0,663	11,98	1,200
1600	550	683	692	859	0,343	0,427	7,68	0,471	0,585	10,54	0,432	0,538	9,66	0,560	0,695	12,52	1,189
1700	599	744	749	932	0,353	0,438	7,90	0,497	0,618	11,13	0,441	0,548	9,89	0,586	0,728	13,11	1,178
1800	650	806	810	1007	0,361	0,449	8,09	0,522	0,648	11,69	0,450	0,559	10,08	0,611	0,758	13,68	1,167
1900	710	881	878	1090	0,371	0,462	8,33	0,547	0,681	12,28	0,461	0,572	10,31	0,636	0,791	14,27	1,161
2000	760	944	937	1165	0,380	0,472	8,52	0,573	0,713	12,84	0,469	0,583	10,51	0,662	0,823	14,83	1,154
2100	818	1018	1004	1250	0,389	0,483	8,72	0,598	0,743	13,40	0,478	0,593	10,71	0,687	0,853	15,39	1,147
2200	879	1090	1075	1337	0,399	0,496	8,95	0,624	0,776	13,99	0,488	0,606	10,93	0,713	0,886	15,98	1,142
2300	943	1170	1145	1427	0,411	0,508	9,20	0,649	0,808	14,55	0,500	0,618	11,18	0,738	0,918	16,53	1,136
2400	1008	1251	1221	1519	0,420	0,522	9,41	0,674	0,838	15,10	0,509	0,632	11,40	0,763	0,948	17,09	1,131
2500	1077	1339	1299	1615	0,431	0,534	9,65	0,700	0,870	15,69	0,520	0,644	11,64	0,789	0,980	17,68	1,126
2600	1149	1428	1379	1715	0,442	0,549	9,90	0,725	0,902	16,24	0,531	0,659	11,89	0,814	1,012	18,23	1,122
2700	1222	1520	1461	1817	0,453	0,562	10,17	0,750	0,933	16,80	0,542	0,672	12,16	0,839	1,043	18,79	1,118
2800	1303	1610	1544	1920	0,463	0,575	10,38	0,775	0,963	17,36	0,552	0,685	12,38	0,863	1,073	19,35	1,114
2900	1381	1703	1628	2022	0,473	0,587	10,60	0,800	0,994	17,91	0,561	0,698	12,58	0,888	1,104	19,90	1,111
3000	1463	1798	1713	2132	0,482	0,599	10,80	0,826	1,025	18,50	0,571	0,710	12,80	0,914	1,135	20,49	1,107

Tabelle 5. Stickstoff und zweiatomige Gase (O₂, CO sowie Luft).

t °C	U		S	J	C_{v_m}		C_v	C_p		$\frac{c_p}{c_v}$
	Innere Energie kcal				Mittlere spez. Wärme kcal/1°			Wahre spez. Wärme kcal/1°		
	1 m ³ 0° 760	1 kg			1 m ³ 0° 760	1 kg		1 m ³ 0° 760	1 kg	
	0	0			0,223	0,172		0,223	0,172	
0	0	0	0	0	0,223	0,172	4,99	0,223	0,172	1,400
100	22,4	17,3	31,3	24,1	0,224	0,173	5,02	0,226	0,174	1,392
200	45,2	34,8	62,8	48,4	0,226	0,174	5,05	0,228	0,176	1,390
300	68,1	52,5	94,5	72,9	0,227	0,175	5,07	0,230	0,178	1,386
400	91,2	70,4	126	97,6	0,228	0,176	5,10	0,233	0,180	1,380
500	115	88,5	158	122	0,229	0,177	5,13	0,235	0,182	1,378
600	138	106	191	148	0,230	0,178	5,15	0,237	0,184	1,374
700	162	125	224	173	0,232	0,179	5,20	0,240	0,186	1,370
800	186	144	257	199	0,233	0,180	5,23	0,244	0,189	1,363
900	213	165	293	227	0,236	0,183	5,28	0,248	0,192	1,357
1000	240	185	329	255	0,239	0,185	5,36	0,252	0,195	1,352
1100	265	205	363	281	0,241	0,186	5,40	0,256	0,198	1,346
1200	292	226	398	308	0,243	0,188	5,45	0,260	0,202	1,341
1300	318	246	433	335	0,245	0,189	5,49	0,264	0,204	1,335
1400	345	266	469	362	0,246	0,191	5,52	0,268	0,208	1,330
1500	372	288	505	390	0,248	0,192	5,56	0,272	0,212	1,326
1600	399	308	541	418	0,249	0,193	5,58	0,275	0,216	1,322
1700	426	329	577	446	0,251	0,194	5,62	0,278	0,219	1,319
1800	454	351	614	474	0,253	0,195	5,65	0,281	0,221	1,315
1900	483	374	651	503	0,255	0,196	5,70	0,284	0,224	1,312
2000	511	395	688	532	0,256	0,197	5,73	0,287	0,227	1,310
2100	540	417	726	561	0,257	0,199	5,76	0,291	0,229	1,306
2200	569	439	764	591	0,259	0,200	5,80	0,294	0,231	1,302
2300	599	463	803	621	0,260	0,201	5,83	0,297	0,232	1,299
2400	629	486	842	650	0,262	0,202	5,87	0,300	0,234	1,296
2500	659	509	881	681	0,264	0,204	5,90	0,303	0,236	1,293
2600	689	532	919	710	0,265	0,205	5,93	0,307	0,237	1,289
2700	720	556	959	741	0,267	0,206	5,97	0,310	0,239	1,286
2800	751	580	999	772	0,268	0,207	6,00	0,313	0,242	1,283
2900	783	605	1040	804	0,270	0,209	6,04	0,316	0,244	1,280
3000	815	629	1081	835	0,271	0,210	6,07	0,319	0,247	1,277

Tabelle 6. Kohlendioxyd.

t °C	U		S	J	C_{v_m}		C_v		C_{p_m}		C_p		$\frac{C_p}{C_v}$			
	Innere Energie kcal				Mittlere spez. Wärme kcal/1°		Wahre spez. Wärme kcal/1°		Mittlere spez. Wärme kcal/1°		Wahre spez. Wärme kcal/1°					
	1 m ³ 0°760	1 kg	1 m ³ 0°760	1 kg	1 m ³ 0°760	1 kg	1 m ³ 0°760	1 kg	1 m ³ 0°760	1 kg	1 m ³ 0°760	1 kg				
0	0	0	0	0	0,298	0,152	6,68	0,298	0,152	0,387	0,197	8,67	0,386	0,197	8,67	1,297
100	32,2	16,4	41,0	20,9	0,322	0,164	7,21	0,344	0,175	0,410	0,209	9,19	0,432	0,220	9,68	1,258
200	68,4	34,8	86,0	43,8	0,342	0,174	7,65	0,378	0,192	0,430	0,219	9,64	0,465	0,237	10,40	1,235
300	107	54,6	134	68,1	0,357	0,182	8,02	0,404	0,206	0,447	0,227	10,01	0,491	0,251	11,00	1,219
400	149	75,6	185	93,6	0,372	0,189	8,33	0,423	0,215	0,462	0,234	10,32	0,509	0,260	11,40	1,210
500	192	97,5	236	120	0,384	0,195	8,59	0,435	0,222	0,472	0,240	10,58	0,523	0,267	11,70	1,203
600	236	120	289	147	0,393	0,200	8,80	0,446	0,227	0,482	0,245	10,79	0,535	0,272	12,00	1,198
700	281	143	342	175	0,401	0,204	8,97	0,458	0,234	0,489	0,249	10,96	0,547	0,279	12,20	1,193
800	325	166	396	202	0,406	0,207	9,09	0,470	0,239	0,495	0,252	11,08	0,559	0,284	12,51	1,188
900	373	190	453	231	0,414	0,211	9,28	0,482	0,245	0,503	0,256	11,27	0,571	0,290	12,79	1,184
1000	422	215	511	260	0,422	0,215	9,45	0,495	0,252	0,511	0,260	11,44	0,584	0,297	13,07	1,179
1100	472	240	570	290	0,428	0,218	9,60	0,507	0,258	0,517	0,263	11,59	0,596	0,303	13,36	1,175
1200	523	267	630	321	0,436	0,222	9,76	0,519	0,264	0,525	0,267	11,75	0,608	0,309	13,61	1,170
1300	575	293	690	352	0,442	0,225	9,90	0,531	0,271	0,531	0,270	11,89	0,620	0,316	13,89	1,165
1400	629	321	753	384	0,449	0,229	10,08	0,544	0,277	0,538	0,274	12,07	0,633	0,322	14,19	1,163
1500	684	348	817	416	0,456	0,232	10,21	0,556	0,283	0,545	0,277	12,20	0,645	0,328	14,44	1,160
1600	740	377	882	449	0,462	0,235	10,35	0,568	0,290	0,551	0,280	12,34	0,657	0,335	14,73	1,155
1700	798	406	949	483	0,468	0,239	10,50	0,580	0,296	0,557	0,284	12,49	0,669	0,341	14,99	1,152
1800	856	436	1016	517	0,475	0,242	10,65	0,593	0,302	0,564	0,287	12,64	0,682	0,347	15,29	1,150
1900	916	466	1085	552	0,482	0,245	10,80	0,605	0,308	0,571	0,290	12,79	0,694	0,353	15,55	1,145
2000	977	497	1154	588	0,488	0,248	10,95	0,618	0,315	0,577	0,293	12,94	0,707	0,360	15,85	1,143
2100	1040	530	1226	624	0,495	0,252	11,10	0,630	0,321	0,584	0,297	13,09	0,719	0,366	16,11	1,140
2200	1103	562	1298	661	0,502	0,255	11,25	0,642	0,327	0,591	0,300	13,24	0,731	0,372	16,37	1,137
2300	1168	595	1372	700	0,508	0,259	11,40	0,654	0,333	0,597	0,304	13,39	0,743	0,378	16,66	1,135
2400	1234	628	1447	736	0,514	0,262	11,52	0,667	0,340	0,603	0,307	13,51	0,756	0,385	16,92	1,132
2500	1301	663	1523	776	0,520	0,265	11,65	0,679	0,346	0,609	0,310	13,64	0,768	0,391	17,19	1,130
2600	1370	698	1601	817	0,527	0,269	11,81	0,691	0,352	0,616	0,314	13,80	0,780	0,397	17,47	1,127
2700	1440	733	1679	855	0,533	0,272	11,95	0,703	0,358	0,622	0,317	13,94	0,792	0,403	17,75	1,125
2800	1510	769	1758	895	0,539	0,275	12,09	0,716	0,365	0,628	0,320	14,08	0,805	0,410	18,03	1,123
2900	1582	806	1839	936	0,546	0,278	12,22	0,728	0,371	0,635	0,323	14,21	0,817	0,416	18,31	1,121
3000	1656	843	1922	980	0,552	0,281	12,38	0,740	0,377	0,641	0,326	14,37	0,829	0,422	18,59	1,118

Horizontale die entstehende Kurve in dem die theoretische Verbrennungstemperatur bezeichnenden Punkte. Aus Abb. 1, welche die Berechnung für theoretisches Wassergas darstellt, ist zu entnehmen:

Ohne Luftüberschuß ($\lambda = 1$) liest man eine Verbrennungstemperatur von 2262° ab.

Bei einem Luftüberschuß $\lambda = 1,2$ erniedrigt sich die Verbrennungstemperatur auf 2040° .

Vorwärmung des Gasgemisches auf 300° hat bei einem Luftüberschuß von $\lambda = 1,2$ eine Erhöhung der theoretischen Verbrennungstemperatur auf 2243° zur Folge.

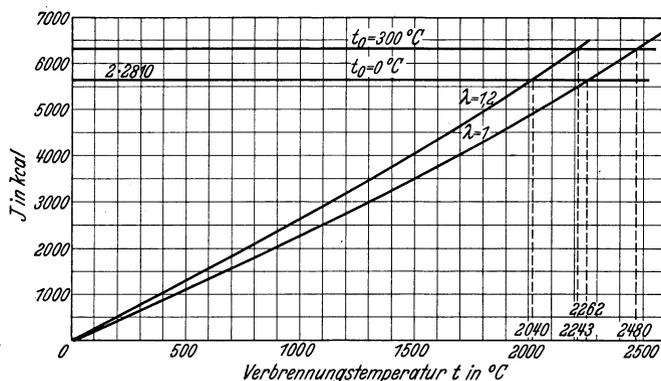


Abb. 1. Berechnung der Verbrennungstemperatur aus den spezifischen Wärmern der Reaktionsteilnehmer.

Die Verbrennungstemperatur nimmt ab mit steigendem Luftüberschuß. Durch Verbrennung mit reinem Sauerstoff erreicht man außerordentlich hohe theoretische Verbrennungstemperaturen. Bronn [Ztschr. angew. Chem. 35, 328 (1922)] errechnet folgende Werte für $\lambda = 1$:

Verbrennung von	H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₂
mit O ₂	3900°	5000°	4400°	6200°
Luft	2260°	2400°	2070°	2670°

Durch Vorwärmung könnten diese Temperaturen noch beträchtlich gesteigert werden. Bei Temperaturen oberhalb 2000° beobachtet man jedoch einen wesentlich niedrigeren Wert, da in diesem Temperaturbereich die einsetzende Dissoziation der Verbrennungsprodukte die theoretische Verbrennungstemperatur herabsetzt.

2. Verbrennungstemperatur unter Berücksichtigung der Dissoziation.

Die Dissoziation von CO₂ und H₂O ist in Abb. 2 und 3 (S. 273) auf Grund der Berechnungen von Menzel [Die Theorie der Verbrennung. Dresden 1924] dargestellt. Wie sich aus dem Massenwirkungsgesetz ergibt, wird die Dissoziation durch Sauerstoffüberschuß herabgesetzt. Die Betrachtung der Dissoziationsgrade lehrt, daß die obigen hohen Verbrennungstemperaturen praktisch auch nicht annähernd erreicht

werden können. Unter Berücksichtigung der Dissoziation ergeben sich für die angeführten Gase bei Verbrennung mit Luft für $\lambda = 1$:

H_2	CO	CH_4	C_2H_2
2170°	2050°	1960°	2310°

Bei gleich hohen Temperaturen ist die Dissoziation des Kohlendioxyds weiter vorgeschritten als die des Wasserdampfes. Bei 3000° C ist CO_2 zu 74% und H_2O zu 22% dissoziiert. Eine Zusammenstellung der Verbrennungstemperaturen technischer Heizgase ist in Tabelle 18, S. 311 wiedergegeben.

3. Verbrennungstemperatur unter Berücksichtigung der Strahlung.

Die auf die beschriebene Art unter Berücksichtigung der Dissoziation berechnete Verbrennungstemperatur stimmt mit den praktisch gemessenen nicht überein, da die berechnete Temperatur durch Strahlungsverluste herabgesetzt wird.

Für die Strahlung eines festen Körpers gilt gemäß Bd. II, S. 124:

$$\text{Ausgestrahlte Wärmemenge} = C_s \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_m}{100}\right)^4.$$

Darin ist: C_s = Strahlungszahl (s. Tabelle 9, Bd. II, S. 125) in kcal je m^2 , h, ° abs. ⁴; T = Verbrennungstemperatur (abs.); T_m = abs. Temperatur der bestrahlten Umgebung.

Setzt man: G = Brennstoffmenge in kg je h und m^2 Rostfläche; R = Rostfläche in m^2 ; F = strahlende Fläche, bei Innenfeuerungen = R ; T_a = Anfangstemperatur, η = Wirkungsgrad, so gilt:

t_s = Verbrennungstemperatur unter Berücksichtigung der Strahlung

$$t_s = t_a + \frac{G \cdot R \cdot H_u \cdot \eta - C_s \cdot F \left[\left(\frac{T}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_m}{100}\right)^4 \right]}{G \cdot R \cdot \Sigma g \cdot c_{p_m}}.$$

Beispiel¹: Für eine Innenfeuerung mit 2,8 m^2 Rostfläche wird eine Strahlungszahl $C_s = 4$ angenommen. Zur Verbrennung gelangt eine Steinkohle mit $H_u = 7500$ kcal. Die Luftüberschuszahl betrage $\lambda = 1,5$. Die Brennstoffmenge beträgt 80 kg je m^2 und h. $\eta = 0,96$.

Der auf Grund der Elementaranalyse berechnete Luftbedarf betrage 10,35 kg. Unter der Annahme, daß die Menge der Feuergase gleich der Luftmenge sei, erhält man $\Sigma g = 16,4$ kg. Nach Herberg [Feuerungstechnik und Dampfkesselbetrieb. Berlin 1930] kann die Temperatur der bestrahlten Umgebung mit 200° angenommen werden.

$\left(\frac{T_m}{100}\right)^4$ wird dann = 500; c_{p_m} sei im Mittel 0,26.

Die Verbrennungstemperatur werde auf 1200° geschätzt.

$$t_s = 20 + \frac{80 \cdot 2,8 \cdot 7500 \cdot 0,96 - 11,2 \cdot \left[\left(\frac{1473}{100}\right)^4 - 500 \right]}{224 \cdot 16,4 \cdot 0,26}$$

$$t_s = 1160°.$$

Unter Vernachlässigung der Strahlung würde sich eine Verbrennungstemperatur $t_{th} = 1710°$ ergeben.

¹ Nach Herberg: (Feuerungstechnik und Dampfkesselbetrieb. Berlin 1930.

C. Gasgleichgewichte.

1. Berechnung.

Auf Grund von Entropiegesetzmäßigkeiten hat Ulich [Thermodynamik. Dresden 1930] zwei Näherungsgleichungen angegeben, die eine zufriedenstellende Übereinstimmung der berechneten Gleichgewichtskonstanten mit experimentellen Werten liefern.

Die Beziehung

$$A_T = Q_{298} - S_{298} \cdot T \quad (9)$$

gestattet, die maximale Arbeit einer Reaktion und ihre Temperaturabhängigkeit hinreichend genau zu berechnen, wenn die Summe der spezifischen Wärmen der Reaktionsteilnehmer nicht allzusehr von Null verschieden und nicht sehr temperaturabhängig ist.

Durch Einführung von $A = -RT \cdot \ln k_p$ (s. S. 124) erhält man:

$$\log k_p = -\frac{Q_{298}}{4,57 \cdot T} + \frac{S_{298}}{4,57}. \quad (10)$$

Ist die Summe der spezifischen Wärmen der entstehenden Stoffe minus Summe der spezifischen Wärmen der verschwindenden Stoffe bei der Temperatur T beträchtlich, so ist die zweite Näherung anzuwenden:

$$\log k_p = -\frac{Q_{298}}{4,57} + \frac{1}{4,57} \cdot [S_{298} + \sum n \cdot c_{p_m} \cdot (0,0007 \cdot T - 0,20)]. \quad (11)$$

Darin ist: $-Q_{298}$ = Wärmetönung der Reaktion bei 25° C; S_{298} = Summe der Einzelentropien der Reaktionsteilnehmer, wobei die Entropien der entstehenden Stoffe mit positivem, die Entropien der verschwindenden Stoffe mit negativem Vorzeichen einzusetzen sind; $\sum n c_{p_m}$ = Summe der mittleren spezifischen Wärmen bei der Temperatur T .

Diese Näherung hat vor der von Nernst entwickelten Näherungsgleichung den Vorzug vielseitigerer Anwendbarkeit (s. hierzu S. 141). Die Näherungsgleichung von Nernst [Theoretische Chemie, 1921] wird unbrauchbar, wenn die Reaktion, wie es bei Umsetzungen von Gasen vielfach der Fall ist, mit starker Volumenänderung verbunden ist. Die Berechnung nach dem Nernstschen Wärmetheorem, wie sie von Schüle [Technische Thermodynamik, Bd. 2. Berlin 1929] auf graphischem Wege sehr anschaulich durchgeführt wird, erfordert die genaue Kenntnis der chemischen Konstanten und der spezifischen Wärmen bis zum absoluten Nullpunkt. Die Verwendung der Entropien als Rechnungsgrundlagen nach den Vorschlägen von Lewis-Randall [Thermodynamik. Wien 1927] und Ulich hat dieser Betrachtungsweise gegenüber den Vorteil, daß die Entropien für eine große Zahl von Stoffen auf Grund spektroskopischer Beobachtungen genau bekannt sind.

Ein Beispiel der Berechnung soll an der Wassergasreaktion durchgeführt werden:



$$k_p = \frac{p_{\text{CO}} \cdot p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{CO}_2} \cdot p_{\text{H}_2}};$$

$$Q_{298} = + 10260.$$

Die Einzelentropien betragen nach Tabelle 1, S. 262:

$$S_{298} \text{H}_2 = 31,8 \quad S_{298} \text{H}_2\text{O} = 44,8$$

$$S_{298} \text{CO} = 47,3 \quad S_{298} \text{CO}_2 = 50,2$$

Die Summe der mittleren spezifischen Wärmen ist nach Tabelle 4—6, S. 266—268 für $T = 298^\circ$

$$c_{p_m} \text{CO} = 6,99 \quad c_{p_m} \text{CO}_2 = 8,90$$

$$c_{p_m} \text{H}_2\text{O} = 8,34 \quad c_{p_m} \text{H}_2 = 6,94$$

$$\Sigma n c_{p_m} = 6,99 + 8,34 - 8,90 - 6,94 = -0,51.$$

Wegen der starken Änderung von $\Sigma n c_{p_m}$ mit der Temperatur ist die zweite Näherungsgleichung (3) benutzt worden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 zusammengestellt. Die errechneten k_p -Werte sind in Abb. 6, S. 277 aufgetragen.

Tabelle 7. Wassergasgleichgewicht.

$$k_p = \frac{P_{\text{CO}} \cdot P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{CO}_2} \cdot P_{\text{H}_2}}; S_{298} = 10,7$$

$$\log k_p = -\frac{10260}{4,57 \cdot T} + \frac{1}{4,57} \cdot [S_{298} \cdot \{\Sigma n c_{p_m} \cdot (0,0007 \cdot T - 0,20)\}].$$

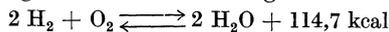
T	$\Sigma n c_{p_m}$	$\log k_p$	k_p	T	$\Sigma n c_{p_m}$	$\log k_p$	k_p
298	-0,51	-5,16	$6,9 \cdot 10^{-6}$	1373	2,53	+ 0,32	2,09
373	0,76	-3,70	0,0002	1473	2,50	+ 0,36	2,29
473	1,10	-2,45	0,0036	1573	2,48	+ 0,42	2,63
573	1,44	-1,65	0,022	1673	2,46	+ 0,48	3,02
673	1,69	-1,10	0,080	1773	2,46	+ 0,52	3,31
773	1,88	-0,71	0,195	1873	2,44	+ 0,55	3,55
873	2,06	-0,41	0,386	1973	2,37	+ 0,59	3,90
973	2,24	-0,21	0,625	2073	2,27	+ 0,63	4,27
1073	2,36	-0,03	0,934	2173	2,17	+ 0,68	4,79
1173	2,43	+ 0,09	1,23	2273	-2,00	+ 0,74	5,50
1273	2,47	+ 0,20	1,59				

Die nachfolgend behandelten Gasgleichgewichte sind, soweit sie nicht vorangegangenen Darstellungen entnommen wurden, aus Entropiewerten berechnet worden.

In vielen Fällen ist es möglich, auf Grund von Entropiegesetzmäßigkeiten Einzelentropien der Rechnung zugänglich zu machen [s. hierzu Uhlig (l. c.) sowie Eastman: Journ. Amer. chem. Soc. 45, 80 (1923)].

2. Die Dissoziation von H_2O und CO_2 .

Bei hohen Temperaturen macht sich, wie früher (S. 269) angegeben, die Dissoziation von H_2O und CO_2 im Sinne einer Erniedrigung der Flammentemperatur geltend. Das Gleichgewicht der Reaktion:



ist von Nernst und Wartenberg [Ztschr. physikal. Chem. 56, 513 1906] experimentell gemessen worden. Abb. 2 zeigt die von Menzel [Theorie der Verbrennung. Dresden 1924] berechneten Dissoziationsgrade in Abhängigkeit von Temperatur und Druck. Die Dissoziation

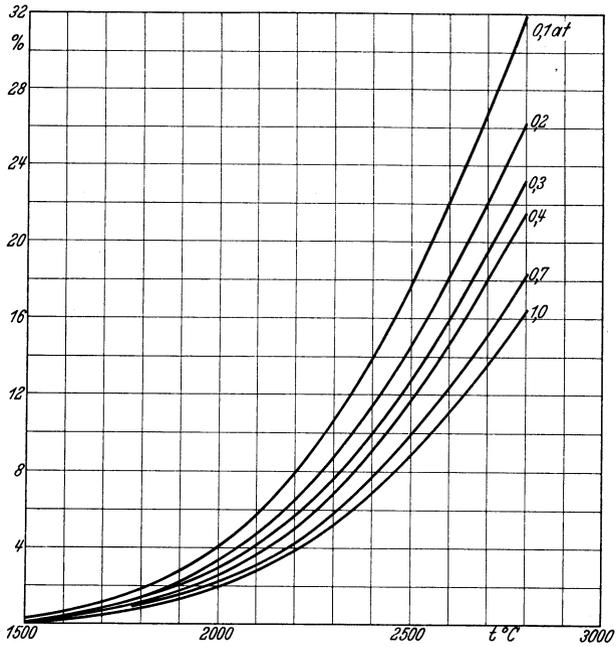


Abb. 2. Dissoziation des Wasserdampfes bei verschiedenen Temperaturen und Drucken.

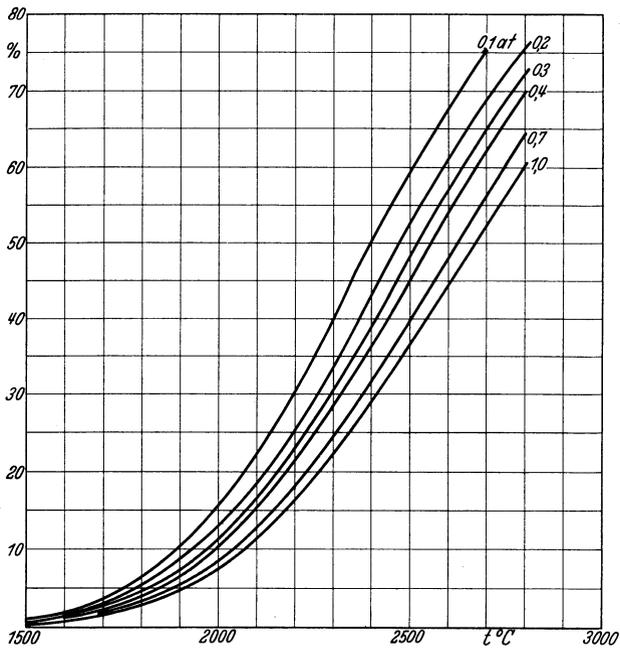
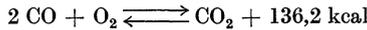


Abb. 3. Dissoziation des Kohlendioxyds bei verschiedenen Temperaturen und Drucken.

des Wasserdampfes tritt erst bei Temperaturen um 1800° merklich in Erscheinung, sie beträgt nahezu 2% bei einem Partialdruck von 0,1 at. Durch Druckerhöhung wird im Sinne des Prinzips von Le Chatelier die Dissoziation zurückgedrängt. Sie beträgt bei einem Druck von 1 at und 1800° 0,81%.

Abb. 3 zeigt die Dissoziationsgrade des Kohlendioxyds, die gleichfalls von Menzel (l. c.) für verschiedene Temperaturen und Drucke berechnet worden sind.

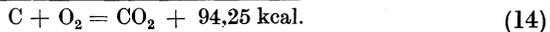
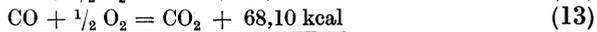
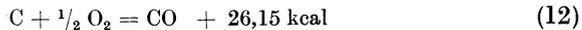
Die Umkehrung der Reaktion:



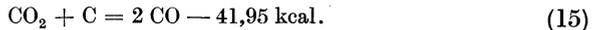
beginnt bei 1500° merklich zu werden. Bei einem Partialdruck von 0,1 at erhält man bei 1800° einen Dissoziationsgrad von 1%, der bei 2400° 50% erreicht.

3. Das Generatorgas-Gleichgewicht.

Der Kohlenstoff liefert bei der Reaktion mit Sauerstoff zwei Oxydationsstufen:



Beide Oxydationsstufen sind durch das Generatorgasgleichgewicht miteinander verknüpft:



Vielfach wird die Ansicht vertreten, daß die Primärreaktion des Kohlenstoffes mit Sauerstoff gemäß (14) verläuft. Die Entstehung des Kohlen-

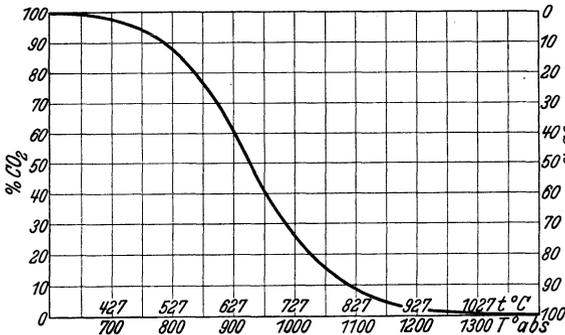


Abb. 4. Das Boudouardsche Gleichgewicht.

oxyds geht dann nach (15) aus primär gebildetem CO₂ vor sich. Aus späterbeschriebenen Erwägungen heraus (s. S. 296) wird im Rahmen dieser Darstellungen der Auffassung Ausdruck verliehen, daß die Oxydation stufenweise nach (12) und (13) vor sich geht. Die Thermodynamik vermag eine Entscheidung über diese Frage nicht zu fällen.

Die Gleichgewichtslage der Reaktion (15) ist unter anderem von Boudouard [Compt. rend. 128, 842 (1899)] bestimmt worden (s. Abb. 4). Bei Temperaturen von 600° abs. beginnt der Zerfall des CO₂ in Berührung mit Kohlenstoff. Bei 925° abs. befinden sich Kohlendioxyd und Kohlenoxyd im hälftigen Gleichgewicht. Bei Temperaturen oberhalb 1000° ist Kohlenoxyd bei Gegenwart von Kohlenstoff allein existenzfähig.

Die Reaktion (15) liegt der Luftgasherstellung im Luftgasgenerator zugrunde, dessen Reaktion eine unvollkommene Verbrennung des Kohlenstoffes nach Gleichung (12) und eine Rückbildung von CO aus CO₂ gemäß Gleichung (15) darstellt. Auf Grund des Boudouardschen Gleichgewichtes hat Menzel [Theorie der Verbrennung. Dresden 1924] die theoretische Zusammensetzung des Luftgases dargestellt (Abb. 5). In den unteren Teilen des Generators entsteht infolge des vorübergehenden Luftüberschusses CO₂, das beim Passieren der hohen glühenden Koks-schicht nach Gleichung (15) zerfällt. Den Abb. 4 und 5 ist zu entnehmen, daß die hierzu erforderliche Temperatur 900—1000° C beträgt. Unter diesen Bedingungen enthält das theoretische Luftgas gemäß der Gleichung:



33 $\frac{1}{3}$ % Kohlenoxyd¹.

Die in Abb. 5 dargestellte Gleichgewichtslage stellt den Idealfall dar, der praktisch niemals erreicht wird. Der zur Luftgaserzeugung verwendete Koks ist je nach seiner Herkunft und Oberflächenbeschaffenheit mehr oder minder reaktionsträge, so daß eine auch nur annähernde Einstellung des Gleichgewichtes im dynamischen Betrieb des Generators niemals erreicht wird. Die Gleichgewichtslage des Luftgasprozesses wird auch durch die Aschenbestandteile beeinflusst.

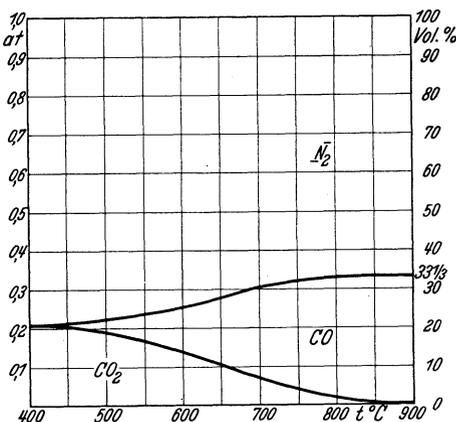
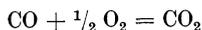


Abb. 5. Gleichgewicht der Luftgasherstellung.

Kohlenoxyd, Kohlenstoff und Wasserstoff sind wichtige Reduktionsmittel der metallurgischen Industrie. Ihre Verwendungsmöglichkeit in verschiedenen Temperaturgebieten ist durch die beschriebenen Gleichgewichte beschränkt.

Vermöge seiner größeren freien Energie übertrifft das Kohlenoxyd den Wasserstoff bei Temperaturen unterhalb von 1500° hinsichtlich der reduzierenden Wirkung. Ist bei hohen Temperaturen der für das Gleichgewicht der Reaktion



berechnete Sauerstoffdruck größer als der Sauerstoffdruck über dem oxydischen Erz z. B.

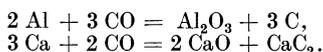


für die gleiche Temperatur, so ist eine Reduktion mittels CO unmöglich. Es tritt vielmehr unter diesen Bedingungen eine Oxydation des Eisenoxyduls ein. Wegen der zunehmenden Dissoziation des Kohlendioxyds

¹ Dies unter der angenäherten Annahme eines Sauerstoffgehaltes der Luft zu nur 20% O₂. Bei 21% O₂ ergibt sich der CO-Gehalt zu 34,7 Vol.-%.

ist oberhalb von 1500° das Kohlenoxyd als Reduktionsmittel nicht mehr verwendbar, wenn nicht im Sinne des Massenwirkungsgesetzes die Dissoziation des CO₂ durch Überschuß von Kohlenoxyd zurückgedrängt wird.

Bei höheren Temperaturen ist der Kohlenstoff das alleinige Reduktionsmittel. Da das Kohlenoxyd auch mit den höchsten zur Verfügung stehenden Temperaturen nicht in seine Elemente gespalten werden kann, kann Kohlenstoff bei den höchsten Temperaturen als Reduktionsmittel verwendet werden. Nach Matthesius [Die physikalischen und chemischen Grundlagen des Eisenhüttenwesens. Leipzig 1924] vermögen nur einige wenige Metalle, die besonders große Affinität zum Sauerstoff haben, dem Kohlenoxyd seinen Sauerstoff zu entziehen:



Da Wasser bei hohen Temperaturen geringer dissoziiert ist als das Kohlendioxyd, ist bei Temperaturen oberhalb 1500° Wasserstoff dem Kohlenoxyd an Reduktionsfähigkeit überlegen.

Für Reaktionen, deren Gleichgewichte mangels thermischer Daten nicht berechnet werden können, ist zuweilen die Betrachtung der Reaktionsentropien, d. h. der Summe der Einzelentropien der entstehenden Stoffe minus Summe der Einzelentropien der verschwindenden Stoffe, außerordentlich aufschlußreich. Im Sinne früherer Betrachtungen (S. 117) gilt der Grundsatz, daß von mehreren möglichen Vorgängen immer derjenige bevorzugt wird, der den größten Zuwachs der Entropie liefert.

Für das Beispiel der Reduktion des FeO sind die Entropien teilweise der Tabelle 1, S. 262 entnommen.

Beispiel:

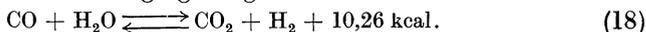
$$\left. \begin{array}{l} \text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO} \\ S_{298} 13 \quad S_{298} 1,39 = S_{298} 6,49 \quad S_{298} 47,3 \end{array} \right\} S_{298} = + 39,40 \quad (16)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2 \\ S_{298} 13 \quad S_{298} 47,3 = S_{298} 6,49 \quad S_{298} 50,2 \end{array} \right\} S_{298} = - 3,61. \quad (17)$$

Das Beispiel zeigt die außerordentlich hohe Reaktionsentropie der Reduktion mittels Kohlenstoff.

4. Das Wassergas-Gleichgewicht.

Die wichtige Verknüpfung der Kohlenoxyd- und Wasserstoffverbrennung liefert das Wassergasgleichgewicht

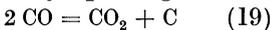


Die nach der Näherungsgleichung von Ulich berechneten K_p -Werte sind in Abb. 6 dargestellt (s. auch Tabelle 7, S. 272). Experimentelle Untersuchungen über das Wassergasgleichgewicht sind unter anderem von Nernst, O. Hahn, Haber, sowie B. Neumann ausgeführt worden. Über die Bedeutung des Wassergasgleichgewichtes für die Vorgänge in Flammen siehe S. 313.

Aus Abb. 6 ist ersichtlich, daß die Reaktion unterhalb 800° im Sinne der Entstehung von Kohlendioxyd und Wasserstoff begünstigt ist. Oberhalb von 800° überwiegen im System Kohlenoxyd und Wasserdampf.

Für die Herstellung von Wasserstoff durch Verbrennung von Kohlenoxyd mit Wasserdampf unter Anwendung von Katalysatoren (Eisenoxyd und Chromoxyd), die von der I. G. Farbenindustrie A. G. ausgebildet worden ist, werden Temperaturen um 500° angewendet. Während die Gleichgewichtslage bei dieser Temperatur für die Bildung von Wasserstoff günstig liegt — durch einen Überschuß von Wasserdampf kann die Wasserstoffmenge im Gleichgewicht gesteigert werden —, muß die Reaktionsgeschwindigkeit, die bei 500° noch äußerst gering ist, durch Anwendung geeigneter Katalysatoren gesteigert werden. Der Vorgang verläuft exotherm und bedarf keinerlei Wärmezufuhr.

Die Kombination der Wassergasgleichung (18) und der auf S. 276 beschriebenen Kohlenoxydspaltung nach



liefert die dem technischen Wassergasprozeß zugrunde liegende Reaktion und ihre Gleichgewichtslage.

Für die beiden Gleichgewichte gilt:

$$K_1 = \frac{C_{\text{CO}} \cdot C_{\text{H}_2\text{O}}}{C_{\text{CO}_2} \cdot C_{\text{H}_2}} \quad \text{und} \quad K_2 = \frac{C_{\text{CO}_2} \cdot C_{\text{C}}}{(C_{\text{CO}})^2}.$$

Werden beide Systeme bei einer gegebenen Temperatur zusammengebracht, so stellt sich zwischen den Einzelkomponenten C, CO, CO₂, H₂ und H₂O ein Gleichgewicht ein. Die Konzentration der in beiden Gleichgewichtskonstanten vorkommenden Komponenten muß für beide Vorgänge gleich sein.

Setzt man C_{CO₂} für beide Reaktionen gleich, so gilt:

$$C_{\text{CO}_2} = \frac{K_2 \cdot (C_{\text{CO}})^2}{C_{\text{C}}} = \frac{C_{\text{CO}} \cdot C_{\text{H}_2\text{O}}}{K_1 \cdot C_{\text{H}_2}};$$

daraus:

$$K_3 = \frac{C_{\text{CO}} \cdot C_{\text{H}_2}}{C_{\text{C}} \cdot C_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{1}{K_1 \cdot K_2};$$

K₃ ist die Gleichgewichtskonstante der Reaktion:



Durch weitere Kombination von Reaktion (18) mit (20) erhält man:

$$K_4 = \frac{C_{\text{CO}_2} \cdot (C_{\text{H}_2})^2}{C_{\text{C}} \cdot (C_{\text{H}_2\text{O}})^2} = \frac{K_3}{K_1};$$

K₄ ist die Gleichgewichtskonstante der Reaktion:

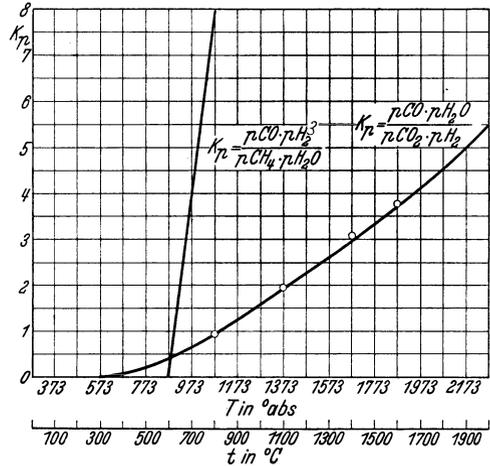
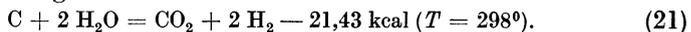


Abb. 6. Gleichgewichte der Umsetzung von CO und CH₄ mit Wasserdampf.

Abb. 7 zeigt die für Gleichung (20) und (21) geltenden Gleichgewichtskonstanten. Je nach der Temperatur verläuft der technische Wassergasprozeß nach Reaktion (20) oder (21). Bei Temperaturen oberhalb 1000° überwiegt die Reaktion (20). Die Wassergasreaktion verläuft zugunsten der Bildung von Kohlenoxyd und Wasserstoff. Das nach dieser Reaktion entstehende theoretische Wassergas besteht aus 50% H_2 und 50% CO und hat einen Heizwert H_u von 2810 kcal/m^3 . Sinkt die Temperatur des Generators unterhalb 1000° , so tritt Reaktion (21) in den

Vordergrund. Das entstehende Wassergas hat eine theoretische Zusammensetzung von $33\frac{1}{3}\%$ CO_2 , $66\frac{2}{3}\%$ H_2 und einen unteren Heizwert von 1720 kcal/m^3 . Im Interesse der Herstellung eines möglichst heizkräftigen Wassergases muß eine Temperatur von wenigstens 1000° im Generator eingehalten werden.

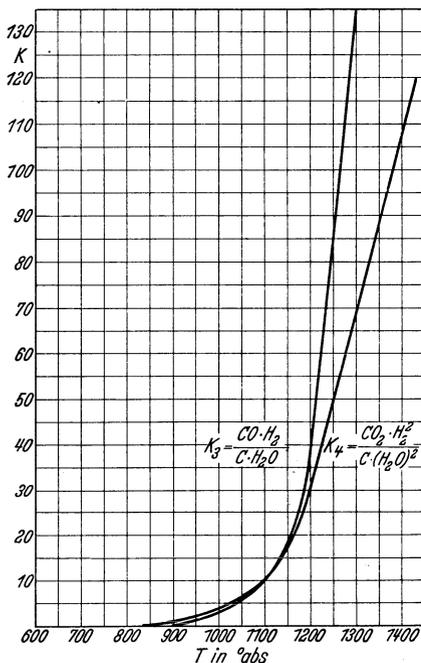


Abb. 7. Wassergasgleichgewichte.

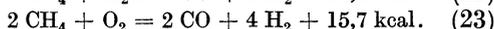
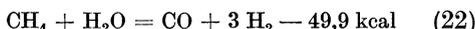
die Temperatur des Kokes knapp unterhalb von 1000° gesunken ist. Die theoretischen Gleichgewichte werden im praktischen Betrieb niemals erreicht. Technisches Wassergas enthält immer Anteile von CO_2 (ungefähr $\frac{1}{10}$ vom Kohlenoxydgehalt) und N_2 und hat einen durchschnittlichen Heizwert von 2500 kcal/m^3 .

5. Wasserstoffherstellung aus Methan.

Für die Wasserstoffherstellung hat neben dem Wassergasprozeß und der Kohlenoxydumwandlung mit Wasserdampf die Spaltung von Methan mit Wasserdampf oder Sauerstoff Bedeutung gewonnen. Große Mengen von Methan und Homologen fallen in der Kokereiindustrie an, nachdem durch Tiefkühlung die für die Ammoniakherstellung und

andere synthetische Zwecke wertvollen Kokereigasbestandteile abgetrennt worden sind. Im Kokereigas sind ungefähr 25 Vol.-% CH₄ enthalten. Der Anfall an Koksofengas beträgt im Ruhrgebiet jährlich 10 bis 11 Milliarden m³, die 2,5 Milliarden m³ Methan enthalten. Methan und Homologe sind im natürlichen Erdgas vorherrschend und fallen auch bei der Krackung von Erdöl und bei der Druckhydrierung von Teer und Erdöl in großen Mengen an.

Die Spaltung des Methans kann in endothermer Reaktion mit Wasserdampf oder in exothermer Reaktion mit Sauerstoff vor sich gehen:



Mit Wasserdampf kann man das entstehende Kohlenoxyd weiterhin umsetzen und abermals 1 Mol H₂ erzeugen nach:



Theoretisch wäre es also möglich, durch Kombination von (22) und (24) je 1 Mol CH₄ 4 Mol Wasserstoff herzustellen. Durch Kombination von (23) und (24) hingegen entstehen aus 1 Mol CH₄ nur 3 Mol H₂.

Nach der Näherungsgleichung von Ulich [Thermodynamik, Dresden 1930, s. S. 271] erhält man für die Gleichgewichtslage von 22:

$$\log K_p = \frac{-49990}{4,57 \cdot T} + \frac{1}{4,57} \cdot [51,6 + \{ \sum r \cdot c_{p_m} \cdot (0,0007 \cdot T - 0,20) \}].$$

Die für das Temperaturintervall von T₂₉₈ — T₂₂₇₃ errechneten K_p-Werte sind in Abb. 8 (s. auch Abb. 6, S. 277) wiedergegeben. Abb. 9 zeigt für die gleiche Reaktion die Menge des umgewandelten Methans in %. Die Gleichgewichtslage wird durch Temperaturerhöhung stark zugunsten der Kohlenoxydbildung verschoben. Oberhalb von 900° ist praktisch alles Methan zerfallen. Für die

weitere Umsetzung des Kohlenoxyds mit Wasserdampf ist diese Temperatur jedoch ungünstig (s. Abb. 6 und 7). Ein befriedigender Umsatz im Sinne der Wassergasreaktion unter Bildung von 4 Mol H₂ je Mol CH₄ kann nur durch einen großen Überschuß von Wasserdampf bewirkt werden, der wiederum einen ungünstigen Einfluß auf die Wärmebilanz ausübt. Es ist erforderlich, für diesen Fall das Optimum auf Grund wirtschaftlicher Erwägungen aufzusuchen, wobei ein unvollkommener

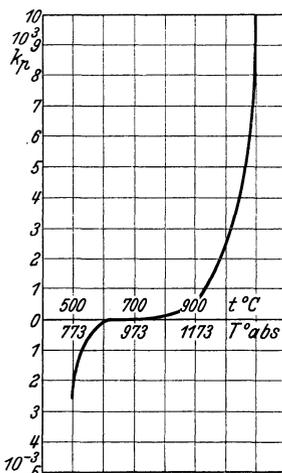


Abb. 8. Spaltung des Methans mit Wasserdampf.

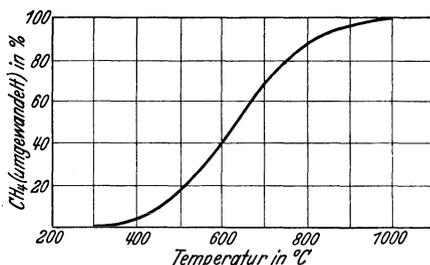
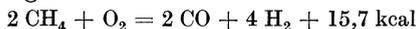


Abb. 9. Spaltung des Methans mit Wasserdampf.

Verlauf des Kohlenoxydumsatzes (Verbleiben von 1—2 Vol.-% Kohlenoxyd im Restgas) in Kauf genommen werden muß (s. Abb. 10).

Für die Spaltung des Methans mit Sauerstoff nach:



ergibt sich folgende Berechnung:

$$\log K_p = \frac{15700}{4,57 \cdot T} + \frac{1}{4,57} [81,4 + \{ \sum r \cdot c_{p_m} \cdot (0,0007 \cdot T - 0,20) \}],$$

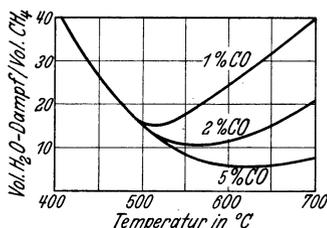


Abb. 10. Wasserdampfbedarf für die Umwandlung von Methan.

Man erhält für $K_{p298} = \frac{p_{\text{CO}^2} \cdot p_{\text{H}_2^4}}{p_{\text{CH}_4^2} \cdot p_{\text{O}_2}} = 29,3$

$$K_{p2273} = 18,0.$$

Im gesamten, in Frage kommenden Temperaturbereich ist das Gleichgewicht vollständig im Sinne des Methanzerfalls verschoben. Gelingt es, bei niedrigen Temperaturen (unterhalb 500°) die Reaktionsgeschwindigkeit der Methanverbrennung mit Sauerstoff in befriedigendem Maße durch Anwendung von Katalysatoren zu beschleunigen, so

kann das entstehende Kohlenoxyd durch beigemischtem Wasserdampf bei dieser Temperatur fast vollständig nach der Wassergasgleichung 18, S. 276 umgesetzt werden.

6. Bildung und Zerfall von Kohlenwasserstoffen.

Für die Verfahren der synthetischen Brennstoffherstellung, für die Erkenntnis der Vorgänge bei der Verkokung, Krackung und Hydrierung, wie auch für den Verbrennungsverlauf ist das Verhalten der Kohlenwasserstoffe bei thermischer Einwirkung und die thermodynamische Möglichkeit ihrer Umwandlung ineinander von Bedeutung. Vor der Betrachtung der Gleichgewichte muß an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, daß die Thermodynamik die mannigfaltigen Reaktionsmöglichkeiten nur in beschränktem Maße zu erfassen gestattet. Sie kann nur feststellen, für welche Reaktion die größere Wahrscheinlichkeit besteht, und welche Umsetzungen überhaupt möglich sind. Ob die betreffende Reaktion tatsächlich eintritt, und mit welcher Geschwindigkeit sie abläuft, ist eine Frage der kinetischen Betrachtung. Sind thermodynamisch mehrere Reaktionen möglich, so kann die Richtung der Reaktion in vielen Fällen durch Anwendung geeigneter Katalysatoren beeinflusst werden (Reaktionslenkung).

Über die Bildung der Kohlenwasserstoffe aus den Elementen, die von v. Wartenberg [Ztschr. physikal. Chem. 61, 366 (1907)] für einige Kohlenwasserstoffe berechnet worden ist, unterrichtet die umfassendere Darstellung in Abb. 11. Die Unterlagen für deren Berechnungen sind den Arbeiten von Francis [Ind. engin. Chem. 20, 277 (1928)] entnommen.

Aus den freien Energien der Bildung aus den Elementen (s. Tabelle 8, S. 282) ist auf Grund der Beziehung:

$$A = - R \cdot T \ln k$$

(s. S. 271) $\log K_p$ berechnet worden. Die Energiewerte der Tabelle 8 sind jeweils durch die Zahl der Kohlenstoffe dividiert worden, so daß die $\log K_p$ -Werte für 1 Kohlenstoffatom gelten. In der Darstellung der Abb. 11 zeigt abnehmender $\log K_p$ abnehmende Beständigkeit und zunehmende Zerfallstendenz.

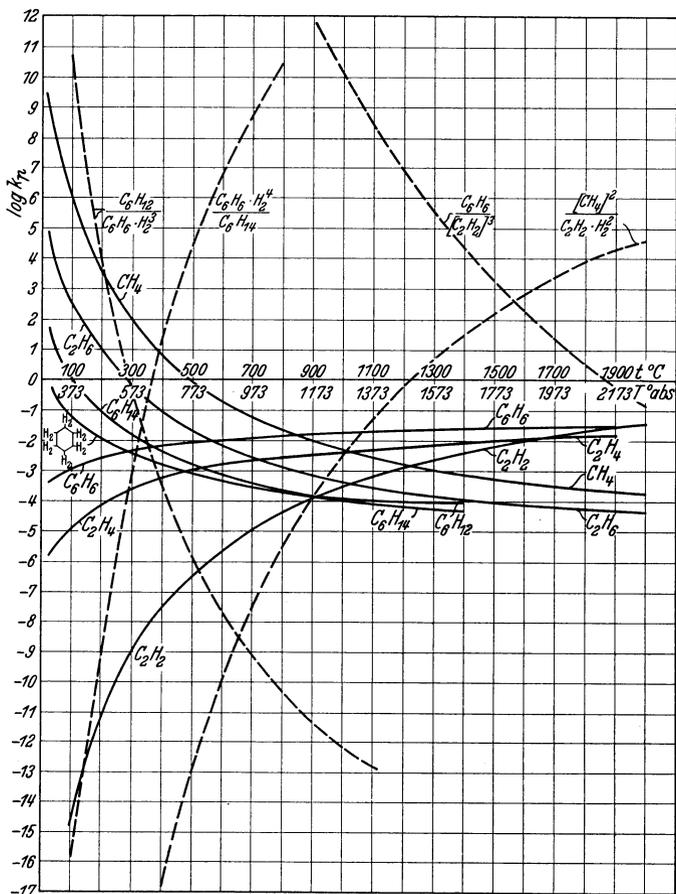


Abb. 11. Gleichgewichte für die Spaltung und Umwandlung einiger Kohlenwasserstoffe.

Während die $\log K_p$ -Kurve für Methan bei 500°C durch den Nullpunkt geht, müßte thermodynamisch gesehen das Hexan schon bei 100°C unbeständig sein. Die Beständigkeit der Paraffine nimmt mit steigender Temperatur ab, während sie bei denjenigen Kohlenwasserstoffen, die negative Bildungswärme haben, wie den Aromaten und verschiedenen Olefinen, mit steigender Temperatur zunimmt. Bei 650°abs . entsprechend 377°C schneidet die Hexankurve die Benzolkurve; von dieser Temperatur ab besteht Tendenz zur Umwandlung von Hexan

Tabelle 8. Freie Energien der Kohlenwasserstoffsynthesen.

a) Aus den Elementen C und H.

Methan	— 20000 + 26,2 T
Äthan	— 29000 + 53,3 T
Octan	— 76100 + 206,6 T
Äthylen	12260 + 11,6 T
Acetylen	54400 — 10,8 T
Benzol	17000 + 35,3 T
Toluol	6860 + 59,2 T
Naphthalin	28100 + 47,5 T
Cyclohexan	— 38100 + 134 T
Paraffine . . . C _x + H ₂ x + 2 =	— 13300 — 7850 · x + 2,2 T + 25,55 · x · T
Olefine . . . C _x · H ₂ x =	31060 — 9400 · x — 39,5 T + 25,55 · x · T
	C _x · H ₂ x — 2 = 68400 — 7000 · x — 61,9 T + 25,55 · x · T

b) Hydrierung, Dehydrierung und Kondensation (Polymerisation).

C ₆ H ₆ + 3 H ₂ → C ₆ H ₁₂	= — 55,2 + 98,8 · T
Benzol Hexahydrobenzol	
C ₆ H ₁₄ → C ₆ H ₆ + 4 H ₂	= 77400 — 120,2 · T
Hexan Benzol	
2 CH ₄ → C ₂ H ₂ + 3 H ₂	= 94400 — 63,2 · T
Methan Acetylen	
C ₆ H ₁₂ + H ₂ → C ₆ H ₁₄	= — 30400 + 33,9 T
Hexylen Hexan	
3 C ₂ H ₂ → C ₆ H ₆	= — 146200 + 68,1 · T
Acetylen Benzol	

in Benzol. Eine gestrichelte Kurve zeigt die Temperaturabhängigkeit der Gleichgewichtslage für die Reaktion:



Sie geht bei 650° abs. durch den Punkt $\log K_p = 0$. Dieser Temperaturbereich ist von Bedeutung für die technischen Krackprozesse, bei denen der Übergang in Aromaten mit Rücksicht auf die Kompressionsfestigkeit (Klopffestigkeit) des entstehenden flüssigen Treibstoffes erwünscht ist. Die Spaltung der Paraffine liefert im Bereich niedriger Temperatur kleine gesättigte Moleküle neben größeren ungesättigten. Da die Spaltwärme der aliphatischen C—C-Bindung 71 kcal beträgt gegenüber 92 kcal für die C—H-Bindung, wird bei niedrigen Temperaturen die Aufspaltung der C—C-Bindung bevorzugt. Nach Haber [Habilitationsschrift München 1896] zerfällt Hexan noch bei 700° gemäß:



Die Wasserstoffabspaltung tritt demgegenüber in den Hintergrund. Bei höheren Temperaturen beginnt dann die Abspaltung von Wasserstoff unter gleichzeitiger Entstehung von Benzol. Die Dehydrierung von Hexan (s. Abb. 13) zu Hexylen: $\text{C}_6\text{H}_{14} = \text{C}_6\text{H}_{12} + \text{H}_2$ ist erst bei 873° abs. entsprechend 600°C möglich. Die Spaltung der Paraffine verläuft bei hohen Temperaturen bevorzugt im Sinne der Bildung von Aromaten. Dehydrierung ohne gleichzeitige Aufspaltung der Kohlenstoffkette findet nicht statt.

Zur Synthese von flüssigen Brennstoffen ist vielfach die thermische Spaltung des Methans herangezogen worden [Franz Fischer u. Peters: s. unter anderem Brennstoff-Chem. 10, 279 (1929)]. Es entstehen dabei

im wesentlichen aromatische Verbindungen. Wie Abb. 11 zeigt, vermag Methan bei 1110° abs. in Benzol überzugehen. Von thermodynamischem Standpunkt aus jedoch ist es richtiger, die Reaktion in zwei Teilvorgänge zu zerlegen. Bei Temperaturen oberhalb 1423° abs. entsprechend 1150° C geht Methan in Acetylen über nach:



Die Acetylenbildung aus Methan ist stark endotherm und verläuft infolgedessen bei hohen Temperaturen vollkommener als bei niedrigeren. Die Kondensation des Acetylens (Abb. 11) zu Benzol verläuft stark exotherm und ist bei niedrigen Temperaturen bevorzugt. Praktisch muß die Spaltung des Methans bei Temperaturen um 1500° C erfolgen, während die Kondensation des Acetylens zu aromatischen Stoffen bei 700° mit 98% Ausbeute vor sich geht [Berl u. Hofmann: Ztschr. angew. Chem. 44, 259 (1931)].

In der aromatischen Reihe sind die Spaltwärmen der C—C-Bindung (96 kcal) und der C—H-Bindung (101 kcal) nicht sehr verschieden. Aromatische Körper sind wärmebeständiger als aliphatische. Aufspaltung des Ringes findet erst bei sehr hohen Temperaturen statt. Sie neigen dann zur Wasserstoffabspaltung. Die wasserstoffarmen Reste kondensieren sich leicht zu Diphenyl, Naphthalin oder Anthracen. Mit zunehmender Wasserstoffverarmung tritt als Endzustand der thermischen Einwirkung die Bildung des Graphitgitters in Erscheinung.

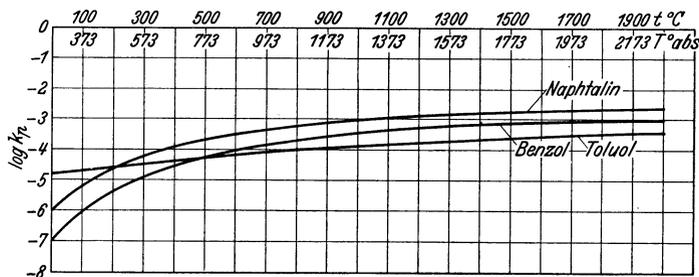
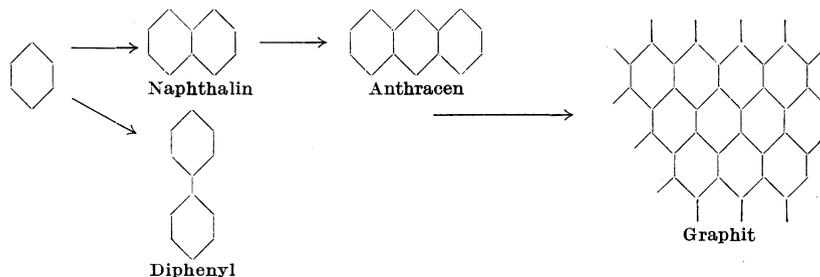


Abb. 12. Gleichgewichte der Bildung aromatischer Kohlenwasserstoffe.

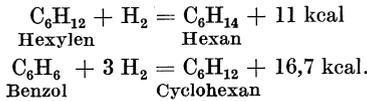
Die flüssigen Produkte der Steinkohlenverkokung (Sekundär-Steinkohlenteer) sind das Ergebnis einer krackenden Zersetzung. Die teils aromatische, teils aliphatische Steinkohle liefert Destillationsprodukte, die aus Benzol und Homologen, aus Naphthalin und Anthracen u. a.

bestehen, sowie aus sog. fixem Kohlenstoff, das ist wasserstoffarmer Kohlenwasserstoff. Als festes Endprodukt entsteht der Koks, in dem das Graphitgitter stark ausgeprägt ist.

Aromatische Körper, die Seitenketten enthalten, spalten diese zuerst ab. Die Spaltwärme der Bindung $C_{arom} - C_{aliphat}$. beträgt 80 kcal, ist also wesentlich niedriger, als die zur Aufspaltung des Kerns erforderliche Energie. Abb. 12 zeigt die zunehmende Beständigkeit der aromatischen Körper mit steigender Kohlenstoffzahl, während das Vorhandensein von Seitenketten die Zerfallstendenz begünstigt. Diese Spaltungsvorgänge sind auch für den Verbrennungsverlauf von Bedeutung (s. S. 335).

7. Die Hydrierung.

Gleichgewichte einiger wichtiger Hydrierungsvorgänge sind in Abb. 13 dargestellt. Die Vorgänge der Hydrierung sind exotherm:



Wie die in Abb. 13 aufgezeichneten $\log K_p$ -Kurven zeigen, verlaufen Hydrierungsvorgänge am günstigsten bei niedrigen Temperaturen.

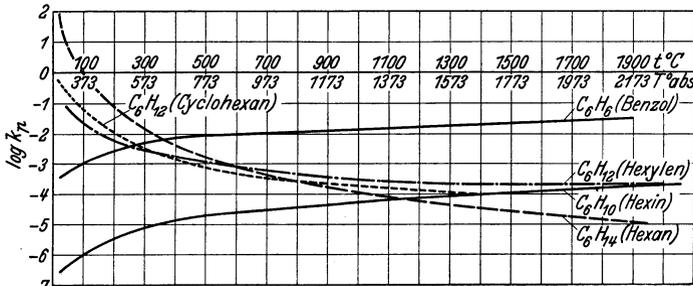


Abb. 13. Gleichgewichte der Hydrierung einiger Kohlenwasserstoffe.

Schon bei 650° abs. beginnt das Cyclohexan wiederum Wasserstoff abzuspalten. Eine Hydrierung mit zufriedenstellender Ausbeute muß deshalb unterhalb dieser Temperatur durchgeführt werden, wenn nicht durch Druckerhöhung die Dehydrierung erschwert wird. Da bei solchen relativ niedrigen Temperaturen die Reaktionsgeschwindigkeit äußerst gering ist, gewinnen für Hydrierungen die Katalysatoren besondere Bedeutung. Sie gestatten eine wesentliche Temperaturerniedrigung unter Berücksichtigung der thermodynamisch günstigen Gleichgewichtslage.

Wichtige Hydrierungsvorgänge sind die Hydrierung des Naphthalins zu Tetralin und Dekalin:



Reaktion (25) wird bei 180—220° unter einem Druck von 15 at mit Nickel als Katalysator durchgeführt. Die Hydrierung des Naphthalins zu

Dekalin erfordert wegen der erhöhten Neigung zur Wasserstoffabspaltung Anwendung höherer Drucke. Man wendet 30—40 at bei 220—240° an. Im Interesse einer guten Ausbeute darf bei beiden Reaktionen die Temperatur von 300° nicht überschritten werden.

Neben diesen Reaktionen hat in den letzten Jahren die Hydrierung und gleichzeitige Krackung in der Industrie der Brennstoffherstellung Bedeutung gewonnen. Durch die Anwesenheit von Wasserstoff bei der thermischen Spaltung der Kohlenwasserstoffe werden die primär entstehenden wasserstoffarmen Bruchstücke abgefangen und hydriert, bevor sie sich zu größeren Komplexen kondensieren. Man erreicht durch diese krackende Hydrierung eine Steigerung der Ausbeute an leichtsiedendem Material unter Zurückdrängung der teer- und asphaltartigen Anteile. Durch Anwendung geeigneter Katalysatoren, wie der Oxyde und Sulfide des Molybdäns, des Wolframs u. a. (s. S. 191) und Verbesserung der Ausbeute durch Anwendung von Druck werden auf diesem Wege nach den Verfahren der I. G. Farbenindustrie A. G. große Mengen von Rohöl, Braunkohlenschwelter und Steinkohlenteer aufgearbeitet.

8. Synthese organischer Verbindungen aus Wassergas.

Auf dem Wege der Herstellung synthetischer Kraftstoffe stellt die Verwendung des Wassergases einen wichtigen Fortschritt dar. Nach dem Verfahren der I. G. Farbenindustrie A. G. läßt sich gemäß:



aus Wassergas mit guter Ausbeute Methanol darstellen, das ein wichtiges Lösungsmittel und das Ausgangsprodukt für Formaldehyd ist. Man arbeitet bei 100 at Druck bei Temperaturen von 250° mit Zinkoxyd und Chromoxyd als Katalysator. Das intensive Studium dieser und ähnlicher Synthesen hat die Umsetzungen des Wassergases zu einem klassischen Beispiel der Reaktionslenkung durch Anwendung von Katalysatoren und Hochdruck gemacht. Einige der mannigfaltigen Reaktionsmöglichkeiten unter Normaldruck

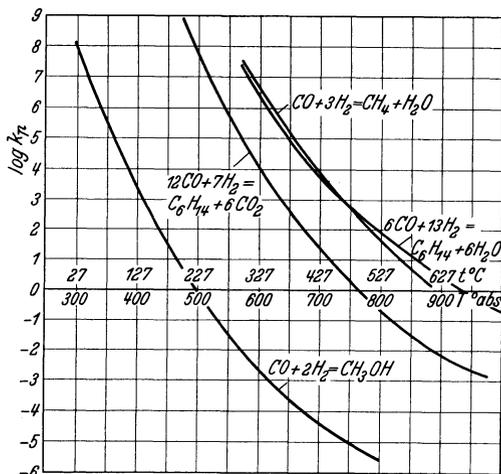
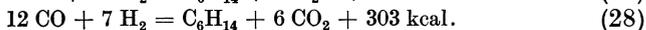
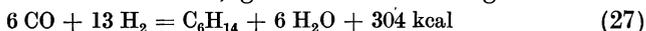


Abb. 14. Gleichgewichte einiger Synthesereaktionen aus Wassergas.

sind in Abb. 14 in Gestalt ihrer $\log K_p$ -Kurven dargestellt. Die Methanolsynthese verläuft am günstigsten bei Temperaturen bis zu 500° abs. (entsprechend 227° C). Durch Anwendung anderer Katalysatoren, wie alkalisiertes Eisen [s. auch Franz Fischer: Gesammelte Abhandlungen

zur Kenntnis der Kohle, ist es der I. G. Farbenindustrie A. G. gelungen, unter ähnlichen Bedingungen durch Anwendung von hohem Druck höhere Alkohole, Aldehyde, Ketone und Säuren (Synthol) herzustellen, die beim Erhitzen unter Wasserabspaltung leicht in das nahezu sauerstofffreie Synthol übergehen.

Bei höheren Temperaturen erfolgt vorzugsweise eine vollständige Reduktion des Kohlenoxyds zu Methan, wenn besonders wirksame Katalysatoren, wie Nickel, angewendet werden. Durch Anwendung weniger wirksamer Katalysatoren, wie Co, Fe, Th, Mn, Ni in Verbindung mit Cu ist es Franz Fischer [Fischer u. Tropsch: Brennstoff-Chem. 7, 97 (1926), sowie zahlreiche Abhandlungen in Brennstoff-Chem. z. B. 13, 461 (1932)] gelungen, diese Reaktion, die als eine stufenweise Reduktion des atomaren Kohlenstoffs über $\text{CH} \leftarrow$, $\text{CH}_2 <$, $\text{CH}_3 -$ als Zwischenprodukt aufgefaßt werden muß, im Sinne der Synthese höhermolekularer Kohlenwasserstoffe zu beeinflussen, gemäß den Gleichungen:

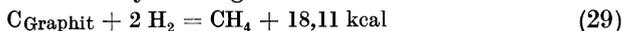


Bei Temperaturen von 190—230° erhält man flüssige Kohlenwasserstoffe, größtenteils paraffinischer Natur, die geringe Anteile sauerstoffhaltiger Körper enthalten. Dabei kann, wie Gleichungen (27) und (28) zeigen, der an den Kohlenstoff gebundene Sauerstoff in dem Reaktionsprodukt entweder als Wasser oder als Kohlendioxyd auftreten. Berl und Jüngling [Ztschr. angew. Chem. 43, 435 (1930)] haben bei Anwendung von Fe als Katalysator, vorzugsweise CO_2 , mit Co vorzugsweise H_2O erhalten. Bemerkenswert ist, daß diese Reaktionen nicht der Anwendung von Druck bedürfen. Wie Abb. 14 zeigt, liegen bei Temperaturen zwischen 400 und 500° die Gleichgewichte noch sehr günstig im Sinne der Kohlenwasserstoffbildung. Da bei Anwendung von Katalysatoren schon bei etwa 200° brauchbare Reaktionsgeschwindigkeiten erreicht werden, ist die Anwendung von Druck nicht erforderlich.

9. Über den Einfluß von Druck auf die Spaltungs-, Bildungs- und Zersetzungsreaktionen.

Reaktionen, die unter Verminderung der Molekülzahl verlaufen, werden durch Anwendung von Druck begünstigt. Diese Erkenntnis Le Chateliers hat in zahlreichen großtechnisch durchgeführten Hochdruckprozessen, wie der Ammoniak- und Methanolsynthese, der Druckhydrierung u. a., Anwendung gefunden.

Der Einfluß des Druckes auf die thermodynamisch erreichbare Ausbeute einer unter Volumenverminderung verlaufenden Reaktion soll am Beispiel der Kohlenstoffhydrierung:



gezeigt werden.

Für das Gleichgewicht der Reaktion (29) gilt:

$$K_p = \frac{p_{\text{CH}_4}}{(p_{\text{H}_2})^2}.$$

Der Partialdruck des festen Kohlenstoffs ist konstant und tritt deshalb nicht in Erscheinung.

In der Gleichgewichtslage sei der Bruchteil x aller CH_4 -Moleküle zerfallen. Dann ist $1 - x$ die Zahl der noch vorhandenen Methanmoleküle. Die Summe aller Moleküle beträgt: $1 + x$. Für p_{CH_4} erhält man:

$$\frac{(1-x) \cdot P}{(1+x)} \quad (30)$$

Für p_{H_2} :

$$\frac{2x}{1+x} \cdot P \quad (31)$$

Darin ist P der Druck, unter dem die Reaktion stattfindet. Setzt man die Partialdrucke aus (30) und (31) in (29) ein, so ergibt sich:

$$K_p = \frac{p_{\text{CH}_4}}{(p_{\text{H}_2})^2} = \frac{\frac{1-x}{1+x} \cdot P}{\left(\frac{2x}{1+x}\right)^2 \cdot P^2} = \frac{(1-x)(1+x)}{4x^2 \cdot P} \quad (32)$$

oder

$$K_p = \frac{(1-x^2)}{4x^2 \cdot P}$$

Für x erhält man

$$x = \sqrt{\frac{1}{1 + 4K_p \cdot P}}$$

Die Ausbeute an Methan in % des Gesamtdruckes ist

$$\begin{aligned} \% \text{CH}_4 &= 100 \cdot \frac{\text{Anzahl der Methanmoleküle}}{\text{Anzahl aller Moleküle}}; \\ \% \text{CH}_4 &= 100 \cdot \frac{1-x}{1+x} = 100 \cdot \frac{1 - \sqrt{\frac{1}{1 + 4K_p \cdot P}}}{1 + \sqrt{\frac{1}{1 + 4K_p \cdot P}}} \end{aligned}$$

Von Berl und Bemmann [Ztschr. physikal. Chem. Abt. A 162, 7 (1932)] sind nach dieser Gleichung die in Tabelle 9 und Abb. 15 aufgeführten Werte berechnet worden¹. Man erkennt den großen Einfluß des Druckes auf die Methan- ausbeute. Bei einer Steigerung des Druckes von 1 auf 100 at im Temperaturbereich von 500° steigt die Methan- ausbeute von 56,5 auf

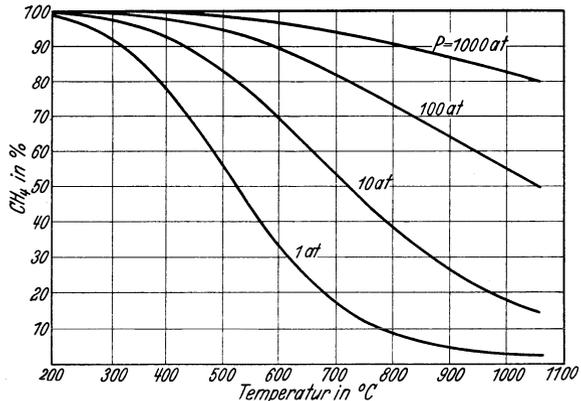


Abb. 15. Gleichgewichte der Methanbildung unter Anwendung von Druck.

¹ In Gleichung (32) ist vernachlässigt worden, daß CH_4 und H_2 bei hohem Druck nicht mehr den idealen Gasgesetzen gehorchen und daß der Bodenkörper die gasförmigen Komponenten absorbiert.

94,4%. Die von Berl und Bemmann gefundenen experimentellen Ergebnisse zeigten gute Übereinstimmung mit den in Abb. 15 dargestellten Werten.

Tabelle 9. Methanausbeuten bei Anwendung von Druck.

$t^{\circ} \text{C}$	A	K_p	Ausbeute in CH_4 in %			
			1 at	10 at	100 at	1000 at
25	— 11560	$3,012 \cdot 10^8$	100	100	100	100
100	— 10146	$8,825 \cdot 10^5$	100	100	100	100
200	— 8132	$5,730 \cdot 10^3$	98,69	99,5	100	100
300	— 6027	$1,992 \cdot 10^2$	93,16	97,79	99,30	100
400	— 3871	$1,809 \cdot 10^1$	78,28	92,84	97,68	99,1
500	— 1682	2,990	56,52	83,31	94,38	98,18
600	+ 513	$7,439 \cdot 10^{-1}$	33,20	69,45	89,06	96,40
700	+ 2705	$2,467 \cdot 10^{-1}$	17,00	53,46	81,81	93,83
800	+ 4883	$1,012 \cdot 10^{-1}$	8,47	38,39	73,12	90,54
900	+ 7044	$4,864 \cdot 10^{-2}$	4,44	26,37	63,79	86,65
1000	+ 9176	$2,655 \cdot 10^{-2}$	2,52	17,90	54,63	82,39

II. Kinetik.

A. Allgemeines über Reaktionsgeschwindigkeit.

Während die Thermodynamik und die Gleichgewichtslehre über die Energiemengen, die bei der Verbrennung verschiedenartigster Brennstoffe verfügbar werden, und über den Grad der Vollkommenheit, der bei einem solchen Umsatz theoretisch erreichbar ist, sehr genaue Angaben machen, ist die Vorausbestimmung der Geschwindigkeiten, mit denen diese Gleichgewichte erreicht werden können, sehr schwierig. Diese Geschwindigkeiten sind für Bildung und Umsetzung gasförmiger, flüssiger und fester Brennstoffe sehr verschieden und nicht nur vom Aggregatzustand und von der Elementarzusammensetzung des Brennstoffes, sondern auch von der chemischen Konstitution und zahlreichen physikalischen Eigenschaften, wie spezifische Wärme, Wärmeleitfähigkeit u. a., abhängig. Die Kenntnis des Reaktionsverlaufes und seiner Geschwindigkeit ist für die Berechnung und für den Betrieb technischer Feuerungen von großer Bedeutung.

Für den monomolekularen und bimolekularen Umsatz, der für die Verbrennungs- und Spaltungsvorgänge in den meisten Fällen in Betracht kommt, gelten die von van't Hoff entwickelten Beziehungen:

$$\frac{dx}{dt} = K \cdot (a - x) \quad (33)$$

$$\frac{dx}{dt} = K \cdot (a - x) (b - x)$$

(s. hierzu S. 154f.).

Die Geschwindigkeit ist der Konzentration der reagierenden Moleküle proportional. Da die Brennstoffe, selbst die reaktionsfähigsten, wie Wasserstoff, in Berührung mit Luft oder reinem Sauerstoff, bei Zimmer-

temperatur nahezu unbegrenzt haltbar sind, ist zu folgern, daß die Geschwindigkeitskonstante K außerordentlich klein ist.

Um eine chemische Reaktion auszulösen, ist es erforderlich, daß die reagierenden Moleküle zusammenstoßen. Errechnet man aus der kinetischen Gastheorie (s. S. 87f.) die Stoßzahl für Wasserstoff unter Normalbedingungen, so ergibt sich die Zahl von $1 \cdot 10^{29}$ Zusammenstößen je cm^3 und s. Die homogene Gasreaktion zwischen Wasserstoff und Sauerstoff müßte demnach bei Raumtemperatur explosionsartig verlaufen. In Wirklichkeit wird jedoch unter diesen Bedingungen keinerlei Reaktion beobachtet.

Nur diejenigen Moleküle vermögen in Reaktion zu treten, die mit einem Schwellenwert an Aktivierungsenergie ausgestattet sind. Die Zahl der Stöße, deren kinetische Energie diesen Schwellenwert erreicht, errechnet sich nach Boltzmann zu:

$$Z_1 = Z \cdot e^{\frac{-E}{RT}}. \quad (34)$$

E wird als Aktivierungsenergie bezeichnet. Alle chemischen Reaktionen bedürfen zu ihrer Auslösung einer für sie charakteristischen Aktivierungsenergie. Nur Ionen, freie Atome, Atomgruppen und freie Radikale reagieren trägheitslos. Bei Reaktionen zwischen Molekülen muß die Umwandlung in derart reaktionsfähige Gruppen vorausgehen.

Ist die Reaktion an einer Stelle im homogenen Gasraum durch Zuführung der Aktivierungsenergie ausgelöst worden, so hängt die Fortpflanzungsgeschwindigkeit davon ab, wie schnell aktive Molekel aus der Masse der übrigen gebildet werden bzw. da sie bei der Reaktion umgesetzt werden, in welchem Maße sie sich erneuern. Durch das Studium photochemischer Prozesse ist festgestellt worden, daß die Zahl der Umsätze wesentlich größer ist, als es der dem System zugeführten Aktivierungsenergie entspricht. Während nach Einstein ein eingestrahktes Lichtquant einen einzigen Umsatz auslösen sollte, hat Bodenstein [s. unter anderem Ztschr. Elektrochem. 38, 911 (1932)] für das Beispiel der Chlorknallgasreaktion 30—50000 Umsätze je Lichtquant gemessen.

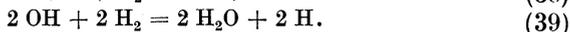
Diese Art der Erhaltung und Fortpflanzung der Aktivierungsenergie hat Bodenstein mit Kettenreaktion bezeichnet. Der Mechanismus solcher Kettenreaktionen ist von Haber und Bonhoeffer [Ztschr. physikal. Chem. Abt. A 137, 763 (1928)] eingehend untersucht worden. Auf spektrographischem Wege wurde festgestellt, daß neben der von Nernst und v. Wartenberg untersuchten Spaltung des Wasserdampfes (s. S. 272) gemäß:



oberhalb von 1500° eine Spaltung nach:



stattfindet. Hydroxyl konnte spektrographisch auch in der Knallgasflamme nachgewiesen werden. Da nach Tabelle 3, S. 264 zur Spaltung in Atome für das Sauerstoffmolekül 160 kcal, für das Wasserstoffmolekül 100 kcal erforderlich sind, liegt es nahe, den Verbrennungsvorgang wie folgt darzustellen:

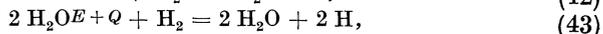
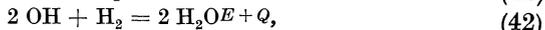


Bei der Bildung des Wassers entstehen nach Gleichung (39) wiederum zwei Wasserstoffatome, die, ohne daß die Zufuhr neuer Aktivierungsenergie von außen erforderlich wird, eine weitere Reaktion nach Gleichung (38) auslösen. Eine solche, durch aktive Atome und Atomgruppen zustande kommende Reaktionskette wird mit *Stoffkette* bezeichnet. Haber hat mit v. Schweinitz [Sitzungsber. preuß. Akad. Wiss. 1928, 499] gezeigt, daß ein Knallgasgemisch durch Zufuhr von Wasserstoffatomen bei Zimmertemperatur zur Reaktion gebracht werden kann.

Die Geschwindigkeit eines jeden chemischen Umsatzes ist darzustellen als Differenz der Geschwindigkeiten der Hin- und Herreaktion. Nach erfolgter Reaktion ist das entstandene Molekül des Verbrennungsproduktes, z. B. das Wassermolekül, im Augenblick des Entstehens Träger der Aktivierungsenergie und der aus dem exothermen Umsatz resultierenden Wärme Q . Vermag das Molekül diesen großen Energieinhalt nicht abzugeben, so muß unmittelbar Rückbildung der Ausgangsstoffe, in diesem Falle also von Wasserstoff und Sauerstoff, einsetzen. Stößt es mit Molekeln der Ausgangsstoffe zusammen, so werden diese aktiviert, während das Molekül des Reaktionsproduktes infolge Energieabgabe in einen Bereich größerer Beständigkeit herabsinkt.

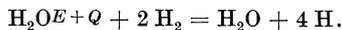
Diese Form der Energiefortpflanzung, die gleichfalls für das System eine Erhaltung der zugeführten Aktivierungsenergie bedeutet, wird mit *Energiekette* bezeichnet, deren Mechanismus von Bodenstein (s. oben), Christiansens und Kramers [Ztschr. physikal. Chem. Abt. A 144, 451 (1923)], sowie Bäckström [s. unter anderem Trans. Faraday Soc. 24, 601 (1928)] eingehend untersucht worden ist.

Für das Beispiel des Knallgases kann eine solche Energiekette wie folgt formuliert werden:



wobei $\text{H}_2\text{O}E + Q$ das mit hohem Energieinhalt ausgestattete Wassermolekül bezeichnet.

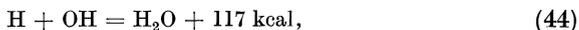
Ist die auf diese Weise fortschreitende Reaktion sehr stark exotherm, so kann die im Reaktionsprodukt aufgespeicherte Energie ausreichen, um zwei oder mehrere Moleküle zu aktivieren:



Es entsteht eine verzweigte Kette, deren Zustandekommen eine Verdoppelung der Reaktionsgeschwindigkeit zur Folge hat. Durch wiederholte Verzweigung der Reaktionsketten kann die Geschwindigkeit der vorher gleichmäßig fortschreitenden Reaktion in die einer Explosion übergehen.

Die durch einmalige Energiezufuhr ausgelöste Reaktion erlischt, wenn Reaktionen stattfinden, die dem System in Gestalt von aktiven Atomen oder kinetischer Energie die Möglichkeit der Fortpflanzung durch Ketten entziehen. Eine Störungsreaktion für die Knallgasreaktion, die das Abreißen der Ketten zur Folge haben kann, stellt die Bildung

von Wasser aus H und OH, sowie die Wiedervereinigung (Rekombination) von Wasserstoffatomen dar:



Eine ähnliche Störungsreaktion ist die Bildung von Wasserstoffsperoxyd aus Hydroxyl:



die man beobachtet, wenn eine Wasserstoffflamme gegen Eis brennt. Man hat deswegen früher das Wasserstoffsperoxyd für das Zwischenprodukt der Wasserstoffverbrennung gehalten.

Die Reaktionsketten reißen auch ab, wenn aktive Atome und Atomgruppen auf feste Flächen treffen, durch welche die Rekombination der Atome beschleunigt wird. Diese Beobachtung steht in scheinbarem Widerspruch zu der Tatsache, daß Wandflächen unter bestimmten Bedingungen Oxydationsvorgänge beschleunigen. Beispielsweise verläuft die Knallgasreaktion bei niedrigen Temperaturen an Platinoberflächen mit ungleich größerer Geschwindigkeit als im Gasraum. Bei Temperaturen oberhalb von 750° treten derartige Grenzflächenreaktionen in den Hintergrund, die Mehrzahl aller Gasreaktionen verläuft nunmehr im homogenen Medium. Die Wandungen bewirken entweder Rekombination dissoziierter Molekel, oder nehmen beim Anprall aktiver Molekel deren kinetische Energie auf und leiten sie nach außen in Form von Wärme ab. In beiden Fällen wird ein Abreißen der Reaktionsketten bewirkt. Man macht sich diese Tatsache bei der Eindämmung von Explosionswellen zunutze, indem man in schlagwettergefährdeten Stollen feinen Gesteinsstaub lagert. Durch die der Explosionswelle voraus-eilende Druckwelle wird der Staub aufgewirbelt und bildet eine großoberflächige Wand, an der infolge Abreißen der Reaktionsketten die Welle zum Stillstand gebracht wird. Auf ähnliche Art bekämpft man im Explosionsmotor die Erscheinung des Klopfens (s.S. 336).

B. Flammgeschwindigkeit und Explosion.

Wird in einem geschlossenen System eine exotherme Reaktion, z. B. ein Verbrennungsvorgang, durch Zündung an einer Stelle ausgelöst, so ist die Geschwindigkeit, mit der sich die Reaktion im Raum ausbreitet, nicht nur von der Art der Zündung und den chemischen und physikalischen Eigenschaften des Gemisches, sondern auch von Form und Material des Raumes abhängig.

Wird durch die früher besprochenen Störungsreaktionen (S. 290) oder durch Wärmeableitung an den Gefäßwänden mehr Energie entzogen, als die in der gleichen Zeit ablaufende exotherme Reaktion nachliefert, so nimmt nach Abb. 16, Kurve 1 die Geschwindigkeit dauernd ab. Die Reaktionsketten reißen ab, bevor ein vollkommener Umsatz stattgefunden hat. Ein Beispiel für diesen Fall sind Flammen, die gegen stark gekühlte Wandflächen brennen. Die Verbrennung verläuft unvollkommen unter starker Rußbildung.

Werden die Wärmeverluste des Systems durch die frei werdende Reaktionswärme genau ausgeglichen, so entsteht ein Geschwindigkeitsverlauf nach 2. Die Reaktion durchläuft, am Zündort beginnend, den Raum mit gleichbleibender Geschwindigkeit, bis vollkommener

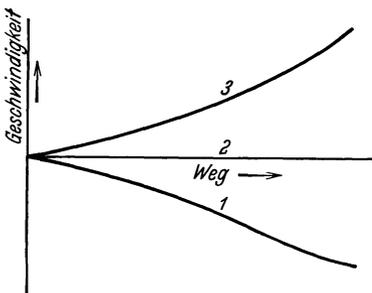


Abb. 16. Geschwindigkeitsverlauf nach Auslösung einer Reaktion.

Umsatz stattgefunden hat. Dieses Gleichgewicht zwischen Energiezufuhr und -ableitung, das in geschlossenen Räumen selten erreicht wird, kennzeichnet die Verbrennung im offenen Raum. Die in einer Feuerung brennende Flamme nimmt bald nach der Zündung eine gleichmäßige Geschwindigkeit an, die solange erhalten bleibt, als die Zufuhr des Brennstoffes und der erforderlichen Verbrennungsluft gleichmäßig erfolgt. Die Verbrennung in der freien Flamme ist eine stehende, mit gleich-

bleibender Geschwindigkeit ablaufende Explosion.

Überwiegt die frei werdende Reaktionswärme die durch die Gefäßwände abgeleitete Energie, so wird durch wiederholte Verzweigung der Reaktionsketten die Geschwindigkeit der Reaktion dauernd gesteigert und geht unter Umständen in die einer Explosionswelle über.

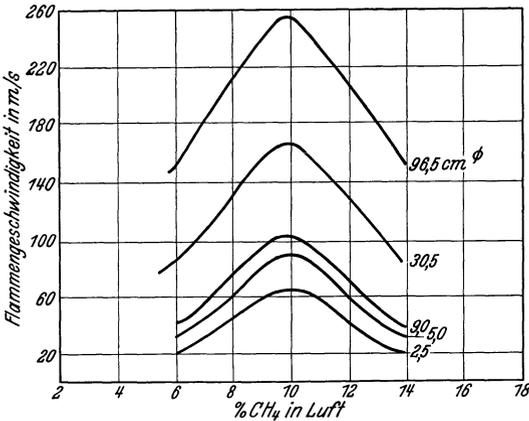


Abb. 17. Flammengeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Gefäßdurchmesser.

Flammengeschwindigkeiten in offenen und geschlossenen Reaktionsräumen sind von Mallard und Le Chatelier [Compt. rend. **91**, 825], Dixon [Ber. **38**, 2019 (1905)], Bone [s. unter anderem Philos. Trans. Roy. Soc. London A **230**, 363 (1931)], Wheeler [Trans. Faraday Soc. **22**, 301 (1926)] u. a. untersucht worden. Vom Ort der Zündung fortschreitend erwärmt die Flammenfront die benachbarten Gasschichten. Diese

Erwärmung bewirkt eine Steigerung des Druckes, die ihrerseits wieder infolge der Konzentrationserhöhung eine Beschleunigung zur Folge hat (s. hierzu Erweiterung der Verbrennungsgrenzen durch Drucksteigerung, S. 305). Vom Zündort breitet sich die Reaktion kugelförmig aus und erfährt eine Hemmung, wenn die Reaktionsketten an festen Wänden abreißen. Der Verlauf der Flammenausbreitung ist deswegen außerordentlich stark von Gestalt und Material des Reaktionsraumes abhängig. Größte Geschwindigkeiten werden in kugelförmigen Räumen

erreicht. Die Zunahme der Flammengeschwindigkeit im zylindrischen Raum mit steigendem Durchmesser zeigt Abb. 17 nach Messungen von K. Bunte, W. Litterscheidt [G. W. F. 73, 837, 871, 890 (1931)]. Berl und Fischer [Ztschr. Elektrochem. 30, 29 (1924)] fanden, daß die Verbrennungsgrenzen durch das Gefäßmaterial merklich beeinflusst werden. Wandflächen aus Glas oder keramischem Material leiten die Reaktionswärme langsamer ab als solche aus Metall und bedingen infolgedessen erhöhte Reaktionsgeschwindigkeit.

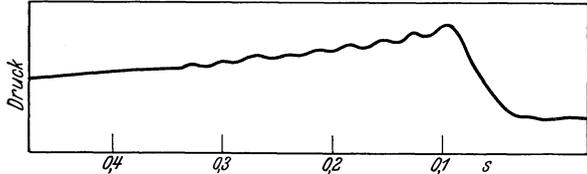


Abb. 18. Druck-Zeitdiagramm der Cyanverbrennung.

Das Druck-Zeitdiagramm einer Cyanverbrennung in Luft zeigt Abb. 18. Die Messung ist von Mallard und Le Chatelier in einem Zylinder von 170 mm lichter Weite vorgenommen worden. Die Zündung erfolgte in der Mitte. Man erkennt die gleichmäßige Drucksteigerung während der fortschreitenden Reaktion. Mallard und Le Chatelier haben für ein Gemisch von 10% CH₄ in Luft in diesem Falle Geschwindigkeiten von 265 m/s gemessen.

Der mit fortschreitender Reaktion zunehmende Druck steigert die Reaktionsgeschwindigkeit bis oder über den Geschwindigkeitsbereich der Schallwellen (360 m/s). Der Verbrennungsvorgang verläuft dann unter Entwicklung eines starken Geräusches. Die Verbrennung geht in eine Explosion über, wenn infolge der vor der Flammenfront bewirkten Drucksteigerung die Selbstentzündungstemperatur des brennbaren Gemisches erreicht wird.

In diesem Augenblick erfährt die gemäß Abb. 18 langsam ansteigende Druckkurve eine plötzliche Steigerung, da die Reaktion das gesamte Gemisch erfaßt. Der Flammenfront eilt eine Druckwelle voraus, die an den Gefäßwänden reflektiert wird, und durch mehrmalige Durchkreuzung der Flammenfront eine wiederholte Geschwindigkeitssteigerung zur Folge hat. Die von Dixon [Ber. 38, 2435 (1905)] gemessenen Fortpflanzungsgeschwindigkeiten von Explosionswellen sind in Tabelle 10 wiedergegeben.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Flammen ist von Bone und seinen Mitarbeitern und anderen Forschern auf photographischem Wege gemessen worden. Abb. 19a und b zeigt die Aufnahme einer Kohlenoxyd-Sauerstoffflamme. Die Reaktion erfolgt in einem Glasrohr von 5 m Länge. Der auf dem Film aufgezeichnete Weg der Flamme ist die Resultierende aus Film- und Flammengeschwindigkeit. Die Flammengeschwindigkeit war um so größer, je weniger geneigt gegen die Horizontale die Lichtbahn auf dem Film verläuft. Die senkrechten schwarzen

Tabelle 10. Geschwindigkeiten von Explosionswellen. (Nach Dixon.)

	m/s
H ₂ + 1/2 O ₂	2821
H ₂ + O ₂	2328
H ₂ + 2 O ₂	1927
H ₂ + 1/2 O ₂ + 1/2 N ₂	2426
H ₂ + 1/2 O ₂ + 2 1/2 N ₂	1822
C ₂ N ₂ + O ₂	2728
C ₂ N ₂ + 2 O ₂	2321
C ₂ N ₂ + O ₂ + 2 N ₂	2165

Striche rühren von den auf dem Glasrohr angebrachten Zeitmarken her. Ihr Abstand entspricht jeweils 20 cm Entfernung im Glasrohr. In Abb. 19a erkennt man die gleichmäßig zunehmende Geschwindigkeit der Flamme, die 0,5 cm vom geschlossenen Ende des Rohres aus entzündet worden ist. Mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 30 m/s durchheilt die Flamme mit

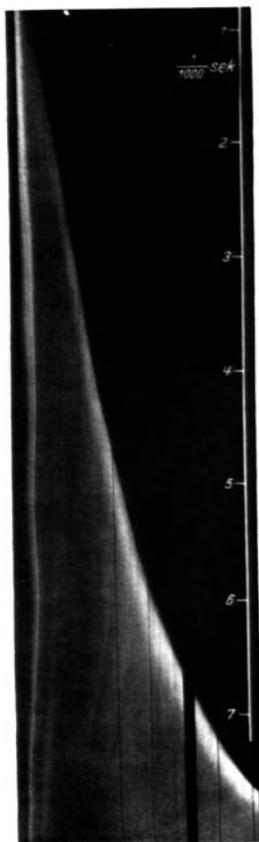


Abb. 19a.



Abb. 19b.

Abb. 19. Photographische Aufnahme einer CO-Verbrennung.

zunehmender Leuchterscheinung den Raum und erreicht eine Endgeschwindigkeit von 560 m/s. In Abb. 19b ist der Flamme, die mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 38,6 m/s fortschreitet, künstlich eine Druckwelle (760 m/s) überlagert worden. Beim Durchkreuzen der Flammenfront wird deren Geschwindigkeit plötzlich auf 308 m/s gesteigert. Die Druckwelle eilt der Flamme unsichtbar (punktierte Linie) voraus. Die Flamme steigert dauernd ihre Geschwindigkeit und holt die Druckwelle kurz vor dem Ende des Rohres ein. In diesem Augenblick wird kurz vor der

Flammenfront eine neue Entzündung ausgelöst. Die Reaktion geht in eine Detonation über mit einer Geschwindigkeit von etwa 2000 m/s.

Mit Hilfe der für die adiabatische Kompression aufgestellten Beziehungen (S. 113) berechnet Schüle [Technische Thermodynamik. Berlin 1930] diejenige Temperatur, die in der Flammenfront erreicht werden muß, um in der benachbarten Gasschicht die Selbstentzündung und damit die Explosion auszulösen:

$$T_{\min} = \frac{T_c \frac{K}{K-1}}{T_A \frac{1}{K-1}} \quad (47)$$

darin ist: T_{\min} = erforderliche Mindesttemperatur der Flamme; T_c = Selbstentzündungstemperatur des brennbaren Gemisches; T_A = Anfangstemperatur des brennbaren Gemisches; $K = \frac{c_p}{c_v}$ (für zweiatomige Gase wenig verschieden von 1,4).

Tabelle 11 enthält die mit Hilfe von Gleichung (47) errechneten notwendigen Flammentemperaturen.

Für $K = 1,38$ und eine Selbstentzündungstemperatur von 600°C = 873° abs. erhält man:

Tabelle 11¹.

	log $T_{\min} = 10,705 - 2,63 \cdot \log T_A$						
t_A in $^{\circ}\text{C}$. .	0	50	100	150	200	300	400
T_A in $^{\circ}$ abs. .	273	323	373	423	473	573	673
t_{\min} in $^{\circ}\text{C}$.	19600	12500	8500	6000	4400	2560	1580
$t_{\min} - t_A$. .	19600	12450	8400	5850	4200	2260	1180

Dieses Temperaturminimum, das zur Auslösung einer Explosion erforderlich ist, liegt um so niedriger, je geringer die Selbstentzündungstemperatur und je höher die Anfangstemperatur ist. Selbst bei Gasen mit hoher Selbstentzündungstemperatur (600°) kann diese Mindesttemperatur erreicht werden, wenn das brennbare Gemisch auf $300\text{--}400^{\circ}$ vorgewärmt wird. Der Übergang der gleichmäßig fortschreitenden Flamme in eine Explosionswelle kann bei technischen Verbrennungsvorgängen Anlaß zu erheblichen Schäden geben. Ein Beispiel dafür geben die Vergasermotoren, in denen als Folge schlechter Wärmeableitung der Zylinderwände und niedriger Selbstentzündungstemperatur des Brennstoffs gegebenenfalls Explosionen auftreten, die man mit Klopfen bezeichnet (S. 336).

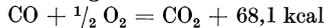
C. Chemischer Verlauf der Verbrennung.

Die Größe der Aktivierungswärme und der Mechanismus ihrer Ausbreitung über das gesamte System ist für jedes Brennstoff-Luftgemisch charakteristisch und in erster Linie abhängig von Zusammensetzung und Konstitution des brennbaren Stoffes einerseits und der Zahl der Zwischenreaktionen, die bis zur ‚Verbrennungsreife‘ durchlaufen werden müssen.

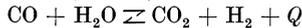
Den einfachsten Mechanismus der Verbrennung zeigen der Wasserstoff und das Kohlenoxyd. Sie allein vermögen ohne vorhergehende

¹ Entnommen aus Schüle [Technische Thermodynamik. Berlin 1930].

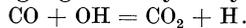
Spaltung und andere Zwischenreaktionen mit Sauerstoff zu reagieren und in die Endprodukte der Verbrennung H_2O und CO_2 überzugehen. Wasserstoff und Kohlenoxyd werden deshalb als verbrennungsreif bezeichnet; alle anderen brennbaren Kohlenstoffverbindungen müssen während des Verbrennungsvorganges durch eine mehr oder minder lange Reihe von Zwischenstufen hindurchgehen, bis sie in Kohlenoxyd und Wasserstoff umgewandelt sind. Von den beiden verbrennungsreifen Gasen ist der Wasserstoff der reaktionsfähigere. Über Wasserstoffatome und Hydroxylradikale verlaufend, stellt die Knallgasreaktion die schnellste aller Verbrennungsreaktionen dar (s. S. 289). Die Reaktion zwischen Kohlenoxyd und Sauerstoff gemäß:



ist demgegenüber außerordentlich träge. Absolut trockenes Kohlenoxyd kann nach Dixon [Chem. News 46, 8, 151 (1884)] überhaupt nicht, nach Mayer [Ber. 19 I, 1100 (1886)] erst durch mehrmaliges starkes Zünden zur Reaktion gebracht werden. Spuren von Wasser und Wasserstoff beschleunigen die Reaktion außerordentlich. Der Umsatz verläuft über die Wassergasreaktion (S. 276):



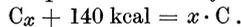
oder im Sinne der Beteiligung von Hydroxyl gemäß:



Kohlenoxyd und Wasserstoff sind bei ihrer Verbrennung miteinander verknüpft. Mit zunehmendem Wasserstoffgehalt nimmt die Verbrennung des Kohlenoxyds vollständig den Charakter der Wasserstoffverbrennung an (s. auch Explosionsgrenzen, S. 303).

1. Die Verbrennung des Kohlenstoffs.

Die Stellung des Kohlenstoffs im periodischen System, sowie die Tatsache, daß der Kohlenstoff gasförmige Oxyde und ein gasförmiges Nitrid, das Cyan, bildet, berechtigt zu der Annahme, daß der elementare Kohlenstoff gleichfalls gasförmig ist. Die Modifikationen des festen Kohlenstoffs, der Graphit, der Diamant und der amorphe Kohlenstoff, dessen Existenz als gesonderte Modifikation durchaus umstritten ist, stellen Polymerisationsprodukte vom Typus C_x dar. Bei der Vergasung des elementaren Kohlenstoffs aus seinem Krystallgitter heraus, sowie bei seiner Verbrennung, muß zunächst die Sublimationswärme aufgewandt werden. Sie beträgt für Graphit 140 kcal je g Atom:



Um diese Sublimationswärme unterscheiden sich die beiden Oxydationsstufen hinsichtlich ihrer Wärmeentwicklung:



Auf Grund des Hessschen Gesetzes von den konstanten Wärmesummen ist es vom thermodynamischen Standpunkt aus gleichgültig, ob diese beiden Reaktionen nacheinander verlaufen, oder ob als Summe von (48) und (49) unmittelbar CO_2 entsteht, das gemäß:



in Berührung mit festem Kohlenstoff unterhalb 1000° CO zurückbildet (s. S. 274). Im Hinblick auf chemische Überlegungen hat die primäre Entstehung von Kohlenoxyd die größere Wahrscheinlichkeit für sich. Das Stufengesetz von Ostwald besagt, daß die Elemente die möglichen Oxydationsstufen nacheinander durchlaufen. Der Kohlenstoff liefert gemäß Gleichung (48) in nicht umkehrbarer Reaktion Kohlenoxyd, der nach (49) zu Kohlendioxyd verbrennt. Bei höheren Temperaturen verläuft Reaktion (50) hauptsächlich von links nach rechts. Reaktion (50) hat ihre Analogie in vielen chemischen Umsetzungen, bei denen sich nach der Regel von Cannizaro eine mittlere Oxydationsstufe in die beiden benachbarten, eine höhere und eine niedrigere, disproportioniert.

Experimentell ist die Frage, ob CO oder CO_2 das Primärprodukt der Kohlenstoffverbrennung ist, schwer zu entscheiden. Die Analyse der Verbrennungsprodukte gestattet nur, Endzustände zu erfassen. Von Eucken und L. Meyer [Ztschr. physikal. Chem. Abt. B 17, 385 (1932)] sind Messungen beschrieben worden, nach denen beide Oxyde gleichzeitig entstehen. Meyer erhielt unterhalb 1000° CO_2 und CO im Verhältnis 1:1, oberhalb 1000° im Verhältnis 1:2. Die komplizierten Verhältnisse an Kohleoberflächen — Berl und Bemann [Ztschr. physikal. Chem. Abt. A 162, 71 (1932)] fanden, daß hochoverhitzte Holz- und Aktivkohlen noch merkliche Anteile an Hydroxyl- und Carboxylgruppen enthalten — gestatten nicht, diese Ergebnisse als endgültige hinzunehmen. Andererseits stellten Berl und Barth [Ztschr. physikal. Chem., Bodenstein-Festband 1931, 211] bei der Untersuchung der Cyanverbrennung fest, daß bei Verwendung einer zur vollkommenen Verbrennung unzureichenden Luftmenge nur CO, niemals CO_2 als Verbrennungsprodukt auftritt [s. hierzu auch Sihvonen: Ztschr. Elektrochem. 40, 743 (1934), daselbst weitere Literaturangaben].

Im Verhältnis zu der Verbrennung von Kohlenoxyd und Wasserstoff stellt die Kohlenstoffverbrennung eine außerordentlich träge Reaktion dar, sie ist von allen Oxydationsprozessen, die von organischer Substanz ausgehen, die langsamste. Die Loslösung des Kohlenstoffs aus dem Krystallgitter des Graphits oder des Diamanten erfordert hohe Temperaturen. Außerdem wird die Geschwindigkeit dieser heterogenen Reaktion durch den Verlauf von Diffusions- und Adsorptionsvorgängen bestimmt. Die Kohlenstoffverbrennung wird wesentlich beschleunigt durch die Anwesenheit von Feuchtigkeit. Über die Wassergasreaktion:



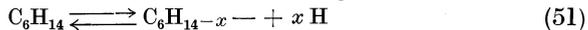
wird die Umwandlung in das verbrennungsreife Kohlenoxyd erleichtert. Der Wasserstoff tritt hier wiederum als Reaktionsbeschleuniger in Erscheinung (s. S. 289).

2. Verbrennung technischer Brennstoffe.

Die technischen Brennstoffe stellen meistens komplizierte Mischungen von kohlenstoff- und wasserstoffhaltigen Körpern dar, deren Zusammen-

setzung in vielen Fällen, wie bei den Kohlen, kaum bekannt ist. Anteile von Schwefel, Stickstoff und Aschebestandteilen sind für den Verlauf der Verbrennung von untergeordneter Bedeutung. Die Verbrennung solcher Kohlenstoffverbindungen verläuft über eine große Reihe von Teilreaktionen. In einem Wechselspiel von Spaltungs- und Oxydationsvorgängen werden die komplizierten Moleküle schrittweise abgebaut und endlich in die verbrennungsreifen Gase CO und H₂ umgewandelt, deren Verbrennung den Abschluß eines jeden Verbrennungsvorganges darstellt.

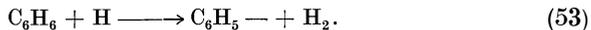
Die thermische Spaltung der Kohlenwasserstoffe unter Luftabschluß ist an anderer Stelle (S. 281) beschrieben. Während unter diesen Umständen die Spaltung der Aliphaten an C—C-Bindungen beginnt, verläuft die Spaltung bei Anwesenheit von Sauerstoff bevorzugt im Sinne einer Abtrennung von Wasserstoff. Aus dem Gleichgewicht der Reaktion:



wird der atomare Wasserstoff leicht wegoxydiert. Er verbrennt zu Hydroxyl. Das entstehende Hydroxyl OH vermag gesättigte Kohlenwasserstoffe unter Bildung wasserstoffärmerer Reste zu dehydrieren:



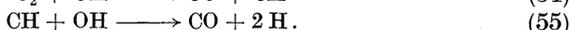
Bonhoeffer und Hartek [Ztschr. physikal. Chem. Abt. A 319, 64 (1928)] nehmen an, daß auch atomarer Wasserstoff eine Dehydrierung verursachen kann, gemäß:



Diese Dehydrierung durch Einwirkung von Hydroxyl und atomarem Wasserstoff ist ein erneutes Beispiel für die innige Verknüpfung der Verbrennungsvorgänge des Wasserstoffs und der Kohlenstoffverbindungen. Der erste Schritt einer jeden Verbrennung aliphatischer und aromatischer Kohlenwasserstoffe ist die Wasserstoffabspaltung aus dem Molekül. Bei Verbrennung mit unzureichenden Luftmengen erhält man unter geeigneten Versuchsbedingungen nur Wasser, keinerlei CO und CO₂ als Verbrennungsprodukt.

Es entstehen wasserstoffarme Reste — freie Radikale —, die nicht etwa mit Olefinen verwechselt werden dürfen, da sie wegen ihren freien Valenzen im Vergleich zu den beständigen ungesättigten Kohlenwasserstoffen mit ungleich höherer Reaktionsgeschwindigkeit ausgestattet sind. Die Existenz solcher Radikale in Flammen ist von Haber und Bonhoeffer [Ztschr. physikal. Chem. Abt. A 137, 763 (1928)] sowie Henry [s. unter anderem Journ. Phys. Rad. Zürich 10, 81 (1929)] auf spektrographischem Wege sichergestellt worden. In der Flamme verbrennender Kohlenwasserstoffe sind die Radikale: C₂ (Dicarbon) und CH (Methin) nachgewiesen worden. Auf anderem Wege hat Paneth [Ber. 62, 1335 (1929)] die Existenzmöglichkeit der Radikale Methyl und Äthyl festgestellt. Die in der Flamme aufgefundenen Radikale stellen das letzte Glied einer langen Reaktionsfolge dar. Es kann angenommen werden, daß in der Flamme bei niedrigerer Temperatur zunächst größere Radikale entstehen, deren spektroskopische Untersuchung wegen ihres komplizierten Aufbaus und ihrer großen Unbeständigkeit bisher nicht möglich

war. Von den Radikalen C_2 und CH führt ein einziger Schritt zu den verbrennungsreifen Gasen CO und H_2 :

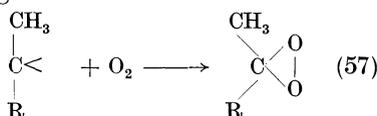


Sind durch Wasserstoffabspaltung freie Radikale gebildet, so verläuft die Verbrennung nach Art einer Kettenreaktion. An die freien Valenzen lagert sich Sauerstoff an. Aus den entstehenden, sauerstoffhaltigen Verbindungen spalten sich Wasser und Kohlendioxyd ab, z. B.:



Unter dauernder Molekülverkleinerung werden die Kohlenwasserstoffe zu Wasserstoff und Kohlenoxyd abgebaut.

Für den Verlauf der Abbaureaktionen ist die intermediäre Bildung von Peroxyden von Wichtigkeit. Durch Anlagerung von molekularem Sauerstoff an die Restvalenzen von Radikalen und ungesättigten Körpern entstehen Verbindungen, die wegen ihrer Überladung mit Sauerstoff sehr unbeständig sind:



Sie zerfallen explosionsartig im Augenblick ihres Entstehens und bewirken eine Beschleunigung der Reaktion. Engler [Kritisches Studium über die Vorgänge der Autoxydation] hat diesen Vorgang mit Autoxydation bezeichnet.

Die Autoxydation ist ein Einzelfall häufig ablaufender Reaktionen, welche man unter den Namen Autokatalyse zusammenfaßt. Man versteht darunter allgemein Reaktionen, bei denen das Reaktionsprodukt selbst oder eine im Verlauf der Umsetzung gebildete Zwischenverbindung durch ihre weitere Teilnahme an der Reaktion eine Beschleunigung bewirkt. Der Geschwindigkeitsverlauf einer autokatalytisch verlaufenden Reaktion und damit der Autoxydation ist in Abb. 20 dargestellt. Während einer Induktionsperiode entsteht im letzteren Falle in langsamer Reaktion das Peroxyd, das durch seinen Zerfall den plötzlichen Anstieg der Geschwindigkeit verursacht. Ähnliche, mit Sauerstoff überladene Additionsverbindungen erhielt Harries [Ber. 37, 3431 (1904)] bei der Einwirkung von Ozon auf ungesättigte Kohlenwasserstoffe. Die dabei entstehenden Ozonide zerfallen in brisanter Reaktion, wobei das Molekül an der Doppelbindung gespalten wird:

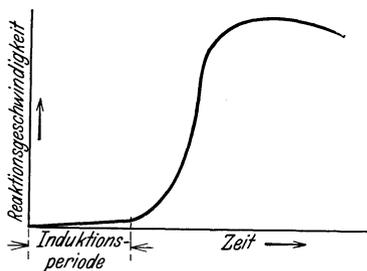
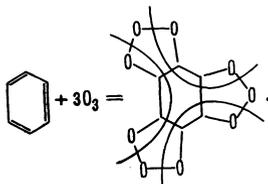


Abb. 20. Geschwindigkeitsverlauf einer Autoxydation.



Ähnliche Peroxyde entstehen außerordentlich leicht bei der Oxydation sauerstoffhaltiger Kohlenstoff-Wasserstoffverbindungen, wie z. B. der Aldehyde. Die Neigung des Äthyläthers, bei Raumtemperatur Peroxyde zu bilden, gibt oft Anlaß zu Unglücksfällen. Die Bildung der Peroxyde ist von Bedeutung für die Verbrennungsvorgänge in Vergasermotoren, wo sie die Ursache des Klopfens sind (s. S. 336).

Die zur Auslösung eines Verbrennungsvorganges benötigte Aktivierungsenergie ist gleichbedeutend mit der zur Abtrennung des Wasserstoffs erforderlichen Spaltwärme (Tabelle 3, S. 264). Diese ist für die Kohlenwasserstoffe verschiedener Konstitution sehr verschieden. Die Oxydationsfähigkeit nimmt in folgender Reihenfolge ab: Ungesättigte Kohlenwasserstoffe (Olefine)—Paraffine—Cycloparaffine (Hydroaromaten)—Aromaten.

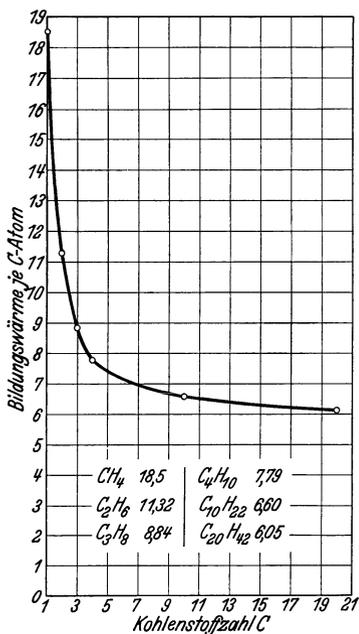
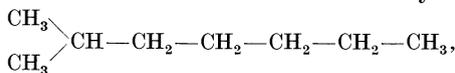


Abb. 21.
Bildungswärme aliphatischer
Kohlenwasserstoffe je
Kohlenstoffatom.

In der Paraffinreihe nimmt die pro Kohlenstoff errechnete Bildungswärme mit steigender Kohlenstoffzahl ab (s. Abb. 21). Im gleichen Maße steigt die Oxydationsfähigkeit. Während Methan erst bei dunkler Rotglut mit Sauerstoff reagiert, können höhere Paraffine schon durch Blasen mit Luft bei Zimmertemperatur zu Fettsäuren oxydiert werden [Grün: Ber. 53, 187 (1920)].

Bei gleicher Kohlenstoffzahl zeigen diejenigen Moleküle die größte Beständigkeit gegen Oxydation, deren Aufbau die größte Symmetrie erreicht. Innerhalb homologer Reihen sind Isomere mit verzweigter Kette beständiger als die unverzweigten normalen Kohlenwasserstoffe. Sind im Molekül verschieden lange Ketten vorhanden, wie z. B. im Dimethylhexan:



so beginnt die Oxydation an der längeren unverzweigten Kette. Aromatische Körper, die durch ihre Ringstruktur ein Maximum der Symmetrie erreichen, setzen der Verbrennung den größten Widerstand entgegen. Durch Kondensation mehrerer Ringe, wie beim Naphthalin und Anthracen, wird diese Reaktionsträgheit noch gesteigert. Ungesättigte und sauerstoffhaltige Kohlenstoffverbindungen reagieren zum Teil schon bei Zimmertemperatur mit dem Sauerstoff der Luft.

Der Grad der Reaktionsfähigkeit und die Temperatur, bei der die Oxydation beginnt, ist auch für den weiteren Verlauf bestimmend. Da der primär abgespaltete atomare Wasserstoff unmittelbar verbrennt,

verarmt der Brennstoff dauernd an Wasserstoff. Der Verbrennungsvorgang gewinnt immer mehr den Charakter der Kohlenstoffverbrennung. Da diese langsam verläuft, neigt das System mit fortschreitender Verarmung an Wasserstoff zu unvollkommener Verbrennung. Diese Gefahr ist dann am größten, wenn bei niedrigen Verbrennungstemperaturen die Wassergasreaktionen, welche die Kohlenstoffverbrennung beschleunigen, noch nicht stattfinden. Die Gefahr der unvollkommenen Verbrennung ist am größten, wenn der Brennstoff entweder sehr wenig Wasserstoff enthält, oder wenn seine Verbrennungstemperatur sehr niedrig ist. Wegen ihres geringen Wasserstoffgehaltes neigen die aromatischen Kohlenwasserstoffverbindungen sehr zur Rußbildung. Die Kohlen, die sich bei sehr niedrigen Temperaturen entzünden, verbrennen mit leuchtender rußender Flamme.

Die wasserstoffreichen Paraffine, wie z. B. das Methan, haben hohe Verbrennungstemperaturen, bei denen auch der Kohlenstoff schon mit ausreichender Geschwindigkeit reagiert. Sie brennen deshalb mit sehr heißer, schwach leuchtender, nicht rußender Flamme.

D. Die Zündung.

Zur Auslösung der Verbrennung muß jedes brennbare Gemisch auf eine Mindesttemperatur, die Entzündungstemperatur, gebracht werden. Erst bei Erreichen dieser, für jeden Brennstoff charakteristischen Temperatur entsteht die Flamme, ein strahlender Gasstrom, in dem sich die letzten Stufen der Umwandlung und die Verbrennung der verbrennungsreifen Gase, Kohlenoxyd und Wasserstoff, vollziehen. In der Flamme erreicht das System seine Höchsttemperatur, die Verbrennungstemperatur. Die Entzündungstemperatur, d. h. das Auftreten einer sichtbaren Flamme, ist niemals gleichbedeutend mit dem Beginn der Oxydation. Lange vor Auftreten der Flammenerscheinung beginnen die Spaltungs- und Oxydationsvorgänge, während derer sich in den festen und flüssigen Brennstoffen schrittweise die Änderung des Aggregatzustandes, die Wandlung in die verbrennungsreifen Gase, vollzieht. Alle Brennstoffe durchlaufen dieses Gebiet der Vorverbrennung. Ist das System während dieser Vorverbrennung starken Abkühlungen unterworfen, so kann die Vorverbrennung sich mit gleichbleibender Geschwindigkeit fortsetzen, ohne daß es zur Ausbildung einer Flamme kommt.

Das Auslösen der Entzündung kann durch Fremdzündung oder durch Selbstzündung erfolgen. Fremdzündung haben alle technischen Feuerungen, wie auch die Explosionsmotore. In den Feuerungen entzündet sich das Brennstoff-Luftgemisch an den glühenden Schichten des brennenden Systems, sowie an den glühenden Wänden des Feuer-raumes. Im Explosionsmotor wird die Zündung durch elektrische Funken bewirkt. Im Glühkopfmotor wirkt der heiße Zylinderkopf als Zündmittel. Alle Fremdzündungen erfolgen mit einer Zündenergie, die wesentlich größer ist als die erforderliche Aktivierungsenergie, sie sind übercalorisch. Das Gebiet der Vorverbrennung wird dadurch bei den Fremdzündungen stark verkürzt. Die Selbstzündung kommt

ausschließlich in Dieselmotoren zur Anwendung. Sie ist unerwünscht die Ursache vieler Brandschäden und Explosionen.

Dauer der Vorverbrennungsperiode und Lage der Selbstentzündungstemperatur sind unter anderem abhängig von der Natur des Brennstoffs. Feste Brennstoffe, sofern sie nennenswert sauerstoffhaltig sind, entzünden sich leicht. Junge, gasreiche Kohlen erhitzen sich zuweilen beim Lagern bei normaler Temperatur, wobei die Selbstentzündung durch Oxydation anorganischer Beimengungen, wie feinverteiltes FeS_2 , sowie durch Sauerstoffanlagerung an ungesättigte Komplexe, erleichtert wird. Bei der Speicherung muß durch richtige Wärmeableitung unter Vermeidung von Zug, eventuell durch Lagerung unter Wasser, der Entzündung vorgebeugt werden. Flüssigkeiten sind um so schwerer entzündlich, je kleiner ihr Molekulargewicht ist. Die Feuergefährlichkeit der niedrig-siedenden Flüssigkeiten ist weniger eine Folge der Selbstentzündung, als vielmehr des hohen Dampfdruckes, wodurch sehr leicht ein brennbares Dampf-Luftgemisch entsteht. Wegen ihrer Tendenz zur Peroxyd-bildung sind viele sauerstoffhaltige Flüssigkeiten, z. B. der Äther, besonders leicht entzündlich.

Die Messung der Selbstentzündungstemperatur wird durch die Einflüsse der Gefäßwandungen, sowie der gesamten Versuchsbedingungen, wie Erhitzungsdauer, Luftströmung u. a., sehr erschwert. Vielfach wird zu ihrer Messung der Zündwertprüfer nach Jentzsch oder nach Krupp [s. Berl-Lunge: Chemisch-technische Untersuchungsmethoden Bd. 2, S. 82. 1932; Bd. 4, S. 667. 1933] benutzt. In Tabelle 11 u. 12 sind die Selbst-

Tabelle 11. Selbstentzündung von Kohlenwasserstoffen.
[Aus Zerbe und Eckert: Ztschr. angew. Chem. 45, 593 (1932).]

	Formel	C:H	Selbst- entzün- dungs- punkt ° C	Oberer Zünd- wert ° C	Zünd- bereich ° C
Isopren	C_5H_8	1:1,6	440	590	150
Diallyl	C_6H_{10}	1:1,66	330	500	170
Hexylen	C_6H_{12}	1:2,0	325	540	215
Heptan	C_7H_{16}	1:2,28	300	560	260
Hexan	C_6H_{14}	1:2,34	296	560	264
Pentan	C_5H_{12}	1:2,4	300	580	280
Tetralin	$\text{C}_{10}\text{H}_{12}$	1:1,20	420	660	240
Oktahydroanthracen .	$\text{C}_{14}\text{H}_{18}$	1:1,28	315	560	245
Cyclohexadien	C_6H_8	1:1,33	360	460	100
Cyclohexen	C_6H_{10}	1:1,67	325	520	195
Dekalin	$\text{C}_{10}\text{H}_{18}$	1:1,80	280	530	250
Cyclohexan	C_6H_{12}	1:2,0	325	520	195
Anthracen	$\text{C}_{14}\text{H}_{10}$	1:0,71	580	770	190
Naphthalin	C_{10}H_8	1:0,8	630	700	70
Benzol	C_6H_6	1:1	690	720	30
Toluol	C_7H_8	1:1,14	640	730	90
Xylol	C_8H_{10}	1:1,25	610	740	130
Hexamethylbenzol . .	$\text{C}_{12}\text{H}_{18}$	1:1,5	375	640	265
Cyclopentadien . . .	C_5H_2	1:1,2	510	640	130
Dicyclopentadien . .	$\text{C}_{10}\text{H}_{12}$	1:1,2	510	680	170

Tabelle 12. Selbstentzündung sauerstoffhaltiger Verbindungen.

	Formel	C : H : O	Selbst- entzündungs- punkt ° C	Oberer Zünd- wert ° C	Zünd- bereich ° C
Methylalkohol	CH ₄ O	1 : 4 : 1	500	535	35
Glykol	C ₂ H ₆ O ₂	1 : 3 : 1	500	570	70
Äthylalkohol	C ₂ H ₆ O	1 : 3 : 0,5	375	670	295
Propylalkohol	C ₃ H ₈ O	1 : 2,7 : 0,33	370	590	220
Cyclohexanol	C ₆ H ₁₂ O	1 : 2 : 0,17	350	640	290
Oktadecylalkohol	C ₁₈ H ₃₈ O	1 : 2,1 : 0,056	270	580	310

Tabelle 13. Selbstentzündungstemperaturen einiger Brennstoffe.

Paraffinöl	370	Steinkohle	6—9%
Steinkohlenteeröl	600	O ₂	300—400
Cellulose	360	Anthrazit mit 3,5 bis	
Torf-Braunkohle mit		3% gebundenem O ₂	440
25—35% gebunde-		Phenol.	715
nem O ₂	250—280	Benzaldehyd	180

Tabelle 13 nach Tauss und Schulte: Über Zündpunkt und Verbrennungsvorgänge im Dieselmotor.

entzündungstemperaturen einiger Flüssigkeiten nach den Angaben von Zerbe und Eckert [Ztschr. angew. Chem. 45, 593 (1932)] zusammengestellt. Die Messung ist mit dem Zündwertprüfer nach Jentzsch erfolgt. Tabelle 13 enthält die von Tauss und Schulte [Mitt. chem.-techn. Inst. Techn. Hochschule Karlsruhe 1924] gemessenen Selbstentzündungstemperaturen verschiedener technischer Brennstoffe. Man erkennt die niedrige Selbstentzündungstemperatur der ungesättigten und sauerstoffhaltigen Körper, sowie die hohe Selbstentzündungstemperatur der Kohlenwasserstoffe, unter denen das Benzol die höchste Stelle einnimmt. Auffällig ist die leichte Entzündlichkeit des Dekalins (280°), die ihre Ursache in der Übersättigung mit Wasserstoff und dem damit verbundenen hohen Wasserstoffdruck hat.

Ein nur scheinbares Maß für die Selbstentzündung ist die Bestimmung des Flamm- und Brennpunktes, die bei Ölen zum Zwecke der Feststellung der Feuergefährlichkeit vorgenommen wird. Der Flamm- und Brennpunkt ist jedoch nur ein Maß für die Temperatur, bei der aus der Flüssigkeit Gase und Dämpfe aufzusteigen beginnen. Die eigentliche Entzündung wird bei dieser Messung durch Fremdzündung ausgelöst.

E. Das brennbare Gemisch.

Mischungen von Gasen und Dämpfen mit Luft oder Sauerstoff sind nur brennbar, wenn sich ihr Brennstoffgehalt in gewissen Grenzen bewegt. Oberhalb und unterhalb des theoretischen Gemisches (Verbrennung allen Kohlenstoffs zu CO₂ und allen Wasserstoffs zu H₂O) dehnt sich der Verbrennungsbereich (Explosionsbereich) aus. Mit

steigendem Brennstoffgehalt kommt man an die obere Verbrennungsgrenze. Die Reaktionskette reißt ab, da die aus der Verbrennung resultierende Wärme nicht ausreicht, um die benachbarten Schichten zu erwärmen. Den gleichen Fall erhält man an der unteren Grenze mit abnehmendem Brennstoffgehalt infolge Luftüberschuß. Ausdehnung und Lage des Verbrennungsbereiches sind in gleicher Weise wie die Selbstentzündung von zahlreichen Versuchsbedingungen abhängig. Die

Tabelle 14. Explosionsgrenzen verschiedener Gas- und Dampf-Luftgemische bei Normaldruck.

Brennstoff	Volumprozent Gas oder Dampf in Luft																	Bemerkungen	Selbstentzündungstemperatur in Luft
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85		
1. Wasserstoff	[Explosion range from 5% to 75%]																	A	1 577° D
2. Kohlenoxyd	[Explosion range from 12% to 75%]																	A	2 610° D
3. Wasser/1% 20 gas 30-50	[Explosion range from 15% to 75%]																	B	3 — —
4. Leuchtgas	[Explosion range from 5% to 15%]																	A	4 600° C
5. Methan	[Explosion range from 5% to 15%]																	A	5 675° D
6. Äthylen	[Explosion range from 3% to 35%]																	B	6 487° D
7. Acetylen	[Explosion range from 2% to 80%]																	B	7 335° D
8. n-Pentan	[Explosion range from 1% to 10%]																	B	8 446° C 320° D
9. n-Hexan	[Explosion range from 1% to 10%]																	A	9 338° C 300° D
10. Benzol	[Explosion range from 1% to 10%]																	A	10 588° C
11. Äthylalkohol	[Explosion range from 3% to 15%]																	A	11 404° C 450° D
12. Aceton	[Explosion range from 3% to 15%]																	A	12 — —
13. Äthyläther	[Explosion range from 3% to 45%]																	A	13 178° D
14. Schwefelkohlenstoff	[Explosion range from 3% to 50%]																	A	14 120° D
15. Ammoniak	[Explosion range from 15% to 25%]																	B	15 780° D

A. * Untersuchungen von Berl und Fischer (Verbrennungsraum: Glaskugel 27 mm) [Ztschr. Elektrochem. **30**, 29—35 (1924)]. B. * Maximalwerte der Verbrennungsgrenzen (Untersuchungen in weiten Röhren) (nach International Critical Tables, Bd. II, dort eingehende Bibliographie). C. * Selbstentzündungstemperaturen nach Berl-Heise (bei fallender Temperatur) [Ztschr. physikal. Chem. **139**, 457 (1928)]. D * Die niedrigst-gefundenen Selbstentzündungstemperaturen in Luft (nach International Critical Tables, Bd. II. 1927).

Ergebnisse der Messungen haben nur relativen Wert und dürfen nur miteinander verglichen werden, wenn sie unter den gleichen Versuchsbedingungen erhalten worden sind. Tabelle 14 zeigt die Zusammenstellung der von Berl und Fischer [Ztschr. Elektrochem. **30**, 29 (1924)] und Berl und Barth [Ztschr. physikal. Chem., Bodenstein-Festband **1931**, 211] gemessenen Verbrennungsgrenzen bei Normaldruck. In der Ausdehnung des Verbrennungsbereiches kommt die verschiedene Reaktionsfähigkeit der brennbaren Gase und Dämpfe zum Ausdruck. Wasserstoff als reaktionsfähigstes Gas hat den größten Verbrennungs-

* Die Werte sind in hohem Maße von Apparatekonstanten beeinflusst.

bereich. Dämpfe mit höherem Molekulargewicht zeigen größere Reaktionsträgheit und deswegen engere Verbrennungsgrenzen. Über den Einfluß von spezifischer Wärme, Wärmeleitfähigkeit und anderer physikalischer Eigenschaften auf den Verlauf der Verbrennung s. S. 313.

Tabelle 15. Verbrennungsgrenzen verschiedener Gase und Dämpfe.

	1 at	50 at	200 at	600 at
Wasserstoff	11,7—62	10—72	9—74	—
Kohlenoxyd, rein.	26,3—48,8	19—48,5	17,5—49	14—57
Kohlenoxyd, technisch 96,2% CO, 2% H ₂ , 1,8% N ₂	20,7—64,0	15—66	15—69	15—72,5
Wassergas, 46% H ₂ , 51% CO	10—62	10—69,5	12—74	12—78,0
Methan	6,8—12,6	6,8—25,8	6—44	400 at 5,6—46
Äthylen	6—16	4—50	3,0—71	—

Es ist bemerkenswert, daß die Verbrennungsgrenzen mit zunehmendem Druck eine wesentliche Erweiterung erfahren. Der Verbrennungsbereich des Wasserstoffs, der sich nach Tabelle 15 unter Normaldruck von 11,7—62% ausdehnt [nach Berl, Werner u. Bausch:

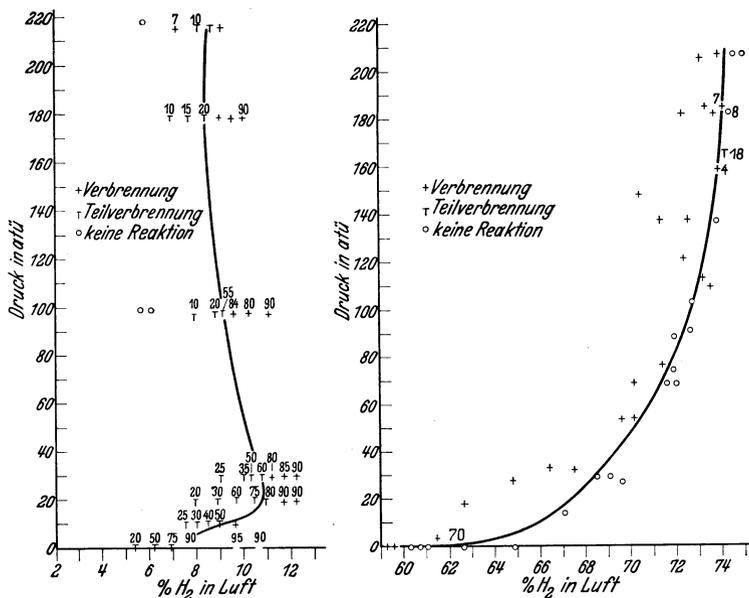


Abb. 22. Explosionsbereich von Wasserstoff-Luftgemischen unter Druck.

Ztschr. angew. Chem. 40, 245 (1927); Ztschr. physikal. Chem. Abt. A 145, 347, 451 (1929)] erweitert sich bei einem Druck von 200 at auf 7—74%. Außerordentlich charakteristisch ist die Erweiterung des brennbaren Bereiches beim Kohlenoxyd. Der enge Bereich des reaktions-trägen trockenen Kohlenoxyds liegt bei Normaldruck zwischen 26 und

48,8% CO in Luft. Bei einem Gehalt von 3% H₂ im technischen Kohlenoxyd erweitert er sich auf 20,7—64% und kommt im technischen Wasser-

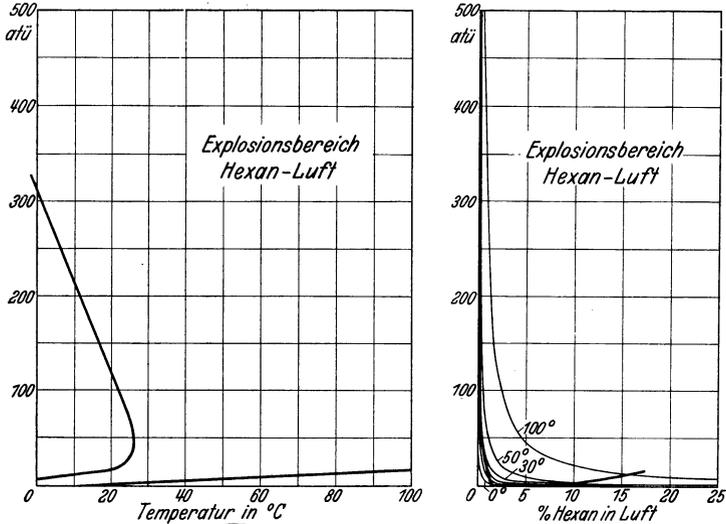


Abb. 23. Explosionsbereich von Hexandampf-Luftgemischen unter Druck.

gas bei Mischung mit 46% H₂ mit einer Ausdehnung von 10—62% dem reinen Wasserstoff sehr nahe. Wie früher erwähnt, nimmt die Verbrennung sehr wasserstoffreicher Gemische (z. B. CH₄- oder C₂H₄-Luft-

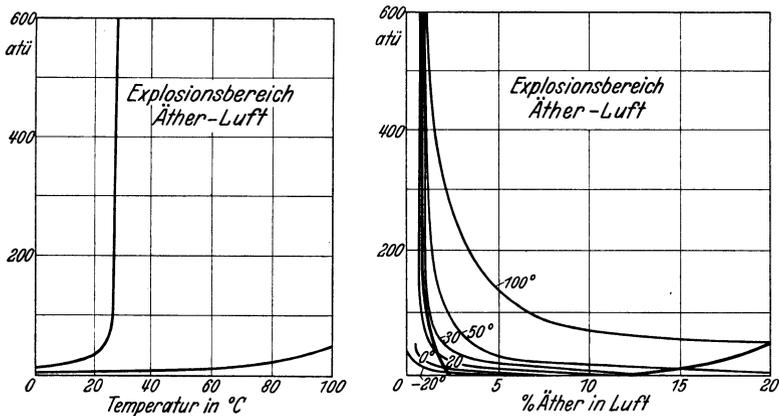


Abb. 24. Explosionsbereich von Ätherdampf-Luftgemischen unter Druck.

gemische nahezu den Charakter der Wasserstoffverbrennung an. Die Erweiterung des Verbrennungsbereiches ist an der oberen Grenze immer stärker als an der unteren. Besonders stark tritt diese Erweiterung an der

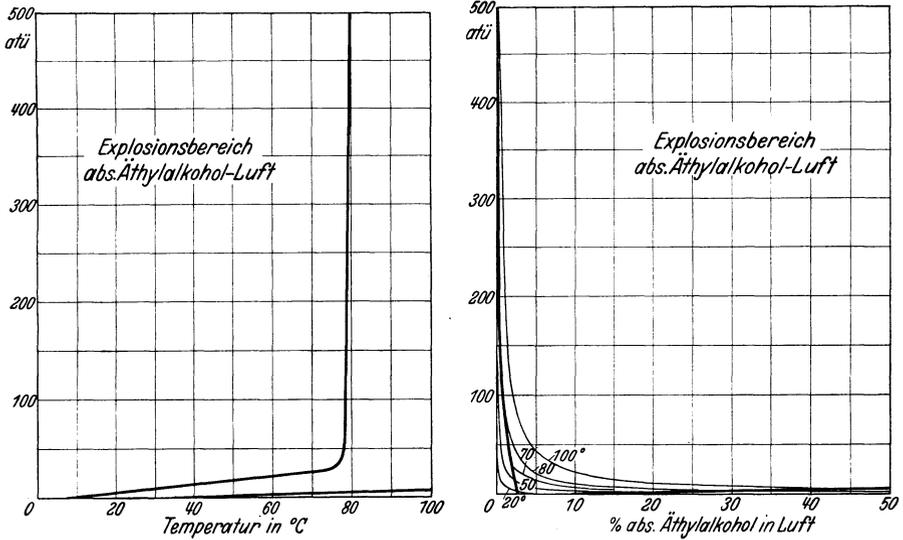


Abb. 25. Explosionsbereich von Äthylalkoholdampf-Luftgemischen unter Druck.

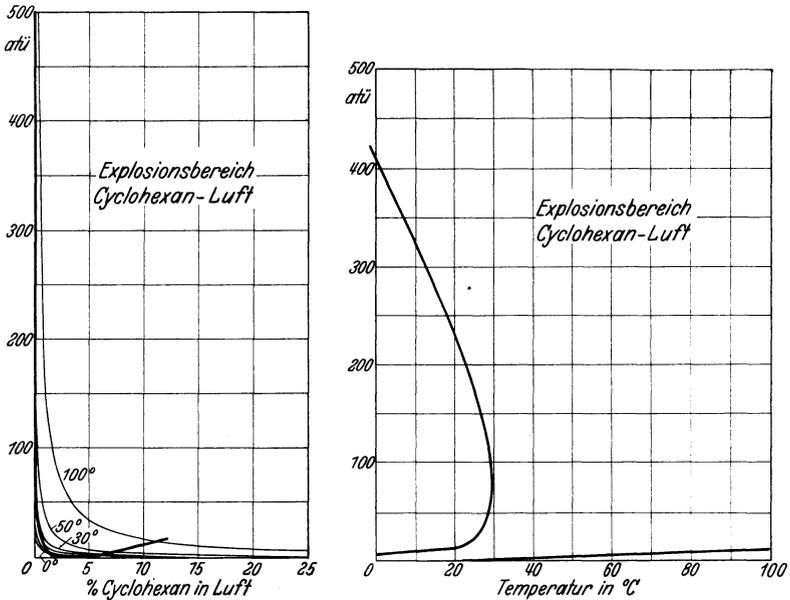


Abb. 26. Explosionsbereich von Cyclohexan-Luftgemischen unter Druck.

oberen Grenze bei den Dämpfen organischer Flüssigkeiten in Erscheinung (Abb. 23—27). Betrachtet man den Verbrennungsbereich für Alkohol (Abb. 25), so ist folgendes zu entnehmen: Bei 70° z. B. befindet man sich wegen des hohen Partialdruckes des Alkohols (542 mm) außerhalb

der oberen Grenze. Bei einem Druck von 3 atü überschreitet man die obere Grenze, das Gemisch wird explosiv. Bei einem Druck von 24 at überschreitet man die untere Grenze; das Gemisch ist nicht mehr explosiv. Bei 80° ist das Alkoholdampf-Luftgemisch von 4 at ab unter jedem Druck explosiv. In Abb. 25 rechts ist mit Hilfe der Temperaturdruckkurve des Alkohols der Verbrennungsbereich in % C₂H₅OH dargestellt. Man erkennt auch hier die außerordentlich starke Ausweitung mit steigendem Druck.

Einen eigenartigen Verlauf nimmt die untere Verbrennungsgrenze bei Hexandampf. Unter einem Druck von 100 at beobachtet man eine plötzliche Erweiterung. Die Zündungen an dieser Grenze sind besonders heftig, setzen aber mit einem merklichen Zündverzug ein. Man beobachtet die typische Erscheinung des Zündverzuges. Während einer Induktionsperiode bilden sich sauerstoff- und peroxydhaltige Körper, die schließlich mit gesteigerter Brisanz verbrennen. Durch Mischung mit Benzol wird die untere Grenze wieder verengt. Gleichzeitig nimmt die Heftigkeit der Reaktionen ab.

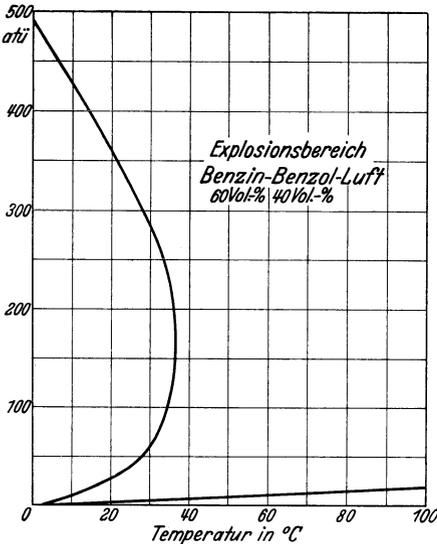


Abb. 27. Explosionsbereich von Benzin- und Benzoldampf-Luftgemischen unter Druck.

Die Beachtung der Verbrennungs- oder Explosionsgrenzen ist nicht nur für die Auslösung und den Verlauf eines Verbrennungsvorganges, sondern auch im Interesse der Vermeidung von Unglücksfällen durch unbeabsichtigte Entzündung von größter Wichtigkeit. Leere Brennstoffbehälter

sind gefährlicher als gefüllte, in denen sich das Gemisch meistens außerhalb der oberen Grenze befindet. Vor dem Betreten von Tanks überzeuge man sich durch Analysen, am einfachsten auf optischem Wege mit dem Gasinterferometer nach Haber-Löwe [s. Berl-Lunge: Chemisch-technische Untersuchungsmethoden, 8. Aufl., Bd. 1, S. 829. 1931], in welchen Konzentrationsbereichen man sich befindet. Die Bildung von explosiven Methan-Luftgemischen in schlecht gelüfteten Stollen führt im Bergwerksbetrieb zu Schlagwetterexplosionen. Viele Brennstoffe haben neben ihrer Neigung zur Explosion gefährliche physiologische Wirkungen. Leere Fässer lassen sich durch Füllen mit Wasser nicht vom brennbaren Dampf befreien. Im Gegenteil wird hierdurch zuweilen die Konzentration des brennbaren Dampfes im Gemisch mit Luft so herabgesetzt, daß man in den Verbrennungsbereich kommt. Nicht explosive Gemische können durch Erhöhung von Druck oder Temperatur explosiv werden. Die Gefahr ist besonders groß bei sauerstoff-

haltigen Flüssigkeiten, sowie bei CS₂, die zugleich eine außerordentlich niedrige Selbstentzündungstemperatur haben.

Bei Druckerniedrigung unter eine Atmosphäre tritt eine Verengung des Verbrennungsbereiches ein, da mit abnehmendem Druck die Zahl der Moleküle in der Volumeneinheit und damit sowohl die Zahl der Zusammenstöße, wie die Wärmeleitfähigkeit des Systems abnimmt. Unterhalb eines bestimmten Druckes, den Stavenhagen [Ztschr. angew. Chem. 34, 114 (1921)] als kritischen Zündungsdruck bezeichnet hat, findet auch bei noch so starker Zündung keine Explosion mehr statt. In Abb. 28 ist die Verengung des Verbrennungsbereiches für Hexan bei abnehmendem Drucke dargestellt [nach Berl u. Hartmann: Ztschr. physikal. Chem. Abt. A 146, 281 (1930); s. auch Berl u. Barth: Ztschr. physikal. Chem. Boden-

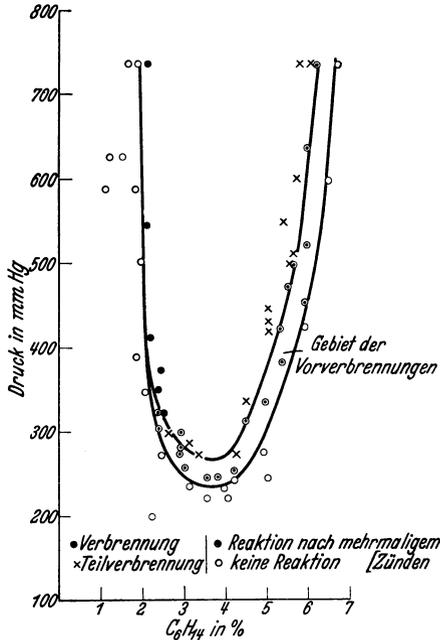


Abb. 28. Explosionsbereich von Hexandampf-Luftgemischen bei Unterdruck.

stein-Festband 1931, 211]. Unterhalb eines Druckes von 240 mm, dem kritischen Zündungsdruck, kann eine Verbrennung nicht mehr stattfinden. Dieser Druck liegt um so tiefer, d. h. das System ist um so reaktionsfähiger, je höher die Temperatur ist, bei der die Zündung erfolgt. In der verschiedenen Lage des kritischen Zündungsdruckes kommt wiederum die unterschiedliche Reaktionsfähigkeit der Brennstoffe zum Ausdruck. Es besteht eine gewisse Proportionalität zwischen kritischem Zündungsdruck und

Tabelle 16. Kritische Zündungsdrucke und Selbstentzündungstemperaturen.

	Kritischer Zündungsdruck mm Hg	Selbstentzündungstemperatur	Theoretische Mischung % Brennstoffdampf in Luft	Entzündlichste Mischung % Brennstoffdampf in Luft
Schwefelkohlenstoff	48	134	6,25	11,0
Acetylen . .	60	335	7,4	11,0
Äther . . .	155	190	2,8	5,9
Hexan . . .	240	338	2,2	3,7
Alkohol . .	330	404	6,25	7,0
Aceton . . .	350	500	5,3	8,0
n-Pentan . .	390	446	2,6	4,1
Cyclohexan .	405	400	2,3	3,1
Cyan . . .	530	810	16,7	16,0

der Selbstentzündungstemperatur. Tabelle 16 enthält einige von Berl und seinen Mitarbeitern gemessene Werte. Der kritische Zündungsdruck sinkt

im allgemeinen mit fallender Selbstentzündungstemperatur. Auffällig niedrig liegt der kritische Zündungsdruck des Acetylen, das als endotherme Verbindung explosionsartig zerfällt. In Tabelle 16 ist neben dem kritischen Druck das Gemisch angegeben, bei dem diese letzte Zündung stattfindet; sie wird als die entzündlichste Mischung bezeichnet. Im Verhältnis zu derjenigen Mischung, die dem theoretischen Luftbedarf entspricht, liegt die entzündlichste immer bei höherem Brennstoffgehalt. Ähnliche Erscheinungen beobachtet man bei der Messung der Selbstentzündungstemperatur und der Entzündungsgeschwindigkeit verschiedenprozentiger Brennstoff-Luftmischungen. Immer erhält man das Maximum der Reaktionsgeschwindigkeit im Bereich des Brennstoffüberschusses. Werden an einem Verbrennungsvorgang besondere Anforderungen bezüglich der Verbrennungstemperatur sowie der Brennerleistung gestellt, so muß unter Außerachtlassen des thermischen Nutzeffektes mit Brennstoffüberschuß verbrannt werden.

III. Verbrennungsformen.

Die Bedürfnisse der Feuerungstechnik sind hinsichtlich der Art des Verbrennungsverlaufes außerordentlich verschieden. Je nach dem

Tabelle 17. Zündung und Brennzeit verschiedener Brennstoffe.
[Nach Allner: VDI 71, 417 (1927).]

Brennstoff	Verbrennung mit	Art des Brennraumes	Zündverzugs	Hauptbrennzeit	Gesamt-brennzeit	Temperatur der Flamme
			s	s	s	° C
Kohlenstaub . .	Luft	Brennstaubfeuerung	—	—	1,125—2,0	≧ 2034
Steinkohle . .	„	Wanderrost	—	—	0,58	—
Teeröl	„	Dampfkessel	—	—	0,2—0,6	≧ 2500
Gasöl	„	Versuchsbombe	0,115	0,020	0,125	—
„	„	Dieselmachine Deutz	0,018	0,0085	0,0265	—
„	„	„ Körting	0,00935	—	—	—
„	„	„ Junkers	0,00486	—	—	—
Gichtgas . . .	„	Dampfkessel	—	—	0,0135	—
Wasserstoff-Kohlenoxyd-Mischung . .	„	Innenkegel der Bunsenflamme	—	—	0,0012	1000
Wasserstoff-Kohlenoxyd-Mischung . .	Sauerstoff	Innenkegel der Bunsenflamme	—	—	0,00066	1660
Kohlenoxyd . .	Luft	—	—	—	0,00006	~ 1700
Leuchtgas . .	„	—	—	—	0,00011	1390
Leuchtgas + CO ₂	„	—	—	—	0,0052	1205
Methan + Wasserstoff	„	—	—	—	0,001	1400
Benzol	„	—	—	—	0,008	~ 2000
Wasserstoff . .	Sauerstoff	Explosion im Rohr	—	—	0,00001	—
Kohlenoxyd . .	„	Selbstentzündung durch Verdichtung	—	—	0,0003 bis 3 · 10 ⁻⁷	—

Verwendungszweck werden oxydierende und reduzierende, leuchtende und nichtleuchtende Flammen unterschieden. Im Interesse eines möglichst guten thermischen Wirkungsgrades verlangt die Kesselfeuerung zum Zwecke der Dampferzeugung höchste Verbrennungstemperatur, deren Erreichung im allgemeinen durch die Feuerbeständigkeit des Rostmaterials und der Auskleidung des Feuerraumes begrenzt wird.

Chemische Prozesse, Schwel- und Trocknungsverfahren erfordern zuweilen Feuer-gase, deren Temperatur mit Rücksicht auf die Beständigkeit des behandelten Materials ein bestimmtes Höchstmaß nicht überschreiten darf. Reduzierende oder oxydierende Ofenatmosphären spielen bei den metallurgischen Prozessen eine wichtige Rolle.

Tabelle 18. Heizwert und Verbrennungstemperatur einiger technischer Brennstoffe.

Material	Unterer Heizwert kcal	Verbrennungstemperatur °C
Gichtgas je m ³	1014	1700
Generatorgas je m ³	1148	1650—1800
Wassergas je m ³	2500	2300
Koksofengas je m ³	4000—5000	2100
Leuchtgas je m ³	5000	2150
Torf mit 33% H ₂ O je kg	3800	1800
Braunkohle (böhmisch) je kg	3800—6000	1980
Steinkohle (Fettkohle) je kg	7500—7900	2100
Steinkohlenkoks je kg	7290	2250

Als technische Brennstoffe stehen gasförmige, flüssige und feste Materialien zur Verfügung, über deren Auswahl nicht nur der Preis, sondern auch die Zweckmäßigkeit im Sinne der an die Feuerung gestellten Anforderungen entscheiden muß. Tabelle 17 [nach Allner: VDI 71, 417 (1927)] gibt eine Zusammenstellung verschiedener Brennstoffe und Verbrennungsformen mit den erforderlichen Brennzeiten und den erreichbaren Verbrennungstemperaturen. Durch die Größe der Brennzeit, d. h. des bis zur vollkommenen Verbrennung erforderlichen Zeitraumes, ist die Belastungsfähigkeit, die Feuerleistung, des Brennraumes in kcal je m³ und h begrenzt (s. S. 319). Tabelle 18 gibt für verschiedene technische Brennstoffe Verbrennungstemperaturen und Heizwerte an.

A. Die Verbrennung der Gase bei konstantem Druck.

Die Verwendung der Gase im Feuerungsbetrieb hat vor allen anderen Heizmitteln den Vorzug der einfachsten Regulierbarkeit. Die Verbrennung der Gase zeichnet sich als homogene Gasreaktion durch größte Entzündungs- und Brenngeschwindigkeit aus. Mit einfachen Mitteln wird eine innige Durchmischung des Brenngases mit der Verbrennungsluft bewirkt, so daß höchste Verbrennungstemperaturen bei geringstem Luftüberschuß erreicht werden. Durch Zumischung von Rauchgasen und Wahl des Luftüberschusses ist es möglich, eine gewünschte Verbrennungstemperatur genau einzuhalten. Gase bieten die geringsten Transportschwierigkeiten im Kesselhaus und verbrennen ohne Hinterlassung von Ascherückständen; sie sind aus diesen Gründen für Feuerungen, an die besondere Anforderungen gestellt werden, die zweckmäßigste

Wärmequelle. Wohl ist es möglich durch die Fortschritte im Bau von Hochdruckfernleitungen Gase auf weite Strecken zu transportieren. In der Regel jedoch sollte die Verwendung mit Rücksicht auf die geringe Energiedichte — d. h. Heizwert der Volumeneinheit — in möglichster Nähe des Erzeugungsortes erfolgen.

1. Die leuchtende Bunsenflamme.

Die einfachste Form der Gasverbrennung, die heute nur noch bei einigen Bade- und Heizöfen praktische Anwendung findet, ist die leuchtende Bunsenflamme. Das Gas, das der Düse des Brennerrohres entströmt, saugt die zur Verbrennung erforderliche Luft aus der umgebenden Atmosphäre an. Nach der Entzündung spielen sich in der Flamme die Vorgänge der Spaltung, Vorverbrennung zu Wassergas und Verbrennung der Wassergasbestandteile ab. Da diese Vorgänge wegen der geringen Durchmischung mit Luft nur langsam verlaufen, hat die leuchtende Flamme eine große Ausdehnung und niedrige Temperatur. Während der Spaltung scheidet sich in der Flamme Kohlenstoff ab, der infolge der geringen Temperatur und des Luftmangels nur langsam verbrennt und in glühendem Zustand das Leuchten der Flamme verursacht. Enthält das Gas schwer verbrennbare Bestandteile mit geringem Wasserstoffgehalt, wie Benzol und Naphthalin, die, von der krackenden Zersetzung aliphatischer Kohlenwasserstoffe herrührend, oft im Leuchtgas enthalten sind, so tritt der große Geschwindigkeitsunterschied zwischen Kohlenstoff- und Wasserstoffverbrennung in Erscheinung. Der Kohlenstoff scheidet sich als Ruß ab. Die Höhe der leuchtenden Flamme ist abhängig von der Austrittsgeschwindigkeit des Gases aus dem Brennerrohr in cm/s und damit umgekehrt proportional dem Querschnitt der Düse. Je größer die Entzündungsgeschwindigkeit des Gases ist, desto geringer ist die Flammenhöhe.

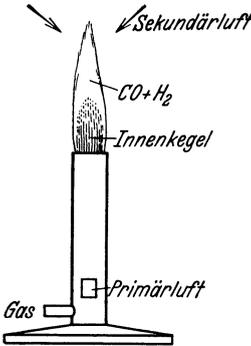


Abb. 29. Die entleuchtete Bunsenflamme.

2. Die entleuchtete Bunsenflamme.

Zur Erzeugung hoher Temperaturen und zur Lieferung großer Wärmemengen in der Zeiteinheit verwendet man das Prinzip der entleuchteten Bunsenflamme. In der entleuchteten Bunsenflamme wird ein Teil der Verbrennungsluft dem Gas als Primärluft zugesetzt (30—50%). Je größer die Menge der Primärluft innerhalb der gesamten Luftmenge ist, desto schneller verläuft die Verbrennung. Das Schema der entleuchteten Bunsenflamme zeigt Abb. 29. In der ersten Zone des Brenners bildet sich, als Folge der hyperbolischen Geschwindigkeitsverteilung im Brennerrohr, ein hell leuchtender Kegel aus. Innerhalb dieses Kegels vollzieht sich die Spaltung und Vorverbrennung. Der Innenkegel leuchtet hell durch den vergasenden Kohlenstoff, sowie durch lichtemittierende Gasionen. Da die Temperatur im Innenkegel schon verhältnismäßig hoch ist, ist die

Umwandlung des Gases in die Wassergasbestandteile beim Austritt aus der Kegelgrenzfläche beendet.

Das Verhältnis von Kohlenoxyd und Wasserstoff zu Kohlendioxyd und Wasserdampf ist nach Haber [Thermodynamik technischer Gasreaktionen. München 1905] durch das Wassergasgleichgewicht gegeben. An der Berührungsfläche zwischen Außenluft und nichtleuchtendem Außenkegel, der keine scharfe Begrenzung hat, vollzieht sich die Verbrennung der Wassergasbestandteile. Die Entzündungsgeschwindigkeit des zuströmenden Gases in der Flamme ist definiert durch die Geschwindigkeit des Gas-Luftgemisches in der Grenzfläche des Innenkegels. An dieser Stelle ist die Geschwindigkeit, mit der die Zündung in das brennbare Gemisch hinein sich auszudehnen trachtet, gleich der Ausströmungsgeschwindigkeit. Wird die Geschwindigkeit des ausströmenden Gas-Luftgemisches größer als die der Entzündung, so verliert der Innenkegel seine scharfen Umrisse, die Flamme löst sich vom Brennerrohr ab und flackert. Wird die Entzündungsgeschwindigkeit größer als die Geschwindigkeit des ausströmenden Gases, so eilt die Zündung dem Gas entgegen. Der Brenner schlägt zurück. Für die Leistung eines Brenners ist deshalb die Entzündungsgeschwindigkeit des Gases von Bedeutung.

3. Die Entzündungsgeschwindigkeit.

Die Entzündungsgeschwindigkeit der meisten Gasbestandteile sind von Wheeler [Trans. Faraday Soc. 22, 301 (1926)], Bone [unter anderem Philos. Trans. Roy. Soc. London A 230, 363 (1931)] und Bunte [s. unter anderem G. W. F. 75, 213 (1932)] und anderen am Modell der entleuchteten Bunsenflamme gemessen worden. Bunte und Litterscheid erhielten für die wichtigsten Gasbestandteile H_2 , CO und CH_4 nebenstehende Werte.

Diese Messungen in der Bunsenflamme sind, da sich die Reaktionen in der homogenen Gasphase abspielen, weitgehend von apparativen Einflüssen unabhängig, sofern dafür gesorgt ist, daß das Brennstoffluftgemisch im Brennerrohr laminar, d. h. ohne Wirbelung strömt. Die Messungen können deshalb auf Feuerungen übertragen werden,

Tabelle 19. Maximale Entzündungsgeschwindigkeiten.

	Maximale Entzündungs- geschwindig- keiten cm/s	Entzündlichste Mischung in % Brennstoff in Luft	Theoretische Mischung in % Brennstoff in Luft
Wasserstoff	267	42,5	29,5
Kohlenoxyd	44	53,0	29,5
Methan . .	37	10,5	9,5

in denen das Prinzip des Bunsenbrenners zur Anwendung kommt (s. S. 312). Von K. Bunte und seinen Mitarbeitern sind in letzter Zeit die Entzündungsgeschwindigkeiten zahlreicher Gase und Dämpfe gemessen worden (s. Abb. 30 und 31). Die Gase und Dämpfe entzünden sich um so schneller, je geringer die Zahl der Reaktionen ist, die bis zur Umwandlung in die Wassergasbestandteile durchlaufen werden müssen. In dieser Geschwindigkeit kommt wiederum die große Verschiedenheit der Brennstoffmoleküle hinsichtlich ihrer Reaktionsfähigkeit zum Ausdruck. Die Entzündungsgeschwindigkeit ist weitgehend abhängig von dem Verhältnis

Gas/Luft im brennbaren Gemisch. Für jedes System existiert ein Mischungsverhältnis höchster Entzündungsgeschwindigkeit. Diese entzündlichste Mischung liegt wiederum bei höherem Brennstoffgehalt, als es der theoretischen Mischung entspricht (s. S. 309). Von allen brennbaren Gasen und Dämpfen haben Wasserstoff und Kohlenoxyd die höchste Entzündungsgeschwindigkeit.

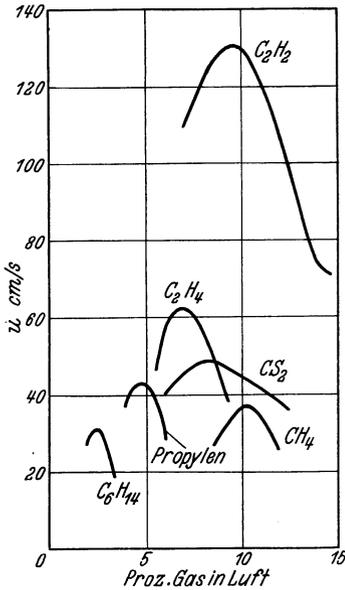


Abb. 30.

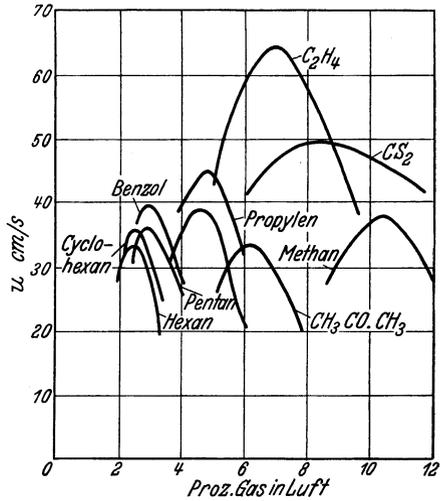


Abb. 31.

Abb. 30 und 31. Entzündungsgeschwindigkeiten von Gas- und Dampf-Luftgemischen.

a) Entzündungsgeschwindigkeiten von Gasmischungen.

Die meisten technischen Brenngase sind Mischungen der oben aufgeführten. Da diese Einzelbestandteile sich bei der Verbrennung durch Zwischenreaktionen gegenseitig beeinflussen, ist das Verhalten der Mischung nicht durch Addition der Eigenschaften der Gemischbestandteile gegeben. Wäre diese Beeinflussung nur physikalischer Natur, so müßten die maximalen Entzündungsgeschwindigkeiten der Mischungen auf Geraden liegen, welche die maximalen Entzündungsgeschwindigkeiten der reinen Gase miteinander verbinden. Tatsächlich ist dies nur selten der Fall.

Die Anwesenheit von Wasserstoff z. B. beeinflußt die Kohlenoxydverbrennung im Sinne der Wassergasgleichung (S. 276). Schon bei der Besprechung der Explosionsgrenzen wurde darauf hingewiesen, daß geringe Mengen Wasserstoff im Kohlenoxyd diesem den Charakter der Wasserstoffverbrennung verleihen. Ein geringer Zusatz von Wasserstoff zum Kohlenoxyd bewirkt eine Erhöhung der Entzündungsgeschwindigkeit, die zu dem Prozentgehalt des zugemischten Wasserstoffs in keinem Verhältnis steht. Abb. 32 zeigt die maximalen Entzündungsgeschwindigkeiten für Mischungen von Wasserstoff und Methan mit

Kohlenoxyd in Abhängigkeit von der jeweiligen Zusammensetzung. Man erkennt den hemmenden Einfluß, den die Beimengung von CO zum Wasserstoff zur Folge hat. Ebenso wird die Entzündungsgeschwindigkeit des Wasserstoffs durch Zusatz von Methan herabgesetzt.

Wegen ihrer großen Entzündungsgeschwindigkeit, die eine hohe Verbrennungstemperatur zur Folge hat, sind Wasserstoff und Acetylen vorzugsweise zum Schweißen verwendbar. Die Verwendung von Methan, das bei der Zerlegung der Koksfoengase mittels Tiefkühlung nach Bronn [Chem. Fabrik 1928, 569] in großen Mengen verfügbar wird, stößt auf Schwierigkeiten, da seine Entzündungsgeschwindigkeit zu gering ist. Beimischung von Wasserstoff oder Acetylen wirken dieser Schwierigkeit entgegen.

Enthält Kohlenoxyd geringe Mengen Methan oder Homologe (s. Abb. 33 und 34), so beeinflussen sich die Gemischbestandteile dahingehend, daß die Verbrennung des Kohlenoxyds eine Beschleunigung erfährt, obwohl die zugemischten Stoffe geringere Reaktionsfähigkeit haben. Der bei der Verbrennung von Methan und seinen Homologen primär abgespaltene Wasserstoff greift als freies Atom, oder nach Vereinigung mit Sauerstoff, als Hydroxyl beschleunigend in die Kohlenoxydverbrennung ein (s. S. 296). Andererseits bewirken Beimengungen von Kohlenoxyd zu einem brennbaren Kohlenwasserstoff - Luftgemisch eine Hemmung der Reaktion, da sie diese reaktionsbeschleunigenden Radikale, welche die Kohlenwasserstoffverbrennung katalysieren, an sich ziehen. Je größer das Molekül des Kohlenwasserstoffs, und je labiler infolgedessen der in ihm enthaltene Wasserstoff ist, desto stärker ist die Reaktionsbeschleunigung, die es auf das Kohlenoxyd ausübt, desto größer ist andererseits die Reaktionshemmung, die es selbst erfährt. Auch ungesättigte Kohlenwasserstoffe

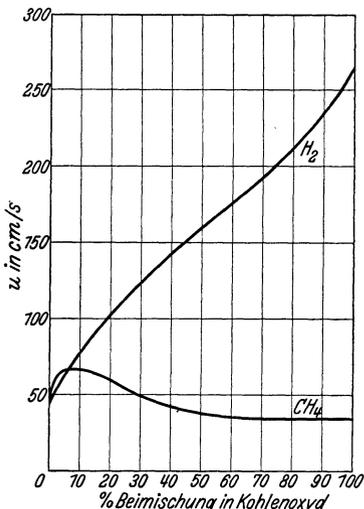


Abb. 32. Entzündungsgeschwindigkeit der Mischungen von H₂, CH₄ und CO mit Luft.

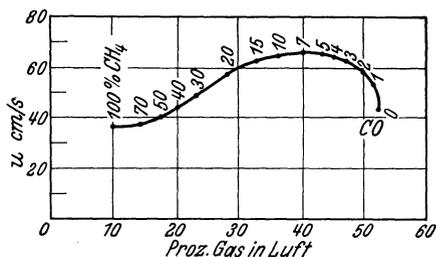


Abb. 33. Entzündungsgeschwindigkeiten der Mischungen von CO und CH₄ mit Luft.

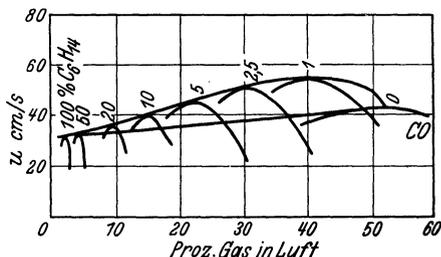


Abb. 34. Entzündungsgeschwindigkeiten der Mischungen von CO und C₄H₁₀ mit Luft.

und Wasserdampf erhöhen die Entzündungsgeschwindigkeit des Kohlenoxyds, jedoch sind dazu größere prozentuale Anteile erforderlich.

Aus diesen Beobachtungen an Brennstoffgemischen erkennt man, daß das Carburieren von Brenngasen, das eine Steigerung des Heizwertes zur Folge hat, für den Verbrennungsvorgang unter Umständen von ungünstigem Einfluß sein kann. Stark carburierte Flammen neigen zu Nachbrennen, sie bilden Aureolen außerhalb des Verbrennungskegels.

b) Die Berechnung von Entzündungsgeschwindigkeiten.

Neben diesen chemischen Einflüssen sind die physikalischen Eigenschaften des Gemisches von Bedeutung für den Verbrennungsvorgang.

Tabelle 20. Wärmeleitfähigkeit von Gasen bei 0° C.

	λ in cal/cm/s
Wasserstoff	0,000410
Helium	0,000336
Luft	0,000057
Sauerstoff	0,000057
Stickstoff	0,000057
Argon	0,000040
Kohlenoxyd	0,000053
Kohlendioxyd	0,000034
Methan	0,000071
Äthylen	0,000044

Die Erwärmung der der Flammenfront benachbarten Schichten ist abhängig von der spezifischen Wärme der Gemischbestandteile. Heizschwache Gase wie Hochofengichtgas, die starke Beimengungen an Kohlendioxyd und Stickstoff enthalten, verbrennen deswegen außerordentlich träge und mit niedriger Temperatur. Der Wärmetransport in der Flammengrenze erfolgt durch Konvektion, Leitung oder Strahlung (s. Bd. II, S. 97f.). Gute Durchwirbelung des Gas-Luftgemisches wirkt deswegen günstig auf die Entzündungsgeschwindigkeit. Die Wärmeleitfähigkeit der Gase ist sehr unterschiedlich (s. Tabelle 20). Der schnell verbrennende Wasserstoff zeigt auch die größte Wärmeleitfähigkeit. Der Stickstoff, der als Bestandteil der Verbrennungsluft in jedem Gemisch einen erheblichen Anteil ausmacht, hat ein sehr geringes Wärmeleitvermögen. Den Einfluß der Wärmeleitfähigkeit der Gase auf die Geschwindigkeit der Methanverbrennung zeigt Abb. 35. Coward und Hess [Journ. chem. Soc. London 1926, 1522] ersetzen den Stickstoff der Verbrennungsluft durch Helium und Argon. Die Entzündungsgeschwindigkeit stieg von 72 cm/s auf 204 cm/s, wenn unter

sonst gleichbleibenden Reaktionsbedingungen Stickstoff durch Helium ersetzt wurde.

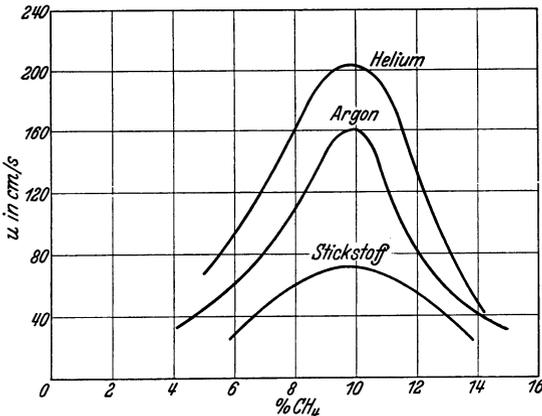


Abb. 35. Entzündungsgeschwindigkeiten von Gasgemischen mit verschiedener Wärmeleitfähigkeit.

sonst gleichbleibenden Reaktionsbedingungen Stickstoff durch Helium ersetzt wurde.

Nußelt [VDI 1925, 872] hat zur Berechnung der Entzündungsgeschwindigkeit eines Gases folgende Formel angegeben:

$$u = \sqrt{\frac{c \cdot \lambda \cdot p \cdot t_0^2 \cdot (t_v - t_c) \cdot B\% \cdot L\%}{103,7 \cdot R^2 \cdot c_p \cdot (t_c - t_0)}} \quad (58)$$

Darin ist: u = Entzündungsgeschwindigkeit in cm/s; c = Konstante, in der die chemische Eigenart des Gemisches zum Ausdruck kommt; λ = Wärmeleitfähigkeit in kcal/s t°; p = Druck; t_0 Anfangstemperatur; t_c = Entzündungstemperatur; t_v = Verbrennungstemperatur; $B\%$ = % Brennbare in Luft; $L\%$ = % O₂ im Gemisch; c_p = Mittlere spezifische Wärme des Gasgemisches bei konstantem Druck zwischen t_0 und t_v ; k = Gaskonstante.

Die Konstante c muß für jedes Gas experimentell bestimmt werden. Die Geschwindigkeit ist um so größer, je höher die Verbrennungstemperatur und je niedriger die Entzündungstemperatur liegen.

Durch Vorwärmung werden die Entzündungsgeschwindigkeit, sowie die Verbrennungstemperatur (s. S. 269) erheblich gesteigert. Passauer [G. W. F. 73, 392 (1930)] hat den Einfluß der Vorwärmung für eine große Zahl Gasgemische bestimmt. Die von ihm erhaltenen Werte für Entzündungsgeschwindigkeit und Brennerleistung (S. 318) in Abhängigkeit von der Vorwärmtemperatur sind in Tabelle 21 zusammengestellt. Z. B. wird die Entzündungsgeschwindigkeit von Luftgas von 19 cm/s auf 111 cm/s gesteigert, wenn das Gemisch auf 560° vorgewärmt ist.

Tabelle 21. Entzündungsgeschwindigkeiten unter dem Einfluß von Vorwärmung.

	Vorwärmung °C	Brenngeschwindigkeit cm/s	Reduzierte Brenngeschwindigkeit cm/s	Unterer Heizwert des Brennstoffs kcal/m ³	Theoretisches Gemisch bei Totalverbrennung zu CO ₂ und H ₂ O	Unterer Heizwert der Brennstoffluft- mischung je m ³	Flammenleistung in kcal/cm ³
Theoretisches Luftgas	20	—	19	1060	55,0	583	11,4
„ „	190	31	19,6	1060	55,0	636	12,4
„ „	280	58	29,0	1060	55,0	665	19,3
„ „	480	87	33,9	1060	55,0	726	24,6
„ „	560	111	38,0	1060	55,0	756	28,7
Theoretisches Halbwassergas	20	—	42	1770	40,7	717	30,2
„ „	120	74	55,0	1770	40,7	748	41,2
„ „	305	183	93,0	1770	40,7	807	75,0
„ „	525	474	175,0	1770	40,7	887	155,0
Theoretisches Wassergas . . .	20	—	85	2805	29,5	830	70,7
„ „	205	200	121,1	2805	29,5	888	107,0
„ „	430	390	162,5	2805	29,5	961	156,0
„ „	600	840	283,0	2805	29,5	1017	288,0
Wiener Stadtgas	20	—	65	3800	21,5	816	53,2
„ „	120	95	71,2	3800	21,5	848	60,3
„ „	280	190	100,0	3800	21,5	898	89,8
„ „	510	378	142,4	3800	21,5	975	138
„ „	645	544	174,3	3800	21,5	1019	177

Zur Vermeidung von Explosionen im Vorwärmer sollte die Erwärmung von Luft und Brenngas getrennt erfolgen. Brenngase dürfen, zumal wenn sie höhere Kohlenwasserstoffe enthalten, niemals auf mehr als 300° vorgewärmt werden, da bei und oberhalb dieser Temperatur Zersetzungsreaktionen einsetzen. Diese bedingen Rußabscheidung und Verminderung des Calorieninhaltes, da an Stelle des Kohlenwasserstoffs der heizarme Wasserstoff tritt. Die Vorwärmung der Luft ist stets erfolgreicher als die des Gases, da die Luft den größten Anteil des brennbaren Gemisches ausmacht. Auf Vorwärmung des Gases kann in vielen Fällen aus Sicherheitsgründen verzichtet werden. Erfolgt die Gaserzeugung in unmittelbarer Nähe der Stelle des Verbrauchs, so ist es zweckmäßig, die fühlbare Wärme der Gase beim Verlassen des Generators durch gute Isolierung der Leitung in der Feuerung nutzbar zu machen. Z. B. beträgt der Wärmeinhalt eines theoretischen Luftgases, das den Generator mit 500° verläßt, 161 kcal/m³, entsprechend 15% des Heizwertes unter Normalbedingungen. Hierdurch wird die Entzündungsgeschwindigkeit von 19 m/s bei Zimmertemperatur auf 90 m/s im Feuerraum steigern.

4. Die Leistung des Gasbrenners.

Bei der Einstellung des brennbaren Gemisches und bei der Auswahl der Brennerkonstruktion für eine bestimmte Gasfeuerung müssen folgende grundsätzliche Forderungen Berücksichtigung finden:

1. Die Temperatur soll mit Rücksicht auf den thermischen Wirkungsgrad so hoch gehalten werden, als es das Material der Ofenausmauerung zuläßt.

2. Die Verbrennungsdichte, d. h. die Zahl der geleisteten Calorien in der Einheit des Raumes soll möglichst groß sein. Die Verbrennung muß auf einen möglichst kleinen Raum konzentriert werden. Nachbrennen außerhalb des Flammenkegels ist zu vermeiden.

Steigerung der Verbrennungstemperatur und der Energiedichte erzielt man durch Vergrößerung der Primärluftmenge. Die Menge der Primärluft hat ihre Grenzen, da mit der gleichzeitig wachsenden Entzündungsgeschwindigkeit die Gefahr des Zurückschlagens größer wird. Mit zunehmender Entzündungsgeschwindigkeit wächst das Bestreben, den Verbrennungsort, dem strömenden Gas entgegen, in das Innere des Brennerrohres zu verlegen. Der Entzündungsgeschwindigkeit wirkt die Strömungsgeschwindigkeit entgegen. In der Grenzfläche des Innenkegels gilt:

Strömungsgeschwindigkeit (v) = Entzündungsgeschwindigkeit (u).

Bei bekanntem u ist es möglich, v des zuströmenden Gases zu berechnen, wenn eine bestimmte Flammenhöhe verlangt wird:

$$u = \frac{\text{Strömendes Gasvolumen in cm}^3/\text{s}}{\text{Kegelfläche}} = \frac{v_1}{\pi \cdot (r^2 + h^2)} \quad (59)$$

$$v = \frac{\text{Strömendes Gasvolumen cm}^3/\text{s}}{\text{Brennerquerschnitt}} = \frac{V_1}{\pi \cdot r^2} \quad (60)$$

Man erhält für:

$$\frac{u}{v} = K = \frac{\text{Strömendes Gasvolumen } V_1}{\text{Brennerradius}^2 + \text{Kegelhöhe}^2} \quad (61)$$

Für $K = 0,5$, das einem gleichmäßig brennenden Brenner am nächsten kommt, haben Brückner und Jahn [G. W. F. 74, 1012 (1931)] die Flammenhöchstleistung (J_s) eines Bunsenbrenners berechnet:

$$J_s = \frac{\text{Heizwert des strömenden Gasvolumens in kcal/cm}^3 \cdot \text{Entzündungsgeschwindigkeit in cm/s}}{K} \quad (62)$$

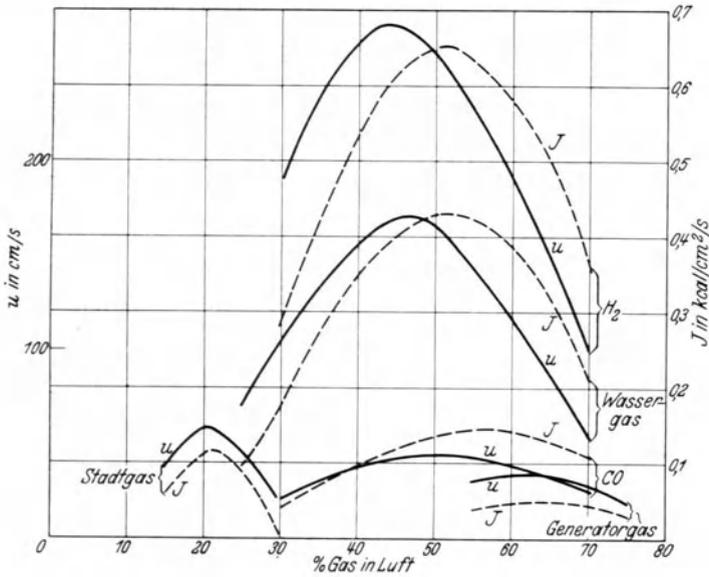


Abb. 36. Brennerleistung und Flammengeschwindigkeit einiger Gas-Luftgemische.

In Abb. 36 sind J und u für einige brennbare Gase nach den Berechnungen von Brückner und Jahn aufgezeichnet. Die ausgezogenen Kurven für u , die Entzündungsgeschwindigkeit beziehen sich auf die linke Ordinate. Die gestrichelten Kurven zeigen J_s in kcal je cm^2 Brennerquerschnitt und s , die Werte bezogen auf die rechte Ordinate.

Im einfachen Bunsenbrenner werden 30—50% der Verbrennungsluft als Primärluft zugesetzt. Die technischen Gasbrenner, wie sie bei der Beheizung industrieller Öfen (s. Bd. II, S. 718) und in Kesselfeuerungen

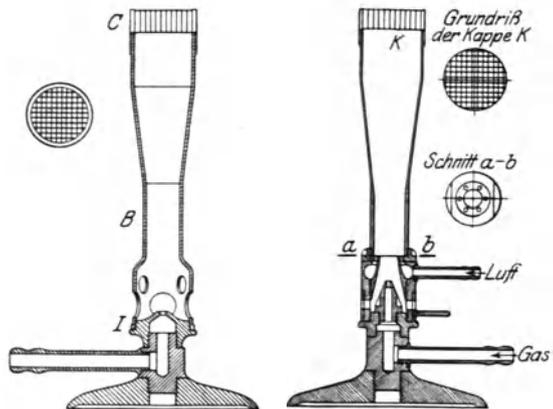


Abb. 37. Schema eines Méker-Brenners.

Verwendung finden, beruhen grundsätzlich auf dem Prinzip des Bunsenbrenners. Durch Kombination mehrerer Brenner über- und nebeneinander und durch konstruktive Verbesserungen am Brenner selbst, wird die Leistung den jeweiligen Anforderungen angepaßt.

Eine Verbesserung des Bunsenbrenners stellt der von Méker konstruierte Brenner dar (Abb. 37). Durch Unterteilung des Brennerrohres wird eine stärkere Kühlung im Brennerrohr verursacht und das Zurückschlagen des Brenners erschwert. Der Méker-Brenner gestattet bis 70% der Verbrennungsluft primär zuzusetzen.

Steigert man die Durchwirbelung des Gemisches und den Prozentgehalt der Primärluft, so muß zum Ausgleich der wachsenden Entzündungsgeschwindigkeit die Strömungsgeschwindigkeit durch Anwendung von Druck vergrößert werden. In Hochleistungsfeuerungen verwendet man Preßgasbrenner. In Feuerungen, die mit hohem Gasdruck arbeiten, verschwindet die Kegelstruktur der Flamme gänzlich. Die Verbrennung erfolgt, losgelöst vom Brennerrohr, nahezu flammenlos an den glühenden Wandungen der Ausmauerung. Der Zwischenraum zwischen Brenner und Wandung erscheint durchsichtig. Der Vorgang verläuft nach dem Prinzip der Oberflächenverbrennung.

5. Die Oberflächenverbrennung:

Schon Davy hat im Jahre 1817 gefunden, daß Gas-Luftgemische sich in Berührung mit heißen Flächen weit unterhalb ihrer Entzündungstemperatur entzünden. Bone [Engineering 1912, 632] und gleichzeitig mit ihm Schnabel [s. Blum: VDI 1913, 281] haben diese Beobachtungen zur eigentlichen Oberflächenverbrennung ausgestaltet. Bringt man in den Brennerkegel eines Brenners eine poröse, großoberflächige Masse, z. B. einen Tonscherben, so erwärmt sich dieser langsam. In dem Maße, wie er ins Glühen kommt, kriecht die Flamme immer mehr in die Masse hinein. Die Verbrennung erfolgt ohne sichtbare Flamme in einer wenige mm breiten Schicht innerhalb der porösen Tonmasse. Das Prinzip eines solchen Brenners zeigt Abb. 38. Durch



Abb. 38. Schema eines Brenners für Oberflächenverbrennung.

diese Anordnung können Strömungs- und Entzündungsgeschwindigkeit des Gases in sehr weiten Grenzen variiert werden, ohne daß der Brenner flackert oder zurückschlägt. Die Entzündung des Gasgemisches bleibt auf die poröse Masse beschränkt, weil sie hier durch Grenzflächenreaktionen katalysiert wird. Durch diese katalytischen Einflüsse wird an der Grenzfläche die Entzündungstemperatur in ähnlicher Weise erniedrigt, wie es bei dem mit Platinschwamm ausgestatteten Feuerzeug nach Döbereiner der Fall ist. In der porösen Masse findet eine besonders gute Durchwirbelung statt. Durch innige Berührung des Gas-Luftgemisches mit den festen Flächen wird der Wärmeübergang zwischen festem und gasförmigem System verbessert und infolgedessen die Periode der Aufheizung des Gasgemisches auf die Entzündungstemperatur abgekürzt.

Der Vorteil der flammenlosen Oberflächenverbrennung liegt in dem außerordentlich intensiven Verlauf der Verbrennung. Sie kann auf kleine Brennstellen konzentriert werden. Die gesamte zur Verbrennung erforderliche Luftmenge kann primär zugesetzt werden. Nach der Zündung brennt das brennbare Gemisch solange außerhalb der Masse, bis diese erglüht ist. Die Verbrennung verläuft dann mit geringstem Luftüberschuß nahezu vollkommen. Die sehr hohe Verbrennungstemperatur, die je nach der Beschaffenheit des Gases bis 1800° betragen kann, wird erreicht ohne jede Vorwärmung. Der Anteil der durch Strahlung abgegebenen Energie ist bei der hohen Temperatur sehr groß, so daß ein günstiger Wärmeübergang erreicht wird.

Die Oberflächenverbrennung hat nicht nur in der Feuerungstechnik des Dampfkesselbaues, sondern auch in der hüttenmännischen Industrie zahlreiche Anwendungen gefunden. Die Anordnung in einem Kessel (s. Abb. 39) besteht z. B. darin, daß zahlreiche Flammrohre, die den Kessel in der Längsrichtung durchziehen, eine Füllung mit poröser, feuerbeständiger Masse erhalten. Zur Sicherung gegen Rückschlag ist in die Gaszuleitung eine Schamotteplatte eingebaut, die wie ein Davysches Sieb wirkt. Der Wirkungsgrad eines solchen Bone-Schnabel-Kessels beträgt nach den Angaben von Blum [VDI 1913, 281] 93–95%, d. h. die Wärme der Brenngase ist nahezu vollständig zur Erzeugung von Dampf verwendet worden.

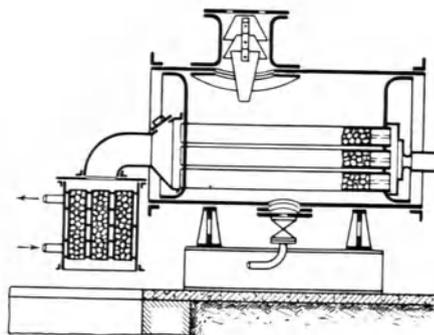


Abb. 39. Bone-Schnabel-Kessel.

Die Schwierigkeiten der Anordnung liegen darin, daß die dicht gepackte poröse Masse dem Gas einen hohen Strömungswiderstand entgegensetzt, der nur durch Anwendung eines großen Gasdruckes überwunden werden kann. Dieser Widerstand wird noch vergrößert, wenn das Gas Flugstaub mitführt und an den Prallflächen ablagert. Wesentlich ist, daß das Füllmaterial selbst bei den hohen Verbrennungstemperaturen absolut feuerfest ist. Die geringste Sinterung verringert den Querschnitt und verhindert den Durchtritt des Gases.

B. Die Verbrennung von Kohle und Öl.

Bei der Verbrennung fester und flüssiger Brennstoffe muß dem eigentlichen Oxydationsvorgang die Umwandlung in den gasförmigen Aggregatzustand vorausgehen. Die Verbrennungsvorgänge an Kohle und Öl sind deswegen in ihrem ersten Stadium heterogene Reaktionen und den homogenen Gasreaktionen an Geschwindigkeit unterlegen. Sowohl die Bildung des Brennstoffluftgemisches, wie auch die Spaltung und Umwandlung der hochmolekularen Kohlenstoffverbindungen erfolgen

an der Phasengrenzfläche fest/gasförmig und sind von den physikalischen Bedingungen der Gemischbildung und den chemischen Eigenschaften des Brennmaterials weitgehend abhängig. Diese heterogenen Reaktionen bestimmen die Geschwindigkeit des gesamten Verbrennungsvorganges, dessen Dauer stets um ein Vielfaches größer ist als bei Gasfeuerungen. Kohle- und Ölfeuerungen erfordern deshalb einen großen Brennraum. Die neben diesen Grenzflächenvorgängen im Gasraum verlaufenden Gasreaktionen, in denen sich die letzte Umwandlung und die Verbrennung der Wassergasbestandteile vollzieht, verlaufen bei genügender Zufuhr an Sekundärluft mit ungleich größerer Geschwindigkeit und fallen bei der Bemessung der Brennzeit nicht ins Gewicht.

1. Die Verbrennung der Kohle auf dem Rost.

Die physikalischen Vorgänge in Feuerungen sind in letzter Zeit besonders durch Rosin (s. unter anderem VDI 75, 849 (1931)) und

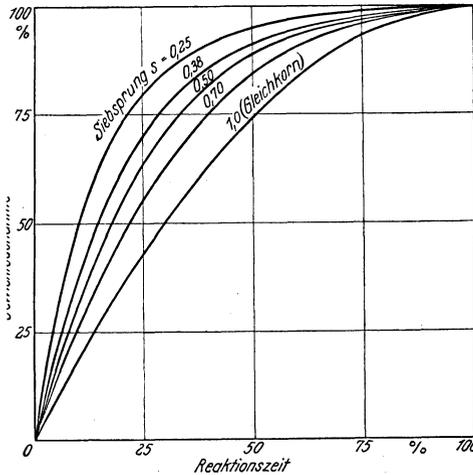


Abb. 40. Reaktionszeit in Abhängigkeit von der Korngröße.

Werkmeister [s. unter anderem Arch. Wärmewirtsch. 12, 23 (1931)] der Aufklärung näher gebracht worden. Rosin hat die Vorgänge in der Grenzfläche, die für die Brennzeit von so großer Wichtigkeit sind, am Modell der Auflösung von Salzen im strömenden Wasser untersucht. Die Reaktionsdauer ist in erster Linie abhängig von der Beschaffenheit der Oberfläche. Da die Schüttung auf dem Rost regellos erfolgt, kommt für die wirkliche Oberfläche die Korngröße allein in Frage. Die Reaktionsgeschwindigkeit ist um so größer, je kleiner die mittlere Korngröße ist. Dabei ist von Bedeutung, wie weit die Korngrenze, d. h.

die größten und kleinsten Dimensionen des Kornes, von der mittleren Korngröße abweichen. Je nach dem Verlauf der Kennlinie verbrennt im Anfang das feinkörnige Material, während die grobkörnigen Anteile auf dem Rost liegen bleiben und später verbrennen. In Abb. 40 ist der Prozentsatz der verbrannten Kohle in Abhängigkeit von der Brennzeit in Prozenten aufgetragen. Die Kurven gelten für verschiedene Kornverteilungsgrade, wobei s der Siebsprung, d. h. das Verhältnis:

$$\frac{\text{Maschenweite des feinsten Siebes}}{\text{Maschenweite des größten Siebes}}$$

bedeutet. Liegen auf dem Rost Schüttungen sehr verschiedener Größe, d. h. mit kleinem Siebsprung, so verbrennt in der ersten Zeit ein ungleich größerer Anteil als gegen Ende. Diesen Vorgängen muß auf dem Wanderrost durch Dosierung der Luftmenge Rechnung getragen werden.

Von Einfluß auf die Ausdehnung der Oberfläche ist die Schütthöhe auf dem Rost. Allgemein steigt die Reaktionsgeschwindigkeit mit zunehmender Schütthöhe, da die der durchströmenden Luft in der gleichen Zeit dargebotene Brennstofffläche vergrößert wird.

Die Strömung der Luft ist für den Verlauf der heterogenen Reaktion von größter Bedeutung. Durch zunehmende Luftgeschwindigkeit und Durchwirbelung wird die Ausbildung von ruhenden Gasschichten an der Kohleoberfläche verhindert und die Geschwindigkeit der Reaktion gesteigert. Die optimale Strömungsgeschwindigkeit erreicht einen Grenzwert, wenn durch die zuströmende Luft die Schüttung mitgerissen wird. Die Überschreitung der kritischen Luftgeschwindigkeit führt zur Bildung von Flugkoks. Befindet sich das Korn im Schwebезustand über dem Rost, so ist zwar die der zuströmenden Luft dargebotene Oberfläche größer, seine relative Geschwindigkeit im Verhältnis zur Luft jedoch eine ungünstige. Die Luftgeschwindigkeit in der Rostebene ist abhängig von der freien Rostfläche, die wiederum eine Funktion der Kornverteilung ist. Die freie Rostfläche verändert sich fortwährend mit der Schütthöhe. Sie wird größer mit fortschreitender Verbrennung, kann jedoch eine Verringerung erfahren, wenn die Kohlen zur Bildung backenden Kokes neigen.

Um den erforderlichen Luftüberschuß möglichst niedrig halten zu können, ohne daß die Verluste durch unvollkommenes Ausbrennen zu groß werden, muß für eine jede Kohle bekannt sein, in welcher Phase der Wanderung auf dem Rost die einzelnen Anteile verbrennen, und welche Luftmenge für jedes Stadium der Verbrennung erforderlich ist.

Die Kohlen sind kompliziert aufgebaute Kohlenstoffverbindungen, die je nach dem Alter und der Geschichte ihrer Entstehung mehr oder weniger Wasserstoff und Sauerstoff enthalten. Man spricht häufig von einem Gehalt an flüchtigen Bestandteilen, ohne sich darüber klar zu sein, daß die bei der trockenen Destillation frei werdenden flüchtigen Verbindungen in der Kohle erst im Augenblick der Erhitzung entstehen. Mit fortschreitender Wanderung auf dem Rost vom Kohlenwehr aus erfolgt die Erwärmung der Kohle durch Strahlung aus dem Gasraum und von den Wänden und durch Konvektion in Berührung mit der vorgewärmten Verbrennungsluft. Bei einer bestimmten Temperatur, nicht weit von 100° gibt sie zunächst ihre Feuchtigkeit ab, wodurch je nach dem Wassergehalt der Kohle ein Stillstand in der Temperatursteigerung eintritt. Bei weiterer Wärmezufuhr beginnt, an wasserstoff- und sauerstoffreichen Kohlen weit vor Auftreten einer Flamme, die Oxydation an der Grenzfläche fest/gasförmig. Die sauerstoffhaltigen großen Brennstoffmoleküle reagieren bei verhältnismäßig niedrigen Temperaturen unter Sauerstoffanlagerung, Peroxydbildung und Zerfall (s. S. 299). Diese Vorgänge, die sich ohne Sichtbarwerden einer Flamme an der Kohlenoberfläche abwickeln können, steigern deren fühlbare Wärme, bis eine Zersetzung, d. h. Abspaltung von Gasen und Dämpfen durch pyrogenen Zerfall eintritt. Die flüchtigen Bestandteile entweichen aus dem Brennstoffbett und entzünden sich an den glühenden Wandungen des Feuerraumes. Es entsteht die leuchtende Flamme, die den gasreichen

Kohlen eigen ist. Durch diese Flammenbildung wird ein großer Teil der Verbrennung in den Gasraum verlegt und verläuft dort als homogene Gasreaktion mit großer Geschwindigkeit, wofern die Sekundärluft zur vollkommenen Verbrennung ausreicht. Bei Verbrennung sehr gasreicher Kohlen, die 40% und mehr flüchtige Bestandteile abgeben, muß diesem gesteigerten Bedarf an Sekundärluft Rechnung getragen werden, wenn die Abscheidung von Ruß in den Abgasen vermieden werden soll.

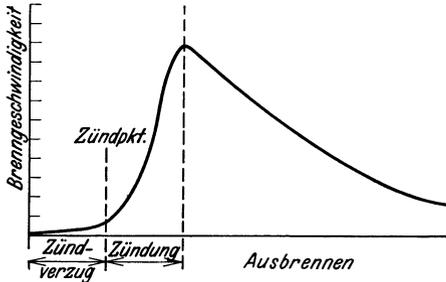


Abb. 41. Schema der Kohleverbrennung auf dem Rost.

Durch die Abscheidung der gas- und dampfförmigen Produkte und ihre Verbrennung außerhalb des Brennstoffbettes verarmt die Kohle an Wasserstoff und Sauerstoff. Da diese beiden Bestandteile die Kohlenstoffverbrennung wirksam beschleunigen, verlangsamt sich die Reaktion in dem Maße, wie sie aus der Kohlenschicht verschwinden. Auf dem letzten Teil des Rostes verbrennt nur noch Koks. Dieser langsamste Teil der Verbrennung ist der geschwindigkeitsbestimmende und begrenzt die Leistung des Rostes.

Der Geschwindigkeitsverlauf während der Wanderung auf dem Rost ist in Abb. 41 dargestellt. Während der Periode des Zündverzögeres verläuft die Vorverbrennung an der Kohlenoberfläche, während der Zündung setzt die Flamme ein. Nach dem Überschreiten einer Höchstgeschwindigkeit klingt die Geschwindigkeit während der Periode des Ausbrennens langsam ab.

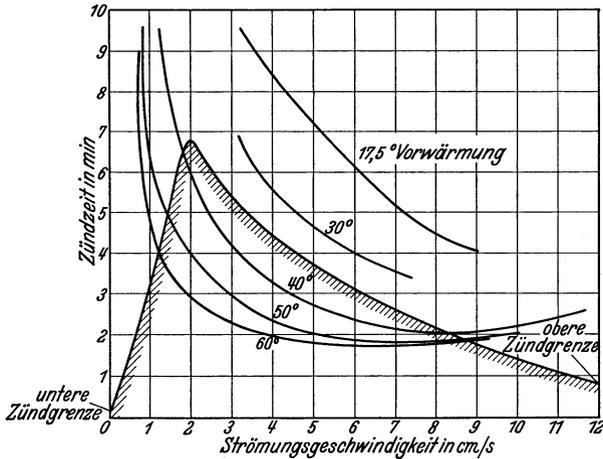


Abb. 42. Zündzeit und Luftgeschwindigkeit bei der Verbrennung von Schwelkoks.

Der Geschwindigkeitsverlauf während der Wanderung auf dem Rost ist in Abb. 41 dargestellt. Während der Periode des Zündverzögeres verläuft die Vorverbrennung an der Kohlenoberfläche, während der Zündung setzt die Flamme ein. Nach dem Überschreiten einer Höchstgeschwindigkeit klingt die Geschwindigkeit während der Periode des Ausbrennens langsam ab.

Die Geschwindigkeit der Entgasung und der Geschwindigkeitsunterschied zwischen Kohlenstoff- und Wasserstoffverbrennung sind abhängig von der Lage der Selbstentzündungstemperatur, bei der die Flamme auftritt. Rosin [Arch. Wärmewirtsch. 12, 97 (1931)] hat empfohlen, an Stelle dieser Temperatur, von ihm Zündpunkt genannt, die Zündkurve zur Beaufsichtigung des Verbrennungsvorganges heranzuziehen. Diese Zündkurve, die die Temperaturerhöhung vom Beginn des Anheizens darstellt, ist für den Brennstoff charakteristischer als der Zündpunkt. Es gibt Brennstoffe mit gleichem Zündpunkt und sehr verschiedener Zündkurve.

Die Zündgeschwindigkeit ist um so größer, je geringer der Wassergehalt des Brennstoffes ist, da bei der Erwärmung auf dem Rost die Temperatursteigerung abgebremst wird, solange Feuchtigkeit verdampft. Sie ist auch um so größer, je höher die Vorwärmtemperatur von Brennstoff und Luft ist.

In Abb. 42 ist die Zündzeit in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit in cm/s für die Verbrennung von Schwelkoks aufgetragen [nach Untersuchungen von Rosin: Arch. Wärmewirtsch. 12, 97 (1931)]. Man erkennt den großen Einfluß der Vorwärmung auf die Zündzeit. Die Luftgeschwindigkeit ist nach oben und unten begrenzt durch die Zündgrenzen. Über diese hinaus darf die Strömungsgeschwindigkeit nicht variiert werden, da wegen Luftmangel oder Luftüberschuß keine Entzündung mehr stattfinden kann. In Abb. 42 ist das für die Zündung in Frage kommende Gebiet durch die schraffierten Linien begrenzt.

Neben den aerodynamischen Verhältnissen auf dem Rost und der Form der Schüttung stellt die immer wechselnde Beschaffenheit des Brennstoffes den wichtigsten Faktor dar. Diese außerordentlich unterschiedliche Natur der Kohle verschiedenen Ursprungs macht eine eingehende experimentelle Untersuchung ihres Verhaltens auf dem Rost erforderlich, bevor an eine zahlenmäßige Erfassung der übrigen Einflußgrößen gedacht werden kann.

Den Entgasungsverhältnissen muß die Zufuhr an Primärluft in den einzelnen Zonen des Rostes angepaßt sein. Beim Wanderrost geschieht diese Dosierung durch Unterteilung der Rostfläche im Zonenrost, der es gestattet, an verschiedenen Stellen des Rostes unabhängig voneinander Luft zuzuführen.

Werkmeister [Arch. Wärmewirtsch. 12, 225 (1931)] hat für verschiedene Kohlen und den Verlauf ihrer Verbrennung in Abhängigkeit von der Brennzeit sog. Kennlinien aufgestellt, die die Ungleichförmigkeit der Verbrennung kennzeichnen. Abb. 43 ist den Untersuchungen von Werkmeister entnommen und stellt den Verbrennungsverlauf einer Fettkohle dar. Kurve *a* zeigt die in der Zeiteinheit verbrennende Kohle in g. Sie beginnt mit der Zündung, erreicht mit zunehmender Gasentwicklung ein Maximum und fällt in dem Maße ab, wie die Reaktion zur nahezu reinen Kohlenstoffverbrennung wird. Kurve *b* zeigt die zur Verbrennung nach *a* gehörige theoretische Luftmenge in l/s. Der Luftbedarf steigt zu Beginn sehr stark an, da die Verbrennung der flüchtigen Bestandteile eine große Luftmenge erfordert. Er fällt nach Überschreitung

des Maximums parallel mit der *a*-Kurve ab. Für die gleichen Versuchsbedingungen ist in Kurve *c* der Schichtwiderstand, d. h. der Widerstand, den die Kohle beim Durchströmen des Rostes findet, aufgetragen. Man sieht, wie der Schichtwiderstand unmittelbar nach beendeter Entgasung

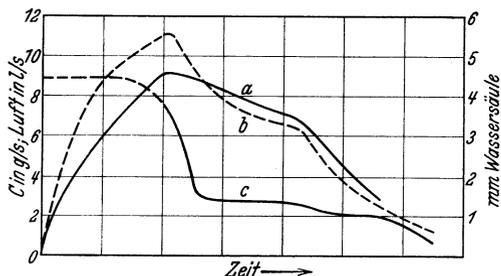


Abb. 43. Kennlinien für den Verbrennungsverlauf einer Fettkohle.

steil abfällt in dem Maße, wie statt Kohle Koks auf dem Roste liegt und die feinkörnigen Anteile bereits verbrannt sind.

Werkmeister hat solche Kennlinien für die wichtigsten Steinkohlentypen aufgenommen. Das Maximum rückt um so mehr von der mittleren Geschwindigkeit ab, je höher die Belastung des Rostes ist. Es liegt um so später im

Verlauf der Verbrennung, je höher die Schüttung auf dem Roste liegt.

Vereinfachte Kennlinien sind in Abb. 44 dargestellt. Sie geben die Verbrennung des Kohlenstoffs in Abhängigkeit von Bruchteilen der Brennzeit an. Die Gaskohle hat hohe Anfangsgeschwindigkeit ohne

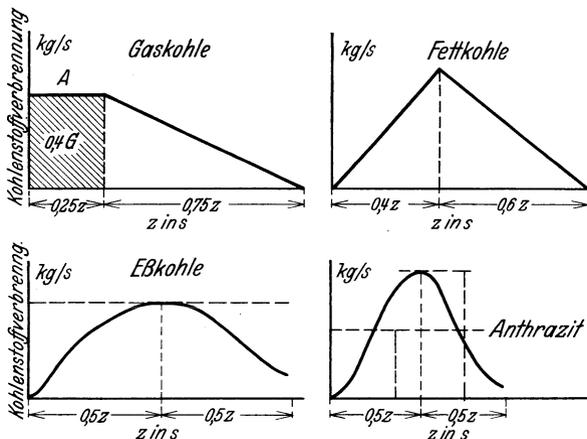


Abb. 44. Vereinfachte Kennlinien für verschiedene Kohlearten.

stark ausgeprägtes Maximum, dann gleichmäßiges Ausbrennen. Fettkohle weist rasch ansteigende Geschwindigkeit und fast ebenso rasch abfallendes Abklingen auf. Die Eßkohle hat langsam ansteigende Geschwindigkeit bis zum Maximum, das nicht sehr weit von der mittleren Brenngeschwindigkeit entfernt liegt, und langsames Abklingen. Der Anthrazit zeigt großen Zündverzug, dann steiles Ansteigen zum Maximum, das weit von der mittleren Brennlinie abweicht, und steilen Abfall der Geschwindigkeit.

Aus den Kennlinien berechnet Werkmeister bei gegebener Feuerleistung die zugehörige Luftmenge wie folgt: Das auf dem Rost befindliche Kohlegewicht beträgt:

$$G = b \cdot l \cdot h \cdot \gamma. \tag{63}$$

Darin ist b = Rostbreite, l = Rostlänge, soweit Luft Zutritt, h = Schütthöhe, γ = Schüttgewicht.

Aus der verlangten Feuerleistung B kg/h errechnet sich die

$$\text{Brennzeit } Z_2 = \frac{3600 \cdot G}{B}. \tag{64}$$

Die Kennlinie muß über der Abszisse Z_2 eine der Kohlenmenge G äquivalente Fläche einschließen. Aus den Gleichungen für die in Abb. 44 aufgezeichneten vereinfachten Kennlinien, erhält man für die Verbrennung der Gaskohle:

Die zur Zeit Z abgeführte Kohlenstoffmenge im Rauchgas ist:

$$c_s = \frac{1,6 G \cdot (Z_2 - Z)}{0,75 Z_2^2} \text{ kg/s} \tag{65}$$

im Bereich der Löschlinie, d. h. während des Ausbrennens. Andererseits

$$c_s = \frac{1,6 G}{Z_2} \text{ kg/s} \tag{67}$$

im Bereich $Z \leq 0,25 Z_2$, d. h. während des horizontalen Verlaufs der Kennlinie.

2. Die Verbrennung von Kohlenstaub.

In der Kohlenstaubfeuerung (s. auch Bd. II, S. 173) wird die Kohle in Form eines feinkörnigen Staubes mit Hilfe von Druckluft in einem geeigneten Brenner zerstäubt. Der äußeren Form nach gewinnt die Kohlenstaubverbrennung durch diese Anordnung Ähnlichkeit mit der Gas- und Ölverbrennung. Folgende Zahlen geben nach Schulte [Glückauf 1921, 416] die je Volumeneinheit des Brennstoffluftgemisches geleistete Wärmemenge für einige Brennstoffe an:

Kohlenstaub	850 kcal/m ³	Wassergas	730 kcal/m ³
Heizöl	720 ..	Generatorgas	550 ..
Leuchtgas	740 ..	Gichtgas	500 ..

Da die Staubteilchen im Schwebезustand von dem Luftstrom mitgerissen werden und ihre Bewegung annähernd gleich der Luftgeschwindigkeit ist, ist die Verweilzeit im Brennerraum gering. Diese Verweilzeit muß ausreichen, um die Umwandlung der Kohle in die Wassergasbestandteile und deren vollkommene Verbrennung zu gewährleisten. Treffen unvollkommen verbrannte Kohleteilchen auf die Wandungen, oder gelangen solche Anteile in den Schornstein, so tritt ein Verlust infolge Flugkoksbildung ein. Diese Brennzeit, d. h. die Zeit, die zu der vollkommenen Verbrennung eines Teilchens notwendig ist, bedingt die Belastung des Feuerraumes und bedingt eine Mindestgröße des Brennraumes. Ist andererseits eine bestimmte Brennraum- oder Feuerleistung gefordert, so muß der Verbrennungsvorgang durch Abkürzung der Brennzeit diesen Anforderungen angepaßt werden.

Die Verbrennung des Staubes ist ähnlich wie der Vorgang auf dem Rost

eine heterogene Reaktion. Das kleine Staubteilchen schwebt in einem verhältnismäßig großen, zu seiner Verbrennung erforderlichen Luftvolumen. Die Reaktionsgeschwindigkeit ist deshalb abhängig von der Korngröße.

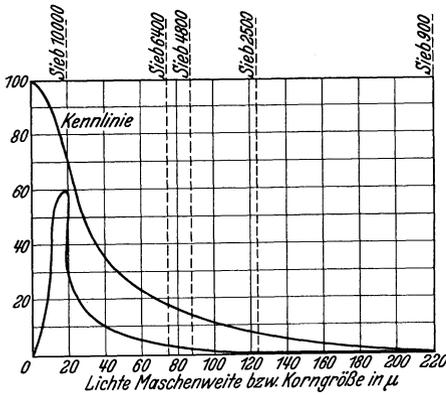


Abb. 45. Kennlinie der Kornverteilung für Kohlenstaub.

Die Zerkleinerung der Kohle in dem Mahlvorgang erfordert einen beträchtlichen Energieaufwand und stellt eine wirtschaftliche Belastung der Kohlenstaubfeuerungen dar. Die Aufbereitung der Kohle wird durch Siebanalysen beaufsichtigt. Der Feinheitsgrad wird in Kennlinien dargestellt (s. Abb. 45) [s. Rosin u. Rammler: VDI 71, 1

(1927)]. Die Aufbereitungskosten sind um so größer, je feiner das Korn ist. Es ist erforderlich, ein Optimum zwischen der durch Kornfeinheit

erreichten Abkürzung der Brennzeit und der Wirtschaftlichkeit aufzusuchen. Unter Umständen muß man einen bestimmten Ausbrandverlust in Kauf nehmen. Wassergehalt der Kohle erschwert den Mahlvorgang. Sehr feuchte Materialien, wie z. B. Braunkohlen, müssen deshalb scharf getrocknet werden, um eventuelles Schmieren in den Mahlgängen zu verhüten. Bei leicht entzündlichem Brennstaub wächst hierdurch die Explosionsgefahr, der durch Mahlen in sauerstoffarmem Verbrennungsgas begegnet werden kann.

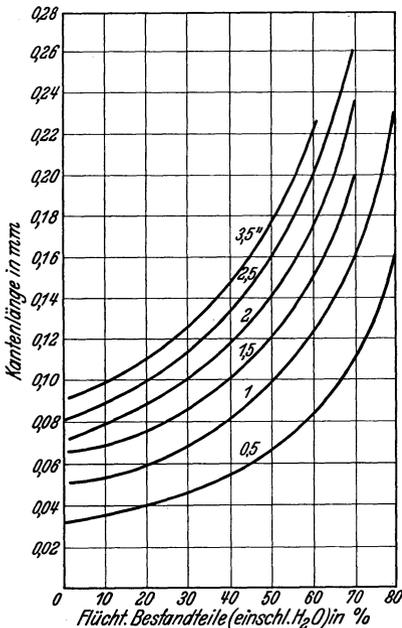


Abb. 46. Brennzeit von Braunkohlenstaub in Abhängigkeit von der Korngröße.

Bei gleicher Korngröße ist die Brennzeit der Kohlen stark von ihren chemischen Eigenschaften abhängig. Die Brennzeit ist um so niedriger, je mehr Entgasungsprodukte die Kohle liefert. In Abb. 46 ist diese Abhängigkeit für Braunkohlen verschiedener Beschaffenheit dargestellt [nach Praetorius: VDI 71, 268 (1927)]. Sehr gasreiche Kohlen bereiten unter Umständen Schwierigkeiten infolge der

Ausbildung von Explosionen beim Austritt aus dem Brenner. Reaktionsträge Stoffe, wie z. B. Steinkohlenkoks, erhöhen die Brennzeit.

Ein Schema des Reaktionsverlaufes an dem in der Verbrennungsluft schwebenden Staubteilchen zeigt Abb. 47 nach Grebel [Ber. 3. Int. Kohlekonferenz Pittsburgh 1930, 421]. Während der Zündperiode nimmt das Staubteilchen fühlbare Wärme auf und gibt seine Feuchtigkeit ab. Mit steigender Erwärmung beginnen an der Grenzfläche gasförmig/fest die Oxydationsvorgänge, die zur Ausbildung einer Gashaut, bestehend aus Kohlenwasserstoffen und Wasserstoff, führen. In der weiteren Zone

werden diese Bestandteile zu Wassergas umgewandelt und verbrannt. Die Summe vieler kleiner, um jedes Staubteilchen herum sich ausbildender Flammen stellt den von der Brenneröffnung ausgehenden Flammenstrom dar. Die Gaszusammensetzung mit zunehmender

Entfernung von der Brenneröffnung ist in Abbildung 47 unten dargestellt. Mit steigender Temperatur verschwinden sehr schnell die Entgasungsprodukte und der Wasserstoff. Das Reaktionsbild wird beherrscht von der sich über den ganzen Brennerraum ausdehnenden Kohlenoxydbildung und Kohlenoxydverbrennung.

Die Verbrennungsluft wird als Primär- und Sekundärluft zugesetzt.

Die Primärluft dient gleichzeitig zum Einbringen des Staubes in den Brennraum und soll so bemessen werden, daß sie zur Verbrennung der Entgasungsprodukte ausreicht. Die aerodynamischen Verhältnisse liegen in der Staubfeuerung ungünstiger als auf dem Rost, da das Staubkorn mit annähernd gleicher Geschwindigkeit wie die Luft den Brennraum durchheilt. Um die bei der Verbrennung an dem Staubkorn sich ausbildenden Gashäute zu zerstören, erteilt man der Primärluft im Brenner eine starke Wirbelbewegung, die unter Umständen dadurch gesteigert wird, daß man auch die Sekundärluft in einem scharfen Strahl in die Flammenbewegung hineinbläst. Durch Vorwärmung wird die Brennzeit verringert und die Verbrennungstemperatur erhöht. Die Vorwärmung der Primärluft führt — besonders bei gasreichen Kohlen — leicht zur Entstehung von Explosionen in den Leitungen und Bunkern. Wegen

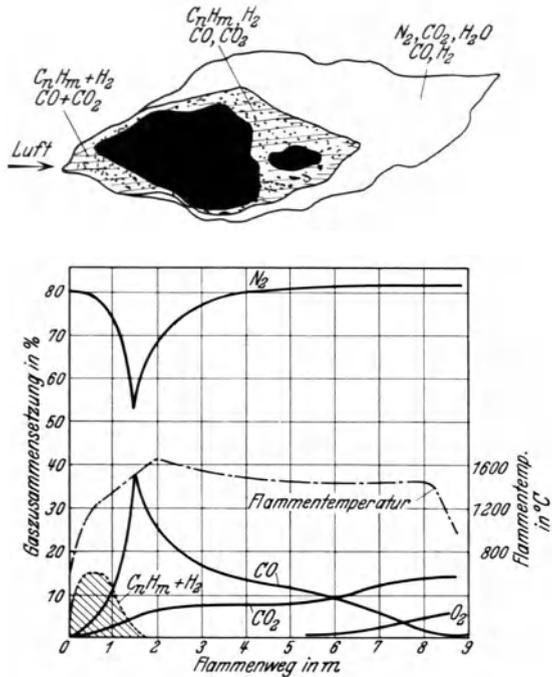


Abb. 47. Schema der Verbrennung eines Kohlenstaubkornes und Gaszusammensetzung.

der guten Durchmischung und der großen Oberfläche des Staubkorns ist ein Luftüberschuß von $\lambda = 1,1-1,2$ ausreichend.

In Abb. 48 ist der Einfluß der geschilderten Reaktionsbedingungen auf den gesamten Verbrennungsvorgang zusammenfassend dargestellt [nach Rosin: VDI 73, 722 (1929)]. Für eine gegebene Kornverteilungslinie (Kennlinie) ist die Verbrennungslinie, d. h. die verbrauchte Kohlenstoffmenge in Prozent, dargestellt. In dem Maße, wie das Feinkorn verbrannt, wächst die erforderliche Brennzeit. Gleichzeitig nimmt die Belastung (Feuerleistung) ab.

Die Hauptvorteile der Kohlenstaubfeuerung sind:

1. Die Möglichkeit, Abfallbrennstoffe zu verwerten.
2. Gute Regelbarkeit und geringe Aufheizzeit.
3. Hohe Verbrennungstemperatur.

Da mit Rücksicht auf die Ofenausmauerung und den Aschenschmelzpunkt die Steigerung der Verbrennungstemperatur über ein bestimmtes

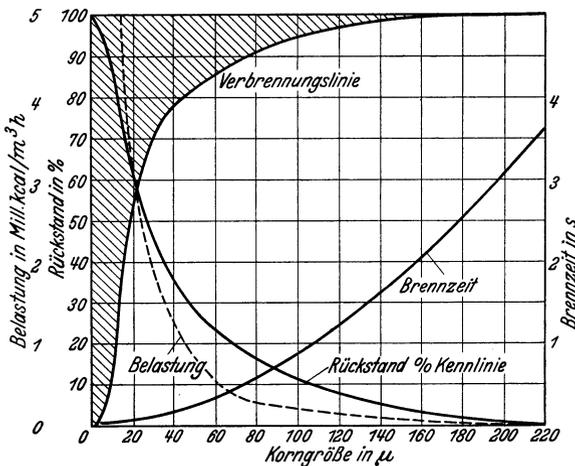


Abb. 48. Schematische Darstellung des Verbrennungsvorganges von Kohlenstaub.

Maß hinaus (1300 bis 1400°) unzulässig ist, verlegt man durch Einbau von Kühlflächen und Strahlungsrohren einen Teil der Verdampfung in den Brennraum. Dadurch wird die Verbrennungstemperatur herabgesetzt (s. S. 269) und zugleich die Wandung gegen das Ansetzen von gesinterten Ascheteilchen geschützt. Es besteht aber bei solchen Einbauten die Gefahr, daß der Brennraum zu stark gekühlt wird. Dadurch wird die Brennzeit verlängert, so daß

unter Umständen unverbranntes und brennendes Korn auf die Kühlflächen trifft und nicht weiter verbrennt. Je nach seiner Feinheit und seiner chemischen Beschaffenheit existiert für jedes Korn eine Temperatur, bei der der Luftüberschuß möglichst niedrig und die Brennzeit bei zufriedenstellendem Wärmeübergang ausreichend kurz ist. Diese Temperatur liegt nach Praetorius [VDI 71, 268 (1927)] für die reaktionsfähigere Braunkohle bei durchschnittlich 1100°, für Fettkohle bei etwa 1250°. Vom Gesichtspunkt einer Schonung der Brennraumwände ist deshalb unter Umständen Braunkohle für die Staubfeuerung besser geeignet als Steinkohle.

Die Feuerleistung (d. h. die Belastung) beträgt nach Bleibtreu [Kohlenstaubfeuerungen. Berlin 1930] in den modernen Staubfeuerungen

etwa 250000 kcal/m³/h gegenüber 350000—400000 kcal/m³/h bei Rostfeuerungen. Nach Aller [VDI 71, 417 (1927)] verhalten sich die Ausmaße der Brennräume bei gleicher Feuerleistung für Staub-, Rost- und Gasfeuerung wie 95 : 43 : 1.

3. Die Ölfeuerung.

Die Verwendung von Öl als Heizmittel bietet gegenüber der Verbrennung von Kohlen den Vorteil, daß die Herstellung des brennbaren Gemisches wesentlich einfacher erfolgen kann. Die Heizöle, die für die Ölfeuerungen in Kesseln in Betracht kommen, sind ungereinigte Rohöle oder Abfallprodukte (Masut), die in Brennern zerstäubt werden. Die Öle lassen sich um so günstiger verbrennen, je geringer ihre Zähigkeit, demnach je größer ihre Fluidität ist. Erhöhung der Temperatur erhöht die Fluidität. Zwischen beiden besteht die Beziehung:

$$\log \frac{1}{\eta} \text{ proportional } T,$$

wobei η = Zähigkeit und $\frac{1}{\eta}$ =

Fluidität und T = absolute Temperatur bedeuten [s. hierzu Berl u. Umstätter: Ztschr. physik. Chem. 148, 471 (1930); 152, 150, 284 (1931) und Kolloid-Beih. 34, Heft 1—4 (1931)]. Man verwendet aliphatische und aromatische Heizöle. Die Eigenschaften einiger Öle sind in Tabelle 24, S. 339 zusammengestellt. Von Bedeutung für

den Verlauf der Verbrennung ist das Verhältnis zwischen aliphatischen und aromatischen Bestandteilen. Abb. 49 stellt nach Aufhäuser [Brennstoff und Verbrennung, Bd. 1, S. 86. Berlin 1926] die Verbrennung schematisch dar. In den Dreiecken ist der Kohlenstoffanteil als Basis, der Wasserstoff als Mittellinie aufgetragen. Würden bei der Verbrennung Kohlenstoff und Wasserstoff gleichmäßig verschwinden, so würde der Vorgang in der schematischen Skizze in Gestalt von ähnlichen Dreiecken zum Ausdruck kommen. Tatsächlich tritt bei der Verbrennung eine zunehmende Verarmung von Wasserstoff ein. Die Mittellinie nimmt stärker ab als die Grundlinie. Die Öle brennen deshalb mit leuchtender rußender Flamme. Um eine vollkommene Verbrennung zu gewährleisten, müssen die Brennräume so groß dimensioniert werden, daß die Flamme nicht mit kalten Wandflächen und Rohrssystemen in Berührung kommt, da an solchen Stellen Kohlenstoffabscheidung stattfindet. Besonders schwierig ist aus diesem Grunde die Verbrennung von aromatischen Steinkohlenteerölen. Die Flamme rußt und liefert Produkte unvollkommener Verbrennung, da die cyclischen Kohlenwasserstoffe, wie Anthracen und Naphthalin, sehr wenig reaktionsfähig sind.

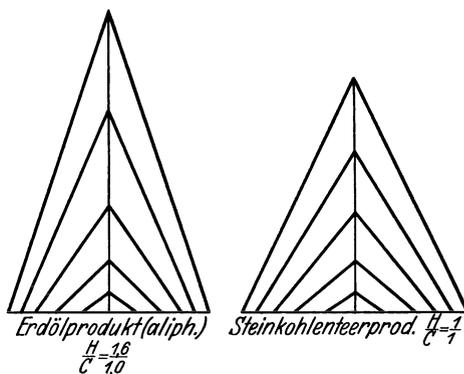


Abb. 49. Schema der Verbrennung von flüssigen Brennstoffen.

C. Die Verbrennung in den Verbrennungskraftmaschinen.

1. Der Vergasermotor.

In den Verbrennungskraftmaschinen, deren verbreitetste Typen die Vergasermotoren mit Fremdzündung sind, wird die chemische Energie durch den Verbrennungsvorgang unmittelbar in kinetische Energie umgewandelt.

Der ideale Arbeitsvorgang eines nach dem Viertaktprinzip arbeitenden Vergasermotors ist in Abb. 50 im $p-v$ -Diagramm aufgezeichnet. Auf dem Wege $a-b$ saugt der Kolben das brennbare Gemisch aus der Vergasierzuleitung an und komprimiert es längs $b-c$ auf den Druck p_1 ; durch die Kompressionswärme ist die Temperatur auf T_1 gestiegen. Durch Fremdzündung wird jetzt der Verbrennungsvorgang ausgelöst, die frei werdende Verbrennungswärme erwärmt das Gemisch auf die Temperatur T_2 . Zugleich steigt der Druck bei konstantem Volumen auf p_2 . Anschließend dehnt sich das Gemisch auf das ursprüngliche Volumen aus, der Druck fällt auf p_3 . Endlich wird das verbrannte Gemisch im 4. Takt ausgestoßen; der Druck fällt dabei von p_3 auf p_4 .

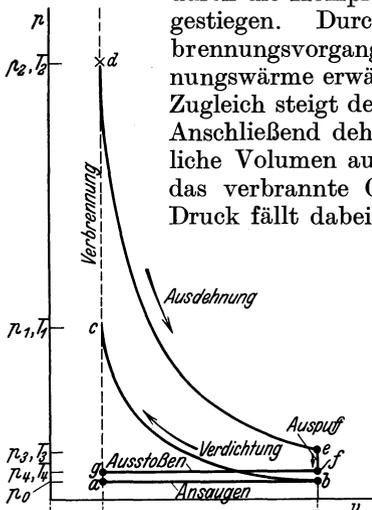


Abb. 50. Arbeitsvorgang eines Viertaktmotors.

Der thermodynamische Wirkungsgrad ist gleich der Differenz der Wärmetönung des Verbrennungsvorganges Q_1 minus der als Wärme durch das Zylindermaterial und die Abgase abgeleiteten Wärme Q_2 , dividiert durch Q_1 :

$$\eta_{th} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad (68)$$

Die Arbeitsleistung des Vorganges ist durch die Fläche $cdef$ dargestellt. Sie verkleinert sich um die zum Ansaugen und Ausstoßen des Gemisches

erforderliche Energie. Als Wärmetönung ist der untere Heizwert bei konstantem Volumen einzusetzen, da die Verbrennung bei konstantem Volumen vor sich geht. Der Wasserdampf verläßt den Zylinder uncondensiert.

Ist das Gewicht des bei einmaligem Ansaugen in den Zylinder eintretenden Gemisches G und seine spezifische Wärme bei konstantem Volumen c_v , so gilt:

$$Q_1 - Q_2 = G \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1) - G \cdot c_v \cdot (T_3 - T_4); \quad (69)$$

$$Q_1 - Q_2 = G \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1 - T_3 + T_4) \quad (70)$$

$$= G \cdot c_v \cdot T_2 \left(1 - \frac{T_3}{T_2}\right) - T_1 \cdot \left(1 - \frac{T_4}{T_1}\right). \quad (71)$$

Aus den Gesetzmäßigkeiten für die adiabatische Kompression folgt (s. S. 113):

$$\frac{p_3}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^k; K = \frac{cp}{cv} = 1,4 \tag{72}$$

$$\frac{p_4}{p_1} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^k. \tag{72 a}$$

Nach der Zustandsgleichung ist:

$$\frac{p_4}{p_1} = \frac{v_2 \cdot T_4}{v_1 \cdot T_1} \tag{73}$$

und

$$\frac{p_3}{p_2} = \frac{v_2 \cdot T_4}{v_1 \cdot T_3}. \tag{74}$$

Aus (72) bis (74) folgt:

$$\frac{T_4}{T_1} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1} \text{ und } \frac{T_3}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1};$$

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1}.$$

Es wird dann:

$$Q_1 - Q_2 = Q_1 \cdot \left(1 - \frac{T_4}{T_1}\right).$$

Demnach ist:

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \eta_{th} = 1 - \left(\frac{p_4}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}. \tag{75}$$

Der thermodynamische Wirkungsgrad ist lediglich vom Verdichtungsdruck abhängig. Dieser wird als Kompressionsverhältnis, d. h. als Verhältnis der Volumen $v_2 - v_1$ angegeben. Abb. 51 zeigt den thermischen Wirkungsgrad in Abhängigkeit vom Kompressionsverhältnis. Infolge zahlreicher Verluste wird dieser Wirkungsgrad im praktischen Betriebe nicht erreicht. Er beträgt bei einem Kompressionsverhältnis von 1 : 6 praktisch etwa 25%.

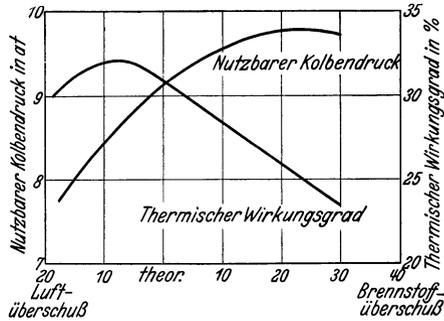


Abb. 51. Thermischer Wirkungsgrad und Kompressionsdruck.

Die Verbrennung im Vergasermotor verläuft bei annähernd konstantem Volumen. Tritt infolge konstruktiver Einflüsse am Motor oder auf Grund der Eigenschaften des Verbrennungsgemisches eine Verzögerung der Zündung ein, so reicht der kurze Augenblick zur Verbrennung nicht aus. Die Verbrennung findet dann auch noch während des Expansionshubes statt. Da der Höchstdruck p_2 (Abb. 50) jetzt nicht erreicht wird, verkleinert sich die Arbeitsfläche. Da ein gewisser Zündverzögerung immer vorhanden ist, begegnet man der dadurch hervorgerufenen Verringerung des Wirkungsgrades durch Einstellung auf Frühzündung. Man erreicht, daß ein Teil der Vorverbrennung vor die

Überschreitung des Totpunktes gelegt und die Verbrennung bei Erreichen des Höchstdruckes p_2 beendigt ist. Bei den schnellaufenden Vergasermotoren ist deswegen die Hauptaufmerksamkeit auf die richtige Abwicklung des Verbrennungsvorganges zu verlegen. Im Interesse einer hohen Zündgeschwindigkeit und einer möglichst vollkommenen Verbrennung ist es von Wichtigkeit, daß das Brennstoffluftgemisch möglichst homogen und der Zündverzug möglichst gering ist.

Bei den Bemühungen, den Wirkungsgrad des Motors durch Steigerung des Kompressionsverhältnisses zu verbessern, stieß man auf Schwierigkeiten, da sich mit steigendem Verdichtungsgrad — das Kompressionsverhältnis wurde von etwa 3,5 auf 5—6 gesteigert — bei Verwendung des gewöhnlichen Petroleumbenzins, das in der Hauptsache paraffinischer Natur ist, die Erscheinung des Klopfens bemerkbar machte. Es tritt in Form eines dumpfen, schlagartigen Geräusches auf, wenn bei der Kompression des Brennstoffluftgemisches infolge der dabei auftretenden Erwärmung die Selbstentzündungstemperatur überschritten wird. Das Gemisch entzündet sich, bevor die magnetische Zündung einsetzt. Man nennt diese Erscheinung Selbstentzündungsklopfen. Unter Detonationsklopfen versteht man ein helles klingendes Geräusch, das dann auftritt, wenn die im Zylinder mit gleichmäßiger Geschwindigkeit fortschreitende Verbrennung in eine Explosionswelle übergeht. Durch das Klopfen wird die gleichmäßige Kolbenbewegung beeinträchtigt. Neben einer Verschlechterung des Wirkungsgrades treten starke Materialbeanspruchungen auf.

Diesen Erscheinungen wird durch konstruktive Änderung des Zylinders und der Zündung, sowie durch Auswahl der Brennstoffe begegnet. Durch Vermeidung toter Räume, durch Verwendung von Leichtmetall, das vermöge seiner guten Wärmeleitfähigkeit Überhitzungen verhindert, durch Anbringung mehrerer Zündstellen u. a., sind die konstruktiven Eigenschaften verbessert worden. Entzündungsgeschwindigkeit und Reaktionsverlauf sind zunächst abhängig von der Beschaffenheit des Gemisches. Die Mischung des Brennstoffes mit der Verbrennungsluft erfolgt im Vergaser. Der Brennstoff, dessen Verdampfungswärme möglichst niedrig sein soll, wird in feinsten Tröpfchen in dem Luftstrom dispergiert werden, damit auf dem Wege in den Zylinderraum und während der Kompression eine völlige Verdampfung einsetzt. Schwere Tropfen fallen in den Zuleitungen oder im Zylinderinnern zu Boden und bewirken Abscheidung von Verkohlungsprodukten — sog. Ölkohle — im Zylinderinnern. Ein wichtiges Kriterium für das Verhalten des Treibstoffes ist die Siedeanalyse. Man gibt das Resultat der Siedeanalyse als sog. Kennziffer an und bezeichnet damit einen Temperaturbereich, innerhalb dessen ein gleichzeitig angegebener Prozentsatz des Treibstoffes übergeht. Gefordert wird im allgemeinen eine gleichmäßige Siedekurve ohne Siedesprünge, damit nicht im Vergaser eine Verarmung an Leicht siedendem und eine Änderung des Mischungsverhältnisses eintritt. Zuviel Leicht siedendes verursacht große Lager- und Transportverluste; zu wenig erschwert in kälteren Jahreszeiten das Anlassen des Motors. Hochsiedende Bestandteile verursachen unvollkommene Verbrennung.

Den geringsten Zündverzög hat ein Gemisch, das 10—20% mehr Brennstoff enthält als dem theoretischen Gemisch entspricht (s. S. 309).

Tabelle 22. Toluolwerte verschiedener Brennstoffe nach Ricardo. (Schnellaufende Verbrennungsmaschinen. Berlin: Julius Springer 1926.)

Brennstoff	Höchstes brauchbares Verdichtungsverhältnis $V_n + V_e$	Toluolwert für Toluol = 100%, für aromatenreies Benzol = 0%	Siedepunkt	Spezifisches Gewicht bei 15°	Verdampfungs-wärme bei konstantem Druck kcal/kg	Unterer Heizwert kcal/kg
	V_n					
Von aromatischen Bestandteilen						
freies Benzin	4,85	0	—	—	73,9	10600
Benzin A	6,0	38,0	—	0,782	78,9	10250
„ B	5,7	28,0	—	0,723	77,8	10490
„ C	5,25	13,5	—	0,727	75,8	10550
„ D	5,35	16,5	—	0,760	73,3	10410
„ E	4,7	5,0	—	0,719	73,3	10530
„ F	5,05	6,5	—	0,704	74,4	10610
„ G	4,55	10,0	—	—	—	—
„ H	5,9	35,0	—	0,767	80,6	10430
Schwere aromatische Brennstoffe	6,5	55,0	—	—	75,5	9950
Petroleum	4,2	22,0	—	—	60,0	10550
Pentan	5,85	33,0	—	—	85,5	10880
Hexan, 80%ig	5,1	8,0	69	0,663	86,7	10700
Heptan, 97%ig	3,75	37,0	98,4	0,691	73,9	10720
Benzol	6,9	67,0	80	0,884	95,5	9630
Toluol 99%ig	> 7,0	100,0	110	0,870	83,9	9750
Xylol 91%ig	> 7,0	85,0	140	0,862	80,6	9890
Cyclohexan, 93%ig	5,9	35,0	81	0,780	86,7	10430
Hexahydrotoluol, 80%ig	5,8	31,5	100	0,770	76,7	10405
Hexahydroxylol, 60%ig	4,9	21,5	119	0,756	73,9	10410
Methylalkohol	5,2	—	—	—	277,5	5340
Äthylalkohol, 95%ig	> 7,5	> 88,0	—	—	245,5	6000

Eine Einstellung des Vergasers auf ein solches Gemisch würde aber zu unvollkommener Verbrennung Anlaß geben. Vergasermotoren arbeiten mit einem Luftüberschuß von $\lambda = 1,1—1,2$. Eine Steigerung der Zündgeschwindigkeit durch allzu starke Durchwirbelung hat ihre Begrenzung durch das Auftreten des Klopfens.

Neben den zahlreichen Prüfungen, denen man die Kraftstoffe unterzieht [s. Berl-Lunge: Chemisch-techn. Untersuchungsmethoden, Bd. 2/1, S. 1. 1931] ist die Untersuchung der Kompressionsfähigkeit die wichtigste. Man versteht darunter die Feststellung desjenigen Verdichtungsgrades, den der Treibstoff in einem bestimmten Motor verträgt,

Tabelle 22a. Analyse von Benzinsorten (s. Tabelle 22).

Benzin-muster	Paraffin	Naphthen	Aromaten
A	26,0	35,0	39,0
B	62,0	23,0	15,0
C	61,0	30,5	8,5
D	38,0	47,0	15,0
E	68,0	20,0	12,0
F	80,0	15,2	4,8
H	10,0	85,0	5,0

ohne zu klopfen. Tabelle 22 enthält die nach den Vorschlägen von Ricardo [Die Verbrennungskraftmaschine] angegebenen Toluolwerte verschiedener Brennstoffe. Unter Toluolwert versteht man diejenige Toluolmenge in Prozent, die in einem paraffinischen Normalbenzin die gleiche Klopfestigkeit erzeugt, wie sie im gleichen Motor für den zu untersuchenden Brennstoff gemessen wird. Alle Toluolwerte liegen zwischen dem Toluolwert = 0 für ein paraffinisches, aromatenfreies Benzin und reinem Toluol = 100. In dem Bestreben, die Kraftstoffprüfung zu vereinheitlichen, wird heute eine ähnliche Skala vorgeschlagen, die n-Heptan als klopfenden und Isooctan als klopfesten Bestandteil anwendet. Die Menge Isooctan, die dem n-Heptan zur Erzielung einer bestimmten Kompressionsfestigkeit zugesetzt werden muß, gibt die Octanzahl an. Die diesbezüglichen Versuche sind noch nicht abgeschlossen [s. hierzu Berichte des Deutschen Verbandes für die Materialprüfungen der Technik].

Die Kompressionsfestigkeit steht in direktem Zusammenhang mit der besprochenen Reaktionsfähigkeit (S. 298) der Kohlenstoffverbindungen. Moleküle, die leicht Wasserstoff abspalten, unterliegen im Zylinder der Peroxybildung, durch deren explosionsartige Zersetzung die Verbrennung eine autokatalytische Beschleunigung erfährt. Callendar [Engineering 147, 187 (1927)] und Moureu [Compt. rend. 184, 413 (1927)] haben solche Peroxyde in den Abgasen klopfender Motore feststellen können.

Die Kompressionsfestigkeit steigt in der Reihenfolge:
Paraffine, Hydroaromaten, Olefine < Äthylalkohol
Aromaten

Tabelle 23.

	Selbstentzündungstemperatur des Brennstoff-Luftgemisches °C
n-Hexan	338
n-Hexan + 0,1% Fe(CO) ₅	410
n-Hexan + 1% Fe(CO) ₅	456
n-Hexan + 1% Pb(C ₂ H ₅) ₄	487
Benzin	415
Benzin + 0,2% Fe(CO) ₅	446
Benzin + 0,5% Fe(CO) ₅	472
Benzin + 0,7% Fe(CO) ₅	478

Alkohol und Aromaten haben annähernd die gleiche Festigkeit. In der homologen Reihe ist der Kraftstoff mit niedrigerem Kohlenstoffgehalt der klopfestere. Verzweigte Ketten sind klopfester als unverzweigte Ketten. Die Feststellung des Klopfens erfolgt entweder nach dem Gehör, oder nach der „bouncing pin“ Methode [s. Ricardo: Die Verbrennungskraftmaschine].

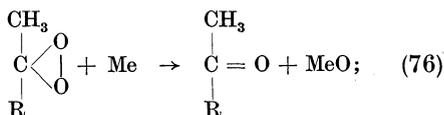
Die Klopfestigkeit kann durch zwei Methoden gesteigert werden:

1. Man setzt dem Brennstoff geringe Anteile von Stoffen zu, die als Antiklopfmittel, Klopfende

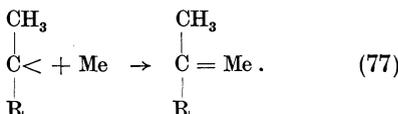
oder auch chemische Bremsen bezeichnet werden. Man verwendet dazu eine große Anzahl chemische Verbindungen, wie u. a. Anilin, Xylidin, besonders aber metallorganische Verbindungen, wie Pb(C₂H₅)₄ und Fe(CO)₅. Diese Stoffe erhöhen die Selbstentzündungstemperatur, wenn sie zu 0,1—1% dem Kraftstoff zugesetzt werden [s. Tabelle 23 nach Berl, Heise u. Winnacker: Ztschr. physikal. Chem. Abt. A 139,

453 (1928)]. Sie verhindern die Peroxybildung und unterdrücken dadurch die Neigung zum Klopfen.

Berl und Winnacker stellten fest, daß die Wirkung der metallorganischen Verbindungen auf der Bildung von feinst verteiltem Metallstaub beruht, der aus der organischen Bindung bei der Erhitzung im Zylinderinnern abgespalten wird [s. Ztschr. physikal. Chem. Abt. A 148, 261 (1930)]. Durch diesen feinen Metallstaub werden entweder primär entstandene Peroxyde desoxydiert und in beständigere Sauerstoffverbindungen übergeführt:



oder die zur Peroxybildung neigenden, in der Flammenfront entstehenden freien Radikale (s. S. 298) werden durch das Metall unter Rückbildung metallorganischer Körper gebunden:



Diese metallorganischen Zusätze, darunter das zuerst in den Vereinigten Staaten verwandte $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$, das in konzentriertem Zustande physiologisch sehr gefährlich, in der starken Verdünnung mit Benzin aber ungefährlich ist, und das $\text{Fe}(\text{CO})_5$ der I. G. Farbenindustrie A. G., das der klopfhindernde Bestandteil des Motalins war, haben den Nachteil, daß sich Metalloxyde im Zylinderraum zu feinen Überzügen festsetzen und die Zündkerzen, sowie das Schmieröl verunreinigen. Der Zusatz von metallorganischen Verbindungen ist auf die Dauer keine befriedigende Lösung, auch wenn durch Zusätze von Äthylenbromid die Dispersität des anorganischen Rückstandes außerordentlich gesteigert wird.

2. Man ist heute in Deutschland durchweg dazu übergegangen, die Zusammensetzung des Brennstoffes durch Mischung verschiedener Bestandteile den Ansprüchen der Kompressionsfestigkeit anzupassen. Man erreicht dies durch Mischung von Aromaten mit paraffinischem Benzin. Ein Beispiel für die Steigerung der Kompressionsfestigkeit durch Zusatz von Benzol zeigt Abb. 52.

In Deutschland wird dem Kraftstoff auf Grund gesetzlicher Vorschriften absoluter (mindestens 99,8%iger) Äthylalkohol zugemischt. Dieser hat als kompressionsfester Zusatz die gleichen guten Eigenschaften wie die Aromaten. Bei an sich niedrigem Heizwert bedingt er einen besonders ruhigen Gang der Verbrennung, da infolge niedriger Selbstentzündungstemperatur die Verbrennung zwar sehr frühzeitig mit

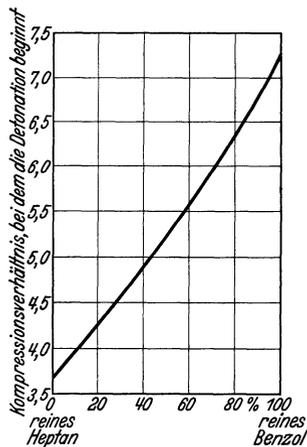


Abb. 52. Steigerung der Kompressionsfestigkeit durch Zusatz von Benzol zu Heptan.

geringem Zündverzug beginnt, aber infolge der geringen zeitlichen Wärmeentwicklung außerordentlich gleichmäßig ohne Detonation verläuft. Nachteile des Alkoholzusatzes sind: Verminderung des Energieinhaltes im Brennstoff je Gewichts- und Rauminhalt, Bildung von sauren, die Auspuffrohre angreifenden Produkten bei unvollkommener Verbrennung, deren Wirkung man durch Zusatz von Natriumbenzoat zu begegnen versucht, und schließlich die wasseranziehende Wirkung des Alkohols. Schon geringer Wassergehalt im alkoholhaltigen Kraftstoff bewirkt bei Abkühlung auf tiefe Temperaturen Entmischung.

2. Der Dieselmotor.

Von allen besprochenen Verbrennungsformen unterscheidet sich der Verbrennungsvorgang im Dieselmotor dadurch, daß er durch Selbstentzündung ausgelöst wird. Der Treibstoff wird entweder in Mischung mit hochkomprimierter Luft, oder, wie es im kompressorlosen Dieselmotor der Fall ist, ohne Zumischung von Luft als feiner Flüssigkeitsstrahl in die verdichtete Luft hineingespritzt, die durch annähernd adiabatische Kompression über diejenige Temperatur gebracht ist, die zur Selbstentzündung des Treiböls erforderlich ist. Bei idealem Verbrennungsverlauf ist der Dieselmotor eine Gleichdruckmaschine. Während des Arbeitstaktes ist die Geschwindigkeit des Kolbens gleich derjenigen, mit der die Verbrennung sich im Zylinderinnern ausbreitet. Daß dieser Idealfall im praktischen Fall nicht erreicht wird, hat seine Ursache darin, daß bei der Entzündung des Brennstoffes Verzögerungen auftreten, die die Anwendung höherer Entzündungstemperatur und dadurch gesteigerte Geschwindigkeiten nach erfolgter Selbstentzündung zur Folge haben. Mechanismus der Entzündung und Verbrennung sind deshalb für den Dieselmotor von größter Bedeutung.

Eine Zusammenstellung einiger gebräuchlicher Dieselöle und ihrer Eigenschaften enthält Tabelle 24 [nach Sass: Kompressorlose Dieselmotoren. Berlin 1929].

Die Elementaranalyse gibt über das Verhältnis zwischen Wasserstoff und Kohlenstoff, die sog. Wasserstoffzahl, sowie über den Gehalt an Sauerstoff Aufschluß. Beide Größen sind für die Selbstentzündungstemperatur und den Verlauf der Verbrennung von Wichtigkeit. Asphaltbestandteile im Dieselöl über ein gewisses Maß hinaus sind unerwünscht, da sie zur Ölkohleabscheidung und damit zu Verlusten durch unvollkommene Verbrennung, sowie zu sonstigen Betriebsstörungen Anlaß geben. Brennpunkt und Flammpunkt sind lediglich für die Berücksichtigung von Lagerungsvorschriften von Bedeutung. Der Stockpunkt muß bei Maschinen, die tiefen Außentemperaturen ausgesetzt sind, berücksichtigt werden. Er soll einige Grade unter Null liegen. Hohes spezifisches Gewicht deutet im allgemeinen auf hohen Asphaltgehalt hin. Die gebräuchlichen Treiböle haben ein spezifisches Gewicht von 0,85—0,92. Nur der untere Heizwert kommt in Frage, da das Verbrennungswasser den Zylinder mit den Abgasen in Dampfform verläßt.

Tabelle 24. Eigenschaften einiger aliphatischer Treiböle.

Herkunft des Öles	Deutsches Paraffinöl	Nördameri-kanisches Gasöl	Mexikani-sches Gasöl I	Mexikani-sches Gasöl II	Argentini-sches Gasöl	Süd-afrikanisches Gasöl
Elementaranalyse, % C	86,74	84,36	84,61	84,99	84,65	86,44
„ „ % H.	10,65	11,75	11,50	7,54	13,54	8,56
„ „ % O + N	1,64	3,59	1,66	5,02	1,63	5,00
„ „ % S.	0,97	0,30	2,23	2,45	0,18	0,00
Asche, %	0,027	0,00	0,00	0,01	Spuren	0,02
Wasser, %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Spuren
Hartasphalt, %	0,11	0,00	0,975	0,00	0,00	1,17
Flammpunkt, °C	77	91	67	112	210	111
Brennpunkt, °C	108	104	131	141	255	133
Stockpunkt, °C	—3	—15	—5,5	—5	—	unter — 15
Spezifisches Gewicht, kg/l	0,875	0,863	0,875	0,870	0,865	0,921
Heizwert, oberer, kcal/kg	10738	11500	10856	10919	10843	10759
„ „ unterer, kcal/kg	10162	10866	10253	10512	10193	10297
Viscosität bei 12° C, °E	—	1,67	2,69	1,83	45,18	13,22
„ „ 20° C, °E	1,68	1,41	—	—	29,25	7,03
„ „ 30° C, °E	—	—	1,76	1,57	16,96	4,58
„ „ 50° C, °E	1,23	—	1,44	1,44	5,46	1,95

Die Siedepunkte der Treiböle sind für den Betrieb des Dieselmotors von untergeordneter Bedeutung. Die Entzündung verläuft im wesentlichen im tropfbar flüssigen Zustand. Von grundsätzlicher Bedeutung ist die Selbstentzündungstemperatur. Die Selbstentzündungstemperaturen werden im Zündpunktprüfer nach Moore in reinem Sauerstoff gemessen. Die gemessenen Zündpunkte liegen dann nahezu gleichmäßig um einen konstanten Wert niedriger, als die in Luft unter Druck gemessenen.

Tabelle 25. Zündpunkte einiger aliphatischer Brennstoffe in Luft und Sauerstoff nach Tauss und Schulte (Über Zündpunkte und Verbrennungsvorgänge im Dieselmotor. Halle 1924).

Bevorzugt werden Öle mit niedrigster Selbstentzündungstemperatur. Aromatische Öle verhalten sich wegen ihrer hohen Selbstentzündungstemperatur ungünstiger als aliphatische. Ein größerer Sauerstoffgehalt erniedrigt die Entzündungstemperatur (s. S. 302).

	Zündpunkt bei 1 at		Zündpunkte in Druckluft	
	in Luft °C	in Sauerstoff °C	°C	bei at
Gasöl	336	270	205	27
Petroleum	290—435	250—265	200	26
Schieferöl	354—435	272—290	200	33
Paraffin	388—414	243—258	228	11,5

Die Selbstentzündungstemperatur wird erreicht durch die Erwärmung der Verbrennungsluft während des Kompressionstaktes. Zündpunkt und Verdichtungsgrad sind zwangsläufig miteinander verknüpft. Abb. 53 zeigt den Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Verdichtung für die kalte Maschine ($t_0 = 27^\circ$) und die heiße Maschine ($t_0 = 50^\circ$) nach

Berechnungen von Sass. Bei 28 at Verdichtungsdruck erhält man eine Temperatur von 500° für die kalte, von 550° für die heiße Maschine. In der gleichen Abbildung sind die von Tauss und Schulte gemessenen Selbstentzündungstemperaturen, in Druckluft gemessen, eingetragen. Theoretisch würde man zur Erzielung dieser Temperaturen einen Verdichtungsdruck von 6,1 at benötigen. Im Interesse der Beschleunigung des Zündvorganges müssen Temperaturen, die 250—300° über der Selbstentzündungs-Minimumtemperatur liegen, angewandt werden. Man kommt deshalb zu Verdichtungsdrucken von 35—40 at. Eine Steigerung

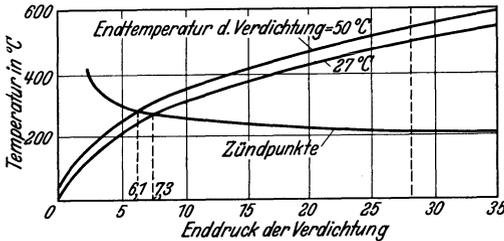


Abb. 53. Zündpunkte und Verdichtungsdruck bei Verbrennung im Dieselmotor.

darüber hinaus, die zur Abkürzung des Zündverzuges wünschenswert wäre, würde zu großen Materialbeanspruchungen Anlaß geben. Bei schnelllaufenden Motoren macht man Gebrauch von Hilfszündungen (Zündkerzen). Dadurch kann man den Verdichtungsdruck unter 20 at halten.

Im Augenblick des Einspritzens beginnt die Erwärmung der Brennstofftröpfchen durch die verdichtete Luft. Bei Erreichen einer bestimmten Temperatur vollziehen sich Spaltungs- und Oxydationsvorgänge. Die Reaktionen erfolgen im Dieselmotor im flüssigen Zustand. Wegen des hohen Siedepunktes der zur Verbrennung gelangenden Öle kommt nur ein Bruchteil zur Verdampfung. Bei verhältnismäßig niedrigen Temperaturen unterliegen die großen, zum Teil ungesättigten und sauerstoffhaltigen Brennstoffmoleküle leicht der Oxydation und Peroxydbildung. Durch Steigerung der Temperatur infolge der frei werdenden Verbrennungswärme erhöht sich die Geschwindigkeit autokatalytisch bis zur Zündung. Diese Geschwindigkeitssteigerung bis zur Zündung erfordert eine bestimmte Zeit. Sie ist die Ursache des Zündverzuges, auch Vorverbrennung genannt, der beim Dieselmotor besonders störend in Erscheinung tritt. Die Dauer des Zündverzuges ist, wie die Selbstentzündungstemperatur, von der Konstitution des Brennstoffmoleküls abhängig. Sauerstoffhaltige, ungesättigte Kohlenwasserstoffe haben zwar niedrige Zündpunkte, benötigen aber große Zeiten bis zur Zündung, während aromatische Öle zwar erst bei hoher Temperatur sich entzünden, dann aber mit größerer Geschwindigkeit reagieren.

Der Zündverzug wird verringert durch Steigerung der Verdichtungs-temperatur und die damit verbundene schnellere Erwärmung, durch feinste Zerstäubung des Brennstoffstrahles und durch gute Durchwirbelung. Der Zündverzug ist von Neumann [VDI 70, 1076 1926] für die verschiedenen Dieselmotoren wie folgt gemessen worden:

- 0,018 s für eine 200 PS_e Vierzylindermaschine nach Deutz,
- 0,00935 s für eine 300 PS_e Zweizylindermaschine nach Körting,
- 0,00486 s für eine 160 PS_e Zweizylindermaschine nach Junkers.

Im Gegensatz zum Vergasermotor erfolgt die Zündung in der Dieselmachine nicht an einer Stelle. Es sind gewissermaßen außerordentlich viele Zündkerzen über den ganzen Verbrennungsraum verteilt. Infolgedessen verläuft die Verbrennung sehr schnell. Sie ist bei Langsamläufern mit dem ersten Drittel des Hubes beendet. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Flamme ist, wie in früheren Betrachtungen (s. S. 332) besprochen wurde, für den Dieselmotor nur dann von Bedeutung, wenn er mit Zündkerzen ausgestattet ist. Da die Dieselöle, je nach ihrer Zusammensetzung, bei geringem Wasserstoffgehalt zu Rußbildung neigen, ist versucht worden, den Verbrennungsvorgang durch Einspritzen von Wasser zu beschleunigen, das an der Kohlenstoffverbrennung im Sinne der

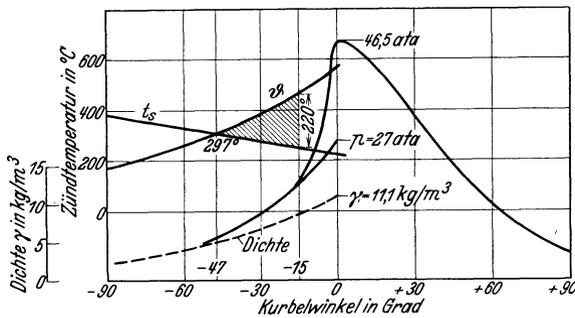


Abb. 54. Zündvorgang in einer Dieselmachine.

Wassergasgleichung teilnimmt. Ölkohleabscheidung und Rußbildung treten besonders dann auf, wenn durch fehlerhafte Konstruktion flüssiger Betriebsstoff auf die heißen Zylinderwandungen trifft. Die Brennstofftropfen sollen vielmehr wie bei der Ölfuehrung im Gasraum verbrennen, ohne in flüssigem Zustand die Wand zu berühren (s. S. 291).

Den Zündvorgang in einer 200 PS_e Vierzylindermaschine stellt Abb. 54 dar [nach Neumann: VDI 70 II, 1071 (1926)]. Während des Verdichtungshubes steigt der Verdichtungsdruck auf $p_k = 27 \text{ ata}$, gleichzeitig ist die Dichte auf $11,1 \text{ kg/m}^3$ gestiegen. Die Temperatur δ steigt mit zunehmender Verdichtung und schneidet bei $t_s = 297$ die Zündpunkt-kurve. Bei 47° vor dem Totpunkt setzt die Einspritzung ein, die sich zunächst infolge Kompressibilität des Öls bis auf 30° vor dem Totpunkt verzögert. Wie die Druckkurve zeigt, setzt die Zündung erst bei 15° ein. Die Verdichtungstemperatur liegt in diesem Falle 220° über dem Zündpunkt. Die Zeit, die benötigt wird, um den Kurbelwinkel von 30° auf 15° zu verändern, entspricht der Dauer des Zündverzuges, der in diesem Falle bei einer Tourenzahl von 295/m 0,0085 s beträgt.

Anwendungsgebiete der Elektrotechnik.

Von Dr.-Ing. W. Speidel VDI, Halle a. S.

I. Allgemeine theoretische Grundlagen.

A. Das elektrische Feld.

1. Elektrizitätsmengen.

Das Bestehen eines elektrischen Feldes setzt das Vorhandensein elektrischer Ladungen voraus. Bei negativ geladenen Körpern hat man sich auf der Oberfläche freie Elektronen, bei positiv geladenen Körpern einen entsprechenden Mangel an freien Elektronen vorzustellen. Gleichartig geladene Körper stoßen sich ab, ungleichartig geladene ziehen sich an. Freie Elektrizitätsmengen befinden sich bei statischen Feldern nur auf der Oberfläche von Leitern (Metallen). Die Kraftwirkung zwischen zwei punktförmig gedachten Elektrizitätsmengen Q_1 und Q_2 im Abstand r ist nach dem Coulombschen Gesetz in einem Medium mit der Dielektrizitätskonstante ε

$$P = -\frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}.$$

Im leeren Raum ($\varepsilon = 1$) übt die elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge (ESE) auf die ihr gleiche Ladung im Abstand $r = 1$ cm die Kraft $P = 1$ Dyn aus. Die elektromagnetische Einheit der Elektrizitätsmenge ist gleich $3 \cdot 10^{-10}$ ESE, und die sog. praktische Einheit der Elektrizitätsmenge (1 Coulomb = 1 Amperesekunde) ist gleich $3 \cdot 10^{-9}$ ESE.

2. Elektrische Feldstärke.

Das Vorhandensein eines elektrischen Feldes zeigt sich in einer Kraftwirkung auf Elektrizitätsmengen Q (geladene Probekugeln). An verschiedenen Feldpunkten kann die Kraftrichtung und die Kraftwirkung verschieden sein (Vektorfeld). Die Kraftrichtung wird durch die Richtung des elektrischen Feldes an dem betreffenden Punkt bestimmt. Die Kraftwirkung P auf Elektrizitätsmengen Q in einem Feld \mathcal{E} ist $P = Q \cdot \mathcal{E}$. Die Größe der Feldstärke \mathcal{E} im elektrostatischen Maßsystem ergibt sich aus der Kraftwirkung in Dyn auf die Einheit der Elektrizitätsmenge.

Nach Faraday kann man das elektrische Feld nach Richtung und Stärke durch sog. Kraft- oder Feldlinien (Einheitsröhren) beschreiben. Die Zahl der aus einer Fläche senkrecht austretenden Einheitsröhren je cm^2 gibt ein Maß für die Feldstärke.

3. Elektrische Verschiebung.

Wenn in den Luftraum eines Plattenkondensators eine Platte höherer Dielektrizitätskonstante, z. B. aus Hartgummi, geschoben wird, so

vergrößern sich in dem verbleibenden Luftzwischenraum zwischen Kondensatorplatte und Hartgummiplatte die Wirkungen des elektrischen Feldes. Zur Erklärung dieser Erscheinung im nicht homogenen Dielektrikum führte Faraday den Begriff der elektrischen Verschiebung ein. Man stellt sich vor, daß sich das Feld im Innern der Hartgummiplatte als elektrische Verschiebung ϑ quellenfrei in den Luftzwischenraum zwischen Hartgummi- und Kondensatorenplatte fortsetzt, während die elektrische Feldstärke \mathcal{E} in dem nicht von der Hartgummiplatte berührten Teil des Luftraumes (Abb. 1 oben) unverändert bleibt. Die elektrische Verschiebung ϑ wird ähnlich wie die elektrische Feldstärke durch die Zahl der Verschiebungslinien je cm^2 beschrieben. Die Verschiebungslinien gehen von positiven zu negativen Ladungen. Die elektrische Verschiebung ϑ ist also proportional der Ladungsdichte und wird direkt in C je cm^2 gemessen. Das Flächenintegral der Verschiebung $\int \vartheta df$ heißt der Verschiebungsfluß Φ_e . Er wird im praktischen Maßsystem in C gemessen. Die Änderung des Verschiebungsflusses in der Zeiteinheit $\frac{d}{dt} \int \vartheta df$ heißt der Verschiebungsstrom in A. Er hat dieselben magnetischen Wirkungen wie der elektrische Strom in Leitern. $\frac{c \vartheta}{\partial t}$ ist die Verschiebungsstromdichte.

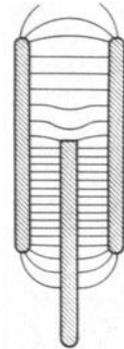


Abb. 1. Feldverteilung beim Plattenkondensator mit inhomogenem Dielektrikum.

Zwischen Feldstärke \mathcal{E} und Verschiebung ϑ besteht die Beziehung $\vartheta = \epsilon \Delta \mathcal{E}$, wobei ϵ die relative Dielektrizitätskonstante, Δ die Verschiebungskonstante bedeuten. Im elektromagnetischen Maßsystem ist $\Delta = \frac{1}{4\pi c^2}$, im praktischen Maßsystem $\Delta = \frac{10^9}{4\pi c^2}$ [F/cm], wobei $c = 3 \cdot 10^{10}$ die Lichtgeschwindigkeit in cm/s.

Die Verschiebungskonstante Δ wird auch die Dielektrizitätskonstante des leeren Raumes genannt. Es ist zahlenmäßig ausgerechnet: $\Delta = 0,884 \cdot 10^{-13}$ F/cm = $0,884 \cdot 10^{-7}$ μ F/cm.

Im Dielektrikum bildet sich demnach durch das Vorhandensein von Elektrizitätsmengen auf isolierten Leitern bei gegebener Feldstärke ein um so größerer elektrischer Verschiebungsfluß, je größer die relative Dielektrizitätskonstante ϵ des Materials ist. Faraday vertrat deshalb die Auffassung, daß die wesentlichen Vorgänge bei der Ladung und Entladung von Kondensatoren sich im Dielektrikum abspielen. Man hat die elektrische Verschiebung mit der elastischen Verformung in der Mechanik verglichen.

Feldlinien und Verschiebungslinien fallen in isotropen Körpern zusammen. Beim Übergang der Kraftlinien von einem Medium mit der relativen Dielektrizitätskonstante ϵ_1 zu einem Medium mit der relativen Dielektrizitätskonstante ϵ_2 findet eine Brechung statt. Bezeichnen α_1 und α_2 die Winkel zwischen Kraftlinienrichtung und der Normalen auf der Grenzfläche, so ist bei Abwesenheit von Ladungen

$$\text{tg } \alpha_1 : \text{tg } \alpha_2 = \epsilon_1 : \epsilon_2.$$

Der Austritt von Kraftlinien aus leitenden Körpern erfolgt annähernd senkrecht zur Grenzfläche.

4. Elektrische Spannung.

Die Arbeit, die bei der Bewegung der Einheitsladung von einem Punkt I eines elektrischen Feldes nach einem anderen Punkt II geleistet werden muß, bezeichnet man als die elektrische Spannung U zwischen den zwei Punkten: $U_{I \text{ u. } II} = \int \mathcal{E} dr$. Liegt der eine Punkt im Unendlichen, so heißt die bei der Bewegung — unabhängig vom Weg — zu leistende Arbeit das elektrische Potential φ des Punktes II . Punkte gleichen Potentials liegen auf einer sog. Äquipotential- oder Niveaufläche. Die Bewegung von Ladungen auf Niveauflächen erfordert keinen Arbeitsaufwand. Die Bewegung von Ladungen von einer Niveaufläche zur anderen erfordert, unabhängig vom Weg, den Arbeitsaufwand der Potentialdifferenz (identisch mit dem Begriff der elektrischen Spannung). Auf einer geschlossenen Kurve ist die Umlaufarbeit $\int \mathcal{E} dr = 0$. Im stationären Zustand sind die Oberflächen von Leitern Niveauflächen, im Innern von Leitern ist dann $\mathcal{E} = 0$.

Die Spannung wird im praktischen Maßsystem in Volt, dementsprechend die Feldstärke \mathcal{E} in V/cm gemessen.

5. Kapazität.

Das Verhältnis von Elektrizitätsmenge Q [C] (gleich dem Verschiebungsfluß Φ_e) und Spannung U [V] eines Kondensators heißt Kapazität: $C = Q/U$ [F] = $[10^6 \mu\text{F}]$. $1 \mu\text{F}$ ist gleich 900000 cm. Die Kapazität ist abhängig von der geometrischen Form und entsprechend dem Verschiebungsfluß Φ_e von der Dielektrizitätskonstante des Zwischenmediums. Wenn ein Luftkondensator beispielsweise in Öl gelegt wird, so erhöht sich seine Kapazität proportional mit der Dielektrizitätskonstante ϵ des Öls.

Kapazitäten können parallel oder hintereinandergeschaltet werden. Sind $C_1, C_2, C_3 \dots C_n$ Einzelkapazitäten, so gilt für die Gesamtkapazität

$$\begin{aligned} \text{bei Parallelschaltung:} \quad C_{\text{ges}} &= (C_1 + C_2 + C_3 + \dots C_n), \\ \text{bei Hintereinanderschaltung:} \quad \frac{1}{C_{\text{ges}}} &= \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots \frac{1}{C_n} \right). \end{aligned}$$

Werte von Kapazitäten und maximale Feldstärken einiger Kondensatorformen.

1. Zwei parallele ebene Flächen je mit der Oberfläche F [cm²] im Abstand a [cm]:

$$C = \frac{\epsilon \cdot F}{36 \cdot \pi \cdot a} \cdot 10^{-5} [\mu\text{F}]; \quad \mathcal{E}_{\text{max}} = \mathcal{E} = \frac{U}{a} \text{ V/cm.}$$

2. Zwei konzentrische Zylinder mit der Länge l [cm] und den Halbmessern r_1 [cm] (innerer) und r_2 [cm] (äußerer):

$$C = \frac{\epsilon \cdot l \cdot 10^{-5}}{18 \cdot \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} \cdot [\mu\text{F}]; \quad \mathcal{E}_{\text{max}} \text{ (am inneren Zylinder)} = \frac{U}{r_1 \cdot \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} \text{ V/cm.}$$

3. Zylinder (Leitungsdraht) mit Halbmesser r [cm] in Höhe h [cm] über (Zylinderachse von Erdoberfläche) Erdboden (r klein gegen h), mit lichtem Abstand d [cm]:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot l \cdot 10^{-5}}{18 \cdot \ln\left(\frac{2h}{r}\right)} [\mu\text{F}]; \quad \mathfrak{E}_{\max} = \frac{U}{r} \cdot \frac{x}{\ln\left(\frac{x+1}{x-1}\right)} \text{ V/cm, worin } x = \sqrt{1 + 2 \frac{r}{d}}.$$

4. Zwei parallele Zylinder (Leitungsdrähte) mit Halbmesser r [cm], Länge l [cm], Abstand a [cm] der Zylinderachsen und lichtem Abstand d [cm]:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot l \cdot 10^{-5}}{36 \cdot \ln\left(\frac{a}{r}\right)} [\mu\text{F}]; \quad \mathfrak{E}_{\max} = \frac{U}{2r} \cdot \frac{x}{\ln\left(\frac{x+1}{x-1}\right)} \text{ V/cm, worin } x = \sqrt{1 + \frac{4r}{d}}.$$

5. Drei parallele symmetrisch liegende Zylinder (symmetrische Drehstromleitung), Bezeichnungen wie bei 4., bezogen auf Phasenspannung:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot l \cdot 10^{-5}}{18 \cdot \ln\left(\frac{a}{r}\right)} [\mu\text{F}]$$

(nur streng gültig, wenn der Abstand der Drähte sehr klein gegenüber Abstand von Erde).

6. Einadriges Kabel (Seele gegen Mantel) von der Länge l [cm], dem Halbmesser der Leitungsseele r [cm] und dem inneren Halbmesser R [cm] des Mantels:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot l \cdot 10^{-5}}{18 \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right)} [\mu\text{F}].$$

7. Dreileiterkabel mit geerdetem Mantel von der Länge l [cm], dem Halbmesser der Leiterseele r [cm], der Entfernung a der Leiterachsen von der Kabelachse in [cm], dem inneren Halbmesser R [cm] des Mantels, Kapazität bezogen auf Sternspannung:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot l \cdot 10^{-5}}{9 \cdot \ln\left[\frac{3a^2}{r^2} \frac{(R^2 - a^2)^3}{R^3 - a^3}\right]} [\mu\text{F}].$$

6. Elektrische Energie und mechanische Kräfte elektrischen Ursprungs.

Im elektrischen Feld eines Kondensators ist bei der Spannung U [V] und einer vorhandenen Ladung Q [C] die aufgespeicherte elektrische Energie

$$W_e = \frac{1}{2} \cdot Q U = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \text{ Ws.}$$

Allgemein ist die in einem elektrischen Feld aufgespeicherte Energie

$$W_e = \frac{1}{2} \int \mathfrak{E} \cdot \vartheta \, dv.$$

Die Kraftwirkungen des elektrischen Feldes [Emde: Elektrotechn. u. Maschinenb. 1910, 33; 1916, H. 12/13] kann man sich nach Faraday als fiktive Zug-, Druck- und Schubspannungen innerhalb und zwischen den Kraftlinien denken. Sie ergeben wahrnehmbare Kräfte an den Grenzflächen von Körpern. Die Resultierende stellt sich als Differenz der auf gegenüberliegende Flächen wirkenden Kräfte dar und ist von der Größe:

$$P_2 - P_1 = \frac{\mathfrak{E}_1 + \mathfrak{E}_2}{2} \text{ Div } \vartheta - \frac{A}{2} \cdot \mathfrak{E}_1 \cdot \mathfrak{E}_2 \text{ grad } \varepsilon + \left[\text{Rot } \mathfrak{E} \cdot \frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2} \right].$$

Die Kräfte setzen sich also aus drei Teilen zusammen:

Der erste Teil setzt das gleichzeitige Vorhandensein von elektrischen Feldern und elektrischen Ladungen voraus, und ist mit der Coulombschen Kraftwirkung auf geladene Körper identisch (nach Emde: Quellenkraft). Der zweite Teil kommt zustande, wenn Körper verschiedener Dielektrizitätskonstante sich in einem elektrischen Feld befinden (Gefällskraft). Ein Beispiel für diese Kraftwirkung ist die Anziehung von Papierschnitzeln oder Holundermarkkugeln durch geladene Körper in Luft. Der dritte Teil entspricht der Kraftwirkung bei der Bewegung von Leitern in einem Magnetfeld (nach Emde: Wirbelkraft).

7. Elektrische Isoliermaterialien und elektrische Festigkeit.

Literatur: Bültemann: Dielektrisches Material. Berlin: Julius Springer 1926. Retzow: Die Eigenschaften elektrotechnischer Materialien. Berlin: Julius Springer 1927. — Schering: Die Isolierstoffe der Elektrotechnik. Berlin: Julius Springer 1924. — Schwaiger: Elektrische Festigkeitslehre. Berlin: Julius Springer 1925.

Die richtige Auswahl eines elektrischen Isoliermaterials setzt die Kenntnis der bei dem betreffenden Verwendungszweck in Frage kommenden mechanischen und elektrischen Beanspruchungen, sowie der besonderen Eigenschaften elektrischer Isoliermaterialien voraus. Die elektrische Beanspruchung ist durch die elektrische Feldstärke \mathcal{E} gegeben, der das betreffende Isoliermaterial ausgesetzt ist. Die maximale Feldstärke \mathcal{E}_{\max} hängt ab von der Spannung zwischen den Elektroden und der geometrischen Form des elektrischen Feldes. Nur bei homogenen Feldern (z. B. Plattenkondensator unendlich großer Flächenausdehnung oder bei endlicher Ausdehnung am inneren Teil der Kondensatorfläche) kann \mathcal{E}_{\max} aus Spannung und Elektrodenabstand allein bestimmt werden. Für andere Kondensatorformen (s. einige Beispiele S. 344) mit eindeutig definiertem Feldverlauf läßt sich \mathcal{E}_{\max} aus den zwischen \mathcal{E} , ϑ und C bestehenden Beziehungen berechnen. \mathcal{E}_{\max} tritt immer an den Stellen schärfster Krümmung (z. B. am inneren Zylinder eines Zylinderkondensators) sowie an Ecken und Kanten auf. Um die elektrischen Beanspruchungen möglichst klein und definierbar zu halten, müssen die Elektrodenformen einem möglichst störungsfreien und stetigen Verlauf der Niveauflächen (möglichst gleichmäßige Feldstärkegradienten) angepaßt, scharfe Ecken und Kanten tunlichst vermieden werden. Außerdem ist es in der elektrischen Isolationstechnik notwendig, gegenüber den so berechneten elektrischen Beanspruchungen einen hohen elektrischen Sicherheitsgrad einzuhalten. Bei der Hintereinanderschaltung von Isolierstoffen verschiedener Dielektrizitätskonstanten verteilt sich die Gesamtspannung auf die Einzelschichten im Verhältnis der reziproken Kapazitäten. Die Schichten kleiner Dielektrizitätskonstante werden über ihre oft geringe Durchschlagsfestigkeit hinaus noch stärker beansprucht. In der Hochspannungstechnik sucht man deshalb Schichtungen von Materialien mit sehr unterschiedlichen Dielektrizitätskonstanten zu vermeiden, abgesehen von Fällen, bei denen die Schichtung einer gleichmäßigeren Verteilung der Feldbeanspruchung dient.

Die Isolierfähigkeit der Dielektrika beruht auf der praktischen Verhinderung der freien Bewegung von Ladungen unter dem Einfluß von Feldkräften. Sie kann durch starke atomare Bindung der Valenzladungen (Kohlenwasserstoffe) oder durch sehr große Reibungswiderstände gegen die Bewegung von Ionen bedingt sein (z. B. salzartige Körper, Glimmer, Gläser, keramische Erzeugnisse mit hohem elektrischem Widerstand). Güntherschulze [Ztschr. Elektrochem. **33**, 360 (1927)] spricht bei den erstgenannten Stoffgruppen von Dielektriken, bei den letzteren Körpern von Pseudodielektriken. Die in der Praxis verwendeten Isoliermaterialien haben (mindestens infolge von Verunreinigungen) sämtlich einen endlichen, wenn auch teilweise sehr hohen elektrischen Widerstand (s. Tabelle 2, S. 351). Bei vielen bedeutsamen Isolierstoffen (z. B. der Luft und den Isolierölen) ist sogar mit dem dauernden Vorhandensein von freibeweglichen Ladungen in beschränktem Umfange zu rechnen. Die bei idealen Dielektriken denkbare Aufhebung der Isolierfähigkeit (Durchschlag) durch statische Befreiung von Valenzladungen mittels hoher Feldkräfte tritt deshalb in der Praxis gegenüber der Abspaltung von Ladungen mittels Stoßionisation durch schnellbewegte Ionen in den Hintergrund.

Bei Gasen ist stets mit dem Vorhandensein von freien Ladungen zu rechnen. Die Ladungen haben um so eher Gelegenheit, eine zur Stoßionisation ausreichende Geschwindigkeit zu erlangen, je größer die freie Weglänge ihrer Ladungen ist (Townsend). Gase mit kleinerer freier Weglänge der Elektronen haben deshalb unter sonst gleichen Umständen die größere Durchschlagsfestigkeit. Der Durchschlag erfolgt nicht sofort nach Überschreitung der dielektrischen Festigkeit, sondern braucht eine gewisse Entwicklungszeit, den sog. Entladeverzug. Die Durchschlagsfestigkeit eines bestimmten Gases wächst proportional mit dem Druck bis zu einem Maximum. Ebenso haben Gase unter stark vermindertem Gesamtdruck eine hohe dielektrische Festigkeit. Im Vakuum wird ein Durchbruch durch die Emission von Ladungen aus dem Elektrodenmaterial erst bei Feldstärken von etwa 10^8 V/cm herbeigeführt.

Die dielektrische Festigkeit der Luft kann für durchschnittlich in der Praxis vorkommende Fälle zu etwa 25 kV/cm, jedoch nicht als konstant angenommen werden. Sie ist stark abhängig vom Abstand und der Form der Elektroden und vom barometrischen Druck (fällt mit Geländehöhe) und von der Feuchtigkeit sowie von einer eventuellen Bestrahlung durch ultraviolette oder Röntgenstrahlen. Die Abhängigkeit der Durchschlagsfestigkeit der Luft vom Elektrodenabstand zeigt die folgende Tabelle 1:

Tabelle 1.

Elektrodenabstand in cm . .	0,01	0,05	0,08	0,10	0,5	1,0	10
Maximale Durchschlagsfestigkeit von Luft in kV/cm . .	95,6	52,9	46,8	44,7	34,7	31,7	26,6

Bei Überschreitung der dielektrischen Festigkeit der Luft bildet sich zunächst eine Glimmerscheinung (Corona) bis zu einer solchen

Ausdehnung aus, daß die Feldstärke am Rande der Corona eben gleich der Durchbruchfeldstärke der Luft ist. Eine weitere Steigerung der Feldstärke führt schließlich zum Durchschlag. Die Gleitfunkenentladungen an Grenzflächen zwischen Luft und festen Isolierstoffen (starke thermische Beanspruchung der Isolierstoffe) beruhen auf einer Überbeanspruchung der Luftstrecke.

Auch der Durchschlag von flüssigen Isoliermaterialien scheint ähnlich wie bei den Gasen unter Mitwirkung freier, sich unter dem Einfluß der Feldstärke stark vermehrender Ionen zu erfolgen. Der Entladeverzug ist noch ausgeprägter als bei Gasen (für kurzzeitige hohe Beanspruchungen der praktischen Isolierstoffe von hoher Bedeutung). Die zur Zeit technisch wichtigsten flüssigen Isolierstoffe sind die raffinierten Mineralöle, an deren Eigenschaften und Verwendung für Transformatoren und Schalter durch VDE¹-Vorschriften bestimmte Forderungen gestellt werden. Die Durchschlagsfestigkeit von Transformatorölen soll im Betrieb im Mittel 80 kV/cm, gereinigt 125 kV/cm betragen. Sie wird durch Wassergehalt außerordentlich erniedrigt.

Von den festen Isolierstoffen besitzen eigentlich nur die reinen Kohlenwasserstoffe annähernd die bei echten Dielektriken vorauszusetzenden dielektrischen Eigenschaften, während man die natürlichen und künstlichen Mineralien sowie eine Reihe anderer anorganischer und organischer Körper zu den Pseudodielektriken (s. S. 347) einreihen muß. Die Eigenschaften der Isolierstoffe werden durch Verunreinigungen, insbesondere Wasseraufnahme und Lufteinschlüsse (Dielektrizitätskonstante 1, chemische und thermische Wirkungen von Glimmerscheinungen bei einer Überanstrengung der eingeschlossenen Luft) wesentlich verschlechtert. Bei Hochspannung muß deshalb auf trockene Isoliermaterialien (möglichste Verhinderung der Feuchtigkeitsaufnahme durch geeignete Tränkung, Lackierung, Luftabschluß usw.) und Abwesenheit von Lufteinschlüssen (Wärmebehandlung unter Vakuum, sattes Aufliegen der Elektroden auf Isoliermaterialien) geachtet werden. Leitende oder feuchte Ablagerungen auf der Oberfläche von Isolierstoffen werden durch geeignete Formgebung möglichst verhindert. (Vertikale Isolierstrecken in Hochspannungsschaltgeräten, unbenetzte Zwischenstrecken an Freiluftisolatoren.)

8. Ableitungs- und dielektrische Verluste.

Nur ideale Dielektriken gestatten verlustfrei die Änderung elektrischer Feldzustände. Diese sind mit Ladungsänderungen verbunden. Bei allen praktischen Dielektriken ist die Änderung, ja schon das Vorhandensein elektrischer Felder, mit Energieverlusten verbunden, die sich in Wärmeerscheinungen auswirken. Bei Gleichfeldern kann man nach dem Abklingen des Einschaltstromes einen durch das Dielektrikum fließenden Dauerstrom (Ableitungsstrom) beobachten, der dessen Leitfähigkeit entspricht. Nicht homogene Dielektriken — es gibt praktisch keine vollständig homogenen Isolierstoffe — zeigen weiter die Erscheinungen der

¹ VDE = Verein Deutscher Elektrotechniker.

Nachladung bzw. des Ladungsrückstandes, welche durch die sich allmählich vollziehende Ansammlung bzw. Abgabe von Ladungen an den Grenzflächen zwischen der Grundsubstanz und den eingelagerten Zusatzstoffen mit anderen dielektrischen Eigenschaften bedingt sind. Die Zeitkonstanten derartiger Grenzflächenauf Ladungen sind groß genug, um bei den technischen und Hörfrequenzen Wirkungen zuzulassen. Die Struktur mancher Stoffe läßt auch die Auswirkung von Polarisationserscheinungen im Dielektrikum vermöge der polaren Eigenschaften der Moleküle bzw. von Molekülansammlungen vermuten. In Wechselfeldern treten demnach zu den Verlusten infolge des endlichen Isolationswiderstandes noch die durch die beschriebenen Erscheinungen erklärbaren dielektrischen Verluste hinzu. Diese übersteigen die durch die reine Gleichstromleitfähigkeit bedingten Verluste wesentlich, oft um einige Zehnerpotenzen. Bei dem Ladestrom läßt sich damit neben einer

wattlosen Komponente (reiner Ladestrom) eine Wattkomponente feststellen, die sich aus dem reinen Leitungsstrom i_l und dem dielektrischen Verluststrom i_v zusammensetzt. [Näheres über Wirk- und Blindströme s. Abschnitt D: Wechselströme und Ausgleichvorgänge, S. 363]. Das Verhältnis von dielektrischem Verluststrom und der reinen Blindkomponente des Ladestromes heißt in der Technik der Verlustfaktor oder der dielektrische Leistungsfaktor. Unter dem Verlustwinkel versteht man nach Abb. 2 das Komplement des Phasenwinkels, den der vom reinen Gleichstromableitungsstrom befreite Kondensatorstromvektor mit der zugehörigen Klemmenspannung einschließt. Im Laufe der Zeit können sich die dielektrischen Verluste von Isolierstoffen (z. B. durch Feuchtigkeitsaufnahme) wesentlich erhöhen. Für die praktische Anwendung von Isolierstoffen sind außer den erwähnten Eigenschaften (Dielektrizitätskonstante, Durchschlagsfestigkeit, Gleichstromleitfähigkeit, dielektrischer Verlustwinkel, Wasseraufnahme), insbesondere die Wärmebeständigkeit, die Glutsicherheit, die Widerstandsfähigkeit gegen chemische Einflüsse, und die mechanische Festigkeit von Bedeutung. Die wichtigsten Eigenschaften einiger Isolierstoffe sind in Tabelle 2, S. 350 u. 351 zusammengestellt.

Für die verschiedenen Isoliermaterialien lassen sich die folgenden Verwendungsgebiete abgrenzen:

a) Natürliche Mineralien: Glimmer und Glimmerpräparate für Wicklungs isolation elektrischer Maschinen und Heizgeräte. Wärmebeständigkeit bis 650°C , hohe chemische Beständigkeit, leichte Formbarkeit, besonders in Verbindung mit Papier und Klebemittel.

Marmor für Schalttafeln und Sockel (neuerdings von geringerer Bedeutung). Schiefer.

b) Anorganische Isolierstoffe: Porzellan für Leitungs isolatoren und Installationsmaterial. Leichte Formbarkeit vor dem Brennen,

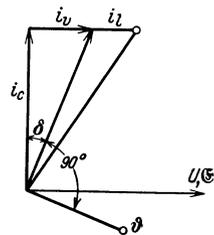


Abb. 2. Vektordiagramm für Ströme und Spannungen im Dielektrikum. i_l reiner Gleichstromableitungsstrom; i_v dielektrischer Verluststrom; i_c reiner Ladestrom des mit Verlusten behafteten Kondensators; δ Verlustwinkel.

Tabelle 2. Eigenschaften

Werkstoff	Raumgewicht kg/dm ³	Dielektrizitätskonstante	Durchschlagsfestigkeit kV/mm	Gleichstromleitfähigkeit s. (cm) ⁻¹ bei 20° C
Hartpapier	1,3—1,4	3,5—5	10—20	
Bakelit mit Holzmehl	1,2	4,5—5,5	1,4—6,0	
Bakelit mit Asbest	1,8—2	2,5—3,0	0,9—7,0	
Bienenwachs	—	—	—	5—16 · 10 ⁻¹⁶
Ceresin	—	2,1—2,2	—	2 · 10 ⁻¹⁹
Cellon	1,2—1,35	3,5	18—27	—
Fiber (Hydratcellulose)	1,2—1,4	—	1—3	10 ⁻¹⁰
Fensterglas	2,4—2,6	5—8	10—40	10 ⁻¹⁴
Minosglas	3,6	8	250	10 ⁻¹²
Glimmer, farblos	2,5	5—8	20—30	10 ⁻¹⁸
Mikanit	2,4—2,6	4,5—5,5	20—30	10 ⁻¹⁵
Hartgummi	1,2—1,5	2,5—3,5	3,0—90	10 ⁻¹⁸
Kautschuk, rein	0,92—0,96	2,12	—	—
Kolophonium	1,07	2,5	—	10 ⁻¹⁷
Marmor (karrar.)	2,72	8,3	—	10 ⁻¹¹
Mineralöl	0,89—0,96	2,2	8,0—12,5	—
Melalith	2,2	—	6,0—8,0	—
Ölleinen	1,1—1,35	—	5—6	—
Ölseide	1,1—1,35	—	30—50	—
Papier	0,70—1,15	1,8—2,6	10—13	—
Paraffin	0,87—0,91	2,1—2,2	—	10 ⁻¹⁶ —10 ⁻⁹
Porzellan	2,3—2,5	4,4	10,0—15,0	0,5 · 10 ⁻¹⁵
Schellack	—	2,7—3,7	—	10 ⁻¹⁶
Schiefer	2,65—2,70	—	—	10 ⁻⁸
Steatit	—	—	10,0—17,0	—

Schwund beim Brennen 18—20%. Die elektrische Leitfähigkeit ist gemäß nachstehender Tabelle 3 stark temperaturabhängig:

Tabelle 3.

° C	50	70	160	190	400	1000	2100
Leitfähigkeit (cm) ⁻¹ . . .	0,46 · 10 ⁻¹⁵	0,25 · 10 ⁻¹³	0,58 · 10 ⁻¹²	0,56 · 10 ⁻¹¹	0,05 · 10 ⁻⁶	1,1 · 10 ⁻⁶	1,3 · 10 ⁻⁶

Steatit hat vor Porzellan den Vorteil kleineren Schwunds beim Brennen (1%) und höherer mechanischer Festigkeit.

c) Organische Isolierstoffe: Papier (möglichst gleichmäßige Stärke, hohe Reißfestigkeit) für Spulenisolation elektrischer Maschinen und Transformatoren, verarbeitet zu Preßspan, Hartpapier (s. VDE-Leitsätze). Wichtig ist möglichste Verhinderung der Wasseraufnahme.

von Isolierstoffen.

bei Frequenz f	Dielektrischer Verlustfaktor $10^3 \operatorname{tg} \delta$	Oberflächenwiderstand in Luft je cm	Druckfestigkeit kg/cm^2	Zugfestigkeit kg/cm^2	Biegefestigkeit kg/cm^2	Schlagbiegefestigkeit cm kg/cm^2
—	—	$40000 \cdot 10^6$	2500	750	800—1200	28—30*
{ 800	8—300	10^{12}	—	—	700	10
		$50 \cdot 10^9$	—	—	600	—14
		—	—	—	—	—
		—	—	—	—	—
{ 500	5	—	—	—	—	
{ 5000	20	—	—	—	—	
500	0,02	$10^8—10^{12}$	—	—	—	—
1000	20—50	10^9	—	200—300	200—300	—
—	—	$0,2 \cdot 10^9$	—	{ längs 700	{ 1400	—
—	1—10	$0,2 \cdot 10^8$	—	{ quer 400	{ 900	—
—	0,6	—	—	—	—	—
50	0,3—2,0	$5 \cdot 10^9$	—	—	—	—
{ 1000	0,2—1,0	—	—	—	—	—
{ 1000	10—100	—	—	—	—	—
500	0,25—3	10^9	—	200—600	400—1000	5—20
800	11—30	—	—	—	—	—
—	—	$200 \cdot 10^{12}$	—	—	—	—
—	—	$0,1—0,3 \cdot 10^8$	—	—	—	—
50	3—200	—	—	—	—	—
—	—	—	bis 7500	230—260	700—900	1,8—1,9
—	—	—	—	{ längs { 250—450	—	—
—	—	—	—	{ 200—350	—	—
—	—	—	—	—	—	—
800	0,05	$7000 \cdot 10^{12}$	—	—	—	—
—	—	$0,6 \cdot 10^9$	1000—3800	200—250	400—900	1,5—1,9
—	—	10^{10}	—	—	—	—
—	—	$0,1 \cdot 10^8$	—	—	—	—
—	—	—	bis 8500	300—330	800—1000	2,3—2,8

Baumwolle und Seide als Bespinnung, Umklöppelung oder Gewebe in Verbindung mit geeigneten Tränkmassen und Lacken. Holz, in Öl gekocht, insbesondere unter Öl für Transformatoren und Schaltgeräte. Gummi, infolge seiner hohen elastischen Dehnbarkeit besonders geeignet für Drähte und Kabel, gute Durchschlagsfestigkeit, jedoch nur geringe Wärmebeständigkeit (bis 55° C, Spezialsorten bis 100° C), hohe dielektrische Verluste, Neigung zur Alterung, Nachvulkanisation.

Isolierpreßstoffe: meist Kondensationsprodukte wie die der Phenole mit Aldehyden (Bakelit), und Harnstoff sowie einige Polymerisationsprodukte, mit Füllmitteln wie Kaolin, Marmormehl und Faserstoffen (Asbest, Papier, Leinenschnitzel). Sie lassen sich in warmem Zustand unter hohem Druck in Formen pressen. Sie sind beständig gegen Öl, Benzin und Benzol, weitgehend gegen Säuren, jedoch nicht beständig gegen Alkalien und Ätzalkalien. Je nach Zusammensetzung und

* Je nach Bakelitgehalt und Härtung.

Fabrikation (Härtung) bestehen große Unterschiede in der Wasseraufnahme (0—25%), der Hitzebeständigkeit und den mechanischen Eigenschaften. Verwendung für Installationsmaterialien, Schutzgehäuse usw. Isolierlacke aus Kopal (fossile Harze) oder Kunstharzen, Ölen und Trockenmitteln (harz- bzw. leinölsaure Verbindungen mit Metallen, z. B. Mn, Pb, Co), sowie Kautschuk-, Nitrocellulose-, Acetylcellulose- (am besten Cellulosetriacetat) und andere Cellulosederivate. Zur Erzielung einer gewissen Elastizität werden sog. „Weichmacher“ zugesetzt. Je nachdem der Erhärtungsvorgang bei Zimmertemperatur oder bei höheren Temperaturen vor sich geht, unterscheidet man Luftlacke und Ofenlacke. Von guten Isolierlacken erwartet man leichtes Eindringen in Gewebe, gute Haftfestigkeit, gleichmäßiges Trocknen ohne Schädigung von Geweben oder Metallen, möglichst Wasserundurchlässigkeit. Die Eigenschaften der obenerwähnten Isolierlacke zeigen große Unterschiede.

B. Der Gleichstrom.

Bei der Elektrizitätsleitung unterscheidet man Leiter erster und zweiter Klasse. Die Leiter erster Klasse (Metalle) gestatten den Stromdurchgang durch die Bewegung freier Elektronen unter dem Einfluß elektrischer Felder, ohne daß damit im allgemeinen eine auffällige Veränderung der chemischen Beschaffenheit des Leiters verbunden wäre. Leiter zweiter Klasse sind immer chemische Verbindungen (nie reine Elemente oder deren Legierungen), bei denen der Elektrizitätstransport stets mit Verschiebung von Materie verknüpft ist.

1. Ohmsches Gesetz.

Ein Strom I Ampere [A], der durch einen metallisch leitenden Widerstand (Leiter erster Klasse) R Ohm [Ω] fließt, beansprucht nach dem Ohmschen Gesetz die Spannung $U = I \cdot R$ Volt [V]. Der Ohmsche Widerstand eines l [m] langen Leiters mit dem durchgehend gleichen Querschnitt q [mm²] ist bei dem spezifischen Widerstand ρ [Ω mm²/m] des Leitermaterials für Gleichstrom: $R_{gl} = \rho \cdot l/q$ [Ω]; für Wechselstrom vergrößert sich der Widerstand um den Wirbelstromfaktor ε zu $R_w = \varepsilon \cdot \rho \cdot l/q$ [Ω]. Der spezifische Widerstand ρ wird meist auf 20° C bezogen. Er ist bei einer beliebigen Temperatur t angenähert $\rho_t = \rho_{20} [1 + \alpha (t - 20)]$. α ist der Temperaturkoeffizient bei 20° C für die Änderung des spezifischen Widerstandes bei 1° Temperaturänderung. Er ist für eine beliebige Bezugstemperatur t : $\alpha' = \alpha/[1 + \alpha (t - 20)]$.

Spezifische Leitfähigkeiten von Isolierstoffen siehe Abschnitt A, S. 350 sowie Deutscher Kalender für Elektrotechniker, S. 75 bis 76. München: R. Oldenbourg 1925/26.

Joulesches Gesetz. Beim Fließen des Stromes I [A] durch den Widerstand R [Ω] wird je s: $N = I^2 \cdot R = U \cdot I$ [W] in Wärme umgesetzt. Die in t [s] entstehende Wärmemenge ist $Q = 0,2390 \cdot I^2 \cdot R \cdot t$ [cal]. Diese Wärme kann für elektrische Heizungen, Schweißen, Schmelzen u. dgl. ausgenutzt werden; in vielen Fällen ergibt sie einen unerwünschten

Tabelle 4. Spezifischer Widerstand [$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$] und Temperaturkoeffizient bei 20°. [Nach Hütte, 26. Auf., Bd. 2, S. 961.]

Stoff	ϱ_{20}	100 α_{20}	Stoff	ϱ_{20}	100 α_{20}
Aluminium . .	0,03—0,04	0,36	Messingdraht . .	0,07—0,08	0,13—0,19
Aluminiumdraht (mit 99,6% Al)	0,029	0,40	Neusilber	0,35—0,41	0,007
Aluminium- bronze (Cu mit 5—10% Al) . .	0,13—0,29	0,06—0,1	Nickel	0,09—0,11	0,44
Blei	0,208	0,40	Nickelin	0,4—0,44	0,018—0,021
Eisen (99,9 bis 99,0% Fe) . .	0,10—0,15	0,45	Platin	0,10—0,11	0,38—0,39
Eisenblech . . .	0,13	0,45	Quecksilber . . .	0,958	0,090
Eisenblech, le- giert (1,0—5% Si-Gehalt) . .	0,27—0,67	—	Silber	0,0165	0,36
Eisen, gegossen .	rd. 0,6—1,6	—	Stahl	0,10—0,25	0,45—0,5
Gold	0,023	0,38	Stahldraht . . .	0,17	0,52
Konstantan . . .	0,49—0,51	—0,005	Tantal	0,16	0,3
Kupfer für Lei- tungen	0,0178	0,392	Wismut	1,2	0,4
Kupfer für Wick- lungen	0,0172	0,392	Wolfram	0,055	0,4
Manganin	0,42	$\pm 0,001$	Zink	0,063	0,37
			Zinn	0,12	0,44
			Gaskohle	rd. 100	—0,03—0,08
			Bogenlampen- kohle	50—90	—
			Kohlebürsten . .	40—75	—
			Graphitbürsten .	12—40	—
			Kupferkohle- bürsten	0,12—4,5	—

Leitungsverlust. Bei Kurzschluß kann sie zur Zerstörung von Leiter-
teilen führen (Schutz hiervoor durch Einbau von Schmelzsicherungen,
automatischen Schaltern oder entsprechende Leiterbemessung).

Verschiedene Einzelwiderstände R_1, R_2, \dots, R_n ergeben bei Hinterein-
anderschaltung einen Gesamtwiderstand $R_{\text{ges}} = (R_1 + R_2 + \dots + R_n) \Omega$;
bei Parallelschaltung errechnet sich der Gesamtwiderstand aus

$$\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \right) \Omega.$$

2. Kirchhoffsche Gesetze.

1. Kirchhoffsches Gesetz. Die Summe aller in einem geschlossenen
Stromkreis wirkenden Spannungen ist gleich Null. Hierbei sind treibende
Spannungen als positiv, durch Widerstände verursachte
als negativ einzusetzen.

2. Kirchhoffsches Gesetz. Für jeden Verzwei-
gungspunkt muß die Summe der zufließenden, gleich
der Summe der wegfließenden Ströme sein.

Die Kirchhoffschen Gesetze werden z. B. in der
Wheatstoneschen Brücke (Abb. 3) zur Bestimmung
unbekannter Widerstände benutzt (Kabelfehlerorts-
bestimmung). Zeigt ein Nullindicator in der Brücke
keinen Ausschlag, so ist der unbekannte Widerstand
 $x = b \cdot c/a$.

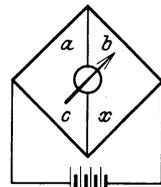


Abb. 3. Wheat-
stonesche
Brücke.

Die obigen Gesetze gelten zunächst für Gleichstrom und bei induk-
tionsfreien Widerständen auch für Wechselströme [Näheres hierfür s.
Abschnitt D, S. 363].

3. Die Elektrizitätsleitung in Gasen

[v. Engel u. Steenbeck: Elektrische Gasentladungen. Berlin: Julius Springer 1932] (Abb. 4) beruht auf Ionenwanderung. Die Ionen können durch sog. Ionisatoren (Röntgenstrahlen, Radiumstrahlen u. dgl.) in dem Gasraum erzeugt oder etwa durch Emission glühender Metalloberflächen in den Raum befördert werden (unselbständige Gasströmung). Der Strom wächst zunächst proportional mit der Feldstärke und nähert sich durch Bildung von Gegenfeldern (Raumladeeffekt nach

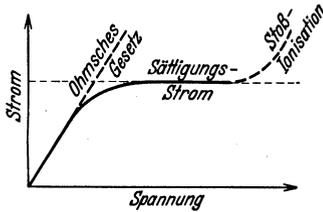


Abb. 4. Strom- und Spannungsverlauf bei Gasentladungen.

Langmuir und Schottky) einem Sättigungswert. Über einer gewissen Feldstärke erlangen vorhandene Ionen eine sehr hohe Geschwindigkeit, die sie zur Spaltung von Gasmolekülen befähigt (Stoßionisation). Bei einer darauf entstehenden Strömung spricht man von selbständiger Leitung. Lade- und Ausgleichströme siehe Abschnitt D, S. 367 dieses Kapitels.

C. Magnetisches Feld und Induktionsgesetz.

1. Einheitspol, magnetische Feldstärke.

Der Definition der Einheitsladung im elektrischen Feld entspricht im magnetischen der punktförmig gedachte Einheitspol. Er übt auf den gleichen Einheitspol im Abstand 1 cm die Kraft 1 Dyn aus. Für die Kraftwirkung zwischen zwei punktförmigen Magnetpolen mit den Polstärken m_1 und m_2 im Abstand r cm gilt das Coulombsche Gesetz $|P| = m_1 \cdot m_2 / r^2$. Gleichnamige Pole stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an. In der Umgebung von Magneten befinden sich magnetische Felder, die sich durch Feldlinien vom Nordpol zum Südpol darstellen und durch Aufstreuen von Eisenfeilspänen veranschaulichen lassen. Sie geben durch ihre Richtung für jeden Punkt die Richtung der magnetischen Feldstärke und durch ihre Dichte die Feldstärke an. Die Einheit der magnetischen Feldstärke \mathfrak{H} ist an einem Punkt vorhanden, wenn hier die Poleinheit die Kraftwirkung 1 Dyn erfährt. Diese Einheit heißt im elektromagnetischen Maßsystem 1 Oerstedt oder auch 1 Kraftlinie je cm^2 .

2. Magnetische Felder elektrischer Ströme.

Der Erzeugung magnetischer Felder durch elektrische Ströme kommt in der Praxis gegenüber der Erzeugung durch permanente Magnete eine erhöhte Bedeutung zu. Man stellt sich vor, daß um jeden stromdurchflossenen Leiter magnetische Feldlinien in Form geschlossener Kurven vorhanden sind. Die Richtung der Feldlinien ist dem Stromverlauf im Sinne einer rechtsgängigen Schraube zugeordnet. Es zeigt sich, daß das Randintegral der magnetischen Feldstärke \mathfrak{H} auf irgendeiner geschlossenen Kurve um den Leiter bei einem bestimmten durchgehenden Strom I stets denselben Wert besitzt. Die magnetische Umlaufspannung

$\oint \mathfrak{H} \cdot dl$ ist gleich der elektrischen Durchflutung, d. h. gleich der Summe der Ströme, welche durch die von der Umlaufkurve begrenzte Fläche hindurchtreten. Damit lautet das Durchflutungsgesetz:

$$\oint \mathfrak{H} dl = 0,4 \pi \cdot \Sigma I,$$

wobei I in A, l in cm einzusetzen sind. Häufig wird die magnetische Feldstärke \mathfrak{H}' im praktischen Maßsystem entsprechend obiger Beziehung durch A/cm, oder bei verschiedenen Windungen, die denselben Strom führen, in Amperewindungen pro cm angegeben.

Das magnetische Feld eines unendlich langen geraden Leiters vom Halbmesser a cm ist im Abstand r cm von der Leiterachse,

$$\text{bei } r > a: \mathfrak{H} = 0,2 \cdot \frac{I}{r} \text{ Feldlinien pro cm}^2 \text{ (} I \text{ in A),}$$

$$\text{bei } r < a: \mathfrak{H} = 0,2 \cdot \frac{Ir}{a^2} \text{ Feldlinien pro cm}^2 \text{ (} I \text{ in A).}$$

Das magnetische Feld einer kreisförmigen Ringspule mit w -Windungen ist im Innern des Ringes $\mathfrak{H} = 0,4 \cdot \pi \cdot w \cdot I/l = 0,2 \cdot w \cdot I/r$, außerhalb des Ringes $\mathfrak{H} = 0$, wobei r den Halbmesser des Rings, $2\pi l$ den mittleren Feldlinienweg je in cm bedeuten.

Weitere Beispiele siehe Deutscher Kalender für Elektrotechniker 1925/26.

3. Magnetische Induktion \mathfrak{B} .

Wird in ein magnetisches Feld, z. B. das einer Ringspule, ein Eisenstück hineingelegt, das quer zum Kraftlinienfluß geschlitzt ist, so zeigt sich in diesem Schlitz gegenüber dem gleichgebliebenen Feld \mathfrak{H} außerhalb des Eisens eine bedeutende Feldverstärkung. Man nimmt nun an, daß die magnetische Feldstärke \mathfrak{H} im Innern des Eisens eine magnetische Induktion \mathfrak{B} zur Folge hat, welche sich in den Schlitz hinein quellenfrei fortsetzt, und im elektro-magnetischen Maß zu der magnetischen Feldstärke die Beziehung besitzt: $\mathfrak{B} = \mu \cdot \mathfrak{H}$.

Die Einheit der Induktion befindet sich im Abstand 1 cm vom Einheitspol und heißt 1 Gauß. μ heißt die Permeabilität.

Abgesehen von magnetischen Feldern in Krystallen fallen die Richtungen von Induktion \mathfrak{B} und Feldstärke \mathfrak{H} an jedem Punkt zusammen. Man kann deshalb auch \mathfrak{B} durch die Zahl der Induktionslinien je cm^2 oder der Einheitsröhren je cm^2 definieren, welche in Luft mit den Feldlinien identisch sind. Die Zahl der Induktionslinien, welche durch eine Fläche F cm^2 senkrecht hindurchtreten, bezeichnet den Induktionsfluß $\Phi = \int \mathfrak{B} df$ Maxwell. Der Fluß 1 Maxwell entsteht bei der Induktion $\mathfrak{B} = 1$ Gauß senkrecht zur Fläche 1 cm^2 . Beim Übergang von einem Körper mit der Permeabilität μ_1 in einen anderen mit der Permeabilität μ_2 findet eine Brechung der Induktionslinien statt. Bezeichnen α_1 und α_2 die Winkel zwischen Induktionslinienrichtung und der Normalen auf der Grenzfläche, so ist $\text{tg } \alpha_1 : \text{tg } \alpha_2 = \mu_1 : \mu_2$. Der Übergang von Eisen in Luft erfolgt fast senkrecht zur Grenzfläche. Im Vakuum und nahezu auch in Luft ist $\mu = 1$. Stoffe, bei denen

$\mu > 1$, heißen paramagnetisch, solche mit $\mu < 1$ (jedoch stets positiv) heißen diamagnetisch.

4. Ferromagnetismus.

In den sog. ferromagnetischen Stoffen (Eisen, Kobalt, Nickel und einige [z. B. Heuslersche] Legierungen) ist μ nicht konstant. Das Verhältnis von \mathfrak{B} und \mathfrak{H} wird für diese Stoffe durch sog. Magnetisierungskurven ausgedrückt. Sie zeigen zunächst angenäherte Proportionalität zwischen \mathfrak{B} und \mathfrak{H} , bei größer werdendem \mathfrak{B} Sättigungserscheinungen, welche bei Steigerung von \mathfrak{B} einen unverhältnismäßigen Magnetisierungsaufwand bedingen (Kurve *a*, Abb. 5). In Abb. 5 ist eine sog. Permeabilitätskurve für Eisen wiedergegeben. Sie beginnt mit der Anfangspermeabilität μ_0 (Größenordnung einige Hundert bis 10000) und steigt

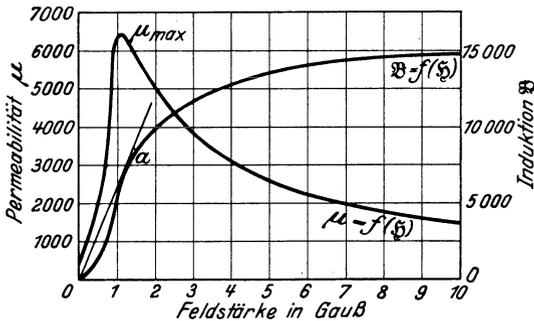


Abb. 5. Induktions- und Permeabilitätskurve.

zu einer Maximalpermeabilität μ_{max} , um dann langsam zu fallen.

An Stelle von Magnetisierungskurven für verschiedene Eisensorten werden auch Zahlentafeln verwendet, Tabelle 5 gibt Mittelwerte für verschiedene Eisensorten [nach Hütte, 26. Aufl., Bd. 2, S. 973].

Tabelle 5. Magnetisierungstafel für verschiedene Eisensorten.

\mathfrak{B}	\mathfrak{H}' in A/cm		\mathfrak{B}	\mathfrak{H}' in A/cm		\mathfrak{B}	\mathfrak{H}'	\mathfrak{B}	\mathfrak{H}'
	Dynamo-blech und Stahlguß	Guß-eisen		Dynamo-blech und Stahlguß	Guß-eisen				
1000	—	2,5	9000	4,7	80	13500	12,3	17500	92
2000	—	5,0	10000	5,7	120	14000	15,4	18000	117
			10500	6,2	150	14500	19,6	18500	146
3000	1,0	8,0	11000	6,8	170	15000	24	19000	181
4000	1,4	12	11500	7,4	200	15500	32	19500	225
5000	1,9	17	12000	8,2	240	16000	42	20000	280
6000	2,4	25	12500	9,0	—	16500	54	20500	350
7000	3,1	37	13000	—	—	—	—	21000	450
8000	3,8	56	—	10,4	—	17000	72	22000	780

Genauere Werte, insbesondere auch für Legierungen siehe Gumlich: Leitfaden der magnetischen Messungen. Braunschweig: F. Vieweg & Sohn 1918.

a) Hysteresis.

Läßt man nach einer Magnetisierung die Feldstärke \mathfrak{H} wieder langsam abnehmen, so folgt die Abhängigkeit von \mathfrak{H} und \mathfrak{B} nicht der „jungfräulichen“ Magnetisierungskurve (Abb. 6). Auch bei $\mathfrak{H} = 0$ ist noch

eine gewisse Induktion \mathfrak{B}_r (remanenter Magnetismus) vorhanden. Erst nach einer Umkehr der Magnetisierung in einem gewissen Umfange (Koerzitivkraft \mathfrak{H}_c) erreicht man die Aufhebung des remanenten Magnetismus \mathfrak{B}_r . Ein voller Wechsel zwischen $+\mathfrak{H}$ und $-\mathfrak{H}$ ergibt die sog. Hysteresisschleife, deren Inhalt die durch die Ummagnetisierung verbrauchte Arbeit $\frac{1}{4\pi} \int \mathfrak{H} d\mathfrak{B}$ Erg/cm³ anzeigt, die sich in Wärme umsetzt. Die Ummagnetisierungswärme (bei Luft gleich Null) folgt nach R. Richter bei der Frequenz f der Formel

$$V_{\text{hyst}} = \varepsilon \cdot \left(\frac{f}{100}\right) \cdot \left(\frac{\mathfrak{B}_{\text{max}}}{10000}\right)^2 \text{ W/kg}.$$

ε ist eine Materialkonstante (s. Tabelle 6).

Stoffe hoher Maximalpermeabilität haben steile Magnetisierungskurven und meist schmale Hysteresisschleifen, also hohe Remanenz, kleine Koerzitivkraft und geringe Hysteresisverluste. Solche Stoffe heißen magnetisch weich im Gegensatz zu Stoffen mit geringer Permeabilität und breiter Hysteresisschleife, die man als magnetisch hart bezeichnet. Stahl ist magnetisch härter als reines

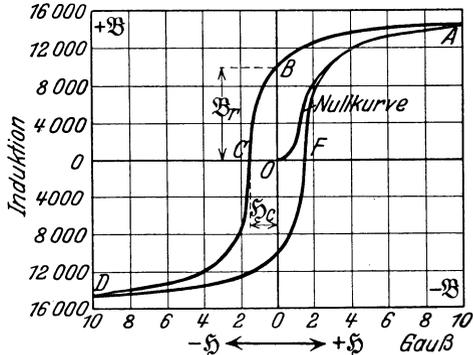


Abb. 6. Hysteresisschleife.

Eisen. Die sog. hochmagnetischen Legierungen aus Nickeleisen (z. B. Permalloy C, Permenorm 4801, Mumetall, Megaperm 4510 und 6510, beziehbar von Heraeus-Vakuumschmelze, Hanau a. M.), besitzen besonders hohe Anfangspermeabilitäten oder auch hohe Maximalpermeabilitäten (Abb. 7). Chemisch reines sog. Carbonyleisen (I. G. Farbenindustrie) [F. Duftschmid, L. Schlecht u. W. Schubhardt: Die technische Verarbeitung von pulverförmigem Carbonyleisen nach dem Sinterverfahren. Stahl u. Eisen 52, 845 (1932)] besitzt eine Koerzitivkraft 0,08 Gauß, eine Anfangspermeabilität von 2000—3000, eine Maximalpermeabilität von

Tabelle 6. Permeabilität gesinterner Nickel-Eisenlegierungen, gemessen an gewalztem, 0,35 mm starkem Band.

Feldstärken in Oersted	4 h auf 1100° erhitzt und langsam abgekühlt		4 h auf 1100° und nach Abkühlung auf 650° an der Luft abgeschreckt 78% Ni, 22% Fe
	42% Ni 58% Fe	50% Ni 50% Fe	
0,005	9500	8200	14700
0,010	13600	13250	27300
0,025	24200	33000	80100
0,050	31000	55500	—
0,100	32000	—	—
Maximalpermeabilität	33200	56200	85900
Erreicht bei Feldstärke	0,078	0,056	0,029
Koerzitivkraft	0,038	0,037	0,021

besitzt eine Koerzitivkraft 0,08 Gauß, eine Anfangspermeabilität von 2000—3000, eine Maximalpermeabilität von

20000, eine Remanenz von 6000 und ist bei 22000 Gauß gesättigt. Gesinterte und zu Blechen oder Bändern gewalzte Carbonyl-Nickel-

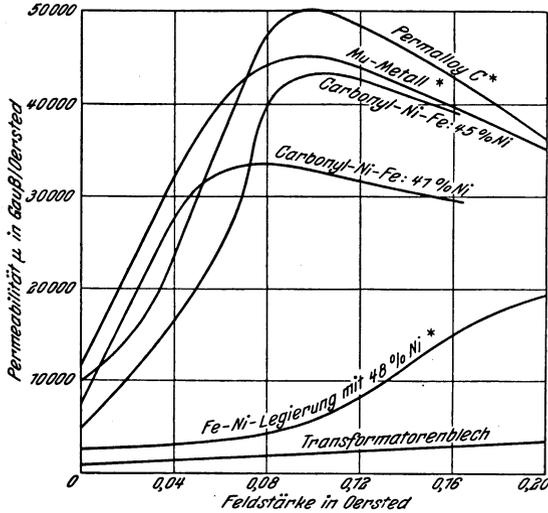


Abb. 7. Permeabilitätskurven einiger hochmagnetischer Legierungen.

Eisenlegierungen zeigen die aus Abb. 7 und der vorstehende Tabelle 6 ersichtlichen Eigenschaften, die sie in besonderem Maße zur Verwendung für Meßgeräte, Meßwandler, Pupinspulen usw. geeignet machen.

b) Wirbelströme.

Durch magnetische Wechselfelder (s. Abschnitt D, S.363) werden im Eisen elektrische Spannungen in Ebenen senkrecht zur Feldrichtung induziert, die nach dem Ohmschen Gesetz je nach dem spezifischen

Widerstand des Leitermaterials Wirbelströme und damit Wärmeverluste zur Folge haben. Zu ihrer Verringerung werden die Eisenkörper aus dünnen Blechen (0,35—0,5 mm dick), die entweder durch Papier oder die oberflächliche Zunderschicht voneinander isoliert sind, zusammengesetzt (lamelliert). Außerdem wird den Blechen durch geeignete Beimengungen (legierte Bleche) ein höherer elektrischer Widerstand gegeben. Die gesamten Eisenverluste sind nach Richter [Elektrische Maschinen, S. 152 bzw. 157. Berlin: Julius Springer 1924]

$$V_{ges} = \left[\varepsilon \cdot \left(\frac{f}{100} \right) + \sigma \left(\frac{f}{100} \right)^2 \right] \cdot \left(\frac{\mathcal{B}_{max}}{10000} \right)^2 \text{ W/kg.}$$

Die Werte ε und σ nehmen für legierte Bleche die Werte nach Ta-

Tabelle 7. Verlustkonstanten für Eisenbleche.

Blechsorte	Dicke mm	ε	σ	V 10 W/kg	V 15 W/kg
Dynamoblech	0,35	4,7	3,2	3,2	7,1
	0,5	4,4	5,6	3,6	8,1
Hochlegiertes Blech	0,35	2,4	0,6	1,35	3,0

belle 7 an, in der außerdem die sog. Verlustziffern V_{10} und V_{15} (gesamte Eisenverluste bei $\mathcal{B}_{max} = 10000$ und 15000 für $f = 50$ und 20°C , Näheres s. VDE-Vorschriften) enthalten sind.

c) Temperaturabhängigkeit ferromagnetischer Körper.

Die ferromagnetischen Körper zeigen bei steigender Temperatur zunächst ein langsames, dann ein immer stärkeres Absinken der Magneti-

sierbarkeit, insbesondere bei höheren Feldstärken¹. Bei Eisen nehmen Induktion, Permeabilität bei hohen Feldstärken, Koerzitivkraft (zunächst wenig), Remanenz (sofort stark) und Hysteresisverlust mit wachsender Temperatur ab. Über 700° erfolgt nach Abb. 8 der Abfall rapid, bis bei etwa 790° (ferromagnetischer Curiepunkt) die Remanenz, und bei etwa 830° (paramagnetischer Curiepunkt) die Koerzitivkraft Null wird.

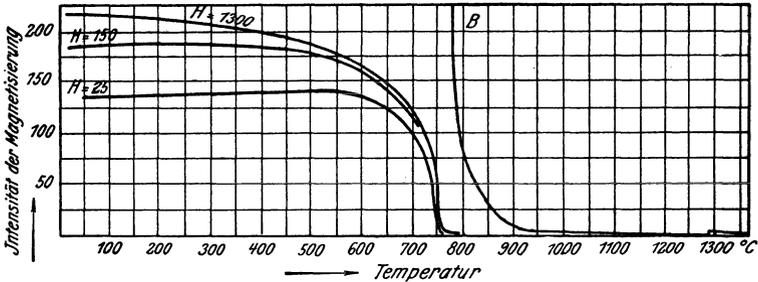


Abb. 8. Magnetisierungsintensität von weichem Flußeisen in Abhängigkeit der Temperatur für verschiedene Feldstärken (Curie).

Bei niederen Feldstärken (unter etwa 100 Gauß) findet zunächst ein Ansteigen von Induktion und Permeabilität, in der Nähe des Curiepunktes ein rascher Abfall statt.

5. Der elektromagnetische Kreis.

Wenn ein Eisenkörper, wie in Abb. 9 dargestellt, aus Einzelstücken verschiedenen Querschnitts zusammengesetzt ist, so ist der magnetische Fluß Φ für alle Teile gleich und \mathfrak{B} veränderlich. Zwischen Fluß Φ und der magnetischen Spannung $\int \mathfrak{H} ds$ besteht die dem Ohmschen Gesetz entsprechende Beziehung:

$$\Phi = \frac{0,4 \pi \cdot \Sigma I}{\left(\frac{l}{\mu F}\right)} = \frac{\int \mathfrak{H} ds}{R_m} \text{ Induktionslinien.}$$

Der Ausdruck $\frac{l}{\mu \cdot F} = R_m$ heißt der magnetische Widerstand,

$$\frac{\mu F}{l} = \frac{1}{R_m} = \mathfrak{G}_m \text{ der magnetische Leitwert.}$$

Darin ist l [cm] die Länge einer Teilstrecke gleichen Querschnitts F [cm²], μ die Permeabilität. Da μ bei Eisen stark von der Induktion abhängt, nimmt man zur Berechnung eines elektromagnetischen Kreises den Fluß Φ zunächst an, und bestimmt \mathfrak{B} und I für jede Teilstrecke. Der Induktionsfluß geht immer den Weg kleinsten magnetischen Widerstands; er kann deshalb durch Verwendung von Eisen gelenkt werden.

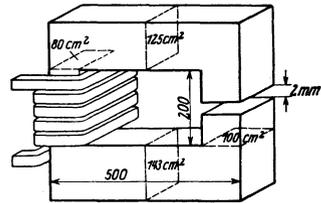


Abb. 9. Elektromagnetischer Kreis.

¹ Kühlewein: Über die magnetischen Eigenschaften von Eisen, Nickel, Kobalt und einigen Legierungen bei höheren Temperaturen. Wissensch. Veröffentl. Siemens-Konzern 11, Heft 1, 124. — Meßkin-Kußmann: Die ferromagnetischen Legierungen. Berlin: Julius Springer 1932.

Ein Teil des Flusses wird sich, besonders bei einer nicht gleichmäßigen Verteilung der Erregeramperewindungen, in Form von Streuflüssen auf unerwünschten Bahnen (entsprechend den magnetischen Leitwerten) schließen, und eine Erhöhung der Induktion in einzelnen Teilstrecken des magnetischen Kreises bewirken. Transformatoren besitzen praktisch eisengeschlossene magnetische Kreise, während bei Elektromaschinen größtenteils (Luftspalt!) der Fluß im Eisen verläuft. Die zu ihrer Magnetisierung notwendigen Erregeramperewindungen werden nach obigen Gesetzen berechnet.

6. Das Induktionsgesetz.

In einer Spule wird, wie Faraday gezeigt hat, eine Spannung erzeugt, wenn sich ein die Spule durchsetzender Induktionsfluß ändert. Die induzierte Spannung ist so gerichtet, daß ein durch sie verursachter Strom der Änderung des Flusses entgegenwirkt. Die Spannung, die in einer Windung erzeugt wird, wenn sich der umfaßte Fluß in 1 s um 1 Maxwell ändert, heißt die absolute Einheit der Spannung. 1 V ist gleich 10^8 absoluten Einheiten. In w hintereinandergeschalteten Windungen wird eine w -mal größere Spannung erzeugt. Damit lautet das Induktionsgesetz:

$$e = -w \cdot \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ V},$$

oder gemäß den Gesetzen der Vektorrechnung:

$$\text{rot } \mathcal{E} = - \frac{\partial \mathfrak{B}}{\partial t}.$$

Die Änderung des die Spule durchströmenden Induktionsflusses kann durch die Veränderlichkeit des Flusses selbst bei stillstehender Spule (durch Wechselstrom erzeugter Fluß), oder durch eine Bewegung der Spule in einem unveränderlichen Magnetfeld erzeugt werden. Wenn ein Leiter von der Länge l [cm] mit einer Geschwindigkeit v [cm/s] senkrecht zu einem gleichförmigen Magnetfeld mit der Induktion \mathfrak{B} [Gauß] bewegt wird, so ist die in ihm induzierte elektromotorische Kraft (EMK) e :

$$e = \mathfrak{B} \cdot l \cdot v \cdot 10^{-8} \text{ [V]}.$$

Die Richtung der bei Bewegung von Leitern in einem Feld erzeugten EMK (Generatoren), ergibt sich aus der Dreifingerregel der rechten Hand. Von den ersten senkrecht zueinander gespreizten Fingern zeigen

- der Daumen die Richtung der Leiterbewegung,
- der Zeigefinger die Richtung des Flusses,
- der Mittelfinger die Richtung der induzierten EMK.

Andererseits gilt für Motoren zur Bestimmung der Kraftrichtung die Dreifingerregel der linken Hand:

- Es zeigen: der Daumen die Richtung der Bewegung,
- der Zeigefinger die Richtung des Flusses,
- der Mittelfinger die Richtung des Stromes.

7. Selbstinduktivität.

In einer Spule wird auch durch die vermöge des eigenen Stromes verursachte Feldänderung eine Spannung erzeugt. Man nennt diese Spannung die Selbstinduktionsspannung. Für eine Spule mit w -Windungen, die sämtlich vom gleichen Strom i durchflossen werden, wird beim magnetischen Leitwert \mathcal{G}_m die Selbstinduktionsspannung:

$$e = -w \cdot \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} = -w^2 \cdot \mathcal{G}_m \cdot 10^{-8} \cdot \frac{di}{dt} = -\mathcal{L} \frac{di}{dt} \text{ V.}$$

Man bezeichnet mit

$$\mathcal{L} = w^2 \cdot \mathcal{G}_m \cdot 10^{-8}$$

die Induktivität der Spule. Die Einheit der Induktivität ist vorhanden, wenn bei der gleichmäßigen Änderung des Stromes um 1 A je s in der Spule 1 V induziert wird. Diese Einheit heißt 1 Henry. Die Induktivität \mathcal{L} kann auch durch folgende Beziehung zwischen \mathcal{L} und Φ ausgedrückt werden.

$$\mathcal{L} = w \cdot \frac{\Phi}{I} \cdot 10^{-8} \text{ H.}$$

\mathcal{L} ist für Anordnungen ohne Eisen von den geometrischen Abmessungen der Spulenanordnung abhängig. Bei Anordnungen mit Eisen ändert sich die Induktivität mit dem Strom, entsprechend dem magnetischen Leitwert \mathcal{G}_m bzw. der Permeabilität μ .

Wenn man bei einer Leiteranordnung $\mathcal{L} = 0$ machen will, muß man durch bifilares Wickeln der Drähte die magnetischen Wirkungen des Stromes aufzuheben versuchen. In massiven Leitern bewirkt die Selbstinduktion eine Stromverdrängung (Hauteffekt) in die äußeren Grenzschichten, insbesondere bei Hochfrequenz.

8. Gegeninduktivität.

Wenn der magnetische Fluß einer Spule noch mit einer zweiten Spule verkettet ist, so wird in dieser eine Spannung der gegenseitigen Induktion erzeugt. Ist der die zweite Spule (w_2 -Windungen) durchsetzende Fluß der ersten Spule (w_1 -Windungen) gleich Φ , der ihm zugehörige magnetische Leitwert \mathcal{G}_m , so ist die EMK der gegenseitigen Induktion:

$$e_{12} = -w_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} = -w_1 \cdot w_2 \cdot \mathcal{G}_m \cdot 10^{-8} \cdot \frac{di}{dt} = -M \cdot \frac{di}{dt} \text{ V.}$$

Man nennt

$$M = w_1 \cdot w_2 \cdot \mathcal{G}_m \cdot 10^{-8} \text{ H}$$

die Gegeninduktivität der Leiteranordnung.

Werte von Selbstinduktivitäten und Gegeninduktivitäten von Leitungen.

- a) Einfachleitung mit Erde als Rückleitung. Drahthalbmesser r , Länge l (sämtliche Maße in cm)

$$\mathcal{L} = 2l \left(\ln \frac{2l}{r} - \alpha \right) \cdot 10^{-9} \text{ H.}$$

α wird 3/4 bis 7/4 je nach Verteilung der Rückströme im Erdboden [F. Breisig: Theoretische Telegraphie, S. 168. Braunschweig 1910].

- b) Doppelleitung, zur Schleife verbunden, Halbmesser der Drähte r_1 und r_2 , Abstand d , Schleifenlänge l (sämtlich in cm)

$$\mathfrak{L} = l \cdot \left(4 \cdot \ln \frac{d}{\sqrt{r_1 r_2}} + \alpha \right) \cdot 10^{-9} \text{ H,}$$

$\alpha = 1$, wenn der Strom sich gleichmäßig über den Querschnitt verteilt.

$\alpha = 0$, wenn der Strom nur in dünner Oberflächenschicht fließt (Hochfrequenz).

- c) Zwei Doppelleitungen von der Schleifenlänge l , von denen die Drähte 1 und 2 die eine Schleife, 3 und 4 die andere Schleife bilden, mit den Drahtachsenabständen d_{12} , d_{13} usw. (cm)

$$M = 2 l \ln \frac{d_{23} d_{14}}{d_{13} d_{24}} \cdot 10^{-9} \text{ H.}$$

- d) Drehstromleitung (Bezeichnungen wie bei c). Drähte 2 und 4 fallen zusammen. r = Drahthalbmesser in cm

$$M = 2 l \cdot \left(\ln \frac{d_{12} \cdot d_{23}}{d_{13} \cdot r} + 1/4 \right) \cdot 10^{-9} \text{ H.}$$

Selbstinduktivitäten und Gegeninduktivitäten von Spulenformen siehe Kalender für Elektrotechniker. München u. Berlin: R. Oldenbourg 1925.

9. Die magnetische Energie und mechanische Kräfte magnetischen Ursprungs.

Im magnetischen Feld ist die in jedem Raumteilchen dv vorhandene magnetische Energie

$$d W_m = \frac{d v}{4 \pi} \int_0^{\mathfrak{H}} \mathfrak{H} d \mathfrak{H} \text{ Erg.}$$

Für einen magnetischen Kreis ist die magnetische Energie, wenn die Längen der Teilstrecken in Eisen gleich l_{Fe} cm und die Längen der Teilstrecken in Luft l_{Lu} cm, und I in A ausgedrückt werden:

$$W_m = \frac{1}{8 \pi} \left(\sum \frac{0,4 \pi \cdot \Sigma I}{\mu \cdot q_{Fe}} + \frac{l_{Lu}}{q_{Lu}} \right)^2 \text{ Erg.}$$

Die magnetische Energie einer Leiteranordnung läßt sich mit Hilfe der Selbstinduktivität \mathfrak{L} berechnen zu $W_m = \frac{\mathfrak{L} \cdot I^2}{2} \cdot [\text{W} \cdot \text{s}]$. Dieser Ausdruck gleicht jenem für die kinetische Energie der Mechanik $\frac{m v^2}{2}$.

Die in magnetischen Feldern je cm^3 aufspeicherbare Energie ist viel (10—100 mal) größer als die in elektrischen Feldern übliche Stärke je cm^3 aufgespeicherte Energiemenge.

Die magnetische Energie zweier Stromschleifen mit den Strömen I_1 und I_2 läßt sich mit Hilfe der Selbstinduktivitäten \mathfrak{L}_1 und \mathfrak{L}_2 H und der Gegeninduktivität M H wie folgt ausdrücken:

$$W_m = \left(\frac{1}{2} \mathfrak{L}_1 \cdot I_1^2 + M \cdot I_1 \cdot I_2 + \frac{1}{2} \cdot \mathfrak{L}_2 \cdot I_2^2 \right) [\text{W} \cdot \text{s}].$$

10. Die Kraftwirkungen des magnetischen Feldes

bestehen nach Faraday-Maxwell in Differenzwirkungen von fiktiven Zug-, Druck- und Schubspannungen in und zwischen den Kraftlinien (Zug längs und Druck senkrecht zu den Kraftlinien), deren Größe von der Dichte der magnetischen Energie abhängt. Solche Differenzwirkungen sind vorhanden, wenn permanente Magnete (Coulombsche Kräfte) oder Stoffe höherer Permeabilität (Gefälle von μ), z. B. weiches Eisen, in magnetische Felder gebracht werden. Kraftwirkungen erfahren weiter stromdurchflossene Leiter in magnetischen Feldern. Es besteht also eine sehr weitgehende Ähnlichkeit zwischen den Kraftwirkungen im magnetischen und elektrischen Feld. Dies veranschaulicht (im Vergleich zu der entsprechenden für das elektrische Feld) die nachstehende Formel für die Kraftwirkungen auf Grenzflächen im magnetischen Feld:

$$P_2 - P_1 = \left(\frac{\mathfrak{H}_1 + \mathfrak{H}_2}{8\pi} \cdot \text{Div } \mathfrak{B} - \frac{1}{8\pi} \cdot \mathfrak{H}_1 \cdot \mathfrak{H}_2 \cdot \text{grad } \mu + \left[\text{Rot } \mathfrak{H} \cdot \frac{\mathfrak{B}_1 + \mathfrak{B}_2}{8\pi} \right] \right).$$

Die Gefällskraft von μ wird z. B. bei Elektromagneten ausgenutzt; für diese wird die Tragkraft:

$$\begin{aligned} P &= -\frac{1}{8\pi} \cdot \mathfrak{H}_1 \cdot \mathfrak{H}_2 \cdot \text{Grad } \mu \text{ [Dyn/cm}^2\text{]} \text{ oder annähernd} \\ &= \frac{\mathfrak{B}^2}{8\pi} \text{ [Dyn/cm}^2\text{]}. \end{aligned}$$

Die Berechnung der Tragkraft nach obiger Formel ist jedoch sehr unsicher, weil die genaue Abgrenzung der Induktion für jedes Flächenstück und die Schätzung des Induktionslinienwegs nur ungenau möglich ist. Häufig ergeben sich deshalb gegenüber obiger Formel in der Praxis höhere Werte.

D. Wechselströme und Ausgleichvorgänge.

1. Grundbegriffe.

Ein Strom, der seine Stärke und Richtung mit der Zeit ändert, heißt ein Wechselstrom. Wechselströme, deren Stärke und Richtung einem periodischen Zeitgesetz gehorchen, sind für die Technik am wichtigsten. Das einfachste periodische Zeitgesetz ist die Sinusfunktion, da sämtliche anderen periodischen Funktionen auf eine Sinusfunktion (Grundwelle) und darüber gelagerte Oberwellen zurückgeführt werden können (Fouriersche Reihe). Technische Wechselströme sind meist nahezu sinusförmig.

Die Zeit T [s], nach der sich eine Sinusschwingung zum erstenmal wiederholt, heißt eine Periode, der reziproke Wert $f = \frac{1}{T}$ die Frequenz in Perioden je s [Einheit 1 Hertz (in Deutschland meist $f = 50$)]. $\omega = 2\pi f$ heißt die Kreisfrequenz. Zur Definition einer Sinusschwingung gehört die Frequenz und ihr Höchstwert, die Amplitude.

Eine sinusförmige Spannung hat demnach folgende Gleichung, wenn ihre Schwingung im Augenblick $t = 0$ beginnt:

$$u = u_m \cdot \sin \omega t.$$

Ein Strom, der erst nach φ Bogengraden seinen Nulldurchgang hat, hat dann die Formel

$$i = i_m \cdot \sin(\omega t - \varphi).$$

Man nennt φ den Phasenverschiebungswinkel, im obigen Fall speziell zwischen Strom und Spannung. Sinusschwingungen können in Abhängigkeit der Zeit oder in einem rechtwinkligen Koordinatensystem durch eine Strecke dargestellt werden, welche mit der Kreisfrequenz ω um einen Endpunkte rotiert. Die Projektion auf die eine Achse stellt dann den jeweiligen Augenblickswert der Schwingung dar.

Wenn mehrere Ströme in einem System mit gleicher Winkelgeschwindigkeit, aber mit gegenseitiger fester Verschiebung rotieren, entsteht ein Mehrphasensystem. Der häufigste Mehrphasenstrom ist der Dreiphasenstrom oder Drehstrom.

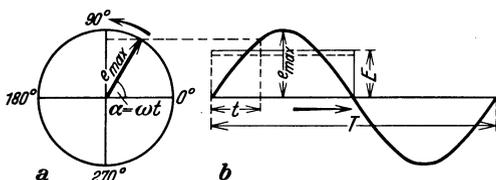


Abb. 10. Darstellung einer Sinusschwingung durch eine rotierende Strecke.

Die Joulesche Wärme, die sich in einem gegebenen Widerstand R beim Durchfluß eines sinusförmigen Wechselstromes in 1 s bildet, ist

$$W = R \cdot \frac{i_m^2}{2} \text{ [W]}.$$

Man bezeichnet bei Wechselströmen als die effektive Stromstärke diejenige, welche denselben thermischen Effekt ergibt wie ein Gleichstrom, für dessen Wärmeentwicklung $W = R \cdot i \cdot^2 \text{ [W]}$ gilt. Damit errechnet sich die effektive Stromstärke aus dem Maximalwert eines sinusförmigen Stromes zu:

$$I = \frac{i_m}{\sqrt{2}} \text{ [A]}$$

und entsprechend die effektive Spannung:

$$U = \frac{u_m}{\sqrt{2}} \text{ [V]}.$$

Das Verhältnis von Höchstwert zu Effektivwert einer Strom- oder Spannungskurve heißt ihr Scheitelfaktor (bei sinus-Schwingung $\sqrt{2}$). Für Ströme beliebiger Kurvenform errechnet sich der Effektivwert des Stromes allgemein zu:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/2} i^2 dt} \text{ [A]}.$$

und die effektive Spannung:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/2} u^2 \cdot dt} \text{ [V]}.$$

Die elektrische Leistung eines Wechselstromes ist $N = U \cdot I \cdot \cos \varphi \text{ [W]}$. Der Cosinus des Phasenverschiebungswinkels φ zwischen

Strom und Spannung heißt der Leistungsfaktor. $N_s = U \cdot I$ Volt-ampere [VA] heißt die Scheinleistung eines Wechselstromes und $U \cdot I \cdot \sin \varphi$ seine Blindleistung [BW].

Bei gegebenen Spannungs- und Stromwerten wird die elektrische Leistung durch eine Phasenverschiebung φ zwischen Strom und Spannung unter Umständen beträchtlich vermindert. Die für die Leistung allein in Betracht kommende Stromkomponente ($I \cdot \cos \varphi$), die mit der Spannung phasengleich ist, heißt die Wirkstromkomponente und der Wert ($I \cdot \sin \varphi$) die Blindstromkomponente.

Ein sinusförmiger Strom hat in Luft einen genau sinusförmigen, in Eisen je nach der Eisensättigung einen annähernd sinusförmigen und mit dem Strom phasengleichen Induktionsfluß zur Folge.

In der Praxis drückt man im allgemeinen Ströme und Spannungen in Effektivwerten, Induktionsflüsse in Maximalwerten aus, letzteres weil für die Berechnung der elektrischen Durchflutung magnetischer Kreise die Maximalflüsse Φ_{\max} zu berücksichtigen sind. Sowohl die Effektivwerte sinusförmiger Ströme und Spannungen wie die Maximalwerte sinusförmiger Induktionsflüsse lassen sich zur Kennzeichnung ihrer gegenseitigen Phasenverschiebung in Form gerichteter Strahlen (Vektoren) darstellen und nach den Gesetzen der Vektorrechnung geometrisch zusammensetzen. Dabei kann die Phasenverschiebung entweder durch die Annahme der Rotation der Vektoren in einem Koordinatensystem bzw. durch deren nacheinander folgendes Auftreffen auf eine Zeitlinie oder durch die Rotation der Zeitlinie bei stillstehenden Vektoren veranschaulicht werden. Je nach der gewählten Darstellungsmethode ist ein bestimmter Drehsinn (meist gegen den Sinn des Uhrzeigers als positiv) festzulegen.

In Abb. 11 kommt die Zeitlinie bei ihrer Rotation zuerst zur Spannung U und erst nach einem Phasenverschiebungswinkel φ zum Strom I . Man spricht in diesem Falle von einer Nacheilung des Stromes gegen die Spannung. Ganz ähnlich kann sich auch eine Voreilung des Stromes gegen die Spannung ergeben. Der Strom I läßt sich wie in Abb. 11 in Wirkstrom- und Blindstromkomponente aufteilen.

Ein Wechselstrom I erfährt in einem induktions- und kapazitätsfreien Widerstand $R_w \Omega$ keine Phasenverschiebung gegen die Spannung. Gegenüber einem Gleichstromwiderstand $R_{gl} \Omega$ ist nur die Widerstandserhöhung durch Stromverdrängung vermöge der Selbstinduktion des Leiters zu berücksichtigen. Um den Unterschied zwischen R_w und R_{gl} (Wirbelstromfaktor) [Deutscher Kalender für Elektrotechniker. München: R. Oldenbourg 1925] möglichst klein zu halten, werden stärkere Leiter zweckmäßig in Einzeldrähte unterteilt, die bei Hochfrequenz gegebenenfalls voneinander isoliert werden.

Die Kirchhoffschen Gesetze für Stromverzweigungen (s. S. 353) gelten auch für Wechselströme, sofern es sich um induktionsfreie Widerstände handelt.

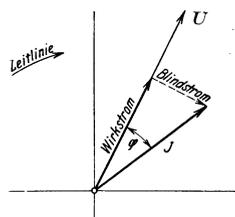


Abb. 11.
Vektordarstellung für
Wechselströme und
Wechselspannungen.

Ein durch eine Induktivität \mathcal{L} H fließender Wechselstrom $i = i_m \cdot \sin \omega t$ erzeugt nach dem Induktionsgesetz eine Spannung der Selbstinduktion $u_s = -\mathcal{L} \cdot \frac{di}{dt} = \mathcal{L} \cdot \omega \cdot i_m \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$ V, worin $\omega = 2\pi f$ die Kreisfrequenz bedeutet. Die EMK u_s erfährt in einer Induktivität demnach eine nachteilende Phasenverschiebung von 90° gegenüber dem sie erzeugenden Strom. Umgekehrt muß eine der Selbstinduktionsspannung entgegenwirkende gegen elektromotorische Kraft dem Strom um 90° vorauslaufen. In Effektivwerten ist die EMK $U_s = \omega \cdot \mathcal{L} \cdot I$ [V]. $\omega \cdot \mathcal{L}$ heißt der induktive Widerstand des Wechselstromkreises.

Die im magnetischen Feld in jedem Augenblick vorhandene magnetische Energie $\frac{\mathcal{L} \cdot i^2}{2}$ steigt im ersten Teil und fällt im zweiten Teil einer Halbperiode. Die magnetische Energie gleicht sich daher im Bereich einer Halbperiode vollständig aus.

Nach Abschnitt A, S. 342 dieses Kapitels ist die Änderung der Spannung eines Kondensators mit einer Änderung des Elektrizitätsbelages, d. h. mit dem Auftreten eines Stromes verbunden, entsprechend $du_c = \frac{dQ}{C} = \frac{i dt}{C}$. Die zu einem Strom $i = i_m \cdot \sin \omega t$ gehörende Spannung u_c an einer Kapazität C ist damit

$$u_c = \frac{i_m}{C \cdot \omega} \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \text{ V.}$$

Die Spannung an einer Kapazität bleibt also um 90° hinter dem Ladestrom zurück. Umgekehrt hat der kapazitive Strom gegenüber der Spannung eine Voreilung um 90° . In Effektivwerten ist die Spannung am Kondensator $U_c = \frac{1}{\omega \cdot C} \cdot I$ [V]. $\frac{1}{\omega C}$ heißt der kapazitive Widerstand eines Wechselstromkreises.

Die im elektrischen Feld aufgespeicherte elektrische Energie ist in jedem Augenblick $\frac{u^2 \cdot C}{2}$. Sie steigt in einer Viertelperiode bis auf $\frac{u^2_{\max} C}{2}$ und fällt in der anschließenden Viertelperiode wieder auf Null. In Stromkreisen mit Kapazität und Induktivität flutet die Energie ständig zwischen dem elektrischen und magnetischen Feld hin und her. Man sagt, solche Stromkreise sind schwingungsfähig mit der Eigenfrequenz $f = \frac{1}{2\pi \sqrt{\mathcal{L} \cdot C}}$.

2. Ohmsches Gesetz für Wechselstrom.

Das einfache Ohmsche Gesetz für Gleichstrom $U = R \cdot I$ [V] gilt für Wechselstrom nur, wenn in dem Stromkreis ausschließlich reine Ohmsche Widerstände vorhanden sind.

Bei Parallelschaltung von Induktivität und Kapazität gemäß Abb. 12 wird die Gesamtspannung

$$U = I \sqrt{R^2 + \left(\frac{\omega \mathcal{L}}{1 - \omega^2 \mathcal{L} \cdot C} \right)^2}.$$

Sind Ohmscher Widerstand R [Ω], Induktivität \mathcal{L} [H] und Kapazität C [F] hintereinandergeschaltet, so ergibt sich folgendes Ohmsches Gesetz für Wechselstrom:

$$U = I \sqrt{R^2 + \left(\omega \mathcal{L} - \frac{1}{\omega C}\right)^2},$$

worin U und I sowohl als Effektivwerte, wie als Augenblickswerte eingesetzt werden können. Die Wurzel heißt der Scheinwiderstand des Stromkreises. Die Phasenverschiebung zwischen Strom und Gesamtspannung läßt sich errechnen aus:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega \mathcal{L} - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

Bei $\omega \mathcal{L} = \frac{1}{\omega C}$ wirkt der Wechselstromwiderstand wie ein rein Ohmscher Widerstand (Resonanz). Hierbei können die Teilspannungen an der Induk-

tivität $U_{\mathcal{L}} = \omega \mathcal{L} \cdot I = I \sqrt{\frac{\mathcal{L}}{C}}$ oder an der Kapazität $U_C = U \frac{I}{\omega C} = I \sqrt{\frac{\mathcal{L}}{C}}$ wesentlich größer sein als die Gesamtspannung. Resonanzerscheinungen sind deshalb unter Umständen für elektrische Anlagen gefährlich.

$\sqrt{\frac{\mathcal{L}}{C}}$ heißt der Schwingungs- oder Wellenwiderstand des Stromkreises.

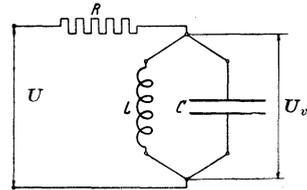


Abb. 12. Parallelschaltung von Induktivität und Kapazität.

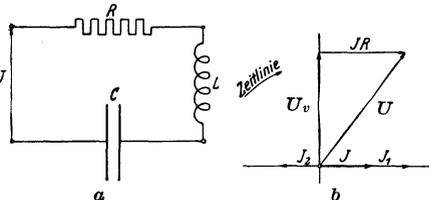


Abb. 13. Hintereinanderschaltung von Induktivität und Kapazität. a Schaltbild, b Vektordiagramm.

3. Ausgleichvorgänge, Wanderwellen, Überspannungen.

Bei einer Veränderung der Bedingungen eines Stromkreises, etwa dem Einschalten oder Abschalten der Spannung oder der Veränderung von Widerständen, stellt sich nicht sofort der durch die obengenannten Spannungsgleichungen beschriebene Zustand ein. Es müssen vielmehr zuerst die den neuen Bedingungen entsprechenden Energien des magnetischen und elektrischen Feldes aufgebracht, und damit ein Ausgleich zwischen den vor und nach der Änderung bestehenden Zuständen des Stromkreises geschaffen werden. Man kann den Übergang durch das Zusammenwirken eines stationären Stromes i_{st} und eines freien Ausgleichstromes i_f beschreiben [A. Fraenkel: Theorie der Wechselströme. Berlin: Julius Springer 1921].

a) Für einen Stromkreis mit Widerstand R und Induktivität \mathcal{L} gilt die Spannungsgleichung $U = R \cdot i + \mathcal{L} \cdot \frac{di}{dt}$, welche von dem stationären Strom i_{st} für sich erfüllt wird. Der freie Ausgleichstrom i_f muß daher der Gleichung gehorchen: $R \cdot i_f + \mathcal{L} \cdot \frac{di_f}{dt} = 0$; also wird

$i_f = i_{f_0} \cdot e^{-\frac{R}{\Omega} t}$. Der Faktor $\frac{\Omega}{R} = T$ heißt die Zeitkonstante des Stromkreises.

Für das Einschalten eines Gleichstromkreises gilt

$$i = \left(\frac{U}{R} + i_{f_0} \cdot e^{-\frac{R}{\Omega} t} \right) A,$$

wobei sich der Wert i_{f_0} aus der Grenzbedingung $t = 0, i = 0$, als $i_{f_0} = -\frac{U}{R}$ errechnet.

Beim Einschalten einer Wechselspannung $u = u_m \sin(\omega t + \alpha)$ stellt sich ein stationärer Strom ein von der Größe

$$i_{st} = \frac{u_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 \cdot \Omega^2}} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi)$$

— worin sich φ aus $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega \Omega}{R}$ errechnet — und ein freier Ausgleichstrom

$i_f = i_{f_0} \cdot e^{-\frac{R}{\Omega} t}$, dessen Anfangswert für $t = 0, i = 0$ wird:

$$i_{f_0} = -i_m \cdot \sin(\alpha - \varphi).$$

Das Einschalten eines Wechselstromkreises stellt sich als eine Überlagerung der stationären Wechselstromschwingung mit einer freien nach einer Exponentialfunktion abklingenden Gleichstromschwingung dar, deren Anfangswert vom Einschaltmoment abhängt und beim Einschalten im Nulldurchgang der Spannung am größten ist.

b) Für eisengeschlossene Stromkreise (Induktivität Ω veränderlich) mit Widerstand R gilt die Spannungsgleichung:

$$u = R \cdot i + \omega \cdot \frac{d\Phi}{dt}.$$

Die Beziehung zwischen i und Φ wird durch die Magnetisierungskurve bzw. bei Wechselstrom durch die Hysteresisschleife hergestellt, so daß eine exakte analytische Lösung nicht möglich ist. Beim Einschalten einer Gleichspannung ergibt sich ein zunächst gegenüber einem eisenlosen Stromkreis stark verzögerter Stromanstieg. In Wechselstromkreisen, z. B. beim Einschalten leerlaufender Transformatoren, können sich je nach dem Einschaltmoment Einschaltströme ergeben, die den normalen Magnetisierungsstrom, ja den Nennstrom des Transformators mehrfach überschreiten¹.

c) Die Ladung einer Kapazität C über einen Widerstand R erfolgt bei Gleichstrom mit dem Ladestrom $i = \frac{u}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$, also ebenfalls nach einem Exponentialgesetz mit der Zeitkonstante $T = R \cdot C$, und dem Anfangswert $\frac{u}{R}$, der z. B. bei direkt eingeschalteten Hochspannungskabeln recht erheblich sein kann. Bei der Einschaltung einer Wechselspannung $u = u_m \cdot (\sin \omega t + \alpha)$ ergibt sich ein stationärer Strom:

¹ Näheres siehe J. Biermanns: Überströme in Hochspannungsanlagen. Berlin: Julius Springer 1926. — Fraenkel, A.: Theorie der Wechselströme. Berlin: Julius Springer 1921. — Rüdénberg, R.: Schaltvorgänge, 3. Aufl. Berlin: Julius Springer 1933.

$$i_{st} = \frac{u_m}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} \cdot \sin(\omega t + \alpha + \varphi),$$

wobei sich φ aus $\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{\omega C \cdot R}$ errechnet, und ein freier Ausgleichstrom

$$i_f = - \frac{u_m \cdot \cos(\alpha + \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{RC}}}{\omega R \cdot C \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}},$$

dessen Anfangswert für $t = 0$, $i = 0$ am größten ($= \frac{u_m}{R}$) ist, wenn im Spannungsmaximum geschaltet wird.

d) In zusammengesetzten Stromkreisen mit Induktivität, Kapazität und Widerstand in Reihenschaltung gilt die Spannungsgleichung

$$u = R i + \mathcal{L} \cdot \frac{d i}{d t} + \int \frac{i dt}{C},$$

und für den freien Ausgleichstrom:

$$R i_f + \mathcal{L} \cdot \frac{d i_f}{d t} + \int \frac{i_f \cdot dt}{C} = 0.$$

Die daraus ableitbare Differentialgleichung

$$\frac{d^2 i_f}{dt^2} + \frac{R}{\mathcal{L}} \frac{d i_f}{dt} + \frac{i_f}{\mathcal{L} \cdot C} = 0$$

ergibt bei Wechselspannung und $R \geq 2 \sqrt{\frac{\mathcal{L}}{C}}$ einen aperiodisch ge-

dämpften, bei $R < 2 \sqrt{\frac{\mathcal{L}}{C}}$ einen oszillierend verlaufenden Ausgleich-

vorgang, dessen Eigenfrequenz gleich $\sqrt{\frac{1}{\mathcal{L} C} - \left(\frac{R}{2 \mathcal{L}}\right)^2}$ wird. Ist die

Eigenfrequenz größer als die Netzfrequenz, so ist der maximale Einschaltstrom etwa im Verhältnis von Eigenfrequenz zu Netzfrequenz größer als der maximale stationäre Wechselstrom, und die Kondensatorspannung kann etwa den doppelten des Spannungswertes annehmen.

e) Bei der Abschaltung von Stromkreisen muß die in ihnen aufgespeicherte magnetische und elektrische Energie in eine andere Energieform, meist in Wärme, umgewandelt werden. Zu einem gewissen Teil erfolgt dies im Abschaltlichtbogen. Das rasche Abschalten von Stromkreisen kann, insbesondere bei Gleichstrom, hohe Selbstinduktionsspannungen hervorrufen. Man verwendet deshalb für Gleichstrom keine Ölschalter. Bei Wechselstrom erfolgt die Abschaltung während des Nulldurchgangs des Stromes, sofern sich die Kontakte beim Spannungsanstieg soweit entfernt haben, daß keine Rückzündung eintritt. Diese kann andernfalls die Abschaltung noch bis zu einem der nächsten Nulldurchgänge oder bis zur Erreichung eines genügenden Kontaktabstandes verschieben. In Stromkreisen mit Kapazität können bei der Abschaltung Rückzündungsspannungen von der 2—3fachen Amplitude der Normalspannung auftreten.

Die mit den oben beschriebenen Schaltvorgängen verbundenen Ausgleichsschwingungen und Überspannungen greifen auf die Leitungen in Form von Wanderwellen über, die sich etwa mit Lichtgeschwindigkeit auf den Leitungen bewegen. Für Wanderwellen gilt ein dem Ohmschen ähnliches Gesetz $u = i \cdot W$, wobei $W = \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \Omega$ der Wellenwiderstand der Leitung ist. Nach W. Petersen [Abschnitt Überspannungsschutz in Deutscher Kalender für Elektrotechniker. München u. Berlin: R. Oldenbourg 1925] beträgt der Wellenwiderstand für Freileitungen etwa 600—800 Ω , für Kabel zwischen 30 und 100 Ω (nach Hütte, 26. Aufl., Bd. 2, im Mittel 50 Ω).

Transformatoren und elektrische Maschinen haben bedeutend höhere Wellenwiderstände, so daß an ihnen, ähnlich wie an offenen Leitungsspulen, eine Reflexion der Wanderwellen unter Verdoppelung ihrer Spannung eintritt. Gefährliche Überspannungen vom 4—4,5fachen der Normalspannung und großer Steilheit (Sprungwellen) können durch intermittierende Erdschlüsse, bedeutend höhere Überspannungen — bis zur Grenzwert-Überschlagspannung der Isolatoren oder eingebauter Überspannungsableiter — durch Blitzschläge hervorgerufen werden. Bei Transformatoren und Maschinen mit geerdetem Nullpunkt besteht vor allem die Gefahr von Spulen- oder Lagenüberschlägen in der Nähe der Eingangsspulen. Transformatoren und Maschinen mit isoliertem Nullpunkt haben ihre gefährdete Stelle in der Nullpunktisolation. Stationen, sowie insbesondere auch Übergangsstellen von Freileitungen in Kabel erhalten Überspannungsschutz, Netze mit Erdschlußströmen über 5 A Erdschlußspulen nach Petersen [Elektrotechn. Ztschr. 1919, 5].

4. Drehstrom oder Dreiphasenstrom.

Der Drehstrom oder Dreiphasenstrom umfaßt drei Wechselstromsysteme (Phasen), die nach Strom und Spannung je um 120° gegeneinander phasenverschoben sind (Vektordiagramm Abb. 14). Die drei Phasen können entweder nach Abb. 15 in Sternschaltung, oder nach Abb. 16 in Dreieckschaltung verbunden werden, so daß sich in beiden Fällen nur drei Zuleitungen — bei Anschluß eines Nulleiters am Sternpunkt für Beleuchtungszwecke vier Zuleitungen — ergeben.

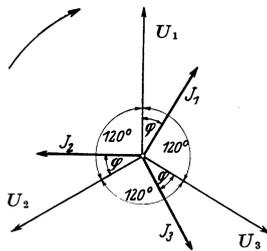


Abb. 14. Vektordiagramm für Drehstrom.

Man unterscheidet bei Drehstrom die Phasenspannung (bei Dreieckschaltung gleich der Spannung zwischen den Außenleitern) und die verkettete Spannung bei Sternschaltung, welche $\sqrt{3}$ mal größer als die Phasenspannung ist. Entsprechend ist bei Dreieckschaltung der Strom im Außenleiter $\sqrt{3}$ mal größer als der Phasenstrom und der Außenleiterstrom bei Sternschaltung. Im allgemeinen versteht man unter der Spannung U eines Drehstromsystems die verkettete Spannung, als Stromstärke wird im allgemeinen der Phasenstrom I angegeben. Dann ist die Drehstromleistung gleich $\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cos \varphi$ [W].

Der Drehstrom ist zur Zeit die wichtigste Stromart, weil er — abgesehen von Großübertragungen auf weite Entfernungen, wo der hochgespannte Gleichstrom in Wettbewerb zu ihm zu treten im Begriffe ist —

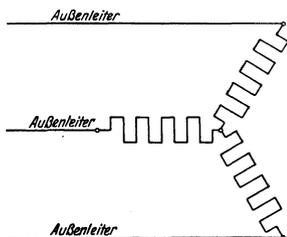


Abb. 15. Sternschaltung.

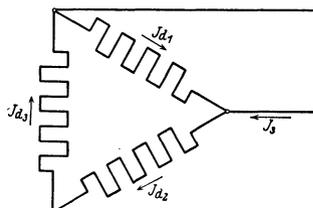


Abb. 16. Dreieckschaltung.

die wirtschaftlichste Kraftübertragung und die einfachste und betriebs-sicherste Bauart von Elektromaschinen und Motoren ergibt.

II. Der Transformator.

Literatur: Liwshitz: Die elektrischen Maschinen. Leipzig: B. G. Teubner 1931. — Richter, R.: Elektrische Maschinen, Bd. 3. Berlin: Julius Springer 1932. — Vidmar: Die Transformatoren. Berlin Julius Springer 1925. Der Transformator im Betrieb. Berlin: Julius Springer 1927. — Vorschriftenbuch des VDE, Regeln für die Bewertung und Prüfung von Transformatoren. RET 1930.

Der Transformator wandelt elektrische Wechselstromleistung in elektrische Wechselstromleistung bei im allgemeinen gleichbleibender Frequenz ohne mechanisch bewegte Teile um. Zwei oder mehrere elektrische Wicklungen sind durch einen gemeinsamen magnetischen Wechselkraftfluß verbunden, der die Übertragung der elektrischen Leistung von einer Wicklung auf die andere übernimmt. Die Wicklung, welche die elektrische Leistung empfängt, heißt Primärwicklung; jene, welche die elektrische Leistung abgibt, Sekundärwicklung. Im allgemeinen erfolgt die Transformierung elektrischer Leistung zum Zwecke der Spannungs- oder Stromänderung, teilweise auch zur Durchführung einer elektrischen Trennung zusammenarbeitender Leitungsnetze, oder zum Zwecke der Umwandlung auf eine andere Phasenzahl.

Nach der Phasenzahl unterscheidet man Einphasen-, Zweiphasen- und Drehstromtransformatoren, Transformatoren für den Übergang von Zweiphasen- in Drehstrom, für Spezialzwecke (z. B. Gleichrichtertransformatoren für 6 bzw. 12 Phasen) auch Transformatoren für höhere Phasenzahlen.

A. Der magnetische Kreis des Transformators.

Den magnetischen Kreis des Transformators versucht man möglichst vollständig eisengeschlossen zu gestalten. Zur Erleichterung der Bewicklung wird er jedoch meist in Kerne und Joche aufgeteilt. Kerne und Joche bestehen aus geschichteten und gegeneinander isolierten Einzelblechen von 0,3—0,35 mm Dicke bei 50 Hertz und von 0,5 mm Dicke

bei $16\frac{2}{3}$ und 25 Hertz. Bei kleineren und mittleren Transformatoren werden im allgemeinen gemäß Abb. 17 die Kern- und Jochbleche verzapft. Die erhöhten magnetischen Widerstände an den Übergangsstellen (ungleiche Induktionsverteilung über den Jochquerschnitt) können Luftspalten von 0,03—0,05 mm gleichgesetzt werden. Bei größeren Transformatoren werden die Stoßfugen bearbeitet und unter Zwischenlage einer etwa 0,1—0,5 mm starken Isolierschicht stumpf aneinandergesetzt. Die im Transformatorenbau üblichen Induktionen liegen bei 50 Hertz im allgemeinen zwischen 11000 und 14000 Gauß. Nach Festlegung der Hauptabmessungen des magnetischen Kreises läßt sich damit die zu einem bestimmten Fluß Φ notwendige magnetische Spannung $\oint \mathfrak{H} dl$

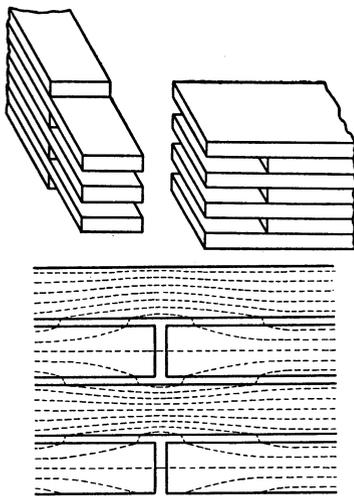


Abb. 17. Verzapfte Stoßstellen (Induktionslinien gestrichelt).

(s. Kapitel I, C, S. 359) berechnen. Magnetische Feldstärke und magnetische Induktion folgen der für das betreffende Blechmaterial geltenden Hysteresis-schleife. Einem zeitlich sinusförmig verlaufenden Induktionsfluß entspricht daher nicht auch ein zeitlich sinusförmig verlaufender Magnetisierungsstrom. Der Maximalwert des Magnetisierungsstromes $i_{\mu \max}$ ist durch den Maximalwert des Flusses Φ_{\max} für einen bestimmten magnetischen Kreis festgelegt. Je nach Induktion und Luftspaltanteil, bei Mehrphasentransformatoren außerdem je nach Schaltung, ergeben sich verschiedene, etwa zwischen 1,0 und 2,3 schwankende Umrechnungsfaktoren [nähere Zahlenwerte s. R. Richter: Elektrische Maschinen, Bd. 3. Berlin: Julius Springer 1932] zwischen dem Maximalwert und

dem dem Netz entnommenen Effektivwert des Magnetisierungsstromes.

Neben dem dem Eisenweg folgenden und mit Primär- und Sekundärwicklung verketteten Hauptfluß Φ bilden sich außerdem nur mit Primär- oder Sekundärwicklung verkettete Streuflüsse Φ_{S_1} und Φ_{S_2} aus. Sie schließen sich unter Benützung verfügbarer Eisenteile (z. B. Ölkessel) hauptsächlich durch Luft. Ihre Augenblickswerte lassen sich aus magnetischer Spannung und Leitwert des Kraftlinienwegs berechnen. Die Streuflüsse dienen nicht der Leistungsumwandlung und sind unerwünscht. Den mit einer bestimmten Windungszahl verketteten Streuflüssen entsprechen elektromotorische Kräfte der Streuinduktion, die entweder für Primär- und Sekundärwicklung getrennt berechnet oder allein auf die Primärwicklung bezogen werden können.

B. Der leerlaufende Transformator.

Der leerlaufende Transformator (Sekundärwicklung offen) nimmt unter Spannung einen dem Fluß Φ zugeordneten Leerlaufstrom I_0 auf,

der sich aus dem wattlosen Magnetisierungsstrom I_μ und einer Wattkomponente zur Deckung der Eisen- und der dielektrischen Verluste zusammensetzt. Einem zeitlich sinusförmig verlaufenden Fluß mit dem Maximalwert Φ_{\max} entsprechen die in den Primär- und Sekundärwicklungen (Windungszahlen W_1 und W_2) induzierten elektromotorischen Kräfte

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot W_1 \cdot \Phi_{\max} \cdot 10^{-8} \text{ V}$$

und

$$E_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot W_2 \cdot \Phi_{\max} \cdot 10^{-8} \text{ V.}$$

Die primären und sekundären elektromotorischen Kräfte verhalten sich zueinander wie die Windungszahlen. Das Verhältnis der Windungszahlen W_1/W_2 heißt das Übersetzungsverhältnis des Transformators. Die primär angelegte Klemmenspannung U_1 hat außer der EMK E_1 die durch den Leerlaufstrom bedingten Ohmschen und induktiven Spannungsabfälle zu überwinden. Da der Leerlaufstrom eines Transformators praktisch nur 5—10% des Nennstromes beträgt, sind diese Spannungsabfälle klein, so daß das Übersetzungsverhältnis sehr angenähert dem Verhältnis der Leerlaufspannungen entspricht.

Eine Überhöhung der Klemmenspannung gegenüber dem Rechnungswert hat eine etwa proportionale Steigerung des Flusses und damit bei hoher Eisensättigung eine starke Erhöhung des Leerlaufstromes und der Eisenverluste zur Folge. Zur Abhilfe dienen Wicklungsanzapfungen.

C. Der belastete Transformator.

Der belastete Transformator nimmt primär einen Strom I_1 auf, der etwa im umgekehrten Verhältnis der Windungszahlen kleiner (oder größer) ist als der Sekundärstrom I_2 . Bei gleichbleibender Klemmenspannung U_1 sinken infolge der Erhöhung der primären Ohmschen und induktiven Spannungsabfälle die EMK E_1 und damit der Fluß Φ ein wenig gegenüber den Leerlaufwerten. Praktisch können jedoch Fluß und Magnetisierungsstrom bei Leerlauf und Vollast als gleich angesehen werden. Es muß daher die primärseitige Durchflutung $I_1 \cdot W_1$ stets der geometrischen Summe der Sekundärdurchflutung $J_2 \cdot W_2$ und der der Magnetisierung und der Deckung der Eisenverluste dienenden Durchflutung $I_0 \cdot W_1$ das Gleichgewicht halten. Die Änderung der Strom- und Spannungswerte wird zweckmäßig durch Vektordiagramme ähnlich Abb. 18 dargestellt. Um übersichtlichere Diagramme zu bekommen, ist es üblich, die sekundären Ströme und Spannungswerte auf den Primärkreis, und damit auf das Übersetzungsverhältnis 1 : 1 zu reduzieren. ($E'_2 = E_2 \cdot \frac{W_1}{W_2}$;

$I'_2 = I_2 \cdot \frac{W_2}{W_1}$, sekundäre Spannungsabfälle zu multiplizieren mit $\left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2$).

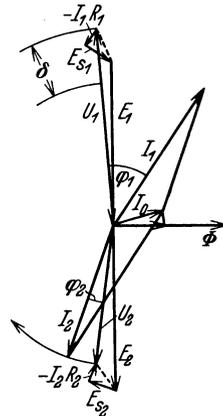


Abb. 18. Vektordiagramm des belasteten Transformators.

Bei der Zeichnung des Vektordiagrammes wird von dem Sekundärstrom I'_2 , der sekundären Phasenverschiebung φ_2 , und der Klemmenspannung U'_2 ausgegangen. Zu U'_2 addiert sich in Richtung I'_2 der sekundäre Ohmsche Spannungsabfall $R'_2 I'_2$ und senkrecht zu I'_2 die sekundäre Streuspannung $E_{S'_2}$. Damit sind die sekundäre EMK E'_2 und, gegenüber dieser um 180° phasenverschoben und größtmäßig gleich, die primäre EMK E_1 bekannt. Der Fluß Φ eilt E'_2 um 90° vor. Mit Φ ist der Magnetisierungsstrom phasengleich; damit sind I_0 und, durch geometrische Addition von I_0 und I'_2 , auch I_1 zu bestimmen. Wenn Größe und Richtung des Primärstromes bekannt sind, können die primären Spannungsabfälle errechnet und die primäre Klemmenspannung ermittelt werden.

In Abb. 18 bezeichnet δ die Spannungsänderung des Transformators, d. h. den Unterschied der Sekundärspannung zwischen Leerlauf und Vollast bei einem bestimmten $\cos \varphi$.

D. Der Transformator bei Kurzschluß.

Bei sekundärem Klemmenkurzschluß wird die gesamte primäre Klemmenspannung zur Überwindung Ohmscher und induktiver Widerstände im Transformator aufgebraucht. Der Nennprimärspannung U_1 entspricht ein primärer Dauerkurzschlußstrom

$$I_k = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_{s1} + X_{s2})^2}} = \frac{U_1}{\sqrt{R^2 + X_s^2}},$$

wobei R den gesamten auf die Primärwicklung bezogenen Ohmschen Widerstand, X_s den gesamten, auf die Primärwicklung bezogenen induktiven Streuwiderstand darstellen. Der Übergang von einem anderen Belastungszustand (etwa Leerlauf) zum Dauerkurzschluß wird durch einen freien Ausgleichstrom (s. Kapitel I, D, 3, S. 367) vollzogen.

Unter der Nennkurzschlußspannung U_k versteht man die bei geschlossener Sekundärwicklung an die Primärwicklung anzulegende Spannung, die den Nennprimärstrom zum Fließen bringt. Sie errechnet sich zu $U_k = I_N \cdot \sqrt{R^2 + X_s^2}$. Meist wird U_k auf die primäre Nennspannung bezogen und in % der Normalspannung angegeben. Übliche Werte für U_k % sind 3,5—5% bei kleineren und mittleren, 6—8% bei Großtransformatoren.

Kurzschlußströme haben bedeutende mechanische Kraftwirkungen zwischen den einzelnen Windungen einer Wicklung (Anziehung) und zwischen Primär- und Sekundärwicklung (Abstoßung) zur Folge, denen bei der Konstruktion durch Formgebung (möglichst runde Spulen) sowie (zum Teil federnde) Abstützungen und Bandagierungen der Wicklungen Rechnung getragen werden muß. Berechnung der Stromkräfte siehe Abschnitt I, C, 10, S. 363.

E. Das Einschalten von Transformatoren.

Das Einschalten von Transformatoren kann bei offener Sekundärwicklung zu sehr bedeutenden Einschaltstromstößen führen. Der

ungünstigste denkbare Einschaltstrom ergibt sich beim Einschalten im Nulldurchgang der Spannung und entspricht dem zur Erzielung des doppelten Höchstwertes des Dauerflusses zuzüglich etwaiger Remanenz erforderlichen Magnetisierungsstrom. Dieser Stromwert kann ein Hundertfaches des normalen Magnetisierungsstroms und ein Vielfaches des Transformatornennstroms bedeuten. Er fällt nach einer Exponentialfunktion auf den Leerlaufstrom ab.

Beim Einschalten eines Transformators mit über einen Widerstand geschlossener Sekundärwicklung (Widerstand entsprechend \leq Nennbelastung) ergibt sich ein rascheres Abklingen des Einschaltstromes als bei sekundär offenem Transformator. Als Endwert stellt sich der dem Widerstand entsprechende Belastungsstrom ein.

Beim Einschalten eines sekundär kurzgeschlossenen Transformators tritt ein sog. Stoßkurzschlußstrom auf, der im ungünstigsten Falle (Schalten im Nulldurchgang der Spannung) den 1,7—1,8fachen Wert der Amplitude des Dauerkurzschlußstromes erreichen kann. Die Zeitkonstante beträgt für den Stoßkurzschlußstrom zwischen 0,005 (kleinere Transformatoren) und 0,04 s (Großtransformatoren).

Zur Dämpfung der Einschaltstromstöße werden für größere Transformatoren Schalter mit Vorkontakten und Widerständen empfohlen.

F. Der Transformator bei Überspannung.

Auflaufende Überspannungswellen erfahren an den Transformator клемmen infolge des gegenüber Leitungen erhöhten Wellenwiderstandes von Transformatoren eine Aufstauung bis zur Verdoppelung des Spannungswerts. Das Eindringen in den Transformator selbst ergibt eine hyperbolische Spannungsverteilung infolge der bei hochfrequenten Spannungsschwingungen wesentlichen Kapazitäten von Windung gegen Windung und der Wicklungen gegen Erde. An den Eingangswindungen stellen sich die größten Spannungsgradienten von Windung gegen Windung und von Lage gegen Lage ein. Der Ausgleich der kapazitiven Spannungsverteilung auf den durch Nullpunktserdung oder Nullpunktisolation gegebenen Endzustand erfolgt durch freie Schwingungen. Diese führen bei Nullpunktserdung zu erheblichen Spannungsgradienten an den dem Nullpunkt benachbarten Windungs- und Lagenisolationen, bei Nullpunktisolation zu einer bedeutenden Überspannung der Nullpunktisolation gegen Erde, ohne daß sich an den benachbarten Windungen gefährliche Spannungsgradienten einstellen würden. Stimmt die Frequenz der freien Ausgleichschwingung mit der Eigenfrequenz des Transformators überein, so entstehen Resonanzüberspannungen, die insbesondere die mittleren und Endspulen gefährden. Zur Vermeidung von Transformatordurchschlägen ist auf eine besonders sorgfältige Formgebung und Isolation (hohe Windungskapazität günstig!) der Eingangs- und Endwindungen, eine durchgehend gute Windungsisolation und bei isoliertem Nullpunkt auf gute Nullpunktisolation zu achten. Zur Prüfung der Überspannungssicherheit wird durch die RET die Sprungwellenprobe vorgeschrieben.

G. Transformatorverluste.

Die Transformatorverluste bestehen aus den Eisenverlusten V_e , den Verlusten im Dielektrikum V_{diel} sowie den Kupferverlusten V_c und den Wirbelstromverlusten V_{wi} . Die Summe $(V_e + V_{diel})$ stellt die sog. Leerlaufverluste, $(V_c + V_{wi})$ die Wicklungsverluste dar, die etwa den Verlusten im sekundären Kurzschluß bei Normalstrom entsprechen. Von den Gesamtverlusten entfällt meist der größere Teil auf die Kupferverluste, welche sich mit wechselnder Belastung quadratisch ändern.

Der Wirkungsgrad eines Transformators bezeichnet das Verhältnis von Leistungsabgabe zu Leistungsaufnahme bei Vollast und $\cos \varphi_2 = 1$. Die Wirkungsgrade von Transformatoren schwanken je nach Leistung und Spannung zwischen etwa 96,5% (Leistung 50 kVA, 10 kV) und 99% (bei Großtransformatoren). Der Jahreswirkungsgrad bezeichnet das Verhältnis von abgegebener zu aufgenommener elektrischer Arbeit in kWh. Er ist abhängig von der jährlichen Belastungskurve und der Aufteilung der Gesamtverluste auf die Leerlauf- und Kupferverluste.

H. Belastbarkeit des Transformators.

1. Die Belastbarkeit des Transformators (Nennleistung in kVA) ist ein Erwärmungs- bzw. ein Kühlungsproblem, da die Baumwoll- oder Papierisolation der Wicklungen nur bestimmten zulässigen Grenzerwärmungen (nach RET etwa 70° C) ausgesetzt werden darf. Von den nach § 18 RET unterschiedenen Kühlungsarten sind die wichtigsten:

TS Trockentransformatoren mit Selbstkühlung (nur für kleine Transformatoren unter 250 kVA, meist unter 10 kVA).

OS Öltransformator mit Selbstkühlung (bevorzugte Kühlungsart; Anwendung von Wellblechkesseln für Leistungen bis 5000 kVA, von Röhrenkesseln bis 15000 kVA, von abschraubbaren Radiatorbatterien bei großen Transportwegen).

Für Wärmeabgabe durch Strahlung (nur freistrahrende Oberflächen, nicht Boden und Deckel oder Wellenflächen) kann bei Raumtemperatur 15° C und mittlerer Oberflächentemperatur 40° C die Wärmeabgabezahl zu etwa 6 W je °C und m² angenommen werden. Die Wärmeabgabezahl für Leitung und Konvektion beträgt 7—8 W je °C und m² je nach Transformatorgröße.

OF Öltransformator mit Fremdlüftung. (Häufig haben Großtransformatoren Selbstkühlung für leistungsschwache Zeiten und Fremdlüftung für die Zeit der Spitzenbelastung. Die Leistungssteigerung durch Lüftung beträgt dabei oft 30—40%. Erforderliche Luftmenge 4—5 m³ je min und kW Verlustleistung.)

OWA Öltransformator mit Ölumlaufl und äußerer Wasserkühlung (häufig für Großtransformatoren bei Vorhandensein geeigneten reinen Wassers). Dabei wird die Ölmenge 4—5mal je h umgewälzt. Nach Karthäuser kann für Berechnung der erforderlichen Kühlfläche in Flüssen die resultierende Wärmeabgabezahl zu 60—80 W je °C und m² angenommen werden.

Innere Wasserkühlung durch Einbau von Kühlschlangen in das Transformatorgehäuse beansprucht ein größeres Transformatorgehäuse und gefährdet bei Wasseraustritt den Transformator.

2. Die zeitweise Überlastbarkeit des Transformators ist von der Anfangstemperatur, der normalen Materialausnutzung und der Wärmeaufnahmefähigkeit der Wicklungen abhängig. Zur überschlägigen Berechnung der Wärmeaufnahmefähigkeit können nach Vidmar die äußeren Abmessungen der Wicklungen einschließlich Isolierung als einheitliche Kupferklötze angenommen werden. Öltransformatoren mit Selbstkühlung haben größere Zeitkonstanten als Trockentransformatoren (letztere $T = 45\text{--}80\text{ min}$) oder Transformatoren mit Fremdkühlung.

3. Der Transformatorschutz umfaßt Einrichtungen zur rechtzeitigen Abschaltung von Überströmen, sowie zur Anzeige und Abtrennung von Windungsschlüssen und Erdschlüssen im Transformator, die sich nicht in einem zur Abschaltung genügenden Überstrom bemerkbar machen. Zur Abschaltung von Überströmen dienen primärseitig angebrachte Leistungsschalter mit

Überstromauslösern, bei kleinen Transformatoren bis etwa 250 kVA auch Hochspannungs-Trennsicherungen in Verbindung mit sekundärseitig eingebauten Überstromautomaten. Diese bewirken einen Überlastungsschutz, den die Sicherungen nicht zu geben vermögen. Windungsschlüsse und Erdschlüsse können durch sog. Differentialschutzeinrichtungen unschädlich gemacht werden. Diese reagieren auf unsymmetrische Strom- und Spannungsverhältnisse und erhöhte Eisenverluste.

Der Buchholzschutz für Öltransformatoren benutzt die mit Windungs- oder Erdschlüssen stets verbundene Ölzersetzung zur Betätigung von Anzeigevorrichtungen oder zur selbsttätigen Abschaltung des Transformators.

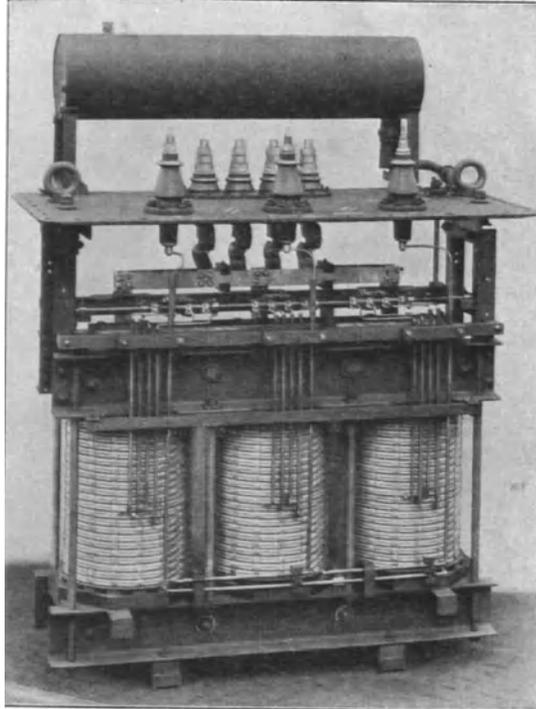


Abb. 19. Drehstromöltransformator 500 kVA, 6000/400 V, fertig bewickelt zum Einsetzen in Wellblechkessel. (Nach Liwshitz-Glückner: Elektr. Maschinen II.)

Zum Transformatorschutz gehören weiter Überspannungsableiter (z. B. Kathodenfallableiter), Einrichtungen (Durchschlagssicherungen) zum Schutze der Niederspannungswicklung gegen den Übertritt von Hochspannung, sowie Ölgruben, die etwa austretendes Öl aufzunehmen und brennendes zu löschen vermögen. Wichtig ist ferner die Sicherung einer genügenden und gleichmäßigen Kühlmittelbewegung, welche bei selbstkühlenden Transformatoren durch geeignete Kühlluftführung erzwungen werden muß. Die elektrischen Schalteinrichtungen müssen

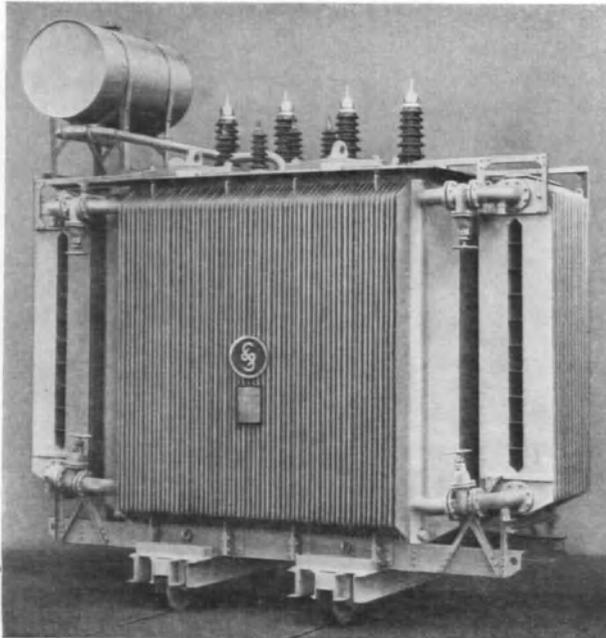


Abb. 20. Transformator 10 000 kVA, 50/10 kV mit zwei durch Absperrschieber abtrennbaren Kühltaschen für Aufstellung im Freien. (Siemens-Schuckert-Werke.)

eine genügende Zahl von Trennschaltern enthalten, um das Auftreten von Rückspannungen bei Arbeiten am Transformator ausschließen zu können. Leerlaufströme von Transformatoren können (selbstverständlich auch dann nur bei entsprechender Vorsicht) nur bei Leistungen unter 250 kVA und Spannungen unter 30 kV durch Lufttrennmesser abgeschaltet werden.

Bei Parallelbetrieb zweier oder mehrerer Transformatoren besteht die Gefahr, daß sich die Belastungsströme nicht entsprechend den Transformatorleistungen aufteilen, oder daß zwischen den Transformatoren Ausgleichströme fließen. Für einen einwandfreien Parallelbetrieb müssen besondere, in den RET festgelegte Voraussetzungen erfüllt sein, insbesondere: gleiches Übersetzungsverhältnis, gleiche Kurzschlußspannung, bei Drehstromtransformatoren Übereinstimmung der Schaltung (gleiche Schaltgruppen).

J. Transformierung von Dreiphasenstrom.

Die Transformierung von Dreiphasenstrom kann durch drei Einphasentransformatoren (in Amerika wegen einfacher Reservehaltung vielfach üblich) oder billiger durch Drehstromtransformatoren mit verketteten magnetischen Kreisen erfolgen. Bei Kerntransformatoren werden drei mit der Primär- und Sekundärwicklung einer Phase bewickelte, meist in einer Ebene aufgestellte Kerne durch gemeinsame Joche verbunden (Abb. 21). Die Magnetgestelle der Manteltransformatoren

schließen die bewickelten meist liegenden Kerne mantelförmig ein (Abb. 22). Für Großtransformatoren (über etwa 50000 kVA) ist zur Verringerung der Bauhöhe (Bahntransport) die Anordnung zweier unbewickelter neben den drei bewickelter Kernen notwendig (Abb. 23). Bei

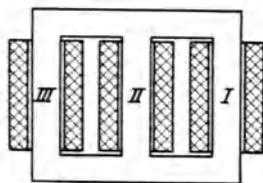


Abb. 21. Drehstromkerntransformator.

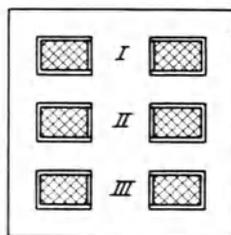


Abb. 22. Drehstrommanteltransformator.

Kern- und Fünfschenkeltransformatoren werden die Wicklungen meist in Form konzentrischer Röhren (Abb. 24) ausgeführt, welche eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen Stromkräfte, billige Herstellung und kleine Streuung ergeben. Es ist jedoch auch die Anwendung der Scheibenwicklung (Abb. 25) möglich, welche insbesondere für Regeltransformatoren Vorteile besitzt. Für Manteltransformatoren kommt nur die Scheibenwicklung in Frage.

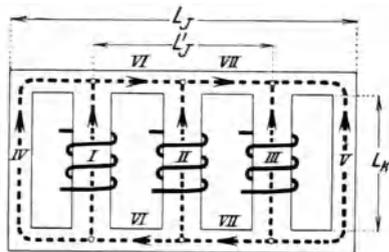


Abb. 23. Fünfschenkelgroßtransformator.

Die Wicklungen der drei Phasen können nach verschiedenen, durch die RET in vier Schaltgruppen eingeteilten Schaltarten miteinander verbunden werden. Sämtliche Schaltungen lassen sich aus den Grundformen der Sternschaltung (\star Abb. 27), der Dreieckschaltung (\triangle Abb. 26), und der Zickzackschaltung (\sim Abb. 28) zusammensetzen. Bei der Dreieckschaltung liegt jeweils eine Phase zwischen zwei Außenleitern, bei der Sternschaltung ergibt dagegen erst die Reihenschaltung zweier Phasen die Außenleiterspannung. Für die Herstellung ergibt sich daher bei der Dreieckschaltung eine größere Windungszahl je Phase als bei der Sternschaltung und damit ein höherer Herstellungspreis. Bei der primär- oder sekundärseitigen Zickzackschaltung wird die betreffende Wicklung jedes Kernes in zwei gleiche Teile unterteilt und je zwei Wicklungshälften verschiedener Kerne etwa entsprechend Abb. 28 gegeneinandergeschaltet. Da die elektromotorischen Kräfte der in Reihe geschalteten Wicklungsteile in der Phase um den Winkel $\pi/3$ verschoben sind, ist zur Erzielung einer bestimmten Sekundärspannung

gegenüber der Sternschaltung eine im Verhältnis $2/\sqrt{3}$ größere Windungszahl erforderlich.

Bei Transformatoren für Niederspannungsnetze dient die sekundäre Stern- oder Zickzackschaltung vielfach dazu, in Verbindung mit dem am Sternpunkt angeschlossenen Nulleiter eine niedrigere Gebrauchsspannung für Glühlampenstromkreise zu schaffen. Die Spannung zwischen einem Außenleiter und dem Nulleiter ist um den Faktor $\sqrt{3}$ kleiner als die Spannung zwischen

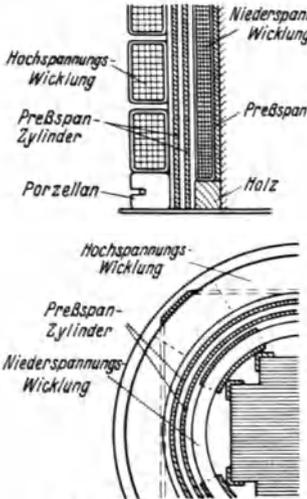


Abb. 24. Röhrenwicklung.

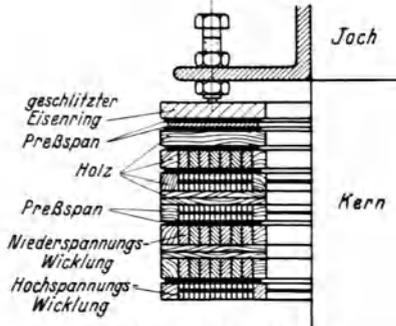


Abb. 25. Scheibenwicklung.

zwei Außenleitern. Dabei können sich allerdings ungleichmäßige Belastungen auf den drei Phasen einstellen.

Die Δ -Schaltung läßt bei Manteltransformatoren keine, bei Kerntransformatoren nur eine geringe (etwa 10% des Nennstromes betragende)

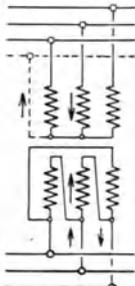


Abb. 26. Dreieck-Sternschaltung.

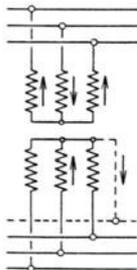


Abb. 27. Stern-Sternschaltung.

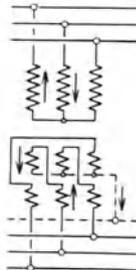


Abb. 28. Stern-Zickzackschaltung.

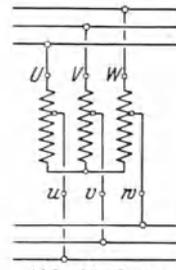


Abb. 29. Spar-schaltung beim Dreiphasentransformator.

einseitige Belastung zu. Sie darf deshalb nur für reine Motorstromkreise, oder bei Großtransformatoren angewandt werden, wo mit gleichbelasteten Phasen gerechnet werden kann.

Die Δ -Schaltung gestattet einphasige Belastungen bis zum vollen Nennstrom. Als Vorteil dieser Schaltung ist anzuführen, daß bei

Beschädigung einer Phase der Weiterbetrieb des Transformators in V-Schaltung (s. Literaturnachweis, S. 371) mit auf 58% verringerter Leistung möglich ist. Praktisch kommt diese Möglichkeit allerdings nur selten zur Anwendung. Der Nachteil der $\Delta\Delta$ -Schaltung ist die teurere Herstellung der Oberspannungswicklung.

Die Stern-Zickzackschaltung läßt ebenfalls einphasige Belastungen bis zum vollen Nennstrom zu. Als Nachteil dieser Schaltung ist die schlechte Wicklungsausnutzung, als Vorteil die einfache Herstellung und Lagerhaltung hervorzuheben, wenn die Notwendigkeit der Fabrikation von Transformatoren für 220/380 V und für 220/115 V besteht.

Bei der Sparschaltung ist die Sekundärwicklung ein Teil der Primärwicklung (Abb. 29). Im Vergleich zu einem normalen Transformator gleicher Leistung ist der Spartransformator billiger herzustellen. Die Sparschaltung eignet

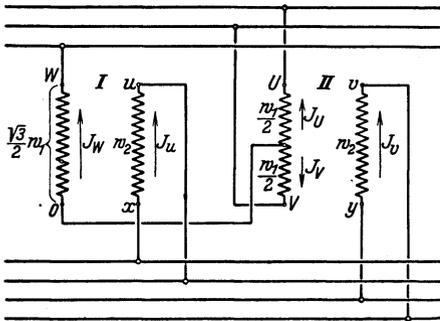


Abb. 30. Scottsche Schaltung.

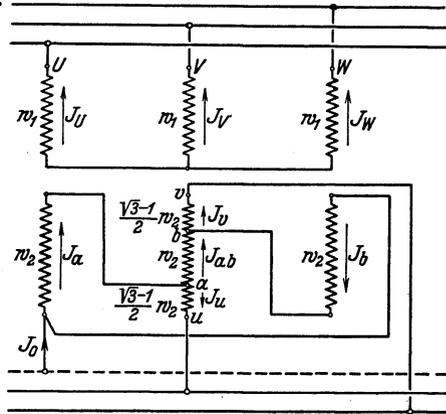


Abb. 31. Schaltung von Jos. Kübler mit (einem) Dreiphasentransformator.

sich besonders für Zusatztransformatoren, bei welchen sich die Primär- und Sekundärspannungen nur wenig unterscheiden. Nachteilig ist vielfach die elektrische Verbindung der Ober- und Unterspannungswicklung, ebenso der je nach Übersetzungsverhältnis und Art des Kurzschlusses gegenüber normalen Transformatoren derselben Leistung und Kurzschlußspannung erheblich größere Kurzschlußstrom.

K. Übergang von Zwei- in Dreiphasenstrom.

Der Übergang von Zwei- in Dreiphasenstrom und umgekehrt ist mittels verschiedener Schaltungen möglich. Die Scottsche Schaltung (Abb. 30) verlangt zwei Einphasentransformatoren (s. Literaturnachweis, S. 371) die Schaltung von Jos. Kübler [Elektrotechn. u. Maschinenb. 1920, 105] einen Dreiphasentransformator (Abb. 31).

L. Transformatoren zur Spannungsregelung.

Die Transformatoren zur Spannungsregelung können in solche mit stufenweiser und solche mit stetiger Spannungsänderung unterteilt werden.

Zur stufenweisen Spannungsregelung dienen Wicklungsanzapfungen, die zweckmäßig an die Wicklungsenden (Überspannungssicherheit) oder die Mitte der Wicklung (Rücksicht auf Streuung) gelegt werden. Bei größeren Leistungen wird die Regelung besonderen Zusatztransformatoren zugeteilt. Die üblichen Regelbereiche liegen zwischen 5 und 20% der Gesamtspannung; sie sollten mit Rücksicht auf Streuflüsse und Preis nicht unnötig vergrößert werden. Die Umschaltung kann entweder mittels stromlos zu bedienender Anzapfschalter (billig, verlangen jedoch Abschaltung der Last) oder mittels besonderer Lastschalter vorgenommen werden. Meist wird hierbei die eigentliche Lastschaltung einem außerhalb des Transformatorbessels liegenden Gerät zugewiesen, das mit den im Ölkessel eingebauten Stufenwählern so verriegelt ist, daß diese nur stromlos schalten können. Zur Vermeidung von Kurzschlüssen beim Überschalten von Stufe zu Stufe werden Widerstände oder Drosselpulen in geeigneten Schaltungen (z. B. von Jansen) verwendet.

Eine stetige Spannungsregelung gestatten die Drehtransformatoren und die Schubtransformatoren. Die Drehtransformatoren sind wie Asynchronmotoren gebaut. Die dauernde Drehung des Läufers ist verhindert. Durch eine relative Verdrehung des Läufers gegen den Ständer wird teils die Zahl der mit dem Primärfeld verketteten Sekundärwindungen, teils die Phase der induzierten Spannung verändert. Drehtransformatoren sind kostspielig und nur für Spannungen unter 15 kV geeignet. Der von der Firma Koch & Sterzel A.G., Dresden entwickelte Schubtransformator besitzt zwei gegeneinandergeschaltete Primärwicklungen, deren Wirkungen auf die Sekundärwicklung durch Verschiebung der Primärwicklungen gegenüber der feststehenden Sekundärwicklung geändert werden. Die Spannungsregelung erfolgt stufenlos zwischen $\pm U_2$.

III. Gleichstromerzeuger und Gleichstrommotoren.

A. Allgemeines über Gleichstrommaschinen.

Gleichstromerzeuger sind umlaufende Maschinen, die mechanische Leistung in elektrische Gleichstromleistung verwandeln. Gleichstrommotoren sind umlaufende Maschinen, die elektrische Gleichstromleistung in mechanische Leistung verwandeln. Gleichstromerzeuger unterscheiden sich in ihrem grundsätzlichen Aufbau im allgemeinen nicht von Gleichstrommotoren und können auch als solche betrieben werden.

1. Aufbau.

Der feststehende Teil (Ständer) der Gleichstrommaschinen trägt im allgemeinen die Pole mit der Erregerwicklung, der umlaufende Teil (Läufer) die Ankerwicklung mit dem Stromwender. Bei der verbreitetsten Ankerwicklung, der Trommelwicklung, werden alle Einzelleiter in axiale Nuten des Ankerblechpaketes eingelegt, und nach besonderen Gesetzmäßigkeiten [R. Richter: Ankerwicklungen für Gleich- und

Wechselstrommaschinen. Berlin: Julius Springer 1922] teils parallel, teils hintereinandergeschaltet. So entstehen wellen- oder schleifenförmige

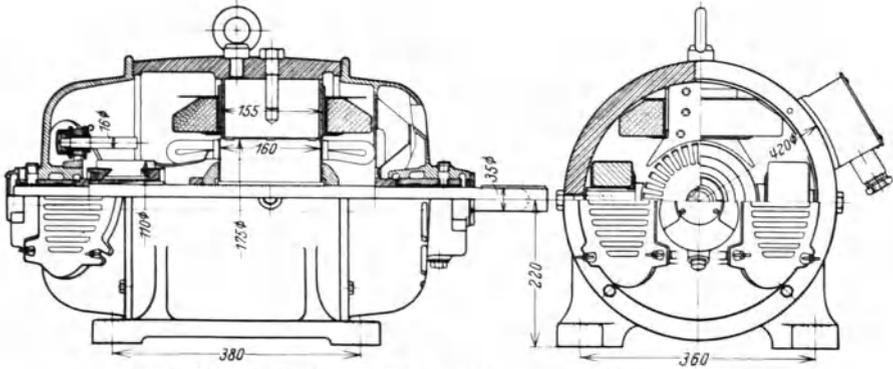


Abb. 32. Schnitt durch AEG-Gleichstrommotor 7 kW, $n = 1700$.

Wicklungsformen, die in gleichartige und sich wiederholende Einzelstücke, die Ankerspulen, aufgeteilt werden können. Der Abstand der Spulenseiten entspricht dabei etwa einer Polteilung.

2. Wirkungsweise.

Nach dem Induktionsgesetz (s. Abschnitt I, C, 6, S. 360) wird in jedem durch ein magnetisches Feld bewegten Leiter eine Spannung erzeugt. Vor dem Nordpol ist die im Leiter induzierte Spannung entgegengesetzt gerichtet wie vor dem Südpol, in einer Zwischenlage (neutrale Zone) wird im Leiter keine Spannung erzeugt. Zwei um eine Polteilung auseinanderliegende Leiter können nun zu einer Spule zusammengeschaltet (Abb. 34) und an zwei Stege eines Stromwenders (Kollektor oder Kommutator) angeschlossen werden. Damit

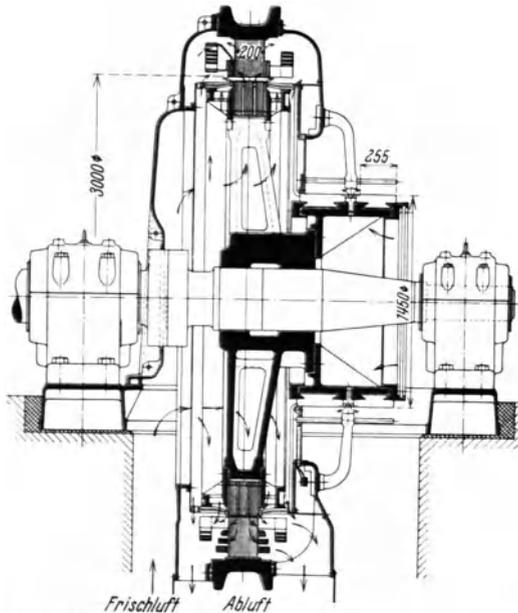


Abb. 33. Schnitt durch SSW-Gleichstromgenerator 3500 kW, $n = 375$.

wird die in jedem Leiter während des Durchgangs durch eine Polpaarteilung erzeugte Wechselfspannung in eine zunächst noch zwischen einem Höchstwert und Null schwankende Gleichspannung umgewandelt. Durch

eine gleichmäßige Besetzung des Ankers mit fortlaufend verbundenen Ankerspulen, deren Enden jeweils an besondere Stromwendersegmente angeschlossen werden, läßt sich an den an der neutralen Zone liegenden Bürsten eine praktisch gleichförmige Spannung abnehmen. Die induzierte

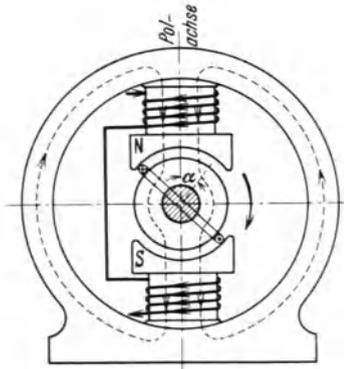


Abb. 34. Bewegung einer Spule im magnetischen Feld.

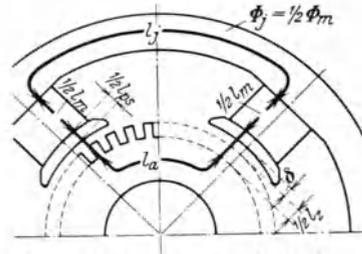


Abb. 35. Verlauf des Induktionsflusses.

Gesamtspannung beträgt bei p Polpaaren, z Ankerleitern und a parallelen Ankerstromzweigen:

$$E = \frac{p \cdot n}{a \cdot 60} \cdot z \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \text{ [V]} = c_1 \cdot n \cdot \Phi \text{ [V]}.$$

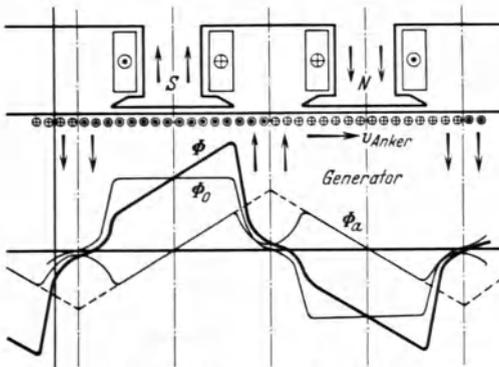


Abb. 36. Feldverteilung im Anker.

Hierin bedeuten n die Drehzahl je min und Φ den nutzbaren Erregerfluß je Pol.

Der Induktionsfluß Φ eines Poles (meist aus Dynamoblech) teilt sich nach dem Eintritt in den Anker bzw. das Joch (meist Stahlguß oder Schmiedeeisen) in zwei gleiche Teile, die sich über die benachbarten ungleichnamigen Polhälften schließen (Abb. 35). Außerdem ist mit Streuflüssen zwischen den Polen in Höhe

von 10—20% des Nutzflusses zu rechnen. Die notwendige Erregerdurchflutung kann aus den Gesetzen des magnetischen Kreises bestimmt werden (s. Kapitel I, C, 5, S. 359).

3. Ankerrückwirkung.

Die magnetische Induktion im Luftspalt kann bei Leerlauf unter den Polen als gleichmäßig, sodann gegen die neutrale Zone als stetig abnehmend angenommen werden. Bei Belastung bewirken die stromführenden Ankerleiter ein Querfeld, das auf der auflaufenden Polseite eine Schwächung, auf der ablaufenden Polseite eine Stärkung des Polflusses hervorruft (Abb. 36). Infolge der bei Gleichstrommaschinen

angewandten hohen Zahninduktionen gleicht die Stärkung auf der einen Polseite nicht ganz die Schwächung des Flusses auf der anderen Polseite aus, so daß sich der Nutzfluß und damit die EMK der Maschine im Lauf verringert. Bei Bürstenverschiebung können die Stromwindungen des Ankers dem Erregerfeld direkt entgegenwirken. Diese beiden als Anker-rückwirkung bezeichneten Erscheinungen können durch eine auf den Polschuhen aufgebrachte, vom Belastungsstrom durchflossene Kompensationswicklung ausgeglichen werden. Diese Maßnahme ist insbesondere bei Regelantrieben und Großmaschinen notwendig.

4. Stromwendung.

Die Stromwendersegmente (Baustoff: hartgezogenes Kupfer) erhalten ein konisches Profil, um sie unter Zwischenlage von Glimmerscheiben (je nach Spannung und Leistung 0,7—1,5 mm stark) mit Hilfe einer Schwalbenschwanzverbindung zu einem zylindrischen Kommutatorkörper zusammenpressen zu können. Die unter einem gewissen Druck (etwa 200 g/cm² bei ortsfesten, 300 g/cm² bei Krananlagen) aufliegenden Bürsten bestehen neuerdings meist aus feinsten Kohle, die teilweise mit metallischen und anderen den Kollektor polierenden Zusätzen versetzt ist. Im Augenblick der Verbindung zweier benachbarter Segmente durch eine Bürste wird die an die beiden Segmente angeschlossene Spule über den Übergangswiderstand und den Eigenwiderstand der Bürste kurzgeschlossen (Abb. 37). Während der Dauer T des Kurzschlusses tritt in der kurzgeschlossenen Spule eine Umkehr der Stromrichtung ein.

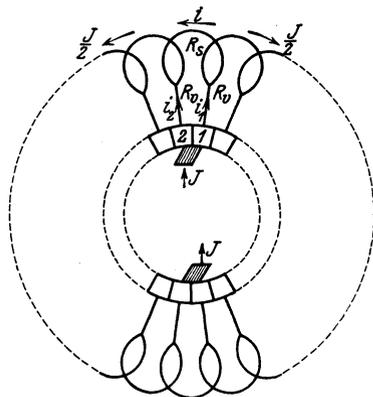


Abb. 37. Stromverlauf in der kurzgeschlossenen Spule bei Stromwendung.

Wenn die Spulen-, Bürsten- und Übergangswiderstände allein zu berücksichtigen wären (Widerstandskommütierung), würde sich dabei eine etwa geradlinige Stromübergangskurve ($\frac{di}{dt} = \text{const}$), also eine gleichmäßige Stromdichte unter den Bürsten ergeben. Infolge der Induktivität der kurzgeschlossenen Spule wird die Kommutierung

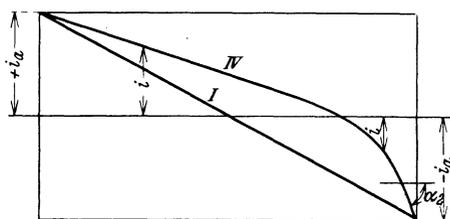


Abb. 38. Verzögerung der Kommutierung durch die EMK der Selbstinduktion der kurzgeschlossenen Spule.

gegenüber der geradlinigen Stromübergangskurve verzögert, die Stromdichte wird unter dem ablaufenden Stromwendersegment vergrößert und unter dem auflaufenden verringert (Abb. 38). Diese Wirkung der EMK der Selbstinduktion der kurzgeschlossenen Spule kann durch das

Vorhandensein eines Magnetfeldes in der Wendezone verstärkt oder abgeschwächt werden, je nachdem die dadurch induzierte EMK der Bewegung im Sinne der EMK der Selbstinduktion oder dieser entgegenwirkt. Es ist also möglich, durch Verschiebung der Bürsten über die neutrale Zone hinaus (beim Erzeuger in Drehrichtung, beim Motor entgegen der Drehrichtung), oder neuerdings fast ausschließlich durch Anbringung von hauptstromerregten Wendepolen zwischen den Hauptpolen die Stromwende-spannung und damit die Stromübergangskurve zu verbessern. Eine gute, funkenfreie Kommutierung setzt voraus, daß während der Stromwendeung die für die betreffende Bürstensorte zulässige Stromdichte (s. Tabelle 8) nicht überschritten wird, und daß die Bürstenhalter einen stetigen Anpressungsdruck gewährleisten. Sorgfältige Auswahl der verwendeten Bürstensorte und gute Bürstenhalter machen sich bezahlt.

Tabelle 8. Zulässige Stromdichten und Spannungsabfälle an Kohlebürsten. [Aus Hütte, 26. Aufl., Bd. 2.]

Bürstensorte	Mittlere Stromdichte	Hierbei ΔU je Bürste	Höchstzulässige Stromdichte	Hierbei ΔU je Bürste
	A/cm ²	V	A/cm ²	V
Kupferkohle	15—20	0,5 —0,6	30	0,7
Sehr weiche Kohle . .	9—12	0,4 —0,6	20	0,7
Weiche Kohle	7—10	0,55—0,7	15	0,9
Mittelharte Kohle . .	6—8	0,9 —1,1	11	1,2
Sehr harte Kohle . .	4—6	1,2 —1,5	9	1,6

Wesentlich für eine gute Kommutierung ist weiter eine sorgfältige Pflege des Kollektors (runder Lauf, gute Politur, Zurückstehen der Glimmerzwischenlagen, zeitweise Reinigung von Kohle- und Kupferstaub). Rillenbildung kann durch axiale Versetzung der Bürsten verringert werden.

B. Gleichstromerzeuger.

1. Ankerspannung und Drehmoment.

Bei Belastung ist die Ankerspannung P_a um den Ohmschen Spannungsabfall ($I_a \cdot R_a$) im Anker (einschließlich Bürsten und Übergang) kleiner als die induzierte EMK:

$$P_a = (E - I_a \cdot R_a) = \left(\frac{p \cdot n}{a \cdot 60} \cdot z \cdot \Phi \cdot 10^{-8} - I_a \cdot R_a \right) [\text{V}].$$

Das vom Antrieb des Gleichstromerzeugers aufzubringende Drehmoment errechnet sich aus

$$D = \frac{10^{-8}}{2 \cdot \pi \cdot 9,81} \cdot \frac{p}{a} \cdot z \cdot \Phi \cdot I_a = c_2 \cdot \Phi \cdot I_a [\text{mkg}].$$

2. Die Betriebseigenschaften der Gleichstromerzeuger

sind im wesentlichen durch die Art der Erregerschaltung gegeben. Sie kommen in bestimmten (bei konstanter Drehzahl aufgenommenen) Kennlinien zum Ausdruck, insbesondere der Leerlaufkennlinie

(Abhängigkeit der EMK vom Erregerstrom), der Belastungskennlinie (Abhängigkeit der Klemmenspannung vom Erregerstrom bei konstantem Ankerstrom) und der sog. inneren bzw. äußeren Kennlinie (Abhängigkeit der EMK bzw. der Klemmenspannung vom Belastungsstrom).

a) Beim fremderregten Gleichstromerzeuger

wird die Erregerwicklung von einem fremden Netz mit konstanter Spannung U_E oder von einer besonderen Erregermaschine gespeist. Der Erregerstrom i ist also abhängig von der Klemmenspannung der Hauptmaschine. Für Generatoren mit Wendepol- und Kompensationswicklung gilt die Schaltung nach Abb. 39. Bei Leerlauf und konstanter Drehzahl (Abb. 40) folgt die EMK dem Erregerstrom nach der Magnetisierungskurve; sie ändert sich proportional mit der Drehzahl. Die Klemmenspannung ist beim Belastungsstrom I_a um den Ohmschen Spannungsabfall und die Ankerückwirkung kleiner als die Leerlauf-EMK bei derselben Erregung (Abb. 40, Kurve 2 mit Kompensation, Kurve 3 ohne Kompensation). Die Abhängigkeit der EMK und der Klemmenspannung vom Belastungsstrom I_a zeigt Abb. 41. Die Spannungsregelung des fremderregten Generators erfolgt durch Änderung des Erregerstromes mit Hilfe der Erregerspannung oder

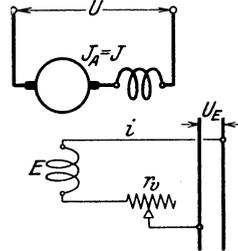


Abb. 39. Fremderregter Gleichstromerzeuger.

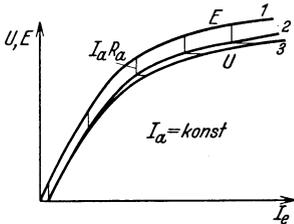


Abb. 40. Leerlaufkennlinie fremderregter Gleichstromerzeuger.

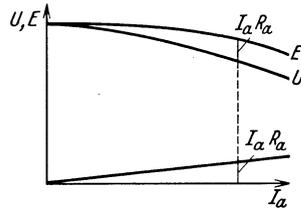


Abb. 41. Belastungskennlinie fremderregter Gleichstromerzeuger.

durch Regelwiderstand im Erregerkreis. Weitgehende und exakte Spannungsregelung ist meist für Wahl der Fremderregung ausschlaggebend.

b) Bei Nebenschlußerregung

wird die Erregerwicklung an den Ankerklemmen angeschlossen (Abb. 42). Beim Erstbetrieb wird Fremderregung angewandt; später genügt bei richtiger Schaltung (Verstärkung des remanenten Feldes durch die Erregung!) der remanente Magnetismus zum Angehen.

Die Leerlaufcharakteristik und die Belastungskennlinie stimmen praktisch mit den entsprechenden Kurven des fremderregten Generators (Abb. 40—41) überein. Die innere und die äußere Kennlinie (E bzw. U in Funktion von I_a bei konstanter Drehzahl und unveränderlichem Widerstand im Erregerkreis) zeigen stärkere Abfälle der Spannungen mit wachsendem Belastungsstrom als bei fremderregten Generatoren (Abb. 43).

An einem bestimmten Belastungspunkt, der sog. kritischen Stromstärke erfolgt eine Umkehr der Kennlinien. Je nach der vorhergegangenen Belastung kann man also bei Nebenschlußgeneratoren bei einem Ankerstrom zwei verschiedene Spannungen erhalten. Nach Abklingen des ersten Stoßes fällt bei Klemmenkurzschluß der Ankerstrom auf einen

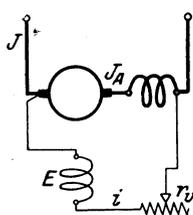


Abb. 42. Nebenschlußgenerator.

kleinen, dem remanenten Magnetismus entsprechenden Wert ab. Für Belastungen unterhalb des Normalstromes ist der Spannungsabfall des Nebenschlußgenerators gegenüber Leerlauf [„Spannungsänderung“ (REM § 70) zwischen Leerlauf und Nennbetrieb etwa 10—15%] gering, was für Generatoren im allgemeinen (Beleuchtung, Antriebe, Elektrolyse, Laden von Akkumulatoren) erwünscht ist.

Die Spannungsregelung erfolgt mittels eines im Nebenschluß liegenden Widerstandes. Die Schaltung ist dabei so zu treffen, daß beim Ausschalten zunächst der ganze Widerstand vor die Magnetwicklung geschaltet und diese am Schluß durch einen besonderen Kurzschlußkontakt kurzgeschlossen wird, um die Entstehung hoher elektromotorischer Kräfte der Selbstinduktion zu vermeiden. Auch Vorkehrungen gegen zufälliges Abschalten der Erregung sind zweckmäßig.

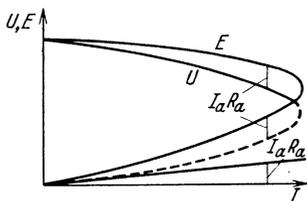


Abb. 43. Innere und äußere Kennlinie des Nebenschlußgenerators.

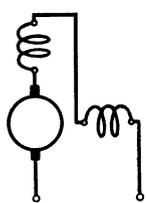


Abb. 44. Reihenschlußgenerator.

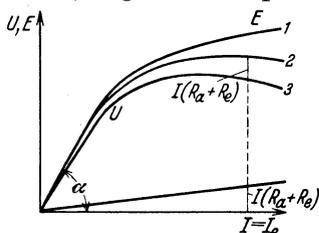


Abb. 45. Innere und äußere Kennlinie des Reihenschlußgenerators.

c) Bei Reihenschlußerregung

wird die Erregerwicklung vom Belastungsstrom durchflossen (Abb. 44). Leerlauf- und Belastungskennlinie sind mit Fremderregung zu ermitteln,

und geben somit Kurven ähnlich Abb. 40—41. Die innere und äußere Kennlinie (Abb. 45) zeigen starke Spannungserhöhungen mit wachsendem

Belastungsstrom. Diese Eigenschaft ist im allgemeinen unerwünscht. Die Reihenschlußerregung kommt deshalb praktisch nur in Verbindung mit der Nebenschlußerregung in der sog. Doppelschlußerregung vor. Die Schaltung von Doppelschlußgeneratoren kann nach Abb. 46a oder b erfolgen. Sie kann zum Konstanthalten (Spannungs-

änderung 1—2%) der Spannung, oder zur Erzielung einer mit wachsendem Strom ansteigenden oder abfallenden Spannung ausgenutzt werden. Die Doppelschlußerregung wird für Straßenbahnen, Schiffsanlagen, zur Speisung von Lichtbogenöfen verwendet. Sie eignet sich, ebenso wie die Reihenschaltung, nicht für die Ladung von Akkumulatorenbatterien.

Bezüglich Unipolarmaschinen, Quersfeldmaschinen (Anwendung für Lichtbogenweißung), Scheinwerfermaschinen, Zugbeleuchtungs- und Dreileitermaschinen, sei auf die Spezialliteratur verwiesen.

d) Eine Änderung der Drehrichtung

bewirkt bei fremderregten und Nebenschlußmaschinen eine Umpolung; bei letzteren müssen außerdem die Anschlüsse der Magnetwicklung vertauscht werden. Bei Reihenschlußmaschinen müssen die Anschlüsse der Magnetwicklung gekreuzt werden, die Stromrichtung im Anker bleibt unverändert. Doppelschlußmaschinen verlangen sowohl die Umpolung der Nebenschluß- wie der Hauptschlußwicklung.

e) Bei Parallelschaltung von Gleichstromerzeugern

mit Nebenschlußerregung ist auf gleiche Spannung und gleiche Polarität zu achten. Zur Sicherstellung dieser Bedingung ist Netzerregung zweckmäßig. Gemäß Abb. 47 a wird zunächst der eine Pol (Schalter A_1)

zugeschaltet, die Spannung mit dem Regulierwiderstand eingestellt, sodann der zweite Pol (Schalter A_2) an das Netz gelegt. Die Belastung wird durch höhere Erregung eingestellt. Abb. 47 b zeigt Parallelschaltung bei Selbsterregung unter Zuhilfenahme eines Drehspulinstrumentes zur Feststellung der Polarität. Bei Doppelschlußmaschinen ist der Vorgang der Parallelschaltung ähnlich wie bei Nebenschlußmaschinen. Zur Verhinderung einer Umpolarisierung müssen jedoch zusätzlich die Verbindungsklemmen zwischen Anker- und Reihenschlußwicklung durch Ausgleichsleitungen verbunden werden. Parallelschaltete Doppelschluß- und Nebenschlußmaschinen verlangen ebenfalls diese Ausgleichsleitungen; außerdem ist der Nebenschlußmaschine ein Zusatzwiderstand vorzulegen, der der Hauptstromwicklung der Doppelschlußmaschine entspricht. Parallelschaltung von Reihenschlußmaschinen kommt nicht in Frage.

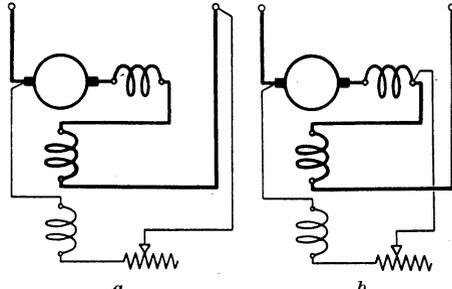


Abb. 46 a und b. Schaltung von Doppelschlußgeneratoren.

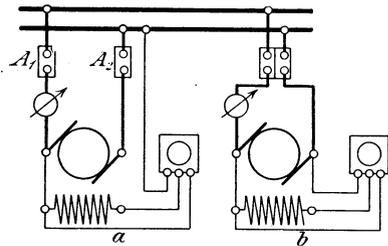


Abb. 47. Parallelschaltung zweier Nebenschlußmaschinen.

f) Die Reihenschaltung

verschiedener Gleichstromerzeuger ist z. B. beim Thury-System vorgesehen, das hierfür Reihenschlußmaschinen verwendet. Die Spannungsregulierung erfolgt durch Widerstände parallel zur Erregerwicklung [Näheres Elektrotechn. Ztschr. 1902, 1001].

Normale Klemmenbezeichnungen, Spannungen, Wirkungsgradbestimmung und zulässige Erwärmung siehe VDE-Normen (REM). Nennleistungen, Drehzahlen und Wirkungsgrade für offene Gleichstrom-

erzeuger sind gemäß DIN VDE 2050 und 2051 genormt. Die Rücksicht auf Kommutierung und Fliehkräfte bewirkt, daß die ausführbaren Drehzahlen von Gleichstrommaschinen mit wachsender Leistung immer kleiner werden.

C. Gleichstrommotore.

1. Klemmenspannung, Drehzahl und Drehmoment.

Bei Gleichstrommotoren ist die EMK um den Ohmschen Spannungsabfall kleiner als die Klemmenspannung U . Es gilt:

$$U = I_a \cdot R_a + E = I_a \cdot R_a + \frac{p \cdot n}{a \cdot 60} \cdot z \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \text{ [V]}.$$

Das Drehmoment berechnet sich zu

$$Md = \frac{10^{-8}}{2 \cdot \pi \cdot 9,81} \cdot \frac{p}{a} \cdot z \cdot \Phi \cdot I_a = c_2 \cdot \Phi \cdot I_a \text{ [mkg]}.$$

2. Die Betriebseigenschaften der Gleichstrommotoren

kommen in Kennlinien zum Ausdruck, welche das Drehzahlverhalten in Abhängigkeit von Drehmoment und Erregung angeben. Die Erregerschaltungen entsprechen denen der Gleichstromerzeuger.

a) Der fremderregte Gleichstrommotor

zeigt bei unveränderter Erregung einen nur geringen Drehzahlabfall mit wachsender Belastung. Der dabei aufgenommene Ankerstrom I_a ist dem

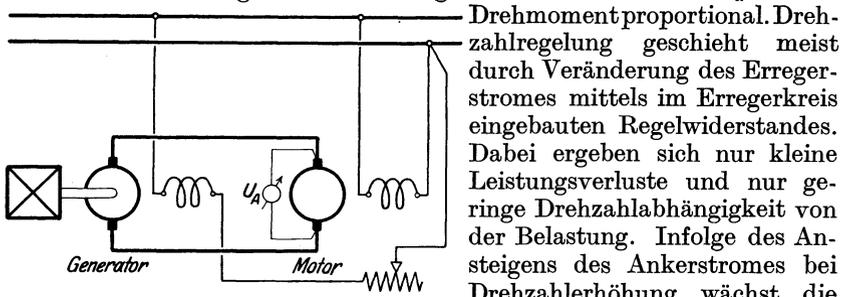


Abb. 48. Ward-Leonard-Schaltung.

Drehmoment proportional. Drehzahlregelung geschieht durch Veränderung des Erregerstromes mittels im Erregerkreis eingebauten Regelwiderstandes. Dabei ergeben sich nur kleine Leistungsverluste und nur geringe Drehzahlabhängigkeit von der Belastung. Infolge des Anstiegens des Ankerstromes bei Drehzahlerhöhung wächst die Ankerrückwirkung. Für weitgehende Drehzahlregulierung sind deshalb Kompensationswicklung und Wendepole unerlässlich. Stark verringerte Erregung bei kleiner Belastung bewirkt gegebenenfalls unzulässige Drehzahlerhöhung („Durchgehen“); Unterbrechungen im Erregerkreis müssen deshalb sorgfältig vermieden werden.

Bei der Ward-Leonard-Schaltung (Abb. 48) wird durch Spannungsänderung im Generator und Erregungsänderung im Motor eine sehr feinstufige Regulierung erreicht. Die Rückwirkungen häufiger Belastungsänderungen auf das Kraftwerk können nach Ilgner durch ein mit der Steuermaschine verbundenes Schwungrad gemildert werden.

Eine Drehzahlregulierung durch Einschalten von Widerständen in den Ankerkreis ergibt hohe Leistungsverluste und eine starke Drehzahlabhängigkeit von Belastungsänderungen.

b) Der Nebenschlußmotor

zeigt bei konstanter Spannung dasselbe Drehzahlverhalten wie der fremd-erregte Motor. Drehmoment und Anzugskraft sind stark spannungsabhängig. Das Anlassen erfolgt durch allmähliches Ausschalten eines Widerstands im Ankerkreis. Um ein genügendes Anzugsmoment bzw. eine Erregung zu erhalten, darf dieser Anlaßwiderstand nicht in einer gemeinsamen Zuleitung zu Anker und Erregung liegen (Abb. 49). Beim Anlassen ist zuerst die Erregung, dann der Anker einzuschalten, beim Ausschalten zuerst der Anker, dann die Erregung auszuschalten. Die Dimensionierung der Anlasser erfolgt nach den REA¹ so, daß die Anlaßstromstärke zwischen einem für die Kommutierung zulässigen Höchstwert I_{\max} und einem Mindestwert I_{\min} schwankt. Die Anlaßzeit wurde für verschiedene Motorleistungen N kW durch die empirische Formel $t = (4 + 2 \sqrt{N})$ s festgelegt. Näheres über Widerstandsstufung siehe REA.

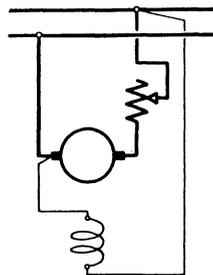


Abb. 49. Richtige Schaltung des Anlaßwiderstandes beim Nebenschlußmotor.

c) Der Reihenschlußmotor

erhält seine Erregung durch den Ankerstrom. Sein Drehmoment ist ausschließlich der Stromstärke, und zwar bei kleiner Belastung quadratisch, bei größerer Belastung etwa direkt proportional. Gering belastete Reihenschlußmotoren nehmen eine hohe Drehzahl an.

Entsprechend dem verstärkten Feld sinkt die Drehzahl mit wachsender Belastung (Abb. 50), so daß die dem Netz entnommene Leistung nicht — wie beim Nebenschlußmotor — proportional mit dem Drehmoment wächst. Diese Eigenschaften, zusammen mit dem hohen Anfahrmoment, machen die Gleichstrom-Reihenschlußmotoren für Bahnen, Krananlagen usw. besonders geeignet. Die Drehzahlregulierung erfolgt durch Veränderung eines zur Erregerwicklung parallel geschalteten Widerstands, teilweise auch durch Reihenparallelschaltung zweier gleicher, mechanisch gekoppelter Motoren.

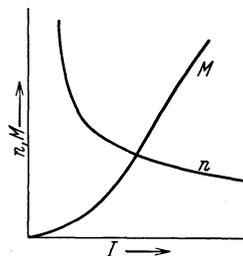


Abb. 50. Drehzahl- und Stromkennlinien des Reihenschlußmotors in Abhängigkeit vom Moment.

Gleichstromkranmotoren werden neuerdings nach Aussetzleistung für bestimmte relative Einschaltdauern von 15, 25 und 40%, bezogen auf die gesamte Spieldauer, definiert.

Die Anlasser von Reihenschlußmotoren können nach REA (s. dort) mit kleinerer Stufenzahl ausgerüstet werden als die für Nebenschlußmotoren.

¹ REA-Regeln für die Bewertung und Prüfung von Anlassern und Steuergeräten des VDE.

Die Doppelschlußschaltung wird meist zur Verringerung der Ankerrückwirkung von Nebenschlußmotoren angewandt, wenn ein umfangreicher Drehzahlregelbereich in Frage kommt.

d) Erzeuger als Motoren, Drehrichtungsumkehr.

Ein Gleichstromerzeuger darf als Motor soweit belastet werden, daß seine Stromaufnahme der Stromabgabe bei Erzeugerbetrieb entspricht. Leistungsabgabe und Drehzahl sind dabei kleiner als bei Erzeugerbetrieb. Wenn Feld und Stromrichtung im Anker unverändert bleiben, läuft die Gleichstrommaschine als Motor im entgegengesetzten Drehsinn wie sie als Erzeuger angetrieben wurde. Soll die Drehrichtung geändert werden, so muß die Stromrichtung entweder im Anker einschließlich Wendepolen oder in der Magnetwicklung geändert werden.

Nebenschlußmaschinen behalten beim Übergang vom Erzeuger- zum Motorbetrieb die Erregung bei, die Stromrichtung im Anker ändert sich. Sie laufen also als Motoren und Erzeuger in derselben Drehrichtung. Von gekuppelten und parallel geschalteten Nebenschlußmaschinen kann je nach Erregung ein Teil als Motoren, ein Teil als Generatoren wirken.

Bei Reihenschlußmaschinen muß beim Übergang vom Erzeuger- zum Motorbetrieb und umgekehrt die Erregung umgepolt werden, um Drehrichtung und Feldrichtung beizubehalten.

IV. Wechselstromerzeuger und Wechselstrommotoren.

Wechselstromerzeuger sind umlaufende Maschinen, die mechanische Leistung in elektrische Wechselstromleistung verwandeln. Wechselstrommotoren sind umlaufende Maschinen, die elektrische Wechselstromleistung in mechanische Leistung verwandeln.

Nach der Stromart unterscheidet man Einphasen-, Zweiphasen- und Dreiphasen-Wechselstrommaschinen, von denen die letzteren, auch Drehstrommaschinen genannt, die größte Bedeutung haben.

Nach Wirkungsweise, Aufbau und Drehzahlverhalten unterscheidet man synchrone und asynchrone Wechselstrommaschinen sowie Wechselstromkommutatormaschinen.

Durch VDE sind einheitliche Klemmenbezeichnungen festgelegt worden. Bewertung und Prüfung von Wechselstrommaschinen siehe REM¹.

A. Synchrone Wechselstrommaschinen.

1. Aufbau.

Der feststehende Teil („Ständer“) der synchronen Wechselstrommaschinen trägt im allgemeinen die Ankerwicklung, der umlaufende Teil („Läufer“) die Pole mit der Erregerwicklung (Abb. 53). Meist läuft das Polrad innerhalb des Ankers (Innenpolmaschinen). Bei den

¹ REM = „Regeln für die Bewertung und Prüfung von elektrischen Maschinen“ des VDE.

Außenpolmaschinen liegen die Pole außerhalb der Ankerwicklung; es ergibt sich deshalb ein sehr hohes Schwungmoment, das gelegentlich für Kolbenmaschinen von Vorteil sein kann. Das Magnetsystem kann entweder aus ausgeprägten Einzelpolen (Abb. 52 *a*) (meist bei Langsamläufnern) oder, wie z. B. bei Turbomaschinen, aus genuteten Vollzylindern (Abb. 52 *b*) aufgebaut werden, deren Nuten die Erregerwicklungen aufnehmen.

Polbefestigung und Wicklungsabstützung bei Einzelpolmaschinen, Aufbau, Zahnform und Bandagierung der Wicklung der Turboläufer sind nach den bei der betreffenden Maschinengattung in Frage kommenden Schleuderdrehzahlen (bei normalen Motoren und Erzeugern 20%, bei Dampfturbinenantrieb 25%, bei Wasserturbinenantrieb 80—120% über Nenndrehzahl) zu bemessen. Die Grenzleistungen der Turbogeneratoren (zur Zeit 80000 kW

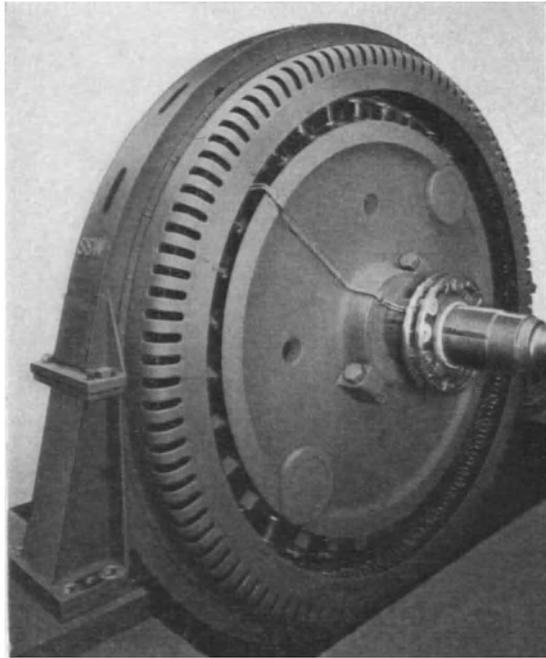


Abb. 51. Drehstrom-Synchronmotor FW 560/10—32, Leistung 575 kW, 3 kV, 188 U/min (SSW).

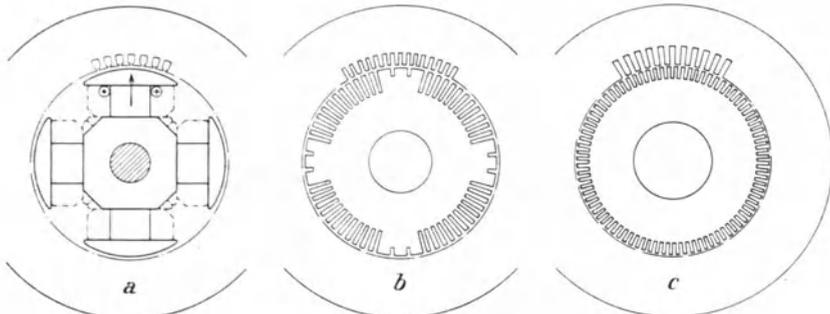


Abb. 52. Typische Ausführungen der Magnetkörper von Synchronmaschinen. *a* ausgeprägte Pole; *b* Turboläufer; *c* Läufer von Synchroninduktionsmotor (BBC).

bei 3000 U/min und 160000 kW bei 1800 U/min) sind durch die erheblichen mechanischen Beanspruchungen durch Fliehkräfte bzw. die

Herstellungsmöglichkeit genügend homogener großer Schmiedestücke gegeben.

Die Ankerwicklung [Richter: Ankerwicklungen für Gleich- und Wechselstrommaschinen. Berlin: Julius Springer 1920] wird in meist (Ausnahme Einphasengeneratoren) gleichmäßig über den Umfang des Ankerblechpaketes (Einzelbleche 0,3—0,5 mm dick) verteilten Nuten untergebracht, deren Form (offen, halboffen, geschlossen) wesentlich die

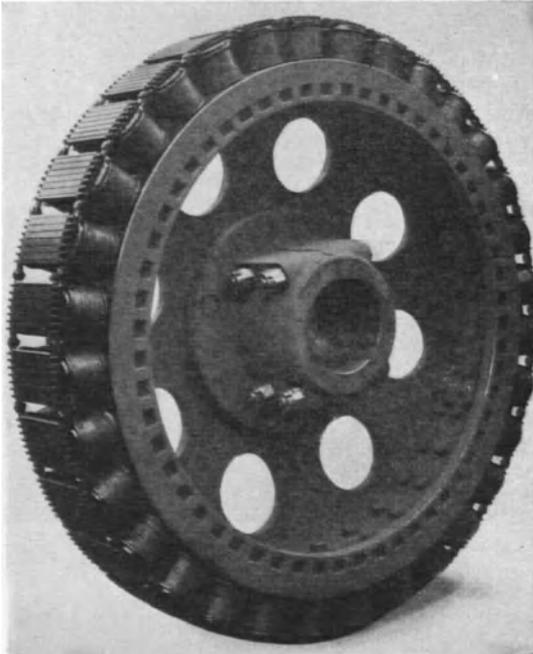


Abb. 53. Polrad eines Synchronmotors für Selbstanlauf von 260 kW, 3 kV 188 U/min (BBC).

Ausbildung und Herstellung der Ankerwicklung (einlegen, einträufeln, einfädeln, löten) beeinflusst. Je Pol und Phase werden eine oder mehrere Nuten (Ein- oder Mehrlochwicklungen) vorgesehen. Wenn jede Nut nur eine Spulenseite enthält, spricht man von Einschichtwicklungen, bei zwei Spulenseiten von Zweischichtwicklungen. Der Abstand der Spulenseiten ist entweder gleich (Durchmesserwicklung) oder kleiner (gesehnte Wicklung ergibt kleinere Verluste durch Oberfelder) als eine Polteilung. Je nach Spannung wird die Nut-Isolation gegen Eisen durch Preßspanhülsen mit Glimmereinlage (bis 3 kV) bzw. durch warme

Umpressen der Spulenseiten mit Mikapapier erreicht. Durch Wahl rechteckiger Leiterquerschnitte und Befestigung der Wickelköpfe wird gegenseitige Verschiebung, durch Tränkung und Vakuumtrocknung der Spulen werden Luft einschlüsse zu vermeiden gesucht. Die Eingangsspulen erhalten zum Schutz gegen Sprungwellen eine besonders gute Windungs-isolation.

Die Ableitung der Verlustwärme wird durch Schaffung hinreichender axialer (hauptsächlich im Läufer) und radialer (Unterteilung des Ständereisens) Kühlluftwege bewirkt. Der Einbau von Ringlaufkühlern verhindert Verschmutzung und Verstopfung der Kühlluftwege. Durch Anwendung von Wasserstoff an Stelle von Luft als Kühlmittel, welche dichten Abschluß des Kreislaufwegs voraussetzt, kann die Maschinenleistung um 25—30% gesteigert werden.

2. Wirkungsweise.

Sowohl bei Maschinen mit vollzylindrischem als mit Einzelpolmagnet-system wird durch Anordnung der Erregerwicklung bzw. geeignete Formgebung der Pol-schuhe (nach außen Luftspalterweiterung) eine räumlich sinus-förmig verlaufende Feldkurvenform erstrebt. Bei synchronem Lauf wird die zunächst offen gedachte Ständerwicklung von einem auch zeitlich sinusförmig verlaufenden Induktionsfluß durchsetzt, der in dieser transformatorisch eine EMK je Phase induziert von der Größe

$$E = 4,44 \cdot f_w \cdot k_f \cdot f \cdot w \cdot \Phi_{\max} 10^{-8} \text{ [V]}.$$

Hierin bedeuten f die Frequenz in Hertz, Φ_{\max} den Fluß je Phase, w die mit diesem verkettete Windungszahl, f_w den sog. Wicklungs-

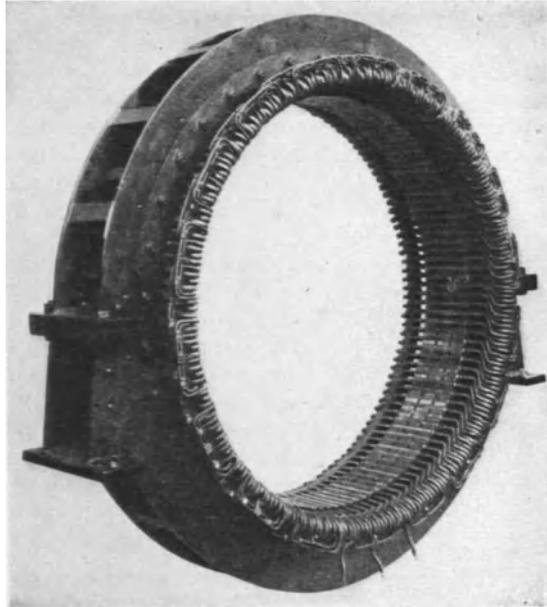


Abb. 54. Ständer eines Synchronmotors für Selbstanlauf von 260 kW, 3 kV, 188 U/min (BBC).

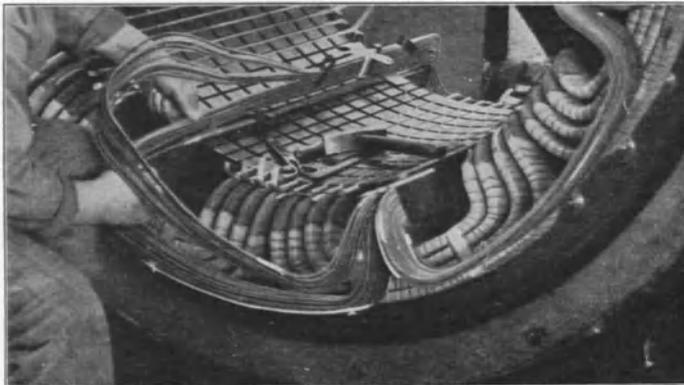


Abb. 55. Eingeträufelte Ständerwicklung (s. auch Kühlluftkanäle). (Nach Liwschitz-Glöckner: Elektr. Maschinen II.)

faktor und k_f den sog. Feldfaktor. Der Wicklungsfaktor f_w (meist 0,96—0,93) bringt zum Ausdruck, daß infolge der räumlichen Verteilung

der Ständerspulen die in den einzelnen Spulen entstehenden EMKE eine kleinere Gesamt-EMK ergeben als ihrer arithmetischen Summe entspricht. Der Feldfaktor k_f berücksichtigt die Abweichung der Feldkurve von einer reinen Sinuskurve.

Bei Belastung bildet der Ankerstrom von Mehrphasenmaschinen Ankerdrehfelder aus, welche sich mit dem Erregerfeld zu einem resultierenden Feld zusammensetzen. Die Art dieser Ankerrückwirkung hängt von der Phasenlage des Belastungsstromes und der Bauart der Maschine (Vollzylinder oder Einzelpole) ab. Bei Phasengleichheit zwischen Ankerstrom und EMK ergibt sich bei Turbomaschinen nur eine quer-

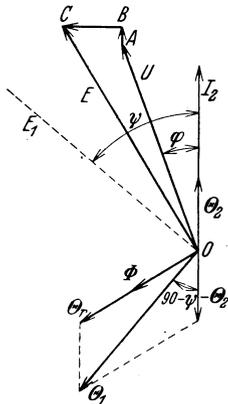


Abb. 56. Spannungs- und Durchflutungsdiagramm eines Synchrongenerators mit Vollpolen bei induktiver Belastung.

magnetisierende Ankerrückwirkung, welche infolge der Eisensättigung in den Polen insgesamt eine Schwächung des Erregerflusses bewirkt. Liegen Belastungsstrom und EMK um 90° auseinander, so ergibt sich bei Turbomaschinen eine längsmagnetisierende Ankerrückwirkung, welche bei Phasennacheilung des Stromes den Erregerfluß schwächt, bei Phasenvoreilung stärkt, Erzeugerbetrieb vorausgesetzt (bei Motorbetrieb umgekehrt). Zwischenliegende Phasenlagen ergeben entsprechende quer- und längsmagnetisierende Komponenten, welche ähnlich wie beim Transformator zur Bestimmung des resultierenden Flusses bzw. der Spannung herangezogen werden müssen.

Einzelpolmaschinen zeigen infolge des wechselnden magnetischen Widerstands an Polen bzw. Pollücken zusätzlich zu den für Turbomaschinen geltenden Ankerrückwirkungserscheinungen noch Verzerrungen der Kurvenform durch die Querdrehfeldmagnetisierung, zu deren Begrenzung ein geeignetes Verhältnis von Erreger- und Ankerdurchflutung gewählt werden muß.

In ganz ähnlicher Weise wie beim Transformator (s. II., S. 373) können Anker- und Läuferdurchflutungen sowie EMK, Ohmsche und induktive Spannungsabfälle und Klemmenspannung in einem Vektor- und Durchflutungsdiagramm veranschaulicht werden (s. Abb. 56).

Bei Einphasengeneratoren tritt an die Stelle des Ankerdrehfeldes ein Ankerwechselfeld, das man sich aus einem synchron rotierenden und einem gegenläufig rotierenden Ankerdrehfeld entstanden denken kann. Das synchrone Ankerdrehfeld hat die halbe Amplitude des Wechselfeldes und kann in gleicher Weise wie bei Mehrphasenmaschinen mit dem Erregerfeld zusammengesetzt werden. Das gegenläufige Drehfeld induziert im Läufer eine EMK mit der doppelten Periodenzahl, welche erhöhte Verluste im Läufer und Ständer und eine Verzerrung der Spannungs- und Durchflutungskurve zur Folge hat. Zur Verringerung dieser Auswirkungen des gegenläufigen Drehfeldes der Einphasengeneratoren werden auf den Läufer Dämpferwicklungen aufgebracht.

3. Verhalten im Betrieb.

Das Betriebsverhalten der Synchronmaschine kommt in verschiedenen Kennlinien zum Ausdruck.

a) Die Kennlinien der Synchronmaschine.

Die Leerlaufkennlinie (Abb. 57) gibt die Abhängigkeit der EMK von der Erregerdurchflutung an, welche durch die Magnetisierungskurve der Maschine gegeben ist. Die gestrichelte Verlängerung des geraden Teils der Magnetisierungskurve in Abb. 57 bezeichnet den auf den Luftspalt entfallenden Magnetisierungsanteil.

Die Kurzschlußkennlinie gibt die Abhängigkeit des Dauerkurzschlußstromes von der Erregerdurchflutung an. Da der Dauerkurzschlußstrom hauptsächlich zur Magnetisierung der Ankerstrefelder verbraucht wird, wirken Ankerdurchflutung und Erregerdurchflutung einander praktisch direkt entgegen. Ist in Abb. 57 lm die Kurzschlußspannung der Maschine, so ist Om die zugehörige resultierende Durchflutung, welche zusammen mit der Ankerrückwirkung \overline{mn} die Gleichstromerregerdurchflutung On ergibt. Im Punkte n kann nun der zugehörige Ankerkurzschlußstrom I_2 aufgetragen werden. Damit ist die Kurzschlußkennlinie als Verbindungsgerade zwischen O und dem Endpunkt von I_2 festgelegt. Das Dreieck

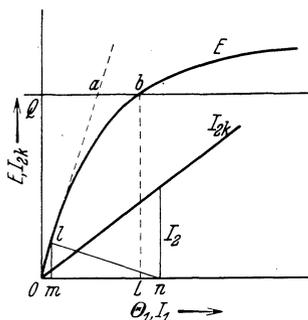


Abb. 57. Leerlauf- und Kurzschlußkennlinie.

mln heißt das Potiersche Dreieck. Das Verhältnis seiner Seitenlängen ml und \overline{mn} gibt das Verhältnis von Streuspannung zu Ankerdurchflutung an, welches für jede induktive Belastung der Maschine Bedeutung besitzt (Näheres s. Spezialliteratur).

Unter dem Kurzschlußverhältnis $u_k = I_k/I_n$ einer Synchronmaschine (zu beziehen auf Leerlauf- oder Vollasterregung) versteht man das Verhältnis von Dauerkurzschlußstrom zum Nennstrom. Das Kurzschlußverhältnis und die Spannungsänderung (= Unterschied der Spannung zwischen Vollast und Leerlauf bei Vollasterregung) neuerer Synchronmaschinen zeigt Tabelle 9. Ältere Synchronmaschinen können höhere Werte für das Kurzschlußverhältnis zeigen.

Der Stoßkurzschlußstrom (erster Stromstoß bei plötzlichem Kurzschluß) beträgt ein Mehrfaches des Dauerkurzschlußstromes, da im ersten Augenblick noch der volle Induktionsfluß vorhanden ist. Bei neueren Maschinen darf er nach REM den 21fachen Effektivwert des Nennstromes der Maschine nicht übersteigen; bei älteren Turbogeneratoren kann er die doppelten Werte erreichen.

Die bei Entlastung von Synchronmaschinen zu erwartende Spannungsänderung (bei nachteilendem Strom Spannungserhöhung, bei voreilendem

Tabelle 9. [Aus Hütte, 26. Aufl., Bd. 2.]

Maschinenart	Spannungsänderung		Kurzschlußverhältnis	
	Nennlasterregung		Leerlauf- erregung	Vollast- erregung $\cos \varphi = 0,8$
	$\cos \varphi = 1$ %	$\cos \varphi = 0,8$ %		
Drehstromgeneratoren:				
Langsamläufer	10—20	20—30	1,5—1,3	3,0—2,5
Schnellläufer	15—25	30—40	1,3—0,9	2,6—2,0
Turbogeneratoren	20—30	40—50	0,8—0,5	1,8—1,3
Einphasenbahngeneratoren	18—28	35—45	1,2—0,8	2,4—1,6

Strom Spannungsminderung) bzw. tretenden Spannungsschwankungen

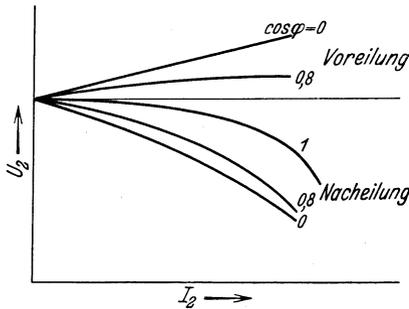


Abb. 58. Äußere Kennlinien der Synchronmaschine.

werden mit Hilfe von Reglern (Trägglern oder Schnellglern), die auf den Erregerstrom einwirken, im allgemeinen auf eine einstellbare Spannung reguliert. Der jedem Belastungsstrom und jedem $\cos \varphi$ zugehörige Erregerstrom wird durch Regulierkurven, die Abhängigkeit der Klemmenspannung vom Ankerstrom I_2 bei gleichbleibender Erregung und gleichbleibendem Leistungsfaktor durch die sog. äußere Kennlinie der Synchronmaschine (Abb. 58) veranschaulicht.

b) Das Parallelarbeiten von Synchronmaschinen.

Das Parallelschalten von Synchronmaschinen setzt gleiche Klemmenspannung, gleiche Periodenzahlen und gleiche Phasenlage der

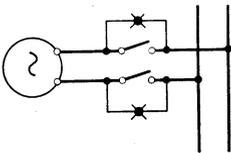


Abb. 59. Synchronisierschaltung (Dunkelschaltung).

zusammenzuschaltenden Maschinen voraus. Zur Feststellung des zum Parallelschalten geeigneten Betriebszustandes dienen vielfach Synchronisierlampen oder Voltmeter (Abb. 59), welche an die Schalterkontakte gelegt werden. Bei Schaltung nach Abb. 59 ist angenäherter Synchronismus vorhanden, wenn die Lampen dunkel brennen, richtige Phasenfolge, wenn die Helligkeitsänderung aller drei Lampen in gleichem Rhythmus erfolgt. Von den

Elektrofirmen sind auch selbsttätige Parallelschaltvorrichtungen¹ erhältlich.

Die Wirklastverschiebung zwischen parallellaufenden Synchronmaschinen kann nicht durch Veränderung der Erregung, sondern nur durch Veränderung der Drehmomente der Antriebsmaschinen erfolgen. Das Magnetsystem versucht, bezogen auf den Anker, eine andere

¹ Beschreibungen siehe Elektrotechn. Ztschr. 1921, 1098 (SSW); 1923, 524 (Voigt & Haeffner); BBC Nachr. 1923, 20; AEG-Mitt. 1931, 144.

Lage einzunehmen. Die Erreger- und Ankerdurchflutungen verschieben ihre gegenseitige Lage im Vektordiagramm und verändern die Vektorlage der resultierenden Durchflutung und damit der EMK. Bei Steigerung des Drehmoments kommt die EMK in Voreilung zur Klemmenspannung; als Folge hiervon wird der Generator zur Aufnahme von Wirkleistung gezwungen. Ist kein Antriebsdrehmoment, sondern ein Belastungsdrehmoment vorhanden, so kommt die EMK in Nacheilung zur Klemmenspannung, und die Maschine läuft als Synchronmotor.

Die Verschiebung der räumlichen Lage des Magnetpols gegenüber dem Anker erfolgt durch die sog. synchronisierende Kraft soweit, bis das Antriebsdrehmoment dem Lastmoment entspricht. Der Übergang zu einem neuen Belastungszustand erfolgt in Form von gedämpften Schwingungen um die neue Endlage, deren Schwingungsdauer durch die synchronisierende Kraft und das Schwungmoment des Läufers bestimmt ist. Die Eigenschwingungsdauer bei Parallelbetrieb einer Maschine mit unendlich starkem Netz rechnet sich für Synchronmaschinen nach der Formel

$$T_e = \frac{0.25}{p} \sqrt{\frac{GD^2 \cdot f}{(I_k/I) \cdot N}} \text{ s},$$

für normale Drehstromsynchronmaschinen zu $T_e = \frac{6}{p} \sqrt{\frac{GD^2 \cdot f}{I_k \cdot U}} \text{ s}$.

Hierin bedeuten p = Polpaarzahl, f = Frequenz in Hertz, GD^2 = Schwungmoment [kg m²], U = Klemmenspannung [V], N = Leistung [kVA], I = Ankerstrom [A], I_k = Dauerkurzschlußstrom [A] für die betreffende Betriebserrregung.

Außer diesen Eigenschwingungen können sich z. B. bei Antrieb durch Kolbenmaschinen vermöge des Ungleichförmigkeitsgrades der Antriebsmaschine $\left(\frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\text{mit}}}\right)$ erzwungene Schwingungen einstellen. Es ist darauf zu achten, daß der Takt der erzwungenen Schwingungen nicht mit einer der Eigenschwingungszahlen des Systems genau oder angenähert übereinstimmt, um Resonanzschwingungen, die zu Pendelungen oder Außertrittfällen führen können, zu vermeiden. Diese Überlegungen gelten auch für den Anschluß von Synchronmotoren an Netze.

Die Änderung der Erregung von Synchronmaschinen bewirkt eine Vergrößerung (bei Übererregung von Generatoren) oder eine Verkleinerung (bei Untererregung von Generatoren, bei Motoren umgekehrt) der EMK gegenüber der Klemmenspannung. Die Maschine muß in diesem Falle von einem solchen Strom durchflossen werden, daß der Erregerfluß durch die Ankerrückwirkung geschwächt bzw. verstärkt wird. Das ist im ersten Falle (s. Abschnitt über Ankerrückwirkung, S. 396) bei Generatoren ein nacheilender, bei Motoren ein voreilender, im zweiten Falle ein voreilender bzw. ein nacheilender Ankerstrom.

c) Das Betriebsverhalten des Synchronmotors.

Das Betriebsverhalten des Synchronmotors, insbesondere die Zusammenhänge von Strom, Leistung, Drehmoment und Wirkungsgrad bei gleichbleibender Klemmenspannung und Erregung oder

gleichbleibender Leistung lassen sich durch Kreisdiagramme [s. Näheres Richter: Elektrische Maschinen, Bd. 2. Berlin: Julius Springer 1930. — Liwshitz: Die elektrischen Maschinen, Bd. 1. Leipzig: B. G. Teubner 1931] beschreiben. Bestimmt man aus diesen oder durch Messung die bei gleichbleibender Leistung verschiedenen Erregerströmen zugeordneten Ankerströme, so ergeben sich die sog. V-Kurven des Synchronmotors (Abb. 60). Die Verbindung der Minima verschiedener V-Kurven ergibt die $\cos \varphi = 1$ -Linie. Die Stabilisierungsgrenze nähert sich mit wachsender Belastung der $\cos \varphi = 1$ -Linie, so daß sich bei Vollbelastung von Synchronmotoren eher eine Über- als eine Untererregung empfiehlt.

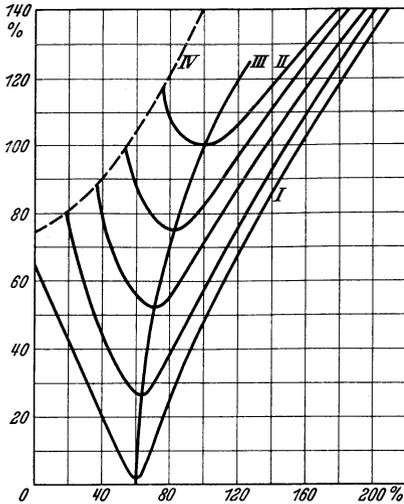


Abb. 60. V-Kurven von Synchronmotoren bei verschiedenen Belastungen. I V-Kurve bei Leerlauf; II V-Kurve bei Vollast; III Linie für $\cos \varphi = 1$; IV Kippgrenze.

Hilfe einer auf den Polen aufgebrauchten Dämpferwicklung bis zu etwa 95% der Drehzahl; hiernach wird durch meist selbsttätige Vorrichtungen die Erregung zugeschaltet. Sofern es die Größe des Kraftwerkes irgendwie zuläßt, sollte direkte Einschaltung (ohne Spannungsminderung) gewählt werden. Hierbei lassen sich Anzugsmomente von 40—50% der Nennmomente bei 3,5—4fachem Anlaufstrom, bei Bedarf auch höhere Anzugsmomente bei entsprechend erhöhten Anlaufströmen und gegebenenfalls schlechterem Betriebswirkungsgrad erreichen.

B. Asynchrone Wechselstrommaschinen.

1. Aufbau.

Der Ständer der Asynchronmaschine zeigt ebenso wie die Ständerwicklung keine wesentlichen Unterschiede gegenüber den entsprechenden Teilen von Synchronmaschinen. An Stelle des Magnetsystems der Synchronmaschine tritt jedoch ein aus geschichteten Blechen (meist

Damit ist gleichzeitig eine Verbesserung des Leistungsfaktors der Anlage verbunden. Das Kippmoment ist dem Kurzschlußverhältnis $u_k = I_k/I_n$ proportional, es verhält sich zum Nennmoment etwa wie $\sqrt{1 + u_k^2}$.

Synchronmotoren werden häufig als Blindleistungserzeuger verwendet. Ihre Hauptvorteile zeigen sich bei langsamlaufenden Antrieben und Leistungen über etwa 300 kW (z. B. Kolbenkompressoren), wo sie vielfach mit etwa 1—2,5% besserem Wirkungsgrad und zu niedrigerem Anschaffungspreis als Asynchronmotoren gebaut werden können, abgesehen von der Verbesserung des Leistungsfaktors, der bei langsamlaufenden Asynchronmotoren (Größenordnung $\cos \varphi = 0,7—0,75$) störend sein kann. Der Anlauf solcher Synchronmotoren erfolgt asynchron mit

0,5 mm dick) zusammengesetzter Läufer, der eine Wicklung trägt. Diese kann — und zwar für Mehr- oder Einphasenmaschinen — als

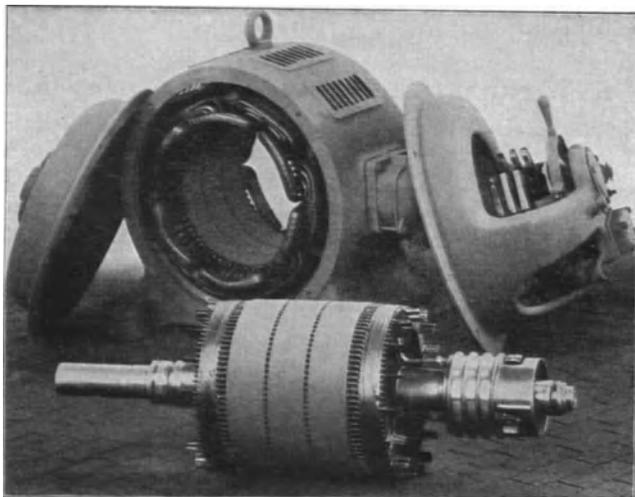


Abb. 61. Dreiphasiger Asynchronmotor mit Schleifringläufer 40 kW, $n = 725$ U/min.
(Nach Liwshitz: Elektr. Maschinen I.)

Mehrphasenwicklung, die an Schleifringe angeschlossen wird oder als kurzgeschlossene Käfigwicklung ausgeführt sein. Die Wicklungen der Schleifringläufer werden meist als Zweischichtstabwicklungen gebaut. Die Zwingen für die Verbindung zweier Stäbe erhalten flügelartige Verlängerungen, um eine genügende Luftbewegung herbeizuführen. Die Käfigwicklungen für kleinere Motoren werden aus meist runden Stäben zusammengesetzt, die auf beiden Seiten durch Kurzschlußringe innig miteinander verbunden werden. Häufig werden Kurzschlußringe und Stäbe gemeinsam aus Aluminiumguß gegossen. Bei größeren Leistungen bekommen die einzelnen Kurzschlußstäbe zur Erzielung hoher Anlaufmomente bei verhältnismäßig kleinen Anlaufströmen eine

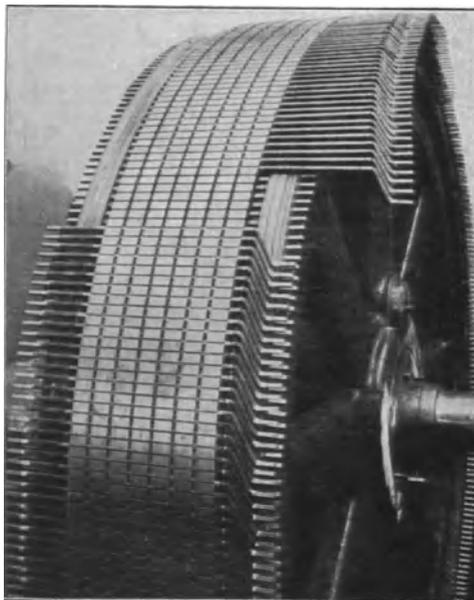


Abb. 62. Läufer einer Asynchronmaschine mit Zweistabwicklungen. (Nach Liwshitz-Glöckner: Elektr. Maschinen II.)

schmale rechteckige Form (Wirbelstromläufer), oder es werden mehrere Stabreihen mit verschiedenen Stabquerschnitten (Doppel- oder Dreinutläufer) in die entsprechend gestanzten Blechpakete eingezogen und durch Kurzschlußringe verbunden (Abb. 63).

2. Die Wirkungsweise der Asynchronmaschinen.

Die Wirkungsweise der Asynchronmaschinen läßt sich auf die Vorgänge im Transformator zurückführen. Ein Dreiphasenasynchronmotor, der ständerseitig an das Netz gelegt wird, nimmt einen Strom auf, der einen über den Läufer geschlossenen, mit der Netzfrequenz umlaufenden magnetischen Kraftfluß hervorruft. Im Augenblick des Einschaltens steht der Läufer noch still, die Läuferwicklung wird mit der vollen Netzfrequenz vom umlaufenden Ständerdrehfeld geschnitten. Die in

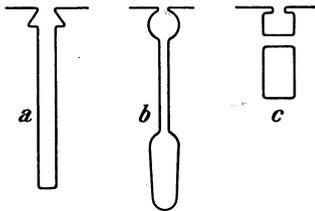


Abb. 63. Nutformen für Käfigläufermotoren. *a* Wirbelstromläufer; *b* und *c* Doppelstabläufer.

Ständer und Läufer induzierten elektromotorischen Kräfte verhalten sich zueinander wie die entsprechenden Ständer- bzw. Läuferwindungszahlen. Ist die Läuferwicklung direkt oder über einen Widerstand geschlossen, so bildet sich unter dem Einfluß der EMK ein Läuferstrom aus, der durch den mit ihm verketteten Kraftfluß eine Kraftwirkung bzw. ein Drehmoment erfährt. Dieses Drehmoment beschleunigt den Läufer, bis er eine wenig unter der synchronen liegende Drehzahl erreicht hat. Während dieser Beschleunigungszeit verringert sich die Frequenz, mit der die Läuferstäbe durch das Ständerfeld geschnitten werden, entsprechend auch die Läufer-EMK und der Läuferstrom, deren Frequenz mit der jeweiligen sog. Schlupffrequenz übereinstimmt. Durch das Anwachsen der Läuferdrehzahl mit der sich verringernden Schlupffrequenz bleibt die relative Umlaufzahl der Läufer- gegenüber der Ständerdurchflutung unverändert gleich der synchronen, d. h. Ständer- und Läuferdurchflutungen können wie beim Transformator für jeden Schlupf und Belastungsfall zur resultierenden, mit obiger synchronen Durchflutung zusammengesetzt werden.

3. Verhalten im Betrieb.

a) Im Leerlauf

nimmt der Mehrphasenasynchronmotor einen Leerlaufstrom auf, der hauptsächlich der Magnetisierung, weiter zur Deckung der Eisenverluste im Ständer (Eisenverluste im Läufer wegen der kleinen Schlupffrequenz vernachlässigbar gering) und der kleinen Stromwärme- sowie der Reibungsverluste dient. Infolge des Luftspalts ergibt sich gegenüber dem Transformator ein wesentlich größerer Magnetisierungsstrom ($0,2-0,4 \cdot I_N$)* und dementsprechend ein sehr niedriger $\cos \varphi$ im Leerlauf ($\cos \varphi = 0,1-0,2$)¹.

¹ Zahlenwerte nach Liwtschitz: Die elektrischen Maschinen, Bd. 1. Leipzig: B. G. Teubner 1931.

b) Bei Kurzschluß der Läuferwicklung

und Stillstand des Läufers kann sich der mit der Läuferwicklung verkettete Teil des Ständerflusses nur soweit ausbilden, als es zur Deckung der Stromwärmeverluste im Läufer notwendig ist. Der Ständerfluß wird deshalb größtenteils in die Streuwege abgedrängt. Zu dem zur Magnetisierung dieses Streuflusses notwendigen ideellen Kurzschlußstrom tritt eine Wirkkomponente zur Deckung der Stromwärmeverluste hinzu. Der tatsächliche Kurzschlußstrom beträgt bei Asynchronmaschinen das 6,5—3,5fache¹ des Nennstromes (bei Transformatoren das 40—12fache).

c) Bei motorischer Belastung der Asynchronmaschine

stellt sich ein dem Lastmoment und dem Läuferwiderstand proportionaler Schlupf gegenüber der synchronen Drehzahl ein. Der sich entsprechend ergebende Läuferstrom wird durch einen ständerseitig aufgenommenen Wirkstrom ausgeglichen, ähnlich wie bei einem durch Ohmschen Widerstand belasteten Transformator. Die durch den Kraftfluß auf den Läufer übertragene Wirkleistung (Luftspaltleistung N_δ) schließt neben der abgegebenen mechanischen Leistung (einschließlich Reibungs- und zusätzlichen Eisenverlusten in den Zähnen) die Stromwärmeverluste im Läufer ein, welche dem Schlupf direkt proportional sind. Kleiner Schlupf d. h. kleiner Läuferwiderstand bedeutet hohen Wirkungsgrad. Die vom Ständer aufgenommene Wirkleistung ist die Summe von Luftspaltleistung und Ständerverlusten. Neben dieser Wirkleistung wird dem Netz ständig die zur Magnetisierung der Haupt- und Streuflüsse notwendige Blindleistung entnommen, so daß sich bei Asynchronmaschinen ohne besondere Kompensierseinrichtungen (s. S. 407) stets eine Nacheilung des Stromes gegenüber der Spannung ergibt.

Das Drehmoment von Asynchronmaschinen nimmt mit wachsendem Schlupf bis zum sog. Kippmoment (meist etwa 1,8—2,5·Nennmoment) zu und fällt dann auf das Anlaufmoment (s. Abb. 64). Der Verlauf der Drehmomentenkurve in Abhängigkeit des Schlupfes und insbesondere das Verhältnis von Kippmoment zu Nennmoment sind wesentlich durch die Streuung der Maschine bedingt. Kleine Streuung ergibt hohes Kippmoment.

Die jeweilige Abhängigkeit von Drehmoment und Schlupf, Leistung, Strom und Wirkungsgrad läßt sich durch das sog. Heylandsche Kreisdiagramm¹ aus den Verhältnissen bei Leerlauf und Kurzschluß bestimmen.

d) Die Asynchronmaschine als Erzeuger.

Wenn eine mit einem Netz verbundene Asynchronmaschine übersynchron angetrieben wird (Schlupf negativ), so gibt sie Wirkleistung

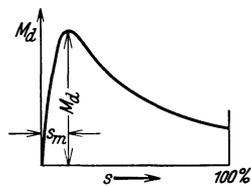


Abb. 64. Drehmoment von Asynchronmotoren, abhängig vom Schlupf.

¹ Siehe Näheres Hütte, 26. Aufl., Bd. 2, S. 1038. — Liwshitz: Die elektrischen Maschinen, Bd. 1. Leipzig: B. G. Teubner 1931. — Thomälen: Kurzes Lehrbuch der Elektrotechnik, 10. Aufl. Berlin: Julius Springer 1929.

an das Netz ab. Sie wirkt also als Erzeuger. Ihre Blindleistung entnimmt sie wie bei Motorbetrieb aus dem Netz (sofern keine Drehstromerregemaschine vorgesehen ist), das auch die Takthaltung bestimmt. Gegenüber Synchrongeneratoren ist die Inbetriebnahme (kein Synchronisieren) der Asynchronerzeuger vereinfacht. Stoß- und Dauerkurzschlußstrom sind günstiger.

4. Der Anlauf von Mehrphasenasynchronmotoren

richtet sich nach ihrer besonderen Bauart als normale Kurzschlußläufermotoren, Wirbelstrom- oder Doppelnutläufermotoren oder als Schleifringläufermotoren. Er ist weiter abhängig davon, ob direkt die volle Spannung auf den Motor geschaltet oder ob mit verringerter Spannung angelassen wird, sei es durch Sterndreieckschaltung oder durch Verwendung von Anlaßdrosselspulen oder von Anlaßtransformatoren.

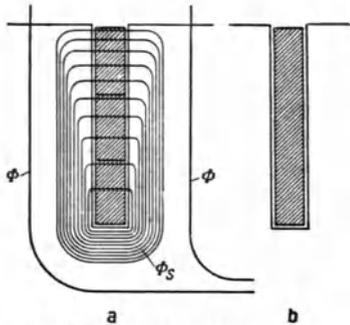


Abb. 65. Stab eines Käfigankers mit Stromverdrängung. (SSW.)

a) Der direkt eingeschaltete normale Kurzschlußläufermotor durchläuft während des Anlaßvorganges seine volle Momentenkurve (s. Abb. 64, S. 403) vom Anlaufmoment über das Kippmoment bis zu dem seiner Belastung entsprechenden Betriebspunkt. Währenddessen verändert sich die Stromaufnahme von dem im ersten Augenblick auftretenden Kurzschlußstrom bis zu dem der Belastung entsprechenden Betriebsstrom.

Das Anlaufmoment beträgt bei normalen Käfigläufermotoren je nach Leistung und Polzahl das 1,2—1,6fache des Normalmomentes, der Anlaufstrom das 5,5—7fache des Normalstromes. Die Form des durch den Antrieb gegebenen Gegenmomentes (linear, quadratisch ansteigend oder konstant) und die Größe des zu beschleunigenden Schwungmomentes haben keinen Einfluß auf den grundsätzlichen, sondern nur auf den zeitlichen Verlauf des Anlaßvorganges.

b) Der direkt eingeschaltete Wirbelstromläufermotor (s. Abb. 66) zeigt im grundsätzlichen dasselbe Anlaufverhalten wie der Kurzschlußläufermotor. Durch Formgebung und Anordnung der Einzelstäbe (kleinere Streuinduktivität der dem Luftspalt benachbarten gegenüber den entfernter liegenden Stabteilen und infolgedessen Stromverdrängung nach den dem Luftspalt zunächst liegenden Teilen der Stabquerschnitte) wird jedoch eine mit dem Anlaufvorgang fortschreitende Verringerung des effektiven Ohmschen Läuferwiderstandes erreicht. Der im Anlaufpunkt erhöhte Ohmsche und verringerte induktive Läuferwiderstand bewirkt eine Verbesserung der Phasenverschiebung zwischen Strom und EMK im Läufer und damit eine Erhöhung des Anlaufmomentes. Es ist dadurch möglich, das im allgemeinen erwünschte

Anlaufmoment vom 1,2—1,4fachen des Nennmomentes bei einem etwa 4—4,5fachen Anlaufstrom zu erreichen (Abb. 66).

c) Bei den Doppelnutläufermotoren

wird in ähnlicher Weise wie bei den Wirbelstromläufermotoren eine im Verlaufe des Anlaufvorganges abnehmende Stromverdrängung im inneren, meist mit erhöhtem Querschnitt ausgeführten Stabkranz, und damit eine Erhöhung des Anlaufmomentes auf das 1,5—2fache des Nennmomentes bei oben genannten oder noch niedrigeren Anlaufströmen erzielt. Diese Anlaufmomente sind für viele Antriebe unzulässig hoch. Es sind deshalb bei Doppelstabläufermotoren für direkte Einschaltung besondere Maßnahmen — teilweise auf Kosten von Betriebswirkungsgrad und $\cos \varphi$ — notwendig, um die Anlaufmomente tunlichst niedrig zu halten. Für das Anlassen mit verringerter Spannung (s. u.) sind dagegen die besonderen Eigenschaften der Doppelnutläufermotoren wertvoll.

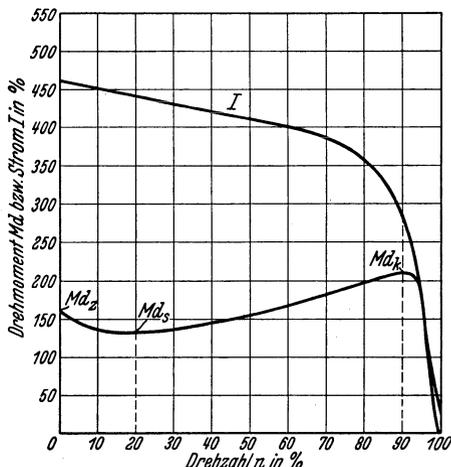


Abb. 66. Drehmomenten- und Stromkurve eines Motors mit Wirbelstromläufer 12 kW $n = 100$ U/min. (SSW.)

d) Direkte Einschaltung oder Sterndreieckanlauf.

In zweckmäßig aufgebauten Energieverteilungsanlagen mit eigener Krafterzeugung oder eigener Transformierung wird es im allgemeinen keine Schwierigkeiten machen, für Leistungen von 5—7 kW normale Kurzschlußläufermotoren und darüber (in größeren Anlagen bei 380 V bis 50 kW, bei 500 V bis 80 kW, bei 3 kV bis 1000 kW) Wirbelstrom- oder Doppelstabmotoren direkt einzuschalten.

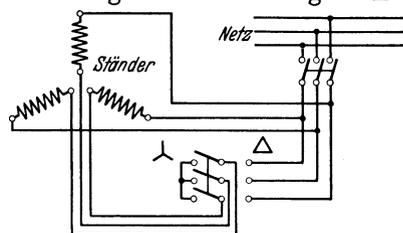


Abb. 67. Sterndreieckanlauf.

Wo berechtigte Bedenken (nicht etwa nur Vorschriften) gegen die damit verbundenen Einschaltströme bestehen, können die Rückwirkungen auf das Netz bei Sterndreieckanlauf (Abb. 67) auf ein Drittel, durch Anlaßtransformatoren im quadratischen Verhältnis der Spannungserniedrigung vermindert werden. Da sich jedoch die Anlaufmomente im selben Verhältnis verringern, ergeben sich bei Wirbelstromläufermotoren mit Sterndreieckanlauf nur Anlaufmomente von 40—50%, bei Doppelnutmotoren von 60—70% der Normalmomente. Es ist also nicht immer möglich, von der Spannungsverringern Gebrauch zu machen.

e) Der Schleifringläufermotor.

Der Schleifringläufermotor (früher der meist angewandte Asynchronmotor, in letzter Zeit zunehmend durch den Kurzschlußläufermotor verdrängt) gestattet die Einschaltung veränderlicher Widerstände in

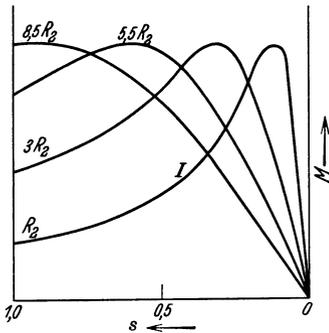


Abb. 68. Verlauf der Drehmomentkurven von Schleifringläufermotoren bei verschiedenen Läuferwiderständen.

den Läuferkreis, und damit eine dem jeweiligen Schlupf und erforderlichen Moment angepaßte Bemessung des Läuferwiderstandes (Abb. 68). Ein Schleifringläufermotor nimmt während des Anlaufvorganges jeweils etwa die Leistung auf, die dem geforderten Drehmoment bei seiner Nenndrehzahl entspricht. Was nicht in mechanische Leistung oder Verlustwärme im Motor umgewandelt wird, wird jeweils im Anlaßwiderstand vernichtet. Gesamtwiderstände und Stufenzahl von Läuferanlassern sind durch REA (Regeln für Anlasser und Steuergeräte des VDE) genormt. Der Anlaufstrom kann bei geeigneter Dimensionierung und richtigem

Überschalten (im Betrieb selten erreicht!) auf das 1,6—1,7fache des Normalstromes begrenzt werden.

5. Drehzahlregelung von Mehrphasenasynchronmotoren.

Die Drehzahlregelung von Mehrphasenasynchronmotoren kann als Schlupfregelung durch Veränderung von Widerständen im Läuferkreis, durch Kaskadenschaltungen sowie in gewissen Stufen durch Polumschaltung erfolgen.

Die Schlupfregelung von Schleifringläufermotoren setzt genügend stark dimensionierte Läuferwiderstände voraus, um längere Zeit oder dauernd auf einer bestimmten Regelstufe verbleiben zu können. Je größer der eingeschaltete Läuferwiderstand, desto niedriger wird die sich bei einem bestimmten Moment einstellende Drehzahl. Eine desto stärkere Abhängigkeit zeigt jedoch die Drehzahlkennlinie (Abb. 69) von der Belastung. Bei Entlastung steigt die Drehzahl auf jeder Regelstufe bis in die Nähe der synchronen Drehzahl.

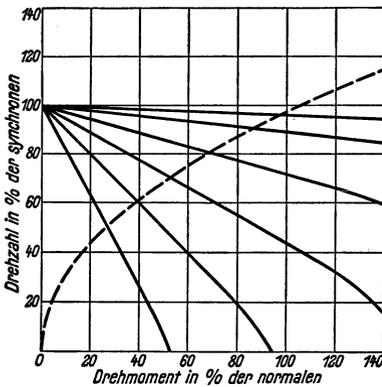


Abb. 69. Drehzahlkennlinien eines Drehstromasynchronmotors mit Schlupfregelung durch Widerstände im Läuferkreis. (SSW.)

Die Anwendung dieser Regelungsart bleibt zweckmäßig auf solche Fälle beschränkt, bei denen das Drehmoment mit kleinerer Drehzahl stark sinkt (z. B. Ventilatoren), oder die Regulierdauer (z. B. Krane) oder der Regelbereich klein ist, die Energiekosten also eine geringere Rolle spielen.

Anstatt die Läuferenergie im Läuferwiderstand zu vernichten, kann sie auch dem Ständer eines zweiten, mit dem Hauptmotor mechanisch gekuppelten Schleifringläufermotors zugeführt werden. Dabei lassen sich bei unterschiedlichen Polzahlen der beiden in Kaskadenschaltung vereinigten Motoren drei Drehzahlen einstellen. Um eine stetige Drehzahlregelung zu ermöglichen, muß die den Läuferstrom der Hauptmaschine aufnehmende Hintermaschine, als Kommutatormaschine ausgeführt oder z. B. als Einankerumformer mit einem Gleichstrommotor verbunden sein. Dabei kann gleichzeitig der Leistungsfaktor auf $\cos \varphi = 1$ kompensiert werden. Drehstromregelsätze kommen nur für Leistungen über etwa 200 kW wirtschaftlich in Frage. In der chemischen Industrie ist ihre Anwendung auf Sonderfälle beschränkt.

Für Regelung in wenigen Stufen (2, 3 oder 4 Drehzahlen) kommt Polumschaltung (bei Kurzschlußläufermotoren nur im Ständer) in Frage. Die Dimensionierung der Motoren kann auf gleichbleibende Leistung oder gleichbleibendes Moment erfolgen, wobei mit einer Erhöhung der Drehzahlstufen, bezogen auf eine bestimmte Modellgröße, eine Verringerung der Leistungen verbunden ist.

6. Der Einphasenasynchronmotor.

Der Einphasenasynchronmotor besitzt im Lauf ähnliche Eigenschaften wie der Mehrphasenasynchronmotor. Im Stillstand heben sich jedoch die Wirkungen der gegeneinander rotierenden Drehfelder (s. Einphasensynchronmaschine S. 396) gegenseitig auf, so daß der Motor von sich aus kein Anlaufmoment aufzubringen vermag. Sein Anlassen erfolgt durch besondere Anlaßhilfswicklungen, in denen Ströme mit gegen den Hauptstrom zeitlich verschobener Phase fließen. Mehrphasenasynchronmotoren können zu $\frac{2}{3}$ ihrer Nennleistung einphasig betrieben werden, z. B. bei Abtrennung einer Phase nach vollzogenem Anlauf. Da jedoch die Stromaufnahme bei Nennlast gegenüber dreiphasigem Betrieb um 50% erhöht ist, besteht für den Motor Überlastungsgefahr. (Häufiger Grund für Motorschäden bei Fehlen von Motorschutzschaltern!)

C. Wechselstrom-Kommutatormaschinen.

Die Wechselstrom-Kommutatormaschinen können nach ihrer Phasenzahl in Ein- und Mehrphasen- (meist Dreiphasen-) Kommutatormaschinen, nach Schaltung und Drehzahlverhalten in Reihenschluß- und Nebenschlußmaschinen unterteilt werden.

1. Aufbau.

Die Dreiphasen-Kommutatormaschinen besitzen Ständer mit ähnlichem Wicklungsaufbau wie die Ständer der synchronen und asynchronen Drehstrommaschinen und Läufer mit Gleichstromwicklung, Kommutator und je nach Bauart einem oder zwei Bürstensätsen, deren Einzelbürsten je um 120 elektrische Grade auseinanderliegen.

Die Einphasen-Kommutatormaschinen können mit ausgeprägten Polen wie bei Gleichstrommaschinen oder mit verteilten Wicklungen wie

bei den Einphasen-Synchronmaschinen gebaut sein. Die Läuferausführung entspricht der von Gleichstrommaschinen.

Die Einphasen-Kommutatormaschinen haben besonders für den Antrieb von Vollbahnfahrzeugen Bedeutung erlangt, während ihre Anwendung in der chemischen Industrie auf wenige Spezialfälle beschränkt bleibt. Auch die Dreiphasen-Kommutatormaschinen haben sich in der chemischen Industrie (ausgenommen Spezialfälle) weitere Anwendung noch nicht erringen können. Auf die Behandlung der Einphasen-Kommutatormaschinen kann daher in diesem Zusammenhang verzichtet werden. Von



Abb. 70. Drehstromreihenschlußmotor offener Bauart für 32 kW, $n = 550\text{--}1100$ U/min.
(Nach Liwshitz: Elektr. Maschinen I.)

den Drehstrom-Kommutatormaschinen sollen nicht die einzelnen Bauformen, sondern nur die grundsätzliche Wirkungsweise und ihr Drehzahlverhalten geschildert werden.

2. Wirkungsweise.

Bei Anschluß des Ständers an ein Drehstromnetz werden in den einzelnen Läuferspulen EMKe von der jeweiligen Schlupffrequenz induziert. Ähnlich wie bei den Gleichstrommaschinen wirkt jedoch der Kommutator als Frequenzwandler, so daß an den Bürsten, unabhängig von der Drehzahl, jeweils nur Spannungen mit der Netzfrequenz auftreten. Der Läufer kann deshalb entweder über den Ständer oder direkt bzw. über Transformatoren mit dem Netz verbunden werden. Durch Änderung der an den Bürsten aufgedrückten Spannung (z. B. Drehstrom-Nebenschlußkommutatormotoren der AEG) oder durch räumliche Verschiebung der Bürsten, d. h. durch die Änderung der zeitlichen Phasenverschiebung zwischen Ständer- und Läufer-EMKe, kann die Drehzahl der Kommutatormotoren verändert werden. Ähnlich wie bei der Gleichstrommaschine

tritt bei der Stromwendung (s. S. 385) in der kurzgeschlossenen Spule eine EMK der Selbstinduktion auf, deren Höhe von dem Momentanwert des kommutierten Bürstenstromes abhängt. Sie kann ähnlich wie bei Gleichstrommaschinen durch Wendefelder kompensiert werden, welche dem Strome proportional und diesem gegenüber in der Phase um 180° verschoben sind. Darüber hinaus wird bei den Wechselstrom-Kommutatormaschinen in der kurzgeschlossenen Spule vom Ständerfeld eine transformatorische EMK der Ruhe induziert, welche dem Ständerfeld und der Schnittfrequenz proportional ist. Sie kann nicht durch eine andere transformatorische EMK, sondern nur durch eine EMK der Bewegung ausgeglichen werden, also nicht im Anlauf, wo die transformatorische EMK am größten ist. Um sie im Anlauf und bei allen Regeldrehzahlen in zulässigen Grenzen (im allgemeinen 2,5—3 V) zu halten, müssen die Windungszahl der kurzgeschlossenen Spule klein (viele Kommutatorlamellen!), das Ständerfeld schwach (viel Eisen!), und wenn möglich die Netzfrequenz niedrig gehalten (z. B. bei Vollbahnen $16\frac{2}{3}$ Hertz!) werden. Im Zusammenhang hiermit können Kommutatormaschinen nur für verhältnismäßig kleine (meist < 500 V) Ständerspannungen gebaut werden, wobei die dem Kommutator zuzuführende Spannung (z. B. durch Zwischentransformatoren) weiter (meist < 100 V) herabgesetzt werden muß. Die von einem Pol

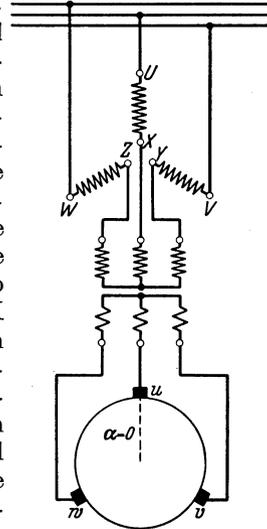


Abb. 71. Schaltbild eines Drehstromreihenschlußmotors mit einem Bürstensatz. (SSW.)

übernehmbare Leistung ist durch die erwähnten Verhältnisse ebenfalls beschränkt. Mit wachsender Leistung ergibt sich daher ein rascher Abfall der ausführbaren mittleren Drehzahl und damit eine starke Steigerung der Anlagekosten.

3. Verhalten im Betrieb.

Das Betriebsverhalten der Dreiphasen-Kommutatormotoren hängt von ihrer Schaltung ab.

a) Der Drehstromreihenschlußmotor,

meist mit nur einem Bürstensatz und Zwischentransformator (Schaltbild s. Abb. 71) ist der einfachste seiner Art. Die Drehzahlregulierung erfolgt meist durch Bürstenverschiebung. Dabei ergeben sich die aus Abb. 72 ersichtlichen, mit wachsendem Drehmoment stark (stärker als

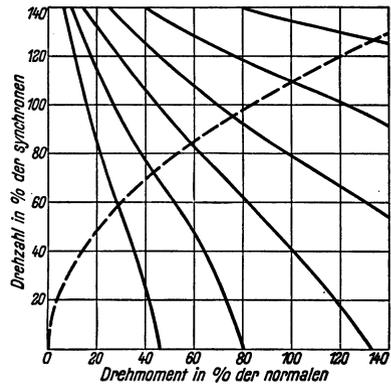


Abb. 72. Drehzahlkennlinien eines Drehstromreihenschlußmotors. (SSW.)

beim Asynchronmotor) abfallenden Drehzahlkennlinien. Diese Eigenschaft zusammen mit dem verhältnismäßig kleinen Regelbereich (maximal etwa 1 : 2,4) beschränkt seine Anwendung auf wenige Antriebs-

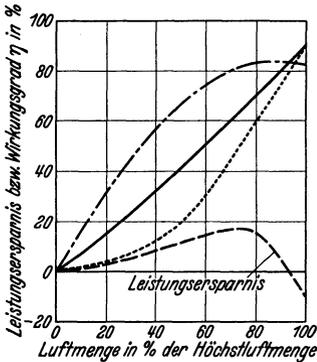


Abb. 73. Wirkungsgrad eines Reihenschlußmotors (— · — ·) und eines Asynchronmotors (—) bei Lüfterantrieb (Leistung) (SSW.)

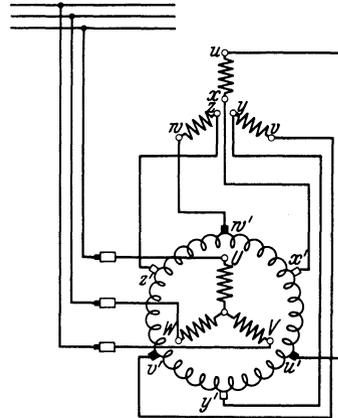


Abb. 74. Schaltbild eines Drehstromneben-schlußmotors mit Läufer-speisung. (SSW.)

arten, z. B. Lüfter mit quadratisch ansteigendem Drehmoment. Hierbei hat er vor dem Asynchronmotor einen besseren Wirkungsgrad (Abb. 73) bei Teillasten voraus.

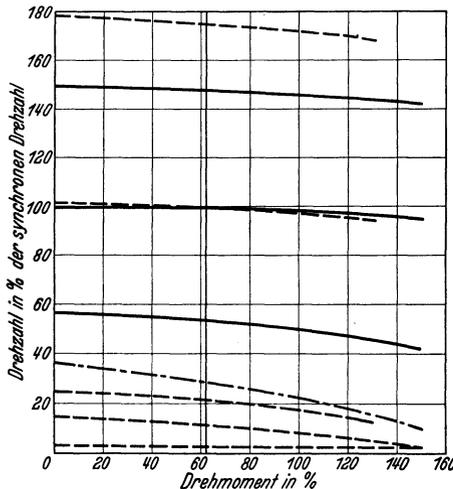


Abb. 75. Drehzahlkennlinien eines Drehstrom-neben-schlußmotors mit Läufer-speisung der SSW.

b) Der Drehstromneben-schlußmotor

kann für Ständer- oder Läufer-speisung gebaut werden. Bei Ständerspeisung wird dem Läufer über verschiedene Ständeranzapfungen oder durch Zwischenschaltung eines Drehtransformators (Winter-Eichberg-Motor) eine veränderliche Spannung zugeführt. Bei Läufer-speisung (über Schleifringe) wird der Ständerwicklung von der Kommutatorwicklung eine durch Bürstenverschiebung veränderbare Spannung aufgedrückt, welche sich zu der vom Läufer induzierten und von der Dreh-

zahl abhängigen Spannung addiert oder subtrahiert. Der hierdurch normal erreichbare Regelbereich 1 : 3 bis 1 : 4 (maximal 1 : 8 bei besonderer Bemessung und kleinen Leistungen von der synchronen Drehzahl etwa gleichmäßig nach oben und unten) kann durch Einschalten von Widerständen in den Ständerkreis ähnlich wie beim Asynchron-

motor mit Schleifringläufer auf 1 : 5 bis 1 : 8 erweitert werden. Wirkungsgrade (bis 82%) und $\cos \varphi$ (zwischen 0,85 und 0,95) sind besonders gut im übersynchronen Gebiet. Das Drehzahlverhalten ergibt sich aus Abb. 75. Die Vorteile dieser Motoren liegen in ihrem günstigen Drehzahlverhalten bei guten Wirkungsgraden und einfacher Bedienung. Nachteilig sind ihre Empfindlichkeit und ihre hohen Anschaffungskosten, insbesondere bei größeren Leistungen.

V. Umformer und Stromrichter.

Umformer sind umlaufende Maschinen oder Maschinensätze für die Umwandlung elektrischer Leistung in elektrische Leistung. Nach ihrer besonderen Bauart und Wirkungsweise unterscheidet man Motorgeneratoren, Einankerumformer und Kaskadenumformer.

Stromrichter sind Apparate, welche die Umwandlung elektrischer Energie in andersgeartete elektrische Energie vermöge eines stark stromrichtungsempfindlichen, teilweise veränderlichen Eigenwiderstands gestatten. Die Gleichrichter (zur Zeit die wichtigsten Stromrichter) dienen der Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstromleistung.

A. Umformer.

1. Bei Motorgeneratoren wird die Umwandlung einer elektrischen Energieform in eine andere durch unmittelbar gekuppelte elektrisch getrennte Motoren und Generatoren herbeigeführt. Sie haben, verglichen mit anderen Umformerarten, den Vorteil hoher Unempfindlichkeit; sie sind dagegen ungünstiger im Wirkungsgrad.

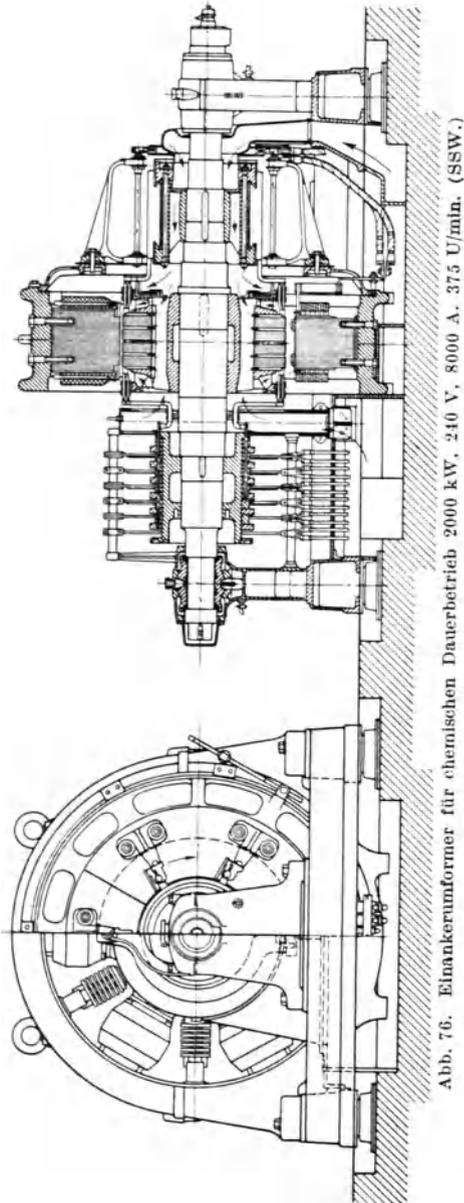


Abb. 76. Einankerumformer für chemischen Dauerbetrieb 2000 kW, 240 V, 8000 A, 375 U/min. (SSW.)

2. Beim Einankerumformer erfolgt die Umwandlung von Mehrphasen- (seltener Einphasen-) Wechselstrom in Gleichstrom in einem normalen Gleichstromanker, dem der Wechselstrom über Schleifringe zugeführt wird. Erregung und Stromwendung (meist Wendepole) erfolgen im wesentlichen wie bei Gleichstrommaschinen. Die Drehzahl ist durch Polzahl und Frequenz synchron bestimmt. Bei gleichstromseitiger Belastung wirken sich die Gleichstrom- und die Wechselstromdurchflutungen im Anker entgegen, so daß in den einzelnen Ankerspulen nur von Phasenzahl und Spulenlage abhängige Restwirkströme zum Fließen kommen. Wechselstromseitig aufgenommene Blindströme werden dagegen nicht ausgeglichen. Die gegenüber Gleichstrommaschinen wesentlich kleineren Stromwärmeverluste gestatten bei Umformerbetrieb (mit Ausnahme der Einphasenumformer) eine Gleichstrommaschine mit einer erhöhten Leistung (Verhältniszahlen s. Tabelle 10) zu betreiben.

Tabelle 10¹. Mögliche Leistungserhöhung bei Verwendung einer Gleichstrommaschine für Umformerbetrieb.

Phasenzahl Leistungsfaktor	1	3	6	12
	Verhältnismäßige Leistungserhöhung			
cos $\varphi = 1$. . .	0,85	1,33	1,93	2,20
cos $\varphi = 0,9$. .	0,73	1,09	1,45	1,58
cos $\varphi = 0,8$. .	0,63	0,90	1,14	1,22
cos $\varphi = 0,7$. .	0,54	0,74	0,91	0,97

Erhöhung der Phasenzahl ergibt nach Tabelle 10, bezogen auf dieselbe Leistung, kleinere Maschinen. Umformer über etwa 250—300 kW werden deshalb im allgemeinen sechsphasig ausgeführt. Der Ohmsche Spannungsabfall im Anker ist im reziproken Verhältnis obiger Zahlenwerte kleiner als bei Gleichstrommaschinen gleicher Leistung.

Schleifringwechselspannung und Gleichspannung an den Bürsten stehen zueinander (abgesehen vom kleinen inneren Spannungsabfall) in dem festen,

nur durch die Phasenzahl m beeinflussten Verhältnis: $\frac{U_w}{U_{gl}} = \sim \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sin \frac{\pi}{m}$

(bei Dreiphasenstrom etwa = 0,62, bei Sechspannenstrom etwa 0,36. Voraussetzungen: Bürsten in neutraler Zone, Verhältnis von Polbogen zu Polteilung etwa 0,7). Einankerumformer müssen deshalb meist über Transformatoren an Wechselstromnetze angeschlossen werden. Spannungsregelung erfolgt teils durch vorgeschaltete Drosselspulen in Verbindung mit Veränderung der Erregung, d. h. des Leistungsfaktors (nur für kleine Regelbereiche), teils mittels Drehtransformatoren oder Stufentransformatoren mit Lastschaltung.

Das Anlassen von Einankerumformern wird gelegentlich von der Gleichstromseite, meist jedoch von der Drehstromseite aus mit Hilfe des zur Verhinderung von Pendelerscheinungen nötigen Dämpferkäfigs, wie bei Synchronmotoren (s. dort, Abb. 77), oder durch besondere Anwurfmotoren vorgenommen. Die richtige Polarität kann durch Fremderregung oder probeweise durch kurzes Abschalten des Hauptschalters eingestellt werden. Einwandfreier Parallelbetrieb verschiedener Einankerumformer setzt gleiche Charakteristiken und Spannungsabfälle,

¹ Aus Liwshitz: Die elektrischen Maschinen, Bd. 1. Leipzig: B. G. Teubner 1931.

sowie Zuordnung besonderer Transformatoren voraus. Unterschiede können durch Drosselspulen ausgeglichen werden. Fliehkraftschalter verhindern Durchgehen bei Rückstrom.

Zum Schutz der Einankerumformer gegen Kurzschlüsse auf der Gleichstromseite ist der Einbau von Schnellschaltern oder von Einrichtungen zur Schnell-Entregung notwendig. Wechselstromseitige, symmetrische Spannungsabsenkungen unter etwa 25 % der Normalspannung führen schon nach wenigen Zehntelsekunden zum Außertrittfallen und kurzschlußartigen Ausgleichvorgängen. Unsymmetrische wechselstromseitige Spannungsabsenkungen, z. B. durch einphasige Kurzschlüsse, machen sich durch Überlagerung von Wechselspannungen über die Kommutatorgleichspannung, Pendelerscheinungen, Spritzfeuer am Kollektor und gegebenenfalls Außertrittfallen bemerkbar. Als Schutzmaßnahme gegen solche Ereignisse wird von der AEG neben Maximalrelais der Einbau von rasch wirkenden, drehstromseitigen Spannungsrückgangsauslösern, wirksam unter 30—40 % der Normalspannung und von Wechselspannungsrelais auf der Gleichstromseite empfohlen.

Einankerumformer finden in der chemischen Industrie vielfach, insbesondere für Elektrolysezwecke und damit für kleine Spannungen (meist < 550 V, oft nur 4—6 V) Verwendung. Obere Spannungsgrenzen sind 1200—2000 V. Für Rückwärtsarbeiten von Gleichstrom auf Drehstrom und für sehr weitgehende Spannungsregelung (z. B. auch für Anfahren von Netzen) sind Einankerumformer weniger geeignet.

3. Beim Kaskadenumformer ist eine Asynchronmaschine mit einem Einankerumformer mechanisch und elektrisch gekuppelt, so daß er eine Zwischenstellung zwischen Motorgenerator und Einankerumformer einnimmt. Seine synchrone Drehzahl entspricht der Summe der Polpaarzahlen von Asynchronmaschine und Einankerumformer. Der Ständer der Asynchronmaschine kann für Hochspannung gewickelt werden, so daß unter Umständen ein Netztransformator entbehrt werden kann. Die Spannungsregelung erfolgt wie beim Einankerumformer; besondere Drosselspulen sind jedoch im allgemeinen wegen der Streuung der Asynchronmaschine nicht erforderlich. Der Anlaufvorgang ist dem bei Asynchronmaschinen mit Schleifringläufer ähnlich.

Der Wirkungsgrad der Kaskadenumformer ist etwa um 2—2,5 % besser wie der von Motorgeneratoren, und um etwa ebensoviel schlechter

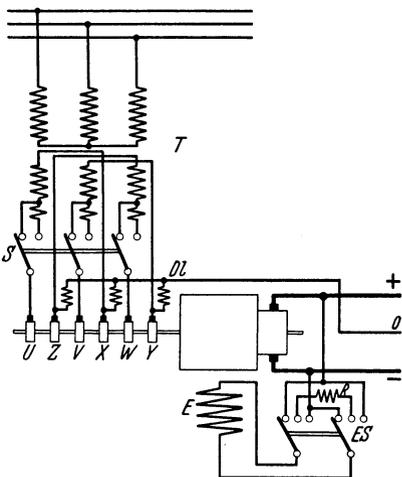


Abb. 77. Schaltbild für drehstromseitiges Anlassen eines Einankerumformers mit verringerter Spannung.

wie der von Einankerumformern, von denen sie auch der größere Grundflächenbedarf und die höheren Anschaffungskosten unterscheiden.

B. Stromrichter.

1. Allgemeine Begriffserklärung.

Stromrichter sind Apparate, welche zur Umwandlung elektrischer Energie in andersgeartete elektrische Energie vermöge eines stark stromrichtungsempfindlichen, gegebenenfalls steuerbaren Eigenwiderstands geeignet sind. Unter Energieumwandlung ist hierbei z. B. die Umformung von Wechselstrom in Gleichstrom oder von Gleichstrom in Wechselstrom oder von Wechselstrom einer bestimmten Frequenz in Wechselstrom einer anderen Frequenz zu verstehen.

Stromrichter, welche der Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom dienen, heißen Gleichrichter, solche zur Umwandlung von Gleichstrom in Wechselstrom heißen Wechselrichter. Apparate zur direkten Frequenzumwandlung von Wechselstrom werden Umrichter genannt.

2. Allgemeine Wirkungsweise.

Beim Stromdurchgang von gewissen Metallen zu anderen festen Stoffen, Flüssigkeiten, Gasen oder durch den freien Raum bilden sich Grenzschichten, welche dem Stromdurchgang je nach der Stromrichtung wesentlich verschiedenen Widerstand entgegensetzen. Der stromrichtungsabhängige Übergangswiderstand von Metallen gegen gewisse Kristalle (Kristalldetektoren) wird in der Radiotechnik verwertet. Die Trockengleichrichter der Siemens-Schuckert-Werke benützen die Ventilwirkung von Kupferplatten gegen Kupferoxydulplatten zur Gleichrichtung kleiner Ströme (bis zu etwa 2 A) und Spannungen (bis zu etwa 200 V) bei einem Wirkungsgrad von 70—75%. Die Stromrichtung größerer Leistungen hat meist die unipolare Charakteristik des elektrischen Lichtbogens zur Grundlage.

3. Der elektrische Lichtbogen als Hilfsmittel zur Stromrichtung.

Im freien Raum ist der elektrische Lichtbogen als Strömung von Elektronen anzusehen, welche von der negativen Elektrode, der Kathode, emittiert werden und unter der Wirkung des elektrischen Feldes zur positiven Elektrode, der Anode, wandern. Der Raum zwischen den Elektroden zeigt bei Stromdurchgang eine negative Ladung. Diese negative Raumladung stellt sich einer Steigerung der Durchgangsstromstärke entgegen und bewirkt, daß zur Erhöhung der Stromstärke eine Vergrößerung der elektrischen Feldstärke zwischen den Elektroden notwendig wird. Vakuumentladungsgefäße benötigen deshalb hohe (Größenordnung 10^2 bis 10^3 V) und stark stromabhängige Anodenspannungen (Abb. 78). Die Anwendung von Hochvakuumröhren zur Stromrichtung ist deshalb unzweckmäßig, wenn der Umformungswirkungsgrad eine Rolle spielt [H. Glaser: Elektrotechn. Ztschr. 1931, 829].

Im gas- oder dampferfüllten Raum können die von der Kathode emittierten Elektronen ihren Weg zur Anode nicht ungestört durchlaufen. Sie stoßen unterwegs mit neutralen Dampfmolekülen zusammen und bilden, hauptsächlich in der Nähe der Elektroden, durch Stoßionisation neue Elektronen sowie positive Ionen. Diese Ionen kompensieren die negative Raumladung und erzeugen in der Nähe der Kathode sogar eine Zone positiver Raumladung.

Die Spannungskurve einer dampfgefüllten Gleichrichterröhre (Abb. 79) zeigt nach einem kurzen stromabhängigen Stück *A—B*, das der Charakteristik der Hochvakuumröhre ähnelt, in einem weiten Strombereich *B—C* praktisch keine Spannungssteigerung mit wachsender Stromstärke. Im Punkt *B* beginnt die eigentliche Bogenentladung in Form einer kombinierten Elektronen- und Ionenströmung. Das Vorhandensein einer kombinierten

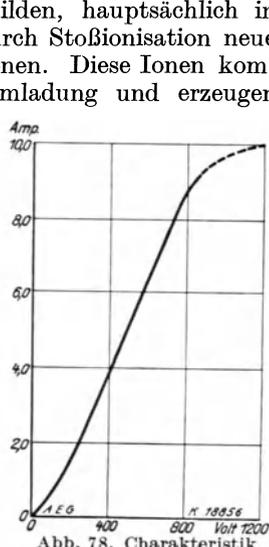


Abb. 78. Charakteristik einer Hochvakuumgleichrichterröhre.

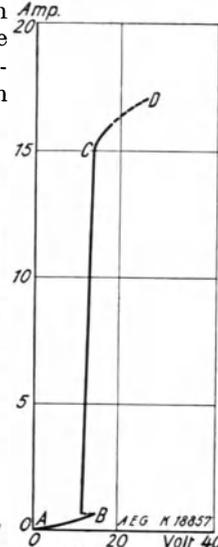


Abb. 79. Schematische Charakteristik einer dampfgefüllten Gleichrichterröhre.

Elektronen- und Ionenströmung gestattet somit gegenüber der reinen Elektronenströmung bei Vakuumentladungsgefäßen eine bedeutende

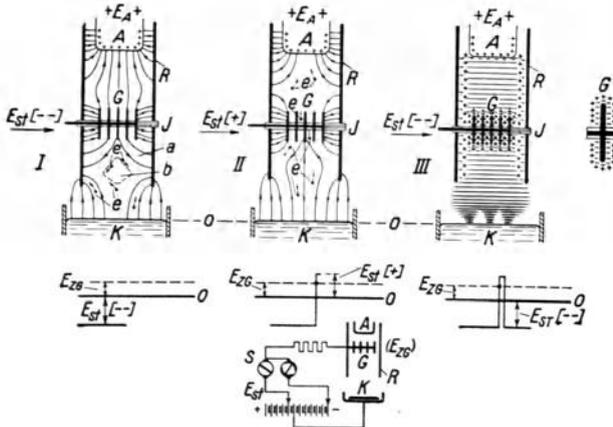


Abb. 80. Feldverteilung an einanodigen gesteuerten Entladungsgefäßen.

Senkung der Anodenspannung und damit eine entsprechende Verbesserung des Umformungswirkungsgrades. Bei einer Überlastung des

Entladungsgefäßes über den Punkt C hinaus erfordert die Schaffung der für den Stromtransport notwendigen erhöhten Elektronenmenge eine Steigerung des Spannungsabfalls, die jedoch durch Einhaltung bestimmter Belastungsgrenzen vermieden werden kann.

Bei den eigentlichen Gleichrichtern muß die Ventilwirkung des Lichtbogens im wesentlichen dadurch unterstützt und gesichert werden, daß der Kathode eine besondere und dauernd wirksame Fähigkeit zur

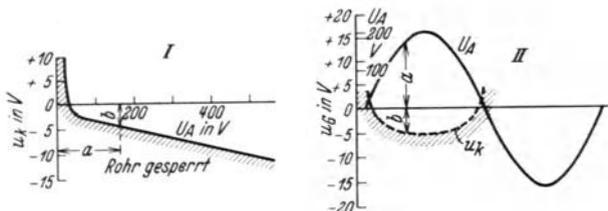


Abb. 81. Kritische Gitterspannung beim Dampfentladungsgefäß. (AEG.)

Elektronenemission verlihen, und umgekehrt den Anoden eine Emission, möglichst erschwert wird. Die hierzu geeigneten Hilfsmittel werden im Abschnitt über Gleichrichter (S. 417) näher beschrieben.

Die Lichtbogenentladung kann jedoch über die im Gleichrichterbau üblichen Maßnahmen hinaus durch Einbau von geladenen Gittern in die Lichtbogenstrecke gesteuert werden. Erteilt man z. B. dem Gitter ein gegenüber der Kathode negatives Potential, so vermögen die von dieser ausgesandten Elektronen nicht bis zur Anode vorzudringen, da sie vom Gitter abgestoßen werden [Abb. 80, M. Schenkel: Elektrotechn. Ztschr. 1932, 762]. Der Stromdurchgang ist somit gesperrt. Wird nun das Gitterpotential langsam

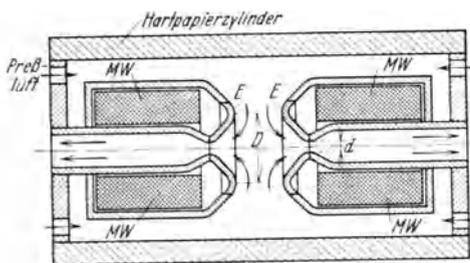


Abb. 82. Schematische Darstellung des Lichtbogenstromrichters für sehr hohe Spannungen und Leistungen nach Marx.

gegen einen positiven Wert verändert, so wird ein von der Spannung abhängiger kritischer Potentialwert erreicht (Abb. 81), über dem die Sperrwirkung aufgehoben ist, wodurch der Stromdurchgang eintritt. Eine Unterschreitung des kritischen Potentialwerts hat bei Hochvakuumgefäßes die sofortige Unterbrechung des Stromdurchgangs zur Folge. Bei dampfgefüllten Entladungsgefäßes besteht jedoch nach Einleitung des Lichtbogens die Entladung unverändert fort. Die negative Gitterspannung kann die abstoßende Wirkung auf die Elektronen nicht mehr ausüben, weil das Gitter von positiven Ionen des Lichtbogens umlagert, und damit abgeschirmt wird. Nur ein Verschwinden der Ionisierung des Gefäßes, d. h. ein Verschwinden des Lichtbogens, z. B. bei Nulldurchgang des Stromes, vermag die Sperrwirkung des Gefäßes wieder herzustellen. Trotzdem die Steuerbarkeit

der Hochvakuumgefäße bedeutend weitergeht, als die der dampfgefüllten Entladungsgefäße, werden die sich daraus ergebenden Nachteile der dampfgefüllten Gefäße wegen ihrer niedrigeren Anodenspannung in der Starkstromtechnik in Kauf genommen.

Die bisher beschriebenen Lichtbogenentladungen fanden sämtlich in stark luftverdünnten Räumen statt. Bei dem Lichtbogenstromrichter nach Marx (Abb. 82), [Lichtbogenstromrichter für sehr hohe Spannungen und Leistungen. Berlin: Julius Springer 1932] wird der Lichtbogen nicht im Vakuum, sondern in strömender Luft von einem gewissen Überdruck gezündet. Die Sperrwirkung wird durch eine besondere Formgebung von Anode und Kathode erreicht und durch geeignete Luftströmung in Verbindung mit der dynamischen Wirkung magnetischer Felder aufrechterhalten. Auch diese Stromrichter können für Steuerung eingerichtet werden, jedoch nicht durch Gitter, sondern mittels Zündung durch hochfrequente gesteuerte Entladungen. Die Lichtbogenstromrichter System Marx sind zur Umformung sehr hoher Spannungen und Leistungen entwickelt worden. Sie können für Gleichstromkraftübertragungen auf weite Entfernungen in Zukunft in Frage kommen.

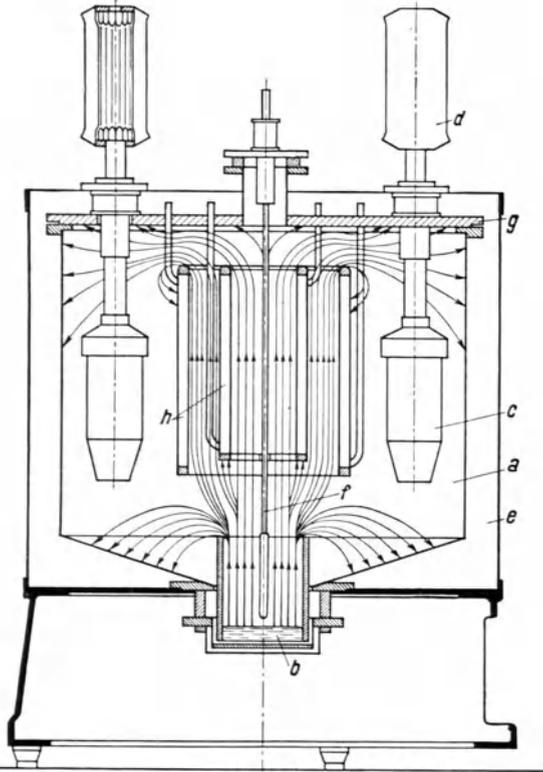


Abb. 83. Schematische Darstellung des Quecksilberdampfumlauftes in einem SSW-Eisengleichrichter.

4. Die Quecksilberdampfgleichrichter mit flüssiger Kathode.

a) Allgemeines.

Der Quecksilberdampf ist der verbreitetste Ionisationsträger für Dampfentladungsgefäße. Er wird durch Erhitzung einer am Boden der Gefäße vorgesehenen Menge flüssigen Quecksilbers gebildet, durch Kondensation an geeignet angeordneten Kühlflächen wieder niedergeschlagen, und zum Boden des Gefäßes zurückgeführt (Abb. 83). Es liegt nahe, diese Quecksilberansammlung am Boden des Gefäßes als Kathode zu benützen. Die bei normalem Stromdurchgang aus der flüssigen Kathode

entwickelte Dampfmenge ist größer, als den Bedürfnissen des Gleichrichters entspricht. Zur Aufrechterhaltung einer genügenden Quecksilberverdampfung und damit des Lichtbogens bei kleiner Belastung wird

im allgemeinen ein besonderer Hilfslichtbogen (sog. Erregerlichtbogen) vorgesehen.

Die Anoden werden räumlich über der Kathode angeordnet, aus einem möglichst dichten, bei Strombelastung nicht gasenden Material hergestellt und betriebsmäßig gekühlt. Da die Kondensation von Quecksilberdampf an den Anoden Emissionszentren ergeben könnte, wird der Quecksilberdampfumlauf möglichst von den Anoden ferngehalten. Diesem Zwecke dienen bei den Glasgleichrichtern armförmige Ausweitungen für die Anoden, und bei den Eisengleichrichtern besondere Anodenschutzrohre. Zur Aufrechterhaltung der Sperrwirkung sind weiter eine sorgfältige Vakuumerhaltung (etwa 10^{-4} mm Hg-Säule), die peinlichste Fernhaltung von Fremdkörpern aus dem Zylinder sowie konstruktive Maßnahmen, z. B. Gitter vor den Anoden, erforderlich (s. auch Abb. 84 und 85).

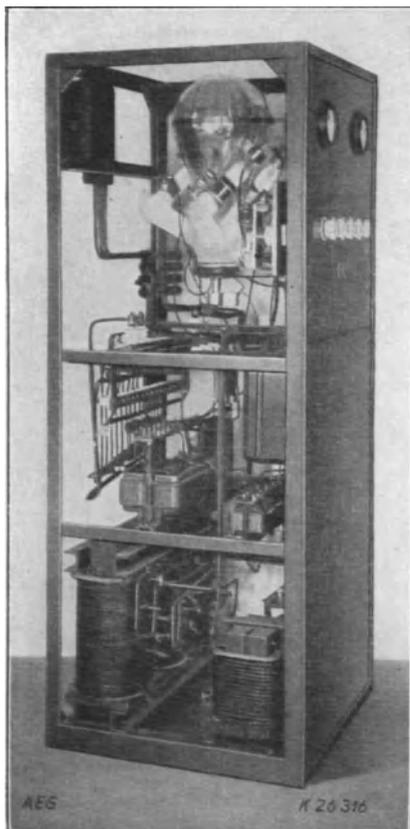


Abb. 84. Glasgleichrichter im Apparateschrank von AEG.

b) Gleichstromspannung und Gleichstromwelligkeit.

Abgesehen von dem im Lichtbogen auftretenden Spannungsabfall von 22—30 V findet eine Änderung der Wechselspannung

im Gleichrichter nicht statt. Zwischen der an den Gleichrichter angeschlossenen effektiven Wechselspannung U und der Gleichspannung U_g besteht somit ein (annähernd) festes, sozusagen geometrisch bedingtes und von der Phasenzahl m abhängiges Verhältnis (s. Tabelle 11).

Tabelle 11.

Phasenzahl m	2	3	4	6	12	∞
Spannungsverhältnis U_g/U	0,9	1,17	1,27	1,35	1,40	1,41

Der Anschluß eines Gleichrichters an ein Wechselstromnetz erfolgt fast immer über einen Transformator, welcher zur Veränderung des Spannungsverhältnisses zwischen Wechselstrom- und Gleichstromnetz

mit Anzapfungen versehen werden kann. An den Transformatornullpunkt wird der negative Pol des Gleichstromnetzes angeschlossen.

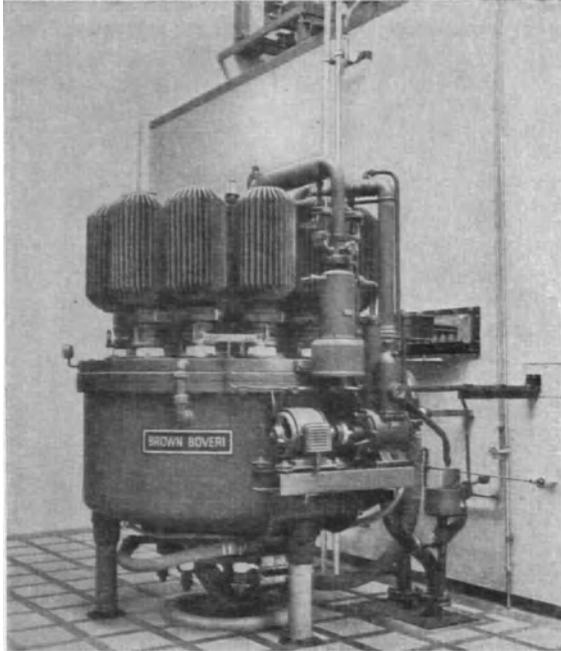


Abb. 85. Eisengleichrichter für 6000 A bei 500 V von BBC.

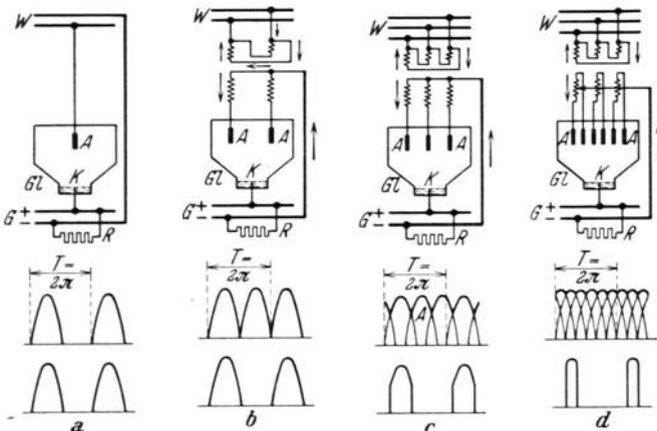


Abb. 86. Stromformen von ungesteuerten Gleichrichtern verschiedener Phasenzahlen.

Die Welligkeit der Gleichspannungskurve ist wesentlich von der Phasenzahl abhängig (Abb. 86). Eine praktisch ausreichende Glättung der Gleichspannungskurve wird bei den verbreitetsten 6- und 12phasigen

Gleichrichtern erzielt. Solche Gleichrichter besitzen im allgemeinen eine der Phasenzahl entsprechende Zahl von Anoden und meist eine gemeinsame Kathode. Der Strom fließt jeweils über die Anode oder

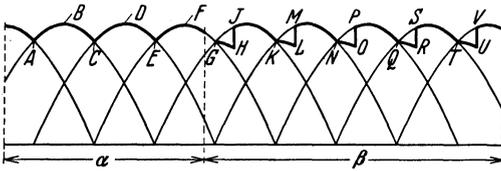


Abb. 87. Kurvenform der Gleichspannung. α im Leerlauf, β bei Belastung.

Anodengruppe, welche in dem betreffenden Augenblick das höchste positive Potential gegenüber der Kathode führt. Der Stromübergang von einer Anode zur anderen erfolgt nicht genau im Schnittpunkt der zugeordneten Phasenspannungskurven. Infolge der Streuinduktivität des Gleichrichtertransformators und der Zuleitungen bildet sich vielmehr eine Überlappung in der Stromführung aus, deren Zeitdauer u (Abb. 87) sich mit der Induktivität und der Belastung vergrößert [Marti, Winograd, Gramisch: Stromrichter. München u. Berlin: Oldenbourg 1933]. Die Abb. 87 läßt erkennen, daß die Überlappung einen mit wachsendem Strom größer werdenden Abfall der mittleren Gleichspannung und eine Verstärkung der Welligkeit der Gleichspannungskurve bewirkt.

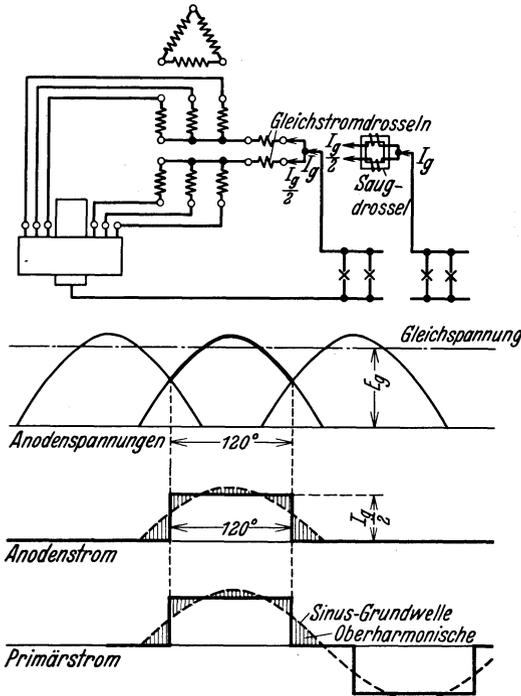


Abb. 88. Doppeldreiphasenschaltung mit Saugdrossel von Brown, Boveri & Co.

Die Welligkeit einer Gleichspannung ist meßtechnisch gekennzeichnet durch das Verhältnis des Mittelwertes (zu messen durch Drehspulinstrument) zum Effektivwert (zu messen durch Eisen- oder dynamometrisches Instrument) der Gleichspannung. Die Welligkeit des einer Gleichspannung zugeordneten Gleichstromes entspricht nur bei rein Ohmscher Belastung der

der Gleichspannung. Die Welligkeit der Gleichstromkurve wird durch die Induktivität des Stromkreises verbessert, und zwar werden die Oberwellen um so stärker unterdrückt, je höher ihre Ordnungszahl ist. In den meisten Belastungsstromkreisen (ausgenommen Heiz- und Beleuchtungsanlagen) bewirken die Oberwellen eine unerwünschte Er-

höhung der Verluste. Wo dieser Einfluß der Welligkeit der Gleichspannung unerwünscht ist, kann sie durch möglichste Herabsetzung der Streuinduktivität des Transformators und geeignete Transformator-schaltung in einem gewissen Maße verringert werden. Im günstigen Sinne wirkt weiter der Einbau von Drosselspulen in den Gleichstromkreis, deren Ohmsche Verluste jedoch bei der Berechnung ihrer wirtschaftlichsten Größe berücksichtigt werden müssen.

c) Transformatorschaltungen, Ausnutzungsgrad und primäre Scheinleistung.

Je größer die Anodenzahl eines Gleichrichters bemessen wird, desto besser wird zwar die Welligkeit der Gleichspannungskurve, desto kürzer wird jedoch die Brennzeit einer Anode, und damit desto schlechter die Ausnutzung von Gleichrichter und Transformator. Die Ausnutzung des Gleichrichtertransformators ist weiter von der gewählten Schaltung [Meyer-Delius: Die günstigste Ausnutzung von Gleichrichtern und Transformatoren. Elektr. Wirtsch. 1930. — Marti, Winograd, Gramisch: Stromrichter. München u. Berlin: Oldenbourg 1933] abhängig. Die Doppeldreiphasenschaltung bzw. bei 12 anodigen Gleichrichtern die Doppelsechsphasenschaltung mit Saugdrosselspule ergibt die günstigsten Verhältnisse, da sich eine etwa der Anodenzahl bei normaler Schaltung entsprechende Welligkeit und eine der halben Anodenzahl entsprechende Gleichrichter- und Transformatorausnutzung ergeben.

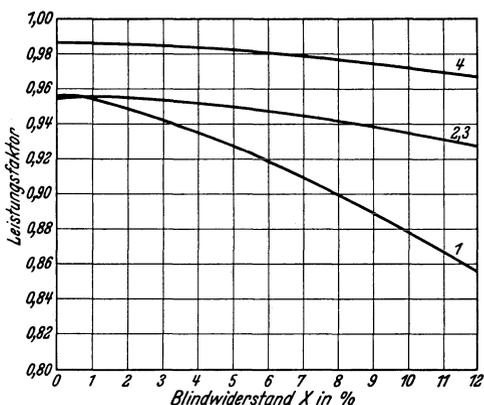


Abb. 89. Leistungsfaktor für Gleichrichter, abhängig von der Transformatorreaktanz. Kurve 1 für Dreieck-Doppelsternschaltung; Kurve 2 für Doppelzickzackschaltung; Kurve 3 für Doppeldreiphasenschaltung mit Saugdrossel; Kurve 4 für Doppelsechsphasenschaltung mit Saugdrossel. [Aus Marti, Winograd, Gramisch: Stromrichter. München und Berlin: Oldenbourg 1933.]

Die Kurvenform des einer beliebigen Gleichstrombelastung entsprechenden primären Wechselstromes soll möglichst genau einer Sinuskurve entsprechen, da etwa vorhandene Oberwellen nur eine Erhöhung der Transformator- und Leitungsverluste ergeben, ohne sich an der Energieübertragung zu beteiligen. Die Oberwellen bewirken somit eine Verschlechterung des primären Leistungsfaktors. Ist φ der Verschiebungswinkel zwischen Strom und Spannung, I_1 der Effektivwert der Grundwelle und I der Effektivwert des gesamten Primärstromes, so ist der Leistungsfaktor $\gamma = \frac{I_1}{I} \cdot \cos \varphi$. Er wird als das Verhältnis der wattmetrisch gemessenen Wirkleistungs- zur Scheinleistungsaufnahme gemessen. Der Leistungsfaktor ist abhängig vom Überlappungswinkel,

also von Transformatorreaktanz und Transformatorschaltung. Er verschlechtert sich mit wachsender Belastung. Die Abb. 89 zeigt die Abhängigkeit des Leistungsfaktors von der Schaltung und der Transformatorreaktanz bei Vollast. Zur Ermittlung des Leistungsfaktors bei Teillast ist als Transformatorreaktanz eine dem Teillastverhältnis entsprechend verringerte Reaktanz einzusetzen. Unter Viertellast ergeben sich aus den Kurven zu hohe Leistungsfaktoren, da sich bei kleiner Last der Magnetisierungsstrom des Transformators stark verschlechternd bemerkbar macht.

Auch hinsichtlich des primären Leistungsfaktors sind die Saugdrosselschaltungen von Brown, Boveri & Co. den anderen Schaltungen gleichwertig oder überlegen.

d) Der Betrieb von Quecksilberdampfgleichrichtern.

Beim Betrieb von Quecksilberdampfgleichrichtern ist zunächst zwischen Glasgleichrichtern und Eisengleichrichtern zu unterscheiden.

1. Bei Glasgleichrichtern werden sämtliche Leitungseinführungen in das Glasgefäß vakuumdicht eingeschmolzen, so daß eine einmalige Evakuierung in der Fabrik genügt. Die Zündung des Lichtbogens erfolgt bei Glasgleichrichtern meist mittels mechanischer Kippvorrichtungen. Bei größeren Glasgleichrichtern, welche wegen der Ventilator Kühlung einen starren Einbau des Kolbens bedingen, werden statische Zündverfahren, z. B. die Spritzzündung der Siemens-Schuckert-Werke angewandt. Als Höchststromgrenze für Glasgleichrichter gelten zur Zeit 400—750 A. Als Lebensdauer werden 20 000—30 000 Betriebsstunden angegeben.

2. Bei Eisengefäßen ist vor der Inbetriebsetzung sowie nach jeder länger andauernden Öffnung des Gefäßes eine Entgasung der Gefäßwände und der Anoden notwendig. Sie erfolgt durch ein Ausheizen des Gefäßes bis zu einer über der normalen Betriebstemperatur liegenden Temperatur unter ständigem Absaugen der entweichenden Gase und Dämpfe. Je nach der Konstruktion erfolgt das Ausheizen mittels einzubauender Widerstände oder durch das Durchleiten warmen Wassers durch die Kühlkanäle. Nach dem Ausheizen werden die Gleichrichter durch ein bei niedrigen Spannungen (50—60 V) und niedrigen Strömen beginnendes und langsam bis zu den normalen Betriebswerten zu steigern des Formieren für den Betrieb vorbereitet. Dabei ist eine ständige Beobachtung des Vakuums, der Wandtemperaturen und der Gleichspannung erforderlich. Die Belastung ist nur in einem solchen Maße zu steigern, daß der Druck nicht über etwa 0,01 mm Hg-Säule anwächst und wesentliche Schwankungen der Gleichspannung vermieden werden. Von den Herstellerfirmen werden der jeweiligen Konstruktion angepaßte Richtlinien für die Formierung, die dabei zu verwendende Schaltung und die zu treffenden Maßnahmen erlassen.

Die Vakuumerhaltung der Eisengleichrichter erfolgt durch zwei hintereinandergeschaltete Vakuumpumpen, von denen die rotierende Vorvakuumpumpe einen Druck von etwa 10^{-1} bis 10^{-2} mm Hg-Säule

herstellt, während die Hochvakuumpumpe Luftleeren bis 10^{-4} bis 10^{-5} mm Hg-Säule ergibt. Zur Messung des Vakuums dienen meist Hitzdrahtinstrumente, deren Wirkungsweise auf der druckabhängigen Wärmeabfuhr geheizter Drähte aufgebaut ist.

Das Potential der Kathode gegenüber dem Transformatornullpunkt entspricht den Potentialen der jeweils stromführenden Anoden, vermindert um den Spannungsabfall im Lichtbogen. Bei Eisengleichrichtern muß deshalb die Kathode von den Gefäßwänden sorgfältig isoliert sein.

Die Zündung des Lichtbogens erfolgt im allgemeinen durch selbsttätige Herstellung eines Hilfslichtbogens zwischen der Kathode und einem Zündstab. Zur Aufrechterhaltung des Lichtbogens auch bei kleinen Belastungen dienen besondere Erregeranoden, welche, bezogen auf die Hauptanoden, näher an der Kathode liegen und mit einer kleinen Spannung gespeist werden. Neuerdings wird meist für Zündung und Erregung die Verwendung von Wechselstrom bevorzugt, der einem besonderen an das Wechselstromnetz angeschlossenen Hilfstransformator entnommen wird.

Neben einer sorgfältig einzustellenden und aufrecht zu erhaltenden Kühlung benötigt der Hg-Dampfgleichrichter keine weitere Wartung.

Die Instandhaltung beschränkt sich auf die Beobachtung der Dichtungen, der Vakuumeinrichtung, sowie gelegentlich in den Kühlmanteln sich einstellender Korrosionen. Die Einfachheit der Inbetriebsetzung und der Abschaltung macht den Gleichrichter besonders auch für automatische Anlagen geeignet.

Neben den geringeren Wartungsansprüchen liegen die Vorzüge der Quecksilberdampfgleichrichter gegenüber rotierenden Umformern in den besseren Wirkungsgraden. Da die Lichtbogenspannung praktisch unabhängig von der Belastung und der Gleichstromspannung ist, ergeben sich um so vorteilhaftere Verhältnisse, je höher die Gleichstromspannung ist (Abb. 90 und 91). Der hohe Wirkungsgrad bei Teillast und die Unempfindlichkeit des Gleichrichters gegen kurzzeitige Überlastungen haben dem Gleichrichter vor allem das Gebiet der Gleichstrombahnen erschlossen. Mit der Erhöhung der Spannungswerte über 500 V hinaus ist der Gleichrichter auch in der elektrochemischen Industrie mit Vorteil verwendbar.

5. Die Quecksilberdampfgleichrichter mit Glühkathode.

Bei den Quecksilberdampfgleichrichtern mit Glühkathode wird ebenfalls Hg-Dampf als Ionisationsträger verwendet. Im Gegensatz zu den Quecksilberdampfgleichrichtern mit flüssiger Kathode ist jedoch die

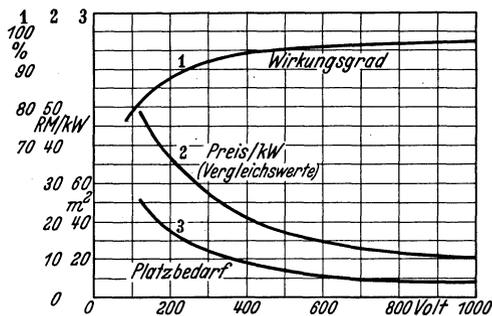


Abb. 90. Wirtschaftlichkeit des Gleichrichters abhängig von der Betriebsspannung. (BBC.)

verdampfte Quecksilbermenge nicht von dem Stromdurchgang abhängig, so daß die Dampfdichte entsprechend der günstigst möglichen Anodenspannung von 11—12 V eingestellt werden kann. Nach Versuchen von Hull [Trans. Amer. Inst. Electr. Engr. 47, 755] ergibt eine solche Senkung der Anodenspannung neben der Verbesserung des Umformungswirkungsgrades eine bedeutende Erhöhung der Lebensdauer der Glühkathoden. Die Glühkathoden werden meist indirekt beheizt. Sie bestehen aus

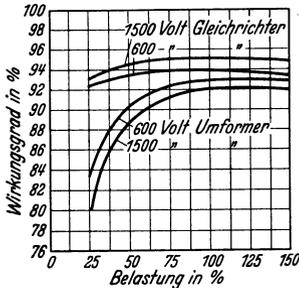


Abb. 91. Vergleich zwischen den Gesamtwirkungsgraden von Gleichrichtern und rotierenden Umformern für 600 und 1500 V in Abhängigkeit von der Belastung.

hochhitzebeständigem Material (z. B. Wolfram), das zur Erzielung einer starken Emissionsfähigkeit bei verhältnismäßig niedriger (etwa 850° C) Temperatur mit Oxyden der Erdalkalimetalle überzogen wird.

Die Vorteile der Quecksilberdampfgleichrichter mit Glühkathoden wirken sich in wirtschaftlicher Hinsicht besonders bei niedrigen Spannungen (unter 500 V) und nicht zu hohen Strömen (maximal etwa 2000 A), und in technischer Beziehung bei Spannungen über 10000 V aus, da die Rückzündungssicherheit gegenüber Gleichrichtern mit flüssiger Kathode bedeutend erhöht ist.

6. Anwendung gesteuerter Gleichrichter und Umrichter.

Nach den Ausführungen auf S. 414 über die Steuerung einer Lichtbogenentladung in einem dampfgefüllten Gefäß kann der Stromdurchgang gesperrt werden, indem

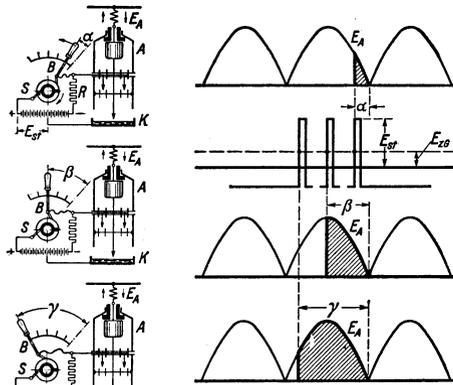


Abb. 92. Gittersteuerung mittels Kontaktscheibe S und verstellbaren Bürsten B. [Aus Schenkel: Elektrotechn. Ztschr. 1932, 761.]

einem zwischen Kathode und Anode angebrachten Gitter ein einen kritischen Wert unterschreitendes Potential gegenüber der Kathode erteilt wird. Wenn der Stromdurchgang eingeleitet ist, kann er nur durch Unterbrechung des Lichtbogens selbst, z. B. im Nulldurchgang des Stromes, gelöscht bzw. eine Neuzündung verhindert werden. Die Steuerung der Lichtbogenentladung erfordert demnach eine Apparatur, welche in periodischen Abständen den Zündzeitpunkt der Entladung einzuleiten und

zu verändern vermag. Abb. 92 beschreibt ein Verfahren, bei dem mittels einer gleichmäßig rotierenden Kontaktscheibe von einer Batterie periodisch positive Potentiale an das Gitter gelegt werden, deren Zeitpunkte durch verstellbare Bürsten verändert werden. An Stelle der mechanischen Kontaktscheibe können auch die in Abb. 93 beschriebenen rein

elektrischen Arten der Gittersteuerung angewandt werden. Sie beruhen darauf, daß entweder durch Änderung der Phasenverschiebung der Gitterspannung gegenüber der Anodenspannung (z. B. mittels Drehtransformatoren) oder durch Veränderung der Amplitude einer Wechselgitterspannung oder durch Veränderung einer Gleichvorspannung über

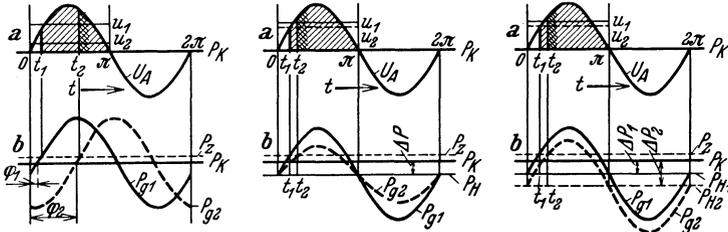


Abb. 93. Elektrische Gittersteuerungen. [Aus Rachel: Elektr.-Wirtsch. 1932, 465.]

einer konstanten Gitterwechselspannung der Zeitpunkt verändert wird, in dem die kritische Gitterspannung (Abb. 81) überschritten wird.

Diese Grundelemente der Gittersteuerung können für ein- und mehrphasige Stromrichter verwendet und zu folgenden Zwecken benutzt werden:

- a) zur Schaltung von Strömen,
 - b) zur Spannungsregelung,
 - c) zur Frequenzumformung.
- a) Schaltung von Strömen.

Die Schaltung von Strömen mittels Stromrichtern hat gegenüber anderen Methoden die Vorzüge, daß sie mit außerordentlich kleinen Strömen trägheitslos und ohne Kontaktabbbrand erfolgen kann. Die kleinen Energien, welche Photozellen zu liefern vermögen, können mittels

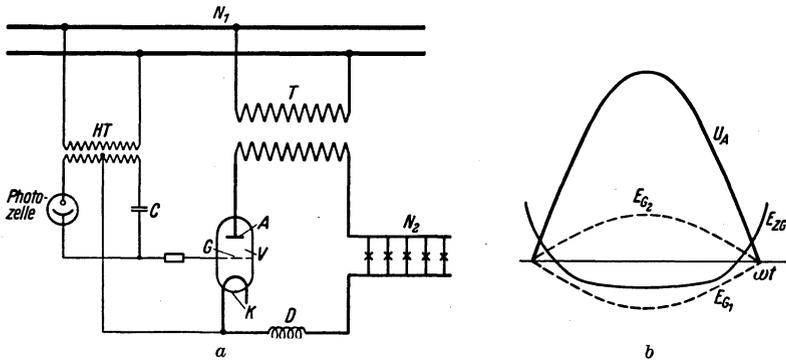


Abb. 94 a und b. Steuerung eines Stromrichters durch eine Photozelle. (SSW.)

Stromrichtern zur Betätigung von Stromkreisen benutzt werden. In Abb. 94 a wird z. B. der veränderliche Widerstand der Photozelle mit einer Kapazität C so abgeglichen, daß sich bei verschiedenen Beleuchtungsstärken die Gitterspannung von dem negativen Wert E_{g1} auf den positiven Wert E_{g2} (Abb. 94 b) ändert, und damit den Lampenstromkreis N_2 ein-

bzw. ausschaltet. Die Temperatur elektrisch geheizter Öfen kann mittels Gittersteuerung sehr feinstufig (auf wenige Grade) und mit sehr einfacher

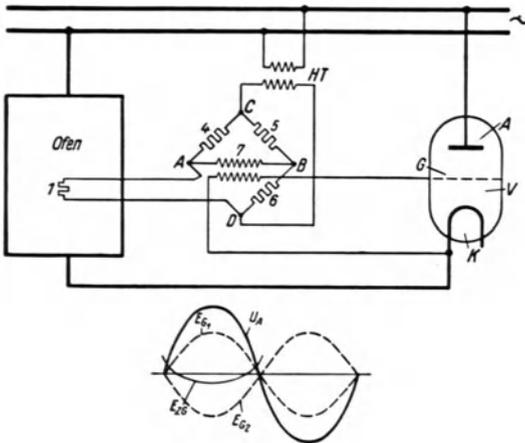
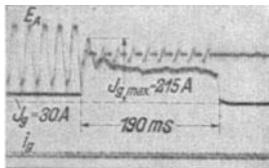


Abb. 95. Temperaturregelung eines elektrisch geheizten Ofens durch Stromrichter. (SSW.)

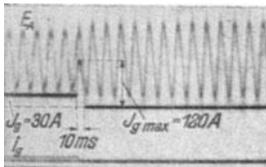
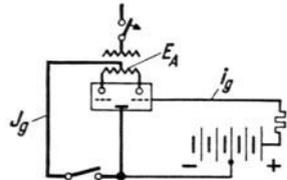
Betätigung geregelt werden. In Abb. 95 wird die Veränderung eines im Ofen aufgebauten Widerstands I über eine Brückenschaltung direkt zur Steuerung der Ofentemperatur benutzt. Die Abschaltung von Kurzschlüssen durch Gittersteuerung wird nach Abb. 96 in einem Bruchteil der bei Ölschaltern notwendigen Zeiten vollzogen.

b) Spannungsregelung.

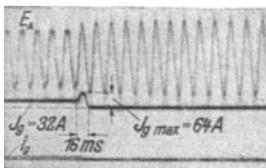
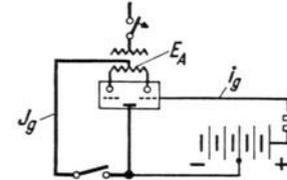
Die Spannungsregelung mittels Dampfentladungs-



Abschalten durch Ölschalter ohne Drossel



Abschalten durch Gitter ohne Drossel



Abschalten durch Gitter mit Drossel 1,5Henry

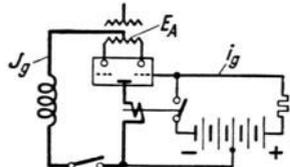


Abb. 96. Abschaltzeiten bei Kurzschluß in einer Gleichstromanlage für 1200 V. [Aus Rachel: Elektr.-Wirtsch. 1932, 471.]

gefäßen mit Gittersteuerung hat gegenüber der Regelung mittels Reguliertransformators im Wechselstromkreis des Gleichrichters den Vorteil,

daß die Regelung mit verhältnismäßig einfachen Mitteln stetig und praktisch verlustlos erfolgen kann. Wie aus Abb. 92 und 93 ersichtlich, wird der Mittelwert der Gleichspannung dadurch verändert, daß aus der gesamten Wechselspannungskurve veränderliche Stücke herausgeschnitten werden. Die zunächst je nach dem Regelungsgrad starke Welligkeit der Gleichspannung kann durch Glättungsdrosseln und abgestimmte Schwingungskreise verbessert werden. Dagegen erfährt der dem Wechselstromnetz entnommene Primärstrom eine um so größere Phasenverschiebung gegenüber der Wechselspannung, je stärker die Gleichspannung geregelt wurde. Es gilt angenähert [Meyer-Delius: Elektr.-Wirtsch. 1931, H. 5], daß der primäre Leistungsfaktor dem Verhältnis der geregelten zur Leerlaufgleichspannung entspricht. Der geforderte Regel-

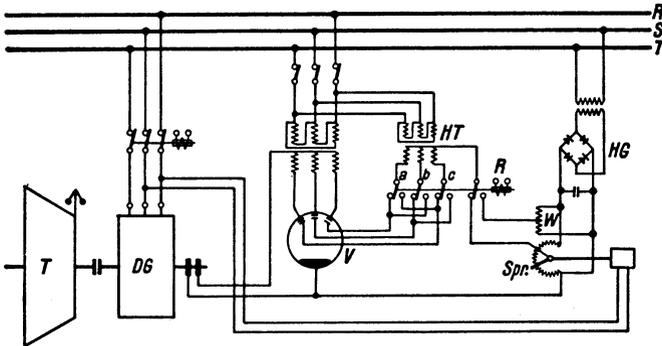


Abb. 97. Selbsttätige Spannungsregelung und Schnell-Entregung eines Generators durch Stromrichter. (SSW.)

bereich wirkt sich demnach stark auf die Dimensionierung des Gleichrichtertransformators aus.

Die Regelung der Verbraucherspannung in Gleichstromnetzen stellt ein wesentliches Anwendungsgebiet für gesteuerte Gleichrichter dar. Der Steuerbereich kann dabei so gewählt werden, daß auch das langsame Hochfahren eines belasteten Gleichstromnetzes nach erfolgter Abschaltung möglich ist, was bei rotierenden Umformern zu Schwierigkeiten führen kann. Für die Parallelarbeit von gesteuerten Stromrichtern mit rotierenden Umformern ist bedeutsam, daß die Belastungscharakteristik, ähnlich wie bei ungesteuerten Gleichrichtern, auch bei verschiedenen Regelspannungen geradlinig abfallend verläuft und der Charakteristik der Umformer angepaßt werden kann. Die Abschaltung von Kurzschlüssen wird entsprechend dem vorstehenden Abschnitt a), S. 426 im Stromrichter vollzogen.

Die Erregermaschine von Synchronmaschinen kann durch gesteuerte Stromrichter ersetzt werden, welchen neben der feinstufigen und trägheitslosen Spannungsregelung bei beliebiger Charakteristik auch die Schnell-Entregung übertragen werden kann (Abb. 97). Bei Gleichstrommaschinen können die Stromrichter in den Erregerkreis eingebaut und damit verschiedene, nahezu trägheitslos sich einstellende Charakteristiken erreicht werden. Die Drehzahlregelung von Gleichstrommotoren wird

mit günstigeren Wirkungsgraden als mit rotierenden Umformern durch gittergesteuerte Stromrichter vollzogen, und z. B. auch zur Steuerung von Lokomotiven benutzt, welche aus normalen 50 periodigen Netzen gespeist

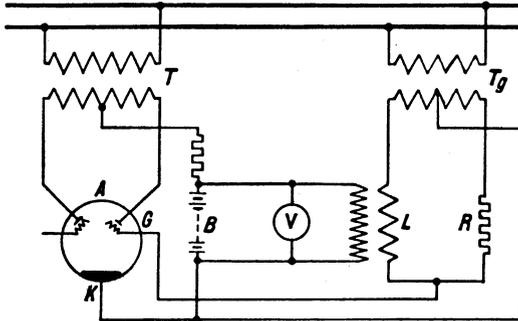


Abb. 98. Selbsttätige Batterieladung. (SSW.)

und mit Gleichstrommotoren ausgerüstet werden. Für die Umsteuerung von Antrieben und die wechselweise Stromaufnahme und Stromrückgabe, wie sie bisher mittels Leonard-Umformern durchgeführt wurden, können ebenfalls Stromrichter in Kreuzschaltung verwendet werden. Hierbei ergeben sich wesentlich einfachere Apparaturen und je nach der Steuerart zum Teil bedeutend bessere Wirkungsgrade. Als weiteres Beispiel ist die selbsttätige Batterieladung durch gesteuerte Stromrichter hervorzuheben.

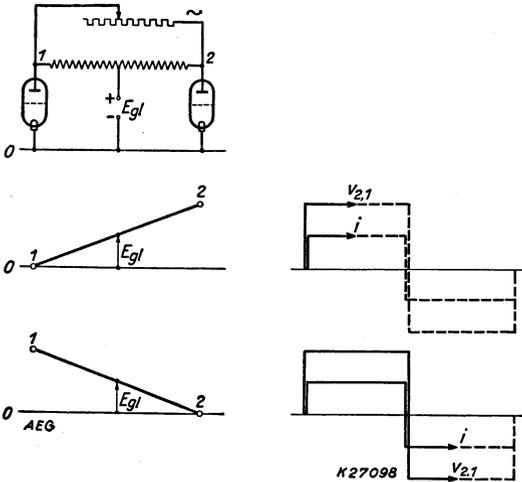


Abb. 99. Strom- und Spannungsverlauf am Einphasenwechselrichter. (A.E.G.)

Bei der Wechselrichtung wird die Gleichspannung einerseits zur Kathode eines Entladungsgefäßes — in Abb. 99 sind der Deutlichkeit halber zwei getrennte Röhren gezeichnet — andererseits zum Mittelpunkt eines Spannungsteilertransformators geführt. In einer durch die gewünschte Frequenz festgelegten Zeitfolge werden abwechselnd die Stromwege 1 und 2 freigegeben. An den Wicklungsendpunkten 1 und 2 des Transformators erscheint mit periodisch wechselndem Vorzeichen

und mit Gleichstrommotoren ausgerüstet werden. Für die Umsteuerung von Antrieben und die wechselweise Stromaufnahme und Stromrückgabe, wie sie bisher mittels Leonard-Umformern durchgeführt wurden, können ebenfalls Stromrichter in Kreuzschaltung verwendet werden. Hierbei ergeben sich wesentlich einfachere Apparaturen und je nach der Steuerart zum Teil bedeutend bessere Wirkungsgrade. Als weiteres Beispiel ist die selbsttätige Batterieladung durch gesteuerte Stromrichter hervorzuheben. Abb. 98 zeigt eine Schaltung, bei welcher die Eisendrossel L von der Batteriespannung vormagnetisiert, und auf diese Weise die Ladestromstärke der Batteriespannung angepaßt wird.

c) Frequenzumformung.

Die Frequenzumformung mittels gesteuerter Stromrichter umfaßt die Umbildung von Gleichstrom in Wechselstrom (Wechselrichtung) und damit die Gleichstromtransformierung, sowie die eigentliche Frequenzumformung von Wechselströmen.

die Spannung $2 E_{gl}$ in Form einer Rechteckskurve (Abb. 99). Diese Rechteckskurve ist sodann durch Parallelschaltung mit einer Taktgebermaschine oder mittels einer geeigneten Zusatzmaschine [Peterson: Elektrotechn. Ztschr. 1932, 773] in Verbindung mit der Speicherwirkung einer Drosselspule in eine normale Sinuskurve umzuwandeln. Gegenüber einer normalen Gleichrichterschaltung sind hierbei nur die Gleichstromanschlüsse an den Entladungsgefäßen vertauscht, d. h. es ist möglich, durch Umpolung der Anschlüsse den Energiefluß umzukehren. Durch Hintereinanderschaltung eines Gleichrichters und eines Wechselrichters über einen Gleichstromzwischenkreis, die sog. Universalschaltung, können Frequenzumwandlungen in weiten Grenzen vorgenommen werden. Die Lieferung der Blindleistung des Wechselstromnetzes übernimmt bei der erwähnten Schaltung die Taktgebermaschine. Es werden jedoch auch Wege erwogen, welche die Lieferung der Blindleistung über den Gleichstromzwischenkreis aus dem Primärnetz ermöglichen sollen [Peterson: Elektrotechn. Ztschr. 1932, 773].

Neben den netzerregten Wechselrichtern mit Zusatzmaschine gibt es selbsterregte Wechselrichter, bei welchen durch Gittersteuerung die beiden Stromwege (Abb. 100) im Gegentakt gesperrt und freigegeben werden, während die jeweils brennende Anode durch einen Löschkondensator im Umkehrpunkt zum Erlöschen gebracht wird. Diese Schaltung eignet sich besonders für die Speisung von Hochfrequenzöfen.

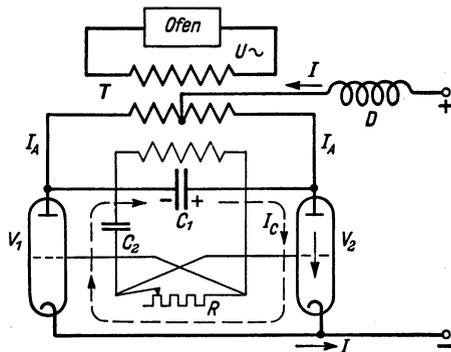


Abb. 100. Selbsterregter Wechselrichter. (SSW.)

Mittels der durch Löbl [Elektrotechn. Ztschr. 1932, 775. — Träger: Elektrotechn. Ztschr. 1932, 778] und Krämer entwickelten Hüllkurvenumrichter können ohne Gleichstromzwischenkreis Frequenzumformungen nach einem ganzzahligen Teilverhältnis der Ausgangsfrequenz eines Wechselstromnetzes vorgenommen werden. Diese Schaltungen haben besondere Vorteile für die Speisung von $16\frac{2}{3}$ periodigen Bahnnetzen aus normalen Wechselstromnetzen von 50 Hertz.

Die Herstellung sehr hoher Frequenzen durch gesteuerte Stromrichter findet ihre Grenzen durch Kommutierungsschwierigkeiten, welche sich aus den endlichen Entionisierungszeiten der Lichtbogenwege ergeben. Quecksilberdampfstromrichter mit flüssiger Kathode sind zur Zeit noch für Frequenzen von 1000—2000 Hertz verwendbar. Die Quecksilberdampfstromrichter mit Glühkathode haben wegen ihrer kleineren Dampfdichte kürzere Entionisierungszeiten und gestatten noch Frequenzen bis etwa 10000 Hertz herzustellen. Auch die obere Spannungsgrenze liegt bei Stromrichtern mit Glühkathode höher als bei solchen mit flüssiger Kathode. Die Erhöhung der Lebensdauer von Glühkathoden

[A. Glaser: Elektrotechn. Ztschr. 1931, 829] hat deshalb ebenso wie die Steigerung ihrer Überlastbarkeit besondere Bedeutung.

VI. Akkumulatoren und deren Behandlung.

Die Akkumulatoren, auch Stromspeicher oder Sammler genannt, vermögen elektrische Energie in chemische und umgekehrt chemische Energie wieder in elektrische umzuwandeln. Ihre Wirkungsweise beruht auf der Umkehrbarkeit elektrolytischer Prozesse. Für die praktische Anwendung haben sich bisher nur die Bleisammler und die alkalischen Sammler als geeignet erwiesen.

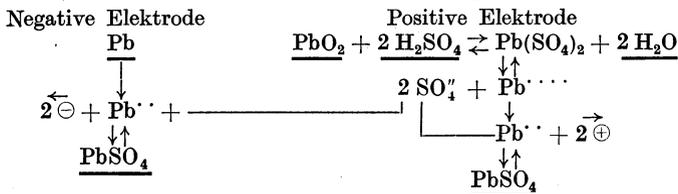
A. Der Bleiakкумуляtor.

Literatur: Bermbach: Die Akkumulatoren, 4. Aufl. Berlin: Julius Springer 1929. — Kretschmar: Die Krankheiten des Bleiakкумуляtors, 3. Aufl. München u. Berlin: Oldenbourg 1928.

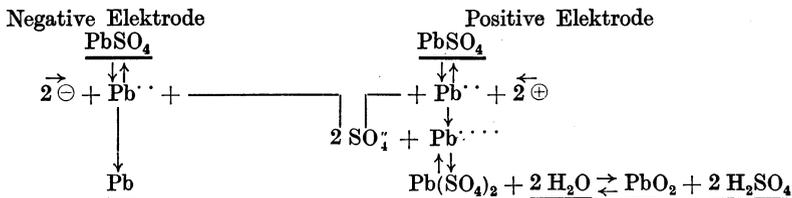
1. Die elektrochemischen Vorgänge im Bleiakкумуляtor.

Die Bleiakкумуляtoren besitzen als negative Elektroden gerüstartig unterteilte Hartbleirahmen, deren Aussparungen feinverteiltes schwammiges Blei tragen, und als positive Elektroden plattenförmige Körper mit einer Auflage von porösem Bleisuperoxyd. Als Elektrolyt dient etwa 25%ige Schwefelsäure vom spezifischen Gewicht 1,14 bis 1,18, entsprechend einer etwa 4 bis 5 normalen Lösung. Der Akkumulatorkasten ist bei kleineren Einheiten meist aus Glas, Hartgummi oder geeigneten Kunststoffen. Größere Batteriekästen bestehen aus Holz mit Bleiauskleidung. Die Distanzierung und Isolation der einzelnen Elemente erfolgt meist durch Kombinationen von Holzbrettchen und Stäbchen, teilweise auch durch Hartgummizwischenlagen.

Die chemischen Vorgänge bei der Entladung einer Bleisammlerzelle lassen sich nach Foerster [Elektrochemie wäßriger Lösungen. Leipzig: Johann Ambrosius Barth] durch folgendes Schema darstellen:



Entsprechend gilt für die chemischen Vorgänge bei der Ladung einer Bleisammlerzelle:



Der Entladungsvorgang ist demnach gekennzeichnet durch die Bildung von Bleisulfat aus Blei bzw. Bleisuperoxyd an den beiden Elektroden, sowie durch eine fortschreitende Verdünnung des Elektrolyten, die sich durch Dichtemessung mittels Aräometers nachweisen läßt. Umgekehrt wird bei der Ladung eines Bleiakкумуляtors das Bleisulfat an der negativen Elektrode wieder in Blei, an der positiven in Bleisuperoxyd zurückverwandelt. Gleichzeitig nimmt die Schwefelsäurekonzentration wieder zu. Auf der im obigen Schema dargestellten Reaktionsfolge fußt die Sulfattheorie. Bezüglich einiger Zwischenvorgänge, besonders an der positiven Elektrode, bestehen von der Foerstersonen abweichende Theorien, beispielsweise von Le Blanc und von Liebenow.

2. Die Spannung des Bleiakкумуляtors.

Die Klemmenspannung U einer Zelle stellt bei Entladung die Differenz, bei Ladung die Summe von elektromotorischer Kraft E und Spannungsabfall vermöge des inneren Widerstandes W dar, also

$$U = (E \mp I \cdot W) V.$$

Der innere Widerstand von Akkumulatorenzellen liegt je nach ihrer Größe in der Höhe von etwa 0,01 bis 0,0001 Ω . Der Spannungsverlauf bei Entladung und Ladung müßte also, bei Berücksichtigung der kleinen Erhöhung des inneren Widerstandes im Lauf der Entladung, nur geringe Unterschiede zeigen. Der tatsächliche Spannungsunterschied (Abb. 101) ist größer als dem inneren Widerstande entsprechen würde. Durch Messung der Einzelpotentiale der beiden Elektroden gegen eine Hilfelektrode (in Abb. 101 ein Cadmiumblech) läßt sich feststellen, daß daran besonders die positive Bleisuperoxydelektrode beteiligt ist. Durch Versuche wurde festgestellt, daß diese Unterschiede durch Konzentrationsänderungen an den Elektroden bedingt sind. Diese Konzentrationschwankungen entstehen infolge nicht genügend rascher Diffusion der Schwefelsäure (bei Entladung zu den Elektroden, bei Ladung von ihnen weg). Diese Annahme wird dadurch bestätigt, daß die normale EMK durch Änderung der Konzentration des Elektrolyten verändert werden kann (Tabelle 12).

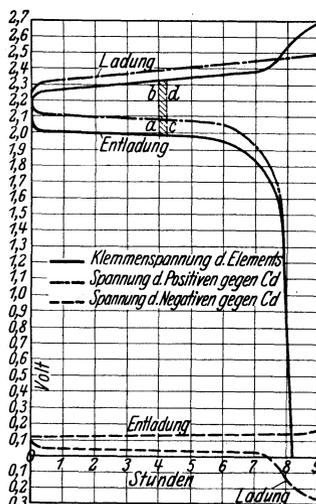


Abb. 101. Spannungsverlauf bei Ladung und Entladung eines Bleisammlers.

Tabelle 12. Abhängigkeit der elektromotorischen Kraft des Bleisammlers von der Stärke der Schwefelsäure.

[Dolezalek: Theorie des Bleiakкумуляtors, S. 29.]

Spezifisches Gewicht der Säure	1,050	1,150	1,200	1,300	1,400
% H_2SO_4	7,37	20,91	27,32	39,19	50,11
EMK in V	1,906	2,010	2,051	2,142	2,233

Die EMK wird im praktischen Betrieb durch Erhöhung der Säuredichte über 1,18 nicht gesteigert, weil mit weiterer Steigerung sowohl die Selbstentladung als auch die Neigung zur Sulfatisierung (s. S. 433) wesentlich verstärkt werden.

Nach Abb. 101 ist die mittlere Klemmenspannung bei der Entladung etwa 1,9 bis 2,0 V, bei der Ladung etwa 2,3 V. Gegen Ende der Entladung geht der weitere Spannungsabfall rasch vor sich. Ein Akkumulator kann praktisch als entladen gelten, wenn seine Klemmenspannung bei der Entladung (nach Ruhepause kann sich Spannung kurzzeitig stark erholen) sich um 10% gegenüber seiner anfänglichen Entladespannung verringert hat. Nach Angaben der Afa sind die Endspannungswerte von Entladezeit und Kapazität wie folgt abhängig:

Entladezeit	1	2	3	5	7½	10 h
Verbürgte Endspannungen a)	1,75	1,75	1,83	1,83	1,83	1,83 V
b)	1,70	1,75	1,80	1,83	1,83	— V
c)	1,67	1,72	1,78	1,80	1,83	— V

Es gelten die Werte a) für Batteriegrößen bis 4000 Ah¹, b) bis 7500 Ah, c) bis 15000 Ah. Die Ladekurve (Ladestrom = 3ständiger Entladestrom) zeigt gegen Ende einen bedeutenden Anstieg bis auf etwa 2,7 V, welcher zu einer vollständigen Rückbildung des Bleisulfats in Blei und Bleisuperoxyd notwendig ist. Während des letzten Teiles der Ladezeit wird nicht nur Bleisulfat, sondern auch Schwefelsäure zerlegt (starke Gasentwicklung infolge Bildung von H₂ und O₂).

3. Die Kapazität des Bleiakkumulators.

Die Kapazität eines Sammlers bezeichnet diejenige Strommenge in Ah, die er nach ordnungsgemäßer Ladung abzugeben vermag. Sie hängt

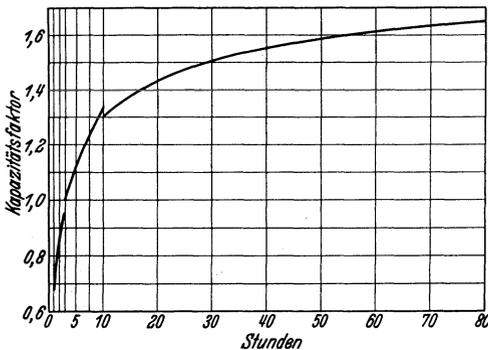


Abb. 102. Kapazitätsfaktor.

von der Menge der wirksamen Masse ab. Der Umsatz von 3,85 g Blei, 4,43 g PbO₂ und 3,66 g H₂SO₄ ergibt theoretisch 1 Ah. Tatsächlich muß jedoch 3 mal mehr Masse als theoretisch erforderlich eingebracht werden, da sie sich nur insoweit an der Stromlieferung beteiligt, als sie mit dem Elektrolyten in Berührung ist. Die Kapazität eines Sammlers steigt durch weitere Formierung

(s. S. 434) der Platten nach Ingebrauchnahme bis zu einem Maximum, um dann wieder langsam zu fallen. Es ergeben sich für längere Entladezeiten und kleine Stromentnahmen höhere Kapazitäten, als für

¹ Ah = Amperestunde.

kurzzeitige Entladungen mit hohen Stromstärken, woran insbesondere die negativen Platten beteiligt sind. Den sich nach Angaben verschiedener Firmen ergebenden Kapazitätsfaktor für verschiedene Entladezeiten zeigt Abb. 102 [aus Kretschmar: Krankheiten des Bleiakкумуляtors. München u. Berlin: Oldenbourg 1928]. Ein Entladen über den Abfall der Klemmenspannung um etwa 10% hinaus kann eine dauernde Verringerung der Kapazität und der Lebensdauer des Sammlers zur Folge haben. Es wird nicht mehr das gesamte Bleisulfat in Blei bzw. Bleisuperoxyd zurückverwandelt, besonders dann, wenn der Akkumulator nur kurze Zeit nach der Entladung wieder geladen wird. Der Übergang von feinpulverigem Bleisulfat in grobkristallinisches bedingt Sulfatisierung, die sich in weißen Deckschichten zeigt.

Durch Vergrößerung der Säurekonzentration kann man bis zu einem gewissen Betrag die Kapazität erhöhen. Sie verringert sich wieder nach Earle nach Überschreiten des spezifischen Gewichts von 1,25. Auch die Steigerung der Temperatur ergibt für je 1° C eine Verbesserung der Kapazität um 1%.

4. Der Wirkungsgrad des Bleiakкумуляtors.

Der Wirkungsgrad eines Bleisammlers kann entweder auf das Verhältnis von abgegebener zu aufgenommener Strommenge in Ah bei voller Entladung und Ladung, oder auf das Verhältnis von abgegebener zu aufgenommener elektrischer Arbeit in Wh bezogen werden. Der Nutzeffekt bezogen auf die Strommenge beträgt im allgemeinen — wenn Selbstentladung (s. unten) vermieden ist — zwischen 90 und 95%, der Nutzeffekt bezogen auf die elektrische Arbeit bei mittleren Entladezeiten zwischen 75 und 80%. Bei Pufferbetrieb, also verhältnismäßig langen Entladezeiten steigt er bis zu 90%. Der schlechtere energetische Wirkungsgrad ist wesentlich auf den inneren Widerstand des Elementes und die Gasentwicklung beim Laden zurückzuführen. Der Kapazitätsverlust in Ruhepausen (Selbstentladung) ist nicht vollständig zu vermeiden (Selbstübergang von Bleischwamm in Bleisulfat, Konzentrationsverschiebung). Er wird begünstigt durch Verunreinigungen der Säure durch gewisse Metalle (Pt, Au, As, Cu, kurz edlere Metalle als Pb, sowie Ni, Fe, Mn) und Säuren wie HNO₃ und HCl, sowie organische Säuren.

5. Konstruktive Ausführung von Akkumulatorplatten.

Die negativen Platten werden entweder als Kastenplatten, oder als Gitterplatten ausgeführt. Die Kastenplatten (Abb. 103) bestehen aus einem Hartbleigestell mit quadratischen Kästchen, in welche die Masse (Bleischwamm mit Zusätzen von Ruß, Porzellanmehl u. a., welche das Zusammensintern des Schwamms verhindern sollen) eingestrichen wird. Ihr Herausfallen beim Quellen der Masse wird durch gelochte dünne Bleibleche verhindert. Die Lebensdauer der negativen Kastenplatten kann zu 10—15 Jahre angenommen werden. Die Gitterplatten (Abb. 104) enthalten in den Zwischenräumen getrocknete und gehärtete Paste, die sich bis zu gewissem Grade mit dem Rahmenblei verbindet.

Im Laufe des Betriebes findet jedoch eine Ablösung der Masse vom Rahmen statt, welche die Kapazität und die Lebensdauer (im Mittel 5 Jahre) verringert. Das Herausfallen der Masse wird durch anliegende harzfreie Holzbrettchen verhindert. Diese geben zugleich sehr wirksame Klebe- und Quellstoffe zur Bindung der Masse mit dem Rahmen ab.

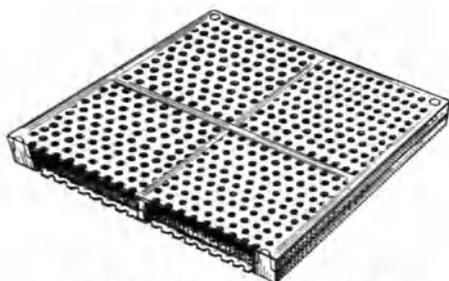


Abb. 103. Stück einer Kastenplatte.

In gutem Zustand ist die Farbe der negativen Platte hellgrau, bei Umladung braun.

Häufig werden negative Platten erst beim Verbraucher durch vorsichtige Ladung formiert, da formierte negative Platten beim Versand besonders vorsichtig behandelt werden müssen („Verbrennungsgefahr“ des Bleies in Gegenwart von Wasser und Sauerstoff).

Die positiven Platten werden für stationäre Anlagen meist als Großoberflächenplatten, für transportable Akkumulatoren vielfach auch als Gitter- oder Masseplatten oder als Panzerplatten gebaut.

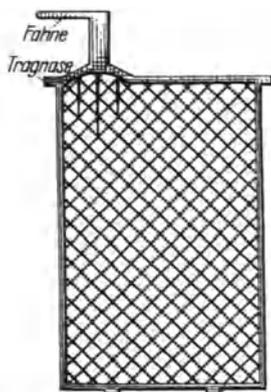


Abb. 104. Leichte Gitterplatte der Afa.

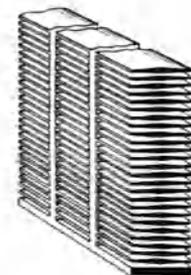


Abb. 105. Stück einer Großoberflächenplatte.

Die Großoberflächenplatten bestehen aus Weichbleirippen (Abb. 105), die durch einzelne Stege gehalten werden, so daß die Gesamtoberfläche etwa 8mal so groß wie die sichtbare ist. Durch wechselndes Laden und Entladen (Planté-Formierung) wird in wachsender Dicke die Oberflächenschicht in Bleisuperoxyd umgewandelt. Durch Zusatz von Alkalisalzen zum Elektrolyten kann die Formierung wesentlich beschleunigt werden. Nach Formierung müssen diese Salze wieder sorgfältig entfernt werden. Die Lebensdauer der Großoberflächenplatten beträgt etwa 5—10 Jahre.

Die positiven Gitter- oder Masseplatten besitzen einen ähnlichen Aufbau wie die beschriebenen negativen Gitterplatten. Ihr Vorteil ist das kleinere Gewicht bezogen auf dieselbe Kapazität gegenüber Großoberflächenbatterien. Ihre Lebensdauer endet nach etwa 250 Entladungen (halbe Lebensdauer gegenüber den negativen Platten).

Die Panzerplattenelemente enthalten die wirksame Masse in durchbrochenem Hartgummiröhrchen, welche die Stoßfestigkeit und Lebensdauer gegenüber Gitterplatten auf das Doppelte erhöhen.

Die Farbe geladener positiver Platten ist blauschwarz bis dunkelbraun, bei vorgeschrittener Sulfatierung hellbraun mit weißen Flecken.

Bei gelblicher bis rötlicher Farbe und Chlorgeruch ist auf Chlorgehalt, bei zerfressenen roten, sich hart anführenden Rippen auf Eisengehalt, bei schwarzer Farbe und stark gekrümmten oder gewachsenen Rippchen auf Essigsäure oder Salpetersäuregehalt der Säure zu schließen. Positive Platten neigen zum Wachsen in Länge und Breite bei zu starken Entladungen, bei Kurzschlüssen zu Verkrümmung.

Nach Hütte, Bd. 2, 26. Aufl., S. 987 gilt für das Gewicht G kg und Grundfläche F m² einschließlich Bedienungsgängen je Zelle für betriebsfertige ortsfeste Batterien in Abhängigkeit der Kapazität für 3stündige Entladung:

Kapazität	50	100	200	500	1000	2000	5000	10000	15000 Ah
G	22	37	60	145	295	560	1350	2600	3800 kg
F	0,12	0,2	0,2	0,36	0,46	0,83	1,25	1,9	2,4 m ²

6. Behandlung im Betrieb.

Bei der Behandlung von Bleiakkulatoren im Betrieb ist entsprechend den geschilderten chemischen Vorgängen auf Einhaltung der normalen Lade- und Entladezeiten, Vermeidung von Nebenschlüssen oder Kurzschlüssen einzelner Zellen durch einfallende Gegenstände oder Schlamm bildung, Verhinderung einer Verunreinigung der Säure durch Alkohol-, Essigsäure-, Ammoniakdämpfe usw. zu achten. Es ergeben sich daher für ihre Aufstellung und Wartung folgende Grundsätze¹:

1. Aufstellung in gut gelüfteten, trockenen Räumen ohne Sonnenbestrahlung, möglichst ohne freiliegende Eisenteile, und abseits von Betrieben, die der Akkulatorensäure schädliche Stoffe abgeben.
2. Ausreichende Isolation der Zellen gegeneinander und gegen Erde, Vermeidung von Kriechstrecken.
3. Säurefeste Herstellung des Fußbodens (Steingut- oder Eisenklinkerplatten, deren Fugen mit säurefestem Asphalt heiß vergossen werden) von genügender Tragfähigkeit; bei Spannungen über 250 V gegen Erde Einbau isolierender Laufgänge aus geöltem Holz ohne Eisenbeschläge.
4. Einfettung von Kupferleitungen und Holzgestellen, Abdeckung der Zellen.
5. Einbau eines Lade- und Entladeamperezählers mit Temperaturausgleich sowie möglichst von selbsttätigen Ladeschaltern, z. B. System Pöhler, welche zu geringe oder Überladung ausschließen.
6. Verwendung einwandfreier Akkulatorensäure¹ der richtigen Konzentration und von destilliertem Wasser für Nachfüllung.
7. Sorgfältige erste Ladung mit zunächst kleiner Spannung, die rasch ansteigt (genaue Befolgung der Vorschriften der Lieferfirma).
8. Führung einer Betriebsliste, in der für jede Zelle die Säuredichte vor und nach der Ladung registriert wird.

¹ Nachprüfung von Akkulatorensäure auf schädliche Beimengungen siehe Bermbach: Akkulatoren, S. 150. Berlin: Julius Springer 1929. — Kretschmar: Krankheiten des Bleiakkulators. München u. Berlin: Oldenbourg 1928.

9. Prüfung, ob gegen Schluß der Ladung sämtliche positiven und negativen Platten gleichmäßig gasen. Nichtgasende Zellen haben vielleicht Kurzschluß. Wenn nach Ladung Gasblasen entwickelt werden (Nachkochen) ist Verunreinigung der Säure vorhanden (Kapazitätsverlust, Nachprüfung durch Auffangen des Wasserstoffs).

10. Rechtzeitige Abschaltung von Schaltzellen von der Ladung, wenn sie nur wenig entladen waren.

11. Messung der Schlammablagerungen in den Zellen.

12. Entnahme von höchstens 60% der garantierten Kapazität, Ladung spätestens 24 h nach Entladung.

13. Schwach beanspruchte Batterien alle 8 Tage ganz entladen und wieder bis zur Gasentwicklung laden.

14. Unterbrechung der Ladung bei einer Steigerung der Säuretemperatur auf 40° C (Gefahr für Holzbrettchen).

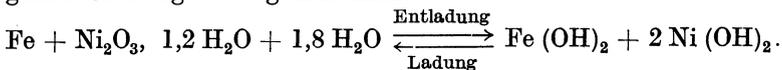
15. Laden einer Batterie vor längerer Ruhepause, am besten dauernde Ladung mit kleinem Strom während dieser Zeit.

16. Regelmäßige Revision durch einen Sachverständigen, der auch zweckentsprechende Auswechslung von Platten und Brettchen vornimmt.

Die Bleiakkumulatoren werden in der chemischen Industrie für Notbeleuchtungs- und Signalzwecke, für Fahrzeuge und Krane, als Zündbatterien für Gasmaschinen, für Fernsprechanlagen, seltener für Pufferbetrieb verwendet. Zu Akkumulatoren gehört als notwendiges Zubehör die regelbare Lademaschine bzw. neuerdings gesteuerte Stromrichter und zur Spannungsregelung bei der Entladung der Zellschalter. Da die äußersten Schaltzellen im allgemeinen weniger stark entladen, und bei der Ladung vor Ladeschluß abgeschaltet werden, kann die Spannung der Lademaschine entsprechend (im allgemeinen 15%) niedriger angenommen werden, als sie zum Aufbringen der höchsten Ladespannung für alle Zellen sein müßte.

C. Die alkalischen Akkumulatoren.

Der Nickeleisenakkumulator¹ besitzt als aktive Masse für die negative Elektrode ein Gemenge von feinverteiltem Eisen und 10% Quecksilberoxyd (bei Jungner mit Cadmiumzusatz), für die positive Elektrode Nickelhydroxydul und Schüppchen aus reinem Nickel für die Stromleitung, die entweder in Taschen einer vernickelten Stahlblechplatte (Taschenzelle) oder in Stahlblechröhrchen (Röhrenzelle) untergebracht werden. Als Elektrolyt dient 20%ige Kalilauge, mit einem Zusatz von Lithiumhydroxyd. Zur Verwendung kommt ein geschlossenes, innen ausgummiertes Stahlblechgefäß. Der Vorgang bei Ladung und Entladung läßt sich nach Foerster (Elektrochemie wäßriger Lösungen) durch folgende Umsatzgleichung darstellen:



¹ In Deutschland geliefert durch die DEAC = Deutsche Edison-Akkumulatoren-Company und durch Svenska-Akkumulator Aktiebolaget Jungner (Nife).

Die Kalilauge ist am Umsatz nur indirekt beteiligt, dagegen wird je Ah 0,6 g Wasser umgesetzt. Bei der Ladung bildet sich Wasserstoff und Sauerstoff, so daß Wasser nachgefüllt werden muß.

Die Ladung erfolgt über 5—7 h mit konstanter Ladestromstärke oder mit konstanter Spannung von 1,7 V. Ladung mit kleiner Stromstärke ergibt ohne Cadmiumzusatz an negativer Elektrode schlechten Wirkungsgrad.

Dabei steigt die Ladespannung von 1,6 auf 1,8 V. Der Elektrolyt darf sich nicht über 50° C erwärmen. Die Entladespannung sinkt von 1,4 auf 1,0 V (im Mittel 1,2 V). Der Spannungsverlauf während Ladung und Entladung ist in Abb. 106 dargestellt. Die Kapazität des Sammlers ist von der Entladestromstärke wenig abhängig und auch gegen starke

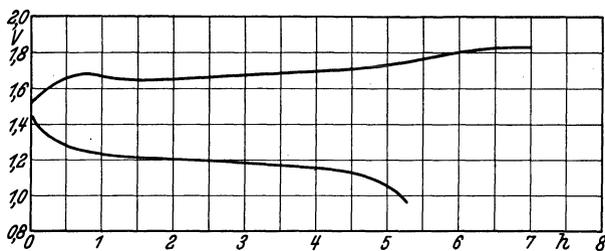


Abb. 106. Lade- und Entladekurve des Edison-Akkumulators.

Entladungen (Kurzschluß) und raue mechanische Behandlung wenig empfindlich. Die Selbstentladung ist gering.

Der Wirkungsgrad bezogen auf Strommenge in Ah ist etwa 70—75%, bezogen auf elektrische Arbeit etwa 50—60%. Die Leistungsfähigkeit je kg liegt zwischen 20 und 28 Wh¹/kg.

Die Vorteile der Nickeisenakkumulatoren liegen in ihrer langen Lebensdauer (600—1000 Ladungen), in ihrer Unempfindlichkeit gegen raue Behandlung, während der früher noch hervorgehobene Vorteil des kleinen Gewichtes durch die Fortschritte im Bau leichter Bleiakumulatoren eingeholt worden ist. Als Nachteile sind der hohe Anschaffungspreis, der schlechtere Wirkungsgrad und die niedrigere Zellenspannung gegenüber Bleiakumulatoren anzuführen.

Der Cadmium-Nickelsammler² hat ähnliche Eigenschaften wie der Nickeisenakkumulator. Er vermeidet jedoch die Wasserstoffbildung bei Ladung großenteils und voll im Betrieb, so daß der Wirkungsgrad besser ist. Er wird hauptsächlich für Grubenlampen verwendet.

VII. Elektrofilter.

A. Allgemeines.

Die Elektrofilter dienen zur Ausscheidung von Staub- und Nebelteilchen aus Abgasen, deren Rückgewinnung entweder wegen des Wertes

¹ Wh = Wattstunde.

² In Deutschland durch Kölner Akkumulatorenwerke (KAW), Afa, DEAC und Friemann u. Wolf-Zwickau hergestellt.

dieser Teilchen, wegen ihrer Gefährlichkeit oder aus hygienischen Gründen erwünscht ist. Die Staubentwicklung und die Verstaubungsverluste in verschiedenen Industrien ergeben sich aus Tabelle 13. [Diese Tabelle ist einem Aufsatz von R. Heinrich, Siemens-Schuckert-Werke Berlin in Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 1930, v. 15. 2. entnommen.]

Tabelle 13. Staubentwicklung und Verstaubungsverluste in verschiedenen Industrien.

Staub-, Rauch- oder Nebelentwicklung in den Abgasen	g/m ³ bei Betriebs-temperatur	Staub- oder Nebelentwicklung bezogen auf das Fertigerzeugnis Gew.-%
1. Metallhüttenindustrie:		
a) Eisenhochöfen, vor den Staubsäcken gemessen	10—40	4—16
b) Blei- und Zinnschacht- und -flammöfen	3—20	3—12
c) Birnen zum Raffinieren von Kupfer	6—10	3—6
d) Messingschmelzöfen	1—5	2—4
2. Chemische Industrie:		
a) Kiesröstöfen	2,5—5	3—6 vom Kiesdurchsatz
b) Blenderöstöfen	5—15	6—15 vom Blendedurchsatz
c) Schwefelsäurenebel, Konzentrationsabgase	4—10	0,5—1,5
3. Vergasungsindustrie:		
a) Braunkohlengeneratoren: Staub	5—50	2,5—25
b) Braunkohlenschwefelgeneratoren; Teer und Öl	20—35	4—6
4. Zementindustrie:		
a) Drehöfen, Naßverfahren	5—10	6—10
b) Drehöfen, Trockenverfahren	8—20	8—20
c) Rohstofftrockner	20—80	8—25
d) Zementmühlen und Schneckenentstaubung	20—50	3—6
5. Trocknungsindustrie:		
a) Tonerdetrockner und Kalzinieranlagen	30—100	10—25
b) Kalisalztrockner	5—20	3—8
c) Kalk-, Gips-, Sandtrockner	5—50	4—20
6. Kohlenindustrie:		
a) Braunkohlenröhrentrockner	12—25	6—12
b) Steinkohlentrockner	10—20	3—5
c) Schnecken, Innenentstaubung und Mühlen	20—50	2—3
7. Kraftwerke und Feuerungsanlagen:		
a) Steinkohlenstaubfeuerungen	5—15	4—8 vom Kohlendurchsatz
b) Steinkohlenrostfeuerungen	1,5—5	2—5
c) Rohbraunkohlenfeuerungen	1,5—3	2—4
d) Müllverbrennungsanlagen	3—10	2—5

Die elektrische Gasreinigung ist auch dann noch anwendbar, wenn die Dimensionen der einzelnen Schwebeteilchen kleiner als $0,1 \mu^*$ sind. Tatsächlich wird die elektrische Gasreinigung auch zur Abscheidung

$$* \mu = \frac{1}{1000} \text{ mm.}$$

von Teertröpfchen verwertet, welche einen Durchmesser zwischen $0,01 \mu$ und 1μ besitzen. Beimengungen, welche bei der betreffenden Temperatur dampf- oder gasförmig sind, werden nicht abgeschieden. Durch Festlegung der geeigneten Abscheidetemperatur, wie auch des Feuchtigkeitsgehaltes lassen sich Art und Qualität der Abscheidprodukte beeinflussen.

B. Die Wirkungsweise von Elektrofiltern

beruht auf Kraftwirkungen elektrischer Felder auf die Staub- oder Nebelteilchen. Solche Kraftwirkungen können nach Kapitel I, A einerseits durch Anziehung von ungleichartigen bzw. Abstoßung gleichartiger Ladungen nach dem Coulombschen Gesetz, andererseits durch die Einwirkung eines elektrischen Feldes auf Körper verschiedener Dielektrizitätskonstanten (Papierschnitzel im elektrischen Feld) zustande kommen. In den Elektrofiltern treten beiderlei Kraftwirkungen auf. Die erstgenannte ist jedoch für ihre Wirkung entscheidend [R. Seeliger: Siemens-Ztschr. 1927, H. 1].

Das zu reinigende Gas durchströmt einen langgestreckten Behälter — im einfachsten Fall ein Rohr N von etwa 200—300 mm Durchmesser und etwa 3—5 m Länge (Abb. 107) —, in dessen Achse ein Draht S von 2—3 mm Durchmesser gespannt ist. Verbindet man das Rohr mit dem positiven, den Draht mit dem negativen Pol eines Erzeugers für hochgespannten Gleichstrom von etwa 40—60 kV, so wird sich bei Über-

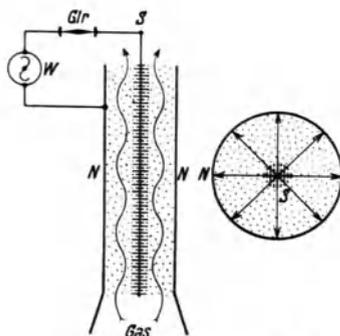


Abb. 107. Schema eines Sprühfilters.

schreiten einer gewissen Feldstärke am Draht $\mathcal{E}'_0 = 29,7 \cdot \left(1 + \frac{0,27}{\sqrt{d}}\right)$ kV/cm (bei d = Drahtdurchmesser in cm) (s. Kapitel I, A, S. 347) eine Koronaentladung einstellen, welche in der den Draht umgebenden Gas-schicht (Sprühzone) positive und negative Ladungen erzeugt. Die negativen Ladungen wandern unter dem Einfluß des elektrischen Feldes nach außen und verbinden sich in der Ladungszone (außerhalb der Sprühzone) mit den Schwebeteilchen, welche auf diese Weise mit den Ladungen gegen das Rohr N getrieben werden. Beim Auftreffen der geladenen Schwebeteilchen auf die Rohrwand geben sie einen Teil ihrer Ladung ab. Die Restladung, die sich bei nichtleitenden Schwebeteilchen halten kann, bewirkt, daß die Teilchen nicht wieder abgestoßen werden, sondern an der Rohrwand haften, bis bei einer gewissen Anhäufung die Haftkräfte durch die Schwerkraft überwunden werden. Der Draht S heißt die Sprühelektrode, das Rohr N die Niederschlags-elektrode.

Die bei kleinen Stromdichten vorhandene, sich einfach aus den geometrischen Verhältnissen errechnende hyperbolische Feldverteilung zwischen Sprüh- und Niederschlags-elektrode wird bei einer Steigerung

der Stromdichte durch die sich in der Ladungszone ansammelnden Raumladungen verzerrt. Die Abb. 108 läßt erkennen, daß die Feldstärke schon bei verhältnismäßig kleinen Stromdichten in einem gewissen Abstand vom Sprühdraht eine annähernd konstante Größe annimmt.

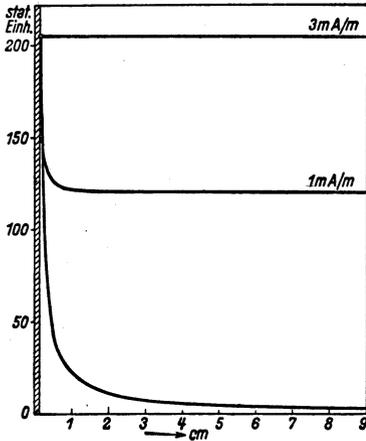


Abb. 108. Feldverteilung in einem Filterrohr mit einer Sprühelektrode von 2 mm Durchmesser bei Stromdurchgangszahlen von 0, ferner 1 und 3 mA/m Länge. [Aus R. Seeliger: Siemens-Ztschr. 1927.]

Es ist Aufgabe des Experiments wie der theoretischen Untersuchung für jede Stoffkombination diese Feldverteilung und damit die Abhängigkeit zwischen Stromdichte und Spannung zu bestimmen und so die Grenze festzulegen, über welche die Spannung nicht gesteigert werden darf, ohne daß die Koronaentladung in eine Funken- bzw. Lichtbogenentladung übergeht. Diese Grenze ist vom Gasdruck abhängig. Wenn auch die Kurzschlußenergien bei den kleinen Stromstärken gering sind, so sind Lichtbogenscheinungen doch wegen des Aufhörens der Reinigungswirkung während der Kurzschlußzeit unerwünscht.

Die mittlere Wanderungsgeschwindigkeit von Schwebeteilchen im elektrischen Feld ist für verschiedene technische Staubarten und Teilchen-

Tabelle 14. Wanderungsgeschwindigkeit abhängig von der Teilchengröße.

Teilchengröße Durchmesser	20 μ	2 μ	0,2 μ	0,02 μ
Zahl der Elementarladungen	4640	376	28	2
Wanderungsgeschwindigkeit in cm/s im Feld 1 [cgs]	0,69	0,56	0,42	0,35

größen versuchsmäßig bestimmt worden. Aus Tabelle 14 [Weyl: Stahl u. Eisen 1926, H. 52] ergibt sich die Abhängigkeit von der Teilchengröße bei einer Feldstärke 1 in cgs-Einheiten.

Tabelle 15. Wanderungsgeschwindigkeit technischer Staube.

Staubart	Wanderungsgeschwindigkeit cm/s bei Feldstärke 1 cgs	Gasgeschwindigkeit m/s
Zement	0,53	—
Zinkoxyd	0,27	2
Ammoniumchlorid	0,6—0,7	—
Bleihüttenabgase	1,1	3,5
Schwefelröstgase	0,56	—
Rauchgase	1,2	1,0—3,6
Hochofengase	0,3—1,2	2,0—3,6

Wassernebeltröpfchen haben bis 30 μ Durchmesser, Teertröpfchen von 0,01 bis 1 μ Durchmesser und H₂SO₄-Tröpfchen zwischen 0,8 und 5 μ Durchmesser. In Tabelle 15 [Weyl: Stahl u. Eisen 1926, H. 52]

sind die Wanderungsgeschwindigkeiten einiger technischer Staubarten zusammengestellt.

Eine Berechnung der mittleren Wanderungsgeschwindigkeit mittels des Stokesschen Satzes ergibt wesentlich kleinere als die praktischen Betriebswerte. Die Staubabscheidung wird offenbar durch turbulente Gasströmungen gegenüber einer sich nur unter dem Einfluß des elektrischen Feldes vollziehenden Wanderung begünstigt.

Sind die mittlere Wanderungsgeschwindigkeit w [cm/s] bei der Feldstärke I [cgs] und die Feldstärke \mathcal{E} [cgs] bekannt, so läßt sich nach Deutsch [Ztschr. techn. Physik 6, 423 (1925)] für ein Niederschlagsrohr mit dem Halbmesser R [cm] und der Länge L [cm], bei der Gasgeschwindigkeit v [cm/s] der Reinigungsgrad nach der folgenden Formel angenähert berechnen:

$$\eta = 1 - e^{-\frac{2 \mathcal{E} \cdot w \cdot L}{R \cdot v}}$$

Die Durchrechnung von Gasreinigungsanlagen nach obiger Formel läßt erkennen, daß die Steigerung des Reinigungsgrads über etwa 80—90% verhältnismäßig hohe Aufwendungen erfordert. Rauchgasreinigungsanlagen werden deshalb im allgemeinen nur für einen Reinigungsgrad von 80% ausgeführt, während bei hochwertigen Abscheidungsprodukten Reinigungsgrade bis zu 98% wirtschaftlich sein können. Der Energieaufwand beträgt je nach Reinigungsgrad und Teilchengröße zwischen 0,1 und 0,5 kWh, in Sonderfällen, z. B. bei der Reinigung des besonders feinen Gichtgasstaubes, bis 0,8 kWh und bei der Trocknung von Wassergas bis 1,4 kWh je 1000 m³ Gasdurchsatz. Hierzu kommt der Energieaufwand für den Druckabfall im Filter, welcher nach Angaben der Siemens-Schuckert-Werke zwischen 2 und 8 mm WS beträgt.

C. Konstruktiver Aufbau¹.

Eine elektrische Gasreinigungsanlage besteht, wie aus Abb. 109 hervorgeht, aus den eigentlichen Elektrofiltern und der Anlage zur Erzeugung des für die Abscheidung notwendigen hochgespannten Gleichstroms.

Die spezielle Ausführung der Elektrofilter wird naturgemäß wesentlich von der Art und Temperatur der Rohgase und der dem Elektrofilter übertragenen Aufgabe beeinflusst. In den meisten Fällen sind die Elektrofilter aus mehreren gleichartigen Elementen zusammengesetzt, welche die Gase in Parallel- und Hintereinanderschaltung durchlaufen (Abb. 110). Der einheitlichen Strömung halber wird meist senkrechte Aufstellung bevorzugt. Die von oben nach unten durchströmten Einheiten werden der Vorreinigung, die von unten nach oben durchströmten Einheiten der Feinreinigung zugeteilt. Besonderen Wert ist auf die rasche Wegführung der abgeschiedenen Schwebeteile aus dem Gasstrom zu legen. Die Filterkammern erhalten deshalb Fangtaschen und Rüttelvorrichtungen, welche automatisch in bestimmter Zeitfolge das Abfallen der Abscheidestoffe bewirken. Um schlammartige und klebende Abscheidprodukte zu vermeiden, wird die Reinigung bei Rohgasen mit

¹ Die Lieferung von Elektrofilteranlagen erfolgt in Deutschland durch die Lurgi-Apparatebau-G. m. b. H., Frankfurt a. M. Die Elektrofilterpatente sind in Händen der Siemens-Lurgi-Cottrell-Elektrofilter-G. m. b. H., Berlin.

festen und flüssigen Verunreinigungen so unterteilt, daß zuerst bei einer über dem Taupunkt der flüssigen Verunreinigungen liegenden Temperatur

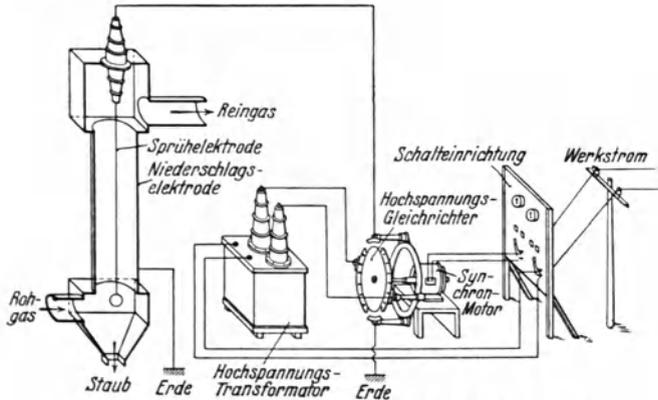


Abb. 109. Schematischer Aufbau einer Gasreinigungsanlage.

soweit möglich nur die festen Stoffe und nach geeigneter Kühlung des Rohgases die flüssigen Stoffe getrennt abgeschieden werden. Ähnliche Maßnahmen werden auch zur Befriedigung bestimmter Qualitätsansprüche an Reingas und Abscheidestoffe sowie zur Vermeidung chemischer Angriffe auf das im Elektrofilter verwendete Material angewandt.

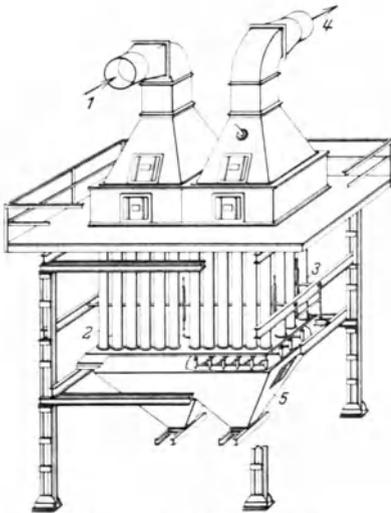


Abb. 110. Elektrofilter mit Röhrenelementen.

Der Erzeugung hochgespannten Gleichstromes mittels mechanischer Gleichrichter in Verbindung mit Transformatoren wird wegen ihrer hohen Unempfindlichkeit meist der Vorzug gegenüber der Erzeugung mittels Glühkathodengleichrichtern gegeben. Beide Gleichrichterarten können für Einphasen- und Drehstromgleichrichtung für aussetzende und andauernde Entladung gebaut werden. Über die bessere Wirksamkeit von andauernder oder aussetzender Entladung liegen scheinbar einander widersprechende Versuchsergebnisse vor [Deutsch u. Hoß:

Elektrotechn. Ztschr. 1930, 1480. — Strigel: Siemens-Ztschr. 1930, H. 4/5]. Elektrofilteranlagen mit mechanischen Gleichrichtern neigen zu Radiostörungen in stärkerem Maße als solche mit Glühkathodengleichrichtern. Durch Vergrößerung der Kapazität der Anlage [Fritz Müller: Siemens-Ztschr. 1927, H. 1] oder durch Einbau Ohmscher

Widerstände an geeigneter Stelle können jedoch auch Elektrofilteranlagen mit mechanischen Gleichrichtern so eingestellt werden, daß sich keine lästigen Rundfunkstörungen ergeben.

D. Anwendung der Elektrofilter.

Das Elektrofilter hat sich in verschiedenen Zweigen der chemischen Industrie mit Erfolg eingeführt.

Bei der Schwefelsäurefabrikation [H. Fiesel: Sonderdruck der Lurgi-Apparatebau-G. m. b. H. — R. Heinrich: Elektrotechn. Ztschr. 1930, 971] nach dem Kontaktverfahren ist das Elektrofilter zu einem wesentlichen Bestandteil des chemischen Verfahrens geworden. An die Röstöfen schließt sich direkt ein Elektrofilter an (Abb. 111), in welchem die von den Röstgasen mitgerissenen Kies- und Abbrandteilchen sowie

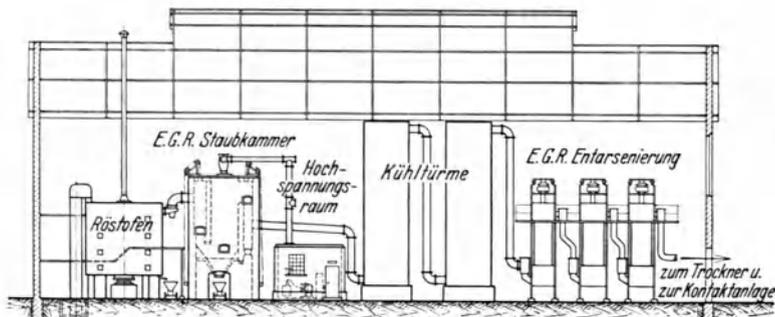


Abb. 111. Schema einer elektrischen Röstgasreinigung mit Entarsenerung in einer Schwefelsäurefabrik nach Kontaktverfahren.

ein Teil der im Röstofen gebildeten Metallsulfate und Oxyde bei 400 bis 500° C abgeschieden werden. Die bei diesen Temperaturen noch dampfförmigen Bestandteile, wie z. B. die für die Kontakte schädlichen Arsenoxyde, werden nach Kühlung und Befeuchtung in einem nachgeschalteten Elektrofiltersystem den Röstgasen entzogen.

Bei der Trocknung von Braunkohle [Fischer: Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 1926, 253], sei es zum Zwecke der Brikettfabrikation oder der Schwelung, entweichen mit den Brüden etwa 6—10% des Trockenkohlendurchsatzes als feinsten Kohlenstaub. Der Rückgewinnung dieses Kohlenstaubs stellte sich zunächst die Schwierigkeit entgegen, daß dieser durch Kurzschlußfunken oder Überschlag im Abscheideraum oder auch durch das Erglimmen von Kohleteilchen an den Sprühelektroden unter Umständen zur Explosion gebracht werden konnte. Eingehende Versuche auf der Grube Ilse (s. Fischer: l. c.) haben ergeben, daß die Explosionsgefahr durch die Einhaltung eines kleinsten, von der Temperatur abhängigen relativen Feuchtigkeitsgehaltes der Brüden, sowie durch die Vorschaltung von Hochspannungssicherungen, welche etwaige Kurzschlüsse rasch abschalten, beseitigt werden kann.

Der relative Feuchtigkeitsgehalt der Rohgase ist von wesentlicher Bedeutung, um bei der Reinigung von Gicht- und Generatorgasen

[Guthmann: Stahl u. Eisen 1932, 529. — Bosse: Stahl u. Eisen 1929, H. 32. — v. Reiche: Stahl u. Eisen 1929, H. 35] einen möglichst hohen Reinheitsgrad zu erreichen. Die Mindesthöhe des relativen Feuchtigkeitsgehalts ist hierbei neben der Temperatur von der

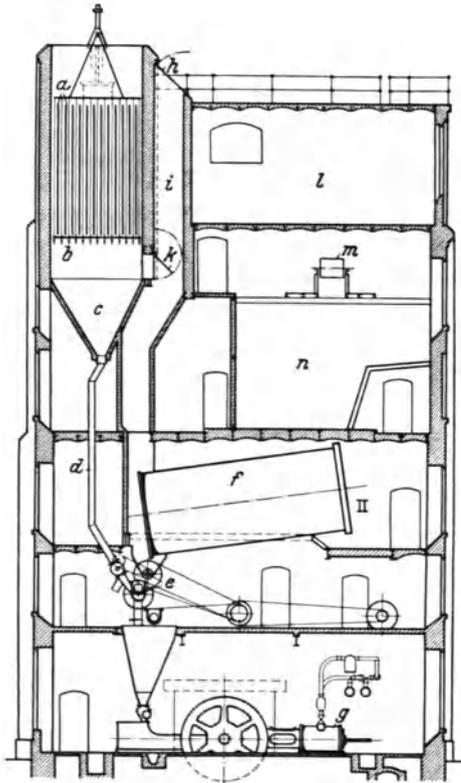


Abb. 112. Betriebsanlage zur elektrischen Entstaubung von Brüden. *a* Niederschlagplatten; *b* Sprühdrahte; *c* Staubtrichter; *d* Staubabfallrohr; *e* Förderschnecke; *f* Röhrentrockner; *g* Brikkettpresse; *h* Explosionsklappe; *i* Hilfsschlot zum Abziehen der Brüden; *k* Umstellklappe; *l* Raum für Gleichrichteranlage; *m* Förderband für aufbereitete grubenfeuchte Braunkohlen; *n* Kohlenboden.

Art der Verunreinigungen der Gase abhängig. Durch die Anwendung einer mehrstufigen Reinigungsanlage [Weyl: Stahl u. Eisen 1926, H. 52] für Generatorgas, wobei die erste Stufe über dem Wasser-Taupunkt der Gase arbeitet, läßt sich eine Trennung in praktisch wasserfreien Teer und in dünnflüssige Öle sowie eine betriebsmäßige Reinigung auf einen Nebelrestgehalt von 0,005 bis 0,01 g/m³ bei einem Kraftaufwand von 1,9 kWh je 1000 m³ Kaltgas erreichen.

Ein bedeutendes Anwendungsgebiet für Elektrofilter ist die Rauchgasreinigung. Wegen des geringeren Wertes der Reinigungsprodukte begnügt man sich hierbei im allgemeinen mit einem Reinigungsgrad von etwa 80% und kommt mit einem Energieaufwand von etwa 0,05 kWh je 1000 m³ aus.

Die Betriebskosten für Rauchgasreinigungsanlagen liegen bei üblichen Abschreibungssätzen und Strompreisen einschließlich Kapitaldienst und Wartung zwischen 1 und 1,5 Pfg. je 1000 m³. Bei Gasreinigungsanlagen sind Betriebskosten in der Größenordnung von 5—10 Pfg. je

1000 m³ Kaltgas anzunehmen, wenn ein Staubgehalt von 0,01—0,02 g je m³ erzielt werden soll.

Die Anwendung der Elektroreinigung auf andere Gebiete erfordert jeweils eingehende Vorversuche, um den Einfluß von Teilchengröße, Back- und Klebefähigkeit, Dielektrizitätskonstante, Wassergehalt usw. zu bestimmen, und den besonderen Eigenschaften des Produkts durch geeignete konstruktive und betriebliche Maßnahmen Rechnung zu tragen.

VIII. Elektrische Heizung.

A. Allgemeines.

Jeder Stromdurchgang durch einen leitenden Körper ist mit der Bildung von Wärme verbunden. Sie errechnet sich aus dem Widerstand

R [Ω] und dem Strom I [A] für die Zeit t [h] zu $Q = 0,86 \int_0^t R I^2 dt$ [kcal].

Je nach der Art des zu beheizenden Gutes kann die Wärme in diesem selbst erzeugt (unmittelbare Beheizung) oder von einem anderen Körper übertragen werden (mittelbare Beheizung). Die unmittelbare Erwärmung des Heizgutes kann entweder dadurch erfolgen, daß an dieses direkt eine Spannung angelegt oder daß im geschlossen angeordneten Heizgut eine Spannung durch ein magnetisches Wechselfeld induziert wird (Induktionsofen s. Bd. II, S. 776). Die mittelbare Beheizung erfolgt meist mittels metallischer Widerstände, von welchen die Wärme durch Strahlung, Konvektion und Leitung auf das Heizgut übertragen wird. Die Lichtbogenöfen (Näheres s. Bd. II, S. 772) stellen einen Zwischentyp zwischen unmittelbarer und mittelbarer Beheizung dar.

Geschlossene elektrische Heizanlagen mit mittelbarer Beheizung können für Temperaturen bis zu etwa 1400° C gebaut werden. In Lichtbogenöfen lassen sich Temperaturen bis zu etwa 3000° C erreichen. Als besondere Vorteile der Elektrowärme für chemische Betriebe sind die Möglichkeit einer feinstufigen Temperaturregelung, die Verwendbarkeit in explosionsgefährdeten Räumen, die einfache Wärmeeinführung in geschlossene und bewegliche Apparaturen anzuführen.

B. Grundlegende Rechnungs- und Betriebswerte.

1. Die nutzbare Wärme.

Die nutzbare Wärme Q_N [kcal] oder [kWh] dient dazu, ein bestimmtes Gewicht G [kg] des Heizgutes mit der spezifischen Wärme c [kcal/kg, °C] in einem gegebenen Temperaturbereich zu erwärmen. Wenn in diesem Temperaturbereich das Heizgut eine Änderung seines Aggregatzustandes erfährt, und r [kcal/kg] die Schmelz- bzw. die Verdampfungswärme bezeichnet, so ist die gesamte nutzbare Wärme:

$$Q_N = \frac{G \cdot c}{860} \cdot (t_m - t_a) + \frac{G \cdot r}{860} \text{ [kWh]}.$$

Hierin bedeutet t_m [°C] die mittlere Endtemperatur und t_a [°C] die Ausgangstemperatur des Heizgutes.

2. Die Verlustwärme.

Die Verlustwärme [J. S. Cammerer: Der Wärme- und Kälteschutz in der Industrie. Berlin: Julius Springer 1928. — H. Gröber: Die Grundgesetze der Wärmeleitung und des Wärmeübergangs. Berlin: Julius Springer 1921] setzt sich zusammen aus den durch Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung abgeführten Wärmemengen. Der

Wärmestrom durch feste, homogene und isotrope Körper ist proportional dem Temperaturgefälle pro Längeneinheit und der Wärmeleitfähigkeit des Körpers. Sind mehrere Körper hintereinander von dem Wärme- fluß zu durchströmen, so ist der gesamte Wärmedurchgangswiderstand gleich der Summe der einzelnen Teilwiderstände. Neben den Wärmedurchgangswiderständen sind bei Hintereinanderschaltung verschiedene Körper die Wärmeübergangswiderstände und die Konvektion zu berücksichtigen. Für bestimmte Isolierstoffkombinationen können mittlere Wärmeleitzahlen λ_m ermittelt werden. Die durchströmende Wärmemenge Q_l [kcal/h] errechnet sich damit für ebene Platten zu:

$$Q_l = F \cdot \frac{\lambda_m}{s} (t_1 - t_2) \text{ [kcal/h].}$$

Hierin sind die Querschnittsfläche F in [m²], die Gesamtschichtdicke s in [m], λ_m in [kcal/m, °C, h] und die Temperaturdifferenz $(t_1 - t_2)$ in [°C] einzusetzen. Die Wärmestrahlung ist, nach dem Stephan-Boltzmannschen Gesetz, mit der 4. Potenz der absoluten Temperatur T des strahlenden Körpers veränderlich (Näheres s. Bd. II, S. 122).

Die genaue Berechnung der Verlustwärme ist nur für besonders einfache Verhältnisse möglich. Im allgemeinen wird man sich auf eine Schätzung der Temperaturverteilung und eine überschlägliche Berechnung des gesamten Wärmedurchgangs beschränken müssen und versuchen, genauere Werte durch Versuch zu erhalten. Der thermische Wirkungsgrad von elektrischen Öfen und Gaserhitzern ist sehr hoch und erreicht bei guter Isolierung Werte von 80—90%.

3. Die Speicherwärme.

Die Speicherwärme Q_{sp} [kWh] oder [kcal] bezeichnet diejenige Wärmemenge, welche zur Aufheizung der Wicklung, der Isolierung und der sonstigen Teile des Heizkörpers erforderlich ist. Dieser Wärmebetrag errechnet sich ganz ähnlich wie die nutzbare Wärme aus dem Gewicht G' [kg], der spezifischen Wärme c' [kcal/kg, °C] und der mittleren Aufheiztemperaturspanne $(t'_m - t'_a)$. Es ist demnach die Speicherwärme Q_{sp} :

$$Q_{sp} = \frac{G' \cdot c'}{860} \cdot (t'_m - t'_a) \text{ [kWh].}$$

Bei Hochtemperaturöfen mit Schamotteauskleidung nimmt die Schamotteschicht wegen ihres hohen spezifischen Gewichts den größten Teil der Speicherwärme auf. Zu ihrer Verringerung ist es notwendig, der Schamotteschicht die geringstmögliche Stärke zu geben.

4. Der Anschlußwert.

Der Anschlußwert einer elektrischen Heizung bezeichnet die von ihr bei Nennspannung und Nennfrequenz aufgenommene Höchstleistung. Diese Höchstleistung läßt sich nicht ohne weiteres aus der Summe von nutzbarer und Speicherwärme, bezogen auf eine gewünschte Anheizzeit, berechnen, da die Durchwärmung eines Heizgutes im Rahmen

einer gewünschten Temperaturspanne eine von seiner Wärmeleitfähigkeit abhängige Mindestzeit erfordert. Diese Durchwärmungszeit läßt sich unter vereinfachenden Annahmen nach den unter Ziffer 2, S. 446 aufgeführten Gesetzen der Wärmeleitung berechnen [Näheres s. V. Paschkis: Elektrische Industrieöfen für Weiterverarbeitung. Berlin: Julius Springer 1932]. Auch während dieser Durchwärmungszeit ist die Leistungsaufnahme ungleichmäßig. Es ist deshalb notwendig, den Anschlußwert von elektrischen Heizungen wesentlich (um 30—50%) größer zu machen als der mittleren Leistungsaufnahme während der Durchwärmungszeit entspricht, und die zeitliche Leistungsaufnahme nach einer gewünschten Ofentemperatur zu regeln.

Eine zeitliche Regelung der Leistungsaufnahme ist möglich

α) durch zeitweises Ab- und Einschalten der Spannung (Änderung der relativen Einschaltdauer),

β) durch Änderung der Spannung (z. B. mittels eigenen Generators, Reguliertransformators oder gittergesteuerten Gleichrichters),

γ) durch Veränderung des Heizwiderstandes (z. B. durch Serien- oder Parallelschaltung einzelner Zweige, oder bei Drehstrom, z. B. durch Stern-Dreieckschaltung). (Näheres über Schaltungen s. V. Paschkis, s. oben.)

Die Veränderung des Heizwiderstandes nach γ) ergibt naturgemäß nur eine mehr oder weniger grobe, stufenweise Regelung. Dagegen kann durch zeitweises Ab- und Einschalten der Spannung, und insbesondere durch Änderung der Spannung mittels gittergesteuerten Gleichrichters (s. S. 424) in Verbindung mit automatisch wirkenden Regelinstrumenten (Siemens & Halske, Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft, Hartmann & Braun) eine sehr exakte Einhaltung einer gewünschten Temperatur erzielt werden.

5. Bemessung von Heizwiderständen.

Die in der chemischen Industrie vorkommenden elektrischen Heizungen werden meist für mittelbare Beheizung durch metallische Widerstände ausgelegt. Bei der Bemessung solcher Metallwiderstände ist einerseits die Wahl eines für den fraglichen Temperaturbereich geeigneten Werkstoffs, andererseits die Einhaltung einer als zulässig anzusehenden Heizflächenbelastung und die konstruktive Unterbringung der notwendigen Heizfläche von Bedeutung.

Geeignete Widerstandsbaustoffe werden von der Spezialindustrie (z. B. Heraeus-Vakuumschmelze, Hanau, Krupp, Schöller-Bleckmann, Wien) für Drahttemperaturen bis nahe an 1200° C hergestellt. Die häufigst verwendeten Baustoffe ergeben sich aus Tabelle 16. Die spezielle Zusammensetzung ist nach den Erfahrungen der Spezialfirmen zu wählen. Der spezifische Widerstand beeinflusst wesentlich die Querschnitts- und Längenbemessung sowie das Gewicht des Widerstandsbaustoffs. Bei kleineren Heizanlagen ergeben sich günstigere Abmessungen bei Verwendung von Baustoffen hohen spezifischen Widerstandes. Für Heizungen größerer Leistung ist mit Rücksicht auf das Gewicht ein

niedriger spezifischer Widerstand anzustreben, sofern nicht der in Frage kommende Temperaturbereich ein bestimmtes Material bedingt. Aus

Tabelle 16. Baustoffe für elektrische Widerstände.

Temperaturbereich ° C	Baustoff
300	Walzeisen, Cr-Ni-Legierungen, Nickel, Gußeisen
500	Cr-Ni-Legierungen, Ni, Cu-Ni-Legierungen, Gußeisen
600—700	Cr-Ni-Legierungen, Ni
700—1000	Cr-Ni-Legierungen
1000—1200	Spezial Cr-Ni-Legierungen
1200—1500	Siliciumcarbid, Molybdän (in Schutzgas), Platin

Abb. 113 ist die Abhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes von der Temperatur für einige Widerstandsbaustoffe ersichtlich.

Der spezifische Widerstand von Siliciumcarbid, das insbesondere für Temperaturen zwischen 1000 und 1500° C in Frage kommt, kann durch Änderung der Zusammensetzung zwischen 200 und 6000 [Ω , mm²/m] geändert werden.

Die zulässige Heizflächenbelastung [W/cm^2] ist hauptsächlich von der für den Widerstand abhängig, welche um das für den Wärmegeflüß zum Heizgut notwendige

Wärmegefälle höher ist als die Temperatur des Heizguts. Die Lebensdauer des Widerstandskörpers verringert sich mit wachsender Heizflächenbelastung. Die in Tabelle 17 zusammengestellten Heizflächenbelastungen sollen im allgemeinen nicht überschritten werden. Durch den Anschlußwert N [kW] und die zulässige Heizflächenbelastung [W/cm^2] ist die Heizfläche bestimmt. Da für eine gegebene Spannung U [V] zur Erzielung einer Leistung N [kW] ein bestimmter Widerstand $R = \frac{U^2}{N \cdot 10^3}$ [Ω] notwendig ist, können nur noch der spezifische Widerstand r_s [Ω , mm²/m], der Leiterquerschnitt [mm²] und die Länge l [m] so verändert werden, daß sich beim Widerstand $R = \frac{r_s \cdot l}{q}$ [Ω] die notwendige Heizfläche ergibt und die Wicklungslänge konstruktiv unterzubringen ist. Wenn sich bei dieser Rechnungsweise kleinere Leiterstärken als in Tabelle 18 für den betreffenden Temperaturbereich angeführt, ergeben, empfiehlt es sich, die Anschlußspannung herabzusetzen. Wenn sich unhandliche Leiterquerschnitte ergeben, kann der errechnete Widerstand

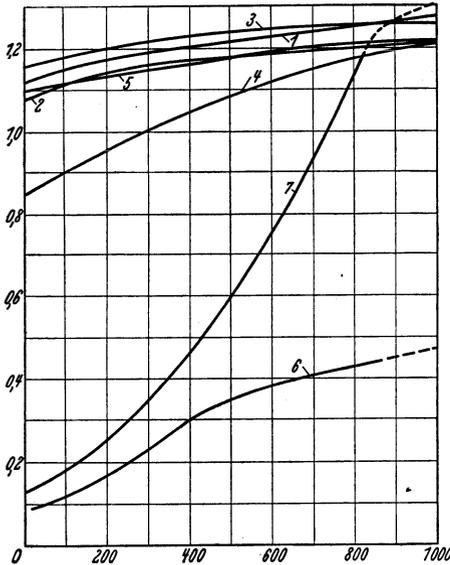


Abb. 113. Spezifischer elektrischer Widerstand [Ω , mm²/m] in Abhängigkeit von der Temperatur [°C] (Abszisse). Baustoffe: 1 Heraeus B, 2 Krupp NCT 3, 3 Heraeus B 7 M, 4 Krupp NCT 6, 5 Heraeus CO, 6 Nickel-Mangan, Heraeus, 7 Elektrolyteisen.

sich bei dieser Rechnungsweise kleinere Leiterstärken als in Tabelle 18 für den betreffenden Temperaturbereich angeführt, ergeben, empfiehlt es sich, die Anschlußspannung herabzusetzen. Wenn sich unhandliche Leiterquerschnitte ergeben, kann der errechnete Widerstand

selbstverständlich auch durch Parallelschaltung mehrerer schwächerer Leiter erreicht werden.

Tabelle 17.
Heizflächenbelastung.

Heizguttemperatur ° C	Heizflächenbelastung W/cm ²
100	8
350	4,5
600	2,5
800	1,2
900	1,0
1000	0,6
1100	0,4
1150	0,25

Tabelle 18¹. Leiterstärken für
verschiedene Temperaturbereiche.

Konstruktionsart	Temperaturbereich ° C	Mindestleiterdurchmesser mm
Leiterwicklung . .	bis 300	1
	über 300	2
Wendel.	bis 600	2
	bis 1000	5—3,5
	über 1000	7—6
Bandförmige Leiter	bis 600	1
	bis 800	2
	bis 1000	3

Für Heiz- und Kochplatten u. ä. sind evtl. auch kleinere Leiterstärken zulässig.

6. Baustoffe für elektrische und Wärmeisolation.

Für die elektrische Isolierung der Heizwicklungen kommen bei Temperaturen unter etwa 300° C Glimmer und keramische Materialien, bei Temperaturen zwischen 300 und 1000° C hauptsächlich Speckstein, Steatit und Schamotte in Frage. Bei Temperaturen über etwa 600° C ist bereits mit einer verhältnismäßig großen, und mit wachsender Temperatur rasch ansteigenden elektrischen Leitfähigkeit zu rechnen und bei der Wahl der Anschlußspannung bzw. der Anordnung der Heizwicklung zu berücksichtigen.

Der Aufbau einer zweckmäßigen Wärmeisolierung ist einerseits vom Temperaturbereich, andererseits von der zu erwartenden mechanischen Beanspruchung der Isolierung abhängig. Für erhöhte mechanische Beanspruchungen kommen die in Tabelle 19 aufgeführten Baustoffe in Frage. Die besonderen Eigenschaften der Wärmeisolationmaterialien, z. B. spezifische Wärme, Wärmeleitfähigkeit, mechanische Festigkeit siehe insbesondere J. S. Cammerer: Der Wärme- und Kälteschutz in der Industrie. Berlin: Julius Springer 1928; V. Paschkis: Elektrische Industrieöfen für Weiterverarbeitung. Berlin Julius Springer 1932.

Tabelle 19. Baustoffe für
Wärmeisolierung.

Temperaturbereich ° C	Baustoff
100	Korkstein
200	Diatomit,
200— 400	Schlackenwolle oder Asbest- und Magnesiabaustoffe
500— 700	Kieselgurhartbrandsteine, z. B. von Grünzweig & Hartmann
800—1000	Kieselgurhartbrandsteine oder Sterchamolfabrikate
1000—1300	Feuerleichtsteine von Sterchamol
1300—1600	Schamotte

¹ Nach V. Paschkis: Elektrische Industrieöfen für Weiterverarbeitung. Berlin: Julius Springer 1932.

C. Konstruktiver Aufbau.

Die konstruktive Ausführung elektrischer Heizeinrichtungen wird selbstverständlich ganz von dem Zweck und der Art der zu heizenden Apparatur bedingt. Man wird stets bestrebt sein, dem Wärmefluß den kürzestmöglichen Weg zum Heizgut zuzuteilen. Bei Gaserhitzern wird man deshalb die Heizelemente möglichst in den Gasstrom verlegen, sofern Korrosions- oder Explosionsgefahren nicht eine besondere Umkleidung der Heizelemente erfordern. Bei Flüssigkeitserhitzern wird neben den für Gase angeführten Gefahrpunkten auch die elektrolytische Zersetzung der Flüssigkeit oder die Möglichkeit der Bildung von Stromnebenschlüssen durch die Flüssigkeit zu berücksichtigen sein. Sofern die Heizwicklung nicht direkt auf den Umfang des zu heizenden Gefäßes — etwa unter Zwischenlage von Heizmikanit oder Steatitreitern — aufgewickelt werden kann, besteht stets die Möglichkeit der

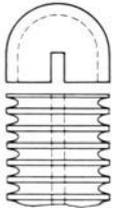


Abb. 114.
Steatitreiter
für Leiter-
elemente.

Auflösung in einzelne gleichartige Elemente. Am häufigsten haben diese die Form von Leitern oder Rahmen. Diese Leitern werden meist durch Flacheisen gebildet, welche durch einzelne Sprossen in einem gewissen Abstand (möglichst nicht über 80 mm, wegen der Verlängerung des Heizdrahtes bei Erwärmung) gehalten werden. Auf die Flacheisen werden dann Steatitreiter (Abb. 114) aufgereiht, welche durch die Auflegung der Heizwicklung (Abb. 115) festgehalten werden. Für solche Elemente eignen sich nur nicht korrodierende Heizdrähte, um die Gefahr von Windungsüberbrückungen oder Körperschlüssen durch abblätternde Teile der Heizwicklung zu vermeiden. Die Elemente können in ihrer Form der Oberfläche des Heizgefäßes angepaßt werden.



Abb. 115. Leiterelement.

Die Heizwicklung kann auch aus einzelnen Wendeln (Abb. 116) zusammengesetzt werden, bei deren Befestigung besonders auf die Möglichkeit allseitiger Strahlung ohne zu starke Muffelung, d. h. Wärmestauung zu achten ist.

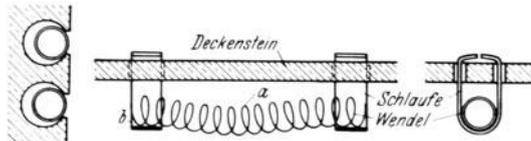


Abb. 116. Heizwendel mit Befestigung durch Rillen oder Schlaufen.

Oft lassen sich auch Flachprofile oder Rohre als Heizelemente benutzen. Rohre haben besondere Vorteile bei Hochstromwiderständen, indem sich durch Übereinanderstecken von Rohren verschiedener Durchmesser leicht bifilare Anordnungen erzielen lassen. Rohre lassen sich auch zur Durchleitung von Wasser für eine etwa gewünschte rasche Abkühlung des Heizgutes benutzen.

D. Die Anwendung der elektrischen Heizung

in der chemischen Industrie ist mannigfaltig entsprechend der leichten Anpassungsfähigkeit an besonders gelagerte Verhältnisse. Ein weites Anwendungsgebiet stellen Gas- und Flüssigkeitserhitzer, Trockenschränke, Kochplatten, Zusatzheizungen zur Beschleunigung chemischer Prozesse. Die größten Heizleistungen (bis zu mehr als 15000 kW je Ofen) nehmen die Lichtbogenöfen zur Darstellung von Calciumcarbid, Ferrosilicium und Phosphor [s. Joh. Wotschke: Grundlagen des elektrischen Schmelzofens. Halle a. S.: Wilhelm Knapp 1933] auf (s. Bd. II, S. 770).

In jedem einzelnen Fall sind die betrieblichen Vor- und Nachteile der elektrischen Beheizung gegenüber Verwendung von Heißdampf oder direkter Befuerung zu untersuchen.

Werkstoffe für die chemische Ingenieurtechnik.

Von Professor Dr. August Thum VDI, Darmstadt und Dr.-Ing. Helmut Holdt VDI, Darmstadt.

I. Allgemeiner Teil.

A. Die Bedeutung der Werkstoffe für die chemische Ingenieurtechnik.

Für die Fortschritte des Maschinen- und Apparatebaues in der chemischen Großindustrie ist die Werkstofffrage von einschneidender Bedeutung. Viele chemische Prozesse erfordern die Anwendung entweder sehr hoher oder sehr tiefer Temperaturen und hoher Drücke. Zur wirtschaftlichen Erzeugung vieler chemischer Produkte ist es außerdem notwendig, mit möglichst großen Apparateeinheiten zu arbeiten. Dies bringt eine wesentliche Steigerung der Beanspruchungen der Werkstoffe mit sich. Bei hohen Temperaturen sind die Festigkeitseigenschaften aller Werkstoffe nur gering; niedere Temperaturen haben bei manchen Werkstoffen, so besonders bei Stahl und Gußeisen Sprödigkeit zur Folge. Erhebliche Schwierigkeiten entstehen im Apparatebau bei Anwendung hoher Drücke und Temperaturen sowie durch die zerstörenden chemischen Einflüsse.

Wie überall in der Technik, wo man die Naturkräfte in besonders wirtschaftlicher Weise ausnützen will, stößt man auf die Materialschranke. Es ist daher für die Entwicklung des Apparatebaues von Wichtigkeit, nicht nur die chemischen Verfahren zu studieren, sondern eingehende Kenntnisse von den chemischen und physikalischen Gesetzen bezüglich des Verhaltens der Werkstoffe im Betrieb zu haben. Nur dann wird es mit Sicherheit gelingen, den geordneten Verlauf chemischer Reaktionen zu erzwingen.

Die Ansprüche des chemischen Apparatebaues haben ebenso wie der moderne Kraftmaschinenbau auf die Weiterentwicklung der Werkstoffe

großen Einfluß gehabt. Die letzten Jahre haben erhebliche Fortschritte in der Verbesserung der Werkstoffgüte und in der Erzeugung neuer, hochwertiger Werkstoffe gebracht.

Hinsichtlich der Festigkeitseigenschaften ist der Stahl der hochwertigste Werkstoff. Gerade er bietet aber im chemischen Apparatebau besondere Schwierigkeiten durch seine starke Korrosionsempfindlichkeit. Wohl ist es gelungen, durch Legierungszusätze wie Chrom und Nickel und durch geeignete Überzüge und Bekleidungen die zerstörenden chemischen Einflüsse zu hemmen. In vielen Fällen ist man der Zerstörung durch Korrosion gegenüber noch machtlos. Daher ist die chemische Industrie gezwungen, in weitem Ausmaße keramische Massen zu verwenden, deren verschiedenartige Erzeugnisse sich durch hohe chemische Widerstandsfähigkeit und Temperaturbeständigkeit auszeichnen. Diese Werkstoffe haben aber den Nachteil, daß sie nicht nur verhältnismäßig geringe Zug- und Biegefestigkeit, sondern auch besonders große Sprödigkeit aufweisen, was namentlich bei stoßweiser und schwingender Beanspruchung große Schwierigkeiten verursacht.

Die Werkstofffrage ist auch eine Frage der Wirtschaftlichkeit. Mit der Steigerung der Werkstoffgüte steigt im allgemeinen der Preis erheblich. Man verstößt gegen die Gesetze der Wirtschaftlichkeit, wenn man die notwendige Betriebssicherheit der Konstruktion durch zu teure Werkstoffe erkauft in Fällen, wo man mit einfacheren billigeren Werkstoffen auskommen könnte. Die neuere Erfahrung hat gezeigt, daß in vielen Fällen bei Betriebsschäden nicht schlechte Werkstoffeigenschaften an sich schuld sind, sondern das mangelnde Sicheinfühlen des Konstrukteurs in die Werkstoffeigenschaften. Es ist ein dringendes Erfordernis, daß man nicht nur die zulässigen Beanspruchungen der einzelnen Werkstoffe bei den verschiedenen Beanspruchungsarten, sondern auch bei den verschiedenen Konstruktionsformen und unter Berücksichtigung der verschiedenen Bedingungen wie Wärmeeinflüsse und chemischer Einwirkungen genau kennenlernt. Die Forschungsergebnisse der letzten Jahre geben dem Konstrukteur vielseitige Anregungen, um nicht nur zu betriebssicheren, sondern auch zu billigen und wirtschaftlichen Konstruktionen zu kommen. Nur in seltenen Fällen genügt es, mit den alten Formeln der klassischen Elastizitätstheorie allein zu rechnen, die einen vollständig gleichmäßigen Werkstoff voraussetzt, der nicht existiert. Noch ist es üblich, die Unzulänglichkeit der alten Festigkeitslehre durch Sicherheitszahlen auszugleichen, die aber auf falsche Wege führen. Eine wirkliche Sicherheit der Konstruktionen erreicht man nicht durch hohe Sicherheitszahlen, sondern nur durch eingehendes Studium des Verhaltens der Werkstoffe bei den verschiedenen Betriebsbedingungen.

B. Die mechanischen und chemischen Beanspruchungen der Werkstoffe.

Bei der Verwendung der Werkstoffe für Maschinen und Apparate der chemischen Industrie kommt es auf ihre Festigkeitseigenschaften, ihre Temperaturbeständigkeit und ihren Widerstand gegen chemische Einflüsse an.

Unter Festigkeit eines Werkstoffes versteht man seinen Widerstand gegen Formänderung und gegen die Trennung seiner kleinsten Teilchen. Es genügt nicht allein, daß ein Konstruktionsteil so bemessen wird, daß er bruchsicher ist, sondern es dürfen auch keine unzulässigen Formänderungen auftreten. Ein ausreichendes Formänderungsvermögen muß aber von den Werkstoffen besonders da verlangt werden, wo im Betrieb die Gefahr von Überbeanspruchungen besteht, damit plötzliche Brüche vermieden werden, die oft schwere Schäden zur Folge haben.

Die auftretenden Beanspruchungen können zügig oder wechselnd sein. Zügig nennt man die Beanspruchung, wenn die Verformung sich in einem Zuge vollzieht, also in der Richtung nicht wechselt, gleichgültig ob geringe Verformungsgeschwindigkeit vorliegt oder große von schlagartiger Wirkung.

Unter wechselnden Beanspruchungen versteht man solche, bei denen die Verformungsrichtung der Werkstoffteilchen ständig wechselt. Beide Beanspruchungsarten können in verschiedenen Formen auftreten, je nachdem die Kräfte, die an den Konstruktionsteilen angreifen, den Werkstoff zu zerreißen, zerdrücken, knicken, biegen, abscheren oder zu verdrehen suchen. Entsprechend diesen verschiedenen Beanspruchungsformen untersucht man die Werkstoffe und bestimmt ihre Zerreiß-, Druck-, Knick-, Biege-, Scher- und Verdrehungsfestigkeit. Die Versuche werden statisch oder dynamisch ausgeführt. Beim statischen Versuch wird die Beanspruchung allmählich gesteigert, wobei die Kräfte, die zur Verformung und Zerstörung des Werkstoffes führen, gemessen werden. Bei der dynamischen Werkstoffprüfung erfolgt die Zerstörung entweder durch dauernd wechselnde Beanspruchungen, z. B. wechselnde Zug-Druckbeanspruchung, Biegebeanspruchung, Verdrehungsschwingungen usw. oder durch kleine Stoßkräfte, die den Werkstoff allmählich zu Bruch bringen oder aber durch Schlagversuche, bei denen die Versuchsstücke durch einen oder wenige kräftige Stöße zerstört werden. Je nachdem man den Werkstoff allmählich durch viele tausend oder gar Millionen Beanspruchungen zu Bruch bringt oder durch eine einzige Beanspruchung — die statisch oder schlagartig sein kann —, unterscheidet man Dauerbrüche und Gewaltbrüche. Von besonderer Bedeutung sind namentlich die Dauerbrüche, da weitaus die meisten mechanischen Schäden an Konstruktionsteilen durch Dauerbrüche entstehen.

In der chemischen Technik ist neben den rein mechanischen Angriffen der Einfluß der chemischen Stoffe von großer Bedeutung. Die Einwirkung der Atmosphäre und der angreifenden chemischen Stoffe bedingt sorgfältigste Auswahl der Konstruktionswerkstoffe. In erster Linie hat man gegen die Korrosionserscheinungen anzukämpfen. Durch chemischen oder elektrochemischen Angriff werden die Werkstoffe von der Oberfläche her angegriffen, wodurch mehr oder minder rasch eine Zerstörung der Konstruktionsteile erfolgt.

Chemische und mechanische Beanspruchungen bewirken gemeinsam, namentlich bei Strömung und Wirbelung von Flüssigkeiten und Gasen, Abnutzungen und Auswaschungen. In allen diesen Fällen ist es

notwendig, die Gefahren durch Verwendung geeigneter Werkstoffe oder Schutzüberzüge zu bannen.

Besondere Aufgabe des Chemikers ist es, zu untersuchen, daß nicht durch die Werkstoffe der chemische Prozeß in unerwünschter Weise, z. B. durch Kontaktwirkung, Verfärbung u. dgl., beeinflußt wird.

Viele Konstruktionsteile werden im Betriebe tiefen oder hohen Temperaturen ausgesetzt. Tiefe Temperatur bedingt oft Versprödung der Werkstoffe und macht sie gegen schlagartige Beanspruchungen empfindlich. Hohe Temperaturen haben meist eine Erweichung insbesondere der metallischen Werkstoffe zur Folge, wodurch deren Festigkeitseigenschaften wesentlich herabgesetzt werden. Besonders gefährdet sind alle Werkstoffe, die Feuergasen ausgesetzt sind. Nur wenige metallische Werkstoffe sind bei Rotglut brauchbar. Durch Abbrand tritt eine rasche Zerstörung ein. Für Temperaturen über 1200° C kommen praktisch nur keramische (feuerfeste) Erzeugnisse in Frage, die aber nur mäßige Festigkeitseigenschaften aufweisen.

C. Das Verhalten der Werkstoffe bei mechanischen Beanspruchungen.

1. Mechanische Beanspruchungen.

a) Elastizität.

Wird ein Werkstoff belastet, sei es durch Zug-, Druck-, Bieigungs- oder Verdrehungsbeanspruchung, so hat die Beanspruchung Formänderungen zur Folge. Eine Zugbeanspruchung bewirkt Verlängerung des Stückes und damit eine Verminderung des Querschnittes. Druckbeanspruchung bewirkt umgekehrt Verkürzung der Probe und dementsprechende Vergrößerung des Querschnittes.

Geht man mit der Belastung wiederum zurück, so gehen auch die Formänderungen zurück. Erreicht die Versuchsprobe wieder vollkommen ihre ursprüngliche Gestalt, so bezeichnet man die Formänderungen als federnd oder elastisch. Die meisten Werkstoffe zeigen bis zu einer gewissen Beanspruchungsgrenze, der Elastizitätsgrenze, dieses elastische Verhalten.

Bei vielen Werkstoffen wie Flußstahl, Stahlguß, Kupfer, Aluminium, Holz sind die elastischen Formänderungen innerhalb gewissen Belastungsgrenzen proportional der Beanspruchung.

Man drückt diesen Vorgang durch das Hooke'sche Gesetz aus:

$$\text{Hierbei ist} \quad \varepsilon = \alpha \cdot \sigma = \frac{\sigma}{E}. \quad (1)$$

$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ das Verhältnis der Längenzunahme Δl zur ursprünglichen Länge l_0 ,

P die Zug- oder Druckkraft in kg,

F_0 der Stabquerschnitt in mm²,

$\sigma = \frac{P}{F_0}$ die Spannung oder die auf die Querschnittseinheit bezogene Beanspruchung,

α die Dehnungszahl in kg/mm² = $\frac{1}{E}$,

E der elastische Formänderungswiderstand in kg/mm², der Elastizitätsmodul.

Der elastische Formänderungswiderstand (Elastizitätsmodul) beträgt z. B. für Stahl $21\,500 \text{ kg/mm}^2$; d. h. ein Stahlstab dehnt sich bei einer Beanspruchung von 1 kg/mm^2 um $\frac{1}{21\,500}$ seiner Länge, also bei 100 mm Länge um etwa $0,005 \text{ mm}$. Derartig geringe Längenänderungen lassen sich nur mit Feinmeßgeräten wie z. B. Martens-Spiegelapparaten [Wawrziniok: Handbuch des Materialprüfungswesens] oder Huggenberger-Tensometern einwandfrei messen.

b) Plastische Formänderungen und Formänderungswiderstand.

Steigert man die Belastung über eine gewisse Grenze, die Elastizitätsgrenze, so beobachtet man nach der Entlastung bleibende (plastische) Formänderungen.

Dieses Auftreten der Formänderungen kann man am besten beim Zerreißen eines Stahlstabes am Spannungs-Dehnungsschaubild verständlich machen (Abb. 1). Die Beanspruchungen des Stabes sind in Abhängigkeit von seiner Dehnung aufgetragen. Punkt E stelle die Grenze der vollkommenen Elastizität dar. Würde man den Stab wieder entlasten, so ginge die Dehnung völlig zurück. Belastet man über E hinaus, so kann man beobachten, daß der Stab nach Entlastung nicht mehr ganz seine ursprüngliche Länge annimmt, sondern daß bleibende Formänderungen zurückbleiben. Oberhalb des Punktes E wird also der Formänderungswider-

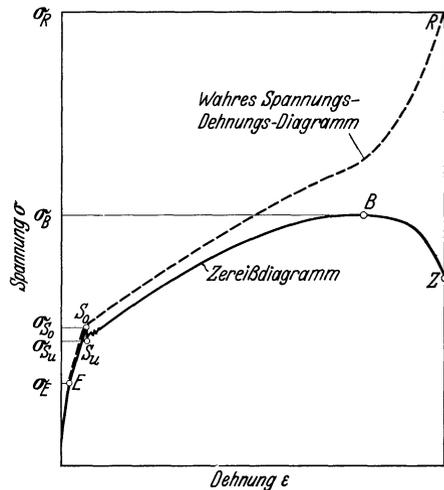


Abb. 1. Zerreißdiagramm und wahres Spannungs-Dehnungsschaubild von weichem Flußstahl.

stand des Stahles überwunden. Steigert man die Belastung weiter, so bricht auf einmal die Belastung zusammen, man erreicht die Streck- oder Fließgrenze (S). Hier beginnt der Stahl sich sehr stark zu dehnen, ohne daß zunächst die Beanspruchung gesteigert wird. Zuweilen sinkt sogar die Last ab, man unterscheidet dann eine obere und untere Streckgrenze (S_o und S_u). Das Erreichen der Streckgrenze erkennt man meist mit bloßem Auge an dem Auftreten der Fließlinien unter 45° zur Achse der Versuchsprobe. Bei weiterer Belastungssteigerung nimmt die Formänderung immer mehr zu, man erreicht den Punkt B , die Höchstlast. Nun beginnt der Stab sich einzuschnüren und reißt bei Z schließlich auseinander. Infolge der Verformung bemerkt man nach Überschreiten der Streckgrenze eine Erwärmung des Probestabes.

Entsprechend der Reckung des Probestabes tritt gleichzeitig eine Querschnittsverminderung ein, die nach Überschreiten der Höchstlast sich noch besonders rein örtlich an der Bruchstelle als Einschnürung

ausprägt. Bei dem Zerreißschaubild in Abb. 1 sind die Spannungen über dem ursprünglichen Querschnitt des Probestabes aufgetragen. Die wahren Spannungen, d. h. die auf den jeweiligen Stabquerschnitt bezogenen Spannungen sind aber größer. Diese sind als gestrichelter Linienzug über der Dehnung aufgetragen. Die Dehnungen sind bis zum Erreichen der Streckgrenze wegen der Deutlichkeit etwas verzerrt vergrößert gezeichnet. Aus dem wahren Spannungs-Dehnungsschaubild erkennt man, daß mit zunehmender Verformung der Formänderungswiderstand steigt. Je stärker man einen Werkstoff verformt, um so größere Kräfte sind dazu erforderlich. Der Formänderungswiderstand ist bei manchem Werkstoff, wie Stahl, Kupfer, Zink, wesentlich abhängig von der Belastungsgeschwindigkeit. Mit zunehmender Belastungsgeschwindigkeit erhöht sich der Formänderungswiderstand. Besonders groß ist dieser Einfluß bei den metallischen Werkstoffen, insbesondere auch bei Stahl bei erhöhten Temperaturen. So treten bei Stahl, der bei 400°C beansprucht wird, schon bei verhältnismäßig kleinen Belastungen bleibende Formänderungen ein, die um so größer sind, je geringer die Belastungsgeschwindigkeit ist. Belastet man einen Probestab aus weichem Flußstahl innerhalb 1 min auf 10 kg/mm^2 und entlastet sofort, so beobachtet man noch keine Formänderungen. Steigert man aber die Belastung innerhalb mehrerer Stunden, so bemerkt man, daß nach der Entlastung bereits geringe bleibende Formänderungen aufgetreten sind. Läßt man die Beanspruchung von 10 kg/mm^2 bei 400°C mehrere Stunden ruhen, so kann man beobachten, daß sich der Probestab allmählich dehnt. Diese Erscheinung bezeichnet man als Kriechen. Sie ist besonders wichtig für das Verhalten der Werkstoffe bei erhöhten Temperaturen.

c) Trennfestigkeit, spröde und zähe Werkstoffe.

Besondere Bedeutung hat in Abb. 1 der Punkt *R*, bei dem der Zusammenhalt der einzelnen Moleküle überwunden wird, der Stab zerreißt. Diese auf den Bruchquerschnitt bezogene Beanspruchung bezeichnet man als Trennfestigkeit, im besonderen Falle des Zerreißversuches auch als wahre Festigkeit oder Reißfestigkeit. Bei vielen Werkstoffen erfolgt die Zerstörung, bevor plastische Formänderungen auftreten. Man unterscheidet danach zähe und spröde Werkstoffe. Bei spröden Werkstoffen ist die Trennfestigkeit des Materials kleiner als der Formänderungswiderstand. Bruch tritt also bereits ein, ehe bleibende Verformungen auftreten (s. Abb. 15c, Diagramm von Gußeisen). Bei zähen Werkstoffen ist der Formänderungswiderstand kleiner als die Trennfestigkeit. Der Bruch tritt erst ein, nachdem der Formänderungswiderstand mit zunehmender Verformung die Trennfestigkeit erreicht. Die spröden Werkstoffe unterscheiden sich außerdem durch eine im Verhältnis zur Druckfestigkeit geringe Zugfestigkeit. Die Zugfestigkeit beträgt bei ganz spröden Werkstoffen nur etwa $\frac{1}{5}$ bis $\frac{1}{20}$ der Druckfestigkeit.

d) Formänderungsbehinderung infolge Kerbwirkung.

Im praktischen Maschinen- und Apparatebau hat man es in der Regel nicht mit einfachen Konstruktionsteilen zu tun, bei denen man eine

gleichmäßige Spannungsverteilung annehmen kann. Durch Bohrungen, Nuten, Kerbe, Gewinde findet nicht nur eine Schwächung des Querschnitts statt, sondern es treten noch örtliche Spannungserhöhungen auf, die weit größer als die rechnermäßigen Spannungen sind. Aber nicht nur Schwächungen, sondern auch Verstärkungen der Konstruktionsteile wie z. B. Bunde auf Wellen, Köpfe auf Nieten und Schrauben, bewirken am Querschnittsübergang örtliche Spannungserhöhungen. Einige Beispiele von Spannungslinienkonzentration infolge Kerbwirkung zeigt Abb. 2.

Betrachtet man einen zylindrischen oder prismatischen Probestab, der auf Zug beansprucht ist, so beobachtet man im allgemeinen eine

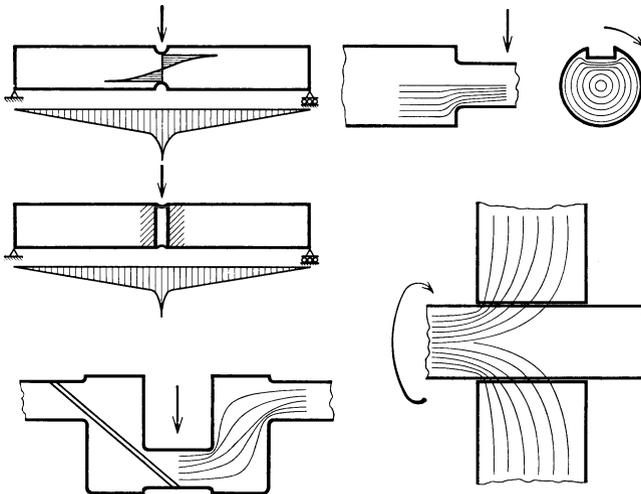


Abb. 2. Beispiele von Spannungslinienkonzentration infolge Kerbwirkung.

gleichmäßige Spannungsverteilung über dem gesamten Querschnitt. Versieht man diesen Probestab mit einer Kerbe, belastet ihn auf Zug und mißt die Spannungen im gekerbten Querschnitt, so beobachtet man, solange der Stab elastisch beansprucht ist, im Kerbgrunde Spannungserhöhung. Abb. 3 zeigt die Spannungsverteilung in gekerbten Flachstäben. Die Spannungserhöhung ist um so größer, je schärfer und tiefer der Kerb ist. Die Kerbe bewirkt, daß der seitlich der Kerbe bei α befindliche Werkstoff nicht mitbeansprucht wird und sich infolgedessen auch nicht verformen kann. Dadurch wirkt die Kerbe versteifend auf den gekerbten Querschnitt. Durch diese Versteifung treten außer den Zugspannungen parallel zur Stabachse noch Normalspannungen senkrecht zur Stabachse auf, die im Kerbgrunde die örtliche Spannungserhöhung bewirken.

Beansprucht man einen gekerbten Stab über die Elastizitätsgrenze hinaus, so tritt auch eine Behinderung der plastischen Formänderungen auf. Im Kerbgrunde treten zwar infolge der Spannungserhöhung bereits örtlich Verformungen auf, ehe die auf den Stabquerschnitt berechnete

mittlere Spannung etwa der Streckgrenze des glatten Stabes entspricht. Doch wird das Fließen nach der Stabmitte zu durch die Kerbe verzögert. Der Verformungswiderstand wird also erhöht.

Abb. 4 zeigt die Spannungs-Dehnungsschaubilder von verschiedenen gekerbten Stäben. Man ersieht daraus, wie mit zunehmender Verengung der Kerbe der Verformungswiderstand erhöht wird. Da man beim gewöhn-

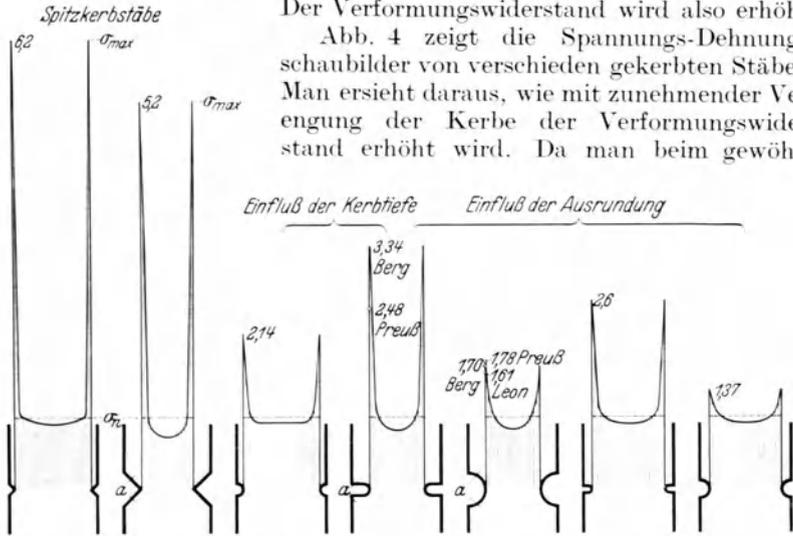


Abb. 3. Spannungsverteilung in gekerbten Zugstäben. Angeschrieben ist die gemessene Formziffer $\alpha_K = \sigma_{max} / \sigma_n$.

lichen Zugversuch am glatten Stab als Zugfestigkeit σ_B den Wert Höchstlast bezeichnet, also die auf den ursprünglichen Stabquerschnitt

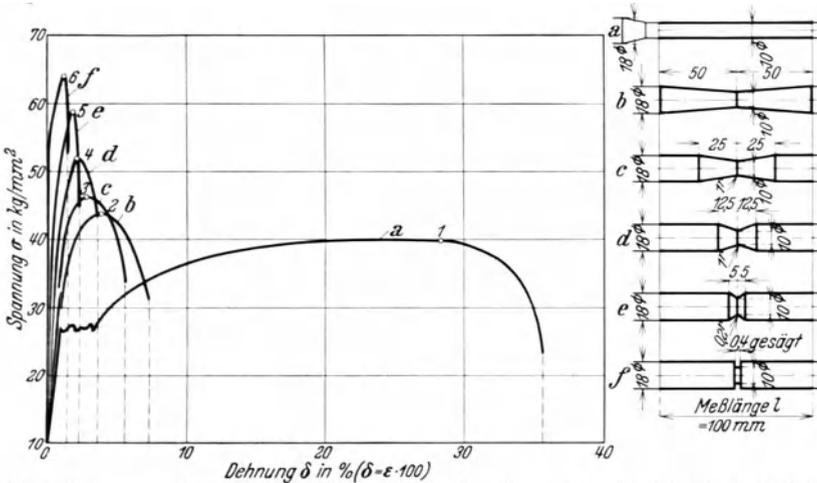


Abb. 4. Spannungs-Dehnungsschaubilder von gekerbten Zugstäben. (Nach Ludw ig · Scheu.)

Probestabdurchmesser bezogene höchste Zugkraft und nicht die Last im Augenblick des Zerreißen, so bezeichnet man damit eigentlich einen Gleitwiderstand. Da der Gleitwiderstand aber infolge Kerbwirkung

erhöht wird, so wird auch die Festigkeit von formänderungsfähigen Stoffen infolge Kerbwirkung erhöht. Bei ruhender Last ist also die Belastungsfähigkeit eines gekerbten formänderungsfähigen Werkstoffes größer.

Hat man es dagegen mit sprödem Werkstoff, wie Gußeisen, Porzellan usw. zu tun, bei dem der Formänderungswiderstand größer ist als die Trennfestigkeit, so bewirkt die Spannungserhöhung im Kerbgrunde eine Erniedrigung der Festigkeit. Es braucht dabei der Bruch noch nicht in dem Augenblick einzutreten, wenn im Kerbgrunde die Spannung größer wird als die Trennfestigkeit des Werkstoffes ist. Infolge der geringeren Beanspruchung in der Probestabmitte hilft dieser Teil noch mit, die Beanspruchungen aufzunehmen.

e) Wechselfestigkeit.

Es ist eine allgemein bekannte Tatsache, daß Konstruktionsteile, die lange Zeit hindurch gehalten haben, plötzlich brechen, obwohl die Beanspruchungen ganz wesentlich geringer waren, als sie beim statischen Versuch für die Bruchfestigkeit ermittelt wurden. Derartige Brüche — Dauerbrüche oder Ermüdungsbrüche genannt — treten bei wechselnden Beanspruchungen auf. Der Bruch erfolgt also nicht nach einmaliger hoher Belastung, er kündigt

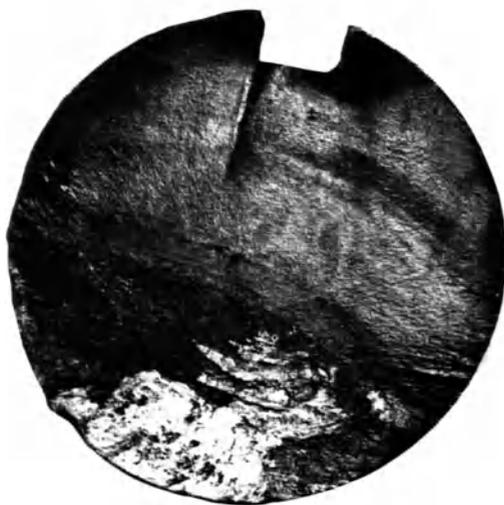


Abb. 5. Dauerbruch.

sich auch nicht durch Formänderungen wie Dehnung oder Einschnürung an, sondern er erfolgt plötzlich nach vielen tausenden, oder auch nach einigen Millionen Lastwechseln. Der aufmerksame Beobachter würde feststellen, daß sich ein feiner Haarriß bildet, der immer tiefer in das Material hineingeht, bis schließlich der Materialquerschnitt so geschwächt ist, daß er auf einmal bricht. Dem Bruchverlauf entsprechend haben diese Dauerbrüche ein typisches Aussehen. Abb. 5 zeigt einen solchen Dauerbruch. Die Bruchfläche zeigt zwei voneinander vollkommen verschiedene Teile. Der eine Teil, in dem der Anriß auftrat, ist während des Betriebes oft glatt geschleift. Meist erkennt man deutlich Linien, die anzeigen, wie der Anriß allmählich fortgeschritten ist. Im Gegensatz hierzu ist der andere Teil des Bruches, den man als Restbruchquerschnitt bezeichnet, kristallinisch. Er bildete zuletzt noch den Zusammenhang des Materials bis der Konstruktionsteil vollständig zerbrach.

Für das Entstehen des Dauerbruches ist es kennzeichnend, daß er immer infolge Kerbwirkung an Nuten, Bohrungen, Querschnittsübergängen, Einspannungen auftritt. Auch geringe Materialverletzungen wie Schleifrisse oder Schlackeneinschlüsse fördern das Auftreten des Dauerbruches. Wie bereits auf S. 457 gesagt wurde, tritt an Kerben bei Beanspruchung eine wesentliche Spannungserhöhung auf. Während bei ruhender Beanspruchung die Kerbe bei zähem Material verfestigend wirkt, tritt bei Wechselbeanspruchung das Gegenteil ein. Infolge der mit jeder neuen Beanspruchung auftretenden Spannungsspitze und damit örtlichen Überlastung des Werkstoffes ermüdet dieser. Es erfolgt eine allmähliche Zermürbung des Werkstoffes an der Kerbe. Es bildet sich ein anfänglich sehr feiner Haarriß, der sich bei weiteren Beanspruchungen immer schneller in den Werkstoff hinein fortsetzt, bis schließlich der Konstruktionsteil infolge der starken Schwächung plötzlich zu Bruch

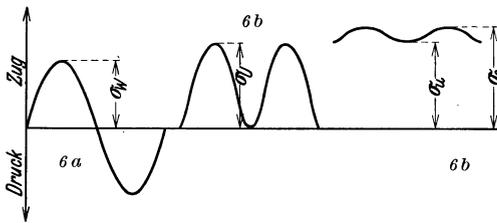


Abb. 6. Verschiedene Arten der Dauerbeanspruchung.

geht. Die Dauerfestigkeit eines Werkstoffes ist am geringsten, wenn die Wechselbeanspruchung zwischen einem gleich großen positiven und negativen Wert schwankt, also etwa zwischen Zug und Druck, oder bei umlaufender Biegung (Abb. 6a). Als Ursprungsfestigkeit be-

zeichnen wir Wechselbeanspruchungen zwischen 0 und einem Höchstwert (Abb. 6b). Der Grenzfall der Dauerfestigkeit ist die Dauerstandfestigkeit, die ruhende Last, die der Werkstoff dauernd ertragen kann, ohne sich zu verformen oder zu brechen. Das Verhältnis der reinen Wechselfestigkeit zur Ursprungsfestigkeit und Dauerstandfestigkeit ist abhängig vom Werkstoff, von der Kerbwirkung (Nuten, Bohrungen usw.) des Konstruktionsteiles und der Oberflächenbeschaffenheit. Bei polierter Oberfläche ist die Wechselfestigkeit wesentlich höher als bei geschliffenen oder roh gedrehten Teilen. Auch Korrosion wirkt stark mindernd auf die Dauerfestigkeit. Wie stark diese Einflüsse sind, geht daraus hervor, daß bei poliertem Stahl sich Dauerstandfestigkeit: Ursprungsfestigkeit: Zug-Druckwechselbeanspruchung etwa wie 1,5:1,2:1 verhalten. Dieses Verhältnis kann sich durch Kerbwirkung und Oberflächenverletzungen je nach der Stahlqualität auf 5:2:1, ja 12:4:1 verändern. Je zäher ein Stahl ist, um so niedriger sind diese Verhältnis-zahlen. Daraus geht hervor, daß die Wechselbeanspruchung bei Kerbwirkung die Dauerhaltbarkeit der Konstruktionsteile bedeutend herabsetzt. Allgemein kann gesagt werden, daß die bisherige Konstruktionslehre die Bruchgefahr infolge mangelnder Berücksichtigung der Kerbwirkung bei statischer Belastung eher überschätzt, bei rein schwingender Beanspruchung eher unterschätzt hat.

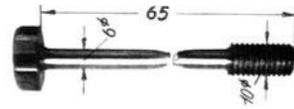
f) Stoßfestigkeit.

Die gefährlichste mechanische Beanspruchung aller Werkstoffe ist ein Stoß. Man bemüht sich, alle Apparate und Maschinen so zu bauen,

daß Stöße möglichst nicht auftreten und versucht, die Stöße, soweit unvermeidlich, zu dämpfen. Trotzdem treten Stoßbeanspruchungen sehr häufig infolge Unregelmäßigkeiten im Betriebe auf. Die besondere Gefahr des Stoßes beruht darin, daß die Stoßenergie in elastische Formänderungen umgesetzt wird. Konstruktionsteile, die Stößen ausgesetzt werden, müssen daher eine große Dehnlänge besitzen. Kerbwirkung und damit Spannungslinienkonzentration sind zu vermeiden, damit sich ein möglichst großes Werkstoffvolumen an der Arbeitsaufnahme beteiligen kann.

Während bei statischer Beanspruchung der Bruch an der schwächsten Stelle erfolgt, tritt er bei wechselnder und Dauerstoßbeanspruchung an der Stelle mit der größten Spannungslinienkonzentration ein. Abb. 7 gibt hierfür ein Beispiel. Statisch erfolgt der Bruch im Schaft, dynamisch im Gewinde beim Übergang in die Mutter, der Stelle größter Spannungslinienkonzentration. Bemerkenswert ist weiterhin, daß die Schraube mit schwachem Schaft wegen ihres besseren elastischen Formänderungsvermögens eine größere Schlagarbeit dauernd ausgehalten hat.

Bruch beim statischen
Zerreißversuch
im Schaft $\sigma_B = 55 \text{ kg/mm}^2$



Dauerschlagversuch
Dauerbruch im Gewinde
Dauerschlagarbeit 7,5 kgcm
dauernd ausgehalten



Dauerschlagarbeit 2 kgcm
dauernd ausgehalten

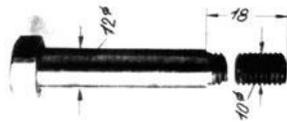


Abb. 7. Bruchlage beim statischen Zerreißversuch und beim Dauerschlag-Zugversuch von Schrauben.

Für Konstruktionsteile, welche betriebsmäßig Stößen ausgesetzt sind, oder welche infolge möglicher Betriebsunfälle plötzlich starken Beanspruchungen ausgesetzt werden können, müssen besonders zähe Werkstoffe ausgewählt werden, die ein sehr hohes plastisches Formänderungsvermögen besitzen, um bei Überbeanspruchungen möglichst große Arbeitsenergie aufzunehmen, weil damit in vielen Fällen schwere Unfälle verhütet werden können.

g) Verschleißfestigkeit.

Umfangreiche Zerstörungen muß man durch Verschleiß bei vielen technischen Anlagen in Kauf nehmen. Teilweise sind sie rein mechanischer Natur (Erosion), vielfach wirken wohl auch chemische und mechanische Vorgänge (Reiboxydation) zusammen. Hierbei verliert der Werkstoff oft durch chemische Angriffe an Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischem Verschleiß.

Verschleiß tritt auf bei Konstruktionsteilen, bei denen infolge gleitender oder rollender Reibung Kräfte übertragen werden. Durch geeignete

Schmiermittel kann in manchen Fällen der Verschleiß in sehr engen Grenzen gehalten werden. Von großer Bedeutung ist der Verschleiß bei solchen Konstruktionsteilen, die zusammenpressen, zerkleinern, mischen oder fördern. Erhebliche Abnutzung erleiden insbesondere auch Werkstoffe, die zur Fortleitung von harten Stoffen oder von Gasen und Flüssigkeiten dienen, welche durch harte Körper verunreinigt sind. Abb. 8 zeigt den Verschleiß einer Platte aus einem Ventilator, der durch mit Staub angereicherter Luft zerstört wurde.

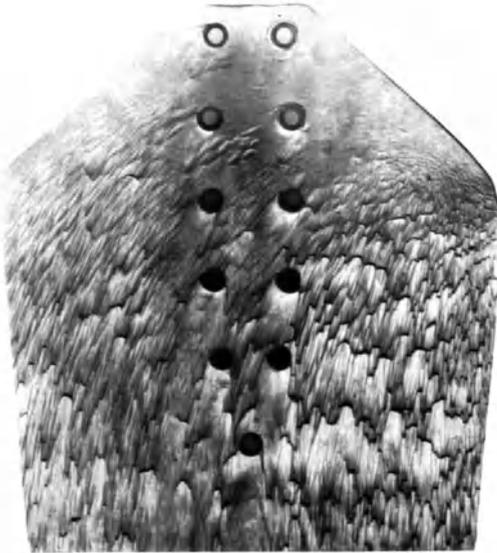


Abb. 8. Verschleiß einer Platte aus einem Ventilator durch Staub (Erosion).

Verschleiß und Bearbeitungsfähigkeit sind in erster Linie von der Festigkeit und Härte des Werkstoffes abhängig. Mit zunehmender Härte nehmen sie ab. Bei Werkstoffen gleicher Härte ist der zähere Werkstoff der verschleißfestere. Außer Härte und Festigkeit ist bei dehnbaren Werkstoffen auch die Reißfestigkeit von Einfluß (s. S. 455, Abb. 1, Punkt R).

2. Chemische Einflüsse. — Korrosion.

Die größten Schwierigkeiten bereitet im chemischen Apparatebau die Zerstörung der Werkstoffe durch chemischen Angriff. Besonders der wichtigste Werkstoff, der Stahl, ist trotz seiner überragend günstigen Festigkeitseigenschaften, seiner leichten Formgebung und Bearbeitbarkeit im Apparatebau oft nicht verwendbar, da er durch viele chemische Stoffe überaus schnell zerstört wird. Bei manchen Nichteisenmetallen ist die Beständigkeit gegen chemischen Angriff wesentlich günstiger. Gegen Salzsäure sind alle billigeren metallischen Werkstoffe nicht genügend korrosionsfest. Daher verwendet man im chemischen Apparatebau in weitem Umfange auch nichtmetallische Werkstoffe wie Steinzeug, Porzellan, Glas, Gummi trotz ihrer geringen Festigkeitseigenschaften.

Unter Korrosion versteht man die Veränderung eines Körpers, die durch unbeabsichtigten chemischen oder elektrochemischen Angriff hervorgerufen wird, der von der Oberfläche ausgeht¹.

¹ Fassung des Korrosionsbegriffes des „Reichsausschusses für Metallschutz“, Mitteilung des Reichsausschusses für Metallschutz, Korrosion u. Metallschutz, H. 2, S. 212.

Die Korrosion kann rein chemischer Natur sein, so namentlich bei den nichtmetallischen Körpern, oft ist sie bei metallischen Werkstoffen



Abb. 9. Gleichmäßige Korrosion eines Stahlrohres durch Bodenwässer.

durch elektrochemische Vorgänge bedingt. Man unterscheidet bei der Korrosion auch je nach dem Umfang des Angriffs zwischen allgemeiner

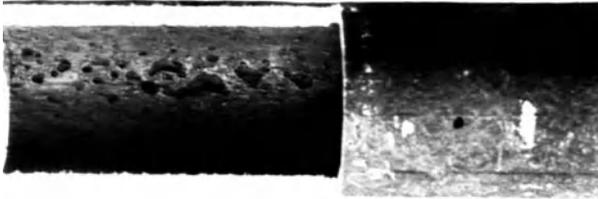


Abb. 10. Örtliche Korrosion (Pittings) an einem Stahlrohr.

und örtlicher Korrosion. Letztere bildet gerade für Konstruktionsteile besondere Gefahren, da durch sie meist eine unerwartete und rasche Zerstörung erfolgt. In Abb. 9 ist die gleichmäßige Korrosion eines Stahlrohres wiedergegeben. Abb. 10 zeigt ein nahtloses Stahlrohr, das durch Kohlensäure- und sauerstoffhaltiges Wasser örtlich punktförmig zerfressen wurde.

Die Anfrassungen sind abhängig von der Art und Konzentration des angreifenden chemischen Stoffes. Mitunter bewirkt eine mittlere Konzentration einen stärkeren Angriff als geringere sowie höhere Konzentration. Als Beispiel ist in Abb. 11 der Angriff von Salpetersäure auf Reinaluminium¹ wiedergegeben. Bei etwa 30% iger Salpetersäure ist das Lösungsvermögen am größten. Mit stärkerer Konzentration erfolgt eine Passivierung der Oberfläche, wodurch die Löslichkeit an der Oberfläche verringert wird. Höchste

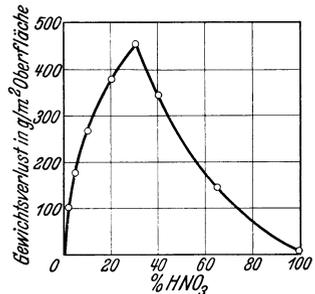


Abb. 11. Gewichtsabnahme von walzhartem 99,3% igem Reinaluminium in Salpetersäure verschiedener Konzentration nach 4wöchentlicher Versuchsdauer.

¹ Versuche von Boßhard, Aluminiumindustrie A.G., Neuhausen. Haus-Ztschr. der V.A.W. und der Erftwerke A.G.; Aluminium 1931, Heft 9/11, 329.

Beständigkeit eines Werkstoffes gegen eine bestimmte Säure gibt keinen Anhaltspunkt über sein Verhalten gegen eine andere Säure oder gegen alkalische Flüssigkeiten.

Von wesentlichem Einfluß auf die Korrosionsbeständigkeit gegen chemische Angriffe ist die Oberflächengröße. Die Oberfläche muß möglichst klein gehalten werden. Kanten und Ecken sind besonders dem Angriff ausgesetzt und müssen vermieden werden. Wichtiger als die geometrischen Abmessungen ist die wahre Oberflächengröße, die vom Oberflächenzustand abhängig ist. Eine sorgfältig polierte Oberfläche hat immer noch Erhöhungen und Vertiefungen und bietet dem chemischen Angriff eine etwa 3—4mal größere Fläche dar, als man geometrisch mißt. Die Oberfläche einer geschliffenen Stahlplatte ist etwa 10mal, die einer gehobelten Stahlplatte vielhundertfach größer als ihre geometrische Fläche. Sorgfältige Oberflächenbehandlung ist daher für die Korrosionsverhütung von großer Bedeutung.

Von den metallischen Werkstoffen verhalten sich namentlich solche mit homogenem Mischkristallgefüge günstig gegen Korrosion. Bei Gefügebestandteilen mit verschiedenem Potential (z. B. α und β Mischkristalle im Messing) wird die Korrosionsneigung bedeutend verstärkt.

Ferner sind innere Spannungen und Kaltverformungen von Einfluß auf den Korrosionsvorgang. Innere Spannungen können für Apparate von großer Gefahr sein. Durch Oberflächenanfressungen kann das Wechselspiel der Spannungen gestört werden, wodurch Rißbildung erfolgt (s. S. 521, Abb. 53).

Auch die mechanischen Beanspruchungen beeinflussen die Korrosion. Korrosion bewirkt eine Minderung der Festigkeitseigenschaften. Abgesehen von den Fällen, wo durch Anfressungen eine Querschnittsverminderung erfolgt, wird namentlich bei Wechselbeanspruchungen unter Korrosionseinwirkung die Dauerfestigkeit bedeutend herabgesetzt. Die gemeinsame Zerstörung der Werkstoffe durch mechanische Wechselbeanspruchung und Korrosion bezeichnet man als Korrosionsermüdung. Als Beispiel diene die Korrosionsermüdung von weichem Flußstahl. Dieser hatte eine Dauerbiegefestigkeit in poliertem Zustand von 26 kg/mm², der gekerbte Stab von 18 kg/mm². Bei Einwirkung von Leitungswasser, das auf die umlaufende Stahlwelle auftröpfte, sank die Dauerfestigkeit im polierten Zustand auf 10 kg/mm².

Eine andere Korrosionserscheinung ist die interkristalline Brüchigkeit. Sie äußert sich in Rissen zwischen den Korngrenzen der Metalle. Während bei der Korrosionsermüdung die Risse vornehmlich quer durch die Krystalle (transkristallin) gehen, verlaufen sie bei interkristalliner Brüchigkeit vornehmlich in den Korngrenzen. Es bildet sich meistens auch nicht nur ein einziger Riß, sondern die Risse der interkristallinen Korrosion verästeln sich vielfach, dabei hauptsächlich den Korngrenzen nachlaufend. Abb. 12 zeigt den Rißverlauf bei Korrosionsermüdung mit transkristallinem Verlauf. Abb. 13 interkristalline Korrosion eines Flußstahlrohres aus einem Laugenverdampfer. Die Ausbildung der interkristallinen Korrosion tritt nach bisherigen

Erfahrungen bei schwacher Korrosionswirkung auf, wobei nur die Kornfugen angegriffen werden, während die Krystalle selbst nicht korrodiert werden. Es ist anzunehmen, daß gegenüber der Lösung in den Kornfugen ein unedleres Potential vorliegt als bei dem Krystall selbst. Auch können die Krystallflächen durch Salze in der korrodierenden Lösung passiviert werden, während die Korngrenzen angegriffen werden. In den meisten Fällen scheint für das Auftreten der interkrystallinen Korrosion die gleichzeitige Wirkung von Zugspannungen erforderlich zu sein.

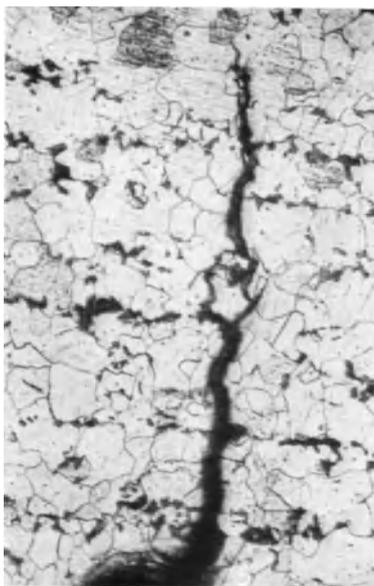


Abb. 12. Transkrystalliner Korrosionsermüdungsriß in Kesselblech. Angriff durch 30 % ige Natronlauge bei 275°C und 87,5 atü.

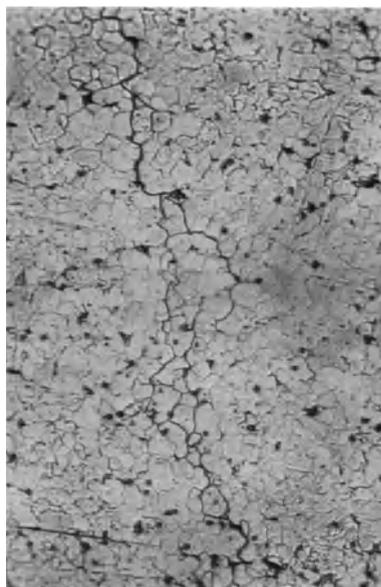


Abb. 13. Interkrystalline Korrosion in einem Laugenverdampferrohr durch 40 % ige Natronlauge.

Interkrystalline Korrosion tritt auf bei Stahl durch gleichzeitige Einwirkung schwacher Laugen und Zugbeanspruchungen; ferner wurde sie beobachtet bei Zinn (mit geringen Beimengungen von Aluminium) durch atmosphärische Einflüsse, bei Zinn (mit Beimengungen von Zink) durch Dampf, bei Blei durch basisches Bleiacetat, bei Nickel durch heiße schweflige Gase, bei Aluminium durch Chloride, bei Duralumin durch atmosphärische Einflüsse und gleichzeitige Wechselbeanspruchungen. Die interkrystalline Korrosion bedarf noch weitgehender Erforschung, um die fördernden und verhindernden Einflüsse genauer erkennen zu können.

Der Zerstörung der Metalle durch chemische Angriffe kann man durch Schutzmaßnahmen entgegenarbeiten.

Der beste Korrosionsschutz ist die Auswahl eines geeigneten Werkstoffes. Für Stahl sind hauptsächlich Chrom, Kobalt, Nickel und

Wolfram die Legierungselemente, welche die chemische Beständigkeit am meisten verbessern. In der Regel müssen die Legierungszusätze so bemessen werden, daß homogene Mischkristalle erhalten werden.

Der eigentliche Korrosionsschutz erfolgt aus wirtschaftlichen Gründen durch Oberflächenbehandlung. Hierbei kommen metallische Überzüge von Blei, Chrom, Cadmium, Kupfer, Nickel, Zinn und Zink in Betracht, ferner nichtmetallische Überzüge durch Emaillieren, Gummieren und Anstriche. Weitere Verfahren beruhen auf einer chemischen Veränderung der Oberfläche wie bei Eisen durch Alitieren, Brünieren, Coslettieren, Parkerisieren und Nitrieren, auf die später (s. S. 545) eingegangen wird.

Korrosionsschutz kann in manchen Fällen dadurch erzielt werden, daß die Stoffe von ihren aggressiven Bestandteilen befreit werden. Erwähnt sei die Entgasung des Kesselspeisewassers, wobei aggressive Kohlensäure und Sauerstoff entfernt werden (vgl. Bd. II, S. 284). Elektrolytische Schutzverfahren müssen angewandt werden, wo verschiedene in der elektrolytischen Spannungsreihe weit voneinanderstehende Werkstoffe, z. B. Stahl und Kupfer durch eine Flüssigkeit in leitender Verbindung stehen, so daß eine Potentialdifferenz entsteht. Hier kann durch Einbringen eines Hilfsmetalle, das zum Sauerstoff eine größere chemische Verwandtschaft hat, die Zerstörung auf dieses abgelenkt werden.

3. Werkstofftechnische Gesichtspunkte für die Konstruktion.

Für eine betriebssichere und wirtschaftliche Bemessung der Konstruktionsteile ist es erforderlich, daß man die Werkstoffeigenschaften genau studiert und die besonderen Eigenschaften jedes Werkstoffes bei der Konstruktion berücksichtigt. Die schwierigen Betriebsbedingungen, denen die Werkstoffe gerade im chemischen Apparatebau ausgesetzt sind, begrenzen oft sehr stark die Auswahl unter den vielartigen Werkstoffen. Andererseits verlangt der Werkstoff eine Anpassung der Konstruktion an seine Eigenschaften.

Es kann hier nur auf einige wenige Gesichtspunkte hingewiesen werden. Gußstücke verlangen besonders sorgfältige Formgebung. Beim Erstarren des in die Form gegossenen flüssigen Metalles erfolgt Schwindung. Es muß dafür gesorgt werden, daß die Abkühlung möglichst gleichmäßig erfolgt. Anderenfalls entstehen innere Spannungen, welche die Festigkeit des Gußstückes erheblich herabsetzen. Es muß darauf geachtet werden, daß die Querschnitte in allen Teilen möglichst gleichmäßig sind. Bei notwendigen Querschnittsunterschieden müssen die Übergänge sehr allmählich verlaufen.

Hohe Sorgfalt auf Formgebung muß bei den spröden keramischen Massen wie Steinzeug und Porzellan beachtet werden. Je kleiner, rundlicher und dünnwandiger ein keramisches Gefäß ist, um so größeren Beanspruchungen, namentlich gegen Temperaturwechsel, kann es ausgesetzt werden. Eckige Formen und ungleichmäßige Wandstärken sind wegen der Spannungslinienkonzentration zu vermeiden (s. S. 457).

Bei rein mechanischen Beanspruchungen sind immer Stahl oder Gußeisen die gegebenen Werkstoffe. Die Art und Größe der Beanspruchung entscheiden, welche der zahlreichen Sorten anzuwenden sind. Konstruktionsteile schwieriger Formgebung werden bei höheren Beanspruchungen aus Stahlguß und bei mäßigen Beanspruchungen aus Gußeisen gefertigt. Bei Temperaturen bis 300° C eignet sich vorzüglich Gußeisen, oberhalb 300° C kommt nur noch Stahlguß in Frage. Bei Wechselbeanspruchungen und gleichzeitiger Kerbwirkung ist die Verwendung hochzäher Stähle erforderlich. Man verwendet Stähle, die in der Lage sind, gefährliche Spannungsspitzen abzubauen, also zähe Stähle von hohem Formänderungsvermögen. Ist die Vorspannung des Konstruktionsteiles hoch und ist ihm eine zusätzliche Wechselbeanspruchung überlagert, so wird man zweckmäßig legierte und vergütete Stähle mit hoher Streckgrenze auswählen. Treten neben mechanischen Beanspruchungen noch chemische Einflüsse und erhöhte Temperaturen hinzu, so bedarf es sorgfältigen Abwägens, welcher Werkstoff für einen Konstruktionsteil gewählt werden soll. Die Konstrukteure lassen sich vielfach zu sehr von den Rücksichten auf die Festigkeitseigenschaften und Bearbeitbarkeit des Materials leiten und verwenden in den Apparaten nebeneinander Stahl, Aluminium, Bronze, Messing usw. (s. elektrolytischen Angriff, S. 466). Bezüglich der Festigkeit werden sehr hohe Sicherheitszahlen in Rechnung gesetzt. Doch wird oft vergessen, auf korrodierende Einflüsse Rücksicht zu nehmen, wenn Apparate für Wasser, Salzlösungen, Laugen usw. konstruiert werden.

Bei chemischen Beanspruchungen kommen Kohlenstoffstähle oft nicht in Betracht, sondern hochlegierte Stähle oder Nichteisenmetalle. Bei starken chemischen Angriffen, aber geringen mechanischen Beanspruchungen empfiehlt sich meist die Verwendung keramischer Massen wie Quarzglas, Porzellan oder Steinzeug. Es muß jedoch auf völlige Stoßfreiheit der Konstruktion geachtet werden, auch dürfen im Betriebe möglichst nur Druckbeanspruchungen und nur geringe Zugbeanspruchungen auftreten. Dies kann z. B. dadurch erreicht werden, daß auf Zug beanspruchte nichtmetallische Konstruktionsteile eine Druckvorspannung durch eine Vorspannungspanzerung erhalten. Oft sind Stahl- oder Gußkonstruktionen mit keramischen Auskleidungen oder Gummibelag zweckmäßig.

Bei der Berührung verschiedener Metalle können sich galvanische Ketten von mehreren Volt Spannung ausbilden, die eine rasche Zerstörung der mit hohen Festigkeits-Sicherheitszahlen berechneten Konstruktion zur Folge haben. Wenn schon verschiedene Baustoffe in einem Apparat verwandt werden müssen, so muß wenigstens darauf hin gearbeitet werden, innerhalb der Berührungsflächen von Metall und Flüssigkeit einen einheitlichen Überzug aus einem Metall herzustellen.

Für eine sichere und wirtschaftliche Konstruktion sind stets alle Gesichtspunkte zu überlegen, welche die Haltbarkeit beeinflussen. Es ist unzweckmäßig, mit allgemeinen Sicherheitszahlen zu arbeiten, sondern es ist richtiger für alle Einflüsse Minderungszahlen einzusetzen. Dazu ist es notwendig, daß sich der Konstrukteur ein Bild vom Spannungsverlauf

im Werkstück macht, das die Gefahrenpunkte der Konstruktion erkennen läßt. Es ist eine der wichtigsten Aufgaben der Werkstoffforschung, daß dem Konstrukteur zuverlässige Kennziffern zur Hand gegeben werden, die gestatten, die Einflüsse von Oberflächenbearbeitung, Kerbwirkung, chemischen Korrosionen auf die Dauerhaltbarkeit rechnermäßig zu berücksichtigen.

Mitunter ist es wirtschaftlich, einen Konstruktionsteil aus billigerem Werkstoff herzustellen und so zu bemessen, daß er nur über einen vorausbestimmbaren Zeitraum hält und dann ausgewechselt wird.

D. Die Prüfung der Werkstoffe auf ihre Eignung.

1. Der Zerreißversuch.

Aus dem zu untersuchenden Werkstück werden Probestäbe von meist kreisförmigem oder rechteckigem Querschnitt herausgearbeitet. Die Erfahrung hat gelehrt, daß bei Metallen die Größe des Querschnitts keinen wesentlichen Einfluß auf die Versuchsergebnisse hat, sofern sich nicht die Werkstoffeigenschaften selbst mit verschiedenen Dicken ändern. Die Abmessungen der Probestäbe werden so gewählt, daß bei Vierkantstäben das Seitenverhältnis nicht größer als 1 : 4 ist. Für die Dehnungsmessung sind durch das Normblatt DIN 1605 bestimmte Melängen vorgeschrieben, die in Tabelle 1 wiedergegeben sind.

Tabelle 1.

Zugversuch. Abmessungen der Probestäbe.

a) Probestabformen und Melängen nach DIN 1605¹.

Der Probestabquerschnitt kann kreisförmig, quadratisch, rechteckig (im allgemeinen mit einem Seitenverhältnis nicht größer als 4 : 1) oder in Ausnahmefällen auch anderweitig geformt sein; kleine Profilstäbe, kleine Rohre usw. können als Ganzes zerrissen werden.

	Zu unterscheiden sind folgende Probestabformen	Abmessungen in mm			Querschnitt F_0 mm ²	Zeichen für die Bruchdehnung
		Versuchslänge mindest.	Meßlänge l	Durchmesser ² d		
1	Langer Normalstab	$l + d$	$10d = 200$	20	314	δ_{10}
2	Kurzer Normalstab		$5d = 100$			
3	Langer Proportionalstab		$10d = 11,3 \sqrt{F_0}$	beliebig	belieb.	δ_{10}
4	Kurzer Proportionalstab		$5d = 5,65 \sqrt{F_0}$			
5	Langstab		200	beliebig	belieb.	δ_l
6	Kurzstab		100			

¹ Wiedergabe erfolgt mit Genehmigung des Deutschen Normenausschusses. Verbindlich ist die jeweils neueste Ausgabe des Normblattes im DIN-Format A 4, das durch den Beuth-Verlag G. m. b. H., Berlin S 14, Dresdener Straße 97 zu beziehen ist.

² Bei anderen als kreisförmigen Querschnitten gilt der Durchmesser des dem Stabquerschnitt flächengleichen Kreises.

b) Zweckmäßige Abmessungen von Probestäben.

Probestäbe nach Abb. 14	Durchmesser	Querschnitt	Kopf			Meßlänge $l_0 = 10d$			Meßlänge $l_0 = 5d$			
	d mm	F_0 mm ²	D mm	d_1 mm	a mm	l_k mm	l_v mm	L mm	l_k^* mm	l_v mm	L mm	
a	5	19,6	10	7	7	15	60	104	6	30	56	
	10	78,5	18	13	13	30	110	196	15	54	100	
	12	113	20	16	16	34	135	235	17	64	130	
	15	176,7	28	20	20	42	166	300	20	80	160	
	18	254,4	22	23	22	50	200	344	25	100	194	
	20	314,1	35	25	25	70	220	410	30	110	220	
	25	490,8	45	33	30	80	270	490	35	135	265	
d	5	19,6	Gewinde $\frac{3}{8}''$		7	15	8	60	106	4	30	68
	10	78,5	$\frac{3}{8}''$		16	20	20	110	190	15	55	125
	15	176,7	$1\frac{1}{4}''$		21	25	28	165	271	20	80	170
	20	314,1	$1\frac{1}{4}''$		26	30	35	220	350	25	110	220

Für zylindrische Probestäbe ohne Kopf beträgt die gesamte Länge L eines Stabes vom Durchmesser d bei einer Meßlänge:

$$\text{Abb. c: } \begin{matrix} l_0 = 10d & L = 20 \text{ bis } 22d \\ l_0 = 5d & L = 15 \text{ bis } 16d \end{matrix}$$

Die Probestabform nach Abb. 14c eignet sich nur für Stahl bis etwa 45 kg/mm² Festigkeit und 30 mm Durchmesser.

Die Form der Einspannkpfe richtet sich nach den Einspannmglichkeiten der Zerreimaschinen. Es ist darauf zu achten, daß vom Einspannkopf ein allmählicher Übergang auf den Querschnitt der Meßlänge erfolgt. Die Einspannkpfe werden bei Feinmessungen nach Abb. 14a, bei Blechen nach Abb. 14b hergestellt. Probestäbe nach Abb. 14b und c haben den Vorzug des schnelleren und bequemeren Einspannens mittels Beißkeilen. Sollen Zugversuche bei höheren Temperaturen durchgeführt werden, so benutzt man meist Probestäbe mit Gewinde (Abb. 14d), die in einen elektrischen Ofen eingebaut werden können.

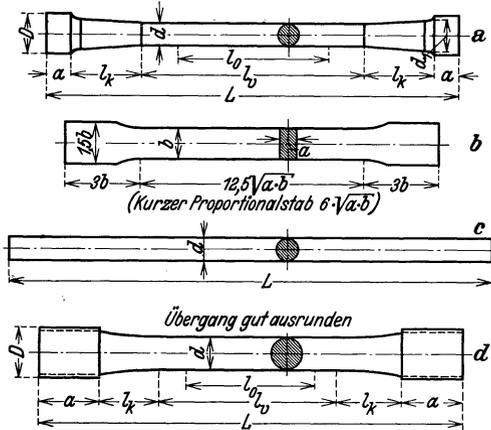


Abb. 14. Probestabformen für Zerreißversuche von metallischen Werkstoffen.

Für die Beurteilung der Güte der Werkstoffe werden bei Flußstahl, Stahlguß und Nichteisenmetallen folgende Werte angegeben (vgl. auch DIN 1602, 1603, 1605).

* Die Konuslnge kann, falls notwendig, noch mehr verkürzt werden.

$$\text{Streckgrenze } \sigma_s = \frac{P_s}{F_0} = \frac{\text{Last an der Streckgrenze}}{\text{ursprünglicher Stabquerschnitt}} \text{ in kg/mm}^2$$

$$\text{Bruchfestigkeit } \sigma_B = \frac{P_B}{F_0} = \frac{\text{Höchstlast}}{\text{ursprünglicher Stabquerschnitt}} \text{ in kg/mm}^2$$

$$\text{Bruchdehnung } \delta = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 = \frac{\text{Längenzunahme} \cdot 100}{\text{Meßlänge}} \text{ in } \%,$$

wobei δ_5 die auf den kurzen Proportionalstab, δ_{10} die auf den langen Proportionalstab bezogene Dehnung angibt.

$$\begin{aligned} \text{Brucheinschnürung } \psi &= \frac{F_0 - F'}{F_0} \cdot 100 = \\ &= \frac{\text{Verringerung der Bruchquerschnittsfläche}}{\text{ursprünglicher Stabquerschnitt}} \cdot 100 \text{ in } \%. \end{aligned}$$

Selten wird noch die Elastizitätsgrenze bestimmt. Als Elastizitätsgrenze wird praktisch die Spannung bestimmt, bei der die bleibenden Formänderungen gerade noch meßbar

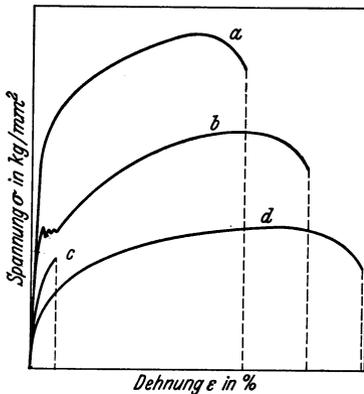


Abb. 15. Zerreißdiagramm verschiedener Werkstoffe. *a* Mittelharter Flußstahl ($\sigma_B = 55 \text{ kg/mm}^2$), *b* weicher Flußstahl ($\sigma_B = 38 \text{ kg/mm}^2$), *c* Gußeisen, *d* Kupfer, weich gegläht.

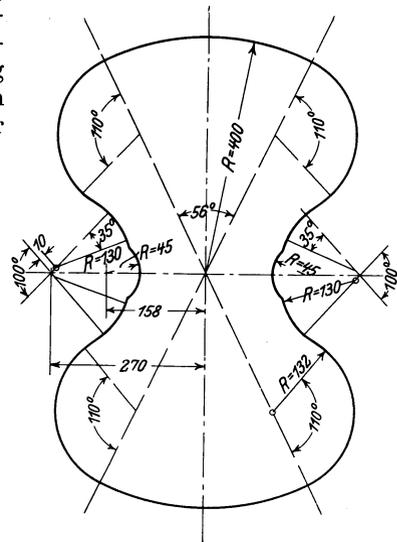


Abb. 16. Zerreißkörper für Zementmörtel und keramische Massen. Bruchquerschnitt 5 cm^2 . [Aus Wawrzyniak: Handbuch für das Materialprüfungswesen.]

sind, im allgemeinen 0,001% bleibende Dehnung (zuweilen auch 0,003 und 0,02%).

Die Streckgrenze wird an dem Knick der Spannungs-Dehnungslinie (s. S. 455, Abb. 1) bestimmt. Härtere Stähle und Nichteisenmetalle zeigen meist keine ausgeprägte Streckgrenze. In Abb. 15 sind Spannungs-Dehnungsdiagramme von weichem Flußstahl mit 0,1% C, mittelhartem Flußstahl mit 0,5% C, Kupfer und Gußeisen wiedergegeben. Der härtere Flußstahl und das Kupfer zeigen, daß größere Formänderungen nicht plötzlich wie bei weichem Flußstahl auftreten, sondern allmählich. In diesem Falle bestimmt man die 0,2% Dehngrenze als die Beanspruchung, bei der die Meßlänge des Probestabes um 0,2% verlängert wird. Gußeisen zeigt, wie alle spröden Werkstoffe überhaupt keine Streckgrenze.

Von vorläufig noch wissenschaftlichem Interesse ist die Reißfestigkeit (wahre Festigkeit)

$$\sigma_R = \frac{\text{Zerreiblast}}{\text{Bruchquerschnittsflche}} \text{ in kg/mm}^2.$$

Für Zerreißversuche an spröden Werkstoffen wie Zement, Beton, Steinzeug, keramische Massen bedient man sich entweder der Achterformen nach Abb. 16 oder der Achter-Rotationskörpern, die sich in ihrem Längsschnitt dem der Achterformen angleichen. Besser sind prismatische oder zylindrische Körper mit Einspannung nach Abb. 17. Diese Körper haben den Vorteil, daß die Spannungsverteilung über den Querschnitt gleichmäßiger ist und die Kerbwirkung durch die Einspannung etwas vermindert wird.

2. Der Druckversuch.

Der Druckversuch, die Umkehrung des Zugversuches, wird hauptsächlich für die Prüfung spröder Werkstoffe angewandt, insbesondere bei natürlichen Steinen, keramischen Massen, Beton, seltener bei Metallen. Die Prüfung erfolgt meist an würfelförmigen Probekörpern. Bei zylindrischen Proben wählt man die Probenhöhe zweckmäßig gleich dem Probendurchmesser. Mit zunehmender Probenhöhe nimmt die Druckfestigkeit ab.

Bei zähen Werkstoffen wie Flußstahl, Kupfer usw. tritt beim Druckversuch überhaupt kein Bruch ein. Als Maß für die Druckfestigkeit wird dann lediglich die Quetsch- oder Fließgrenze bestimmt. Das ist die auf die Querschnittseinheit bezogene Beanspruchung, bei der das Material bleibende Zusammendrückungen zeigt. Als Quetschgrenze legt man in der Regel eine bleibende Zusammendrückung von 0,2% der ursprünglichen Probekrperhhe zugrunde. Zähe Werkstoffe bauchen sich beim Zusammendrücken in der Mitte tonnenförmig auf. Spröde Werkstoffe dagegen brechen in der Regel unter Bildung sog. Druckkegel oder Rutschkegel auseinander. Als Maß für die Druckfestigkeit spröder Körper wird die auf die Querschnittseinheit bezogene Höchstlast angegeben.

3. Der Biegeversuch.

Der Biegeversuch wird ebenfalls nur bei spröden Werkstoffen, namentlich Gußeisen, Steinzeug, ferner vielfach bei Holz angewandt, da bei zähen Werkstoffen kein Bruch erzielt wird. In der Regel wird die möglichst lange stabförmige Probe an beiden Enden auf Rollen frei aufgelagert und in der Mitte belastet. Da hierbei die höchste Beanspruchung nur in der Mitte des Stabes erfolgt und nur an der oberen äußersten Faser die höchste Druckbeanspruchung und an der äußersten unteren

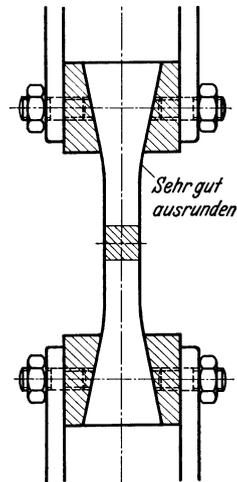


Abb. 17. Probekrperform und Einspannung für Zugversuche an nichtmetallischen spröden Körpern.

Faser die höchste Zugbeanspruchung auftritt, werden etwaige Materialfehler in der Probe nur mit geringer Wahrscheinlichkeit entdeckt.

Für die Prüfung von Gußeisen werden als normale Biegeproben Stäbe von 650 mm Länge und 30 mm Durchmesser mit Gußhaut geprüft. Die Proben werden auf Rollen von 600 mm Abstand aufgelagert und in der Mitte belastet. Als Biegeproben keramischer Massen werden meist Stäbe von 16 mm Durchmesser und 120 mm Länge verwandt. Die Stützweite beträgt 100 mm. Bei Holz ist die Entnahmerichtung wichtig. Die Proben werden dem Stamm so entnommen, daß eine im Radialschnitt liegende Seite Zugseite wird oder so, daß zwei Querschnittsseiten tangential zu den Jahresringen und parallel zur Krafrichtung stehen. Die Auflagerlänge soll mindestens das 8fache der Querschnittshöhe betragen.

4. Schlagproben.

Obwohl schlagartige Beanspruchungen nach Möglichkeit im Betriebe vermieden werden sollen, so lassen sie sich doch nie ganz ausschließen.

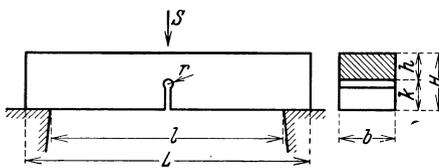


Abb. 18. Kerbschlagprobe für metallische Werkstoffe.

Schlagversuche ergeben ein hervorragendes Maß für die Sprödigkeit des Materials. Man führt bei allen Werkstoffen, insbesondere auch bei den spröden keramischen Massen, Schlagproben aus. Sie werden meist als Biegeproben ausgeführt. Hierzu benutzt man Pendelschlagwerke

nach Charpy. Sie bestehen aus einem pendelnd aufgehängten Hammer, der aus einer bestimmten Höhe herabfällt und den zwischen zwei Auflagern frei aufliegenden Probestab durchschlägt. Aus dem Hammergewicht G , der Fallhöhe h_1 und der Steighöhe h_2 des Pendelhammers wird die verbrauchte Schlagarbeit A bestimmt: $A = G(h_1 - h_2)$. Als Zähigkeitsmaß gibt man die auf die Querschnittsfläche F des Probestabes bezogene Schlagarbeit an

$$a = \frac{A}{F} \text{ in cmkg/cm}^2.$$

Bei keramischen Massen benutzt man meist zylindrische Stäbchen von 16 mm Durchmesser und 120 mm Länge. Die Auflagerentfernung für diese Proben beträgt 100 mm. Die Schlagbiegefestigkeit, d. h. die auf je 1 cm² Querschnitt verbrauchte Schlagarbeit, beträgt bei Schamotte etwa 0,3—1,7 cmkg/cm², bei Steinzeug 1,4—1,9 cmkg/cm², bei Feinsteinzeug bis zu 2,4 cmkg/cm², Gußeisen hat dagegen bei hochwertiger Qualität bis zu 120 cmkg/cm², ist also um das Vielfache zäher. Zäh metallische Werkstoffe wie Stahl, Kupfer lassen sich in der Regel in prismatischen Proben nicht zerschlagen. Die Proben werden daher einseitig angekerbt, wodurch die Probe in ihrer Formänderungsfähigkeit behindert, also versteift wird (s. Abb. 18).

Schlecht vorbehandelte Stähle erweisen sich bei der Kerbschlagprüfung bei Raumtemperatur spröde und zeigen nur geringe Arbeitsaufnahme. Man bezeichnet dies als Kaltsprödigkeit. Je zäher das

Gefüge, bei um so tieferen Temperaturen tritt Kaltsprödigkeit ein. Abb. 19 zeigt die Abhängigkeit der Kerbzähigkeit von der Temperatur bei verschiedenen vorbehandelten Stählen. Der Übergang von der Hochlage der Kerbzähigkeit mit Verformungsbruch zur Tiefelage mit sprödem Bruch erfolgt plötzlich und wird bei überhitztem und gealtertem Stahl ins Gebiet höherer Temperaturen verschoben.

Der besondere Wert des Kerbschlagversuches liegt darin, daß er oft der einzige Versuch ist, um den richtigen Glühzustand des Stahles nach-

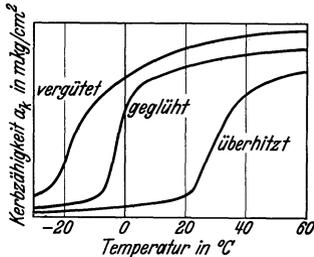


Abb. 19. Abhängigkeit der Kerbzähigkeit von der Versuchstemperatur und der Wärmebehandlung bei Stahl.

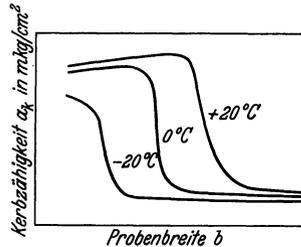


Abb. 20. Einfluß der Probenbreite auf die Kerbzähigkeit von Stahl.

zuweisen. Jeder Verstoß gegen die sachgemäße Erzeugung sowie mechanische und thermische Weiterbehandlung wird durch ihn aufgedeckt.

Der Übergang von der Hochlage zur Tiefelage wird auch durch die Probenform beeinflusst. Mit zunehmender Probenbreite und kleinerer Kerbrundung erfolgt eine größere Versteifung der Probe und somit eine Verschiebung des Überganges von der Hochlage zur Tiefelage der Kerbzähigkeit in den Bereich höherer Temperaturen (s. Abb. 20).

Geometrisch ähnliche Versuchsproben lassen sich nicht ohne weiteres in ihren Ergebnissen vergleichen, wie überhaupt die Versuchsergebnisse bei der Kerbschlagprobe stark abhängig sind von den Versuchsbedingungen: Probenabmessungen, Kerbform, Art und Größe der aufgewandten Schlagenergie und der Versuchstemperatur.

Tabelle 2. Abmessungen der Kerbschlagproben.

	Breite	Höhe	Länge	Auf- lager- entfer- nung	Kerb- tiefe	Kerb- rundung
	<i>b</i> mm	<i>H</i> mm	<i>L</i> mm	<i>l</i> mm	<i>k</i> mm	<i>r</i> mm
Charpy-Probe (große Probe des Internationalen Verbandes der Materialprüfungen)	30	30	160	120	15	2
Deutsche Normenprobe	10	10	55	40	3	1
Zusatzprobe zur Deutschen Normenprobe	10	10	55	40	3	0,1 Spitzkerb 45°
Probeder Vereinigung der Großkesselbesitzer	15	30	160	120	15	2

Die üblichen Abmessungen der Kerbschlagproben sind in Tabelle 2 (s. S. 473) zusammengestellt.

Für die Prüfung der Kesselbleche, insbesondere die Prüfung der Alterungsbeständigkeit (s. S. 488 und 502) ist die Anwendung der Probe der Vereinigung der Großkesselbesitzer sehr zu empfehlen.

5. Härteprüfung.

Unter Härte eines Werkstoffes versteht man den Widerstand, den er dem Eindringen eines anderen Körpers entgegensetzt. Die Härteprüfung erfolgt meist in der Weise, daß man mit einer bestimmten statisch oder dynamisch wirkenden Kraft eine Stahlkugel oder Stahlkegelspitze oder eine Diamantspitze in den zu untersuchenden Werkstoff eindrückt und die Größe des Eindruckes mißt. Man mißt hierbei Verformungen bzw. Verformungswiderstände. Auch beim Zerreißversuch bestimmt man bei zähen Werkstoffen mit der Höchstlast oder Zugfestigkeit in Wirklichkeit höchsten Gleitwiderstand, den der Werkstoff dem endgültigen Auseinandergleiten entgegensetzt; denn nach Erreichen der Höchstlast beginnt sich der Stahl einzuschnüren. So steht auch die durch das Eindruckverfahren gemessene Härtezahl bei den metallischen Werkstoffen in einem bestimmten Verhältnis zur Zugfestigkeit. Die große Bedeutung der Härtebestimmung liegt darin, daß man aus ihr auf die Festigkeit der Werkstoffe schließen kann.

Von den verschiedenen Verfahren haben sich nur die Härteprüfung nach Brinell und nach Rockwell allgemein eingeführt¹.

Das Kugeldruckverfahren nach Brinell (DIN 1605 II) beruht darauf, daß eine gehärtete Stahlkugel in das zu untersuchende Material eingedrückt wird. Aus der Belastung P der Kugel und der Oberfläche der in den Werkstoff eingedrückten Kalotte F_0 wird die Härtezahl $H = \frac{P}{F_0}$ in kg/mm² ermittelt.

Je nach der Dicke der Proben werden die in Tabelle 3 angegebenen Kugeldurchmesser und Belastungen angewandt.

Tabelle 3. Belastung und Kugeldurchmesser für die Brinell-Probe (nach DIN 1605).

Dicke der Probe a mm	Kugeldurchmesser D mm	Belastung P in kg		
		30 D^2 für Gußeisen und Stahl	10 D^2 für hartes Metall, Messing, Bronze u. a.	2,5 D^2 für weichere Metalle
über 6 . . .	10	3000	1000	250
von 6—3 . .	5	750	250	62,5
unter 3 . . .	2,5	187,5	62,5	15,6

¹ Weitere Prüfverfahren siehe László: Werkstoff-Handbuch Stahl-Eisen C 1, herausgeg. vom Verein Deutscher Eisenhüttenleute. — Wawrzyniok: Handbuch für das Materialprüfungswesen. Berlin: Julius Springer.

Aus der Brinell-Härte kann bei Stahl zuverlässig auf die Festigkeit geschlossen werden. Bei Kohlenstoffstählen (30—100 kg/mm²) ist die Zugfestigkeit $\sigma_B = 0,36 H$, bei Chromnickelstählen gilt $\sigma_B = 0,34 H$. Bei Nichteisenmetallen läßt sich aus mehreren Eindrücken mit verschiedener Belastung auf die Festigkeit schließen [Schwarz: Zugfestigkeit und Härte bei Metallen. VDI-Forsch.-Heft 1929, 313]. Bei Gußeisen kann mit einer gewissen Streuung nach Abb. 21 auf die Zugfestigkeit geschlossen werden.

Bei der Härteprüfung nach Rockwell wird in weicheren Stählen und Nichteisenmetallen eine Stahlkugel von 1,59 mm Durchmesser ($\frac{1}{16}$ '' Durchmesser) mit einer Belastung von 100 kg und in härteren Stahl eine Diamantkegelspitze mit einem Öffnungswinkel von 120° mit 150 kg Belastung eingedrückt. Gemessen wird die Eindringtiefe, die an den Prüfgeräten direkt ablesbar ist, und zwar die „B“-Skala für die Eindringtiefe der Kugel und „C“-Skala für den Diamantkegel.

Das Verhältnis von Brinell-Härte zur Rockwell-Härte ist vom Werkstoff abhängig. Abb. 22 gibt die ungefähren Umrechnungszahlen für Stahl wieder.

Eine weitere Härteprüfung erfolgt mit dem Shore-Skeroskop durch Bestimmung der Rückprallhöhe eines Fallhämmerchens, das für die Untersuchung von Stahl eine Diamantspitze, für Nichteisenmetalle eine breitere Aufprallfläche aus Stahl hat. Für glashart gehärteten Stahl beträgt die Rückprallhöhe 100 (= Shore-Härtezahl).

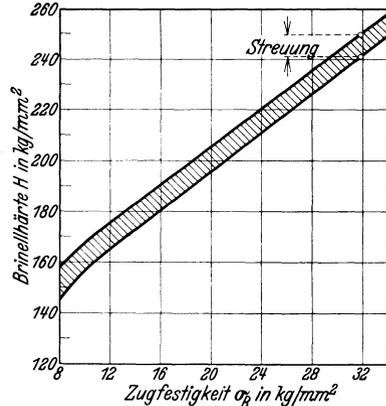


Abb. 21. Abhängigkeit von Brinell-Härte und Zugfestigkeit bei Gußeisen.

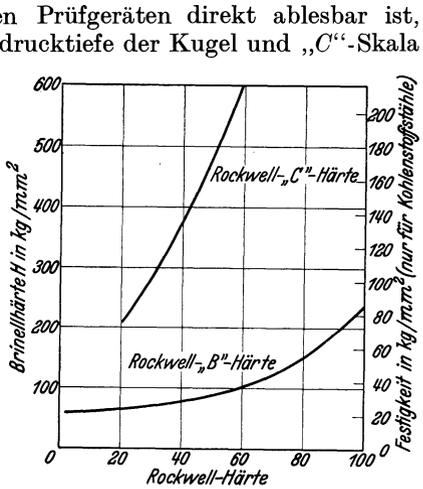


Abb. 22. Verhältnis von Rockwell- und Brinell-Härte bei Stahl.

6. Dauerversuche bei ruhender Belastung.

Für eine dauernd ruhende Beanspruchung können bei Stahl im Bereiche der Raumtemperatur und tiefer Temperaturen die beim statischen Zug-, Druck- oder Biegeversuch ermittelten Werte zugrunde gelegt werden. Die Elastizitätsgrenze und Streckgrenze ergeben genügend zuverlässige Maße für die zulässigen Beanspruchungen. Dagegen zeigen Stahl bei Temperaturen über 300° C, Kupfer, Aluminium und manche

Nichteisenmetallegerungen bereits bei Raumtemperatur die Erscheinung, daß bei sehr langsamer Steigerung der Belastung die Streckgrenze gegenüber dem normalen Zerreißversuch wesentlich erniedrigt wird. Bean-

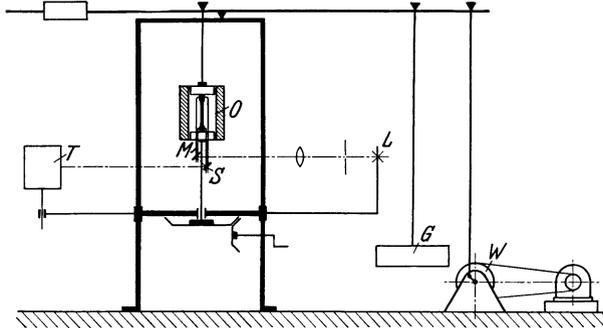


Abb. 23. Versuchseinrichtung für Dauerstandversuche mit zusätzlicher Wechselbelastung.

sprucht man diese Werkstoffe mit einer ruhenden Last, so kann man beobachten, daß sie schon bei Beanspruchungen unterhalb der Streck-

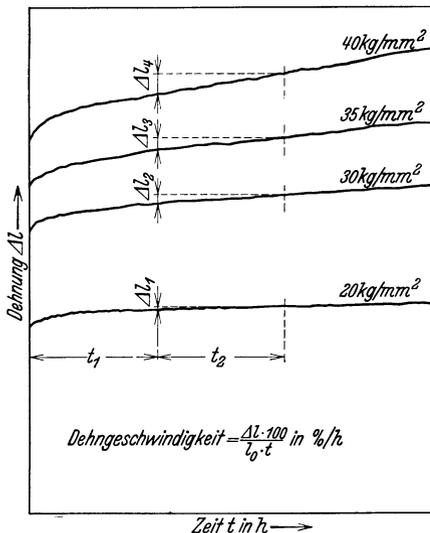


Abb. 24. Zeit-Dehnungsschaubilder von Dauerstandversuchen (Molybdänstahl bei 400° C).

grenze Formänderungen unterworfen sind. Man bezeichnet diese Erscheinung als Kriechen. Da dieses Kriechen für die Sicherheit und Betriebsfähigkeit einer Anlage erhöhte Gefahren bedeutet, ist es erforderlich, die Dauerstandfestigkeit [Pomp u. Dahmen: Mitt. Kais.-Wilh.-Inst. Eisenforsch., Düsseld. 9, Abh. 74, 33—52 (1927); Pomp u. Enders: Mitt. Kais.-Wilh.-Inst. Eisenforsch., Düsseld. 12, 127—147 (1930); Tap-sell: Creep of Metals. Oxford University Press 1931; Körber u. Pomp: Stahl u. Eisen 52, 553 (1932)] oder Kriechgrenze als diejenige Beanspruchung zu ermitteln, bei der unter Dauerbelastung nur noch sehr kleine Formänderungen auftreten. Die Versuchsausführung erfolgt zweckmäßig in einem Prüfstand nach Abb. 23. Der Probe-

stab ist in einem elektrischen Ofen *O* eingebaut und wird mittels Hebel belastet (*G*). Zur Messung der Dehnungen dienen Martens-Spiegelapparate *MS*. Um das Ablesen der Dehnungswerte zu ersparen, wird auf die Spiegel ein Lichtstrahl *L* geworfen, der von den Spiegeln auf eine sich durch Uhrwerk drehende Trommel *T*, die mit lichtempfindlichem Papier bespannt ist, reflektiert wird, so daß ein Zeit-Dehnungsdiagramm

photographisch aufgenommen wird. Ein Kurbeltrieb W ermöglicht noch zusätzliche Wechselbeanspruchungen über der durch G erzeugten Vorspannung. Abb. 24 zeigt solche Zeit-Dehnungsdiagramme, aus denen die Dehngeschwindigkeit ermittelt wird. Als praktische Dauerstandfestigkeit wird nach Vorschlag des Kaiser-Wilhelm-Institutes für Eisenforschung [Pomp u. Enders: Mitt. Kais.-Wilh.-Inst. Eisenforschg., Düsseld. 12, 127—147 (1930)] diejenige Belastung ermittelt, bei der die Dehnungsgeschwindigkeit der Versuchsprobe im Zeitraum der

3.— 6. Versuchsstunde nach Lastaufgabe	0,005 %/h
5.—10. " " "	0,003 %/h
25.—30. " " "	0,0015 %/h

beträgt.

Siebel und Ulrich [Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 72, 659 (1932)] schlagen vor, die Dauerstandstreckgrenze als diejenige Belastung zu bestimmen, bei der die Dehngeschwindigkeit bei 0,2% bleibender Dehnung auf $1 \cdot 10^{-4}$ %/h gesunken ist.

Eine einheitliche Festlegung des Begriffes Dauerstandfestigkeit ist noch nicht erfolgt. Je nach der Art des Konstruktionsteiles können ihm höhere oder geringere Dehnungen zugemutet werden. Es empfiehlt sich daher Schaubilder über die Abhängigkeit von Beanspruchung und Kriechen für die Werkstoffe aufzustellen, aus denen der Konstrukteur die zulässigen Beanspruchungen entnehmen kann. Bei Stahl hängt die Dauerstandfestigkeit nicht nur von der chemischen Zusammensetzung, sondern auch sehr wesentlich vom Gefügestand ab [vgl. Thum u. Holdt: Gießerei 17, 333 (1930)]. Für die Beurteilung der Dauerstandfestigkeit ist es wichtig, auch die versteifende Wirkung der Konstruktion durch Querschnittsübergänge, Bohrungen mit zu berücksichtigen. Die Dauerstandfestigkeit wird zweckmäßig an gekerbten Proben untersucht [A. Thum u. H. Holdt: Das Kriechen des Stahles bei erhöhten Temperaturen. Masch.-Schad. 8, 17 (1931)]. Durch Kerbwirkung wie überhaupt durch Formänderungsbehinderung wird die Dauerstandfestigkeit erhöht.

7. Dauerversuche bei veränderlicher Beanspruchung.

In der Mehrzahl der Fälle hat man es nicht mit ruhenden Beanspruchungen, sondern mit veränderlichen Beanspruchungen zu tun. Selbst in einem Behälter, der dauernd unter Druck steht, muß man infolge der Druckschwankungen während des Betriebes und des An- und Abschaltens während der Betriebspausen mit veränderlichen Beanspruchungen rechnen. Von besonderer Bedeutung ist es daher, die Wechselfestigkeit und Dauerfestigkeit der Werkstoffe¹ zu ermitteln.

In Abb. 25 und 26 sind solche Versuchseinrichtungen für Dauerversuche dargestellt². Besonders einfach und daher häufig angewandt

¹ Graf: Die Dauerfestigkeit der Werkstoffe und der Konstruktionselemente. Berlin: Julius Springer 1929. — Thum u. Buchmann: Dauerfestigkeit und Konstruktion. Berlin: VDI-Verlag 1932. — Moore u. Kommers: The fatigue of metals. — Gough: The fatigue of metals. London: Ernest Blum Ltd. 1926.

² Über Dauerprüfmaschinen siehe Föppl-Becker-Heydekampf. Berlin: Julius Springer.

ist der Dauerbiegeversuch. Ein umlaufender Probestab wird entweder mit einer Einzellast oder zwei gleichen Lasten beansprucht (Abb. 25). Das Schema einer Zugwechselmaschine Bauart Thum-Holzhauser, die gleichzeitig die Einwirkung von Temperaturen und chemischen Stoffen

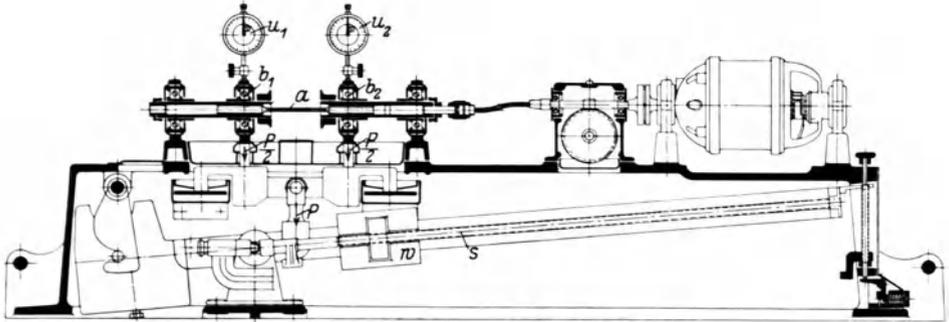


Abb. 25. Dauerbiegemaschine (Bauart Maschinenfabrik C. Schenk, Darmstadt).

unter Druck gestattet, ist in Abb. 26 dargestellt. Der Probestab ist in ein heizbares Druckgefäß eingebaut. Er wird durch einen Kurbeltrieb über eine Feder und Hebel belastet. Die Belastung kann zwischen Null und einem Höchstwert und auch zwischen einer Zugvorspannung und einem Höchstwert wechselnd eingestellt werden. Die Längenänderungen der Feder gestatten eine einwandfreie Messung der Beanspruchungen. Der Einbau des Probestabes in das Druckgefäß ermöglicht den Einfluß von Laugen, Säuren und Dämpfen auf die Dauerfestigkeit bei verschiedenen Drücken und Temperaturen zu untersuchen.

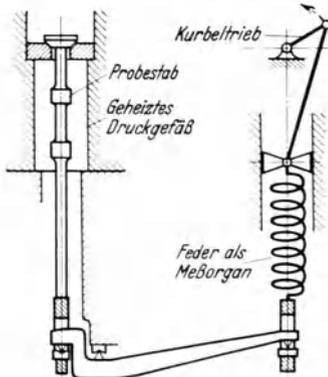


Abb. 26. Zugwechselmaschine.
[Holzhauser: Mitt. Mat.-Prüf.-
Anstalt Darmstadt, Heft 3.
VDI-Verlag 1933.]

Die Dauerfestigkeit kann zuverlässig im allgemeinen nur durch wirkliche Dauerversuche (Wöhler-Versuche¹) ermittelt werden. Man beansprucht den Probestab etwas höher als die voraussichtliche Dauerfestigkeit beträgt und bestimmt die Anzahl der Lastwechsel bis zum Bruch. Bei den folgenden Proben wird die Belastung vermindert, bis die Probe nicht mehr bricht. Bei Stahl und Gußeisen kann man 10 Millionen Lastwechsel als ausreichend annehmen. Bei Korrosionsermüdungsversuchen, bei denen der Probestab außer der mechanischen Beanspruchung noch dem Angriff durch feuchte Luft, Wasserdämpfen, angreifenden Gasen usw. ausgesetzt wird, treten Brüche nach Erfahrungen in der Materialprüfungsanstalt Darmstadt noch nach höheren Lastwechselzahlen auf, so daß die Versuchsdauer

¹ Wöhler führte zuerst (1858) systematisch solche Dauerversuche durch [Ztschr. Bauwes. 1870, 73f.]

für die Bestimmung der Korrosionsermüdungsfestigkeit zweckmäßig bis zu 50 Millionen Lastwechsel ausgedehnt wird.

Für die Bestimmung der Dauerfestigkeit sind mindestens 4—5 Proben erforderlich. Abb. 27 zeigt Wöhler-Kurven, wie sie mit der Zugwechselmaschine an Kesselblech in Laugen verschiedener Konzentration ermittelt wurden.

Auf die Wechselfestigkeit an sauber polierten Probestäben kann ungefähr aus der Zugfestigkeit geschlossen werden. Bei Stählen beträgt

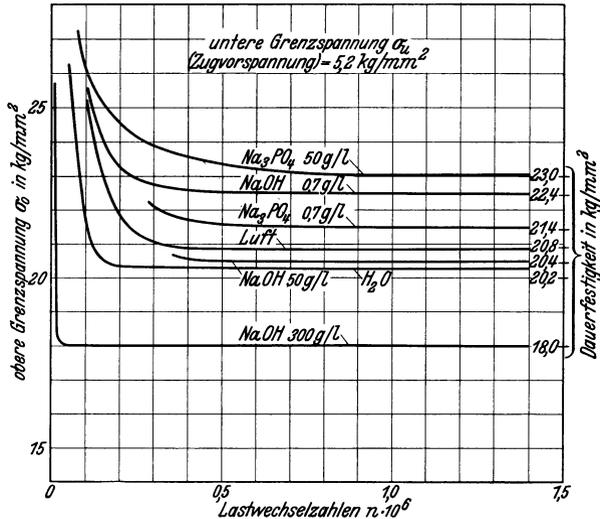


Abb. 27. Dauerversuche mit Kesselblech in Luft, Wasser, Natronlauge und Natriumphosphat. Bestimmung der Dauerfestigkeit aus Wöhler-Kurven.

sie etwa die Hälfte, bei guten Stählen bis etwa 60%, bei harten und spröden Stählen bis herunter zu 30% von σ_B . Bei Nichteisenmetallen beträgt die Wechselfestigkeit etwa 30%.

Für die Dauerfestigkeit wechselnd beanspruchter gekerbter Konstruktionselemente lassen die statischen Festigkeitswerte keine Schlüsse zu. Maßgebend ist hier die Spannungslinienkonzentration, die von der Größe der Kerbwirkung abhängig ist, die Kerbempfindlichkeit des Werkstoffes und die Oberflächenempfindlichkeit des Werkstoffes, die von der Bearbeitungsart abhängig ist. Zähle Werkstoffe sind im allgemeinen wenig kerb- und oberflächenempfindlich. Sie vermögen infolge ihres hohen Formänderungsvermögens hohe Spannungsspitzen abzubauen. Die Gefahr eines Anrisses und Ermüdungsbruches wird damit vermindert. Dagegen sind härtere Werkstoffe sehr kerb- und auch oberflächenempfindlich. Schon geringe Verletzungen der Oberfläche durch feine Schleifrisse oder Walzhaut setzen die Dauerfestigkeit erheblich herab. Gußeisen als spröder Werkstoff ist dagegen weniger kerb- und oberflächenempfindlich, da die Kerbwirkung durch die Graphitadern auch am polierten Stab bereits besteht.

8. Dauerschlagversuche.

Vielfach werden die Konstruktionsteile aber nicht nur schwingenden Beanspruchungen ausgesetzt, sondern Erschütterungen bewirken stoßartige Beanspruchungen, die besonders bei spröden Werkstoffen schnell zu Dauerbrüchen führen. Schwierigkeiten bietet hierbei die Ermittlung der auftretenden Beanspruchungen [Berg: Zur Frage der Beanspruchung beim Dauerschlagversuch. Forsch.-Arb. Ing.-Wes. 1930, Heft 331], denn diese sind bei einer gegebenen Stoßenergie von verschiedenen Umständen wie Kerbwirkung, Steifigkeit der Konstruktion, der Dämpfungsfähigkeit des Werkstoffes, dem Elastizitätsmodul, der sich mit der Temperatur wesentlich verändert, u. a. abhängig.

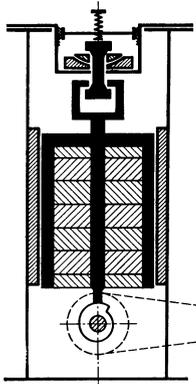


Abb. 28. Dauerschlagwerk.

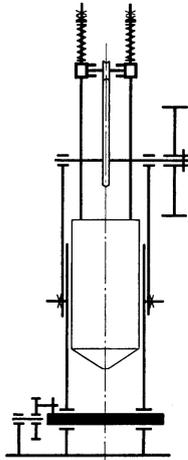


Abb. 29. Dauerschlagwerk.

In Abb. 28 und 29 sind Dauerschlagwerke schematisch dargestellt, wie sie sich für stoßweise Dauerschlagversuche bewährt haben. Bestimmt wird die Schlagarbeit (Bärgewicht · Fallhöhe in cmkg), die der in der Regel gekerbte Probestab dauernd aushält.

9. Technologische Proben.

Hierbei wird lediglich die Formänderungsfähigkeit der Werkstoffe untersucht, ohne daß Kraft- und Arbeitsmessungen durchgeführt werden.

Der **Faltversuch** (DIN 1603, 1605 III) dient zum Nachweis der Biegebarkeit (Zähigkeit) des Werkstoffes bei Raumtemperatur. Flachstäbe von 30—50 mm Breite oder Rundstäbe sowie auch Profile werden kalt um einen Dorn gebogen. Je nach der Zähigkeit des Werkstoffes werden Dorndurchmesser und Biegewinkel oder Biegeradius vorgeschrieben, die die Probe beim Falten aushalten muß, bis sie auf der Zugseite anreißen darf. (Für Flußstahl s. DIN 1612, 1613, 1621, 1623, 1628; für Messing, Bronze DIN 1705, 1709, 1774, 1778, 1779.)

Zum Nachweis der Warmbearbeitbarkeit dient der **Rotbruchversuch**, der ähnlich wie der **Faltversuch**, jedoch im rotwarmen Zustande durchgeführt wird.

Die **Schweißbarkeit im Feuer** wird geprüft, indem Probestäbe nach dem üblichen Werkstattverfahren überlappt zusammengeschweißt werden. Ebenso müssen Gasschmelzschweißungen und Lichtbogenschweißungen [s. unter anderen Bardtke: Gemeinfaßliche Darstellung der gesamten Schweißtechnik. Berlin: VDI-Verlag 1927; Lehrbücher für Lichtbogenschweißung, herausgeg. vom Deutschen Ausschuß für Technisches Schulwesen. Berlin 1930] auf ihre Güte nachgeprüft werden.

Eine hochwertige Schweißung muß die Festigkeit der zu verbindenden Werkstoffe besitzen. Prüfvorschriften für Schweißungen DIN 4100.

Die Prüfung der Drähte erfolgt durch Hin- und Herbiegeproben (DIN DVM 1211). Bei dieser Probe wird der Draht zwischen Klemmbacken gespannt und nach beiden Seiten um einen Halbmesser gebogen, der gewöhnlich etwa die 2—3fache Drahtdicke beträgt. Gemessen wird die Zahl der Hin- und Herbiegungen bis zum Bruch. Als eine Biegung zählt das Biegen von der senkrechten Lage um 90° und wieder zurück. Die Hin- und Herbiegezahlen betragen bei Stahldrähten bis 160 kg/mm^2 Festigkeit etwa 6—13 je nach dem Verhältnis von Drahtdicke zu Biegungsradius, bei Stahldrähten höherer Festigkeit etwa 5—11, bei gleichen verzinkten Stahldrähten etwa 4—9.

Dünne Bleche, die durch Ziehen oder Drücken starken Verformungen unterworfen werden sollen, werden zweckmäßig der Tiefziehprobe unterworfen. Am meisten eingeführt ist der Tiefungsprüfapparat nach Erichson. Hierbei wird ein abgerundeter Stößel in die zwischen einer Matrize und einem Faltenhalter eingespannte Blechprobe eingedrückt. Gemessen wird die Tiefe der Ausbauchung des Bleches bis zum ersten Anriß (DIN Vornorm DVM Prüfverfahren A 101).

10. Chemische Untersuchung und Gefügeuntersuchung.

Die Festigkeitseigenschaften der Werkstoffe werden bedingt durch ihre chemische Zusammensetzung und ihre thermische sowie mechanische Vorbehandlung. Deshalb ist für die Werkstoffprüfung die chemische Analyse [s. unter anderen Berl-Lunge: Chemisch-technische Untersuchungsmethoden, Bd. 2. Berlin 1932; Schiffer: Stahl u. Eisen, Werkstoffhandbuch Stahl und Eisen, herausgeg. vom Verein Deutscher Eisenhüttenleute, V 1. Nichteisenmetalle, Werkstoffhandbuch Nichteisenmetalle, herausgeg. von der Gesellschaft für Metallkunde C 3 bis C 9] nicht zu entbehren. Bei den metallischen Werkstoffen müssen die absichtlich zugesetzten Legierungselemente und die beim Herstellungsprozeß sich ergebenden schädlichen Bestandteile nachgeprüft werden. Beim Stahl ist es in erster Linie der Kohlenstoffgehalt, der in engen Grenzen eingehalten werden muß. Zu niedriger Kohlenstoffgehalt vermindert die verlangte Festigkeit, zu hoher Kohlenstoffgehalt die Zähigkeit bzw. Verformbarkeit. Man muß auch die genaue Zusammensetzung des Stahles kennen, um hieraus auf die richtigen Glüh- und Vergütungstemperaturen schließen zu können (s. S. 488 f.). Bei den legierten Stählen und bei den Legierungen der Nichteisenmetalle ist eine genaue Prüfung der chemischen Zusammensetzung erforderlich, da größere Abweichungen nach oben oder unten unerwünschte Eigenschaften hinsichtlich der Festigkeit, der Korrosionsbeständigkeit oder der Volumänderungen bei hohen Temperaturen zur Folge haben. Der chemische Nachweis der schädlichen Bestandteile gibt einen Anhalt über die chemische Beständigkeit, die Verformbarkeit, Schweißbarkeit. Es ist deshalb in den Normen für viele Werkstoffe die höchst zulässige Menge und Art der Verunreinigungen vorgeschrieben.

Bei den nichtmetallischen Werkstoffen, so z. B. den keramischen Massen gibt zwar die chemische Analyse allein keinen Anhalt für die mechanischen und chemischen Eigenschaften. Nur beim Überwiegen bestimmter Bestandteile lassen sich bestimmtere Schlüsse auf die Eigenschaften ziehen. So ist bei Steinzeug oder Schamotte für die Beurteilung außer der Zusammensetzung noch die Kenntnis der Brenntemperatur und eine mikroskopische Untersuchung nötig. Bei allen Werkstoffen hat die chemische Analyse eine gewichtige Bedeutung bei der Auswahl der Rohstoffe.

Auch bei den metallischen Werkstoffen ist es wichtig, neben der chemischen Zusammensetzung den Gefügebau kennenzulernen. Daraus lassen sich weitgehende Schlüsse auf eine richtige thermische und mechanische Vorbehandlung ziehen.

Zur Beurteilung der Eigenschaften werden die Metallproben geschliffen und zur Sichtbarmachung des Gefüges mit verdünnten Säuren geätzt [Goerens: Einführung in die Metallographie. Halle: Wilh. Knapp 1932]. Schon mit dem bloßen Auge lassen sich wesentliche Beobachtungen über Seigerungen, Verformungen oder grobkristallines Gefüge machen. Zur Untersuchung der Krystallstruktur benutzt man besondere Metallmikroskope, bei denen das Gefüge im auffallenden Licht betrachtet wird. Für die Beurteilung ist es wichtig, ob das Gefüge gleichmäßig ist, ob feine oder grobe Krystalle vorliegen. Man kann aus dem Gefügebild die Glühbehandlung, Vergütung, Verformungen usw. erkennen. Bei Stahl läßt sich aus dem Gefügebild ziemlich genau auf den Kohlenstoffgehalt schließen. Wichtig ist auch die Feststellung von feinen Rissen, Poren, Schlackeneinschlüssen. Bei Gußeisen ist es wertvoll, die Größe und Art der Ausscheidung der Graphitadern festzustellen. Bei vielen Metallegierungen können aus der Gefügeuntersuchung weitgehende Schlüsse auf ihre Verwertbarkeit gezogen werden. Man unterscheidet Mischkrystalle, die eine feste Lösung der Legierungsbestandteile bilden und sich durch erhöhte Korrosionsbeständigkeit auszeichnen und heterogene Gemenge von Krystallen der einzelnen Metalle oder Metallverbindungen.

In den letzten Jahren ist die Gefügeuntersuchung durch Röntgenstrahlen wesentlich entwickelt worden. Von praktischer Bedeutung ist hierbei besonders der Nachweis von Rissen, Gasblasen, nichtmetallischen Einschlüssen und Spannungen im Innern von Metallstücken.

11. Prüfung der Korrosionsbeständigkeit.

Für den chemischen Apparatebau ist die Prüfung der Werkstoffe auf ihr Verhalten gegen chemische Angriffe von größter Bedeutung.

Über die Korrosionsprüfung ist grundsätzlich zu sagen, daß im allgemeinen nur dann zuverlässige Ergebnisse erhalten werden, wenn die Versuchsbedingungen möglichst vollständig den praktischen Betriebsverhältnissen angeglichen sind. Kurzversuche, bei denen die Versuchsbedingungen angehäuft werden, führen mitunter zu nicht einwandfreien Ergebnissen. So dürfen auch nicht stärkere Konzentrationen als die

betriebsmäßigen angewendet werden. Als Beispiel sei die Korrosionswirkung von Salzlösungen auf Eisen erwähnt. Bei manchen Salzlösungen nimmt der Korrosionsangriff mit zunehmender Konzentration zunächst zu, erreicht bei einer bestimmten, der kritischen Konzentration einen Höchstwert, um bei stärkerer Konzentration wieder abzunehmen. Bei sehr starker Konzentration der Salzlösung findet schließlich praktisch kein Angriff mehr statt. Ein ähnliches Beispiel zeigt Abb. 11. Auch sind für den Korrosionsangriff innere Spannungen, etwaige plastische Verformungen und mechanische Beanspruchungen von wesentlichem Einfluß.

Grundsätzlich ist anzustreben, bei allen Korrosionsprüfungen die Betriebsbedingungen so genau, als es laboratoriumsmäßig möglich ist, nachzuahmen. Betriebserfahrungen müssen sorgfältig gesammelt und ausgewertet werden.

Bei Vergleichsversuchen¹ müssen alle Versuchsbedingungen gleichmäßig eingehalten werden, so insbesondere gleiche äußere Form und Oberflächenbeschaffenheit der Proben, gleiche Versuchsgefäße und Unterbringung der Proben. Bei Langzeitversuchen muß dafür Sorge getragen werden, daß Konzentration und Temperatur des angreifenden chemischen Stoffes gleichbleibt.

Die Versuchsausführung kann verschieden erfolgen. Bei Standversuchen werden die Proben in mit Lösungen gefüllte Gläser oder Flaschen gestellt.

Vielfach wird auch die Flüssigkeit durch Rührwerke in gleichförmiger Bewegung gehalten, oder die Proben kreisen im Versuchsbehälter (Trommelapparate). In allen diesen Fällen muß Sorge getragen werden, daß die Proben gleichmäßig mit der Flüssigkeit oder dem Gas in Berührung gehalten werden. Für Schnellkorrosionsversuche wird oft der Sprühapparat angewandt, wobei ein Nebel aus Gas oder Luft und Flüssigkeit gegen die Proben geblasen wird. Beim Tauchverfahren werden die Proben abwechselnd senkrecht in die Flüssigkeit getaucht und dann für bestimmte Zeitabschnitte herausgehoben und der Luft ausgesetzt.

Die Ergebnisse des Korrosionsversuches werden im allgemeinen durch Bestimmung des Gewichtsverlustes, ausgedrückt in g/m^2 Oberfläche, ausgewertet. Etwaige Korrosionsprodukte müssen sorgfältig losgelöst werden. Falls dies mechanisch nicht ohne Beschädigung der Probe gelingt, müssen diese oder das Metall gegebenenfalls chemisch gelöst werden. Wichtig ist ferner die Beobachtung der Proben während des

¹ Rabald: Werkstoff und Korrosion, Bd. 1, S. 97f. Leipzig: Otto Spamer 1931. — Wiederholt: Arbeitsverfahren der Korrosionsprüfung. Werkstoffhandbuch Nichteisenmetalle C 12. — Prüfverfahren zur Feststellung der Korrosion von Aluminium und Aluminiumlegierungen. Richtlinien, ausgearb. vom Ausschuß „Aluminium“ des Reichsausschusses für Metallschutz e. V. (Obmann Ob.-Reg.-Rat Prof. Dr. Maaß), Berlin und beraten mit der Deutschen Gesellschaft für Metallkunde. Ztschr. Metallkunde 22, 280 (1930); Korrosion u. Metallschutz 6, 146 (1930). — Richtlinien für die praktische Prüfung von Stählen auf ihren Korrosionswiderstand. Ber.-Nr. 164 des Unterausschusses für Rostschutz im Werkstoffausschuß des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute, erstattet von Prof. Dr.-Ing. E. H. Schulz in Dortmund. Stahl u. Eisen 50, 1266 (1930). — Gollnow: Chem. Fabrik 4, 326, 335, 341 (1931).

Versuches hinsichtlich Veränderungen der Oberfläche, Gasbildung und Bildung von Korrosionsprodukten.

Der Einfluß der Korrosion auf die Festigkeitseigenschaften kann nachträglich durch Zerreißversuche geprüft werden. Werkstoffe, die während des Betriebes großen Beanspruchungen ausgesetzt sind, werden zweckmäßig während der Korrosionsprüfung in gleicher Weise mechanisch beansprucht (s. S. 478, Abb. 26).

Zur schnellen Beurteilung der Korrosion sind verschiedene elektrochemische Verfahren entwickelt worden. So bestimmt man mit dem Korrosionskurzprüfapparat nach Duffek [Korrosion u. Metallschutz 2, 183 (1926); 4, 251—253 (1928)] das Potential (Abb. 30). In die angreifende Lösung taucht eine Quecksilberelektrode und der Prüfkörper. Der Rostvorgang wird durch Zuleitung von Sauerstoff noch verstärkt. Aus der Potentialmessung wird auf die Auflösungs geschwindigkeit des untersuchten Metalles geschlossen.

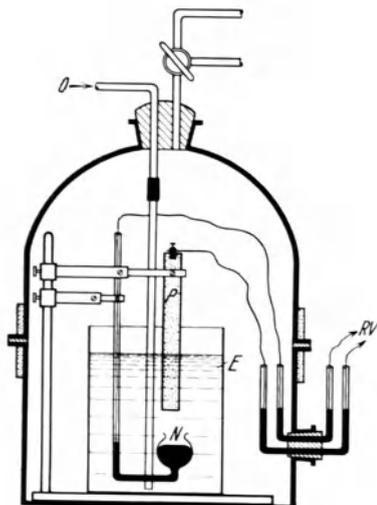


Abb. 30. Rostapparat von Duffek. P Versuchsprobe; N Quecksilberelektrode; E Becher mit Elektrolyt; O Sauerstoffzuführung; RV Zuführung zum Millivoltmeter.

Bei der Korrosionskurzprüfung nach Tödt [Ztschr. Elektrochem. 34, 586 f. (1928)] wird die Stromstärke zwischen Platin und dem Prüfstück in der zu untersuchenden Flüssigkeit gemessen. Diese Prüfung beruht auf der Tatsache, daß die Stromstärke unabhängig ist von der Größe des Prüfstückes, wenn die Oberfläche der edleren Elektrode vollkommen gleich ist.

Bei der Prüfung von Schutzüberzügen auf Eisen kommt es hauptsächlich darauf an, deren Dichtigkeit zu prüfen. Zu diesem Zwecke wird die Porenzahl im Überzug bestimmt [Korrosion und Rostschutz, herausgeg. vom Ausschuß für wirtschaftliche Fertigung, Heft 6. Berlin: Beuth-Verlag G. m. b. H. 1925]. Die Werkstücke werden nach sorgfältiger Reinigung in neutrale Agargallerte gelegt, die Kaliumferri-cyanid und Phenolphthalein enthält. Nach 24 h können die Poren durch Blaufärbung festgestellt werden.

12. Prüfverfahren für feuerfeste Baustoffe.

Die Feuerfestigkeit der feuerfesten Baustoffe wird durch Vergleiche mit Segerkegeln festgestellt (DIN 1063). Aus ungeformter Masse werden Kegel von der Gestalt und Größe eines kleinen Segerkegels hergestellt. Die Prüfkörper und Vergleichssegerkegel werden in gleichem Abstand vom Heizrohr in den Ofen eingesetzt. Die Feuerfestigkeit wird durch die Nummer des Segerkegels bezeichnet, dem der Prüfkörper gleicht. Um die Feuerfestigkeit zuverlässig zu bestimmen, müssen mehrere Schmelzversuche durchgeführt werden, und zwar einer mit dem im

Verhalten am nächsten stehenden Segerkegel und zwei weitere mit dem der Feuerfestigkeit der Probe nächsthöheren und nächsttieferen Segerkegel.

Besonders wichtig ist das Verhalten der feuerfesten Baustoffe bei hohen Temperaturen unter gleichzeitiger Belastung (DIN 1064). Zu diesem Zwecke wird die Druckfeuerbeständigkeit an zylindrischen Proben von 50 mm Durchmesser und 50 mm Höhe bestimmt. Die Prüfkörper werden aus der Mitte der zu untersuchenden Steine so herausgebohrt, daß eine Grundfläche des unbearbeiteten Prüfkörpers von der Brennhaut des Steines gebildet wird. Die Belastung der Probe beträgt 2 kg/cm^2 . Die Temperatur wird bis 1000°C um 15° je min, oberhalb 1000°C um 8° je min gesteigert. Die Höhenänderung des Prüfsteines wird durch die Prüfmaschine in 10facher Vergrößerung aufgezeichnet. Bestimmt werden die Temperaturen, bei denen die aufgenommene Kurve gegenüber ihrem höchsten Punkt um 3 mm abgesunken ist (Beginn der Druckerweichung), und bei denen die Höhe des Prüfkörpers um 20 mm gegenüber der Höhe vor dem Versuch abgesunken ist oder bei denen der Prüfkörper vorzeitig zusammengesunken ist (Ende der Druckerweichung).

Zur Bestimmung des Widerstandes gegen Temperaturwechsel werden die feuerfesten Steine wiederholt schroffem Temperaturwechsel ausgesetzt (DIN 1068). Als Proben werden ganze Steine oder zylindrische Prüfkörper von 36 mm Durchmesser und etwa 60 mm Höhe verwendet, die aus den Steinen herausgebohrt werden. Die zu untersuchenden Steine werden auf 950°C erwärmt und in Wasser abgeschreckt. Bei Normalsteinen wird nur $\frac{1}{3}$ des Steines mit der Kopffläche in den Ofen eingesetzt. Bestimmt wird die Abschreckzahl, bis zu der bei ganzen Steinen mindestens 50% der dauernd erhitzten und abgeschreckten Kopffläche des Prüfkörpers abgesprengt ist, und bei zylindrischen Proben, bis der Prüfkörper zerspringt.

Als weitere Prüfverfahren kommen noch in Betracht: Druckversuch bei Raumtemperatur, der an zylindrischen Prüfkörpern von 50 mm Durchmesser und 45 mm Höhe durchgeführt wird (DIN 1067), chemische Analyse (DIN 1062), Bestimmung des spezifischen Gewichtes, Raumgewichtes und Porosität (DIN 1065) und Bestimmung der Beständigkeit gegen Angriff fester und flüssiger Stoffe bei hoher Temperatur und Ermittlung der Verschlackungsbeständigkeit (DIN 1069).

II. Die Werkstoffe, ihre Eigenschaften und ihre Verwendung.

A. Stahl und Eisen.

1. Die technischen Eisenarten und das Eisen-Kohlenstoff-Schaubild.

Die technischen Eisensorten sind Legierungen des Eisens mit einer Reihe anderer Elemente. Diese sind bereits teilweise in den Eisenerzen enthalten und verbleiben im Roheisen. Beim Frischen oder Umschmelzen

des Eisens werden sie nicht völlig beseitigt. Zu diesen Begleitern des Eisens gehören Kohlenstoff, Mangan, Silicium, Phosphor, Schwefel, Arsen, Kupfer, Sauerstoff. Zur Erlangung bestimmter Eigenschaften werden von diesen Elementen insbesondere Kohlenstoff, Mangan, Silicium und Kupfer absichtlich zugelegt. Zur Erzeugung hochwertiger Stahlsorten sind die Legierungen des Eisens mit Chrom, Nickel, Molybdän, Wolfram, Vanadium, Uran, Titan, Kobalt, Aluminium sehr wichtig.

Von besonderer Bedeutung für das technische Eisen ist der Kohlenstoff. Der Kohlenstoff ist im Eisen entweder als Eisencarbid (Zementit)

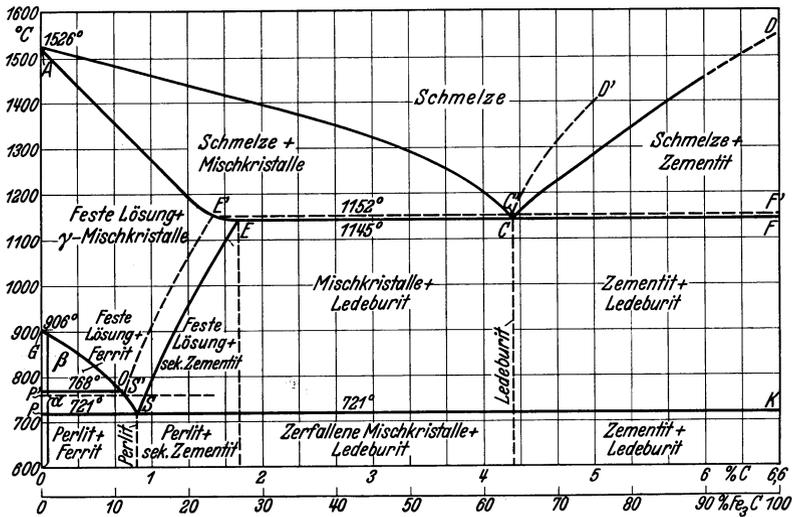


Abb. 31. Eisen-Kohlenstoffdiagramm (herausgeg. vom Verein Deutscher Eisenhüttenleute).

gebunden oder als freier Kohlenstoff in Form von Graphit oder Temperkohle enthalten.

Nach dem Kohlenstoffgehalt kann man die Eisensorten in zwei Hauptgruppen einteilen. Unter $\sim 1,7\%$ C-Gehalt ist das Eisen schmiegebar, oberhalb nur gießbar. Die schmiedbaren Sorten bezeichnet man als Stahl, die gießbaren als Roheisen. Wird das Roheisen unter Mitverwendung von Gußbruch und Schmelzzusätzen umgeschmolzen, so erhält man das Gußeisen. Eine Untergruppe des Gußeisens ist der Temperguß, im Rohguß ein weißes sprödes Gußeisen, bei dem durch nachträgliches Glühen das Eisencarbid in Eisen und Temperkohle zerlegt wird. Hierdurch wird eine gewisse Dehnbarkeit und leichte Bearbeitbarkeit erzielt.

Für das Verständnis der Festigkeitseigenschaften der Stahl- und Eisensorten ist es erforderlich, den Gefügebau der Eisenkohlenstofflegierungen etwas näher kennenzulernen. Hierzu ist das Eisen-Kohlenstoffdiagramm [Das Eisen-Kohlenstoffdiagramm, Ber.-Nr. 42 des Werkstoffausschusses des Vereins Deutscher Eisenhütten-

leute, 2. verb. Aufl. Düsseldorf: Verlag Stahleisen 1926] (Abb. 31) sehr gut geeignet.

Für die Wärmebehandlung der Stähle sind die ausgezogenen Linienzüge des Eisen-Zementitschaubildes grundlegend. Oberhalb ACD ist das Eisen flüssig. Bei 4,29% C-Gehalt ist der Schmelzpunkt, der bei reinem Eisen 1520°C beträgt, auf 1145°C erniedrigt. Längs der Linie AC scheiden sich beim Abkühlen der Schmelze Mischkristalle von Eisen und Eisencarbid, längs der Linie CD Zementitkristalle ab. Unterhalb des Linienzuges $AECF$ ist das Eisen fest. Unterhalb AE existieren bis zu einem Kohlenstoffgehalt von 1,7% Mischkristalle, die als Austenit bezeichnet werden. Kühlt man das Eisen weiter ab, so treten längs der Linie GSE Abscheidungen aus den Mischkristallen ein. Es scheiden sich längs der Linie GS reine Eisenkristalle, längs SE Eisencarbid ab. Die reinen Eisenkristalle bezeichnet man als Ferrit, das längs der Linie SE abgeschiedene Eisencarbid als Sekundärzementit. Im Punkte S erfolgt bei einem C-Gehalt von 0,89% gleichmäßige Abscheidung von Sekundärzementit und Ferrit. Das Gefüge zeigt bei sehr starker Vergrößerung gleichmäßige Streifen von reinem Eisen und Zementit und wird als Perlit bezeichnet. Unterhalb der Linie PSK herrscht Gleichgewicht, die Mischkristalle sind zerfallen. Das Gefüge eines Stahles mit weniger als 0,89% C besteht aus Ferrit und Perlit. Je höher der Kohlenstoffgehalt ist, um so mehr Perlit zeigt das Gefüge. Bei 0,9% C beobachtet man reines perlitisches Gefüge. Bei einem C-Gehalt über 0,9—1,75% C besteht das Gefüge aus Perlit und Sekundärzementit. Ist der Kohlenstoffgehalt höher als 1,75%, so scheiden sich unterhalb EC Mischkristalle von Eisen mit 1,75% C und Ledeburit aus. Bei 4,29% C wird nur Ledeburit gebildet, bei noch höherem C-Gehalt scheidet sich neben Ledeburit noch Primärzementit aus. Der Ledeburit ist das Eutektikum von Mischkristallen und Zementit. Die gestrichelten Linienzüge kennzeichnen das System Eisen-Graphit, welches bei langsamer Abkühlung und höherem Siliciumgehalt sich ausbildet. Längs $C'D'$ scheidet sich Primärgraphit (Garschaumgraphit) ab. Der Linienzug $E'F'$ zeigt die Erstarrungslinie des Eutektikums von Mischkristallen (mit $\sim 1,4\%$ C) + Graphit an. Längs $E'S'$ scheidet sich aus den Mischkristallen Sekundärgraphit (Temperkohle) aus. $P'S'$ entspricht dem Zerfall der Mischkristalle in ein Eutektoid Ferrit + Graphit.

Sämtliche Legierungsbestandteile im Eisen erhöhen die Festigkeit und Härte. Doch kann man davon nur beschränkten Gebrauch machen. Die Steigerung der Härte hat in der Regel eine wesentliche Abnahme der Zähigkeit zur Folge. Besonders schädlich sind hierbei Phosphor, Schwefel, Arsen und gelöste Gase wie Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff. Die größte Härtesteigerung bewirkt der Kohlenstoff. Mit Erhöhung des Kohlenstoffgehaltes nimmt die Zähigkeit des Stahles erheblich ab. Dagegen können die Kohlenstoffstähle durch Legieren mit Chrom, Nickel, Wolfram, Molybdän, Vanadium, Titan, Mangan und Silicium in ihren Festigkeitseigenschaften wesentlich gesteigert werden, wobei gleichzeitig eine gute Zähigkeit erreicht wird.

2. Einfluß der thermischen und mechanischen Vorbehandlung des Stahles.

a) Ausglühen.

Normalisieren. Der Stahl ist aus zahlreichen kleinen Einzelkrystalliten aufgebaut. Durch den Einfluß von Temperatur und mechanischer Behandlung werden diese Krystallite und somit auch die Festigkeitseigenschaften in weitgehendem Maße verändert. Unter Normalisieren oder Ausglühen des Stahles versteht man ein gleichmäßiges Erwärmen auf eine Temperatur etwa 30—50° C oberhalb der oberen Umwandlungslinie (Abb. 31, Linienzug *SG*) mit nachfolgendem Erkalten

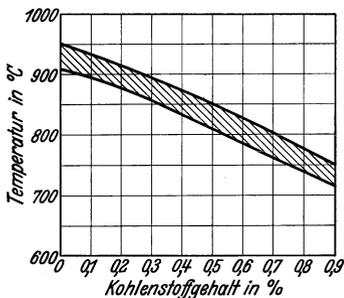


Abb. 32. Härte- und Glühtemperaturen in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt. Bei niedrigerem Mangangehalt (< 0,5 % Mn) ist die obere Grenzlinie, bei höherem Mangangehalt (~ 0,8 % Mn) die untere Grenzlinie maßgebend.

in ruhiger Luft. Hierbei wird der Stahl in den Zustand der festen Lösung überführt. Beim Abkühlen erfolgt eine neue Krystallisation. Durch Ausglühen erhält man ein gleichmäßiges feinkörniges Gefüge. Hierdurch kann man die grobkörnige Gußstruktur sowie die Einflüsse von Kaltverformung, Überhitzung usw. beseitigen. Die zweckmäßigen Glühtemperaturen in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt sind in Abb. 32 wiedergegeben.

b) Kaltverformung.

Kaltverformung von Stahl, durch Ziehen, Kaltwalzen, Stauchen, Biegen bei Raumtemperatur, bewirkt eine Steigerung der Festigkeit. Die Dehnbarkeit des Werkstoffes nimmt gleichzeitig ab. Hohe Kaltverformung wird beim Ziehen von Drähten, Stangen, Rohren, beim Kaltschlagen von Schrauben und Nietköpfen, Kugeln usw. angewandt. Für hochbeanspruchte Konstruktionsteile ist Kaltverformung wegen der damit verbundenen Sprödigkeit des Stahles unerwünscht. In der Regel werden alle Konstruktionsteile nach der Kaltverformung ausgeglüht oder vergütet.

c) Alterung.

Die durch Kaltverformung bewirkte Verfestigung setzt sich nach beendeter Verformung noch weiter fort. Das Höchstmaß der Festigkeit wird erst nach sehr langer Zeit, nach Monaten oder gar Jahren erreicht. Verbunden damit ist eine Versprödung des Werkstoffes. Diese Erscheinung wird als Alterung bezeichnet. Beschleunigt wird die Alterung unter dem Einfluß von Temperaturen zwischen 100—300° (künstliches Altern). Die vollständige Alterung erfolgt hierbei oft schon nach einigen min. Besonders gefährlich wird die Alterung bei weichen Flußstählen mit einem C-Gehalt bis etwa 0,25 %, wenn die Verformung etwa 5—20 % beträgt. Hierbei werden infolge Alterung Streckgrenze und Festigkeit zwar erhöht, aber die Kerbzähigkeit eines solchen Stahles wird sehr

gering. Erfolgt die Verformung bei Temperaturen von 200—400°, so tritt die Alterung augenblicklich ein. Derartig spröde gewordene Stähle werden als blaubruchig bezeichnet. Als Konstruktionsmaterial bieten solche stoßempfindliche Werkstoffe eine große Gefahr. Die Versprödung des Stahles durch Alterung wird nach neueren Forschungen hauptsächlich durch den im Stahl gelösten Sauerstoff und Stickstoff bedingt. Durch sorgfältige Desoxydation oder Reduktion beim Herstellungsprozeß werden alterungsbeständige Stähle erzeugt.

d) Rekristallisation.

Werden kaltverformte weiche Stähle bei 700—900° C, also unterhalb der oberen Umwandlungslinie, ausgeglüht, so beobachtet man Kornwachstum. Die Ferritkrystalle werden außerordentlich grob. Die Gefahr der Rekristallisation besteht nur bei kritischer Verformung, d. h. etwa 8—20%. Besonders nachteilig ist hierbei der neben dem Kornwachstum auftretende Korngrenzzenementit, der vollständige Sprödigkeit des Stahles zur Folge hat. Solche Fehler können ebenfalls durch Normalisieren beseitigt werden. Ist bei dünnen Blechen oder Drähten das Ausglühen bei so hohen Temperaturen wegen Verzunderung nicht möglich, so muß die Verformung wenigstens 30% betragen. Es genügen dann Glühtemperaturen von 600° C an. Eine Gefahr der Rekristallisation besteht bei hohen Verformungsgraden nicht mehr.

e) Warmformgebung (Schmieden und Walzen).

Das Schmieden, worunter allgemein auch das Pressen, Walzen, Ziehen in der Wärme verstanden wird, muß oberhalb der oberen Umwandlungstemperatur (s. Abb. 32) vorgenommen werden, um Schäden durch innere Spannungen und Schmiedezerreißungen zu vermeiden. Sobald die Temperatur des Schmiedestückes unter die Umwandlungstemperatur fällt, muß das Stück aufs neue erwärmt werden. Zur Erreichung einer guten Plastizität des Stahles geht man mit den Schmiedetemperaturen meist ziemlich hoch, auf etwa 1200—900° C. Durch das Schmieden werden die Festigkeitseigenschaften des Stahles wesentlich verbessert. Die günstigsten Ergebnisse werden erzielt, wenn die Warmverformung etwas oberhalb der Temperatur des Umwandlungspunktes erfolgt.

f) Härten und Vergüten.

Glüht man einen Stahl oberhalb der oberen Umwandlungslinie (s. Abb. 32) und schreckt ihn in Wasser ab, so wird der Zerfall des Austenites in Perlit und Ferrit verhindert. Man erhält ein feinnadeliges Gefüge, den Martensit (s. Abb. 34). Mit seiner Bildung ist eine wesentliche Steigerung der Festigkeit verbunden, die Zähigkeit wird gering. Der Grad der Härtebarkeit hängt vom Kohlenstoffgehalt und in geringerem Maße von der Abkühlungsgeschwindigkeit ab. Die Sprödigkeit wird gemildert durch Anlassen. Konstruktionsteile werden, um eine hohe Zähigkeit zu erlangen, vergütet. Die Vergütung erfolgt durch Härten und nachträgliches Anlassen bei Temperaturen zwischen 450

und 700° C. Hierdurch wird zwar die Festigkeit wieder vermindert, doch ist die Streckgrenze und Zugfestigkeit noch höher als im geglühtem Zustand. Gleichzeitig erreicht man eine gute Dehnung und bessere Kerbzähigkeitswerte als im geglühten (normalisiertem) Zustande.

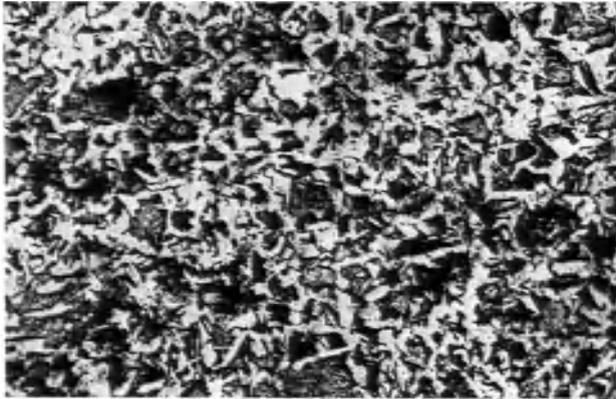


Abb. 33. Stahl mit 0,45 % C bei 840° C geglüht und an der Luft abgekühlt (normalisiert). Gefüge: Ferrit hell und Perlit dunkel. Vergr. 200fach.

Durch das Abschrecken entstehen im Werkstück leicht innere Spannungen, die bei komplizierteren Stücken schon beim Härten zu Rissen führen können. Diese Stücke werden deshalb besser in einem milderen

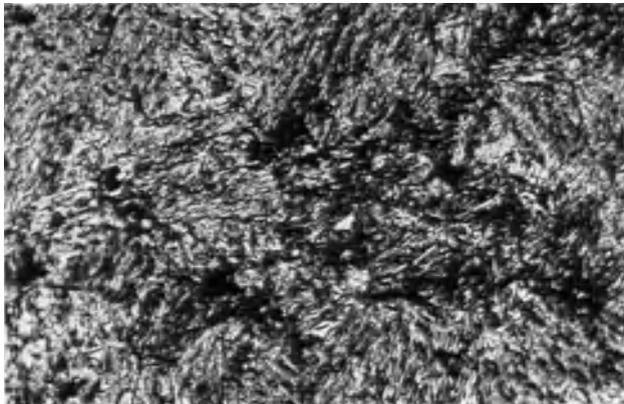


Abb. 34. Stahl mit 0,45 % C bei 840° C geglüht und in Wasser abgeschreckt (gehärtet). Gefüge: Martensit (nadelige Struktur). Vergr. 300fach.

Abschreckungsmittel, wie Öl oder heißem Wasser gehärtet. Bei legierten Stählen ist eine geringere Abkühlungsgeschwindigkeit erforderlich, da infolge der geringeren Wärmeleitfähigkeit die Gefahr innerer Spannungen größer ist. Die Umwandlung der festen Lösung in Perlit und Ferrit geht auch langsamer vor sich. Damit wird auch eine bessere Durch-

härtung größerer Schmiedestücke erreicht. Die Härtung kann deshalb im Ölbad oder auch im Luftstrom erfolgen. Beim Anlassen erfolgt ein Zerfall des Martensites. Bei 350—400° C erhält man Troostit, bei

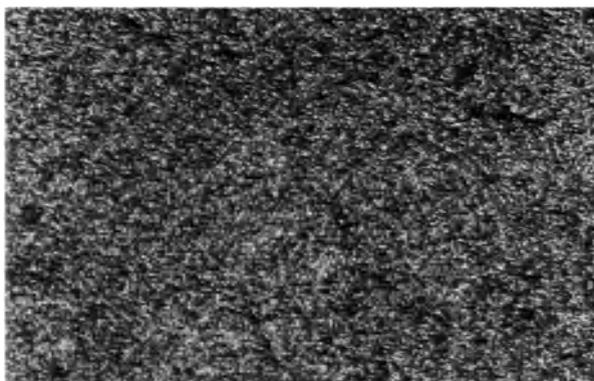


Abb. 35. Stahl mit 0,45 % C bei 840° C gegläht, in Wasser abgeschreckt und bei 650° C angelassen (vergütet). Gefüge: Sorbit. Vergr. 300fach.

450—700° C Sorbit. In Abb. 33—35 sind die Gefügebilder eines Stahles mit 0,45 % C bei verschiedener Wärmebehandlung wiedergegeben. Der Einfluß des Härtens und Vergütens auf die Festigkeit von Stahl ist in Abb. 36 und 37 dargestellt.

g) Einsatzhärten.

Vielfach handelt es sich darum, nur eine harte Oberfläche zu erhalten, dagegen soll der Kern zäh und weich bleiben. Hierzu können Kohlenstoffstähle und legierte Stähle mit einem C-Gehalt von weniger als 0,2% einatzgehärtet (zementiert) werden. Der Stahl wird in einem kohlenstoffreichen Mittel (Härte-

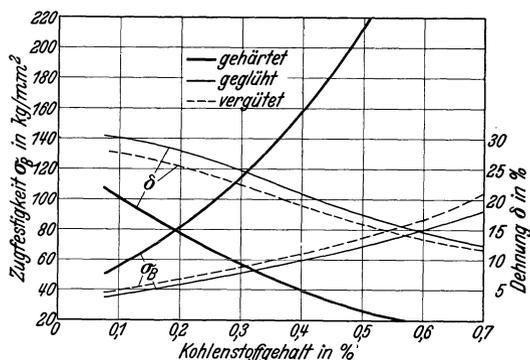


Abb. 36. Einfluß des Härtens und Vergütens bei Stählen mit verschiedenem Kohlenstoffgehalt.

pulver) mehrere h bei 840—900° C gegläht, wobei der Kohlenstoffgehalt in die obersten Schichten hineindiffundiert. Die Tiefe der Aufkohlung hängt von Härtungszeit, Temperatur und von der Beschaffenheit des Härtepulvers ab. Nach dem Glühen werden die Teile langsam abgekühlt, hierauf zum Zwecke der Kornverfeinerung auf 850—900° C gegläht und abgeschreckt, dann nochmals auf 750—780° C gegläht und in Öl oder Wasser abgeschreckt. Ist eine hohe Zähigkeit des Kernes nicht erforderlich, so können die im Einsatz geglähten Teile auf etwa 760° C langsam abgekühlt und dann in Wasser abgeschreckt werden.

Tabelle 4. Zusammenstellung der genormten Kohlenstoffstähle nach DIN 1611, 1612, 1613, 1621, 1661¹.

Markenbezeichnung nach DIN	Klasse und Gütebezeichnung	Erzeugnisse	Zugfestigkeit σ_B kg/mm ²	Bruchdehnung mindestens in %		Zugfestigkeitsgrenze σ_s kg/mm ²	Faltversuch (DIN 1605), lichte Weite der Schleife beim Biegewinkel von 180° bezogen auf die Probendicke a	Kohlenstoffgehalt C in %	Eigenschaften
				am Kurzstab δ_5	am Langstab δ_{10}				
St 00.11	A			nicht gewährleistet					
St 37.11	A		37—45	25	20	mind.			weder kalt- noch rotbrüchig
St 34.11	B		34—42	30	25	19		0,12	übliche Thomas- oder Siemens-Martingüte einsetzbar, feuer-
St 42.11	B		42—50	25	20	23		0,25	einsetzbar, noch einsetzbar, schwer feuer-
St 50.11	B		50—60	22	18	27		0,35	schweißbar, wenig härtbar, kaum feuer-
St 60.11	B		60—70	17	14	30		0,45	schweißbar
St 70.11	B		70—85	12	10	35		0,60	härtbar, vergütbar
St 00.12	Handelsgüte	Flußstahl gewalzt oder geschmiedet nach DIN 1611 ²	nicht gewährleistet	Probendicke in mm			Im warmen und kalten Zustand um 90° biegen		weder kalt- noch rotbrüchig
St 37.12	Normalgüte	Formeisen, Stabeisen, nach DIN 1612 ²	37—45	unter	unter		Ausrundung		
St 34.12	Sondergüte			30—8	8—7	7—5	30—8	$r = 2a$	
St 42.12	„		42—50	25	20	15	Probe muß sich kalt zusammenschlagen lassen		Bei der Faltprobe dürfen beim Zusammenschlagen auf der Zugseite keine Risse auftreten
St 44.12	„		44—52	30	22	18	$2a$		
				24	20	15	$3a$		

St 38.13 St 34.13	Normalgüte Sondergüte Nietisen	Sohraubenisen nach DIN 1613 ¹	38—45 34—42	25 30	22 26	18 22	20 25	18 22	15 18	0,5 a Probe muß sich kalt zusammen- schlagen lassen	Bei der Faltprobe dürfen beim Zu- sammenschlagen auf der Zugseite keine Risse auf- treten	
												37—45 36 (quer zuge- lassen)
St 00.21	gewöhnliche Baubleche nach DIN 1621 ²		nicht gewähr- leistet				18	20		2 a		
St 37.21	Baubleche I ³							16	20	2 a		
St 42.21	Baubleche II								20	2 a		
Einsatz- und Vergütungsstähle nach DIN 1661 ²												
St C 10.61	Einsatzstahl	Flußstahl geschmiedet oder gewalzt	~ 38	30	25	21					Mangan höchstens 0,06 bis 0,13	Silicium höchstens 0,35 % 0,35 %
St C 16.61	„		~ 42	28	23	23					0,13 bis 0,20	0,4 % 0,35 %
St C 25.61	ausgeglüht vergütet	Flußstahl geschmiedet oder gewalzt	42—50 47—55	27 24	22 20	24 28					0,25	
St C 35.61	ausgeglüht vergütet		50—60 55—65	23 22	19 18	28 33					0,35	Silicium höch- stens 0,35 %
St C 45.61	ausgeglüht vergütet		60—70 65—75	19 18	16 15	34 39					0,45	
St C 60.61	ausgeglüht vergütet		70—85 75—90	15 14	13 12	40 45					0,60	

¹ Wiedergabe erfolgt mit Genehmigung des Deutschen Normenausschusses. Verbindlich ist die jeweils neueste Ausgabe des Normblattes im DIN-Format A 4, das durch den Beuth-Verlag G. m. b. H., Berlin S 14, Dresdener Straße 97 zu beziehen ist.

² Weitere Angaben siehe in den oben angegebenen DIN-Blättern.

³ Feinbleche (Stahlblech unter 3 mm) besondere Technische Lieferbedingungen DIN 1623.

h) Nitrierhärtung.

Werden mit Chrom oder Aluminium legierte Stähle bei etwa 500° C 50 h lang in Ammoniakstrom geglüht, so erfolgt eine Härtung der Oberfläche durch Nitrierung (Patente der Firma Fr. Krupp A.G., Essen). Die Tiefe der Härtung ist zwar gering, doch erzielt man spannungsfreie Werkstücke mit sehr großer Oberflächenhärte, die sehr verschleißfest und wesentlich korrosionsbeständiger sind als gewöhnliche ein-satzgehärtete Stähle.

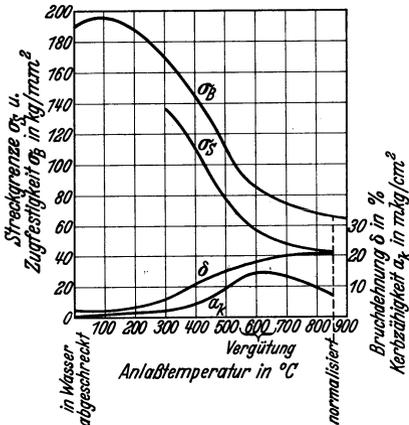


Abb. 37. Einfluß des Härtens und der Anlaßtemperatur auf die Festigkeitseigenschaften von Stahl mit 0,45 % C.

3. Geschmiedete Kohlenstoffstähle.

Unter Kohlenstoffstählen werden die unlegierten Stähle verstanden. Sie unterscheiden sich hauptsächlich durch den C-Gehalt und damit in ihren Festigkeitseigenschaften. Nach dem Grade ihrer Reinheit, insbesondere hinsichtlich des Schwefel- und Phosphorgehaltes, werden sie eingeteilt in Stähle einer Klasse A mit geringerer Reinheit und Güte und einer Klasse B, an die man hinsichtlich chemischer Reinheit und mecha-

nischer Festigkeitseigenschaften höhere Anforderungen stellt. Für höhere Anforderungen an Konstruktionsstähle werden noch unlegierte Sonderstähle geliefert, die besonders als Einsatz- und Vergütungsstähle verwendet werden. Die Anwendung der letzten Gruppe für sehr hohe Beanspruchungen kommt nur bei kleineren Schmiedestücken in Frage. Für schwere Stücke, an welche große Anforderungen gestellt werden, sind schwere Stähle zu verwenden.

Die Kohlenstoffstähle sind hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und ihrer Mindestwerte an Festigkeit und Dehnung genormt. Es empfiehlt sich daher, möglichst Stahl mit Normenbezeichnung zu bestellen. Dann ist die beste Gewähr gegeben, daß die Stahlwerke einen zuverlässigen Werkstoff mit den geforderten Eigenschaften liefern. Für die Zusammenstellungen (Tabelle 4, s. S. 492 und 493) sind die Normblätter DIN 1611, 1612, 1613, 1621 und 1661 zugrunde gelegt.

a) Unlegierte Kohlenstoffstähle Klasse A.

Schwefel- und Phosphorgehalt ist nicht gewährleistet, doch darf das Material weder kaltbrüchig noch rotbrüchig sein. Die Verwendung erfolgt hauptsächlich für Eisenkonstruktionen jeder Art. Die Stähle 00.11, 00.12, 00.21 dürfen nur für ganz untergeordnete Zwecke verwendet werden, bei denen keine wesentlichen Beanspruchungen auftreten. Zur Klasse A gehören weiterhin die Stähle 37.11 in rohgewalzten oder

geschmiedeten Stücken, Stahl 37.12 im gewalzten Zustand als Stab-, Form- und Breiteisen, ferner das normale Schraubeneisen Stahl 38.13 und die Baubleche Stahl 37.21 und Stahl 42.21. Diese Stähle finden eine mannigfache Verwendung für alle Konstruktionsteile, die keiner hohen Beanspruchung, insbesondere keinen Wechselbeanspruchungen ausgesetzt sind. Für höhere Beanspruchungen sind die Stähle der Klasse B zu wählen.

b) Unlegierte Kohlenstoffstähle Klasse B.
(Regelstähle für den Maschinenbau.)

Der Phosphor- und Schwefelgehalt darf nicht mehr als je 0,06%, zusammen jedoch nicht mehr als 0,1% betragen. Die mechanischen Eigenschaften gelten für den ausgeglühten — normalisierten — Zustand, der meist der Anlieferungszustand ist. Annähernd gleiche Eigenschaften sollen bereits beim gut durchgewalzten oder durchgeschmiedeten Werkstoff vorhanden sein.

Zu den Stählen der Klasse B gehören auch die Sondergüte für Form-, Stab- und Breiteisen und die Sondergüte des weichen Schraubeneisens St 34.13. Die Stähle St 34.11, 34.12, 34.13 haben zwar keine hohe Festigkeit, zeichnen sich aber durch hohe Zähigkeit aus. St 42.11 ist geeignet für größere Schmiedestücke und alle Konstruktionsteile bei denen infolge wechselnder Beanspruchung neben hoher Zähigkeit eine höhere Festigkeit verlangt werden muß. Stahl St 50.11 hat wegen seiner Härte eine bessere Verschleißfestigkeit und wird daher hauptsächlich für höher beanspruchte Triebwerksteile angewandt. Für größere Schmiedestücke (z. B. Wellen über 150 mm Durchmesser) ist er nicht geeignet. Stahl 60.11 ist für kleinere höher beanspruchte Konstruktionsteile zu empfehlen wie Paßstifte, Keile, Schnecken, Ritzel, Spindeln. Ist Zähigkeit erforderlich, so muß der Stahl vergütet werden. Stahl 70.11 wird nur für kleinere Teile angewandt, bei denen eine sehr hohe Härte erforderlich ist.

c) Die unlegierten Sonderstähle (DIN 1661).

Einsatz- und Vergütungsstähle. Bei hohen Ansprüchen an Festigkeit werden besonders reine Stähle verwandt. Zur Erzielung einer harten Oberfläche werden Stähle mit einem C-Gehalt bis 0,2% einsatzgehärtet (s. S. 33). Der weiche Kern gewährleistet eine hohe Zähigkeit. Die Stähle mit höherem C-Gehalt sind hochvergütbar. Der Schwefel- und Phosphorgehalt dieser Sonderstähle darf nicht mehr als 0,04%, zusammen nicht mehr als 0,07%, der Mangengehalt höchstens 0,8% und der Siliciumgehalt höchstens 0,35% betragen. Man verwendet diese Stähle im allgemeinen in gleicher Weise wie bei Stahl 34.11—70.11 angegeben, wenn neben genügender Festigkeit besondere Sicherheit gegen Stoßbeanspruchung erforderlich ist. Ihre größere Reinheit bedingt eine geringere Korrosionsempfindlichkeit. Besonders die Gefahr der Bildung von Lokalelementen ist geringer. Diese Stähle eignen sich bei geringerem C-Gehalt nur für kleinere Schmiedestücke. Große Stücke lassen sich nur in ungenügendem Maße härten und vergüten. Für solche Schmiedestücke müssen legierte Stähle gewählt werden.

Neben den in den Normen festgelegten Werten für Streckgrenze, Zugfestigkeit und Dehnung sind noch eine Reihe weiterer Eigenschaften für den Konstrukteur wichtig. Für hochbeanspruchte Konstruktionsteile ist vor allem eine gute Kerbzähigkeit notwendig. In Abb. 38 sind Streckgrenze, Zugfestigkeit, Dehnung, Bruchseinschnürung und Kerbzähigkeit für Konstruktionsstähle in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt dargestellt.

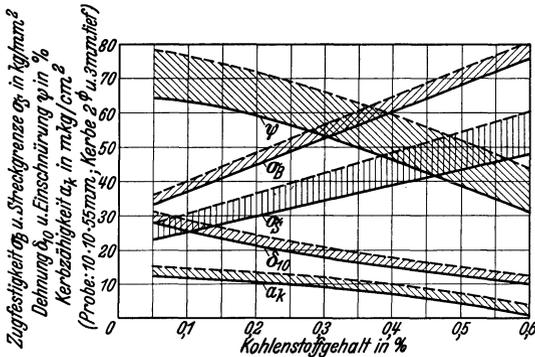


Abb. 38. Abhängigkeit der Festigkeitseigenschaften vom Kohlenstoffgehalt bei geschmiedeten Stählen. Die ausgezogenen Linien geben Durchschnittswerte, die gestrichelten Linien Spitzenwerte an.

zähigkeit für Konstruktionsstähle in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt dargestellt. Die durch gestrichelte Linien angegebenen Spitzenwerte wurden an KZ-Stahl (unlegierter Reduktionsstahl der Vereinigten Stahlwerke) gemessen.

Abb. 39 enthält Angaben über die Dauerbiegefestigkeit von Kohlenstoffstählen nach Versuchen der Materialprüfungsanstalt Darmstadt. Über die

Abhängigkeit der Festigkeitseigenschaften von den Temperaturen gibt Abb. 40 auf Grund von Versuchen des Kaiser-Wilhelm-Institutes für Eisenforschung Düsseldorf und der Materialprüfungs-

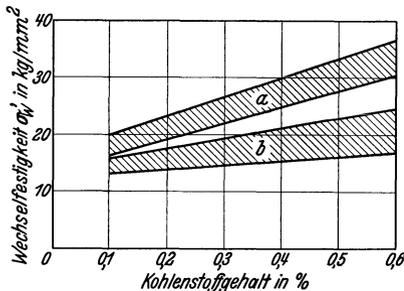


Abb. 39. Wechselbiegefestigkeit von Kohlenstoffstählen ermittelt an geschliffenen (a) und gekerbten Proben (b) bei umlaufender Biegung.

anstalt Darmstadt Aufschluß. Bei Stählen mit höherem Kohlenstoffgehalt ändern sich die Festigkeitswerte etwa im gleichen Verhältnis. Die Warmzugfestigkeit und die Warmstreckgrenze geben im allgemeinen keine zuverlässigen Anhaltspunkte über die Warmfestigkeit. Maßgebend hierfür ist die Dauerstandfestigkeit (s. S. 476, Abb. 24). Die Dauerstandfestigkeit hängt wesentlich von der Gefügeausbildung ab. Bei streifigem Perlit ist sie höher als bei körnigem Perlit. Über 450° C nimmt bei hochgekohten Stählen

die Dauerstandfestigkeit verhältnismäßig noch stärker ab. Bei 600° C beträgt sie auch bei hochgekohten Stählen nicht mehr als ~ 1 kg/mm².

4. Legierte Stähle.

a) Nickelstähle und Chromnickelstähle.

Bei höchsten Anforderungen an Festigkeit, Widerstandsfähigkeit gegen Stöße, hohe Temperaturen, Verschleiß und Korrosion müssen legierte Stähle verwandt werden. Als Baustähle sind die wichtigsten

die Nickel- und Chromnickelstähle. Der Vorzug dieser Stähle liegt in der Erhöhung der Festigkeit, ohne daß die Zähigkeit wesentlich erniedrigt wird, ferner besonders in der Erniedrigung der kritischen Abkühlungsgeschwindigkeit. Dadurch wird erreicht, daß auch bei größeren Schmiedestücken eine gute Vergütung größerer Querschnitte erzielt wird, was bei unlegierten Stählen nicht möglich ist.

Eine Reihe dieser Stähle sind genormt (DIN 1662, s. Tabelle 5). Man unterscheidet zwei Gruppen: die Einsatzstähle (Kennzeichen E) mit höchstens 0,18% C und die Vergütungsstähle (Kennzeichen V) mit 0,25—0,40% C. Die Legierungsbestandteile werden in der Markenbezeichnung durch C (Chrom) und N (Nickel) gekennzeichnet. Der Nickelgehalt wird in der 10fachen Menge angegeben. So heißt also VCN 25: Vergütungsstahl mit Cr und 2,5% Ni legiert.

Diese Stähle zeichnen sich durch eine verhältnismäßig hohe Streckgrenze und hohe Kerbzähigkeit namentlich in vergütetem Zustand aus. Chromnickelstähle werden zweckmäßig noch mit 0,2—0,3% Molybdän legiert, um der bei großen Schmiedestücken durch Chrom zuweilen auftretenden Anlaßsprödigkeit entgegenzuwirken.

Neben diesen genormten Stählen werden eine Reihe Nickelstähle viel verwendet. Für Einsatzhärtung kommen hauptsächlich Stähle mit 0,1—0,18% C und 1—5% Ni und als Vergütungsstähle solche mit 0,25—0,40% C und 1—5% Ni in Betracht, deren günstige Festigkeitseigenschaften vielseitigste Verwendung ermöglichen (s. Tabelle 6).

Mit zunehmendem Nickel- und besonders Chromgehalt wird die chemische Beständigkeit erheblich verbessert. Praktisch rostsicher sind Stähle mit 12—16% Chrom und etwa 0,5—2% Nickel (s. Tabelle 12). Sie sind auch recht beständig gegen Salpetersäure und manche organischen Säuren wie Essig-, Citronen- und Weinsäure. Die beste chemische Widerstandsfähigkeit haben die austenitischen Stähle mit 18 bis 25% Chrom, 8—9% Nickel und etwa 0,15% Kohlenstoff. Sie sind ein wichtiges Konstruktionsmaterial für die chemische Großindustrie (s. S. 505).

b) Molybdän-, Wolfram- und Vanadinstähle.

Molybdän wirkt schon in sehr geringen Zusätzen (0,15—0,4% Mo) sehr günstig auf die Festigkeitseigenschaften, namentlich auf die Kerb-

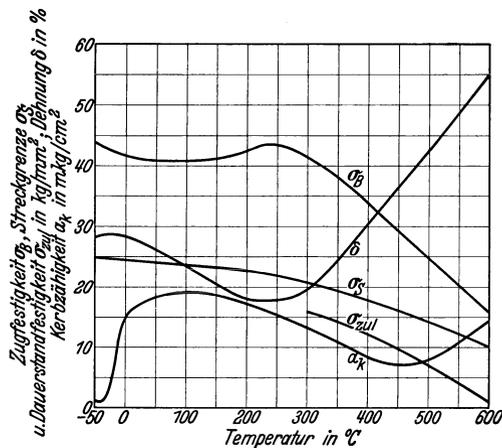


Abb. 40. Einfluß der Temperatur auf die Festigkeitseigenschaften von Kohlenstoffstahl mit 0,25% C.

Tabelle 5. Nickel- und Chromnickelstähle für mechanisch hochbeanspruchte Teile (Auszug aus DIN 1662)¹.

Markenbezeichnung	geglüht		gehärtet bzw. vergütet		Chemische Zusammensetzung in %						
	Brinellhärte H kg/mm ² höchstens	Zugfestigkeit kg/mm ² höchstens	Zugfestigkeit σ_B kg/mm ²	Streckgrenze σ_s in % der Zugfestigkeit mindestens	Bruchdehnung in % mindestens ²		Kohlenstoff C	Nickel Ni	Chrom Cr	Mangan Mn	Silicium Si höchstens
					δ_5	δ_{10}					
EN 15	162	55	60—80 (Wasser)	65	20—10	15—8	0,10—0,17	1,5 ± 0,25	höchstens 0,2	höchstens 0,5	0,35
ECN 25	206	70	80—100 (Öl) 90—110 (Wasser)	70 (Öl) 75 (Wasser)	20—14 (Öl) 16—10 (Wasser)	14—10 (Öl) 12—7 (Wasser)	0,10—0,17	2,5 ± 0,25	0,75 ± 0,2	höchstens 0,5	0,35
ECN 35	220	75	90—120 (Öl)	75	16—9	12—6	0,10—0,17	3,5 ± 0,25	0,75 ± 0,2	höchstens 0,5	0,35
ECN 45	240	83	120—140 (Öl)	75	14—7	10—5	0,10—0,17	4,5 ± 0,25	1,1 ± 0,2	höchstens 0,5	0,35
					Einsatzstähle						
VCN 15w	206	70	65—75	65	24—18	16—13	0,25—0,32	1,5 ± 0,25	0,5 ± 0,2	0,4—0,8	0,35
VCN 15h	206	70	75—85	70	22—16	15—12	über 0,32—0,40	1,5 ± 0,25	0,5 ± 0,2	0,4—0,8	0,35
VCN 25w	220	75	70—85	70	20—14	14—10	0,25—0,32	2,5 ± 0,25	0,75 ± 0,2	0,4—0,8	0,35
VCN 25h	220	75	80—95	70	16—10	12—8	über 0,32—0,40	2,5 ± 0,25	0,75 ± 0,2	0,4—0,8	0,35
VCN 35w	235	80	75—90	75	20—14	14—10	0,20—0,27	3,5 ± 0,25	0,75 ± 0,2	0,4—0,8	0,35
VCN 35h	235	80	90—105	75	16—10	12—8	über 0,27—0,35	3,5 ± 0,25	0,75 ± 0,2	0,4—0,8	0,35
VCN 45	265	90	100—115	80	15—9	10—6	0,30—0,40	4,5 ± 0,25	1,3 ± 0,2	0,4—0,8	0,35
					Vergütungsstähle						

¹ Wiedergabe erfolgt mit Genehmigung des Deutschen Normenausschusses. Verbindlich ist die jeweils neueste Ausgabe des Normblattes im DIN-Format A 4, das durch den Beuth-Verlag, G. m. b. H., Berlin S 14, Dresdener Straße 97 zu beziehen ist.

² Der niedrigste Dehnungswert entspricht dem Stahl mit höchster Zugfestigkeit und umgekehrt. Dazwischenliegende Werte werden durch Interpolation ermittelt.

Tabelle 6. Festigkeitseigenschaften einiger legierter Baustähle.

Chemische Zusammensetzung in %							Wärmebehandlung	H ₂ -% der Zugfestigkeit	Zugfestigkeit σ_B kg/mm ²	Dehnung δ_{10} %	Kerbzähigkeit a_k mkg/cm ²	Bemerkungen
C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V						
0,09—0,18	0,2—0,3	0,4—0,5	3—3,5	—	—	—	gegüht	60	45—55	25—20	40—30	Einsatzstahl Kernfestigkeit nach Oertel
0,25—0,35	0,2—0,3	0,4—0,6	2,9—3,3	—	—	—	gehärtet gegüht zäh vergütet hart vergütet	70 60 70 85	115—130 65—75 75—85 85—95	9—6 20—15 16—10 12—9	30—25 17—12 35—25 25—15	
0,25—0,35	0,2—0,3	0,6—0,8	4,9—5,3	—	—	—	gegüht vergütet	60 70	75—85 80—95	17—13 17—12	22—14 35—25	Rapatz
0,25—0,40	0,2—0,3	0,4—0,6	—	0,8—1,2	—	—	gegüht vergütet	60 70	70—80 80—100	20—15 15—11	—	
0,25—0,40	< 0,40	0,4—0,7	—	0,9—1,2	0,15—0,3	—	zäh vergütet hart vergütet	75 80	80—95 95—110	13—10 11—9	15—12	entspricht VCN 35, für sehr große Stücke
0,30—0,40	< 0,35	0,4—0,7	3—4	0,9—1,2	0,2—0,4	—	zäh vergütet hart vergütet	75 75	75—90 90—105	14—10 12—8	—	
0,25—0,40	< 0,40	0,4—0,7	—	0,9—1,2	—	0,10 bis 0,20	entspricht dem Chrom-Molybdänvergütungsstahl, Kerbzähigkeit geringer	entspricht dem Chrom-Molybdänvergütungsstahl, Kerbzähigkeit geringer	150—165	6—4	—	für kleine Teile hoher Festigkeit
0,40—0,50	< 0,40	0,6—0,9	—	0,9—1,2	—	0,10 bis 0,20	hart vergütet	80	—	—	—	
0,37	—	1,70	—	—	—	—	zäh vergütet hart vergütet bei 1020° C in Wasser abgeschreckt	75—80 75—80 40	82 100 107	17 10 $\delta_2 = 68$	—	hoch verschleißfest
0,9—1,3	—	13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

32*

Vgl. ferner Tabelle 5, genormte Nickel- und Chromnickelstähle. Ausführliche Angaben über Baustähle im Werkstoffhandbuch: Stahl und Eisen, Verlag Stahleisen, Düsseldorf.

Schmitz nach

zähigkeit. Die Schweißbarkeit von Molybdänstählen ist besonders gut. Daher werden diese Stähle hauptsächlich für Hochdruckbehälter verwandt. Auch für Baustähle werden Chrom-Molybdänstähle zuweilen als Ersatz für Chrom-Nickelstähle verwandt. In den Chrom-Molybdän- und Chrom-Nickel-Molybdänstählen wird die Durchhärtung durch den Zusatz des Molybdäns verbessert. Außerdem hat Molybdän den Vorzug, daß Anlaßsprödigkeit beim Vergüten vermieden wird. So können aus diesen mit Molybdän legierten Stählen bei sorgfältiger Wärmebehandlung große Schmiedestücke ohne Eigenspannungen hergestellt werden (Festigkeitswerte s. Tabelle 6). Gleiche Eigenschaften wie Molybdän zeigt Wolfram, das Chrom-Nickelbaustählen mit etwa 0,8—1% zugesetzt wird.

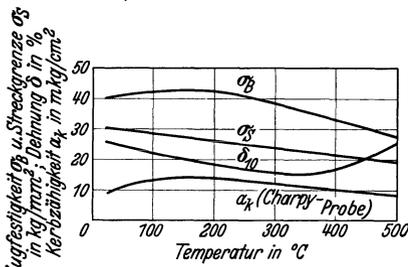


Abb. 41. Vanadinstahl mit 0,1—0,2% C, 0,15—0,25% V, 0,5—0,8% Mn. Festigkeitseigenschaften bei erhöhter Temperatur. [Nach Pohl: Vanadinstähle, Werkstoffhandbuch Stahl u. Eisen, H 51.]

Vanadinstähle sind noch wenig in Anwendung. Der Vorzug des Vanadiums liegt in der guten Desoxydation im Siemens-Martinofen. Bei höheren Temperaturen (400 bis 500° C) liegen Elastizitätsgrenze, Streckgrenze, Zugfestigkeit und Kerbzähigkeit verhältnismäßig hoch. Reine Vanadinstähle mit 0,15—0,25% V und 0,1—0,2% C ergeben hochwertige Kesselbaustoffe für höhere Betriebstemperaturen. In Abb. 41 sind die Festigkeitseigenschaften eines Vanadinstahles

in Abhängigkeit von der Temperatur wiedergegeben. Chrom-Vanadinstähle werden als Baustähle nur für kleinere Abmessungen verwandt, da sonst die Durchhärtung ungenügend ist.

c) Manganstähle und Siliciumstähle.

Diese zeichnen sich durch hohe Streckgrenze im Verhältnis zur Zugfestigkeit aus. Die perlitischen Manganstähle mit 0,4% C und 0,8 bis 1,4% Mn werden als Baustähle für Radreifen, Achsen, Kurbelwellen verwandt, für die hohe Festigkeit verlangt wird. Im allgemeinen sind jedoch die Chrom-Nickelstähle wegen ihrer hohen Kerbzähigkeit besser. Stähle mit 0,6—0,7% C und 1,0—1,2% Mn eignen sich für Federn.

Die wichtigsten Manganstähle sind die hochprozentigen mit 0,9—1,3% C und 12—14% Mn. Durch Abschrecken von etwa 950—1050° C erhält man austenitisches Gefüge, das dem Stahl neben hoher Festigkeit große Zähigkeit und höchste Verschleißfestigkeit verleiht. Die Bearbeitbarkeit dieser Stähle ist sehr gering, sie lassen sich meist nur schleifen. Der hochprozentige Manganstahl wird deshalb vielfach als Stahlformguß verarbeitet. Er wird überall dort mit Vorteil verwandt, wo es auf hohen Abnutzungswiderstand ankommt, wie bei Steinbrechern, Preßformen, Preßstempeln, Kugelmühlen, Sichtern und Siebblechen (Festigkeitswerte s. Tabelle 6, unten).

Siliciumstähle werden hauptsächlich als Silicium-Manganstähle hergestellt. Sie werden als hochwertige Baustähle für Eisenkonstruktionen

mit etwa 0,1% C, 0,8—1,2% Si, 0,5—1,0% Mn hergestellt. Bemerkenswert ist ihre hohe Streckgrenze. Mn-Si-Stähle finden als Federn mit etwa 1,2% Si und 1,2% Mn weitgehende Verwendung.

5. Stahlguß.

Für Konstruktionsteile von schwieriger Formgebung wird der Stahl in Formen vergossen. Es gelingt heute ohne Schwierigkeit, auch ganz große Stücke von vielen t Gewicht einwandfrei zu gießen, wobei Festigkeits- und Zähigkeitswerte erzielt werden, die nahe an diejenigen von Schmiedestücken heranreichen. Vorbedingung für einen einwandfreien Stahlguß ist richtige Konstruktion. Oberster Grundsatz ist möglichst gleiche Wandstärke und Vermeidung scharfer Querschnittsübergänge. Andernfalls sind Hohlräume (Lunker) und Spannungen, die zu Rissen führen können, unvermeidlich.

Nach dem Vergießen ist der Stahlguß noch nicht verwendungsfähig. Die grobe Gußstruktur ist sehr spröde. Der Stahlguß muß ausgeglüht werden. Das Ausglühen erfolgt bei Temperaturen über der oberen Umwandlungslinie (s. Abb. 32). Zum Glühen sind mindestens 2 h erforderlich. Bei dickeren Stücken muß mit wesentlich längeren Glühzeiten gerechnet werden (2 h + 2 min je mm Dicke). Nach DIN 1681 sind folgende Güteklassen von unlegiertem Stahlguß genormt:

Tabelle 7. Stahlguß.

Güteklasse nach DIN 1681	Streckgrenze	Zugfestigkeit	Bruch- dehnung	Kerbzähigkeit (nach den Richtlinien der Vereinigung der Großkessel- besitzer, Probenform Tab. 2)
	σ_S kg/mm ² mindestens	(nach DIN 1681) σ_B kg/mm ² mindestens	δ_5 % mindestens	
Stg 38.81	—	38	20	bis $\sigma_B = 45$ $a_k \geq 6$ mkg/cm ² über $\sigma_B = 45$ $a_k \geq 4$ mkg/cm ²
Stg 45.81		45	16	
Stg 52.81		52	12	
Stg 60.81		60	8	
Stg 38.81 S	18	38	25	
Stg 45.81 S		45	22	
Stg 52.81 S		52	16	

Auch legierter Stahl wird als Stahlformguß für komplizierte Stücke geliefert, bei denen höchste Festigkeit verlangt wird, so insbesondere der hochprozentige Mn-Stahl, ferner Chrom-, Nickel-, Molybdänstahl und die hochlegierten austenitischen nichtrostenden Stähle. (Über Warmfestigkeit von Stahlguß s. Tabelle 14, S. 508.)

6. Stähle für besondere Verwendungszwecke.

a) Behälterbleche und Rohre.

Für Dampf- und Gasbehälter werden entweder Stahlbleche verwandt, die durch Niete oder Schweißen verbunden werden, oder es werden

nahtlos geschmiedete Trommeln hergestellt, wie sie namentlich in der chemischen Hochdrucktechnik verwandt werden. Für die Kesselbaustoffe sind nach den Beschlüssen des Deutschen Dampfkesselausschusses vier Blechsarten vorgeschrieben [Werkstoff- und Bauvorschriften für Landdampfkessel, Ausgabe September 1929, Beuth-Verlag Berlin]:

I	35—44 kg/mm ²	} für Bleche, die in der ersten Feuerzone liegen oder gebördelt werden in Ausnahmefällen für gebördelte Bleche für Mantelbleche.
II	41—50 kg/mm ²	
III	44—53 kg/mm ²	
IV	47—56 kg/mm ²	

Eine besondere Gefahr bildet bei Kesselblechen die Alterung (s. S. 474, 488). Für hoch beanspruchte Kessel werden daher vielfach alterungsbeständige Stähle vorgeschrieben. Diese Stähle zeigen auch nach erfolgter Kaltreckung und Anlassen auf 200—300° C noch verhältnismäßig hohe Kerbzähigkeitswerte. In Tabelle 8 sind die nach den Werkstoffvorschriften für Landdampfkessel und den Richtlinien der Vereinigung der Großkesselbesitzer vorgeschriebenen Dehnungswerte für Kesselbleche wiedergegeben. Die Probeentnahme erfolgt bei Kesselblechen quer zur Walzrichtung. Die Proben werden am Kopf und am Fußende entnommen.

Tabelle 8. Mindestdehnung für Kesselbleche.

(Nach den Richtlinien für die Anforderungen an den Werkstoff und Bau von Hochleistungsdampfkesseln, herausgegeben von der Vereinigung der Großkesselbesitzer e. V.)

Festigkeit in kg/mm ²		Mindestdehnung in % (Meßlänge 200 mm)									
		≥ 35	≥ 36	≥ 37	≥ 41	≥ 43	≥ 44	≥ 45	≥ 46	≥ 51	≥ 53
Proben- querschnitt	bis 500 mm ²	27	26	25	24	23	22	21	20	18	18
	über 500—1000 mm ²	29	28	27	26	24	23	22	21	19	18
	„ 1000—1500 mm ²	30	29	28	27	25	24	23	22	20	20
	„ 1500—2000 mm ²	31	30	29	28	26	25	24	23	21	20

Alterungsbeständige Kesselbaustoffe müssen frei von Sauerstoff sein. Dies wird durch sorgfältige Desoxydation (IZ-Stahl) oder durch besondere Reduktion im Siemens-Martinofen (KZ-Stahl) erreicht. Auch mit Nickel, Vanadium und Molybdän legierte Stähle zeigen günstige Alterungsbeständigkeit und sind daher für Hochdruckkessel geeignet.

Legierte Sonderwerkstoffe. Bei hohen Beanspruchungen werden mit Nickel, Vanadium und Molybdän legierte Bleche verwandt. Nickelstahl mit etwa 0,1—0,2% C und 2—5% Ni wird vielfach vergütet. Er läßt sich nicht feuerschweißen. Dagegen sind Vanadin- und Molybdänstahlbleche sehr gut schweißbar. Vanadinstahlbleche mit 0,1—0,2% C und 0,15—0,25% V sind nur geglüht zu verwenden (s. Tabelle 9). Für Höchstdruckbehälter geht man neuerdings über die Festigkeitswerte der üblichen Dampfkesselbleche hinaus und wendet Stähle bis 70 kg/mm² Zugfestigkeit an.

Über Warmfestigkeit von Vanadinstählen siehe S. 500.

Tabelle 9. Festigkeitseigenschaften einiger legierter Kesselbaustoffe.

Blechsorte	Chemische Zusammensetzung in %						Glühzu-stand	Streckgrenze σ_S kg/mm ²	Zugfestigkeit σ_B kg/mm ²	Dehnung δ_{10} %	Kerbzähigkeit a_k mkg/cm ²
	C	Mn	Si	Ni	Mo	V					
2% Nickelstahl	0,10	~0,5	~0,2	2			geglüht	28,5	44	28	18
3% Nickelstahl	0,12	0,6	0,2	3,2			„	33,4	50,2	22,3	15,8
5% Nickelstahl	0,11	0,6	0,1	4,9			„	39,5	59,8	20,5	14,0
Vanadinstahl ¹	0,10	0,5				0,15	„	30	41	25	
	bis	bis				bis					
	0,20	0,8				0,25					
Molybdänstahl	0,14	0,43	0,32	0,20	0,30		„	28,7	47,0	25,6	

Für Siederohre, Verdampferrohre werden nur nahtlos gezogene Rohre verwandt. Als Rohrwerkstoff wird in der Regel weicher Flußstahl verwandt. Für Rohre sind die in Tabelle 10 enthaltenen Werte maßgebend.

Tabelle 10. Vorschriften für Wasser- und Ankerrohre nach den Richtlinien des Deutschen Dampfkesselausschusses vom 11. Februar 1931.

Zugfestigkeit σ_B kg/mm ²	Dehnung δ_{10} %		Aufweitversuch in % des Innendurchmessers, ohne daß Risse auftreten bei einer Rohrwanddicke		Für legierten Stahl gelten dieselben Mindestwerte. Weitere Prüfungen: Wasserdruckversuch mindestens 50 kg/cm ² sonst 2facher Betriebsdruck, Bördelversuch: legierter Stahl um 60°, Flußstahl um 90°, Abschreckbiegeprobe, Ringprobe
	quer	längs	bis 4 mm	über 4 mm	
35—45	18	20	10	6	
45—55	15	17	8	5	

Tabelle 11. Nahtlose Flußstahlrohre nach DIN 1629.

I. Rohre Klasse A und B für einfache Konstruktionsrohre sowie Leitungsrohre bis Nenndruck 25 und für Temperaturen bis 300°. Markenbezeichnung St 00.29, Gütezahlen bezüglich Zugfestigkeit und Bruchdehnung werden nicht gewährleistet.

II. Rohre mit Gütevorschriften (s. Tabelle).

Wasserdruckversuch in Höhe des 1½fachen Nenndruckes, mindestens 60 kg/cm²; ferner Aufweitversuch, Bördelversuch².

Legierte Rohrwerkstoffe werden für Höchst-

Tabelle 11.

Markenbezeichnung des Werkstoffes	Zugfestigkeit σ_B kg/mm ²	Bruchdehnung mindestens %		Querfaltversuch: Zusammendrücken der Probe bis auf eine Spaltbreite bezogen auf die Probendicke a
		δ_5	δ_{10}	
St 35.29	35—45	25	20	2 a
St 45.29	45—55	21	17	4 a
St 55.29	55—65	17	14	6 a
St 65.29	65—75	12	10	7 a

¹ Nach Pohl: Werkstoffhandbuch Stahl und Eisen.

² Ausführliche Angaben in den Normblättern DIN 1628 bzw. DIN 1629, zu beziehen durch den Beuth-Verlag, Berlin.

druckanlagen und im Dampfkesselbau verwandt. In Betracht kommen namentlich 1—2%ige Nickelstähle und niedriglegierte Molybdänstähle, bei hohen Temperaturen Sicromal.

Großrohrleitungen für Gasleitungen und Flüssigkeitsleitungen werden aus Röhrenblechen (DIN 1628) hergestellt und wassergas-überlappt geschweißt oder auch elektrisch geschweißt. Festigkeitsvorschrift für Röhrenblech St 34.28. Zugfestigkeit 34—45 kg/mm², Bruchdehnung δ_k mindestens 25%, δ_l mindestens 20% ¹.

b) Korrosionsbeständige Stähle.

Gewöhnliche Kohlenstoffstähle sind gegen chemische Angriffe nur in geringem Maße beständig. Äther, reines Benzin und Benzol, kohlenstoffhaltige Gase bei niederen Temperaturen und Drücken, trockener Sauerstoff bei Raumtemperatur, Stickstoff, Zement greifen nicht an. Stark wird Stahl durch Säuren, besonders Salzsäure angegriffen. Zum Schutz gegen Korrosion müssen deshalb Kohlenstoffstähle mit Schutzanstrichen oder Überzügen versehen werden (s. S. 545). Gegen atmosphärische Korrosion schützt wesentlich sorgfältige Oberflächenbearbeitung (Polieren, Schleifen). Von den legierten Stählen zeichnen sich die kupferlegierten Stähle durch Wetterbeständigkeit, die hochlegierten Chromstähle und Chromnickelstähle durch erhöhte Korrosionsicherheit aus. Man unterscheidet zwei Hauptgruppen der nichtrostenden Stähle, die hochlegierten Chromstähle und die austenitischen Chromnickelstähle.

Die hochlegierten Chromstähle sind nur in feingeschliffenem Zustande praktisch rostsicher. Verwandt werden die in Tabelle 12 angegebenen vier Gruppen.

Tabelle 12. Festigkeitseigenschaften der hochlegierten Chromstähle.

Gruppe	Chemische Zusammensetzung		Glühzustand	Streckgrenze σ_S kg/mm ²	Zugfestigkeit σ_B kg/mm ²	Dehnung δ_{10} %	Kerbzähigkeit a_k mkg/cm ²
	Cr %	C %					
I	4—6	0,08—0,2	vergütet	35—40	55—65	20—15	~ 12
II	12—14	0,1	geglüht	30—35	50—60	20—15	~ 12
	12—14	0,1	vergütet	45—65	60—80	17—12	~ 12
III	12—14	0,3	geglüht	35—45	60—70	17—10	~ 8
			gehärtet vergütet	60—80	125—150 80—100	15—10	~ 10
IV ²	25	0,25 0,6 Mo	} vergütet bei 780° in Wasser ab- geschreckt	37—45	55—63	18—35	
	29	0,10 1,5 Mo		40—48	57—65	15—25	

¹ Siehe Note 2, S. 503.

² Nach Hengler: Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 1934, 1164.

Gruppe I wird verwandt für hoch beanspruchte Konstruktionsteile, die schwachen chemischen Angriffen ausgesetzt sind. Durch Zusatz von 0,3% Mo werden diese Stähle sehr temperaturbeständig und sind besonders beständig gegen Wasserstoff bei höheren Drücken und Temperaturen. Gruppe II, meist mit 0,5—2% Ni und 0,3% Mo legiert, wird in der Salpetersäureindustrie und in Ammoniakanlagen verwandt. Die Stähle sind sehr gut verarbeitbar, Bleche lassen sich tiefziehen und bördeln. Festigkeit bei erhöhten Temperaturen siehe Abb. 42. Die Stähle der Gruppe III mit 0,2—0,4% C, meist auch 0,5—2% Ni und 0,3—0,5% Mo sind wegen des höheren Kohlenstoffgehaltes geringer korrosionsbeständig; sie werden für mechanisch sehr hoch beanspruchte Teile in Zerkleinerungs-

und Mischmaschinen angewandt. Die Stähle der Gruppe IV mit sehr hohem Chromgehalt (24—32% Cr) übertreffen die vorgenannten noch hinsichtlich der Korrosionsbeständigkeit, sie sind gegen mäßig konzentrierte heiße Salpetersäure, gegen schwache Salzsäure und Schwefelsäure, Salzlösungen und manche organischen Säuren genügend beständig.

Die hochlegierten Chrommolybdänstähle zeichnen sich auch durch eine gute Dauerstandfestigkeit bei 400—500° C aus.

Die austenitischen Stähle mit 18—25% Cr und 7—12% Ni, 0,1—0,4% C (Krupp VA-Stähle) sind die chemisch widerstandsfähigsten und finden im chemischen Apparatebau sehr weitgehende Anwendung. Im metallisch blanken Zustand sind sie gegen Atmosphäre unbedingt rostsicher. Sie sind beständig gegen Buttersäure, Essigsäure, Salpetersäure, kalte Schwefelsäure und schweflige Säure, nitrose Gase, eine Reihe Mischsäuren und Säure-Salzmischungen, Phosphorsäure, Phosphorsäureanhydrid, Fettsäuren, Gerbsäuren, Carbolsäure, kalte Ameisensäure, Milchsäure, Oxalsäure, Weinsäure, Citronensäure, Ammoniak, Kalilauge, Natronlauge, eine große Zahl von Salzlösungen wie Nitrate, Chloride und Sulfate, Kaliumcarbonat, Natriumcarbonat. Dementsprechend ist auch die Anwendung der VA-Stähle im chemischen Apparatebau sehr vielseitig, so für Autoklaven, Destillierapparate, Säuretürme, Säurefässer, Eindampfapparate, Rohrleitungen, Säurepumpen, Ventile, Rührwerke, Zentrifugen, Ventilatoren, Tanks und Bottiche. Salzsäure und heiße Schwefelsäure greifen diese Stähle dagegen stark an.

Die austenitischen Stähle sind durch thermische Behandlung nicht härtbar. Doch kann man durch Kaltbearbeitung (Walzen, Hämmern)

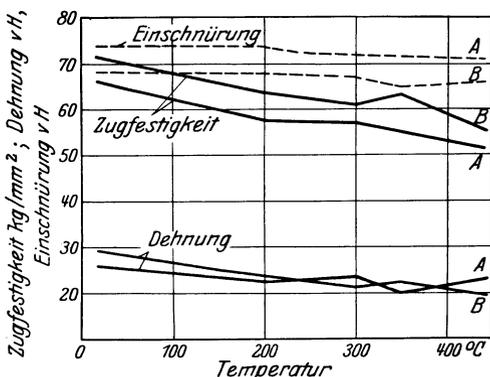


Abb. 42. Festigkeitseigenschaften nichtrostender Stähle. A 0,07% C, 11,9% Cr, 0,28% Ni; B 0,16% C, 13% Cr, 0,31% Ni; beide Stähle gehärtet und bis 500° C angelassen.

[Aus Monypenny-Schäfer: Rostfreie Stähle. Berlin: Julius Springer 1928.]

größere Härte erreichen. Dadurch soll allerdings die Rostbeständigkeit etwas beeinträchtigt werden. Die höchste Korrosionsfestigkeit wird erzielt durch Glühen bei 1000—1200° C und Abschrecken in warmen



Abb. 43. Austenitgefüge von nichtrostendem V2A-Stahl. Vergr. 200fach.

Wasser oder Öl (s. Tabelle 13). Abb. 43 zeigt das typische homogene Mischkristallgefüge dieser austenitischen Stähle.

Tabelle 13. Kruppsche VA-Stähle. Zusammensetzung: 18—20% Chrom, 8—9% Nickel, 0,1—0,4% Kohlenstoff.
(Nach Angaben der Friedr. Krupp A.G., Essen.)

Marke	Verwendungszweck	Streckgrenze ¹ kg/mm ²	Zugfestigkeit kg/mm ²	Dehnung		Querkontraktion %	Kerbzähigkeit a_k mkg/cm ²	Vergütungstemperatur in Wasser ablöschen bei ° C
				δ_5 %	δ_{10} %			
V2A-Extra	für weiche Bleche mit hoher Tiefziehfähigkeit zum Pressen, Ziehen, Drücken	20	60	60	50	60	> 12	1050—1100
V2A-N		20	60	60	50	60	> 12	1050—1150
V2A-H	Harte Qualität mit höherer Streckgrenze und hoher Verschleißfestigkeit	30	65	40	30	45	> 12	930— 980
V2A-S		35	75	35	25	40	> 12	1050—1150
V4A-Extra		22	60	50	40	50	> 12	1150—1200

V2A-N und V2A-S müssen noch nach dem Schweißen vergütet werden, bei V2A-Extra und V2A-H ist eine Nachbehandlung nicht erforderlich.

Bei hohen Temperaturen verhalten sich VA-Stähle ebenfalls günstig. Bei 1000° C ist die Verzunderung noch sehr gering. In Abb. 44 und 45

¹ Für Stangenmaterial, bei Blechen ist die Streckgrenze etwa 10% höher.

sind Streckgrenze, Zugfestigkeit und Dehnung in Abhängigkeit von der Temperatur bei hartem und weichem VA-Stahl dargestellt.

c) Warmfeste und hitzebeständige Stähle.

Unter warmfesten Stählen versteht man solche Stähle, welche bei höheren Temperaturen noch größere Beanspruchungen aufnehmen können. Als hitzebeständig werden Stähle bezeichnet, die bei Temperaturen über 900° C durch Abbrand nicht wesentlich zerstört werden. Beide Eigenschaften, gute Warmfestigkeit und Hitzebeständigkeit, sind bisher völlig befriedigend noch bei keinem Stahl erreicht worden. Besondere Schwierigkeiten bereitet die Warmfestigkeit bei Temperaturen über 600° C. Warmzugversuche ergeben zwar bei einer Reihe von Stählen noch recht günstige Werte. Doch haben Dauerstandversuche, bei denen erst das wahre Verhalten erkannt wird, nur bei sehr wenigen hochlegierten Stählen einigermaßen befriedigende Werte ergeben. Versuche von A. Thum und H. Holdt an einer Reihe üblicher legierter Konstruktionsstähle zeigten, daß die Dauerstandfestigkeit über 500° C rasch abnimmt und bei 600° C höchstens noch 1—2 kg/mm² beträgt. Die ermittelten Werte scheinen jedoch die untersten Grenzen zu sein, bei der Werkstoffe im Betrieb beansprucht werden können. Neuere Versuche lassen vermuten, daß Stellen höchster Beanspruchung wie Kerbe, Querschnittsübergänge durch räumliche Spannungszustände versteift sind und weniger kriechen.

Versuche am Kaiser-

Wilhelm-Institut für Eisenforschung [Pomp u. Enders: Zur Bestimmung der Dauerstandfestigkeit im Abkürzungsverfahren. Mitt. Kais.-Wilh.-Inst. Eisenforsch., Düsseld. 12, Lief. 10] lassen den Schluß zu, daß für Temperaturen bis 500° C die hochprozentigen Chromstähle und Chrom-Molybdänstähle gute Warmfestigkeit zeigen. Über 450° C

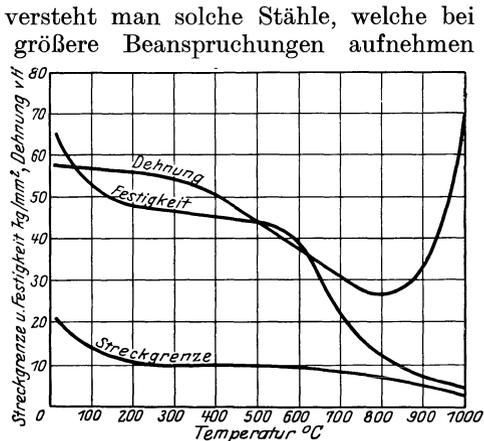


Abb. 44. Streckgrenze, Zugfestigkeit und Dehnung von weichem V 2 A-Stahl bei erhöhten Temperaturen. [Aus Monypenny-Schäfer: Rostfreie Stähle. Berlin: Julius Springer 1928.]

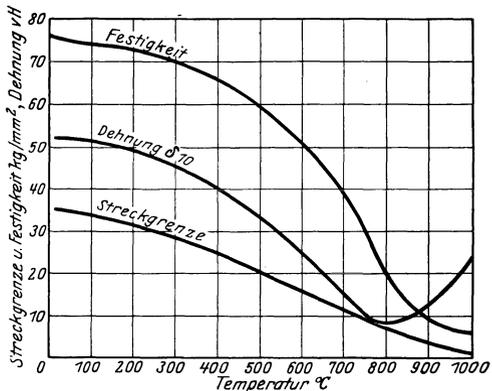


Abb. 45. Festigkeitseigenschaften von V 2 A-Stahl bei erhöhten Temperaturen (vgl. auch Abb. 44).

Tabelle 14. Festigkeitswerte verschiedener Stähle bei erhöhten Temperaturen.

Temperatur	20° C		400° C			500° C			600° C			nach Angaben von		
	Streckgrenze kg/mm ²	Zugfestigkeit kg/mm ²	Dehnung %	Streckgrenze kg/mm ²	Zugfestigkeit kg/mm ²	Dauerstand- festigkeit kg/mm ²	Streckgrenze kg/mm ²	Zugfestigkeit kg/mm ²	Dauerstand- festigkeit kg/mm ²	Streckgrenze kg/mm ²	Zugfestigkeit kg/mm ²		Dauerstand- festigkeit kg/mm ²	
Unlegiert mit 0,06 % C geschmiedet	23,9	36,3	30,9	11,7	30,5	9,5	8,1	18,0	6,0				Pomp und Enders, Kaiser- Wilhelm- Institut Düsseldorf	
Unlegiert mit 0,44 % C geschmiedet	34,9	64,5	19,8	24,6	54,9	17,0	16,3	29,7	8,5					
0,26 % C, 0,15 % Cu, 0,21 % Ni (Elektrostahlguß, gegüht).	27,0	53,8	23,4	17,7	45,6	18,5	16,2	33,1	11,5					
0,55 % C, 0,26 % Ni, 13,44 % Cr (rostbeständiger Stahl, ge- güht)	62,4	86,9	14,4	44,4	60,0	31,5	34,5	45,7	11,0					
0,14 % C, 0,03 % Cr, 0,20 % Ni, 0,30 % Mo gewalzt, normal gegüht	28,7	47,0	25,6	22,5	46,8	27,0	20,9	37,8	17,5					Pomp und Höger, Kaiser- Wilhelm- Institut Düsseldorf
0,13 % C, 0,25 % Mo, 0,24 % Cu gewalzt, normal gegüht	28,8	46,5	25,5	21,5	46,7	25,2	20,3	35,7	15,0					
0,23 % C, 0,78 % Cr, 2,75 % Ni gewalzt, vergütet	79,4	91,5	14,0	52,2	69,3	22,0	28,0	53,2	4,7					
0,12 % C, 0,71 % Cr, 0,30 % Ni, 0,30 % Mo gewalzt, gegüht	28,2	43,3	29,7	25,1	41,6	32,2	20,4	34,1	19,3					
0,27 % C, 0,55 % Mo, 0,40 % Ni, 0,37 % Cu, Stahlguß gegüht	50,5	65,6	20,9	41,4	57,1	27,5	33,6	49,6	15,0	20,4	34,2	3,1		Thum und Holdt, Material- Prüfungsanstalt Darmstadt
0,5 % C, 0,5 % Mo, 0,4 % Ni, Stahlguß gegüht	70,7	84,5	15,0	57,8	74,9	20,5	52,0	62,1	16,2	23,6	39,1	1,5		

nimmt aber auch hier die Dauerstandfestigkeit stark ab. In Tabelle 14 sind Warmzugversuche und Dauerstandswerte verschiedener Stähle zusammengestellt. Archbutt [Trans. Inst. Marine Engr. 42, 295 (1930); im Auszug Stahl u. Eisen 51, 368 (1931)] weist auf gute Warmfestigkeit und Hitzebeständigkeit von Nickel-Chrom-Molybdänlegierungen hin. Bei einer derartigen Legierung, die außerdem noch Zusätze von Wolfram, Silicium und Kohlenstoff enthielt, wurde bei 800° C eine Zugfestigkeit von 47 kg/mm² erreicht. Während einer Versuchsdauer von 2 Monaten bei 800° C wurde eine Zugbeanspruchung von 8 kg/mm² ertragen, ohne daß der Stab zu Bruch ging. Allerdings ist diese Legierung nur durch Schleifen bearbeitbar.

Hochhitzebeständige Legierungen werden hauptsächlich für Roste, Glührohre, Muffeln, Tiegel, Armaturen für heiße Gase, Retorten, Röstanlagen, Schwelöfen usw. benötigt. Neben hoher Beständigkeit in heißer Luft sollen sie auch möglichst widerstandsfähig gegen Ofengase, Wasserdampf, Salzdämpfe usw. sein. Die hitzebeständigen Stähle sind Legierungen des Eisens mit Chrom, Chrom-Nickel, Chrom-Nickel-Molybdän, Chrom-Nickel-Aluminium und Chrom-Nickel-Aluminium-Silicium. Mit steigendem Nickel- und Chromgehalt nimmt die Beständigkeit zu. Nickel allein verbessert die Zunderbeständigkeit nur unbeachtlich. Außerdem gibt es eine Reihe Chrom-Nickellegierungen mit wenig und ohne Eisen, die hitzebeständig sind (s. S. 528, Abb. 57 und Tabelle 29). Die Eisen-Chromlegierungen mit Chromgehalten bis etwa 30% und ebenso die Chrom-Nickel-Eisenlegierungen mit Chromgehalten bis zu 30% und Nickelgehalten bis 60% sind im Dauerbetrieb bis 1200° C verwendbar. In Abb. 46 sind Warmstreckgrenze (Zerreißdauer 20 min) und die Dauerbelastung für hochhitzebeständige Legierungen nach Angabe der Firma Fr. Krupp A.G. wiedergegeben.

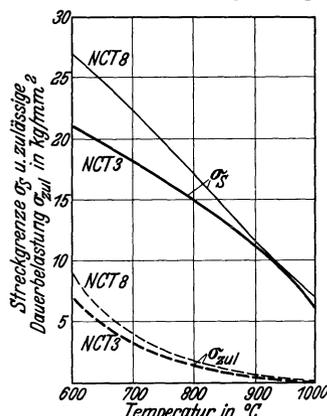


Abb. 46. Warmstreckgrenze und Dauerbelastung von hochhitzebeständigen Legierungen (Krupp).

7. Gußeisen.

a) Gefügeaufbau und Festigkeitseigenschaften.

Die mechanischen Eigenschaften des Gußeisens hängen wesentlich von seinem Gefügeaufbau ab. Das Gefüge des Gußeisens besteht ähnlich dem Stahl aus Ferrit, Perlit und freiem Zementit. Dazu kommt als kennzeichnender Gefügebestandteil der Graphit. Die Abscheidungsform und die Menge des Graphites ist die Grundlage für die Festigkeit des Gußeisens. Graphit hat keine nennenswerte Festigkeit. Bei Beanspruchung des Materials wirken also die Graphitadern praktisch als Hohlräume. Hochwertiges Gußeisen zeichnet sich durch kleine, gleichmäßig verteilte

Graphitadern (Abb. 47) und perlitische Grundgefüge aus. Gußeisen geringer Festigkeit zeigt grobe Graphitadern, ferritische Grundmasse mit wenig Perlit (Abb. 48). Die Graphitausscheidung hängt von der

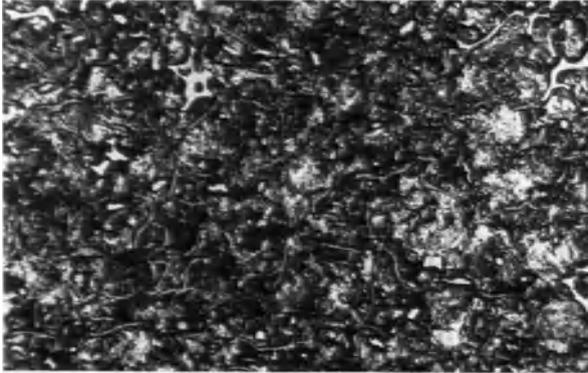


Abb. 47. Hochwertiges Gußeisen. Grundmasse Perlit, Graphit fein verteilt. Vergr. 200fach.

Abkühlungsgeschwindigkeit, der Wandstärke des Gußeisens und dem Kohlenstoff- und Siliciumgehalt ab. Große Wandstärke, geringe Abkühlungsgeschwindigkeit und hoher Siliciumgehalt fördern eine starke

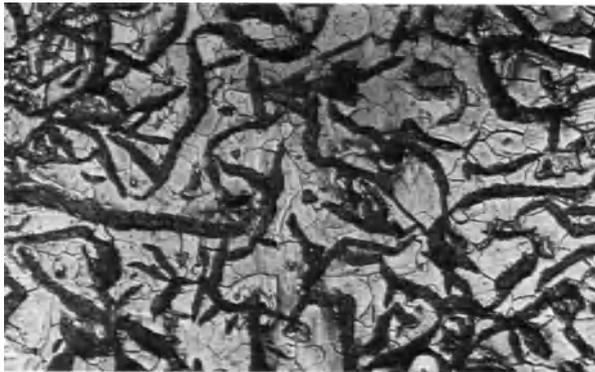


Abb. 48. Gußeisen geringer Festigkeit. Grundmasse vorwiegend Ferrit, grobe Graphitadern. Vergr. 200fach.

Graphitausscheidung. Die wichtigsten Maschinengußsorten sind nach DIN 1691 genormt (Tabelle 15).

Wird die Graphitausscheidung durch hohe Abkühlungsgeschwindigkeit oder hohen Mangangehalt und geringen Siliciumgehalt unterbunden, so wird der Kohlenstoff völlig als Eisencarbid gebunden. Je nachdem der Kohlenstoff im Gußeisen als Graphit und Perlit auftritt oder vollkommen gebunden ist (Ledeburit), unterscheidet man den gut bearbeitbaren Grauguß und den nicht bearbeitbaren, sehr verschleißfesten

Hartguß (Weißguß). Die Zwischenstufe wird als meliertes (halb-graues) Gußeisen bezeichnet. Seiner Zusammensetzung nach grau erstarrendes Gußeisen kann durch starke Kühlung (Abschrecken) der Gußform an der Oberfläche weiß erstarren (Schalen-guß). Der Einfluß der Temperatur auf die Festigkeit ist bis 400° C gering. Die Festigkeit nimmt nur unwesentlich ab. Doch findet bei Temperaturen über 350° C ein Zerfall des Carbidkohlenstoffes statt. Unter längerer Einwirkung von Temperaturen über 350° C ändert

Tabelle 15. Maschinenguß mit besonderen Gütevorschriften nach DIN 1691.

Marken- bezeichnung	Zug- festigkeit σ_B kg/mm ² mindestens	Biege- festigkeit σ_B kg/mm ² mindestens	Durch- biegung f mm mindestens
Ge 14.91	14	28	7
Ge 18.91	18	34	7
Ge 22.91	22	40	8
Ge 26.91	26	46	8

das Gußeisen sein Volumen, es wächst. Das Gefüge des gewachsenen Gußeisens zeigt groben Graphit und Ferrit. Die Festigkeit ist sehr gering. Zuweilen läßt sich solches gewachsenes Gußeisen mit dem Messer schneiden. Hochwertiges Gußeisen mit fein verteiltem Graphit und perlitischer Grundmasse ist dem Wachsen in geringerem Maße ausgesetzt. Der Widerstand gegen chemische Angriffe ist bei gewöhnlichem Gußeisen gering.

b) Säurebeständiger Guß.

Die Säurebeständigkeit wird durch Erhöhung des Siliciumgehaltes erzielt. Gußstücke mit mehr als 6—7% Silicium lassen sich nur noch durch Schleifen bearbeiten. In der Regel wird säurebeständiger Guß mit 12—16% Silicium legiert, zuweilen für höchste Säurebeständigkeit bis 18% Silicium. Der Nachteil hochsiliciumhaltigen Gusses besteht in seiner außerordentlichen Sprödigkeit, schlechten Bearbeitbarkeit und dem hohen Schmelzpunkt und dadurch bedingte erschwerte Gußfähigkeit. Die Wärmeleitfähigkeit von hochsiliciertem Gußeisen beträgt etwa die Hälfte von gewöhnlichem Gußeisen, es muß deshalb vorsichtig und gleichmäßig angewärmt werden. Die Biegefestigkeit beträgt etwa 21 kg/mm². Die Brinell-Härte etwa 290—350 kg/mm². Siliciumguß ist beständig gegen heiße und kalte Salpetersäure, Schwefelsäure, Mischsäuren, ebenso auch gegen eine Reihe organischer Säuren. Es wird zerstört durch Flußsäure, Salzsäure. Säurebeständiger Guß kommt unter verschiedenen Namen wie Thermisilid, Neutrалеisen, Esilit, Tantiron, Duriron usw. in den Handel.

Gute Korrosionsbeständigkeit wird auch mit Kupfer-Nickel-Chrom-Gußeisen erreicht, sowie mit 34% Cr legiertem Gußeisen [beständig gegen 7—66%ige Salpetersäure, Schweflige Säure, Essigsäure, Milchsäure, 50% ige Ammoniumnitrat, Ammoniumsulfat, Calciumbisulfat (bis 90° C), Calciumhypochlorid, Kaliumnitrat]. Das billigere Monelgußeisen (mit etwa 20% Monelmetall legiert) reicht an die Beständigkeit der Bronzen heran.

c) Hitzebeständiges Gußeisen.

Feuerbeständiges Gußeisen muß möglichst perlitisch sein; der Graphit muß sehr fein verteilt sein. Mangan, Phosphor und Schwefel dürfen nur in sehr geringer Menge vorhanden sein. Zunderbeständiges Gußeisen [Piwowarsky: Hochwertiger Grauguß, S. 201. Berlin 1929] ist mit Chrom (bis zu 30%) mit oder ohne Zusätze von Nickel, Aluminium, Silicium, Molybdän und Titan legiert. Gute Warmfestigkeit und gleichzeitig verbesserte Korrosionsbeständigkeit wird durch Legieren des Gußeisens mit etwa 20% Monelmetall und 1,5—3,5% Cr erreicht.

B. Nichteisenmetalle.

1. Aluminium.

Unter Reinaluminium werden nach DIN 1712 drei Qualitäten verstanden:

- Al 99,5 Verunreinigt durch Fe + Si + Cu + Zn \leq 0,5%,
 davon Cu + Zn $<$ 0,05%.
 Al 99 Gesamtverunreinigung \leq 1%, Cu + Zn $<$ 0,10%.
 Al 98/99 Gesamtverunreinigung \leq 2%, davon Fe $<$ 1%, Cu + Zn $<$ 0,10%.

Durch besondere Reinigungsverfahren wird Aluminium bis zu 99,98% ig hergestellt. Reinstes 99,9%iges Aluminium hat im geglühten

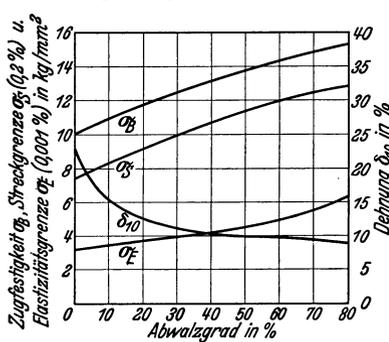


Abb. 49. Aluminium. Abhängigkeit der Festigkeit von der Kaltverformung.

Zustande etwa 7—8 kg/mm² Zugfestigkeit. Durch Beimengungen, besonders Eisen und Silicium, wird die Festigkeit etwas erhöht. Eisen ist als Eisenaluminid Al₃Fe enthalten, Silicium wird gelöst und bildet mit Aluminium Mischkristalle. Bei Temperaturen zwischen 250 und 350° C scheidet sich freies Silicium aus, das die Dehnung und Zugfestigkeit vermindert. Für die Glühbehandlung ist es wichtig, daß Aluminium nie bei 250—350° C geglüht werden darf, da hierbei die Ausscheidung des Siliciums sich am ungünstigsten auswirkt. Beim

Weichglühen von Aluminium muß daher möglichst rasch auf etwa 480—500° C erwärmt werden. Zweckmäßig erfolgt daher die Glühung in Salpeter- oder Bleibädern. Bei Luftglühung muß das Material in den bereits voll erwärmten Ofen gebracht werden. Die Abkühlung muß ebenfalls möglichst schnell erfolgen, am besten durch Abschrecken. Durch Kaltwalzen und Ziehen läßt sich die Festigkeit von Aluminium erheblich steigern (s. Abb. 49). Bei erhöhten Temperaturen nimmt die Festigkeit rasch ab (s. Abb. 50).

Der besondere Vorzug des Aluminiums, auf dem seine weite Verbreitung im chemischen Apparatebau beruht, ist neben seiner Leichtigkeit seine hohe Widerstandsfähigkeit gegen die Atmosphäre und viele

chemische Stoffe. Sie ist begründet in der sehr feinen Oxydschicht, die sich auf Aluminium bei Raumtemperatur sofort bildet. Diese Haut besteht aus schwer löslichen Verbindungen und macht das Aluminium passiv. Die Haut bildet einen besonders wirksamen und dichten Schutz, wenn das Aluminium möglichst rein ist. Legierungsbestandteile, die aus dem Herstellungsprozeß darin enthalten sind, wie z. B. freies Silicium, beeinträchtigen in gewissem Maße diesen Selbstschutz des Aluminiums. Daher ist die angegebene Glühbehandlung auch notwendig, um chemisch hochwiderstandsfähiges Aluminium zu erzielen.

Aluminium ist praktisch beständig gegen destilliertes, hartes und kohlen-säurehaltiges Wasser, kalte schwache Phosphor- und Kohlensäure, konzen-trierte Salpetersäure, Mischsäure, Schwefeldioxyd und schwefelhaltige Gase, Eisenvitriol, viele Stickstoffverbindungen, eine Reihe Kohlenwasser-stoffe, Fette und Fettsäuren, Öle, Alkohol, Äther (s. S. 552f., Tabelle 41).

Aluminium und Aluminiumlegierungen dürfen niemals unmittelbar mit Schwermetallen wie Kupfer und Messing verbunden werden. Durch ihr stark elektronegatives Verhalten in der Spannungsreihe der Metalle sind sie beim Zusammenbau mit elektropositiven Metallen starken örtlichen Korrosionen ausgesetzt.

Zur Erhöhung der Korrosionssicherheit von Aluminium und Aluminiumlegierungen sind eine Reihe Verfahren ausgearbeitet worden, um die natürliche Schutzhaut auf dem Aluminium noch zu verstärken, so das Verfahren mit Hilfe anodischer Oxydation von Bengough, das Eloxalverfahren der Vereinigten Aluminiumwerke, das modifizierte Bauer-Vogel-Verfahren (MBV-Verfahren). Beim Eloxalverfahren [H. Ginsberg: Das Eloxalverfahren. Haus-Ztschr. Aluminium 2, 81 (1930)] wird mit Hilfe des elektrischen Stromes und eines geeigneten Elektrolyten eine harte mechanisch widerstandsfähige Schicht erzeugt. Die Verstärkung der Schutzschicht beim MBV-Verfahren [G. Eckert: Das MBV-Verfahren, ein wirksames Oberflächenschutzverfahren für Aluminium und dessen Legierungen. Haus-Ztschr. Aluminium 3, 349 (1931)], erfolgt durch kurzzeitiges Eintauchen in eine 90° C warme wäßrige Lösung von 5% Soda und 1,5% Natriumchromat.

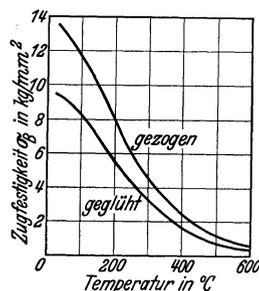


Abb. 50. Aluminium. Abhängigkeit der Festigkeit von der Temperatur. (Nach Röhrig: Werkstoffhandb. Nichtisenmetalle G³.)

2. Aluminiumlegierungen.

Die geringe Festigkeit des Reinaluminiums beschränkt seine Verwendung als Konstruktionswerkstoff namentlich bei höheren Beanspruchungen. Es sind eine große Anzahl Guß- und verformbare Legierungen entstanden, deren Festigkeitseigenschaften erheblich günstiger liegen. Die Korrosionsbeständigkeit ist aber meistens schlechter. Für den chemischen Apparatebau eignen sich Legierungen wie Silumin, KS-Seewasser, Hydronalium, BSS-Legierung, Duranalium, L 15

(nur gegossen) und AW 15, die neben günstiger chemischer Beständigkeit gute Festigkeitseigenschaften aufweisen.

Silumin ist eine veredelte Aluminiumlegierung mit 12—13,5% Si und 0,4—0,6% Eisen. Das Veredeln erfolgt etwa 5—10 min vor dem Vergießen durch Zusatz von Alkalimetallen. Festigkeitseigenschaften siehe Tabelle 16. Die Gießbarkeit des Silumins ist sehr gut, es lassen sich dünnwandige und schwierige Gußstücke einwandfrei und dicht herstellen. Die Korrosionsbeständigkeit entspricht etwa der des Reinaluminiums. Die Anwendung dieser Legierung ist daher im chemischen Apparatebau vielseitig, so für Armaturen, z. B. in der Ammoniak- und Essigsäurefabrikation, für Rührwerke, Mischer, Gehäuse, Verschaltungen, Ventilatorflügel in Betrieben mit schwefel- und säurehaltiger Atmosphäre.

KS-Seewasser ist eine Aluminiumlegierung mit 0,3—1% Si, 1 bis 2% Mn, 1—2% Mg, < 1% Sb von ebenfalls, bereits durch den Namen gekennzeichneten, günstigen Eigenschaften gegen chemische Angriffe. Die Legierung ist bei etwa 450° C schmiedbar und läßt sich zu Rohren, Trägern, Blechen verarbeiten. Festigkeitseigenschaften siehe Tabelle 16.

Tabelle 16. Festigkeitseigenschaften von Silumin und KS-Seewasser¹.

Legierung	Streckgrenze (0,2% Dehnung)	Zugfestigkeit	Dehnung	Brinellhärte	Dauerbiegefestigkeit
	σ_S kg/mm ²	σ_B kg/mm ²	δ %	H kg/mm ²	σ_W kg/mm ²
Silumin-Knetlegierung					
weichgeglüht	6—8	13—16	25—15	40—55	~ 5
halbhart	12—15	16—20	10—3	50—60	
hart	15—18	20—25	5—2	60—80	
Silumin-Gußlegierung					
Sandguß	8,5	17—20	4—8	55—60	
Kokillenguß	10,5	18—22	2—6	60	
Silumin-Gamma					
Sandguß, vergütet	18—25	22—29	4—0,5	75—100	
Kokillenguß, vergütet . .	20—28	25—32	1,5—0,5	85—100	
KS-Seewasser					
weichgeglüht	8—10	16—20	25—15	45—55	10
halbhart	12—18	20—24	8—4	55—65	
hart	20—25	24—32	5—2	65—75	
Sandguß	9—10	12—16	bis 2,8	55—65	
Kokillenguß		14—19	2—5		
Spritzguß		bis 23	bis 1,6		

Die Korrosionsbeständigkeit ist etwa gleich der des Reinaluminiums. Die Steigerung der Festigkeit unter gleichzeitiger Sicherung der chemischen

¹ Aus Aluminium-Taschenbuch 1933, herausgeg. Aluminium-Zentr. e. V., Lautawerk.

Widerstandsfestigkeit wird hauptsächlich durch das Antimon erreicht. KS-Seewasser ist beständiger als Reinaluminium gegen Schwefeldioxyd, Seifenlösungen, Alkohol und organische Säuren. Nahrungsmittel erleiden bei Berührung damit keine Geschmacksveränderungen.

Neben diesen für den chemischen Apparatebau wichtigsten Aluminiumlegierungen sind in Tabelle 18 noch einige weitere Leichtmetalllegierungen, die aber zum Teil weniger chemisch widerstandsfähig sind, zusammengestellt.

Tabelle 17. Festigkeitseigenschaften von Hydronalium. (Nach Angaben der I. G. Farbenindustrie A.G.)

	Streckgrenze kg/mm ²	Zugfestigkeit kg/mm ²	Dehnung %
Preßmaterial . .	15—20	31—35	16—22
Bleche, weich . .	15—18	31—36	16—22
„ hart . .	30—36	38—43	4—9
„ halbhart	—	35—40	6—14

Bei Blechen unter 1 mm liegt die Zugfestigkeit um etwa 1 kg/mm² höher, die Dehnung um 1 % tiefer.

Tabelle 18. Festigkeitseigenschaften einiger Aluminiumlegierungen.

Bezeichnung und Zusammensetzung	Streckgrenze σ_S kg/mm ²	Zugfestigkeit σ_B kg/mm ²	Brinell-Härte <i>H</i> kg/mm ²	Dehnung δ_{10} %	Bemerkungen ¹
1. Vergütbare Aluminiumlegierungen					
Duralumin vergütet 3,5—5,5 % Cu, 0,25—1,0 % Mn, 0,5 % Mg, Rest Al	24—27	38—41	115	18—21	} nach R. Beck
3,5—5,5 % Cu, 0,25—1,0 % Mn, 0,5 % Mg, Rest Al, hart gewalzt 3,5—5,5 % Cu, 0,25—1,0 % Mn, 0,5 % Mg, Rest Al, vergütet (bei —190° C geprüft)	52—53	55—57	156—158	4—5	
Aludur vergütet 0,7—2 % Si, 0,4—1 % Mg, 0,3—0,5 % Fe, Rest Al	32,3	53,7		28,7	
2,5—5,5 % Cu, 0,7—1 % Si, 0,2—0,7 % Mg, 0,3—0,5 % Fe, Rest Al		25—36	70—100	18—8	} Hall- mann
Lautal 4 % Cu, 2 % Si, Rest Al, vergütet 4 % Cu, 2 % Si, Rest Al, nach- verdichtet	21,6—28	38—42	90—120	18—25	
40—59	45—60	100—135	15—3		} Fuß
Scleron 12 % Zn, 3 % Cu, 0,6 % Mn, 0,5 % Si, 0,4 % Fe, 0,1 % Li, Rest Al, vergütet	30	40—50	120	10—15	
2. Aluminium-Gußlegierungen					
Deutsche Legierung 2—5 % Cu, 8—12 % Zn, Rest Al		12—20	60—65	1—5	
Amerikanische Legierung 7—9 % Cu, Rest Al		12—18	63—68	2—5	

Silumin und KS-Seewasser Tabelle 16, Hydronalium Tabelle 17.

¹ Werkstoffhandbuch Nichteisenmetalle.

3. Blei.

Blei hat wegen seiner hohen Widerstandsfähigkeit gegen chemische Angriffe eine vielseitige Verwendung im chemischen Apparatebau gefunden. Seine Festigkeit ist jedoch nur gering.

Zugfestigkeit	1,5—2 kg/mm ²
Dehnung	50%
Quetschgrenze	5 kg/mm ²

Durch Kaltverformung kann Blei nicht verfestigt werden. Es wird geliefert in Form von Blechen, Draht, Wolle, Ringen, Streifen.

Blei ist gegen verdünnte Schwefelsäure das beständigste unedle Metall. Bei Temperaturen über 200° C greift konzentrierte Schwefelsäure stärker an. Durch Zusatz von Kupfer bis etwa 0,2% wird die Beständigkeit von Blei bei höheren Temperaturen verbessert. Blei ist weiterhin beständig gegen Schwefeldioxyd, Kupfervitriol, schwefelsaure Salze, kalte verdünnte Salzsäure, kalte Flußsäure, konzentrierte Salpetersäure, wasserarme Mischsäuren. Dagegen wird Blei durch verdünnte kalte und heiße Salpetersäure, salpetersaure Salze, konzentrierte Salzsäure korrodiert. Auch wird Blei von weichem Wasser (Regenwasser, Kondenswasser) angegriffen. Besonders aggressiv ist freie Kohlensäure in Wasser. Bei Vermauerung von Bleibehältern, Verlegen von Bleirohren darf das Blei nicht mit Kalkmörtel in Verbindung gebracht werden. Die Verlegung darf nur in Gips erfolgen. Für die Korrosionsbeständigkeit ist seine Reinheit wichtig. Schädlich wirkt sich besonders Wismut aus. Geringe Zusätze von Kupfer und Antimon sind vorteilhaft. Blei darf wegen seiner Giftigkeit nicht in der Nahrungsmittelindustrie verwendet werden.

Zur Erhöhung der Festigkeit wird Blei vornehmlich mit Antimon legiert (Hartblei), wodurch seine chemischen Eigenschaften nicht beeinträchtigt werden. Es wird durch Antimonzusatz spröder. Hartblei mit etwa 20% Antimon und 80% Blei hat etwa 4,5 kg/mm² Zugfestigkeit, 1% Dehnung und 12 kg/mm² Druckfestigkeit. Die Korrosionsicherheit des Hartbleies ist fast gleichwertig derjenigen des reinen Bleies.

Die Verwendung des Bleies erfolgt hauptsächlich in der Schwefelsäurefabrikation, in der Explosivstoffindustrie, in Bleichereien, Färbereien, Kunstseide- und Zellstoffabriken, Metallsalzfabriken. Aus Blei werden Behälter, Rohrleitungen, Armaturen, Pumpen, Ventilatoren, Eindampfapparate hergestellt. In der Schwefelsäureindustrie wird Blei praktisch als einziger Werkstoff für Säurekammern, Säuretürme, Säurekästen, Rohrleitungen, Pumpen usw. verwandt.

4. Kupfer.

Kupfer wird in folgenden Reinheitsgraden geliefert (s. Tabelle 19).

Die Bedeutung des Kupfers für den chemischen Apparatebau ist begründet in seiner sehr hohen Wärmeleitfähigkeit, die etwa 6mal so groß wie die von Weichstahl (s. Tabelle 40) und fast ebenso groß wie die von Silber ist, ferner in seiner Geschmeidigkeit, die bewirkt, daß Spannungen infolge ungleichmäßiger Erwärmung schnell und gefahrlos

Tabelle 19. Kupfer. (Auszug aus DIN 1708¹.)

Benennung	Kurzzeichen	Cu mindestens %	Verwendungsbeispiele
Hüttenkupfer A (arsen- und nickelhaltig) . . .	A-Cu	99,0	Feuerbüchsen und Stehbolzen
Hüttenkupfer B (arsenarm)	B-Cu	99,0	Legierungen für Gußerzeugnisse sowie Legierungen mit weniger als 60% Kupfergehalt für Walz-, Preß-, Schmiedeerzeugnisse
Hüttenkupfer C	C-Cu	99,4	Kupferrohre und Kupferbleche
Hüttenkupfer D.	D-Cu	99,6	Legierungen mit mehr als 60% Kupfergehalt für Walz-, Preß-, Schmiedeerzeugnisse
Elektrolytkupfer E	E-Cu	—	Elektrische Leitungen, hochwertige Legierungen

ausgeglichen werden. Auch ist die hohe Zähigkeit bei sehr tiefen Temperaturen wichtig und die günstige chemische Widerstandsfähigkeit gegen feuchte Atmosphäre.

Die Festigkeitseigenschaften des Kupfers im weichgeglühten Zustand (600° C) sind nicht sehr hoch. Schon bei geringen Beanspruchungen treten plastische Formänderungen auf.

Streckgrenze . . . etwa 5—7 kg/mm²
 Zugfestigkeit . . . 21—24 kg/mm²
 Dehnung δ 38%
 Bruchdehnung δ_{br} 50%
 Brinell-Härte . etwa 50 kg/mm²

Durch Kaltwalzen und Kaltziehen lassen sich die Festigkeitseigenschaften weitgehend steigern (s. Abb. 51). Je dünner das Material ausgezogen oder ausgewalzt wird, um so höhere Festigkeiten können erreicht werden. Hartgewalzte Bleche können eine Festigkeit bis etwa 45 kg/mm² bei 10% Dehnung, sehr dünne Drähte bis etwa 50 kg/mm² erreichen. Über die Festigkeit und Zähigkeit des Kupfers bei tiefen und höheren Temperaturen gibt Abb. 52 Aufschluß. Die Kerbzähigkeit ist demnach auch bei sehr tiefen Temperaturen noch hoch. Die Zugfestigkeit nimmt mit zunehmenden Temperaturen gleichmäßig ab, über 200° C wird auch die Dehnung geringer.

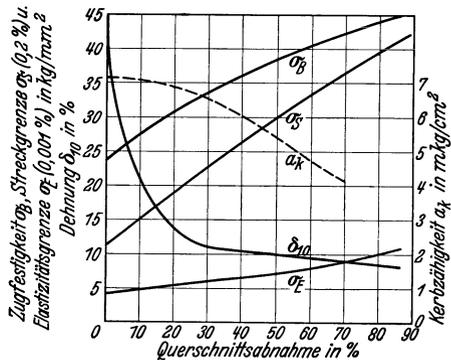


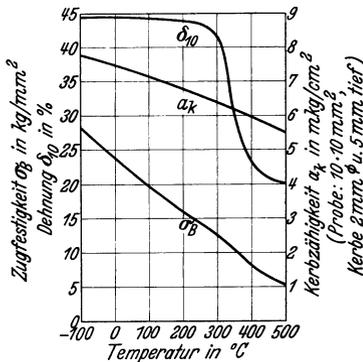
Abb. 51. Kupfer. Abhängigkeit der Festigkeitseigenschaften von der Kaltverformung.

¹ Wiedergabe erfolgt mit Genehmigung des Deutschen Normenausschusses. Verbindlich ist die jeweils neueste Ausgabe des Normblattes im DIN-Format A 4, das durch den Beuth-Verlag G. m. b. H., Berlin S 14, Dresdener Straße 97 zu beziehen ist.

Hüttenkupfer ist verunreinigt durch Kupferoxydul (Cu_2O). Bis etwa 1% Cu_2O ist es wenig schädlich. Cu_2O wirkt sich nachteilig auf die Festigkeit, Zähigkeit und besonders auf die elektrische Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit aus. Wird kupferoxydulhaltiges Kupfer bei höheren Temperaturen mit wasserstoffhaltigen Gasen in Verbindung gebracht, so wird es mitunter rissig. Der Wasserstoff diffundiert bei höheren Temperaturen durch das Kupfer und bildet mit dem Sauerstoff des Kupferoxyduls Wasser. Das verdampfende in Kupfer eingeschlossene Wasser führt zu Aufsprengungen. Diese Erscheinung wird als Wasserstoffkrankheit bezeichnet.

Kupfer ist gegen viele chemische Angriffe sehr korrosionsbeständig, wird aber oft angegriffen, wenn gleichzeitig Luft Zutritt erhält. Es ist beständig unter anderem gegen Ameisensäure, Benzin, Benzol, Essigsäure (bei Sauerstoffabwesenheit), Fettsäure, Glycerin, Wasser. Es wird stark korrodiert durch Schwefel und Schwefelverbindungen, Salzsäure, Salpetersäure. Gegen kalte Schwefelsäure, heiße verdünnte Schwefelsäure und gegen verdünnte kalte Salzsäure ist es einigermaßen beständig. Mit Acetylen bildet es explosives Acetylenkupfer. Daher darf Kupfer unter keinen Umständen in Apparaten, Behältern u. dgl. Verwendung finden, welche mit Acetylen in Berührung kommen.

Abb. 52. Kupfer. Einfluß der Temperatur auf die Festigkeitseigenschaften.



(Probe: 10 · 10 mm², Kerbe 2 mm ϕ u. 5 mm tief)

Die Verarbeitung des Kupfers im chemischen Apparatebau erfolgt hauptsächlich zu Bottichen, Rohren, Heiz- und Kühlschlangen, Trockenapparaten, Destillationsapparaten. Hartgewalztes und gezogenes Kupfer gilt im allgemeinen als korrosionsbeständiger als weichgeglühtes (s. auch S. 552 f., Tabelle 41).

Kupfer ergibt mit verschiedenen anderen Metallen, namentlich mit Zink, Zinn und Nickel, eine Reihe hochwertiger Legierungen von sehr guten Festigkeitseigenschaften. Die Wärmeleitfähigkeit und elektrische Leitfähigkeit wird aber durch geringes Zulegieren anderer Metalle bereits erheblich niedriger (S. 550, Tabelle 40).

5. Kupfer-Zinklegierungen (Messinge).

Technisch brauchbar sind nur Legierungen bis 50% Zn. Bei höherem Zinkgehalt sind sie sehr spröde, so daß eine technische Verwertung dieser Legierungen ausgeschlossen ist.

Die technisch wichtigsten Messingarten sind nach DIN 1709 (Tabelle 20) genormt, ebenso die Festigkeitseigenschaften von Gußmessing und teilweise auch von Walz- und Schmiedemessing (Tabelle 21 und 22).

Legierungen mit mindestens 63% Cu lassen sich kalt ziehen, drücken und walzen. Durch die Kaltbearbeitung erfolgt eine erhebliche Härtesteigerung. Die Korrosionsbeständigkeit wird bei kaltgezogenem Messing

Tabelle 20. Messing, Benennung und Verwendung nach DIN 1709, Bl. 1¹.
(Auszug aus dem Normblatt.)

Benennung	Kurzzeichen	Zusammensetzung ungefähr %			Behandlung	Richtlinien für die Verwendung
		Cu	Zusätze	Zn		
I. Gußmessinge						
Gußmessing 63	GMs 63	63	< 3 Pb	Rest	Bearbeiten mit spanabhebendem Werkzeug	Gehäuse, Armaturen usw.
Gußmessing 67	GMs 67	67	< 3 Pb	„	Bearbeiten mit spanabhebenden Werkzeugen, Hartlötén	Gehäuse, Armaturen usw.
Sondermessing A, gegossen	So-GMs A	54 bis 62	Mn + Al + Fe + Sn bis zu 7,5 % nach Wahl	„	Bearbeiten mit spanabhebenden Werkzeugen	Beschlagteile, Überwurfmutter, Spannmutter, Büchsen für wenig wichtige Lager, Gußteile mittlerer Festigkeit
Sondermessing B, gegossen	So-GMs B	54 bis 62	Mn + Al + Fe + Sn bis zu 7,5 % nach Wahl	„		Hochbeanspruchte Teile im Pumpenbau, für Druckwasserpressen, seewasserbeständige Gußteile
II. Walz- und Schmiedemessinge						
Hartmessing (Schraubenmessing)	Ms 58	58	2 Pb	Rest	Warmpressen, Schmieden, Bearbeiten mit spanabhebenden Werkzeugen	Stangen für Schrauben, Profile, Instrumente, Armaturen, Beschläge, Bleche
Schmiedemessing (Muntz-Metall)	Ms 60	60	—	„	Wie Ms 58, mäßiges Biegen und Prägen	Stangen, Drähte, Bleche, Rohre für mannigfaltige Zwecke, Kondensatorrohrplatten, Beschläge, Vorwärmer- und Kühlerrohre
Druckmessing	Ms 63	63	—	„	Ziehen, Drücken, Prägen, Hartlötén mit leichtflüssigem Schlaglot oder Silberlot	Bleche, Bänder, Drähte, Stangen, Profile für Metallwarenherstellung und Apparatebau, Rohre
Halbtombak (Löt-messing)	Ms 67	67	—	„	Ziehen, Drücken, Kaltbearbeiten, Hartlötén bei hohen Anforderungen	Bleche, Rohre, Stangen, Profile, Federn, Hülsen
Gelbtombak (Schaufelmessing)	Ms 72	72	—	„	Ziehen, Drücken, Prägen, Kaltbearbeiten, bei höchsten Ansprüchen an Dehn- und Haltbarkeit	Drähte, Bleche, Profile für Turbinenschaufeln
Hellrot-Tombak	Ms 80	80	—	„	Kaltbearbeiten (Kunstgewerbe)	Bleche, Metalltücher, Metallwaren
Mittelrot-Tombak (Goldtombak)	Ms 85	85	—	„		
Rottombak	Ms 90	90	—	„	Warmpressen, Schmieden	Kolbenstangen, Verschraubungen, Ventilspindeln, Profile, Turbinenschaufeln für Niederdruckstufe, Bleche, Rohre, Warmpreßteile von hoher Festigkeit
Sondermessing, gewalzt	So-Ms	55 bis 60	Mn + Al + Fe + Sn bis 7,5 % nach Wahl, Ni rechnet als Cu	„		

¹ Wiedergabe in den Tabellen 20 und 21 erfolgt mit Genehmigung des Deutschen Normenausschusses. Verbindlich ist die jeweils neueste Ausgabe des Normblattes im DIN-Format A 4, das durch den Beuth-Verlag G. m. b. H., Berlin S 14, Dresdener Straße 97 zu beziehen ist.

Tabelle 21. Messinggußstücke.
[Festigkeitseigenschaften nach DIN 1709, Bl. 2 (Auszug).]

Benennung	Kurzzeichen	Zugfestigkeit σ_B kg/mm ² mindestens	Dehnung δ_5 % mindestens	Brinell-Härte H 10/500/30 kg/mm ² mindestens
Gußmessing 63	GMs 63	15	7	45
Gußmessing 67	GMs 67	18	20	40
Sondermessing A, gegossen	So-GMs A	30	10	—
Sondermessing B, gegossen	So-GMs B	35—60*	45—15*	90—150*

Tabelle 22. Festigkeitseigenschaften verschiedener Walz- und Schmiedemessinge.

Erzeugnisse	Markenbezeichnung	Zu-stand	Zugfestigkeit σ_B kg/mm ²	Bruchdehnung δ_{10} %	Brinell-Härte H kg/mm ²	Bemerkung
Messing-Vollprofile, Rund-, Flach-, Sechskant- und Winkelmessing, gezogen und gepreßt (DIN 1776)	Ms 58	Sondergüte ³ weich halbhart hart	37—45	mind. 25		alle Dicken bis 40 mm Dicke bis 12 mm Dicke
			44—54	10		
			51—63	5		
	Ms 60	Sondergüte ³ weich halbhart hart	34—42	30		
			41—50	18		
			48—58	10		
	Ms 63	Sondergüte ³ weich hart	29—35	45		
			41—50	18		
Messingblech Messingband, Messingstreifen, kalt gewalzt (nach DIN 1774)	Ms 60	weich halbhart hart	34—42	30	Faltversuch ¹ ,, ² ,, ² ,, ¹ ,, ¹ ,, ² ,, ²	
			41—50	18		
			48—58	10		
	Ms 63	weich halbhart hart feder- hart	29—35	45		—
			35—43	25		75—95
			41—50	15		95—120
			52—64	5		130—150
Messingrohr, nahtlos gezogen (nach DIN 1775)	Ms 60	Sondergüte ³ geglüht gezogen	> 35	35	Je nach Ver- wendungs- zweck: Auf- weitversuch, Flachschlage- und Wasser- druckversuch	
			> 45	15		
	Ms 63	Sondergüte ³ geglüht gezogen	> 29	40		
			> 40	15		

* Je nach Zusammensetzung, bei Bestellung ist die gewünschte Mindestzugfestigkeit anzugeben.

¹ Biegung nach jeder Richtung bis zum vollständigen Berühren.

² Biegung um 90° senkrecht zur Walzrichtung.

³ Werden auch als Handelsgüte geliefert ohne vorgeschriebene Festigkeitseigenschaften.

oft durch innere Spannungen wesentlich herabgesetzt. Geringer Korrosionsangriff führt infolge Auslösung der Eigenspannungen zu Rissen im Material (s. Abb. 53). Zur Beseitigung innerer Spannungen muß Messing bei etwa 250° C angelassen werden. Für den Apparatebau werden besonders kaltgezogene Messingrohre (Ms 63, Ms 67, Legierungen mit 70% Cu, 30% Zn oder 70% Cu, 29% Zn, 1% Sn) verwandt. Zusatz von Zinn bis etwa 1% ist für die Korrosionsbeständigkeit günstig. Die Festigkeit solcher Rohre soll etwa 35—40 kg/mm² bei einer Dehnung von mindestens 25% betragen. Höhere Festigkeit hat meist innere Spannungen zur Folge. Die Rohre müssen sich flach zusammendrücken lassen, ohne anzureißen. Werden Rohrstücke aufgesägt, so darf der Schnitt nach dem Aufsägen nicht weiter als die Schnittbreite des Sägeblattes aufklaffen. Zum Nachweis innerer Spannungen dient vorteilhaft die Quecksilbernitratprobe¹.

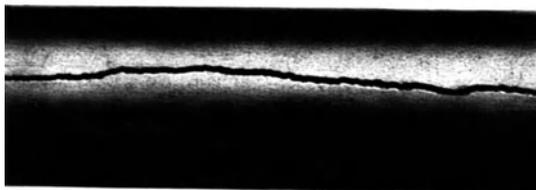


Abb. 53. Messingrohr mit inneren Spannungen infolge schwacher Korrosion aufgerissen.

Messing mit mehr als 62% Cu besteht aus α -Mischkristallen, ist kalt verarbeitbar, Messing mit geringerem Cu-Gehalt läßt sich nur bei

Rotglut verformen (warmschmiedbares Messing oder Preßmessing). Die Festigkeit und Zähigkeit wird durch Warmpressen wesentlich gesteigert.

Sondermessing.

Unter Sondermessing werden Cu-Zn-Legierungen mit Zusatz von Eisen, Mangan, Nickel, Aluminium verstanden. Durch die Zusätze wird neben besseren Festigkeitseigenschaften zuweilen auch erhöhte Korrosionsbeständigkeit erreicht. Günstig für die Korrosionsbeständigkeit sind Mangan, Nickel, Aluminium, Zinn. Eisen wirkt kornverfeinernd und erhöht die Streckgrenze. Mehr als 3% Eisen sind nachteilig für die Korrosionsbeständigkeit. Aluminium steigert die Härte und verbessert die Oxydationsbeständigkeit. Blei fördert die Bearbeitbarkeit. Mehr als 3% Blei vermindern Festigkeit und Zähigkeit.

Messing ist korrosionsbeständig gegen Alkohol, Benzin, Benzol, schwache organische Säuren, überhitzten Dampf. Von besonderer Wichtigkeit ist das Verhalten gegen Wasser, da gezogene Messingrohre besonders für Kondensationsanlagen verwandt werden. Für die Haltbarkeit dieser Rohre ist die Bildung einer passivierenden Schutzhaut wichtig. Zusätze von Aluminium, Zinn, Blei fördern die Bildung derartiger Schutzschichten.

¹ Rohre werden in Quecksilbernitrat getaucht und leicht mit dem Hammer beklopft. Rohre mit inneren Spannungen reißen auf.

Tabelle 23. Gußbronze und Rotguß. (Nach DIN 1705.)

Gruppe	Benennung	Kurzzeichen	Zusammensetzung ungefähr in %				Zugfestigkeit σ_B kg/mm ² mind.	Dehnung δ_5 % mind.	Brinell-Härte $H 10/500/30$ kg/mm ² mindestens	Biegegröße B_g mind.	Richtlinien für Verwendung
			Cu	Sn	Zn	Pb					
Zinnbronzen (Phosphorbronzen)	Gußbronze 20	GBz 20	80	20	—	—	15	—	180	—	Teile mit starkem Reibungsdruck (z. B. Spurlager, Verschleißplatten, Schieberspiegel), Glocken Teile mit starkem Versleiß; hoch beanspruchte Lagerschalen, Räder, hydraulische Hochdruckapparate Allgemeine Verwendung in Maschinen-, Armaturen- und Apparatebau
	„ 14	GBz 14	86	14	—	—	20	3	90	—	
	„ 10	GBz 10	90	10	—	—	20	15	60	20	
Rotguß	Rotguß 10 (Maschinenbronze)	Rg 10	86	10	4	—	20	10	65	15	Allgemeine Verwendung in Maschinen-, Armaturen- und Apparatebau, für Rohrleitungsteile Lager für Eisenbahnzwecke, Armaturen } Maschinenarmaturen, die blank bearbeitet werden Rohrflansche und andere hart zu löfende Teile
	Rotguß 9	Rg 9	85	9	6	—	20	12	60	15	
	„ 8	Rg 8	82	8	7	3	15	6	70	—	
	„ 5	Rg 5	85	5	7	3	15	10	60	—	
	„ 4 (Flaschenbronze)	Rg 4	93	4	2	1	20	25	50	20	
Sonderbronzen	Bleizinnbronze 10	Bl-Bz 10	86	10	—	4	18	15	70	15	Lager für Warmwalzwerke, elektrische Maschinen
	Bleizinnbronze 8	Bl-Bz 8	80	8	—	12	15	8	60	—	Lager mit hohem Flächen- druck (Kaltwalzwerke)

6. Kupfer-Zinnlegierungen (Bronze und Rotguß).

Unter Bronze versteht man Kupfer-Zinnlegierungen mit einem Kupfermindestgehalt von 78%. Neben dem hauptsächlichsten Legierungsbestandteil Zinn können die Bronzen noch geringe Beimengungen von Blei, Antimon und Eisen enthalten. Mit steigendem Zinngehalt bis zu 16% nimmt die Festigkeit und Verschleißhärte erheblich zu. Die Dehnung nimmt von 6% Zinngehalt an stark ab. Durch Zusatz von Phosphorkupfer wird eine sorgfältige Desoxydation des Metallbades erreicht. Diese Bronzen werden als Phosphorbronzen bezeichnet, obwohl Phosphor im gegossenen Material praktisch nicht mehr vorhanden ist. Unter Rotguß werden Kupfer-Zinn-Zinklegierungen mit meist 1—5% Zusatz von Blei¹ verstanden. Die Eigenschaften der handelsüblichen Gußbronzen und Rotgußsorten sind in Tabelle 23 zusammengestellt.

Bronzen mit einem Zinngehalt bis 10% sind kaltverformbar. In Tabelle 24 sind die mechanischen Eigenschaften von Walzbronzen wiedergegeben.

Tabelle 24. Festigkeit von Walzbronzen.

	Zugfestigkeit σ_B kg/mm ²	Dehnung δ %	Brinell-Härte H kg/mm ²	Bemerkungen
Walzbronze, Drähte weich	40—50	50—70		
Walzbronze, Drähte hart	70—90	1,5—3		
Walzbronze, Stangen hart	50—52	15—20	190	Nach Borbeck, Werkstoffhandbuch
Walzbronze, Bleche, Bänder weich	40—50	60—70	77	Nichteisenmetalle
Walzbronze, Bleche, Bänder hart	75—80	1—5	170	
Walzbronze, Federbänder, Federbleche, federhart Marke (WBz 6) 94% Cu, 6% Sn	65—75		150—170	(Nach DIN 1779.) faltver- such: bis 1 mm Dicke um 90° scharf biegen, über 1 mm Dicke um 90° um Rundungshalbmesser = Blechdicke biegen

Gute Korrosionsbeständigkeit der Bronzen wird nur bei homogenem Gefüge erreicht, wo Potentialunterschiede nicht auftreten können. Entmischungen im Guß setzen Festigkeit und besonders chemische Beständigkeit in hohem Grade herab. Ebenso ist vollkommene Desoxydation, wie sie bei den Phosphorbronzen erreicht wird, für die Korrosionsbeständigkeit nötig. Zur Erhöhung der Festigkeit oder Korrosionsbeständigkeit sind eine sehr große Anzahl Sonderbronzen entwickelt worden. Dazu gehören Bronzen mit Zusatz von Blei (bis etwa 0,5%) Mangan (bis etwa 2%), Arsen (bis etwa 1,5%). Phosphorbronzen enthalten in der Regel nur Spuren von Phosphor; höherer Phosphorgehalt verringert die Festigkeit und namentlich Zähigkeit. Nickelbronzen bewahren sich besonders für Beanspruchungen bei höheren

¹ Für hochbeanspruchte Lager werden Bronzen mit Zusätzen bis 12% Blei verwandt.

Temperaturen. Stahlbronzen mit Zusatz von Eisen haben hohe Festigkeit, sind gut warm schmiedbar, haben aber geringere Korrosionsbeständigkeit. Aluminiumbronzen sind in der Regel Kupfer-Aluminiumlegierungen ohne Zinn. Aluminium wird bis etwa 10% zulegiert. Sie zeichnen sich durch gute Festigkeit und hohe Korrosionsbeständigkeit gegen Luft, Seewasser und Sulfidlauge aus.

Für Sonderbronzen werden folgende Festigkeitswerte angegeben (Tabelle 25):

Tabelle 25. Sonderbronzen.

Werkstoff	Zugfestigkeit σ_B kg/mm ²	Dehnung δ_{10} %	Bemerkung
Phosphorbronze (hart), gegossen. . .	20—30	15—20	} Fürstl. Hohenzollernsche Hüttenverwaltung Lauchatal
„ (zähhart), gegossen	20—30	20—10	
Nickelbronze, geschmiedet	85—100	15—8	}
„ „ „ „	45—50	60—40	
Nickelstahlbronze, geschmiedet . . .	75	10	Krupp
Aluminiumbronze 91,95 Cu + 8,03 Al	46,3	43	Guillet
93,13 Cu + 6,76 Al	24,7	49	„

Neben den zahlreichen Sonderbronzen wird hauptsächlich Gußbronze 10 für Armaturen, Pumpenteile, Zentrifugen, Rührwellen verwandt. Phosphorbronzedrähte eignen sich sehr gut für Drahtsiebe. Alle Bronzen sind sehr beständig gegen Wasser und Seewasser, Alkohol, eine Reihe schwacher organischer Säuren, flüssiges Schwefeldioxyd, Magnesiumsalzlösungen, Natriumsalzlösungen. Salpetersäure, Salzsäure und Schwefelsäure greifen mäßig an, solange keine Bewegung der Flüssigkeit erfolgt. Zinnarme Bronzen verhalten sich etwas günstiger. Als besonders säurebeständig gelten Zinn-Kobaltbronzen mit 80—95% Kupfer und 5—20% Zinn und Kobalt, sowie die Nickelbronzen mit etwa 87% Kupfer, 10% Zinn, 2% Zink und 1% Nickel¹. Rotguß ist im allgemeinen weniger beständig.

7. Kupfer-Manganlegierungen.

Kupfer-Manganlegierungen werden noch wenig angewandt. Ihre Korrosionsfestigkeit ist bisher wenig untersucht. Sie dürften aber, da sie aus homogenen Mischkristallen bestehen, recht beständig sein. Sie zeichnen sich durch hohe Warmfestigkeit aus.

In Tabelle 26 sind die Festigkeitseigenschaften nach Heusler [Werkstoffhandbuch Nichteisenmetalle, F 9/10] wiedergegeben.

Mangan-Aluminium-Kupferlegierungen sind härtbar. Der Aluminiumgehalt beträgt nach Heusler etwa 8—10%. Legierungen mit 13% Mangan, 9% Aluminium haben eine Zugfestigkeit von 96 kg/mm² und 1% Dehnung. Sie sind gegen Fruchtsäuren beständig und werden unter anderem für Obstmesser verwandt.

¹ Über Sonderbronzen finden sich ausführliche Angaben bei Reinglas: Chemische Technologie der Legierungen. Leipzig: Otto Spamer 1926.

Tabelle 26. Mangan-Kupferlegierungen.

	Temperatur ° C	Zugfestigkeit σ_B kg/mm ²	Dehnung δ_{10} %	Bemerkung
5%iges Mangan-Kupfer, gegläht	20	32—36	35—39	seewasserbeständig
5% „ „ „ „	200	35,7	36,5	
5% „ „ „ „	300	33,5	37,1	
15% „ „ „ „ (Resistin), gegläht	20	45—47	25—27	
15% „ „ „ „ „ „	250	48,2	32,2	
15% „ „ „ „ „ „	300	45,0	37,5	
15% „ „ „ „ „ „	400	30,5	67,7	
15% „ „ „ „ „ „ hartgezogen	20	52—56	12—18	

(Nach Angaben von Heusler: Werkstoffhandbuch, F 9/10.)

8. Nickel.

Nickel hat wegen seiner hohen Beständigkeit gegen atmosphärische Einflüsse und viele Chemikalien ein weites Anwendungsgebiet im Apparatebau gefunden.

Für die einwandfreie Verarbeitung des Nickels zu Schmiedestücken, Blechen und Rohren ist eine sehr sorgfältige Desoxydation erforderlich.

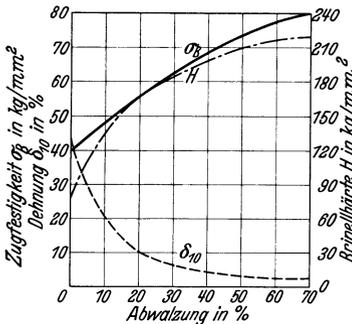


Abb. 54. Nickel. Einfluß der Kaltverformung auf die Festigkeit von Nickel.

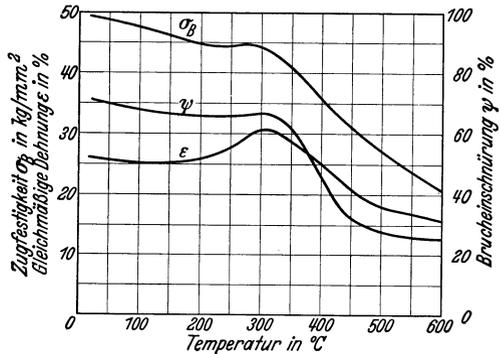


Abb. 55. Nickel. Einfluß der Temperatur auf die Festigkeit von Nickel.

Die Desoxydation erfolgt durch geringen Mangan- und Magnesiumzusatz. Ebenso wie Sauerstoff ist auch Schwefel sehr schädlich. Das Glühen des Nickels muß deshalb in neutraler Atmosphäre erfolgen. Nickel darf nie schwefelhaltigen Heizgasen ausgesetzt werden. In Tabelle 27 (S. 526) sind die Festigkeitseigenschaften von Nickel wiedergegeben. Durch Kaltwalzen und Kaltziehen lassen sich die Festigkeitseigenschaften wesentlich steigern. Zusatz von 1—2% Mangan erhöht die Festigkeit, auch Warmfestigkeit. Als Formguß läßt sich Nickel nicht verwenden.

Die Festigkeitseigenschaften von Nickel sind in Abb. 54 in Abhängigkeit von der Kaltverformung nach Hohorst [Werkstoffhandbuch

Tabelle 27. Festigkeitseigenschaften von Nickel.

	Zugfestig- keit σ_B kg/mm ²	Dehnung δ_{10} %	Brinell- Härte
Nickel, weichgeglüht	40—48	40—50	80—90
„ hartgewalzt	70—80	2	180—220
„ mit 1% Mangan, geblüht . . .	51	43	—
„ mit 2% Mangan, geblüht . . .	57	40	—

Nichteisenmetalle, M 1/2] und in Abb. 55 in Abhängigkeit von der Temperatur nach Sachs [Mechanische Technologie der Metalle. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft 1925] dargestellt.

Nickel ist beständig gegen Wasser, auch Seewasser und kohlen-säurehaltiges Wasser, Alkalien, Seifenlauge, Ammoniak, Borsäure, Farblösungen, Zuckerpflösungen, Beizlösungen, Gerblösungen, Fettsäuren, Leim. Es ist ferner ziemlich beständig gegen viele organische Stoffe, auch gegen mäßig konzentrierte organische Säuren. Salzsäure und Schwefelsäure greifen mäßig an. Salpetersäure ist stark aggressiv. Der Angriff aller Säuren wird bei Gegenwart von Sauerstoff sehr stark erhöht.

Nickel wird hauptsächlich verwendet für Kessel, Behälter, Rohrleitungen, Autoklaven, Abdampfschalen, Schmelzkessel für Alkalien namentlich in der Ammoniak-, Seifen-, Farben- und Lackindustrie, ferner für Heißdampfarmaturen und viele Laboratoriumsgeräte.

9. Nickellegierungen.

a) Kupfer-Nickellegierungen.

Nickel und Kupfer bilden in allen Mischungsverhältnissen Mischkristalle. Für den Apparatebau kommen hauptsächlich Legierungen mit 25—70% Nickel und 75—30% Kupfer in Betracht. Kupfer-Nickellegierungen mit 66²/₃% Nickel, Rest Kupfer eignen sich besonders infolge ihrer hohen Warmfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit. Sehr viel verwendet wird eine Naturlegierung, Monelmetall genannt, die aus Rotnickelkies gewonnen wird. Sie besteht aus etwa 67% Nickel, 28% Kupfer, 5% Eisen, Mangan, Kohlenstoff und Silicium. Sie wird auch

Tabelle 28. Festigkeitseigenschaften von Kupfer-Nickellegierungen.

	Zugfestig- keit σ_B kg/mm ²	Dehnung δ_{10} %	Bemerkung
20% Nickel, 80% Kupfer . . .	~ 35	~ 40	Kühlerrohre, Bleche
66 ² / ₃ % Nickel, 33 ¹ / ₃ % Kupfer . . .	~ 50	~ 35	
66 ² / ₃ % Nickel, 33 ¹ / ₃ % Kupfer, hart gewalzt, angelassen . . .	60—70	25—15	Chemische Apparateteile
Monelmetall, weich geblüht . . .	50	35	
„ kalt gewalzt	63—80	10—5	Bänder, Bleche
„ warm gewalzt	55—65	45—30	
„ kaltgezogen	63—80	20—10	„ Stangen „
„ gegossen	32—58	30—8	„

durch Zusammenschmelzen der Einzelbestandteile hergestellt. Ähnlich zusammengesetzte Legierungen sind Silverin, Nicorros, Corronil.

Über die Warmfestigkeit von Monelmetall gibt Abb. 56 Auskunft.

Die Kupfer-Nickellegierungen mit etwa 67% Nickel sind völlig beständig gegen feuchte Atmosphäre, Wasser, Seewasser, Ammoniak, Borsäure, Fettsäuren, Salpetersäure. Sie sind auch ziemlich beständig gegen reine Salzsäure, Schwefelsäure und verdünnte organische Säuren. Die Zahl der Chemikalien, von denen sie nicht oder nur wenig angegriffen werden ist ziemlich groß. Salpetersäure, Chromsäure, Essigsäure, schweflige Säure, Phosphorsäure greifen stärker an (s. S. 552f., Tabelle 41). Oxydation durch Sauerstoff erfolgt bei Monelmetall erst bei etwa 700° C.

Die Verwendung von Monelmetall und ähnlichen Legierungen im Apparatebau ist demnach sehr vielseitig. Sie werden zu Stangen, Rohren, Profilen, Blechen, Draht, Gußstücken und Schmiedestücken verarbeitet. Hergestellt werden Autoklaven, Behälter, Destillierapparate, Exaktoren, Separatoren, Trockensysteme, Rührwerke, Pumpen, Armaturen.

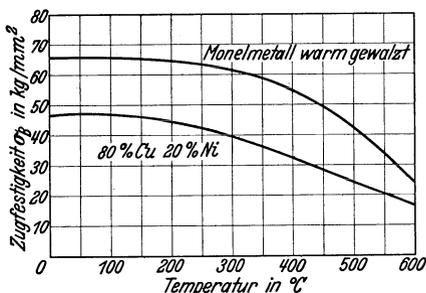


Abb. 56. Kupfer-Nickellegierungen. Einfluß der Temperatur auf die Festigkeit.

b) Kupfer-Nickel-Zinklegierungen.

Diese kommen unter der Bezeichnung Neusilber, Argentan, Alpacka, Packfong, German Silver in den Handel. Je nach dem Verwendungszweck ist die Zusammensetzung sehr verschieden. Sie bestehen aus etwa 5—34% Nickel, 50—70% Kupfer, 13—36% Zink. Zur Verbesserung der Gießbarkeit werden bis 3% Blei zulegiert. Ferner sind oft geringe Zusätze von Zinn, Eisen, Mangan, Cadmium, Kobalt, Aluminium, Phosphor, Antimon u. a. vorhanden. Im Apparatebau wird Neusilber namentlich für Armaturen verwandt. Es ist im allgemeinen chemisch beständiger als Messing. Durch Oberflächenbehandlung mit Salpetersäure kann noch eine Veredlung der Oberfläche erfolgen.

c) Nickel-Chromlegierungen.

Die Nickel-Chromlegierungen sind die gegen hohe Temperaturen beständigsten metallischen Werkstoffe. Bei geeigneter Zusammensetzung sind sie auch chemisch recht beständig, so namentlich gegen heiße Gase. Zur Verbesserung ihrer mechanischen Eigenschaften werden sie noch mit Eisen, Mangan und Molybdän legiert.

In Tabelle 29 (S. 528) sind die Festigkeitseigenschaften einiger Chrom-Nickellegierungen sowie von Chrom-Nickel-Eisen-Molybdänlegierungen wiedergegeben.

In Abb. 57 sind die außerordentlich günstigen Festigkeitswerte bei höheren Temperaturen der Legierung mit 15% Chrom, 60% Nickel,

Tabelle 29. Chrom-Nickellegierungen¹.

	Ungefähre Zusammen- setzung in %					Zustand	Streckgrenze σ_S kg/mm ²	Zugfestigkeit σ_B kg/mm ²	Dehnung δ_{10} %
	Cr	Ni	Fe	Mn	Mo				
Chrom-Nickel B*	15	61	20	4	—	} geglüht bei 1000° C hartgezogen	23	60	48
„ „ B 7 M*	15	60	16	2	7		49	80	35
„ „ B 7 M*							120	bis 130	4—5
Legierung von Borchers	30	67,5 bis 68,5	1,5	2,5	Ag evtl. Mo	gegossen		45	—
„ „ „						gewalzt und geglüht	40	65	40
„ „ „						hart gewalzt		125	

16% Eisen, 2% Mangan und 7% Molybdän dargestellt. Die Werte des Zugversuches wurden in Versuchen von 20—30 h Dauer ermittelt.

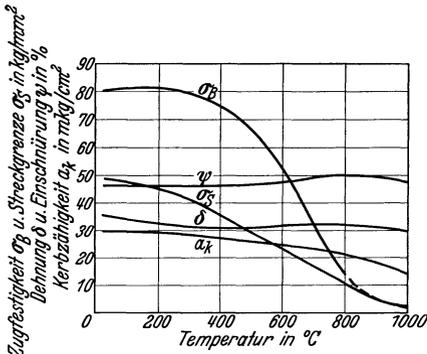


Abb. 57. Festigkeit einer Chrom-Nickel-Molybdänlegierung bei erhöhten Temperaturen (nach Angaben der Heraeus Vacuum-schmelze A.G., Hanau).

Chrom-Nickellegierungen werden wegen ihres hohen Widerstandes für elektrische Heizelemente verwandt. Ihre hohe Hitzebeständigkeit und Unempfindlichkeit gegen heiße Gase macht sie geeignet für Heizanlagen, Roste, Glühtöpfe.

10. Magnesium und Magnesiumlegierungen.

Reines Magnesium kommt als Baustoff wenig in Betracht, da es sehr leicht korrodiert. Nur gegen Flußsäure ist es beständiger, da sich ein schützender Fluoridüber-

zug bildet. Wichtiger sind die Magnesiumlegierungen, namentlich die Elektronlegierungen, die noch leichter als Aluminium sind.

Elektronmetall besteht hauptsächlich aus Magnesium mit Zusätzen von Aluminium (für Guß- und Preßlegierungen bis 10%, Bleche bis 6,5% Aluminium), Zink (bis zu 3%), Mangan (0,2—0,5%), Silicium (für Kokillenguß 2—3%, Preßlegierungen bis 1,4%). Es läßt sich gut warm pressen und warm walzen. Durch Warmverformen wird die Festigkeit erheblich gesteigert. In Tabelle 30 sind die Festigkeitseigenschaften einiger Legierungen nach Angaben von Menking, Ruhrmann, de Ridder und Altwicker im Werkstoffhandbuch Nichteisenmetalle (K3—K5) wiedergegeben.

¹ Vgl. auch S. 507, Hochhitzebeständige Stähle.

* Heraeus Vacuum-schmelze A.G., Hanau.

Tabelle 30. Festigkeitseigenschaften einiger Elektronmetalle.

Legierung	Zustand	Streckgrenze σ_S kg/mm ²	Zugfestigkeit σ_B kg/mm ²	Dehnung δ %	Druckfestigkeit σ_B kg/mm ²
AZF 4% Al, 3% Zn, 0,2—0,5% Mn, Rest Mg,	Sandguß Kokillenguß	9—10 10	17—20 20—23	4—6 6—10	32 35—38
V1 10% Al, Rest Mg		12	13—18	2—4	bis 30
AZM 6—6,5% Al, 1% Zn, 0,2—0,5% Mn, Rest Mg	gepreßt gewalzt weich	20—22 20—23	28—32 28—32	12—16 12—16	35—38 35—37
AZD 5% Mn, 3% Zn, 3% Cd, 0,2—0,5 Mn, Rest Mg	gewalzt weich gewalzt hart gewalzt hart	21—24 — —	30—40 36—42 34—40	10—12 1—3 1—3	37—42 — —

Elektronmetall hat gegenüber Aluminium den Vorzug, daß es durch alkalische Flüssigkeiten nicht angegriffen wird. Es ist ferner beständig gegen verdünnte Flußsäure, Benzin, säurefreie Öle und Fette. Von Säuren, auch sehr schwachen organischen Säuren, Salzlösungen wird es zerstört. Zum Schutz gegen Witterungseinflüsse empfiehlt es sich, Elektronmetall zu beizen.

11. Zink.

Zink gehört zu den unedelsten Metallen und wird von den meisten Chemikalien ziemlich rasch angegriffen. Gegenüber den zerstörenden Einflüssen der Atmosphäre ist es ziemlich beständig, da sich durch die Feuchtigkeit der Atmosphäre Zinkhydroxyd und unter dem Einfluß von Kohlensäure basische Carbonate bilden, die auf dem Metall einen dichten Überzug bilden, der vor weiterer Korrosion schützt. Gegen reines Wasser ist Zink beständig. Lufthaltiges Wasser bildet ebenfalls einen schützenden Überzug. Verunreinigungen im Zink wie Blei, Eisen, Cadmium, Arsen, Wismut, Kupfer erhöhen die Korrosion. Zink wird hauptsächlich zu Blechen und Drähten verarbeitet. Wichtig ist ferner die Verzinkung von Stahl (s. S. 546).

12. Zinn.

Zinn eignet sich wegen seiner geringen Festigkeit wenig als Konstruktionswerkstoff. Zugfestigkeit 3,5—5 kg/mm². Es ist aber sehr beständig gegen Luft, Wasser, Alkohol, Kraftstoffe, die meisten Fruchtsäuren. Zinngeräte dürfen wegen Umwandlung in eine brüchige Modifikation nicht längere Zeit der Kälte ausgesetzt werden. Bei Temperaturen unter 18° C zerfällt es allmählich zu Pulver, da eine Umwandlung der beständigen β -Zinnkristalle in amorphes α -Zinn erfolgt (Zinnpest). Zinn wird hauptsächlich für Gefäße, Dichtungsringe, Rohrleitungen und metallische Überzüge von Stahl und Kupfer verwandt. Von Bedeutung ist es ferner als hochwertiger Bestandteil für viele Legierungen, namentlich Lagermetalle und für Überzüge.

13. Lagermetalle.

Für die Lagerung umlaufender Maschinenteile werden Lager aus Gußeisen, Bronze und mit Zinnlegierungen (Weißmetall) oder Bleilegierungen ausgegossene Lagerkörper verwandt. Die Lagerweißmetalle bestehen aus einer weichen Grundmasse, in die härtere Krystalle eingebettet sind. Sie sind hauptsächlich Zinn-Blei-Antimon-Kupferlegierungen. Ihre Zusammensetzung ist genormt (Tabelle 31).

Tabelle 31. Weißmetalle.

Bezeichnung	Zusammensetzung in %				Zulässige Abweichungen	Druckversuch (nach Versuchen der Technischen Hochschule Breslau)							
						nach DIN 1703 ¹				Quetschgrenze kg/mm ²			
	Sn	Sb	Cu	Pb		20 ^o	50 ^o	75 ^o	100 ^o	20 ^o	50 ^o	75 ^o	100 ^o
WM 80 F	80	10	10	—	Sn ± 1%	13,8	9,4	7,2	6,2	35,5	40	44	45
WM 80	80	12	6	2	Sb ± 1%	13,1	9,9	8,2	7,6	35,5	42	46	48
WM 70	70	13	5	12	Cu ± 1%	12,7	9,3	7,6	6,8	39	49	54	56
WM 50	50	14	3	33	Pb ± 1%	9,9	7,6	7,1	6	21,5	39	48	52
WM 42	42	14	3	41	Sb ± 1%	9,9	7,8	7	6	18	29	35	37
WM 20	20	14	2	64	Pb ± 1%	10,9	8,1	7,1	6	19,5	37,5	46,5	41,5
WM 10	10	15	1,5	73,5	Cu ± 0,5%	11,1	8,6	7,3	6,6	22,5	30	34	26,5
WM 5	5	15	1,5	78,5	Sb ± 1%	10,3	7,8	6,5	5,8	25,5	30	33	30
					Pb ± 1%								

Zulässige Verunreinigungen Eisen = 0,10%, Zink, Aluminium je 0,05%.

Zinnlagermetalle müssen nach dem Vergießen möglichst schnell abkühlen, um ein Gefüge mit sehr vielen kleinen Krystallen zu erhalten. Infolge des hohen Zinnpreises versucht man, mit möglichst bleireichen Lagermetallen auszukommen. Es sind verschiedene Bleilagermetalle entwickelt worden. Erwähnt seien Thermit (70—72% Blei, 22—20% Antimon, 4% Zinn, 1,5—3% Nickel und 0,5—1% Kupfer) und die zinnfreien Alkali- und Erdalkalimetalle, z. B. Bahnmetall, das aus einer weichen Grundmasse von Blei-Natrium-Lithium besteht, in die harte Blei-Calciumkrystalle eingebettet sind.

14. Edelmetalle.

a) Silber.

Silber findet trotz des verhältnismäßig hohen Preises infolge seiner hohen chemischen Beständigkeit Verwendung. Es läßt sich sehr leicht kalt verformen. Nachteilig ist die geringe Härte und die geringe Verschleißfestigkeit. Die Zugfestigkeit beträgt etwa 7,5 kg/mm², bei gewalzten und hartgezogenen Drähten 30—35 kg/mm². Die Warmfestigkeit ist gering.

¹ Siehe Anmerkung S. 493, unten.

Feinsilber hat in der Regel Verunreinigungen von 0,04—0,2%, meist Kupfer, Blei und Gold. Durch Verunreinigung mit Eisen, Wismut, Antimon wird Silber spröde.

Die chemische Beständigkeit des Silbers ist besonders gut gegen alle Alkalien. Dagegen wird es von den meisten kalten Säuren leicht angegriffen. Konz. Schwefelsäure und verdünnte Salpetersäure greifen sehr stark an. Gegen kalte Salzsäure und Essigsäure ist es beständig. Im Apparatebau wird es zu Schalen, Retorten und Rohrschlangen verarbeitet.

Durch Legieren mit Kupfer wird die Festigkeit zwar erhöht, doch wird die Korrosionsbeständigkeit schlechter. Bei einer Reihe anderer Legierungen, z. B. mit Antimon, Zinn, Wismut, Aluminium wird zwar eine gute chemische Beständigkeit erreicht, doch sind die mechanischen Eigenschaften schlechter. Soweit es daher im Apparatebau wirtschaftlich ist, kommt in der Regel nur Feinsilber in Frage.

b) Gold.

Der hohe Preis und die geringen Festigkeitswerte lassen eine Verwendung nur in seltenen Fällen zu. Es ist neben dem Platin das chemisch beständigste Metall, da es von den meisten Säuren, Basen und Salzlösungen nicht angegriffen wird.

c) Platin.

Platin ist gegen chemische Angriffe besonders beständig. Sein hoher Preis beschränkt die Verwendung allerdings sehr. Wegen seiner katalytischen Wirkung bei vielen chemischen Reaktionen wird es in Netzform, ferner in fein verteiletem Zustand, meist in Form von Platinasbest als Kontaksubstanz benutzt. Auch als Elektrodenmaterial findet es Anwendung.

Platin läßt sich sehr gut walzen und ziehen. Hergestellt werden gewalzte Folien bis zu 0,0025 mm Dicke und Drähte bis zu 0,015 mm Durchmesser. Reines Platin ist verhältnismäßig sehr weich und hat geringe Verschleißfestigkeit. Durch Legieren mit Iridium kann die Härte und die chemische Beständigkeit gesteigert werden.

Tabelle 32. Festigkeitseigenschaften von Platin und Platin-Iridium. (Nach Geibel und Houben.)

	Zugfestigkeit kg/mm ²	Dehnung %	Brinell-Härte 5/500/90 kg/mm ²
Platin bis 1100° C ausgeglüht.	20	45	50
30% kaltverformt	35	4	80
50% kaltverformt	37	3	90
Platin mit 5% Iridium bei 1000° C geglüht. .	30	15	100
„ „ 10% „ „ 1000° C „ . .	48	13	140
„ „ 20% „ „ 1000° C „ . .	80	11	230
„ „ 30% „ „ 1000° C „ . .	116	10	350

Platin ist beständig gegen die meisten chemischen Angriffe, auch Säuren. Von Königswasser wird es gelöst. Legierungen des Platins mit 20—30 % Iridium sind auch gegen Königswasser verhältnismäßig beständig.

Platin wird schnell durch Metallschmelzen zerstört wie schmelzendes Arsen, Antimon, Blei, Cadmium, Eisen, Kupfer, Zinn, Zink, Wismut, bei stärkerer Hitze auch von Gold und Silber und die Oxyde und Salze dieser Metalle in Gegenwart reduzierender Stoffe. Ebenso sind für Platin bei höheren Temperaturen Kohlenstoff, Silicium, Bor und Phosphor gefährlich. Platingerätschaften dürfen nie mit einer rußenden oder mit ungenügender Luftzufuhr brennenden Flamme in Verbindung gebracht werden.

C. Nichtmetallische Werkstoffe.

1. Holz.

Holz eignet sich infolge seines geringen Gewichtes, seiner guten Bearbeitbarkeit und Beständigkeit gegen viele Chemikalien als Konstruktionswerkstoff. Nachteilig sind bei Holz die bedeutenden Abweichungen der Festigkeitseigenschaften und der Elastizität in den drei Hauptrichtungen. Die Faserrichtung ist für die Festigkeit des Holzes ausschlaggebend. Parallel zur Faser ist die Zug- und Druckfestigkeit am höchsten. Bildet die Faser nur einen kleinen Winkel zur Beanspruchungsrichtung, so nehmen alle Festigkeitseigenschaften erheblich ab. Ein weiterer Nachteil ist das Quellen des Holzes durch Feuchtigkeit und das Schrumpfen durch Austrocknung. Gut ausgetrocknetes Holz ist diesem Mangel in geringerem Maße ausgesetzt.

Die Festigkeitseigenschaften verschiedener Hölzer sind in Tabelle 33, die zulässigen Beanspruchungen im Bauwesen nach behördlichen Vorschriften in Tabelle 34 zusammengestellt (s. auch Tabelle 40).

Tabelle 33. Festigkeitseigenschaften von Hölzern.

Holzart	Zugfestigkeit σ_B kg/cm ²		Druckfestigkeit σ_{-B} kg/cm ²		Biege- festigkeit σ'_B kg/cm ²
	parallel zur Faser	senkrecht zur Faser	parallel zur Faser	senkrecht zur Faser	
Eiche	600—1500	45—60	350—800	90—140	250—1500
Esche	500—1500	80—120	400—800	100—150	500—1800
Rotbuche	600—1400	65—120	350—800	100—160	500—1500
Weißbuche	800—1600	—	500—800	100—200	800—1300
Kiefer	500—1500	15—60	300—700	70—140	500—1200
Fichte	500—1400	20—40	300—600	60—100	400—1100
Tanne	500—1100	—	300—500	60—100	400—1000
Tallowood	1000—1750	—	~ 600	70—140	1100—1300

Die Festigkeit nimmt mit zunehmendem Feuchtigkeitsgehalt wesentlich ab. Fichtenholz mit 63 % Feuchtigkeit hat etwa nur die halbe Festigkeit von lufttrockenem Holz mit 14 % Feuchtigkeit.

Holz eignet sich besonders dort als Baumaterial für Gebäude, Treppen, Böden, wo Eisen durch Säuredämpfe und Salze schnell zerstört wird.

Tabelle 34. Zulässige Beanspruchungen für Holz (parallel zur Faserrichtung).

Holzart	Zug kg/cm ²	Druck kg/cm ²	Biegung kg/cm ²	Abscherung kg/cm ²	Abscherung senkrecht zur Faser kg/cm ²
Eiche	100—120	80—100	100—120	15—20	80—90
Buche					
Esche	100—120	66	—	—	—
Kiefer (astfrei) . .	100—120	60—80	100—120	10—15	60—70
Tanne	60	50	60	—	—
Fichte					
Tallowood	200	160	200	—	30

Verwendet wird es weiterhin für Filterpressen, Rohrleitungen, Bottiche, Kühltürme für Dämpfe und Laugen.

Für die Beständigkeit des Holzes gegenüber chemischen Angriffen ist die Dichtigkeit des Holzes maßgebend. Auch Hölzer mit hohem Harzgehalt wie z. B. Pitchpine sind sehr widerstandsfähig. Schwache Säurelösungen greifen Holz nur wenig an, auch ist es gegenüber Säuredämpfen recht beständig, nur schweflige Säure zerstört Holz sehr schnell. Verdünnte kalte Alkalien bewirken zwar eine Schrumpfung der Holzsubstanz, doch erfolgt keine wesentliche Zerstörung.

Die Beständigkeit des Holzes gegen chemische Angriffe kann durch Konservierungsmittel noch gesteigert werden. Hierfür eignet sich unter anderem die Durchtränkung mit neutralen Salzen und phenolhaltigen Teerölen, ferner Überzüge mit Blattaluminium, Pechanstriche oder Spatlackanstriche mit Aluminiumpulver [Dunlap: Korrosion u. Metallschutz 4, 284 (1928)]. Auch Überzüge von Emaillack und Schellack haben sich als Schutz gegen Feuchtigkeit bewährt.

2. Keramische Erzeugnisse.

Für die vielseitigen keramischen Erzeugnisse bilden die Kaoline, Tone, Speckstein, verschiedene Arten der Kieselsäure (Quarz, Feuerstein, Opal, Kieselsinter, Tripel, Kieselgur), Feldspat, Bauxit, Korund, Kalkspat, Dolomit, Magnesit, Graphit, Flußspat, Kryolit, Zirkonerde, Monazit-sand die Rohstoffe. Je nach der Zusammensetzung der Rohstoffe, der verschiedenen Aufbereitung und der Temperatur des Brandes, gliedert Singer [Die Keramik im Dienste von Industrie und Volkswirtschaft, 1923] die keramischen Erzeugnisse in Gruppen (s. S. 534).

Im folgenden kann nur soweit auf die vielartigen Erzeugnisse eingegangen werden, als sie für den chemischen Apparatebau von besonderer Bedeutung sind. Die deutsche keramische Industrie hat es verstanden, sich den immer wachsenden Bedürfnissen der Technik in hohem Maße anzupassen und eine große Zahl hochwertiger Werkstoffe zu entwickeln.

Die Vorzüge verschiedener keramischer Erzeugnisse sind hervorragende Beständigkeit gegen hohe Temperaturen und chemische Angriffe, wie sie bei anderen Werkstoffen nicht erzielt werden können. Die früher noch recht niedrigen Festigkeitseigenschaften konnten wesentlich

Einteilung der keramischen Erzeugnisse.

A. Irdengut.

Scherben porös und nicht-durchscheinend.

1. Baumaterial:

α) nicht weißbrennend:
Ziegel, Verblender, Bauterra-
kotten, Hohlziegel, poröse
Steine, Drainröhren, Dach-
ziegel.

β) weißbrennend:
Schamottesteine und -werk-
stücke, feuerfeste Erzeugnisse
aus besonderen Stoffen, feuer-
feste Hohlware.

2. Geschirr:

α) nicht weißbrennend:
Antike Geschirre, Töpferge-
schirr, Blumentöpfe, Wasser-
kühler, Lackware, sog. ordi-
näre Fayence, Ofenkacheln.

β) weißbrennend:
Tonsteingut, Tonzellen, Ton-
pfeifen, Kalksteingut, Feld-
spat- oder Hartsteingut, Sani-
tätsgeschirr, Feuertonware.

I. Ziegelerzeugnisse.

II. Feuerfeste Erzeugnisse.

III. Töpfererzeugnisse.

IV. Steingut.

Irdenware (im weiteren Sinne).

B. Sinterzeug (Scherben dicht).

a) Scherben nicht oder nur an den Kanten durchscheinend (Steinzeug):

1. Baumaterial:

α) nicht weißbrennend:
(Klinkerware)
Klinker, Fliesen, Kanalisa-
tionsröhren.

β) weißbrennend:
Säurefeste Steine, Isolatoren.
Wannen, Tröge, chemische
Gefäße usw.

2. Geschirr:

α) nicht weißbrennend:
Steinzeug, auch künstlich ge-
färbt, Feinterrakotten, Wedge-
woodware, Chromolith usw.

β) weißbrennend:
Steinzeug, auch künstlich ge-
färbt, Feinterrakotten, Wedge-
woodware, Chromolith usw.

V. Steinzeug.

b) Scherben durchscheinend (Porzellan):

1. Baumaterial:

Wandplatten, Futtersteine für Trommelmühlen usw. aus Hart-
porzellan, elektrotechnische Artikel.

2. Geschirr:

Hartporzellan, Weichporzellan, Spezialitäten der Porzellan-
technik.

VI. Porzellan.

C. Steatit.

Scherben dicht und weiß, schwach transparent; Oberfläche hellgelb.

VII. Steatit.

gesteigert werden. Als Nachteil muß ihre geringe Stoßfestigkeit und Zugfestigkeit in Kauf genommen werden.

a) Feuerfeste Erzeugnisse.

Feuerfeste Erzeugnisse sollen einen Schmelzpunkt von mindestens 1580° C (Seegerkegel 26) haben. Wichtig für die Güte feuerfester Steine ist nicht nur ihr Schmelzpunkt, sondern die Temperatur, bei der der Stein unter Belastung zu erweichen beginnt, ferner die Gasdurchlässigkeit und Beständigkeit gegen Temperaturwechsel und chemischen Angriff. Als wesentlicher Faktor in der Beurteilung feuerfester Erzeugnisse kommt die chemische Zusammensetzung in Betracht. Das ternäre System $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ wurde von Berl und Löblein [Forsch.-Arb. Ing. - Wes. 1930, Heft 325] eingehend untersucht. In Abb. 58 ist die Abhängigkeit der Schmelztemperatur von der chemischen Zusammensetzung im Gibbsschen Dreieck dargestellt. Die starke Veränderlichkeit der für die feuerfesten Steine besonders wichtigen Druckerweichung ist aus Abb. 59 zu erkennen. In diesem Diagramm sind die Punkte der untersuchten Mischungen im Gibbsschen Dreieck unter einem Winkel von 45° auf eine Dreiecksseite projiziert und die jeweilige Höhe auf der Senkrechten aufgetragen.

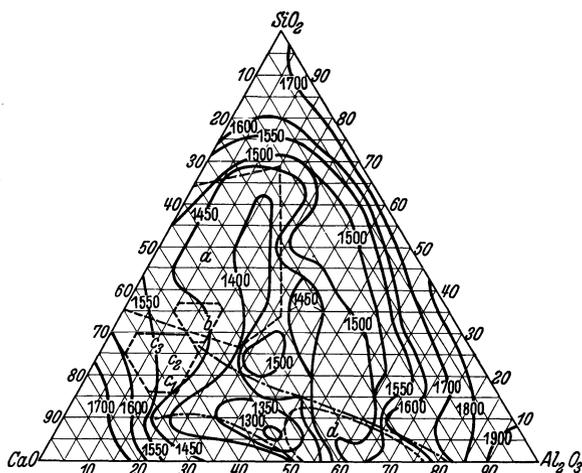


Abb. 58. Schmelzpunktdiagramm des ternären Systems $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$, nach Berl und Löblein [Forsch.-Arb. Ing.-Wes. 1930, Heft 325]. a Feld der Hochofenschlacken; b der Gießerei-Roheisenschlacken; $c_1 - c_3$ der Portland-, Eisenportland- und Hochofenzemente; d der Aluminatschmelzemente.

Der Erweichungspunkt liegt im allgemeinen um so höher, je größer der Kieselsäure- und Tonerdegehalt ist. Durch Kalk wird die Erweichungstemperatur herabgedrückt.

Die Zusammensetzung und wichtigsten Eigenschaften verschiedener feuerfester Erzeugnisse sind in den Tabellen 35 (S. 536 u. 537) und 36 (S. 538) zusammengestellt (s. auch S. 550, Tabelle 40).

Die feuerfesten Steine werden mit Mörtel vermauert, der in der Regel aus dem gleichen Material in feiner Vermahlung besteht. Für sehr hohe Temperaturen wird Mörtel aus einer Mischung von gemahlenem Schieferon mit etwas Kaolin empfohlen. Die Mörtelfugen müssen möglichst klein gehalten, die Steine also sauber aufeinandergepaßt werden.

Für die Haltbarkeit von feuerfesten Steinen ist die chemische Wechselwirkung zwischen den sauren oder basischen Bestandteilen des feuerfesten

Tabelle 35. Feuerfeste Steine.

Bezeichnung	Chemische Zusammensetzung in Gew.-%	Verwendung	Schmelztemperatur in °C		Druckfeuerbeständigkeit in °C		Volumenporosität in %	Bemerkungen
			SK	°C	Beginn	Ende		
Schamotte	55—60% SiO ₂ 36—41% Al ₂ O ₃ 0,2—0,6% CaO 0,8—0,2% Fe ₂ O ₃	Feuerungsanlagen, Gitterschächte, Retorten, Reaktionstürme, Reaktionskammern bei Stickoxyd- und Salpetersäureerzeugung, Ultramarinfabrikation, Röstöfen für sulfidische Erze, Öfen für chlorierende Röstung, Schwefelverbrennung, Calcineröfen für Schwefelkohlenstoff, für niedrig beanspruchte Teile, Decken, Gittersteine, Rauchkanäle.	> 26	> 1580	~ 1250	~ 1500	< 30	Bei hohen Temperaturen schwindend. Durch stärkeren Zusatz von gebranntem Ton im Verhältnis zum Bindeton oder auch durch Beigabe von Quarzit wird das Schwinden geringer. Saure Schlacken greifen stark an.
Quarzschamotte (halbsaure Steine)	Etwa 90% SiO ₂ , ferner Al ₂ O ₃ , CaO, Fe ₂ O ₃	Durch Feuer hochbeanspruchte Gewölbe, Tragsteine, Seitenmauern. Gewölbesteine für mittlere Temperaturen, Kammern, Gitter, Hintermauerungen.	30 32—33 29	1670 1720 1650	> 1300 > 1470	> 1500 bis 1600 > 1520	15—25 < 27	Wenig schwindend; basische Schlacke greift an.

Tondinassteine Silicasteine Silica I	> 94,5% SiO ₂ < 2% Al ₂ O ₃ < 3,5% CaO	Hochtemperaturöfen, hoch beanspruchte Gewölbe, Kokereiföfen, Glasindustrie, Stahlwerke.	32—33	1720	> 1630	< 25	Wachsen bei hohen Temperaturen; wenig temperaturwechselbeständig. Zerstörung durch basische Schlacken.
Silica II	> 92% SiO ₂	Rauchkanäle, Türfutter, Gitterwerke.	30	1670	> 1560	< 26	
Sillimanit	> 90% Al ₂ O ₃ · SiO ₂	Obere Ringlagen f. Schmelzwannen, Rekuperatoren, Trag- und Gewölbesteine in Hochtemperaturöfen, Brennkammern, Brennersteine, Brennkapseln, Düsenauskleidung bei Ammoniakverbrennung, Streckofensteine.	38—39	1875	1620	1750	Beständig gegen alkalische Schmelzen, salzhaltige Braunkohlensäure, konzentrierte Mineralsäuren; gute Temperaturwechselbeständigkeit.
Magnesitsteine	85—88% MgO 4—6% SiO ₂ 1—2% CaO 1—2% Al ₂ O ₃ 4—5% Fe ₂ O ₃	Für Öfen mit basischem Futter.	> 42	> 2000	etwa 1400—1500	24—30	Sehr empfindlich gegen Temperaturwechsel, nur wenig schwindend.
Carborundumsteine	45—90% SiC 5—25% SiO ₂ 3—20% Al ₂ O ₃ und Fe ₂ O ₃	Für höchste Temperaturen, Zinkretorten, Gasretorten, überall dort, wo hoher Wärmedurchgang erforderlich.	> 42	> 2000	> 1700	~ 30	Zersetzung durch oxydierende Gase über 1600° C. Schmelzende Alkalien lösen auf. Unempfindlich gegen Temperaturwechsel, höchste Wärmeleitfähigkeit.
Chromitsteine	38—60% Cr ₂ O ₃ , ferner CaO, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , MgO	Tiegel, Öfen für Calciumcarbidherstellung, Elektrod.	> 42	> 2000	bis 1750° C keine Erweichung		
Kohlenstoffsteine	85—90% C						

Steines mit den basischen bzw. sauren Bestandteilen der Aschen, Schlacken, Schmelzen von Einfluß. So werden saure Silicasteine durch alkali- und kalkhaltige Aschen zerstört. Bei der Auswahl der feuerfesten Baustoffe muß deshalb mit Sorgfalt vorgegangen werden. Die physikalischen Kennziffern geben allein oft keinen zuverlässigen Gütemaßstab. Korrosionsprüfungen sind nur bei hohen Temperaturen zuverlässig. Ein dichter Stein ist korrosionsbeständiger als ein poröser, jedoch empfindlicher gegen Temperaturwechsel. Schamotte hat sich für die feuerfeste

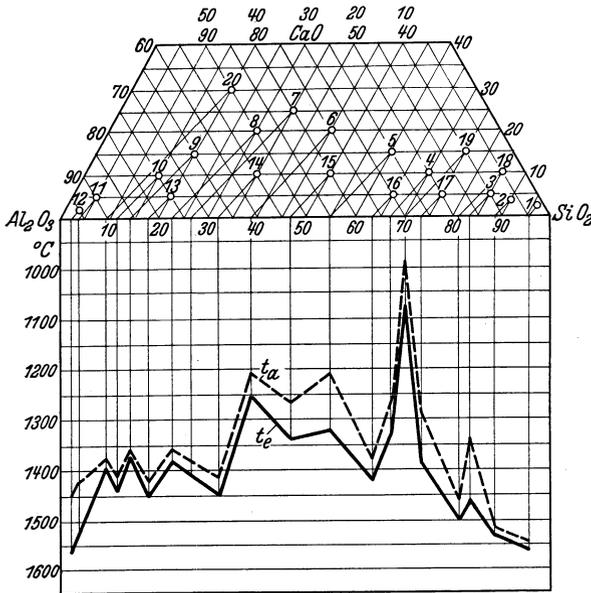


Abb. 59. Druckerweichungsdiagramm bei einer Belastung von 2 kg/cm² nach Berl und Löblein.

Auskleidung der Öfen zum Rösten sulfidischer Erze, auch bei der chlorierenden Röstung, bei der großtechnischen

Verbrennung von Schwefel und in Drehrohröfen zur Erhitzung von Gips mit Ton und Kohle bewährt. Schamotte findet weiterhin Verwendung für Retorten bei der Herstellung von Schwefelkohlenstoff, in Reaktionstürmen für Schwefelchlorür, in Reaktionsräumen beim jetzt verlassenen Leblanc-Sodaprozeß, bei der Stickoxydherstellung nach dem Luftverbrennungsverfahren, bei der Ammoniakoxydation

zu Stickoxyden und Verarbeitung dieser zu Salpetersäure, in der Ultramarinfabrikation usw.

Silicasteine zeichnen sich gegenüber Schamotte durch bessere Standfestigkeit bei hohen Temperaturen und größere Wärmeleitfähigkeit

Tabelle 36. Druckfestigkeit feuerfester Steine. (Nach Hirsch ¹.)

Material	Druckfestigkeit in kg/cm ² bei				
	20° C	800° C	1000° C	1200° C	1400° C
Schamotte I	50	74	97	250	53
Schamotte II	164	176	524	125	20
Schamotte III	123	220	430	170	53
Silicasteine (94% SiO ₂)	348	255	140	95	52
Magnesit (eisenarm)	958	948	813	420	232
Magnesit (eisenreich)	288	325	467	300	257
Chromitsteine	565	590	618	302	102

¹ Hirsch: Ber. Dtsch. keram. Ges. 9, 577 (1928).

aus. Sie bilden deshalb für Hochtemperaturöfen einen wertvollen Werkstoff, so bei der Stahlgewinnung, in der Glasfabrikation und in der Erzeugung von Leuchtgas.

Magnesitsteine und Chromitsteine werden hauptsächlich in der Elektrostahlindustrie verwandt; ein Nachteil der Magnesitsteine ist Empfindlichkeit gegen Temperaturwechsel. In Amerika wurden deshalb starke, beiderseits offene Flußstahlkästen mit Magnesit vollgestampft. Diese mit Stahlmantel versehenen Ziegel wurden mit den offenen Stirnflächen nach dem Ofenraum hineinragend eingebaut.

Gebrannter Bauxit gibt infolge seines hohen Tonerdegehaltes ebenfalls ein Material guter Feuerfestigkeit. Geschmolzener Bauxit mit Zusatz von 10% Bindeton wird wegen des hohen Preises fast nur für Laboratoriumsgeräte verarbeitet.

Ein hochfeuerfester Werkstoff von zugleich hoher Säurebeständigkeit ist geschmolzener Quarz, der durchsichtig als Quarzglas und durchscheinend als Quarzglas bezeichnet wird. Quarzglas wird aus Bergkrystall erschmolzen, Quarzglas aus reinem Quarzsand. Die Zugfestigkeit beträgt $< 7 \text{ kg/mm}^2$, die Druckfestigkeit 198 kg/mm^2 , Druckerweichung erfolgt bei 1500°C (s. auch Tabelle 40). Geschmolzener Quarz hat den geringsten Ausdehnungskoeffizienten aller Werkstoffe, so daß er auch sehr schroffem Temperaturwechsel standhält. Quarzteile lassen sich nur durch Schliff oder Kitt verbinden. Säurefester Kitt [Hirschfeld: Die Keramik im Dienste von Industrie und Volkswirtschaft, herausgeg. von Dr. Singer, S. 207. 1923] (s. auch S. 549) wird aus Schamotte, Lehm oder Quarzglaspulver mit dickflüssigem Zylinderöl bei $150\text{--}200^\circ \text{C}$ gut durchgeknetet, hergestellt. Quarzglas ist beständig gegen kalte und heiße Schwefelsäure, Salpetersäure, Phosphorsäure und Salzsäure, von Basen wird es angegriffen. Außer zu Laboratoriumsgeräten wird Quarzglas im chemischen Großbetrieb für die Herstellung konzentrierter Schwefelsäure durch Eindampfen nach dem Kaskadensystem, bei der Salpetersäureherstellung in Denitrierungsanlagen und in der Salzsäurefabrikation verwendet. Aus Quarzglas werden Schalen, Pfannen, Rohre, Platten, Türme u. a. m. hergestellt.

b) Töpfereierzeugnisse und Steingut.

Für die chemische Industrie kommen hauptsächlich poröse Gefäße aus eisenarmen Tonen für Filter, Filterplatten und Diaphragmen in Betracht. Glasierte Steingutplatten stellen ein hochwertiges, beständiges Wandbekleidungsmaterial für Laboratoriumsräume usw. dar.

c) Steinzeug.

Steinzeug wird aus gutem kieselsäure- und alkaloxydhaltigen fetten Steinzeugton gebrannt, dem für hochwertige Apparateile noch Flußmittel wie Feldspat, Quarzspat oder Pegmatit zugesetzt werden, damit die Sinterung bei Temperaturen möglichst unterhalb des Schmelzpunktes zu einem völlig dichten Material erfolgt. Um gute Feuerfestigkeit zu erreichen, wird ein Ton mit möglichst hohem Tonerdegehalt verwendet.

Die meisten Tone mit 2—3% Eisenoxyd ergeben ein graues bis braunes Steinzeug. Eisenoxydarme Tone ergeben ein weißes Steinzeug von sonst gleichen physikalischen Eigenschaften. Steinzeug wird in der Regel mit Kochsalz glasiert. Für den chemischen Apparatebau ist eine sorgfältige Aufbereitung der Masse erforderlich.

Steinzeug wird als Baumaterial in Form von Klinkerziegeln und Klinkerplatten (Keramikklinker und Eisenklinker) und säurefesten Steinen geliefert. Für die chemische Industrie werden namentlich Hohlkörper aus Steinzeug für säurefeste Apparateile und Maschinenteile in außerordentlich vielseitigen Formen hergestellt. Ein besonders hochwertiges Steinzeug ist die Sillimanitmasse mit einem Gehalt von 62,85% Al_2O_3 und 37,15% SiO_2 . Sie vereinigt die Vorzüge des Porzellans: gute Dichte, Homogenität und Temperaturbeständigkeit mit denen des Steinzeugs: gute Verarbeitbarkeit und Herstellung großer Stücke. Die Schmelztemperatur des Sillimanits beträgt 1825°C , so daß sehr hohe Oberflächen-temperaturen ertragen werden. Über die Festigkeitseigenschaften verschiedener Steinzeugarten gibt Tabelle 37 einige Angaben.

Tabelle 37. Festigkeitseigenschaften von Steinzeug.

	Druckfestigkeit kg/cm ²	Zugfestigkeit kg/cm ²	Biegefestigkeit kg/cm ²	Schlagzähigkeit cmkg/cm ²
Klinker	350—700	—	—	—
Klinkerplatten	350—700	—	—	—
Eisenklinkerplatten	700—2600	—	bis 200	—
Steinzeug ¹	3200—5800	63—133	234—402	1,3—1,9
Feinsteinzeug ¹ (DTS Sillimanit Z. 640)	5833	163	580	—
Steinzeug höchster Festigkeit (1929) ¹	bis 8210	bis 528	bis 953	4,7

Mit zunehmenden Querschnittsabmessungen nehmen die Festigkeitseigenschaften erheblich ab. Genauere Messungen hierüber fehlen noch. Steinzeug zeichnet sich durch hohe Verschleißfestigkeit aus. Durch Schleifen ist es recht genau bearbeitbar. Von besonderer Bedeutung sind die hervorragenden chemischen Eigenschaften. Gegen Salzsäure, Salpetersäure, Schwefelsäure und Salzlösungen ist es vollkommen beständig. Flußsäure, Kieselsäure, siedende Alkalilaugen, hochoerhitzte Phosphorsäure greifen dagegen Steinzeug an.

Wegen seiner hohen chemischen Beständigkeit ergeben sich vielseitige Anwendungsgebiete, so in der Erzeugung und Verarbeitung der Salzsäure, Schwefelsäure und Salpetersäure, in Färbereien, Bleichereien, Papierfabrikation, Lebensmittelindustrie. Steinzeug wird zu Rohren, Kühlschlangen, den verschiedensten Gefäßen, Armaturen und zu komplizierten Apparaten und Maschinenteilen verarbeitet. Erwähnt seien Rührwerke, Mahl- und Mischmaschinen, Druckgefäße, Ventilatoren,

¹ Nach Angaben von Singer: Die Keramik im Dienste von Industrie und Volkswirtschaft, S. 470. Braunschweig 1923.

Kolben- und Kreiselpumpen. Bei hohen Zug- oder Biegebeanspruchungen ist Stahlpanzerung erforderlich.

d) Porzellan.

Die wichtigsten Ausgangsrohstoffe sind Kaolin, Quarz und Feldspat. Die Zugfestigkeit beträgt etwa 100—320 kg/cm², die Biegefestigkeit etwa 570—860 kg/cm², wobei sich die kleinen Werte auf große Querschnitte von über 50 mm Dicke beziehen. Glasiertes Porzellan kann bis etwa 1200 °C, unglasiertes bis 1400° C verwandt werden. Gegen Temperaturwechsel ist es sehr beständig, wird jedoch hierin von geschmolzenem Quarz übertroffen. Die chemische Beständigkeit ist hervorragend. Angriff erfolgt durch Fluorwasserstoff, Kieselfluorwasserstoffsäure, heiße Phosphorsäure, schmelzende und hochkonzentrierte Lösungen von Alkalien und Alkalicarbonaten [Rabald: Werkstoffe und Korrosion, Bd. 2, S. 121. Leipzig 1931]. Bis zu 1400°C ist Porzellan praktisch gasundurchlässig.

Porzellan wird zu Gefäßen aller Formen und Rohren von 0,2—500 mm Durchmesser verarbeitet. Während Steinzeug mehr für dickwandige Apparateile verwandt wird, ist die Verwendung des Porzellans mehr auf dünnwandige Rohre und Gefäße beschränkt.

e) Steatit.

Steatit wird durch Brennen des Specksteins erzeugt. Kleine Apparateile wie Düsen für Brenner werden aus Speckstein gedreht. Das eigentliche Steatit wird durch Pressen des gemahlene Specksteines in Stahlmatrizen und Brennen bei Segerkegel 14—16 gewonnen.

Steatit hat sehr gute mechanische und chemische Eigenschaften. Nach Singer [Die Keramik im Dienste der Industrie und Volkswirtschaft, S. 405. 1923] beträgt die Druckfestigkeit 981 kg/cm², die Schlagbiegefestigkeit 2,2 cmkg/cm². Steatit ist beim Brennen nur sehr geringen Formänderungen unterworfen, da es nur 4% chemisch gebundenes Wasser enthält. Es lassen sich daher Teile höchster Genauigkeit herstellen.

Steatit hat sehr gute Säurebeständigkeit. Gegenüber Porzellan und Steinzeug zeichnet es sich durch bessere Beständigkeit gegen Basen aus. Flußsäure und heiße Phosphorsäure greifen Specksteinerzeugnisse an.

Die Verarbeitung des Steatits erfolgt unter anderem zu feinen säurebeständigen Düsen, zu Platten für Kesselauskleidungen und sehr gleichmäßigen Diaphragmen.

3. Glas.

Glas kommt hauptsächlich nur als Werkstoff für chemische Laboratoriumsgeräte in Betracht.

Die Zugfestigkeit beträgt für Jenaer Glas 3,3—8,1 kg/cm², die Druckfestigkeit 60—126 kg/cm². Flintglas beginnt bei 350—360° C, Crownglas bei 400—410° C, Thermometerglas 59 III bei 430—440° C zu erweichen (nach Angaben von Schott u. Winkelmann) [Rabald: Werkstoffe und Korrosion, Bd. 2, S. 2f. Leipzig 1931]. Gläser sind im allgemeinen

gegen Temperaturwechsel sehr empfindlich. Gute Gläser ertragen plötzliche Temperaturwechsel bis zu 150° C. Die chemische Beständigkeit hängt wesentlich von der Zusammensetzung ab. Gegen Säuren sind namentlich Kalkgläser, Bleigläser und borsäurehaltige Gläser beständiger als gegen Wasser. Flußsäure greift stark an. Gegen Wasser verhalten sich Natrongläser besser als Kaligläser. Durch Bildung einer unlöslichen Schicht nimmt jedoch der Angriff des Wassers mit der Zeit ab. Von den Salzen greifen namentlich Lösungen von Alkalicarbonaten an.

4. Beton.

Beton ist ein Gemenge aus Mörtel und Zuschlagsstoffen. Mörtel besteht aus Zement, Sand und Wasser. Als Zuschlagsstoffe werden Kies, Schotter, Steinsplitt und Steingruß verwandt. Für die Festigkeit des Betons ist maßgebend die Güte des Zementes, die Zementmenge, die Zusammensetzung und Oberflächenbeschaffenheit des Sandes und der Zuschlagsstoffe sowie der Wasserzusatz.

Die Zusammensetzung und Mindestfestigkeitseigenschaften von Portlandzement, Eisenportlandzement und Hochofenzement ist genormt [Deutsche Normen für Portlandzement, Eisenportlandzement und Hochofenzement. Zementverlag Charlottenburg]. Hochwertige Zemente sind meist normale, aber sehr sorgfältig hergestellte und feinst gemahlene Zemente,

die sich durch schnellere Angangerhärtung auszeichnen. Hochwertige Zemente sind ferner die Tonerde- oder Elektro- oder Schmelzzemente, die aus Bauxit und Kalk gewonnen werden. Sie erhärten sehr rasch. Schon nach einem Tag erreichen sie eine sehr hohe Festigkeit. Gegen schwache chemische Angriffe, z. B. kohlensäurehaltige Wässer, haben sich der seltener verwendete Romanzement und Erzzement manchmal bewährt. Zur Erzielung eines dichten Betons höchster Festigkeitseigenschaften müssen die Zuschlagstoffe (Sand und Kies) richtig zusammengesetzt sein [Graf: Der Aufbau des Mörtels und des Betons. Berlin: Julius Springer 1927]. In Abb. 60 sind die günstigsten Kornzusammensetzungen für den Sand und die gesamten Zuschlagstoffe nach den Bestimmungen des Deutschen Ausschusses für Eisenbeton (1932) wiedergegeben.

Das Verhältnis von Zement und Sand zu den Zuschlagstoffen soll so bemessen sein, daß die Hohlräume zwischen dem Kies und Splitt eben gut mit Zement und Sand ausgefüllt werden. Mit steigendem Wasserzusatz vermindert sich die Festigkeit des Betons. Die höchste Festigkeit ergibt erdfeucht angemachtes Gemisch aus Zement, Sand und Zuschlagstoffen. Bei hohen mechanischen Beanspruchungen wird Beton mit

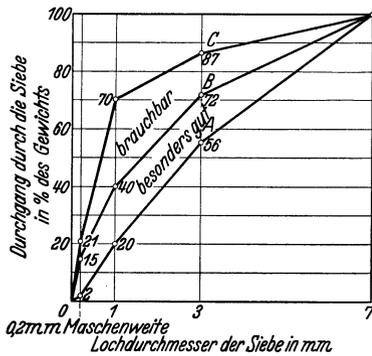


Abb. 60.

Günstigste Kornzusammensetzung Sand.
(Siebkurve nach Graf.) Die gestrichelte
Kurve gilt nur für Quetschsande.

Eiseneinlagen bewehrt (Eisenbeton). Verminderung des Verschleißes z. B. in Kanälen wird durch Zusatz von Stahlsand (Stahlbeton) erreicht.

Den günstigen mechanischen Eigenschaften des Betons steht die im allgemeinen geringe chemische Widerstandsfähigkeit entgegen. Die chemische Beständigkeit des Betons wird verbessert durch höheren Zementzusatz und geringeren Wasserzusatz, durch sorgfältige Auswahl und Zusammensetzung der Zuschlagsstoffe zur Erzielung eines dichten Betons. Durch Zusätze von Traß kann die Dichtigkeit und Beständigkeit gegen aggressive Wässer verbessert werden. Ein wirksamer Schutz des Betons für Anlagen der chemischen Industrie bildet in der Regel nur eine sorgfältige Oberflächenbehandlung [Graf u. Goebel: Schutz der Bau-

werke, S. 48f. Berlin 1930]. Gegen Säuren und organische Flüssigkeiten bewährt sich eine Tränkung mit flüsigem Schwefel. Gute Erfolge werden mit steinkohlenteerhaltigen und besonders bituminösen Überzügen erzielt. Außer Schutzanstrichen werden bei Behältern auch Überzüge aus bituminösen Massen aufgespachtelt oder Isolierhäute mit Klebemasse aufgeklebt. Mit guten bituminösen Schutzüberzügen erzielten A. Thum und H.

Holdt vollkommen dichte Überzüge von sehr guter Beständigkeit gegen konzentrierte Salzsäure und Phosphorsäure, gegen Schwefelsäure, Salpetersäure und Essigsäure mittlerer Konzentration, Salzlösungen und organische Säuren (s. S. 548). Schutzanstriche können durch Verschleiß von fließenden namentlich verunreinigten Wässern leicht zerstört werden.

Als Sonderbeton sind Gemenge von Asphalt, Pech und Zuschlagstoffen zu erwähnen, die säurebeständiger sind. Hierzu gehört der Prodoritbeton, der aus 7—12% Hartpech, 15—20% besonders präparierten und fein verteilten Mineralien sowie Kalkstein und Sand hergestellt wird. Er wird heiß verarbeitet. Prodorit ist bis 80° C beständig gegen Salzsäure, schweflige Säure, Phosphorsäure, Weinsäure, Milchsäure, viele Salzlösungen. Prodoritbeton hat höhere Festigkeit als Zementbeton. Bei hohen Beanspruchungen kann er wie Eisenbeton bewehrt werden. Behälter können bis zu 5 cm³ Inhalt fugenlos hergestellt werden.

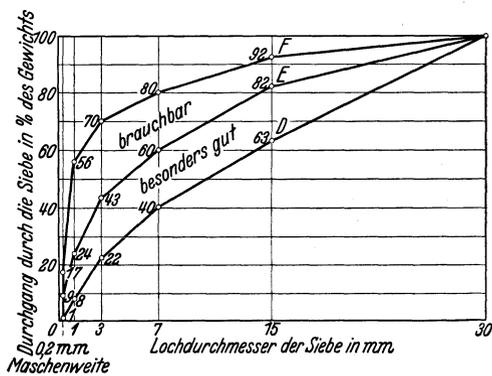


Abb. 61. Richtige Kornzusammensetzung der gesamten Zuschläge.

5. Kohlenstoff.

Kohlenstoff findet im Apparatebau als Werkstoff wegen seiner hohen chemischen Beständigkeit Verwendung. Brauchbar ist im allgemeinen nur der Graphit. Retortenkohle genügt den Ansprüchen meist nicht. Graphit wird gemahlen und mit Anthrazit und anderen kohlenstoffhaltigen pulverigen Materialien, vielfach auch mit einem Bindemittel (Stein-

kohlenteer, Melasse) gemengt, unter hohem Druck gepreßt und bei 1200 bis 1400° C unter Luftabschluß gebrannt. Acheson-Graphit ist geformtes Kohlenstoffmaterial, das durch nochmaliges hohes Erhitzen im elektrischen Widerstandsofen in graphitischen Zustand übergeführt wird. Für gute chemische Beständigkeit namentlich der Elektrodenkohle ist geringe Porosität erforderlich. Graphit ist beständiger als gewöhnliche Kohle. Kohlenstoff ist bei der Raumtemperatur gegen die meisten chemischen Angriffe beständig. Bei erhöhten Temperaturen greifen starke Oxydationsmittel an.

Kohlenstoff wird verwandt für Tiegel, Platten, Hähne und im weiten Umfange für Elektroden. Als Ersatz für Metall dient hochverdichtete, hochleitfähige in Graphit umgewandelte Kohle in elektrischen Lampenfassungen u. dgl.

6. Gummi und Hartgummi.

Gummi hat sich infolge seiner hohen Verschleißfestigkeit und guten Säurebeständigkeit eine weitgehende Verwendung im Apparatebau gesichert. Hartgummi ist als selbständiger Konstruktionswerkstoff geeignet; harter, mittelharter und weicher Gummi dient auch vielfach als Schutzschicht von Metallteilen, durch Belegen mit Platten oder hauptsächlich durch Überziehen mit einer Kautschukschicht, neustens durch bloßen Anstrich auch mit Chlorkautschuk. Hartgummi unterscheidet sich von Weichgummi hauptsächlich durch größeren Schwefelgehalt und längere Vulkanisationszeit.

Die Zugfestigkeit des Hartgummis beträgt etwa 3—7,5 kg/mm², die Druckfestigkeit 3—12 kg/mm². Hohe Stoßfestigkeit und Zähigkeit, gute Bearbeitbarkeit erleichtern die Anwendung als Konstruktionsmaterial.

Bei der Herstellung von Gummiüberzügen wird das Metall in eine Gummimilch gebracht (Latex). Die Kautschukteile werden auf dem Metall niedergeschlagen. Es wird ein sehr fest haftender und dichter Überzug erzielt. Metallische Konstruktionsteile beliebiger Form können so mit einer Kautschukschicht von 0,2 mm Dicke bis zu beliebiger Stärke überzogen werden.

Hartgummi ist unter anderem beständig gegen Salzsäure jeder Konzentration, 15—20% ige Schwefelsäure, Flußsäure, 5% ige Salpetersäure, Oxalsäure, Phosphorsäure, Natron- und Kalilauge bis zu mittleren Konzentrationen, neutrale, alkalische, schwachsaure Metallsalze und organische Salze. Stärker angegriffen wird Gummi durch Schwefelsäure höherer Konzentration, Anilin, Äther, Stickoxyde. Weichgummi wird vom Sauerstoff der Luft allmählich infolge Oxydation zerstört. Hartgummi beginnt bei Temperaturen über 50—60° C zu erweichen. Manche Qualitäten zeigen Erweichung erst über 70—80° C, Hartgummi besonderer Zusammensetzung über 100° C.

Hartgummi wird zu fertigen Apparateteilen wie Hähnen, Rohrstücken, Zentrifugen verarbeitet. Weitgehendste Anwendung finden Maschinen- und Apparateteile aus Gußeisen, Stahl, Aluminium mit Gummiauskleidung, so Hähne, Ventile, Pumpen- und Zentrifugenteile, Rohrleitungen, Kessel, Fässer, gummierte Siebe, Filterplatten.

7. Kunsthharze.

Kunsthharze sind hauptsächlich Kondensationsprodukte von Phenol oder Kresol mit Formaldehyd. Das wichtigste Kunsthharz ist das Bakelite. Ähnliche Erzeugnisse sind Juvelith, Resinit. Für den Apparatebau wichtig ist das Bakelite C mit sehr guten Festigkeitseigenschaften (Tabelle 38) und von hoher chemischer Beständigkeit, namentlich gegen Säuren. In der Wärme ist es bis 180° C brauchbar; bei 300° C tritt Zerfall ein. Die Wärmebeständigkeit wird verbessert durch Mischung des Bakelites mit säureunlöslichem, kieselsäurereichem Asbest (Havegmaterial). Es kann in geeigneter Zusammensetzung bis 300° C verwandt werden.

Tabelle 38. Festigkeitseigenschaften von Kunsthharzerzeugnissen.

Material	Zugfestigkeit kg/cm ²	Druckfestigkeit kg/cm ²	Biegefestigkeit kg/cm ²
Bakelite-Preßmasse . . .	—	—	700—1000
Hartpapier.	750—1000	2000—2700	1200—1700
Haveg.	—	etwa 800	etwa 440

Bakelit wird in Formen gepreßt. Es läßt sich genau bearbeiten. Die gute chemische Beständigkeit gegen viele Säuren, wie kalte und heiße Salzsäure, Phosphorsäure, schweflige Säure, ferner Chlorid- und Sulfatlösungen, Alkohol usw. ermöglicht weitgehende Anwendung. Salpetersäure, Schwefelsäure stärkerer Konzentration, Chromsäure, Natron- und Kalilauge, organische Basen greifen an. Ein Sonderfabrikat Haveg 43 ist auch gegen Flußsäure, Kieselfluorwasserstoffsäure, Fluor und Kieselfluorwasserstoffsalze beständig. Aus Havegmaterial werden Säuregefäße bis 16 m³ Inhalt, Säuretürme, Hähne, Maschinenteile für Kreiselpumpen, Rührer, Ventilatoren, Rohre, Auskleidungen, Füllkörper hergestellt. Bei höheren Beanspruchungen wird Haveg in Verbindung mit Eisen oder anderen Metallen angewandt. Die auszukleidenden Hohlkörper werden aus Voll- oder gelochten Blechen hergestellt (s. auch Silasit, S. 547).

D. Schutzüberzüge.

1. Metallische Überzüge.

Zum Schutze gegen chemische Angriffe wird Stahl, Kupfer, Messing mit metallischen Überzügen versehen. Für die Wirksamkeit der metallischen Überzüge ist es wichtig, daß sie vollkommen dicht sind. Poröse Überzüge erhöhen, besonders wenn das zu schützende Material unedler ist als der Überzug (z. B. bei verzinnem Eisen), die Korrosionsgefahr. Für einen wirksamen Schutz ist es notwendig, daß der Überzug fest haftet, sehr feinkörnig und glatt ist. Rauhe oder grobkörnige Überzüge bieten den chemischen Angriffen eine große Angriffsfläche. Deshalb sind polierte Schutzflächen korrosionsbeständiger als unpolierte. Besteht die Gefahr des Loslösens kleiner Teilchen, so empfehlen sich Zwischenüberzüge aus einem dritten Metall. Die metallischen Überzüge können

durch Eintauchen in flüssige Bäder, durch Spritzverfahren (nach Schoop) oder auf galvanischem Wege erfolgen.

a) Verzinkung.

Die Feuerverzinkung gibt eine dickere aber ungleichmäßigere Auflage als die galvanischen Zinküberzüge. Erstere eignet sich besonders für genietete oder gefaltete Behälter. Das hierfür verwandte technische Hüttenzink ist unreiner und chemisch weniger beständig als die galvanische Verzinkung, die auch eine größere Haftfestigkeit besitzt. Die Verzinkung kommt im wesentlichen nur als Schutz gegen atmosphärische Einflüsse in Frage.

b) Verbleiung.

Die hohe chemische Beständigkeit des Bleies gilt in beschränkterem Maße auch für die Bleiüberzüge. Bisher war es schwierig, dichte, gut haftende Überzüge zu erzielen. Besonders bei der Feuerverbleiung treten häufig Rosterscheinungen unter der Bleischicht auf. Gute Erfolge erzielte Schlötter mit Blei-Quecksilber-Arsenlegierungen und Matschek mit Blei-Quecksilber-Zinklegierungen. Bei der Marine haben sich Überzüge aus Bleilegierungen mit 10% Zinn bewährt. Zweckmäßig ist bei der Feuerverbleiung eine vorherige Verzinnung. Die galvanische Verbleiung ergibt befriedigende Resultate bei Verwendung von kieselfluorwasserstoffsäuren Bädern unter Zusatz von Leim (Betts) und phenolsulfosauren Bädern mit Zusatz von capillaraktiven Substanzen wie z. B. Tannin (Schlötter).

c) Verzinnung.

Verzinkt wird durch das Eintauchverfahren in flüssige Bäder, auf galvanischem Wege und durch Spritzverfahren. Bei der Verzinnung ist besonders darauf zu achten, daß vollkommen dichte Überzüge erzielt werden, da Zinn edler als Eisen ist. Bei Undichtigkeit im Überzug und Gegenwart von Feuchtigkeit bildet sich ein Element mit Zinn als elektropositivem Element und Eisen als Lösungselektrode. Vollkommen dichte festhaftende Überzüge erzielte Schlötter durch phenolsulfosaure Bäder. Im übrigen sind auch alkalische und saure Bäder in Anwendung.

Bei der Feuerverzinnung wird durch Zusatz von Zink zum Zinn eine erhöhte Korrosionsfestigkeit des Überzuges erzielt. Für die Verzinnung müssen die Bleche mit besonderer Sorgfalt abgebeizt werden.

d) Nickelüberzüge.

Vernickelt wird hauptsächlich auf galvanischem Wege. Außer Stahl lassen sich auch die meisten anderen Metalle auf elektrochemischem Wege vernickeln. Dichte Nickelüberzüge sind schwer herzustellen. Besondere Gefahren bietet das gleichzeitige Niederschlagen von Wasserstoff mit Nickel. Eine sorgfältige Vernickelung von Stahl erfordert vorherige Verkupferung oder Cadmiumüberzug oder Vorbehandlung mit Chromsäure. Auch Vernickelung von Aluminium erfordert vorherige Verkupferung.

e) Cadmium- und Chromüberzüge.

Mit Cadmium lassen sich völlig dichte Überzüge erzielen, jedoch ist das Verfahren noch sehr teuer. In der Spannungsreihe liegen Cadmium und Eisen nahe beieinander, so daß die Korrosionsgefahr durch den Überzug selbst gering ist. Chrom ist als Überzugsmaterial sehr geeignet, da es chemisch hoch beständig ist. Jedoch bereitet die Herstellung dichter Überzüge noch gewisse Schwierigkeiten. Deshalb muß eine vorherige Verkupferung erfolgen. Chrom ist wegen seiner großen Härte und Unempfindlichkeit gegen Abnutzung und Stoß vorzüglich als Überzug geeignet.

f) Aluminiumüberzüge.

Zur Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit werden andere Metalle mit einem Aluminiumüberzug durch Aufwalzen, Aufschweißen, Auflöten oder nach dem Schoopschen Spritzverfahren versehen. Galvanische Überzüge lassen sich nicht ausführen.

Von größerer Bedeutung sind Aluminiumüberzüge von Stahl zum Schutze gegen Oxydation bei hohen Temperaturen. Beim Calorisieren werden die in Aluminium und Aluminiumoxyd eingepackten Teile im Wasserstoffstrom mehrere Stunden geglüht. Das von der Firma Fr. Krupp ausgebildete Alitieren ist ähnlich, jedoch wird ohne Verwendung von Wasserstoffgas Aluminium in die Stahloberfläche hineindiffundiert.

2. Nichtmetallische Überzüge.

a) Email.

Zur Verbesserung der chemischen Beständigkeit werden Behälter aus Gußeisen und weichem Stahl emailliert. Email ist ein glasartiger Überzug. Auf die zu emaillierenden Gegenstände wird zunächst eine gefärbte Grundmasse aus Feldspat, Quarz, Ton, Borax und einem Metalloxyd aufgebracht. Nach dem Erkalten wird das Material mit einer Schmelzmasse, hauptsächlich aus Silicaten, ferner Beimengungen von Zinnoxid, Antimonoxid und ähnlichem überzogen. Die Sprödigkeit des Überzuges verlangt sorgfältige Behandlung. Bei stoßartigen Beanspruchungen, größeren Zug und plötzlichen Temperaturunterschieden springt der Emailüberzug leicht ab. Emailierte Kessel und Schalen werden daher zweckmäßig mit Doppelwandung und indirekter Beheizung hergestellt. Emailüberzüge müssen mit größter Sorgfalt hergestellt werden, damit sie porenfrei sind. Die chemische Beständigkeit entspricht etwa der des Glases. Gute Emailüberzüge haben hohe Säurebeständigkeit auch gegen heiße Säuren. Gewöhnliches Geschirremail eignet sich für den Apparatebau nicht. Emaillierungen werden ausgeführt an Schalen, Kesseln, Autoklaveneinsätzen, Flanschenrohren, Rührern usw.

b) Silasit.

Silasit ist ein Phenol-Formaldehyd-Kondensationserzeugnis, das auf Stahl oder Kupfer als Anstrich von etwa 0,5 mm Dicke aufgebracht wird, der dann bei höheren Temperaturen durch Polymerisation hart

und chemisch sehr träge wird. Der Überzug ist beständig gegen Salzsäure und schweflige Säure jeder Konzentration und Temperatur, ebenso gegen viele organische Säuren und gegen die meisten Lösungsmittel wie Benzin, Aceton, Methylenchlorid, Äther und Schwefelkohlenstoff [Wehn: Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 78, 16 (1934)].

c) Parkerisieren, Coslettieren.

Diese Verfahren ermöglichen einen guten Schutz des Eisens gegen atmosphärische Angriffe. Beim Coslett-Verfahren wird auf der Eisenoberfläche eine Phosphatschicht niedergeschlagen, wobei die Teile in eine siedende mit Ferrophosphat gesättigte Lösung von Phosphorsäure eingetaucht werden. Beim Parkerisieren wird eine heiße Lösung von Ferromanganphosphat verwandt. Bereits mit sehr dünnen Überzügen von weniger als $\frac{1}{100}$ mm Dicke werden dichte Schutzschichten erzielt.

d) Anstriche.

Die Anstrichstoffe dienen meist nur zum Schutz gegen Witterungseinflüsse; einige Anstrichstoffe, namentlich die bituminösen, sind chemisch recht beständig. Auch die Farbe ist von Bedeutung, wenn es sich darum handelt, Wärmeaufnahme oder Wärmestrahlung zu verhindern oder zu begünstigen. Helle Anstrichstoffe vermindern Erwärmung von Behältern durch Sonnenbestrahlung und Wärmeabgabe. Ölbehälter und Kühltanks werden daher zweckmäßig weiß angestrichen. Schwarze Anstriche fördern den Wärmeaustausch.

Die Anstrichmittel setzen sich aus dem Bindemittel (Leinöl, Leinöl-Holzölgemisch, Bitumina, Steinkohlenteeröle, Nitrocelluloselacke), dem Farbkörper (meist aus Schwer- und Leichtmetallverbindungen gewonnen) und dem Verdünnungsmittel (Benzol, Benzin, Terpentin, Tetralin) und gegebenenfalls den Trockenstoffen (Sikkative) zusammen. Eines der besten Rostschutzanstriche ist Bleimennige. Es ist jedoch nicht wetterbeständig, so daß noch Deckanstriche mit wetterbeständigen Pigmenten erfolgen müssen, z. B. von Bleiweiß oder Titanweiß.

Die aus Naturasphalt gewonnenen Bitumina, sowie die aus Teeren und Pechen, hauptsächlich Steinkohlenteer erzeugten schwarzen Anstrichstoffe ergeben chemisch sehr beständige Schutzüberzüge für Stahl, Eisen, Beton und Mauerwerk. Die Teer- und Pechpräparate müssen frei von allen sauren und basischen Bestandteilen sein. Einige hochwertige bituminöse Anstrichstoffe sind gegen schwachkonzentrierte Säuren wie Salzsäure, Salpetersäure, Schwefelsäure, Phosphorsäure und eine Reihe weiterer anorganischer und organischer Säuren, Alkalien und Laugen beständig. Bei Beton wird gleichzeitig eine gute dichtende Wirkung erzielt. Eine noch bessere chemische Beständigkeit für Säurebehälter aus Beton, Eisenbeton, Mauerwerk wird mit Spachtelmassen, die auf bituminöser Grundlage aufgebaut sind, erzielt. So ergaben Versuche mit Kerasolithspachtelmasse vollkommene Beständigkeit gegen 40%ige Salpetersäure, 65%ige Schwefelsäure, 37%ige Salzsäure, konzentrierte schweflige Säure, eine Reihe 20%iger Salzlösungen und Laugen.

e) Kitte.

Kitte werden zum Verbinden der verschiedensten Werkstoffe verwandt, dann aber auch zum Ausfüllen von Löchern, Fugen und Überzügen.

Ölkitte bestehen aus 1 Teil Öl und 4—7 Teilen mineralischen Bestandteilen. Sie eignen sich zum Kitten von Glas und Porzellan aneinander, zum Dichten von Röhrenverbindungen, zum Abdichten von Löchern und Fugen in Holz. Für Salpetersäurebetriebe empfiehlt Griffiths [Materials of Chemical Plant Konstruktion — Non Metals. London: Benn Brothers 1922]: 45% rohes Leinöl, 15—20% Kreide, 15—20% Bleiweiß, 15—20% Asbestfasern, 2¹/₂% Mennige oder 15% rohes Leinöl, 10—12% Kreide, 10—12% Bleiweiß, 60—65% Asbestfasern, 2¹/₂% Mennige.

Säurefeste und wärmebeständige Kitte werden aus Bakeliten hergestellt. Kautschukhaltige Kitte und Klebstoffe (Marineleim) zeichnen sich durch hohe Beständigkeit gegen Wasser und viele Chemikalien aus und sind daher für Abdichtung von chemischen Apparaten geeignet. Jedoch sind sie nicht wärmebeständig. H. Wolff [in Paul Kraus: Werkstoffe, Bd. 2, S. 361. Leipzig 1921] gibt folgende Zusammensetzungen an (s. Tabelle 39).

Gegen Wasser, Dampf, Salzsäure und Schwefelsäure, ferner auch Benzin, Benzol, Alkohol sind Glycerinkitte aus Glycerin und Bleiglätte beständig. Sie eignen sich zum Verkitten von Steinen und Eisen in Stein. Die Glycerinkitte widerstehen auch Temperaturen bis 300° C.

Für die Verkittung säurefester Steinauskleidungen [Kögel: Einiges aus der Praxis der säurefesten Steinauskleidungen. Chem. Fabrik 4, 285 (1931)] oder für säurefeste Bauten werden Wasserglaskitte verwandt. Es sind dies Gemische aus Quarzmehl, Schwerspat, Porzellanscherbenmehl, die mit Wasserglas zu einer plastischen Masse angerührt werden. Bei hohen Säure- oder Laugenbeanspruchungen empfiehlt sich die Verwendung von Spezialkitten, die am besten aus dem Handel bezogen werden. Erwähnt seien die hochwertigen schnell erhärtenden Säurekitte der I. G. Farbenindustrie, ferner die Keralithkitte der Keramchemie G. m. b. H., Berggarten, Securitkitte der Securit G. m. b. H., Mannheim, Stellakitte der Stella-Werke A.G., Gladbach, Steulerkitte der Firma Steuler, Koblenz.

Eisenkitte zum Verkitten von Eisenrohren bestehen hauptsächlich aus Eisenfeilspänen mit Salmiak. Werden diese Kitte noch mit Ton oder Schamotte versetzt, so sind sie sehr hitzebeständig. Weitere Kitte und Rezepte siehe Ra b a l d: Werkstoffe und Korrosion, Bd. 2. Leipzig 1931.

Tabelle 39. Kautschukkitte¹.

Geeignet für	Glas		Marineleime			Universalkitt	
Kautschuk	2	5	15	25	10	30	15
Chloroform	65	80	—	—	—	—	—
Benzol	13	—	—	—	—	—	35
Benzin	—	—	70	25	45	—	—
Mastix	20	15	—	—	—	—	—
Kolophonium	—	—	—	15	—	20	7
Schellack	—	—	15	—	—	—	—
Schwefelkohlenstoff	—	—	—	15	—	—	35
Asphalt	—	—	—	—	—	—	8
Tierleim	—	—	—	20	—	—	—
Leinöl oder Firnis .	—	—	—	—	45	—	—

¹ Ein Teil des Kautschuks ist oft vorteilhaft durch Guttapercha zu ersetzen.

Tabelle 40. Spezifisches Gewicht, Schmelzpunkt, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärme und Elastizitätsmodul verschiedener Werkstoffe.

Werkstoff	Spezifisches Gewicht	Schmelztemperatur ° C	Wärmeleitfähigkeit cal/cm · s · ° C	Mittlere spezifische Wärme cal/g · ° C	Elastizitätsmodul kg/mm ²
1. Metallische Werkstoffe:					
Aluminium	2,70	658	bei ° C —100° 0,492 0° 0,502 20° 0,500 100° 0,490 200° 0,475 300° 0,450	0,214	7200
Blei	11,94	327,4	20° 0,0836	0,0319	1500—1700
Bronze		800—900			
G-Bz 20	8,86				
G-Bz 10	8,80		200° 0,131		10600
W-Bz 6	8,73				
Duralumin	~ 2,80	650			6500—7400
Elektronmetall	1,74—1,84	650	0,32	0,24	4000—4600
Gold	19,25	1063	18° 0,7003	0,031	bei
Gußeisen	7,1—7,3	1150—1250	0,07—0,11		$\sigma_B = 28:13500$ $= 25:10000$ $= 16: 6500$
Hydronalium	2,63	560—615			7000—7300
Kupfer	8,4—8,91	1083	20° 0,92 100° 0,90 200° 0,89 300° 0,88 400° 0,87	0,0911	11500
KS-Seewasser	2,8	620—640			
Magnesium	1,74	650	0,376	0,250	
Messing	Ms 58: 8,4 Ms 90: 8,8	1020 880		Gelbtombak bei 100° 0,25 Rottombak bei 100° 0,28	8000—10000
Monelmetall, gegossen	8,82	1360	0,06	0,128	16200
Monelmetall, gewalzt	8,95				
Nickel	8,85	1400—1450	20° 0,142	bei 15—100° C 0,109	20300
Platin	21,4	1764	18° 0,166	0,032	
Silber	10,50	960,5	18° 1,006	0,056	
Stahl:					
Flußstahl mit 0,2% C	7,85	1500	20° 0,12 300° 0,10 600° 0,08	0—100° 0,112 0—300° 0,120 0—600° 0,135	21000
Flußstahl mit 0,5% C	7,83	1400—1480	100° 0,10 300° 0,10 600° 0,08	0—100° 0,113 0—300° 0,121 0—600° 0,136	21000
Niedriglegierte Ni-, Cr-, Mo-, V-, Mn-Stähle wie C-Stähle:					
5%ig. Ni-Stahl . . .	7,88		0,07		20400
12—14%ig. Cr-Stahl	7,75	1475	0,05—0,04		20500

Tabelle 40 (Fortsetzung).

Werkstoff	Spezifisches Gewicht	Schmelztemperatur °C	Wärmeleitfähigkeit cal/cm · s · °C	Mittlere spezifische Wärme cal/g · °C	Elastizitätsmodul kg/mm ²
Nichtrostender Stahl mit 18—25% Cr: 8—9% Ni	7,86	1400—1450	0,04		20000
Hochhitzebeständige Stähle (Ni-Cr-Fe-Legierung)	7,6—8,4	1350—1490	0,04—0,06		
Zink	7,1	419,4	0,265	0,0925	
Zinn	7,3	231,8	0,153	0,052	5500

2. Nichtmetallische Werkstoffe:

Beton	$s = \text{spez. Gew.}$ $r = \text{Raumgew.}$ $r = 2—2,4$		0,0020		2500—4500
Gummi	$s = 1—2$		0,00009		
Holz (lufttrocken):					
Kiefer	$r = 0,3—0,7$		0,0003		900
Eiche	$r = 0,7—1,0$				1080
Buche	$r = 0,6—0,8$				1800
Keramische Massen:					
Porzellan	$s = 2,42$ $r = 2,3$	1650—1700	0,0025		8000
Quarzglas	$s = 2,21$	1720	0,0020	0—100° 0,184 0—500° 0,230 0—900° 0,251	7200
Steingut	$s = 1,33—1,6$				~ 2500
Steinzeug	$s = 2,46—2,65$ $r = 2,15—2,26$		0,0025—0,0037	0,185	4100—6500
Schamotte	$s = 2,5—2,7$ $r = 1,9$	1580—1770	200° 0,0012 600° 0,0018 1000° 0,0024 1200° 0,0027	0,190	6000—7500
Silicasteine	$s = 2,32—2,50$	1670—1770	200° 0,0019 600° 0,0026 1000° 0,0033	0—200° 0,219	

Tabelle 41. Korrosionsbeständigkeit einiger Werkstoffe.

Vorbemerkungen. Es bedeutet:

- I praktisch vollkommen beständig,
- II genügend beständig,
- III ziemlich beständig,
- IV unbeständig.

Die beigeschriebenen %-Zahlen bedeuten die Konzentration der Lösung. Sind die %-Zahlen unterstrichen, z. B. 50%, so bedeutet dies Angriff einer kochenden Lösung in der angegebenen Konzentration.

Die Bewertung der Beständigkeit erfolgte auf Grund von Angaben im Schrifttum, der herstellenden Firmen und Erfahrungen der Verfasser. Die Mehrzahl der Angaben beruhen auf Laboratoriumsversuchen. Es empfiehlt sich daher, für lebenswichtige Konstruktionsteile Betriebsversuche durchzuführen.

Fortsetzung siehe Seite 562.

Tabelle 41. Korrosionsbeständigkeit

Nr.	Angriffsmittel () = spez. Gewicht	Stahl mit 12-14 % Cr	V2A- Stahl	V4A- Stahl	Eisen- silicium- guß	Reinalu- minium	Kupfer
1	Salzsäure (1,002) 1:85	IV	III	III	I	IV	III IV; ohne Luft- zutritt: besser
	(1,017) 1:10	IV	III	III	I	IV	
	(1,19) konz.	IV	IV	IV	II	IV	
	„ koch. 1:85	IV	IV	IV	III	IV	
	„ 1:10	IV	IV	IV	IV	IV	
	„ konz.	IV	IV	IV	IV	IV	
2	Salpetersäure (1,04) 1:10	III	I	I	I	III	IV IV IV IV IV IV
	(1,12) 1:5	III	I	I	I	IV	
	(1,23) 1:1	III	I	I	I	III	
	(1,40) konz.	III	I	I	I	III	
	„ koch. 1:10	IV	I	I	II	IV	
	„ 1:5	IV	I	I	II	IV	
„ 1:1	IV	I	I	II	IV		
„ konz.	IV	II	II	I	IV	IV	
3	Rauchende Salpetersäure	IV	I	I	I	I	IV IV
	Desgl. koch. (1,52)	IV	IV	IV	I	IV	
4	Nitrose Gase	II	I	II		trocken I	IV
						feucht II	
5a	Schwefelsäure (1,03) 1:20	IV	I	I	II	III	III ohneLuft- zutritt: I
	(1,10) 1:10	IV	I	I	II	IV	
	(1,52) 1:1	IV	I	I	I	IV	
	(1,84) konz.	I	I	I	I		
5b	Schwefelsäure koch. 1:20	IV	IV	IV	III	IV	III IV IV IV
	„ 1:10	IV	IV	IV	III	IV	
	„ 1:1	IV	IV	IV	II	IV	
	„ konz.	IV	IV	IV	I	IV	
5c	Rauchende Schwefelsäure		I	I	I	III	
	Desgl. mit 60% SO ₃ (2,00)		70° II	70° II	60° III 100° IV		
6	Schweflige Säure SO ₂ -Gas		II	I	I	I	IV
	SO ₂ -Lösung		I 160° III 200° } III 20 at }	I 160° II 200° } II 20 at }		IV	
7	Mischsäuren						IV
	30H ₂ SO ₄ : 5HNO ₃ :65H ₂ O		II	II	I	mittlere Konzentrationen greifen stark an	
	20H ₂ SO ₄ : 15HNO ₃ :65H ₂ O		I	I	I		
	50H ₂ SO ₄ : 50HNO ₃		I	I	I		
	99H ₂ SO ₄ : 1HNO ₃		I	I	I		
1H ₂ SO ₄ : 99HNO ₃		I	I	I			
8	Phosphorsäure(1,05) 10% ig	III	I	I	I	0,5% III	IV ohneLuft- zutritt: I
	(1,64) 80% ig	IV	I	I	I	5% IV	
	„ koch. 10% ig	III	I	I	I	0,5% IV	
	„ 80% ig		IV	III	I		

einiger Werkstoffe.

Blei	Nickel	Kupfer-Nickel-Legierungen (Monelmetall)	Zinn	Hartgummi	Steinzeug	Einige weitere beständige Werkstoffe	Nr.
II III IV	II <i>Luftzutritt und steigende Konzentration erhöhte Korrosion</i>	II III IV	II	I I I I I I	I I I I I	25% ig: Holz } Wolfram (I), Molybdän (I), Silber (II), Chrom-Nickel-Molybdän-Legierungen (II)	1
IV IV IV II IV IV IV IV	IV IV IV IV IV IV IV IV	II IV	IV III	I I IV IV IV IV IV	I I I I I I I	<i>konz.</i> : Flußstahl 7—66% ig: Gußeisen mit 34% Cr	2
	IV IV			IV IV	I I		3
IV				IV	I	trocken: Gußeisen (II), Stahl (III) feucht: 25% Cr-Stahl, Sichromal	4
	III	II II		<i>bis 100° C und bis 50% ig:</i>	I I I I	Phosphorbronze <i>konz.</i> : Flußstahl (II)	5a
II		III III IV IV		I 80% ig: III <i>konz.</i> : IV	I I I I		5b
III				IV	I		5c
II	II	IV			I I	KS-Seewasser, Chromlegiertes Gußeisen	6
III <i>über 25% H₂O:</i> IV				IV	I		7
III	III	II II		<i>bei 50° C bis 75% II über 75% III</i>	I		8

Tabelle 41. Korrosionsbeständigkeit

Nr.	Angriffsmittel () = spez. Gewicht	Stahl mit 12-14% Cr	V2A- Stahl	V4A- Stahl	Eisen- silicium- guß	Reinalu- minium	Kupfer
9	Borsäure					1% II 1% III	
10	Chromsäure SO ₃ -haltig (1,51) 50% ig " koch. 50% ig " SO ₃ -frei 10% ig " " 50% ig " koch. 10% ig " " 50% ig		I IV I II II III	I IV I II II IV	I I I I	1% bis 60% III konz. IV	
11	Flußsäure 40% ig Kohlensäure	IV I	IV I	IV I		IV I	IV II
12	Essigsäureanhydrid Essigsäure (1,01) 10% ig (1,06) 50% ig (1,07) 80% ig (1,05) 100% ig " koch. 10% ig " " 50% ig " " 80% ig " " 100% ig Speiseessig	I II I	I I I I I I III II I	I I I I I I I I I	I I I I I I I II I	II III III III III III III III III	I I II II III III III IV II
13	Fettsäuren Gerbsäure	I I	I I	I I	I I	inüblicher Konz. II	
14	Phenol	I	I	I	I	bis 75% I bis 75% koch. II konz. IV	
15	Milchsäure (1,02) 10% ig (1,22) konz. " koch. 10% ig " " konz. Oxalsäure 8% ig koch. 10% ig " 25% ig " 50% ig	IV III	I I II III I IV IV III	I I I II I II II II	I I I I I I I II	II IV	III ohne Luft- zutritt I
16	Weinsäure Citronensäure Fruchtsäure	25% II 5% II I	50% I konz. II 25% I 50% I 25% IV 50% IV I	50% I konz. II 25% I 50% I 25% I 50% IV I	10% I 50% I I I I I	3% II 10% III 3% IV II	

einiger Werkstoffe (Fortsetzung).

Blei	Nickel	Kupfer-Nickel-Legierungen (Monelmetall)	Zinn	Hartgummi	Steinzeug	Einige weitere beständige Werkstoffe	Nr.
	I				I		9
I I					I I		10
III IV	<i>passiviert.</i> Nickel II			III	IV I	Elektronmetall, vollkommen beständig nur Wachs	11
} III	III	II	I II II	I <i>bis 80°</i> I	I I I I	Holz, chromlegiertes Gußeisen Gegen organische Säuren KS-Seewasser beständiger als Reinaluminium	12
			II II III		I I I I		
			IV		III		
IV	I 10% II	II			I I		13
	II		0,5% I		I	<i>bis 80% ig:</i> Silumin	14
	II		III	II	I I I I I I		15
	II			I I I I	I I I I		
III giftig!	III II	5% III	II III Zucker schützt I	I	I I		16

Tabelle 41. Korrosionsbeständigkeit

Nr.	Angriffsmittel () = spez. Gewicht	Stahl mit 12-14% Cr	V 2 A- Stahl	V 4 A- Stahl	Eisen- silicium- guß	Reinalu- minium	Kupfer
17	Kalilauge (1,25) 27% ig (1,54) 50% ig ,, koch. 50% ig ,, Schmelzfluß	I I IV	I I II IV	I II IV	I II III IV	IV	IV verfärbt Lösung
18	Natronlauge ,, Schmelzfluß	kalt I IV	34% ig bei 100° I koch. II II	34% ig bei 100° I koch. II II	20% II 34% III IV	IV IV	IV verfärbt Lösung
19	Kalkmilch (Calcium- hydroxyd)	I	I	I			
20	Ammoniak	I	I	I	wäßrige Lösung I wäßrige Lösung II	wasserfrei II Lösung IV	IV
21	Kalium- und Natrium- carbonat Desgl., Schmelzfluß	IV	IV	IV	IV	IV	
22	Natriumsuperoxyd		10% I	10% I			
23	Alaun		10% I 10% II konz. III	10% I 10% I konz. II	konz. Lösung I geschmolz. II	5% II konz. IV	
24	Ammoniumchlorid	25% II	25% I 50% II	25% I 50% I	25% II 50% II	5% II 5% III konz. III	IV
25	Ammoniumnitrat ,,	konz. I	konz. I	konz. I	kalt ges. I heiß ges. III	II	
26	Ammoniumphosphat		I	I	I	10% II konz. IV	
27	Ammoniumsulfat		konz. I	konz. I			
28	Aluminiumchlorid		40% I 10% III	40% I 10% III			
29	Aluminiumsulfat		10% I	10% I	ges. I		
30	Bleiacetat	I	25% I	25% I			
31	Calciumbisulfid		konz. I	konz. I			
32	Calciumchlorid	III	konz. II	konz. I		10% II 20% III >30% IV	

einiger Werkstoffe (Fortsetzung).

Blei	Nickel	Kupfer-Nickel-Legierungen (Monometall)	Zinn	Hartgummi	Steinzeug	Einige weitere beständige Werkstoffe	Nr.
	I I I I	I I I	IV	35% I	III III IV IV	Elektronmetall 5% ig: Bronze	17
10% I konz. II	I I	I	IV	35% I	<u>konz.</u> III <u>konz.</u> IV	Elektronmetall 5% ig: Bronze	18
		I		<u>konz.</u> I			19
I	0,3% I Sauerstoff erhöht Korrosion	I	II	25% I	I	Stahl, Gußeisen	20
	I I	I I	IV		<u>konz.</u> I <u>konz.</u> II IV		21
							22
<u>konz.</u> II <u>konz.</u> IV	10% II 10% III			I	I	5% ig: Silumin	23
5% III >10% II		5% III		I	I		24
				I	I	50% ig: Gußeisen mit 34% Cr	25
						kalt: Stahl	26
II						Gußeisen mit 34% Cr	27
				II		Haveg	28
		<u>konz.</u> I		bis 60° I			29
	10% II			I	I		30
					I	bis 90° C, Gußeisen mit 34% Cr	31
III	2% II	20% II		I	I	25% ig: Silumin	32

Tabelle 41. Korrosionsbeständigkeit

Nr.	Angriffsmittel () = spez. Gewicht	Stahl mit 12-14% Cr	V2A- Stahl	V4A- Stahl	Eisen- silicium- guß	Reinalu- minium	Kupfer
33	Calciumhypochloritlösung		40° III	II	20° I	IV	
34	Chlorkalk, trocken „ feucht		I II	I II	I II	IV	III
35	Cyankupfer, Cyanzink		<u>konz.</u> I		II		
36	Eisenchlorid FeCl ₃	IV	30% IV	30% IV	III	IV	IV
37	Eisensulfat	II	10% I	10% I		IV	
38	Kaliumbichromat		25% I	25% I			
39	Kaliumbitartrat (Wein- stein)		<u>konz.</u> IV	<u>konz.</u> II	<u>konz.</u> III		
40	Kaliumchlorat		<u>konz.</u> I	<u>konz.</u> I	I	II	
41	Kaliumchlorid		<u>konz.</u> I	<u>konz.</u> I	<u>konz.</u> II	IV	III
42	Kaliumferricyanid (rotes Blutlaugensalz)	IV	25% I	25% I		II bei An- wesenheit von KOH IV	
43	Kaliumnitrat (Kali- salpeter)	I	50% I	50% I		I	II
44	Kaliumnitrat, Schmelzfluß						
45	Kaliumpermanganat		10% I	10% I			
46	Kupferchlorid	IV	10% IV	10% IV	10% II	IV	
47	Kupfernitrat	II	<u>konz.</u> I	<u>konz.</u> I			
48	Kupfersulfat	II	<u>konz.</u> I	<u>konz.</u> I	50% II	IV	
49	Natriumchlorid	III	<u>konz.</u> I <u>konz.</u> II	<u>konz.</u> I <u>konz.</u> II	<u>konz.</u> II	III	III
50	Natriumhypochlorit	I	I	I			
51	Natriumsulfat	5% III <u>konz.</u> IV	<u>konz.</u> I	<u>konz.</u> I	<u>konz.</u> II	III	II
52	Natriumsulfid		50% I	50% I			
53	Natriumsulfit		50% I	50% I			
54	Natriumthiosulfat		25% I	25% I			
55	Quecksilberchlorid (Sublimat)	IV	0,1% I 0,7% II 0,7% IV	0,1% I 0,7% II 0,7% IV	0,7% II	IV	IV
56	Sulfurylchlorid						
57	Silbernitrat	I	10% I Schmelz- fluß I	10% I Schmelz- fluß I			

einiger Werkstoffe (Fortsetzung).

Blei	Nickel	Kupfer-Nickel-Legierungen (Monelmetall)	Zinn	Hartgummi	Steinzeug	Einige weitere beständige Werkstoffe	Nr.
				<i>konz.</i> I	I	1,5% Cl: Bronze, Gußeisen mit 34% Cr	33
	II			I I	I I		34
							35
	IV			<i>konz.</i> I	I		36
	IV	III			I		37
					I		38
IV				I	I		39
					I		40
					I		41
				I	I		42
				I	I		43
	II				I		44
					I		45
				I	I		46
II							47
				I	I		48
II	II		I	I	I	Holz	49
III							50
II		I			I	20%ig: Silumin, Bronzen Holz	51
II		III				Stahl (II)	52
		I					53
	III	I		I	I		54
	<u>0,7%</u> II <u>0,7%</u> III				I		55
						Cadmium	56
						5% Chromstahl, Manganbronze	57

Tabelle 41. Korrosionsbeständigkeit

Nr.	Angriffsmittel () = spez. Gewicht	Stahl mit 12-14% Cr	V2A- Stahl	V4A- Stahl	Eisen- silicium- guß	Reinalu- minium	Kupfer
58	Zinkchlorid, wäßr. Lösung		20° I 100° III	25° I 100° I	100° I		
59	Zinksulfat		25% I	25% I	25% I		
60	Zinnchlorid		20° III 100° IV	20° II 100° IV	100° I		
61	Brom	IV	IV	IV	20° I koch. IV	IV	IV
62	Chlor	IV	trocken I feucht IV	trocken I feucht III	I	trocken I heiß, trocken IV feucht IV	IV
63	Chlorwasser		II	II	I	IV	
64	Chlorschwefel	in Gegen- wart von Wasser IV	I	I			
65	Jod				20° I koch. III	IV	IV
66	Schwefel, geschmolzen Schwefeldampf	130° II 445° III	I III	I III	I II	I I	IV IV
67	Schwefelwasserstoff	20° I	I	I		I	trocken I feucht III
68	Atmosphäre	poliert I	I	I	I	I	I
69	Sauerstoff	bis 100° C „ über 500° C	I	I	I I	Schutzschichtbildung I (bis 300°)	
70	Stickstoff	bis 100° C „ über 100° C	I I	I I	I I	I I	I I
71	Wasser	I	I	I	I	I	I
72	Überhitzter Wasserdampf	II	I	I	I	III	III
73	Seewasser		I	I	I	II	III
74	Wasserstoffsuperoxyd	20% bis 15° I bei 80% III	I	I		IV	IV

einiger Werkstoffe (Fortsetzung).

Blei	Nickel	Kupfer-Nickel-Legierungen (Monelmetall)	Zinn	Hartgummi	Steinzeug	Einige weitere beständige Werkstoffe	Nr.
	10% II 10% III	III				Everdur (Cu—Si—Mn)	58
	10% II 10% III						59
							60
	trocken I	trocken I	IV		I	kalt und trocken: Stahl, 600° Tantal, feucht: Email, Platin	61
III IV	II		IV	I	I		62
			IV		I		63
	I				I		64
	trocken I	trocken I	IV		I	kalt und trocken: Stahl, 600° Tantal, feucht: Email, Platin	65
IV					I	bei 150° Silumin	66
trocken I	II	I	I			20° Stahl	67
I	I	I	I	I	I		68
I	I	I bis 700° I	I	I	I	Stahl, Messing, Bronze	69
	I III	I					70
I*	I	I	I	I	I	* freies CO ₂ im Wasser greift stark an	71
	I	I					72
II	II		II		I	KS-Seewasser, Bronze, Holz	73
				40% II	I		74

Tabelle 41. Korrosionsbeständigkeit

Nr.	Angriffsmittel () = spez. Gewicht	Stahl mit 12–14% Cr	V2A- Stahl	V4A- Stahl	Eisen- silicium- guß	Reinalu- minium	Kupfer
75	Wasserstoff <i>bis 250° C</i> „ <i>über 250° C</i>	I I	I I	I I	I I	I	IV IV
76	Alkohol	rein I	I	I	I	rein II	
77	Benzol	rein I	I	I	I	rein II	rein I
78	Bier		I			I	IV
79	Wein					II	IV

(Fortsetzung von Seite 551).

Die Einteilung der Beständigkeit in vier Stufen I–IV wurde in Anlehnung an einen Vorschlag von W. Rohn [Werkstoffhandbuch Nichteisenmetalle, P 1–2] vorgenommen. Dabei konnte der von Rohn angegebene Bewertungsmaßstab nach je Tag und m² in g aufgelöste Menge für I mit < 1 g, II < 10 g, III < 100 g und IV > 100 g nicht streng eingehalten werden. Soweit praktische Betriebsergebnisse bekannt waren, wurden diese bei der Bewertung bevorzugt. Die Tabellen können daher nur einen allgemeinen Anhaltspunkt geben.

Werkstoffe für chemische Apparateile bei verschiedenartigen Beanspruchungen¹.

a) Säuren.

Konstruktionsteile:	Salzsäure.	Konstruktionswerkstoff:
Rührwerke	Stahl mit Hartgummiüberzug, Haveg	
Verdampfer	Quarzgut, Glas	
Ventilatoren	Gummiauskleidung (unter 50° C), Haveg, Silasit	
Filter	Steinzeug, Gummiauskleidung, Holzrahmen (für Säuren unter 20%), Haveg, Silasit	
Filtertücher	Nitrierte Baumwolltücher, nitrierte Kunstseide	
Gasleitungsrohre	Quarzgut, Steinzeug, Glas	
Rohrleitungen	Hartgummi, Glas, Quarzgut, Stahl mit Gummi- auskleidung	
Füllmaterial für Türme	Quarzit, Steinzeug, Porzellan- und Steinzeugfüllkörper	
Pumpen und Pumpenteile	Porzellan, Steinzeug (für konzentrierte Säure), Stahl mit Gummi- oder Silasitüberzug, Antimon, Nickel-Molybdän, Hartgummi	
Armaturen	Hartgummi, Silasit, Steinzeug, Quarzgut	
Behälter	Steinzeug, säurefeste Steinteile, Stahl mit Gummi- oder Silasit- auskleidung (bis unter 65° C), Glas, Holz (für Säuren unter 20% und unter 100° C); für höhere Konzentrationen bei 20° C; Pech- oder Asphalt- auskleidung, Prodorit (nicht über 80° C), säurefeste Klinkern in Palatankitt mit Palatol- anstrichen.	

¹ Zusammengestellt auf Grund von Erfahrungen und Angaben im Schrifttum, teils auch nach einer Zusammenstellung von Roetheli und Forrest [Ind. Engng. Chem. 24, 1018 (1932)].

einiger Werkstoffe (Fortsetzung).

Blei	Nickel	Kupfer-Nickel-Legierungen (Monelmetall)	Blei	Hartgummi	Steinzeug	Einige weitere beständige Werkstoffe	Nr.
	I	I I				Stahl 3%iger Cr-Stahl, 5%iger Wolframstahl	75
					I	Elektronmetall, Holz	76
				II	I	Elektronmetall	77
IV	I				I	Holz	78
IV					I	Holz	79

Salpetersäure aus Nitraten.

Konstruktionsteile:	Konstruktionswerkstoff:
Kondensationsapparate Rohrleitungen	Eisensiliciumguß, Quarzglas, Steinzeug Eisensiliciumguß (für alle Konzentrationen), 15 bis 30%iger Cr-Stahl, V2A-Stahl (für alle Konzentrationen), Steinzeug, Glas
Füllmaterial für Türme	Säurefeste Steine, Porzellan- und Steinzeugfüllkörper, V2A-Stahl, 28%iger Cr-Stahl
Pumpen	V2A-Stahl, Eisensiliciumguß, 15—30%iger Cr-Stahl, Steinzeug (für Gase)
Reaktionsgefäße	Eisensiliciumguß, Steinzeug, Stahl mit Glasüberzug.

Salpetersäure durch Oxydation von NH_3 .

Verdampfer	Eisensiliciumguß
Rohrleitungen	Eisensiliciumguß, V2A-Stahl, 15—30%iger Cr-Stahl, Glas, Steinzeug
Pumpen	Eisensiliciumguß, V2A-Stahl, Phosphorbronze (für verdünnte nicht oxydierende Säuren)
Reaktionsgefäße	V2A-Stahl, Aluminium (nur zu verwenden, wenn die Säure frei von Stickoxyden, Cl, Br, J oder H_2SO_4 ist), Granit
Behälter	Steinzeug, V2A-Stahl, 18—20%iger Cr-Stahl, Glas, Aluminium (unter 20%ige und über 40%ige Säure), Stahl (für konzentrierte Säure). (Cr- und Cr-Ni-Stähle sind nicht so widerstandsfähig in Gegenwart von Cl, Br, J, aber brauchbar für gereinigte Säuren.)
Rohrleitungen	Blei, Steinzeug, Glas, Aluminium für starke, kalte, nitrosefreie Säuren
Pumpen	V2A-Stahl, Steinzeug, Eisensiliciumguß.

Schwefelsäure (Bleikammerverfahren).

Kammern	Blei
Konzentrationsapparate	Quarzglas, Eisensiliciumguß
Rieseltürme	Bleiverkleidung, säurefeste Steinauskleidung, Kupfer (für verdünnte Säuren)
Filter	Hartblei (für Säuren unter 75%), bleiausgekleidete Holzgefäße
Beizgefäße (6% ige Säuren)	Säurefeste Steine, Steinzeug, Holz, Monelmetall, Bleiverkleidung, Aluminiumbronze

Konstruktionsteile:	Konstruktionswerkstoff:
Rohrleitungen	Blei (für Säuren unter 75%), Stahl (für Säuren über 90%), Eisensiliciumguß (für alle Konzentrationen), VA-Stähle.
Pumpen	Hartblei (für Säuren unter 75%), Stahl (für Säuren von 90—98%), Monelmetall (für Säuren unter 10% und unter 200° C), Aluminiumbronzen (für verdünnte Säuren unter 75%)
Behälter	Blei (für Säuren unter 75%), Stahl (für Säuren über 90%), Eisensiliciumguß, Hartgummi und Holz für verdünnte Säuren.

Schwefelsäure (Kontaktverfahren).

Absorptionsgefäße	Flußstahl (kein Gußeisen)
Rohrleitungen	Für SO ₃ : Flußstahl, V2A-Stahl
Pumpen	Eisensiliciumguß
Kontaktkammern	Stahl, Gußeisen.

Rauchende Schwefelsäure.

Rohrleitungen	}	Flußstahl (kein Gußeisen), Eisensiliciumguß.
Pumpen		
Reaktionsgefäße		
Behälter		

Mischsäuren.

Nitriergefäße	Stahl (für wasserarme Mischsäuren), Eisensiliciumguß, Steinzeug, emailliertes Eisen, Reinaluminium
Rohrleitungen	Stahl (für wasserarme Mischsäuren), Eisensiliciumguß (für H ₂ SO ₄ unter 20%), 28% iger Cr-Stahl, V2A-Stahl, Reinaluminium
Pumpen	Stahl (konzentrierte Mischsäuren), Eisensiliciumguß.

Phosphorsäure.

Rieseltürme	Säurefeste Steine
Verdampfer	Quarz
Filter	V2A-Stahl, Kupfer
Rohrleitungen	Steinzeug, Quarz
Pumpen	V2A-Stahl, Steinzeug
Destillierblasen	Eisensiliciumguß.

Borsäure.

Verdampfer	Bleiauskleidung
Filter	Hartblei
Rohrleitungen	Blei, 14% iger Cr-Stahl, V2A-Stahl
Pumpen	Eisensiliciumguß bis 1% Nicorros, Monelmetall.

Flußsäure.

Rohrleitungen	Blei, Stahl mit Gummiauskleidung, Blei mit Palatolanstrich
Pumpen	Blei oder Gummiauskleidung
Destillierblasen	Blei
Behälter	Blei (für technische Säuren), Wachs (für reine konzentrierte Säure), Blei mit Palatolanstrich
Rührwerke	Holz mit Palatol getränkt.

Konstruktionsteile:	Schweflige Säure.	Konstruktionswerkstoff:
Absorptionsgefäße	Steinzeug (unter 100° C)	
Rieseltürme	Blei- oder Silasitauskleidung, V2A-Stahl, säurefeste Steine, Steinzeug	
Rohrleitungen	Blei, Blei- oder Silasitauskleidung, Hartgummi- auskleidung, V2A-Stahl, Steinzeug	
Pumpen	Hartblei, V2A-Stahl, Aluminiumbronze, Bleibronze, Steinzeug, Gummi- oder Silasitauskleidung	
Behälter	Holz (asphaltiert, für verdünnte Säure), Blei, Silasit, Steinzeug.	

Essigsäure.

Konzentrationsapparate	Kupfer bei Sauerstoffabwesenheit
Kondensationsapparate	Eisensiliciumguß (wenig geeignet bei Gegenwart von Cl, Br, J oder Formiaten, Säure von 20—40% greift am meisten an), Steinzeug, Kupfer bei Sauerstoffabwesenheit
Filter	Holz (für verdünnte Säure), Bronze
Rohrleitungen	Kupfer, Eisensiliciumguß, Hartgummi (unter 80° C), Weichgummi- auskleidung (für Säuren unter 20% und unter 50° C), Aluminiumbronze, V2A-Stahl, Monelmetall (für Speiseessig)
Pumpen	Bronze, Hartgummi (unter 80° C), Weichgummi- auskleidung (für Säuren unter 20% und unter 50° C), Eisensiliciumguß, V2A-Stahl
Reaktionskessel	V2A-Stahl, 18%ger Cr-Stahl, Eisensiliciumguß, Steinzeug, Stahl mit Glasauskleidung, Hartgummi (unter 80° C), emaillierter Stahl
Destillierblasen	Kupfer bei Sauerstoffabwesenheit
Behälter	Holz, Steinzeug, Glas (für reine Säure), Kupfer (für rohe Säure), Gummiauskleidung (für Säure unter 20% und unter 50° C). Monelmetall wird hauptsächlich bei höheren Konzentrationen gebraucht.

Fettsäuren.

(Propionsäure, Buttersäure usw.).

	Völlig wasserfreie Fettsäuren greifen Aluminium stark an.
Kondensationsapparate	Aluminium, Aluminiumbronze, emailliertes Eisen, Kupfer, Monelmetall, VA-Stahl
Rohrleitungen	Kupfer, Eisensiliciumguß, Monelmetall, VA-Stahl
Pumpen	Aluminiumbronze, Eisensiliciumguß, Monelmetall, VA-Stahl, Steinzeug, Messing (für verdünnte Säuren)
Destillierblasen	Emailliertes Eisen, Kupfer, Aluminium, Monelmetall, VA-Stahl, Stahl (für verdünnte Säuren).

Gallussäure (Gerbsäure).

Verdampfer	Bleiauskleidung
Filter	Holz, Bleiauskleidung
Pumpen	Bronze
Behälter	Holz.

Phenol.

Kondensationsapparate	Silber, Silumin, Nicorros, Monelmetall
Rohrleitungen	Zinn, Silber (für reinstes Phenol), VA-Stahl, Silumin (bis 80%)
Pumpen	VA-Stahl, Silumin, Stahl, Gußeisen
Destillierblasen	Silber, Nicorros, Monelmetall
Behälter	Emaillierter Stahl, Glas.

	Oxalsäure.
Konstruktionsteile:	Konstruktionswerkstoff:
Verdampfer	Kupfer
Pumpen	V2A-Stahl, Eisensiliciumguß (kalte Säure)
Behälter	Holz.
	Milchsäure.
Verdampfer	Kupfer, emaillierter Stahl
Filter	Holz
Rohrleitungen	Kupfer, Gummiauskleidung, Hartgummi, V2A-Stahl
Pumpen	Bronze
Destillierblasen	Kupfer, Silber
Behälter	Holz, Steinzeug, Kupfer, emaillierter Stahl.
	Citronensäure.
Verdampfer	Emailüberzüge, V2A-Stahl (unter 5% für kochende Säure)
Filter	Bronze, Holz, Kupfer
Rohre	Kupfer, Aluminium (für verdünnte Säure), Hartgummiauskleidung.
	Fruchtsäuren.
	(Kein Blei verwenden.)
Rohrschlangen	Nickel
Kondensationsapparate	15% iger Cr-Stahl, V2A-Stahl
Verdampfer	V2A-Stahl, 15% iger Cr-Stahl
Erhitzungsgefäße	15% iger Cr-Stahl, V2A-Stahl, Zinn
Rohrleitungen	15% iger Cr-Stahl, V2A-Stahl, Aluminium, Nickel, Monelmetall, Messing, Kupfer
Pumpen	V2A-Stahl, 15% iger Cr-Stahl, Aluminium, Monelmetall, Nickel, Bronze
Behälter	Glas, V2A-Stahl, 15% iger Cr-Stahl, emaillierter Stahl, Zinn plattiert
Ventile	Aluminium, Nickel, Monelmetall, Messing, Kupfer.
	Ameisensäure.
Alle Teile	Glasauskleidung, Hartgummi
Pumpen	V2A-Stahl, Bronze.
	Benzoessäure.
Filter	Steinzeug
Rohrleitungen	V2A-Stahl, Hartgummi (unter 85° C), Aluminium, Nickel (für Dampf von 250° C)
Pumpen	V2A-Stahl, Hartgummi (unter 85° C)
Reaktionsgefäße	V2A-Stahl.
	Phthalsäure.
Verdampfer	Blei, Aluminium
Filter	Holz, Aluminium
Rohrleitungen	Blei, Stahl (für Anhydrid)
Pumpen	Bleiauskleidung, Stahl (für Anhydrid)
Destillierblasen	Kupfer, Gußeisen (für Anhydrid)
Behälter	Holz.
	Pikrinsäure.
	(Schwermetallpikrate sind explosiv.)
Filter	Steinzeug
Rohrleitungen	Blei mit Gummiauskleidung, V2A-Stahl

Konstruktionsteile:	Konstruktionswerkstoff:
Pumpen	V2A-Stahl
Reaktionsgefäße	Bleiauskleidung (solange starke Mineralsäuren vorhanden sind)
Behälter	Steinzeug.
	Salicylsäure.
Verdampfer	Blei, Kupfer, Monelmetall, Nicorros
Filter	Aluminium
Rohrleitungen	Aluminium, Kupfer, Blei
Pumpen	Aluminium, Bronze, Bleiauskleidung
Destillierblasen	Aluminium, Monelmetall, Nicorros
Behälter	Holz, Blei.
b) Alkalien.	
	Ammoniak (Gas).
Trockenes Gas:	
Kompressoren (für Haber-Bosch-Verfahren)	3% iger Cr-Stahl, 5% iger Wolframstahl
Ventilatoren	Stahl
Rohrleitungen	Stahl (heißes Gas)
Pumpen und Ventiltteile	Monelmetall
Feuchtes Gas:	
Rohrleitungen	Blei, V2A-Stahl.
	Kalilauge, Natronlauge.
Autoklaven	Gußeisen, Nickel, Kupfer-Nickellegierungen
Verdampfer	Gußeisen, Nickel, Kupfer-Nickellegierungen
Verdampferrohre	Stahl, Kupfer-Nickellegierungen
Schmelzkessel	Gußeisen, Kupfer-Nickellegierungen
Rohrleitungen	Stahl, VA-Stahl
Pumpen	Gußeisen, Stahl, VA-Stahl, Kupfer-Nickellegierungen.
c) Salze.	
	Alaun.
Lösungsgefäße	Blei, Stahl mit Gummiauskleidung
Rohrleitungen	Blei, Stahl mit Gummiauskleidung, Messing
Pumpen	Blei, Eisensiliciumguß, Bleibronze, Gummiauskleidung, Bronzearmaturen
Behälter	Blei, Holz, Gummiauskleidung, für warme Lösungen Blei, für kalte Stahl. Für hohe Korrosionsfestigkeit ist V2A-Stahl erforderlich.
	Aluminiumchlorid (Lösung).
Rohrleitungen	Gummiauskleidung, Steinzeug
Pumpen	Eisensiliciumguß
Behälter	Holz, säurefeste Steinauskleidung.
	Aluminiumsulfat.
Lösungsgefäße	Blei, Monelmetall
Verdampfer	Bleiauskleidung
Filter	Gußeisen, Holz
Rohrleitungen	Blei- oder Gummiauskleidung, Monelmetall
Pumpen	Bleiauskleidung, Monelmetall, Bronzearmaturen, Gummiauskleidung
Behälter	Blei- oder Gummiauskleidung, Holz (für verdünnte Lösungen). Für Konzentrationen unter 10% V2A-Stahl.

	Ammoniumnitrat.
Konstruktionsteile:	Konstruktionswerkstoff:
Verdampfer	Sichromal, Spezialgußeisen, V2A-Stahl
Filter	Gußeisen
Rohrleitungen	Gußeisen, V2A-Stahl, Aluminium
Pumpen	Gußeisen, V2A-Stahl, Stahl mit Gummiauskleidung
Behälter (für Lösungen)	Stahl mit Gummiauskleidung, V2A-Stahl, Aluminium.
	Ammoniumphosphat.
Rieseltürme	Säurefeste Steine
Verdampfer	V2A-Stahl, Aluminium
Filter	Stahl (für kalte Lösungen)
Rohrleitungen	Stahl (für kalte Lösungen), Eisensiliciumguß (für heiße Lösungen)
Pumpen	Stahl, Eisensiliciumguß, V2A-Stahl
Behälter	Stahl (für kalte Lösungen).
	Ammoniumsulfat.
Verdampfer	Bleiauskleidung, V2A-Stahl
Verdampferrohre	Bleiumkleidete Stahlrohre
Filter	Blei, Gußeisen, Bronze, Holz (für verdünnte Lösungen)
Rohrleitungen	Blei, Gußeisen, Stahl, V2A-Stahl
Pumpen	Stahl, Bleiauskleidung, Bronze, V2A-Stahl.
	Bariumchlorid.
Verdampfer	Stahl
Filter	Stahl, Gußeisen
Rohrleitungen	Stahl, Gußeisen
Pumpen	Gußeisen, V2A-Stahl
Reaktionsgefäße	Stahl
Behälter	Stahl.
	Bleichlaugen. (Natrium- und Calciumhypochlorit.)
Bleichgefäße	Säurefeste Steine, Steinzeug, für alkalische Lauge Stahl
Filter	Hart- oder Weichgummiauskleidung (unter 85° C)
Rohrleitungen	Blei, Monelmetall, Eisensiliciumguß, Gummiauskleidung
Pumpen	V2A-Stahl, Eisensiliciumguß, 28%iger Cr-Stahl, Gummiauskleidung, Steinzeug
Rührer	Monelmetall
Behälter für festes Salz	Stahl, Zinn, Zink.
	Calciumhydroxyd.
Alle Teile	Gußeisen, Stahl.
	Eisenchloride.
FeCl_3	
Rohrleitungen	Hartgummi, Holz mit Pech- oder Weichgummiauskleidung
Pumpen	Hartgummi, Weichgummiauskleidung
FeCl_2	
Filter	Stahl mit Gummiauskleidung
Rohrleitungen	Stahl mit Gummiauskleidung
Pumpen	Stahl mit Gummiauskleidung
Behälter	Gummiauskleidung, Holz (für kristallisiertes FeCl_2).

Konstruktionsteile:	Eisensulfate.	Konstruktionswerkstoff:
$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$		
Rohrleitungen		Gummi- auskleidung, Hartgummi
Pumpen		Gummi- auskleidung, Hartgummi
Behälter		Gummi- auskleidung, Stahl (trocken)
FeSO_4		
Verdampfer		Gußeisen
Filter		Stahl, Bronze
Rohrleitungen		Stahl mit Gummi- auskleidung
Behälter		Gummi- auskleidung, Holz (für krystallisiertes FeSO_4).
		Kaliumchlorid.
Pumpen		Gußeisen, Bronze, Aluminium- bronze, Stahl
Behälter		Stahl, Holz (für verdünnte Lösungen oder festes Salz). Für basische Salzlösungen genügt Gußeisen. Für saure oder neutrale Lösun- gen ist V2A-Stahl empfehlenswert.
		Kupfernitrat.
Pumpen		Kupfer, V2A-Stahl.
		Kupfersulfat.
Krystallisationsgefäße		Asphaltierter Beton
Verdampfer		Blei
Filter		Blei
Rohrleitungen		Kupfer, Blei- oder Gummi- auskleidung
Pumpen		Bronze, Aluminium- bronze
Reaktionsgefäße		Holz
Behälter		Gummi- auskleidung, Holz (für krystallisiertes Kupfer- sulfat).
		Natriumbichromat.
Rohrleitungen		Kupfer, Stahl
Pumpen		Bronze.
		Natriumbisulfit.
Filter		Blei
Rohrleitungen		Blei
Pumpen		Blei, Bronze, Stahl
Reaktionsgefäße		Blei
Behälter		Blei, Holz (für trockenes Natriumbisulfit).
		Natriumbisulfat.
Verdampfer		V2A-Stahl
Filter		Blei
Rohrleitungen		Blei, Hartgummi, Gummi- auskleidung, Stahl (für geschmolzenes Salz)
Pumpen		Bleiauskleidung
Reaktionsgefäße		Blei
Behälter		Stahl (für geschmolzenes Salz), Holz oder Blei- auskleidung (für Lösun- gen).
		Natriumcarbonat (Soda).
Alle Teile		Stahl, Gußeisen.
		Natriumchlorid.
Kondensationsrohre		Messing
Rohrleitungen und Pumpen		Gußeisen, Kupfer, Monel- metall, Bronze
Behälter		Emailliertes Eisen, Holz.

	Natriumnitrat.
Konstruktionsteile:	Konstruktionswerkstoff:
Alle Teile	Gußeisen, Stahl.
	Natriumphosphat.
Alle Teile	Gußeisen, Stahl.
	Natriumsulfat.
Krystallisationsgefäße	Galvanisiertes Eisen, 14% iger Cr-Stahl, V2A-Stahl, Holz (unter 50° C)
Lösungsgefäße	Stahl, Monelmetall, Nicorros
Verdampfer	Gußeisen, Stahl, Monelmetall, Nicorros
Filter	Holz (unter 50° C), Gußeisen
Rohrleitungen	Blei, Stahl, V2A-Stahl
Pumpen	Stahl, Bronze, V2A-Stahl
Behälter	Blei, Stahl.
	Natriumsulfid.
Kühlpannen	Stahl
Öfen	Säurefeste Steine
Rohrleitungen	Blei (5—25%, 100° C), Stahl, Steinzeug
Behälter	Stahl, Steinzeug.
	Natriumthiosulfat.
Verdampfer	Gußeisen, Stahl
Filter	Gußeisen
Rohrleitungen	Stahl, Bleiauskleidung
Pumpen	Gußeisen, Hartblei, V2A-Stahl
Behälter	Bleiauskleidung; im Gebrauch ferner Monelmetall, Nickel, Steinzeug.
	Magnesiumchlorid.
Verdampfer	Gußeisen
Pumpen	Hartblei (für heiße Lösungen), V2A-Stahl.
	Zinkchlorid.
Konzentrationsgefäße	Emailliertes Eisen
Verdampfer	Manganbronze, emailliertes Eisen
Schmelzkessel	Gußeisen
Rohrleitungen	Blei (für kalte Lösungen), Manganbronze, Steinzeug, Gummiauskleidung
Reaktionsgefäße	Steinzeug
Behälter	Steinzeug, Blei- oder Gummiauskleidung.
	Zinknitrat.
Pumpen	V2A-Stahl, Aluminiumbronze.
	Zinksulfat.
Verdampfer	Kupfer-Siliciumlegierungen (Cu mit 4% Si, 1% Mn)
Rohrleitungen	Blei
Pumpen	Blei- oder Gummiauskleidung Aluminiumbronze, Gummiauskleidung.
	Zinnchlorid.
Rohrleitungen	Gummiauskleidung (unter 85° C).

d) Gase.

Chlor.

Konstruktionsteile:	Konstruktionswerkstoff:
Trockenes Gas:	
Kompressoren	Gußeisen, Stahl (unter 100° C)
Ventilatoren	Gußeisen, Stahl, Gummiauskleidung
Rohrleitungen	Eisen, Stahl, Steinzeug (für heißes Cl), Emailüberzüge (kalt), Gummiauskleidung (unter 85° C), Eisensiliciumguß (unter 100° C)
Reaktionsgefäße	Blei
Behälter	Stahl
Ventile (für flüssiges Cl)	Monelmetall, Stahl
Feuchtes Gas:	
Chloriergefäße	Steinzeug, emailliertes Eisen, Glas, Bleiauskleidung.

Chlorwasser.

Rohrleitungen	Gummiauskleidung, Blei
Ventile	Hartgummi
Geschlossene Behälter	Beton
Im übrigen	Stahl mit Gummiauskleidung.

Schwefel. — Chlorschwefel.

Rohrleitungen, Pumpen	Gußeisen (unter 150° C), Stahl (fester Schwefel)
Behälter	Holz, Steinzeug, Glas, Blei, Stahl.

Schwefeldioxyd.

Trockenes Gas:	
Kompressoren	Stahl, Gußeisen
Rohrleitungen	Stahl, Gußeisen
Feuchtes Gas:	
Rohrleitungen	Steinzeug, Blei, Aluminiumbronze (unter 150° C).

Schwefelwasserstoff.

Kaltes Gas:	
Rohrleitungen	Stahl, Aluminium
Heißes Gas:	
Rohrleitungen	V2A-Stahl, hochlegierte Cr-Stähle.

Sauerstoff.

Kompressoren	Stahl
Rohrleitungen	Stahl
Ventile	Stahl, Bronze
Flaschen	Stahl
	für hohe Temperaturen: hochlegierte Chrom-Nickelstähle, Chrom-Nickel-Molybdänlegierungen, Si-cromal, alitierte Stähle.

Stickstoff.

Für alle Teile	Stahl, bei höheren Beanspruchungen Nickel- bzw. Chrom-Nickel-Vergütungsstähle.
----------------	--

Wasserstoff.

Für alle Konstruktionsteile, bei Temperaturen bis 250° C und niederen Drücken	Stahl
Für Hochdrucktechnik	3% iger Cr-Stahl, 5% iger Wolframstahl, Cr-V-Stahl.

e) Verschiedene organische Verbindungen.

Alkohole.	
Konstruktionsteile:	Konstruktionswerkstoff:
Rohrschlangen	Kupfer, Nickel
Filter	Gußeisen, Monelmetall
Rohrleitungen	Gußeisen, Stahl ¹ , Kupfer, Nickel
Pumpen	Gußeisen, Stahl ¹ , Bronze
Reaktionsgefäße	Gußeisen, Stahl
Destillierblasen	Kupfer, Stahl, Gußeisen, Monelmetall
Behälter	Stahl ¹ , Kupfer, Holz, Gußeisen.
Äther.	
Rohrleitungen	Blei, Stahl (bei H ₂ SO ₄ -freiem Äther)
Pumpen	Stahl, V2A-Stahl
Reaktionsgefäße	Blei
Destillierblasen	Stahl, Kupfer
Behälter	Stahl, Steingut, Glas.
Acetaldehyd, Benzaldehyd.	
Alle Teile	Stahl, Gußeisen.
Formaldehyd.	
Rohrleitungen	Eisen, Stahl
Pumpen	Bronze, Stahl, Eisen, V2A-Stahl
Reaktionsgefäße	Kupfer, Stahl
Destillierblasen	Kupfer
Behälter	Aluminium, Kupfer, Stahl, Glas, Holz.
Benzol, Toluol, Xylol.	
Alle Teile	Gußeisen, Stahl.
Chlorbenzol.	
Alle Teile	Gußeisen, Stahl
Reaktionsgefäße	Steinzeug.
Chloroform.	
Rohrleitungen	Blei
Pumpen	Bleiauskleidung
Destillierblasen	Blei, Kupfer
Behälter	Stahl (wasserfrei), sonst Blei.
Schwefelkohlenstoff.	
Alle Teile	Gußeisen, Stahl.
Tetrachlorkohlenstoff.	
Alle Teile	Gußeisen, Stahl
Feuchter Tetrachlorkohlenstoff:	Stahl wird allmählich angegriffen, völlig beständig: Eisensiliciumguß.
Nitrobenzol.	
Alle Teile	Gußeisen, Stahl.
Anilin.	
Alle Teile	Gußeisen, Stahl, V2A-Stahl, Nicorros, Monelmetall.
Gelatine (Lösung).	
Konzentrationsapparate	Aluminium, Kupfer
Filter	Gußeisen
Rohrleitungen	Aluminium
Pumpen	Gußeisen, Aluminium
Behälter	Kupfer, Zinn.
Pyridin.	
Alle Teile	Stahl, Gußeisen.

¹ Wasserhaltiger Alkohol greift an.

Technische Meß- und Regelverfahren.

Von Dr. rer. nat. A. Ernst und Dr. phil. C. Hilburg VDI, Ludwigshafen a. Rh.

I. Die gemeinsamen Elemente technischer Meßverfahren¹.

A. Überblick über die Grundformen technischen Messens und ihre Bedeutung.

Die strengen Forderungen nach rationellster Betriebsführung in der chemischen Industrie haben das Meßwesen zu einer außerordentlichen Entwicklung gebracht. Bei allen Einzelmessungen technischer Größen, z. B. der Menge oder der Temperatur, sind stets außer den im Meßverfahren selbst liegenden Fehlern und Unsicherheiten noch die subjektiven Fehlereinflüsse vorhanden, die durch selbsttätige, also rein objektive Meßeinrichtungen heute weitgehend ausgeschaltet werden können. Die selbsttätigen Meßeinrichtungen haben außerdem den Vorteil, daß sie durchweg das Meßergebnis rascher liefern, als menschliche Fertigkeit auch bei der größten Übung es vermag; dazu kommt, daß, wenn diese Vorrichtungen zweckmäßig angelegt und dauernd in einwandfreiem Zustand gehalten werden, die Betriebssicherheit beträchtlich erhöht wird. Die damit geschaffenen Vorteile sind ohne weiteres einleuchtend, wenn sie auch nicht direkt in Geldwert auszudrücken sind. Die Forderung der Betriebssicherheit muß besonders bei Dauer- oder Chargenbetrieben erhoben werden, für die eine Betriebsstockung oder -abstellung große Verluste bedeuten würde.

Zum Wesen einer objektiven Meßmethode gehört, daß das Meßergebnis selbsttätig aufgezeichnet wird und als unbeeinflussbarer Beleg dem Werks- oder Betriebsführer zur Kontrolle vorliegt. Die mannigfachen Registriervorrichtungen sollen im folgenden nach ihrer Eigenart gekennzeichnet und beschrieben werden.

Es ist kein Wunder, daß es in der Entwicklungsgeschichte der Meßtechnik und je nach dem Ausbildungs- und Erziehungsgrad der Belegschaft eines Werkes ein Durchgangsstadium gab oder vielleicht hier und da noch gibt, in welchem die Einführung von Registriereinrichtungen mit großem Unbehagen aufgenommen wird, weil jede Nachlässigkeit in der Bedienung unbeirrbar aufgezeichnet wird. In solchen Fällen ist es von Vorteil, den Bedienungslenten nur ein zu dem Registrierapparat parallel arbeitendes Anzeigegerät an den Bedienungsstand zu hängen, nach welchem sie ihre Arbeit verrichten müssen. Außerdem können willkürlich oder selbsttätig erfolgende Kommandozeichen mittels Ferngeber von einer zentralen Betriebsüberwachung aus die Aufmerksamkeit der Bedienung erhöhen. Die Registrierapparate selbst werden

¹ Bearbeitet von Dr. A. Ernst.

der Einsichtnahme der Belegschaft entzogen und können in einer Meßzentrale zusammengefaßt werden.

Wohl in den meisten Fällen ist eine solche Maßnahme jedoch nicht notwendig. Vielmehr bekommen die mit der Bedienung einer technischen Anlage betrauten Arbeiter mehr Interesse an den Meßeinrichtungen, wenn sie an dem Registrierstreifen die Wirkung ihrer Aufmerksamkeit verfolgen können. Durch die Einführung eines Prämiensystems läßt sich der von der Betriebsleitung angestrebte Zweck einer möglichst günstigen und störungsfreien Bedienung der Fabrikationsvorrichtungen noch wirksam unterstützen.

Überall, wo eine planmäßige Erfassung aller betriebswichtigen Meßgrößen durchgeführt ist, sei es im Hinblick auf die Aufstellung einer Energie- oder einer Stoffbilanz, sind die Aufzeichnungen der Registriergeräte täglich auszuwerten. In Tages-, Wochen- oder Monatsberichten sind die Ergebnisse zusammenzustellen, aus welchen zum Nutzen des Werkes Mängel in der Fabrikanlage erkannt und Verbesserungen technischer oder organisatorischer Art durchgeführt werden können. Erst in einer systematischen Zusammenfassung und kritischen Auswertung dieser Meßergebnisse liegt der höchste Nutzen der in ihrer Auswirkung mit Unrecht zu den unproduktiven Anlagen eines Werkes zählenden Meßeinrichtungen.

Während eine Anzahl von Registrierstreifen zur Summen- oder Mittelwertbildung einzeln ausplanimetriert werden muß, können andere Meßwerte durch geeignete Zählvorrichtungen selbsttätig summiert werden, wobei unter Umständen auf die Registrierung ganz verzichtet werden kann und viel Büroarbeit gespart wird. Auch Apparate für selbsttätige Differenz-, Produkt- und Quotientenbildung zweier Meßgrößen sind bekannt und müssen als meßtechnische Grundformen Erwähnung finden.

Eine weitere, sehr vielen Verfahren gemeinsame und mit dem technischen Messen eng verknüpfte Aufgabe ist die Schaffung von Signal- und Alarmeinrichtungen überall da, wo die Erreichung eines bestimmten Wertes einer Meßgröße eine besondere Aufmerksamkeit in der Bedienung und Wartung der Betriebsanlage erfordert. Die verschiedenen, diesem Zweck dienenden Einrichtungen sollen unabhängig von dem jeweiligen Meßprinzip zusammengestellt und beschrieben werden. Ferner sollen die Einrichtungen zum selbsttätigen Regeln, die als höchstentwickelte Apparate der Meßtechnik anzusehen sind, nach allgemeinen Gesichtspunkten betrachtet werden.

B. Abgrenzung gegen Spezialgebiete.

Die technischen Meß- und Regelverfahren sollen im Rahmen dieses Werkes nur so weit behandelt werden, als sie bei chemischen Prozessen und den in der chemischen Industrie benötigten Hilfsbetrieben, wie Kälte-, Trocknungs- und Reinigungsanlagen, ferner bei der Förderung und Mischung von Stoffen eine Rolle spielen. Die für Kraftmaschinen

oder für elektrische Kraftzentralen entwickelten speziellen Meßeinrichtungen sind nicht ausgesprochenes Rüstzeug der chemischen Technik. Schon aus Raummangel können sie hier nicht beschrieben werden. Eingehende Darstellungen über diesen Zweig der Meßtechnik sind in der Literatur auch bereits bekannt¹. Meßvorrichtungen, soweit sie zur ausgesprochenen Materialprüfung dienen, sind dem Kapitel Werkstoffe, S. 451 vorbehalten. Die für Laboratoriumszwecke speziell entwickelten Meßvorrichtungen können hier ebenfalls keine Aufnahme finden, z. B. die Vorrichtungen zur Registrierung sehr schnell ablaufender Vorgänge mittels Oszillographen oder spektralanalytische Verfahren. Ferner können organisatorische Fragen bezüglich des Meßwesens nur gelegentlich gestreift werden.

Es sollen aus Raummangel nur die wichtigsten Meßprinzipien beschrieben werden, ohne alle die mannigfaltigen Ausführungsformen der Apparatebauformen zu erwähnen; wohl aber sollen typische Beispiele angeführt werden, an Hand deren die praktische Auswirkung der Meß- und Regelverfahren erläutert werden kann. Hiermit ergibt sich von selbst, daß die Aufführung bestimmter Fabrikate durchaus nicht bedeuten soll, daß im Prinzip gleiche oder ähnliche Ausführungsformen anderer Firmen nicht etwa gleichwertig sein können.

C. Registriervorrichtungen.

Unter Registriervorrichtungen sollen hier nur die selbsttätig aufzeichnenden Apparate für beliebige physikalische Meßgrößen in ihrem zeitlichen Verlauf verstanden sein. Ihrem konstruktiven Aufbau nach sind die Registriervorrichtungen im allgemeinen eine Kombination eines Anzeigerätes mit einer Vorrichtung zum Aufzeichnen des jeweiligen Zeigerausschlages.

Wenn das Drehmoment des Meßwerkes größer als 5 gcm ist, so kann an der Zeigerspitze ein Schreibstift oder eine Schreibfeder befestigt werden, unter deren Spitze das Registrierpapier vorbeigleitet. Man erhält auf diese Weise den sog. Linienschreiber. Im Gegensatz zu Linienschreibern werden vielfach noch sog. Flächenschreiber bei Apparaten benutzt, deren Zeiger nicht dauernd die Momentangröße des Meßwertes anzeigt, z. B. bei den Ados-, Eckardt-, Mono-Rauchgasprüfern (s. Tabelle 16, S. 669), ferner beim B.A.S.F.-Gasdichteschreiber (s. Tabelle 13, S. 556), I. G. Titrierautomat (s. Tabelle 16, S. 670). Bei diesen Registriervorrichtungen entspricht die Umhüllende einer Folge paralleler und verschieden langer Striche der Registrierkurve eines Linienschreibers. Bei Meßwerken mit kleinen Drehmomenten, z. B. den elektrischen Präzisionsmeßgeräten mit nur etwa 0,1 gcm Drehmoment, ist man gezwungen, die Reibung zwischen Schreibvorrichtung und Papier durch einen Kunstgriff zu überwinden. Meist wählt man

¹ Gramberg, A.: Maschinentechnisches Versuchswesen, 2 Bände. Berlin 1924 bzw. 1933. — Seuffert, F.: Versuche an Dampfmaschinen, Dampfkesseln, Dampfturbinen und Verbrennungskraftmaschinen. Berlin 1927. — Brand-Seuffert: Technische Untersuchungsmethoden zur Betriebsüberwachung. Berlin 1926. — Prätorius, E.: Wärmewirtschaft im Kesselhaus. Dresden-Leipzig 1930.

hierzu die Fallbügelregistrierung. Diese besteht darin, daß ein Fallbügel von einem Uhrwerk in gleichen Zeitabständen freigegeben wird und durch sein eigenes Gewicht auf den darunter befindlichen Zeiger schlägt, dessen Spitze oder Schneide mittels eines Farbbandes oder Farbkissens einen farbigen Punkt auf dem Registrierpapier erzeugt. Derartige Instrumente nennt man Punktschreiber. Je nach dem zeitlichen Vorschub des Registrierpapiers und der Punktfolge kann eine mehr oder minder geschlossene Punktreihe erzeugt werden, die einem geschlossenen Kurvenzug mehr oder weniger ähnlich ist. Für rasch veränderliche Meßgrößen sind die Punktschreiber nicht verwendbar, wenn es darauf ankommt, die Spitzenwerte zu erfassen; diese Ausnahmen sind jedoch sehr selten.

In Sonderfällen können die Punktschreiber auch derartig verwendet werden, daß die Registrierung nicht in gleichen Zeitabständen erfolgt, sondern jeweils nach Ablauf eines selbsttätigen Arbeitsvorganges, dessen Endzustand physikalisch genau gekennzeichnet ist, z. B. der Beschlag eines Spiegels oder der Farbumschlag einer Flüssigkeit. Als Beispiel ist der selbsttätige Feuchtigkeitsschreiber der I. G. Farbenindustrie A.G., D.R.P. 510953 von P. Gmelin und A. Ernst und F. Ranke genannt. Hierbei wird der Beschlag eines Spiegels als scharf definierter Endzustand eines Arbeitsvorganges benutzt.

Im allgemeinen ist der Papiervorschub proportional der Zeit und die Bewegungsrichtung des Schreibzeuges senkrecht zur Zeitachse. Der stündliche Papiervorschub ist wie auch die übrigen Abmessungen der Registrierstreifen genormt (vgl. Normenblätter DIN 1507, 1508, 1509, 1510). Um keine zu langen Tagesdiagramme zu erhalten, wählt man meist einen stündlichen Vorschub von 20 mm.

Der Antrieb des Registrierstreifens erfolgte früher durchweg mittels Uhrwerks; später kamen die Uhrwerke mit selbsttätigem Motoraufzug (Lieferfirma: Hartmann & Braun A.G., Frankfurt a. M.) oder der über eine Kontaktuhr (Lieferfirma: Siemens & Halske A.G., Berlin) (Mutteruhr) elektromagnetisch betätigte Papiervorschub auf und in neuerer Zeit immer häufiger der reine Motoraufzug ohne Uhrwerk. Die letztgenannte Einrichtung ist an das Vorhandensein eines Wechselstromnetzes gebunden, dessen Frequenz einigermaßen konstant sein muß. Die verwendeten kleinen Synchronmotoren sind völlig wartungsfrei und erheblich billiger als Uhrwerke, erfordern auch weniger Raum als diese.

Registriereinrichtungen, bei denen der Papiervorschub nicht proportional der Zeit, sondern proportional der Häufigkeit eines physikalischen Vorgangs ist, sind selten. Ein Beispiel ist der elektrische Windmesser mit elektrischer Fernübertragung der Firma R. Fuess, Berlin-Steglitz. Der Papiervorschub kann auch proportional einer Zustandsgröße¹ gemacht werden oder (nach einem Vorschlag von P. Neubert, I. G. Farbenindustrie, Leverkusen) proportional einer Durchflußmenge. Das Verfahren wurde sinngemäß auf die sog. Tastzähler übertragen, die derart arbeiten, daß die Tasthäufigkeit eines Mengenzählers von der betreffenden Zustandsgröße gesteuert wird.

¹ Vgl. D.R.P. 585 699 der Firma Hartmann & Braun A.G., Frankfurt a. M.

Nach Form und Anordnung des Registrierpapiers unterscheidet man drei Typen:

a) Trommelschreiber mit rechteckigen Registrierstreifen, die auf eine zylindrische Trommel aufgezogen werden und im allgemeinen einen Umlauf pro Tag, gelegentlich einen Umlauf pro Arbeitsschicht (8 h), seltener pro 1 h und auch solche mit einem Umlauf pro Woche besitzen. Die Trommelschreiber haben den Nachteil, daß das Diagramm nicht in seinem ganzen Umfange überblickt werden kann.

b) Streifenschreiber mit einem von einer Vorratsrolle ablaufenden Papierstreifen. Wenn die Streifen täglich zur Auswertung abgenommen werden, ist es nicht nötig, den abgelaufenen Teil des Streifens aufzuwickeln, wozu in anderen Fällen besondere Aufwickelvorrichtungen dienen.

c) Kreisblattschreiber sind in Deutschland bisher weniger verbreitet als z. B. in Amerika. Sie haben den Vorzug einer sehr gedrängten Bauweise und eines vollständigen Überblickes über das aufgelegte Diagramm (s. Abb. 18, S. 609).

Neuerdings liefert die Firma Siemens & Halske, Berlin ein registrierendes Kolbenmanometer mit Kreisblattdiagramm.

Ein weiterer Unterschied der Diagramme besteht darin, daß Registrierapparate entweder direkt aufzeichnende Schreibhebel mit kreisförmig gekrümmter Ordinate oder Zeiger mit Geradföhrung und geradlinige, auf der Zeitachse senkrechte Ordinate besitzen. Hinsichtlich der Auswertung unterscheiden sich beide Arten nicht.

Für ausnahmsweise rasch veränderliche Meßgrößen hat die Firma Pyrowerk Dr. Rudolf Hase, Hannover einen Schnellschreiber konstruiert, der bei einem stündlichen Papiervorschub bis zu 240 mm durch einen Klopfer das Registrierpapier in zitternder Bewegung hält und dadurch eine häufige, aber nur leise Berührung der Schreibvorrichtung mit dem Papier hervorruft.

Während bei den meisten bekannten Registriereinrichtungen der Zeiger des Meßwerkes auch ein Glied der Registriereinrichtung ist, trifft dies für eine zuerst in Amerika hergestellte Instrumententype¹ nicht zu. Bei diesem Gerät bewegt sich der Zeiger des Meßwerks (Nullgalvanometer) nur in engen Grenzen und betätigt zwei elektrische Kontakte, die mit Hilfe von Motorkraft die Bewegung eines Schlittens steuern. Der Schlitten trägt die Registriervorrichtung. Zugleich wird mit dieser Bauart die Möglichkeit sehr breiter Registrierstreifen (250 mm) angestrebt. Da mit der Verbreiterung des Registrierstreifens nicht notwendig eine Steigerung der Meßgenauigkeit verknüpft ist, so bedeuten derartige Instrumente eine unnötige Verteuerung schon durch die teureren und unhandlich breiten Diagramme.

Um nun nicht für jede Meßstelle einen besonderen Registrierapparat anschaffen zu müssen, insbesondere wenn die Gebergeräte für eine Reihe

¹ Potentiometer-Recorder der Firma Leeds & Northrup Co., Philadelphia; ferner ist ein ähnlicher Apparat bei dem Pyrowerk Dr. Rudolf Hase, Hannover erhältlich. Auch die Firma Siemens & Halske A.G., Berlin liefert neuerdings einen Präzisionstintenschreiber ähnlicher Bauart, den Kompensographen für schnell aufeinanderfolgende Schwankungen einer Meßgröße.

von Meßstellen gleichartig sind, beispielsweise lauter Thermolemente oder Widerstandsthermometer, so kann das Meßwerk mit einem durch Uhrwerks- oder Motorantrieb betätigten Umschalter verbunden werden, der die Meßstellen der Reihe nach ans Meßwerk und damit an den Registriermechanismus anschließt. Dazu eignen sich ganz besonders die Fallbügelschreiber mit elektrischem Meßwerk. Die Unterscheidung der verschiedenen Meßstellen wird durch verschiedene Farbgebung erreicht, indem ein Mehrfarbenband oder eine Farbwalze synchron mit dem Umschalter angetrieben wird. Die Kennzeichnungen der Meßstellen durch verschiedenen Typendruck oder durch gleichzeitige Niederschrift einer Ziffer neben den Registrierpunkt haben sich in Deutschland nicht eingebürgert.

Auch wenn verschiedenartige Meßgrößen mit vollständig verschiedenen Meßwerken gemessen werden, kann eine Zusammenfassung der Registrierung in einem gemeinsamen Gerät erfolgen. Solche Apparate werden z. B. von der Firma J. C. Eckardt A.G., Stuttgart-Cannstatt für Zwei-, Drei-, Vier-, Fünf- oder Sechsfachschreiber für Zug, Druck, Differenzzug, Differenzdruck, Flüssigkeitsstand, Temperatur, Temperaturdifferenz mit Meßfederwerken gebaut; ferner werden Registrierapparate mit mehreren elektrischen Fernmeßwerken von derselben Firma und von der Firma Hartmann & Braun A.G., Frankfurt a. M. hergestellt.

D. Zählvorrichtungen.

Die Zählvorrichtungen sind grundsätzlich überall anwendbar, wo eine Meßgröße registriert werden kann; allerdings können sie kein Ersatz für Registriervorrichtungen sein, weil sie nicht gestatten, Unregelmäßigkeiten im Betrieb richtig zu erkennen. Hierzu gehört die Festlegung des Zeitpunkts einer Störung und des absoluten Betrags derselben. Werden derartige Forderungen jedoch nicht gestellt, oder durch bereits vorhandene Registriergeräte erfüllt, so können die Zählvorrichtungen insofern von großem Nutzen sein, als sie die zeitraubende Büroarbeit des Planimetrierens und Rechnens weitgehend ersparen können. Als Grundlage für die Prämienberechnung in Kesselhäusern wird z. B. von der Firma Siemens & Halske A.G., Berlin die Zählung des CO_2 - und des $(\text{CO} + \text{H}_2)$ -Gehalts der Rauchgase vorgeschlagen.

Es sind folgende Arten von Zählvorrichtungen zu unterscheiden:

1. Mechanische Zähler.

Diese Art von Zählern besorgen das sog. Abzählen gleichartiger mechanischer Bewegungen von Hebeln, Ventilen oder anderen Maschinenteilen oder von Umdrehungen. Beispiele sind die Hubzähler von Kolbenmaschinen und die Zählwerke von Gas- und Flüssigkeitsmessern.

Zu den mechanischen Zählern sind auch alle Ausführungen zu rechnen, die über einen elektrischen Kontakt auf beliebige Entfernung elektromagnetisch ein mechanisches Zählwerk schalten. Bei schlecht zugänglichen Meßstellen ist man auf diese Einrichtungen angewiesen.

Die Grenze der Verwendbarkeit ist für Hubzähler 400 Schaltungen pro min, für Drehzähler 1000 Schaltungen pro min, für elektrische Kontakte soll die Kontaktdauer 0,2 s nicht unterschreiten.

Mechanische, schlupffreie Übersetzungsgetriebe gestatten den Meßbereich nach oben und unten beliebig zu erweitern. Die mechanischen Zähler sind ferner zur Summenbildung aufeinanderfolgender und verschieden großer Werte einer und derselben Meßgröße verwendbar. In dieser Form sind sie ein Ersatz für das nachträgliche Planimetrieren von Diagrammen. Die Firma Bopp & Reuther G. m. b. H., Mannheim-Waldhof verwendet z. B. an einem Venturi-Wassermesser ein kleines mechanisches Planimetrierwerk als Zählvorrichtung.

Während beim bloßen Abzählen in den weitaus meisten Fällen eine direkte Kuppelung des Zählwerks mit den betreffenden Maschinenteilen möglich ist, weil hinreichende Antriebskräfte zur Verfügung stehen, muß diese Voraussetzung bei Summationszählern mit direkter Kuppelung im Einzelfalle geprüft werden, z. B. bei Wärmemengenzählern mit mechanischem Zählwerk (vgl. Siemens-Wärmemengenzähler und Wärmemengenzähler von Wagner). Andere Meßeinrichtungen umgehen diese Schwierigkeit, indem sie ein Uhrwerk oder einen Motor als Hilfskraft einbauen und das Zählwerk damit indirekt antreiben (Samson-Wärmemengemesser der Samson-Apparatebau A. G., Frankfurt a. M., ferner Tastzähler für Strömungsmesser der Firma Hartmann & Braun A. G., Frankfurt a. M. und Integrierwerk zum Gasmengenzähler der Firma R. Fuess, Berlin-Steglitz).

2. Elektrische Zähler.

Unter den elektrischen Zählern sind zwei völlig verschiedene Gattungen zu unterscheiden: die Motorzähler und die Elektrolytzähler. Bei den Motorzählern wird die Drehzahl eines rotierenden Systems auf ein mechanisches Zählwerk übertragen, bei den Elektrolytzählern wird ein Flüssigkeitsfaden in einer Meßkapillare abgelesen. Eine Betrachtung der teilweise komplizierten Bauart der Zähler muß hier unterbleiben; wegen Einzelheiten sei auf die Spezialliteratur [A. Möllinger: Wirkungsweise der Motorzähler und Meßwandler, 2. Aufl. Berlin 1925. — W. v. Krukowsky: Grundzüge der Zählertechnik. Berlin 1930] hingewiesen.

a) Gleichstrommotorzähler.

Sie sind nach Art eines Gleichstrommotors gebaut, derart, daß sich in einem konstanten Magnetfeld eine stromdurchflossene Spule bewegt. Das Drehmoment der Spule ist proportional dem Magnetfeld und dem Feld der Spule. Man gelangt auf diese Weise zu einem Amperestundenzähler.

An Stelle eines konstanten Magnetfeldes kann man auch einen je nach der Strombelastung veränderlichen Elektromagneten verwenden. Auf dieser Grundlage sind die Wattstundenzähler konstruiert. An sich ist ein solcher Zähler spannungsabhängig. Es gibt jedoch Bauarten mit offenen Elektromagneten, die spannungsunabhängig sind. Ein wesentlicher Unterschied in den Zählertypen besteht in der Bremseinrichtung.

Bei konstantem Bremsfeld ist der Bremswert proportional der Drehgeschwindigkeit des Zählers, bei einem wattmetrischen Zählersystem mit quadratischer Abhängigkeit zwischen Spannung und Bremskraft mißt man den Wert $\frac{E \cdot J}{E^2} = \frac{1}{R}$, also den reziproken Wert eines Widerstandes. Solche Zähler nennt man Ohmstundenzähler.

b) Wechselstrommotorzähler.

Diese beruhen auf dem Ferraris-Prinzip des Induktionsmotors. Je nach Bauart erhält man reine Wattstundenzähler für die Größe $E \cdot J \cdot \cos \varphi$ mit veränderlicher Phasenverschiebung oder bei konstanter Phasenverschiebung J^2 - oder E^2 -Zähler.

Entsprechend den Gleichstrom-Ohmstundenzählern werden auch Wechselstrom-Ohmstundenzähler gebaut, die als Stundenzähler und Mengenzähler Verwendung finden. Bei konstantem Zählerwiderstand wird lediglich die Einschaltdauer des Zählers summiert; die Einschaltvorrichtung für den Zähler kann an irgendeine Meßvorrichtung in beliebiger Entfernung angeschlossen werden.

Beim Wechselstrommengenzähler [H. Lohmann u. F. Grundherr: Siemens-Ztschr. 10, 37 (1930)] ist die Zählerspannungsspule ans Netz angeschlossen, während die Stromspule an eine Induktionsspule des Ferngebers angeschlossen ist. Spannungsschwankungen von $\pm 10\%$ beeinflussen den Zähler nicht.

c) Elektrolytzähler.

Sie beruhen auf dem 2. Faradayschen Gesetz, sind also reine Gleichstromstromzähler. An sich ist jedes Voltameter als Elektrolytzähler geeignet; praktisch bewährt haben sich bisher zwei Bauarten: Der Stiazähler der Firma Schott & Gen., Jena und der Wasserstoffelektrolytzähler der Siemens-Schuckertwerke A.G., Berlin. Der Stiazähler enthält Quecksilbernitratlösung, aus welcher flüssiges Quecksilber an der Kathode ausgeschieden wird; der Wasserstoffelektrolytzähler enthält Phosphorsäurelösung, aus welcher kathodisch Wasserstoff gebildet wird. Beide Zähler lassen sich durch Umkippen auf den Ausgangszustand zurückführen und sind praktisch frei von gegenelektromotorischen Kräften, so daß sie auch für thermoelektrische Ströme verwendbar sind. Der Meßbereich der Elektrolytzähler muß für jeden Verwendungszweck durch einen Nebenschlußwiderstand passend eingestellt werden.

E. Fernmeßvorrichtungen.

Eine große Zahl von Meßvorrichtungen sind räumlich nicht an die Anschlußstellen gebunden, sondern können mit Hilfe von Rohrleitungen oder Drahtverbindungen in oft beliebiger Entfernung aufgestellt werden. Für alle an die Anschlußstellen gebundenen Meßgeräte gibt es heute Zusatzeinrichtungen zur Fernübertragung des Meßwertes. Eine Fernmessung wird überall notwendig, wo die Meßstelle selbst schwer

zugänglich ist, oder wo die Empfangsstelle aus organisatorischen Gründen von vornherein festliegt, z. B. ein Bedienungsstand oder eine Meßzentrale.

Die Übertragung auf sehr große Entfernungen sowie die Übertragung einer großen Anzahl von Meßwerten mit möglichst wenig Leitungen und in kürzester Zeit erfordern komplizierte Fernmeldeanlagen [vgl. Gmelin und Krönert: Chemie-Ingenieur, Bd. 2, Teil 1, S. 78. 1932], deren Erläuterung hier nicht erfolgt.

1. Direkte Meßeinrichtungen mit Fernleitungen.

a) Druckmeßgeräte.

Geräte zur Messung von Gas- und Dampfdrücken können in beliebiger Entfernung und praktisch in beliebiger Höhenlage relativ zur Druckentnahmestelle angeordnet werden, gleichgültig, ob bei Überdruck oder bei Unterdruck. Allerdings muß darauf geachtet werden, daß in den Rohrleitungen keine Kondenswasserbildung oder eine Absperrung durch andere Flüssigkeiten entstehen kann, die das Meßergebnis erheblich fälschen würden. Ein Temperaturgefälle in den Fernleitungen hat meist auf den Meßwert keinen merklichen Einfluß. Die Grundlagen und Hilfsmittel der Druckmessung sind im Abschnitt III, S. 611 behandelt.

Auch Flüssigkeitsdrucke können direkt auf beliebige Entfernungen übertragen werden; man ist aber mit der Einbauhöhe des Meßgerätes nicht freizügig, weil der hydrostatische Druck einer schweren Flüssigkeit mit der Tiefe zunimmt. Es ergibt sich also für die Niveaudifferenz h in m zwischen Anschlußstelle und Aufstellungsort des Druckmessers das Korrektionsglied:

$$\Delta p = 10 \cdot h \cdot \gamma \text{ [at]}, \quad (1)$$

wo γ das spezifische Gewicht der Flüssigkeit ist. Ein Temperaturgefälle in den Fernleitungen beeinflußt γ und damit das Korrektionsglied.

b) Elektrische Meßgeräte.

In Tabelle 1 (S. 582) werden die hauptsächlichsten elektrischen Instrumententypen mit Angaben ihrer Eignung für direkte Fernmessung, d. h. ohne Zwischenschaltung irgendwelcher Geberapparate, aufgeführt. Wegen spezifischer Einzelheiten dieser elektrischen Meßgeräte muß auf die Fachliteratur [vgl. G. Keinath: Die Technik der elektrischen Meßgeräte, 2 Bände, 3. Aufl. München und Berlin 1928] verwiesen werden.

c) Akustische und optische Einrichtungen.

Für quantitative Fernmessung eignen sich akustische und optische Einrichtungen in der Technik wenig; sie werden dagegen für Meldezeichen und Kommandogabe im Zusammenhang mit beliebigen Meßgeräten ausgiebig verwendet. Als solche werden sie in Abschnitt F, S. 588 behandelt.

Tabelle I. Elektrische Instrumente für direkte Fernmessung.

Instrumentgattung	Anwendung	Kennzeichnende Angaben
a) Gleichstrom-Drehspulinstrumente:	für Präzisions- und Schalttafelmessungen; Instrumente höchster Empfindlichkeit und Genauigkeit	Strommesser haben 60—100 mV Spannungsabfall; für Fernmessungen 300—1000 mV. Belastung der Drehspule mit 0,05 mA, etwa 20 μ je mV bei hochempfindlichen Typen. Spannungsmesser 1 bis 10 mA; direkte Fernübertragung bis 50 km
b) Dreibeiseninstrumente:	Weitau die verbreitetsten Strom- und Spannungsmesser. Fernmessung wegen hohen Kupferverbrauchs bei Stromstärkenmessung beschränkt. Große Stromstärken nur über Meßwandler	Anzeige ist bei Wechselstrom genauer als bei Gleichstrom (Hysteresefehler bis zu 2% bei guten Fabrikaten ist Anzeigerunterschied für Gleich- und Wechselstrom etwa 0,5%. Kleinere Netz- frequenzschwankungen sind ohne Einfluß
c) Hitzdrahtinstrumente ¹ :	Strom-, Spannungs- und Leistungsmessungen besonders bei Hochfrequenz, sonst wenig üblich	Keine gleichförmige Skalenteilung, wie auch die Instrumente unter b) im Gegensatz zu den Drehspulinstrumenten
d) Elektrodynamische Instrumente: a) Eisenlose Systeme β) Eisengeschirmte Systeme γ) Eisengeschlossene Systeme	für Präzisionsmessungen mit Gleich- und Wechselstrom Strom-, Spannungs-, Leistungs- und Leistungsfaktormessungen [vgl. Brüger: Elektrotechn. Ztschr. 19, 576 (1898)] Desgl. z. B. Siemens-Leistungsfaktormesser und dynamometrischer Zeigerfrequenzmesser	Störender Einfluß von Fremdfeldern, da Magnetfeld nur etwa 20 Gauß. Temperaturfehler 0,02% je °C. Alle Elektrodynamometer sind praktisch unabhängig von Temperatur- und Frequenzschwankungen
e) Drehfeld- und Induktionsmeßgeräte	als Strom- und Leistungsmesser; Ferraris-Frequenzmesser	Nur in engen Grenzen frequenzunabhängig
f) Elektrostatische Instrumente:	besonders für Hochspannungsvoltmeter für Gleich- und Wechselstrom	—
g) Resonanzinstrumente:	für Frequenzmessung, z. B. Zungenfrequenzmesser zur Überwachung der Netzfrequenz; Vibrationsgalvanometer	Die Frequenz ist als einzige elektrische Größe von der Fernleitung völlig unabhängig

¹ Hierunter sollen auch Bimetallmeßwerke mit Heizdrahtwicklung verstanden sein.

2. Indirekte Fernmeßeinrichtungen.

a) Mechanische Fernmeßeinrichtungen.

Mit Hebelübertragungen und Seilzügen kann unter der Vorbedingung großer Antriebskräfte, z. B. bei Gasometerglocken, auf Entfernungen bis zu einigen 100 m eine Fernmessung durchgeführt werden. Große Genauigkeit kann dabei nicht verlangt werden, weil die Temperatureinflüsse infolge Wärme-
dehnung, ferner der veränderliche Wind-
druck bei Anlagen im Freien und die
Reibung bei diesen verhältnismäßig schwer-
fälligen Anlagen eine große Rolle spielen.
Immerhin kann mit solchen primitiven
Mitteln in vielen Fällen wenigstens ein
billiger Notbehelf geschaffen werden.

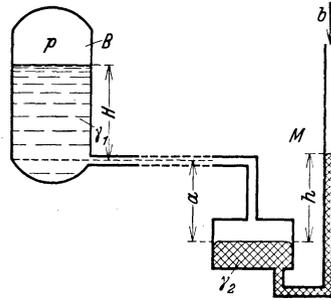


Abb. 1. Flüssigkeitsstand-Fernmessung in geschlossenem Behälter.

b) Hydraulische und pneumatische Fernmeßeinrichtungen.

Die hydraulischen Fernmeßanlagen beruhen auf dem Prinzip der kommunizierenden Röhren und können sowohl für Nieder- als auch für Hochdruck Verwendung finden. Abb. 1 zeigt das Schema einer Flüssigkeitsstand-Fernmessung in geschlossenem Behälter B mit einschlenkigem Differentialmanometer M. Die Anzeige h in m ist in erster Linie abhängig von dem zu messenden Flüssigkeitsstand H in m. Das spezifische Gewicht der Behälterflüssigkeit sei γ_1 , das spezifische Gewicht der Manometerflüssigkeit γ_2 , ferner der Druck über der Behälterflüssigkeit p in at, der Barometerstand b in mm Quecksilber und die Niveaudifferenz zwischen tiefstem Behälterstand und Manometernulllage a in m. Dann gilt die Gleichung:

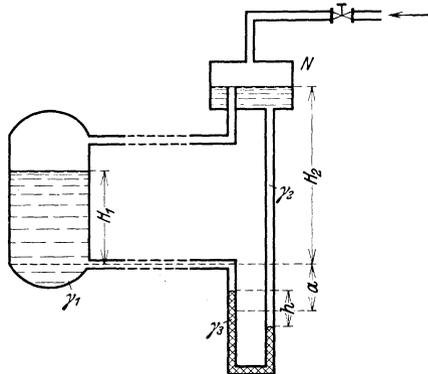


Abb. 2. Wasserstands-Fernmessung für Dampfessel.

$$H = h \cdot \frac{\gamma_2}{\gamma_1} - \left(10 p - \frac{b \cdot 13,6}{10^3} \right) \frac{1}{\gamma_1} - a. \quad (2)$$

Diese Gleichung hat Gültigkeit für einen beliebigen Druckmesser. Für das gewöhnliche Differentialmanometer mit gleichem Querschnitt der beiden Schenkel gilt die Gleichung:

$$H = h \left(\frac{2 \gamma_2 - \gamma_1}{2 \gamma_1} \right) - \left(10 p - \frac{b \cdot 13,6}{10^3} \right) \frac{1}{\gamma_1} - a. \quad (3)$$

Für den offenen Behälter ist $p = b \cdot \frac{13,6}{10^4}$, wodurch das zweite Glied

wegfällt. Eine Spezialanwendung für die Wasserstandsanzeige in Dampfkesseln macht durch Einbau eines Niveaugefäßes N (s. Abb. 2), in welchem sich dauernd durch Kondensation ein konstanter Wasserspiegel hält, unabhängig vom Dampfdruck p . Hierfür gilt die Gleichung:

$$H_1 = (H_2 + a) \frac{\gamma_2}{\gamma_1} + \frac{h}{2} \left(\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{\gamma_1} \right) - h \cdot \frac{\gamma_3}{\gamma_1} - a. \quad (4)$$

Durch Anwendung von Druckwandlern, z. B. Membranen oder gewellten Rohren kann bei hohen Drucken die hydraulische Fernmessung mit Niederdruckfernleitungen durchgeführt werden.

Voraussetzung für ein gutes Arbeiten von hydraulischen Meßanlagen ist, daß die Leitungen dicht sind. Dasselbe gilt auch für die pneumatische Fernmessung, die in der Verlegung nach schwer zugänglichen Meßstellen

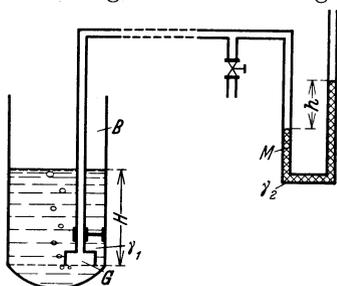


Abb. 3. Pneumatische Flüssigkeitsstand-Fernmessung in offenem Behälter.

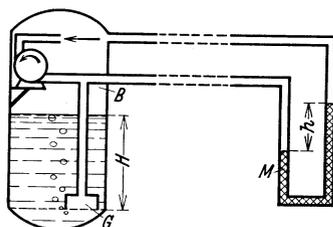


Abb. 4. Pneumatische Flüssigkeitsstand-Fernmessung in geschlossenem Gefäß.

der hydraulischen vorzuziehen ist. Bei dieser arbeitet man stets mit einem neutralen Gas, welches an beliebiger Stelle der Anlage in die Rohrleitung hineingedrückt wird und zu einer unter den Flüssigkeitsspiegel versenkten Glocke führt. Die Glocke ist fest im Flüssigkeitsbehälter eingebaut; ihr unterer Rand ist die Bezugshöhe. Die Druckanzeige- oder Registriergeräte können an beliebiger Stelle der Rohrleitung angeschlossen werden. In Abb. 3 und 4 sind zwei Beispiele pneumatischer Fernmessung dargestellt. Für beide Fälle gilt die Gleichung:

$$H = h \cdot \frac{\gamma_2}{\gamma_1}. \quad (5)$$

c) Elektrische Fernmeßeinrichtungen.

Hierunter sollen elektrische Vorrichtungen mit einem besonderen elektrischen Gebergerät verstanden sein, mit Hilfe dessen eine Meßgröße indirekt auf ein besonderes Empfangsgerät übertragen wird. Diese Einrichtungen gehören zu den wichtigsten meßtechnischen Hilfsmitteln der Betriebsführung. In Tabelle 2, S. 586 f. sind aus der fast unerschöpflichen Mannigfaltigkeit der Ausführungsformen die nach prinzipiellen Gesichtspunkten bekanntesten elektrischen Gebersysteme und die zugehörigen Empfangsgeräte aufgeführt.

Zur Änderung der Skalencharakteristik kann zwischen Geber und Empfangsgerät noch eine besondere Vorrichtung eingeschaltet werden;

dies ist z. B. bei Tachometern und bei vielen Mengennessern üblich. Oft genügt auch ein bloßes Übersetzungsgetriebe, wie z. B. bei Röhrenfedermanometern.

Der Ferngeber darf grundsätzlich keine störende Rückwirkung auf die zu messende Größe haben. Er muß deshalb den jeweiligen Verstellkräften des Meßgerätes angepaßt sein. Eine nachträgliche Anbringung eines Ferngebers erfordert stets eine Neueichung des Meßgerätes.

Bei der Auswahl einer Fernmeßeinrichtung für einen bestimmten Zweck wird man stets bestrebt sein, einem Gebersystem den Vorzug zu geben, das am unabhängigsten von Fehlereinflüssen ist. Unter den Apparaten mit Fremdenergie ist das Kreuzspulmeßwerk besonders beliebt, weil es von Spannungsschwankungen unabhängig ist und wegen hoher Richtkräfte des Systems sehr zuverlässig arbeitet.

Man kann sagen, daß Gleichstromferngeber im allgemeinen häufiger verwandt werden als Wechselstromferngeber. Alle am Wechselstromnetz hängenden Fernmeßeinrichtungen versagen in dem Moment, wenn die Netzspannung ausfällt. Ist es wichtig, daß die Fernmeßanlage ungestört weiterläuft und ist kein getrenntes und besonders gesichertes Signalnetz vorhanden, so wird man sich vorteilhaft für Gleichstrom entscheiden, und zwar kann der Anschluß über eine Pufferbatterie mit Laderegler an das fast überall vorhandene Wechselstromnetz erfolgen.

Die Fernmessung ist besonders wichtig bei Betrieben, die in ihrer Produktion oder Verarbeitung von dem augenblicklichen Betriebszustand eines anderen Betriebes abhängig sind. In der Kraftwirtschaft faßt man alle zur Übersicht des Betriebes notwendigen Fernmessungen in sog. Meßwarten zusammen. Die Übersichtlichkeit wird in schönster Weise durch Leuchtschaltbilder unterstützt.

Als Befehlsgeräte verwendet man die Folgezeigergeräte mit zwei einander gegenüberstehenden Skalen. Die eine Skala stellt den Sollwert dar; der den Istwert angegebende Zeiger der zweiten Skala ist durch Betriebsmaßnahmen auf gleichen Ausschlag einzustellen. Derartige Anzeigegeräte werden auch als Großinstrumente (Leuchtbandgerät von Siemens & Halske) mit Leuchtband an Stelle eines Zeigers ausgeführt.

In engstem Zusammenhang mit der Fernmessung steht die Fernsteuerung. Sie bedient sich derselben Hilfsmittel. Für die oft erheblichen Verstellkräfte der Steuerorgane werden die in Abschnitt G, S. 590f. zu behandelnden Kraftverstärker notwendig.

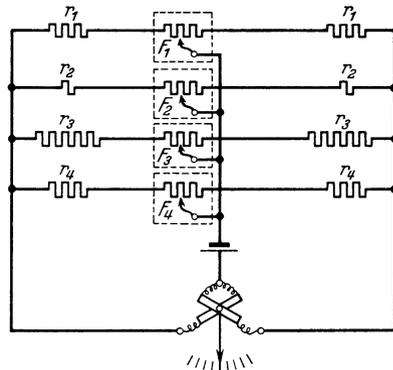


Abb. 5. Summenschaltung mit Brugger'schem Kreuzspulinstrument. Die Vorwiderstände r_1, r_2, r_3, r_4 sind so bemessen, daß der Kombinationswiderstand der Parallelschaltung nur von der Summe der Ausschläge der einzelnen Geber F_1, \dots, F_4 abhängig ist.

Tabelle 2. Indirekte elektrische Fernmeßeinrichtungen.

Gebergerät	Meßgröße	Meßmethode ¹	Empfangsgerät	Kennzeichnende Angaben
a) Für veränderliche Spannungen: Thermoelemente	Temperaturdifferenzen bei Wärmetönungen ² und Heizwertmessungen	Strommessung oder Kompensationsmessung	Drehpuls galvanometer für Ausschlagsmessung, Nullgalvanometer	Bequeme Parallelschaltung von mehreren Empfangsgeräten an verschiedenen Orten; keine Fremdenergie
Mehrfachthermoelemente	Temperaturdifferenzen bei Wärmetönungen ² und Heizwertmessungen	Desgl.	Desgl.	
Strahlungsthermosäulen	Strahlungsenergie bei technischen Analysenapparaten ³	Desgl.	Desgl.	
Photozellen	Technische Analysenapparate, Taupunktmessung ⁴	Desgl.	Desgl.	Mit oder ohne Verstärkung des Photostroms
Galvanische Geber	pH-Wert	Elektrostatistische Spannungs- und Strommessung	Röhrenverstärker mit Drehpuls galvanometer im Anodenkreis	Spezialelektroden ⁵
Transformatorgeber ⁶	Druckdifferenz	Beweglicher Eisenkern in Induktionsspule	Drehpuls galvanometer Voltmeter, Wattmeter, Doppelspuleninstrument oder Wechselstrommengenzähler	Hilfsenergie, Wechselstromanschluß
Tourendynamogeber	Drehzahlen	Geberdynamo für Gleich- oder Wechselstrom, Wirbelstrommessung, Drehpendel	Spannungsmessung	Proportionalität zwischen Drehzahl und Spannungsmessung; bei Gleichstrom sind Drehminn und Vorzeichen der Spannung entsprechend. Auch in Differentialschaltungen verwendbar. Temperatunabhängigkeit
b) Für veränderliche Ohmsche Widerstände: H. & B.-Walzengeber siehe J. Möller; Ztschr. Meß- techn. 6, 151 (1930)	Druck, Menge, beliebige Zeigerstellungen, Kommandogabe	Beliebige Widerstandsmessung	Meist Kreuzspulohmmeter nach Brüger, weil spannungsunabhängig	Lieferanten: B. und S. Schuh, Deufawerke, Th. Horn, Morell, Leipzig
S. & H.-Ringrohrgeber	Desgl.	Spannungsteilerschaltung, Brückenkreuzspul-schaltung	Drehpuls galvanometer, Brückenkreuzspul-instrument ⁷	1 Gebergerät kann Mehrfach-kreise getrennt. Strom-fensender antreiben. Strom-schaltung s. Abb. 5, S. 585 2 Geschlossene Kontakte; 3 4 V Gleichstrom. Kein Übergangswiderstand, spannungsunabhängig

<p>c) Für veränderliche Scheinwiderstände und Phasenwinkel: Keinath¹</p> <p>Veränderliche Selbstinduktion nach Pflüger²</p> <p>Induktionsferngeber der Brown-Instrument Co.</p>	<p>Verschiebungen von 0,01—1 mm</p> <p>Bewegungen bis zu 3 m Hub</p> <p>Mengenmessung und Druckmessung</p>	<p>—</p> <p>—</p> <p>—</p>	<p>Quotientenmesser oder Drosselspulinstrument</p> <p>Desgl.</p> <p>Entsprechend dem Gebergerät</p>	<p>Wechselstromanschluß, spannungsunabhängig, geringe Frequenzabhängigkeit</p> <p>Desgl.</p> <p>Spannungsabhängig, Wechselstromanschluß</p>
<p>d) Veränderliche kapazitive Widerstände: Kondensatoren 0—500 cm</p> <p>Spezialkondensatoren</p>	<p>Z. B. Druck</p> <p>Gunntdickenmessung</p> <p>Feuchtigkeitgehalt von Papier</p> <p>Kleinste Längenänderungen</p> <p>Mengenmessung</p>	<p>Speziialschaltung</p> <p>Brückenschaltung mit Röhrenverstärker</p> <p>Desgl.</p> <p>Desgl.</p> <p>Bornemann³</p>	<p>Wechselstrom-Doppelspulinstrument von H. & B. Siemens-Gummiwaage (Idometer)</p> <p>Papierfeuchtigkeitsmesser von S. & H. Siccometer⁴</p> <p>Gerdiensches Mikrometer⁵</p> <p>Wechselstromzähler</p>	<p>Noch wenig eingeführt</p> <p>Wurzelübertragung durch besondere Ferngebung des Kondensatorbelages</p>
<p>e) Sonstige Ferngeber: Fernsender von J. C. Eckardt</p> <p>System Joedimo der Fa. Bopp & Reuther, Mannheim</p>	<p>Klappen-, Ventile-, Schieber-, Schwimmstellungen</p> <p>Beliebige Zeigerstellungen</p>	<p>Wechselstrom</p> <p>Ferraris-Motor mit Differentialstromspule</p>	<p>Ferraris-System</p> <p>---</p>	<p>Auch für Kommandogabe und Rückmeldung geeignet, Summendifferenzbildung, Multiplikation und Division mit dem Gerät ausführbar</p> <p>Erforderliches Drehmoment von 0,5 cmg.</p> <p>Spannungs- und Frequenzunabhängig.</p> <p>Gehört dem Gebergerät nach zu b)</p>
<p>f) Ausgesprochene Kommandogebler: Spannungsteilersystem von Neufeldt & Kuhnke, Kiel</p> <p>Induktionssystem derselben Firma</p>	<p>Speziell als Kommandoapparat</p> <p>Desgl.</p>	<p>Gleich- und Wechselstrom</p> <p>Für Wechselstrom</p>	<p>Kreuzpulkerät eigener Bauart</p> <p>Entsprechend dem Geberapparat</p>	<p>4 Fernleitungen</p> <p>Kreuzspulen im Geber und Empfänger in gleichartigen Wechselstrommagnetfeldern aufeinanderentwickelt</p> <p>nehmen gleiche Stellung ein.</p> <p>5 Fernleitungen.</p>

¹ Bezüglich der Meßmethode sei auf Jäger, Elektrische Meßtechnik, Leipzig, verwiesen.

² Siehe Wärmetönungsapparat der I. G. Farbenindustrie A.G. S. 671.

³ Siehe Absorptionsschreiber S. 673, Trübungsmesser S. 670.

⁴ Siehe Taupunktzygrometer der I. G. Farbenindustrie A.G. S. 661.

⁵ Siehe S. 672 Antimonelektrode.

⁶ In D.R.P. 369 132 beschriebene, von Ernst und P. Gmelin 1919 entwickelte Fernmeßvorrichtung für Mengenmessung mit Stauorganen; ferner Siemens-Wechselstromferngeber, vgl. H. Lohmann und F. v. Grundherr: Siemens-Ztschr. 10, 37 (1930).

⁷ Jeder Ferngeber enthält drei getrennte Induktionsspulen zum Anschluß drei getrennter Geräte.

⁸ Grüss, H.: Wissenschaftl. Veröffentl. Siemens-Konzern 10, 137 f. (1931).

⁹ Keinath, G.: Die Technik elektrischer Meßgeräte, Bd. 2, S. 315.

¹⁰ Pflüger, P. M.: Siemens-Ztschr. 7, 493 (1927).

¹¹ Vgl. Siemens-Ztschr. 11, 156 u. 267 (1931).

¹² D.R.P. 443 985.

F. Signaleinrichtungen.

Wenn eine Meßgröße einen bestimmten Wert erreicht, über- oder unterschreitet, kann selbsttätig ein Signal ausgelöst werden, je nach Zweck auch mehrere Signale. Irgendeine selbsttätige Einwirkung auf den weiteren Verlauf der Meßgröße durch die Signaleinrichtung erfolgt nicht. Diese dient lediglich dazu, die Bedienung auf den durch das Signal gekennzeichneten Betriebszustand aufmerksam zu machen. Signaleinrichtungen, die unabhängig von Meßgeräten Verwendung finden, liegen in den Kommandoapparaten vor.

Man bedient sich für die Signale sowohl akustischer als auch optischer Einrichtungen; häufig werden beide gleichzeitig verwendet. Man macht dann das akustische Signal abstellbar, während das optische Signal nur durch die Meßgeräte selbst beeinflußt wird und nicht willkürlich abgestellt werden kann. Beispielsweise bleibt ein Lichtsignal solange eingeschaltet, bis der Sauerstoff in einem brennbaren Gasgemisch, das durch einen Analysenapparat fortlaufend untersucht wird, unter die Gefahrgrenze gesunken ist (s. z. B. S. 671). Es ist naheliegend, daß die in der Meßtechnik verwendeten Signale fast ausnahmslos elektrisch ausgelöst werden. Die als Auslösevorrichtungen für das Signal dienenden Kontakte sind sehr vielgestaltig und können hier nur nach ihrem Typus aufgezählt werden. Für akustische Signale verwendet man je nach Zweck Summer, Wecker, Hupen, Sirenen oder Lautsprecher; für optische Signale Fallklappen, Glimmlampen, Glühlampen und beschriftete Leuchtfelder.

Die Signale müssen auffällig sein; die akustischen sollen die stets vorhandenen Betriebsgeräusche deutlich übertönen und die optischen einen möglichst von allen Seiten sichtbaren Aufstellungsort haben. Eine hochentwickelte Abart der optischen Signale sind die bereits erwähnten Leuchtschaltbilder (s. z. B. Firmenkatalog von Siemens & Halske A.G., Berlin).

In der chemischen Industrie sollte man offene Kontakte grundsätzlich vermeiden; damit scheidet man von vornherein eine große Unsicherheit in der Signalgebung aus. In Betrieben, die brennbare Substanzen verarbeiten, müssen offene Kontakte schon wegen Feuer- und Explosionsgefährlichkeit ausscheiden. Die zur selbsttätigen Signalisierung von Gefahren dienenden Einrichtungen, die sog. Alarmeinrichtungen, sind für die Sicherheit eines Werkes und der Belegschaft besonders wichtig und müssen so betriebssicher wie nur möglich ausgeführt werden. Die Art der Kontakte, das Kontaktmaterial und die Isolation müssen den chemischen Einwirkungen der Umgebung angepaßt werden. Fehlalarme müssen unbedingt vermieden werden, weil sonst das Vertrauen in die Zuverlässigkeit der Alarmeinrichtungen mit Recht erschüttert wird. Eine Häufung von Signalen, insbesondere akustischer Signale ist nicht zu empfehlen, weil dadurch die Aufmerksamkeit erlahmt. Aus demselben Grund muß eine zu häufige Kontrolle der Alarmanlagen durch Probealarm vermieden werden.

In Tabelle 3 sind die wichtigsten Signaleinrichtungen und ihre Kennzeichnung angegeben. Ohne weitere Besonderheiten sind die dort

Tabelle 3. Signaleinrichtungen.

Auslösevorrichtung für das Signal	Kennzeichnung	Bemerkungen
a) Direkt schaltende Signaleinrichtungen: Zeigenkontakt	begrenzt den Meßbereich nach oben (Höchstkontakte), nach unten (Niedrigstkontakte)	Nur bei großen Drehmomenten anwendbar (nicht zu empfehlen bei Drehpulsinstrumenten), Kontaktdruck und damit Schaltleistung nicht sehr hoch
Quecksilbertauchkontakt a) offen	Metall- oder Graphitstift taucht in Quecksilber	Verschmutzungs- und Oxydationsgefahr. Funkenbildung bei Gegenwart brennbarer Gase oder Dämpfe gefährlich
β) geschlossen	Kippkontakt: durch kleine Drehbewegungen wird Quecksilber in evakuiertem Glasrohr so bewegt, daß die Einsmelzdrähte dauernd unter Quecksilber und Stromschluß von Quecksilber zu Quecksilber erfolgt Ringrohrkontakt: für große Drehbewegungen geeignet als Streckenkontakt	Keine offenen Funken. Durch Quarz oder Chamottkörper wird der Funke von der Glaswand ferngehalten. Sehr große Belastbarkeit und Lebensdauer
Bimetallkontakt	Mechanischer Vakuumkontakt von Siemens-Schuckertwerke Wärmegesteuerter Quecksilberkontakt von W. C. Heraeus	Günstiger Massenausgleich, daher auch bei kleineren Drehmomenten, wie Röhrenfedern, ohne Verzerrung der Eichskala verwendbar. Kleine Schaltleistung
Schleifkontakt	2 Metallstreifen mit verschiedenem Ausdehnungskoeffizienten krümmen sich und betätigen einen Anschlagkontakt, der offen oder geschlossen sein kann Zwei aufeinander durch Federkraft schleifende Flächen	Zeichnet sich durch außerordentlich kleine Schaltzeit aus Für elektrische Öfen, z. B. als Stromverbrauchsregler ¹ Z. B. Birkaregler. Durch Kunstgriff wird ein momentanes Abreißen erreicht
b) Signaleinrichtungen mit Impulsverstärker: Andrückkontakt ²	Hilfswicklung gibt Gleichstromimpuls. Kontakt bleibt geschlossen, bis er durch Druckknopf unterbrochen wird. Ersatz für Halterelais	Nur bei großen Kräften anwendbar. Chemischer Angriff und Verschmutzungsgefahr
c) Signaleinrichtungen mit Kraftverstärker: Systeme mit Arbeitsstrom	Im Normalzustand sind die Kontakte stromlos. Der Schaltimpuls rückt auch den zweiten Stromkreis des Kraftverstärkers	Für Drehpulsysteme anwendbar; auch für Kreuzpulsgerate, Schaltleistung 0,4 VA
Systeme mit Ruhestrom	Im Normalzustand ist der erste Stromkreis geschlossen, der zweite Stromkreis offen. Durch Unterbrechung des ersten wird der zweite geschlossen	Z. B. Fallbügelkontakt-Instrumente ³ . Das Zeigerspiel der Fallbügelinstrumente wird durch den Kontakt nicht begrenzt. Ausführung als Höchst-, Niedrigst- und Streckenkontakt. Antrieb durch Uhrwerk oder Synchronmotor. Kontakte von außen verstellbar.
Systeme für Richtungswechsel Nachlaufsysteme Wählensysteme	Polarisierte Relais Für Kommandoapparate ⁴ Wie bei automatischen Telephoneinrichtungen	das Signal über geeignete Relais eingeschaltet Höhere Betriebssicherheit als beim Arbeitsstromsystem Je nach Richtung werden zwei verschiedene Schaltorgane betätigt

¹ Siehe Firmenkatalog W. C. Heraeus, Hanau. ² Siehe Firmenkatalog von Hartmann & Braun.
³ Siehe Firmenkataloge von Hartmann & Braun A. G., Frankfurt und Siemens & Halske A. G., Berlin. Eine Abart ist der sog. Temperaturwächter der Firma Hartmann & Braun. Der Fallbügel ist durch einen motorgetriebenen Steigrahmen ersetzt; dieser beträgt je nach Zeigerstellung Quecksilberkippkontakte. Siehe auch H. & B.-Temperaturregler S. 607.
⁴ Z. B. Kommandoapparat der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft (AEG.) und Zeigerfeuermelder von Siemens & Halske.

erwähnten Auslösevorrichtungen für Signale auch verwendbar für die Synchronisierung von Wechselstromgeneratoren bei dem sog. „Synchronlaufsystem“.

G. Regeleinrichtungen.

Die Regeleinrichtungen stellen eine konsequente Weiterentwicklung der Signaleinrichtungen dar in dem Sinne, daß die in Tabelle 3, S. 589 erwähnten Auslösevorrichtungen nicht zur Betätigung eines Signals, sondern eines Arbeitsvorganges dienen, der auf die zeitliche Konstanz oder Änderung der den Kontakt auslösenden Meßgröße von Einfluß ist. In vielen Fällen werden zur Regelung auch mechanische Auslösevorrichtungen verwendet. Besonders wichtige Beispiele von Regeleinrichtungen werden an geeigneter Stelle in den späteren Kapiteln erläutert. Es soll hier nur ein Überblick über die Grundlagen der Regeltechnik und ihrer Hilfsmittel gegeben werden.

Auf eine theoretische Behandlung des Reglerproblems kann hier nicht eingegangen werden. Ansätze zu einer allgemeinen Theorie sind von Neumann und Wünsch [Arch. Eisenhüttenwes. 1932, 13] gegeben worden. Die Entwicklung des Reglergebietes ist jedoch noch zu sehr im Fluß, als daß schon eine abgeschlossene Systematik der Regeleinrichtungen vorliegen könnte.

Zur Einführung soll bemerkt werden, daß die Regelung dazu berufen ist, eine noch wichtigere Rolle zu spielen als das Messen selbst. Sie erhöht den Wirkungsgrad chemischer Verfahren und bei richtiger Anwendung auch die Betriebssicherheit und Lebensdauer der Anlage und der Maschinen. Außerdem wird die Qualität der erzeugten Produkte verbessert. Man sollte überall da, wo eine große Sicherheit der Regelvorgänge zu erzielen ist, erwägen, ob und in welcher Zeit sich eine selbsttätige Regeleinrichtung bezahlt macht.

1. Kraftverstärker.

Während bei der Betätigung von Signaleinrichtungen im allgemeinen keine großen Arbeitsleistungen erforderlich sind, müssen bei Regeleinrichtungen mitunter ganz erhebliche Kräfte aufgewandt werden. Man kann wohl sagen, daß in technischen Betrieben nur in Ausnahmefällen ein Meßgerät so große Verstellkräfte erzeugt, daß man ein Regelorgan direkt damit antreiben kann. Nur sehr robuste Meßgeräte, wie Schwimmer, Gasometerhauben oder Tauchglocken kommen dafür in Betracht (s. Abschnitt III, S. 627). Bei Feinmeßgeräten mit hoher Meßgenauigkeit werden Kraftverstärker benützt, teilweise auch schon in der eigentlichen Meßtechnik, unabhängig von Regelzwecken, wie bei kolorimetrischen Messungen mit Photozellen oder mit Selen-Widerstandszellen (vgl. I. G.-Titrierautomat, Abschnitt VII C, S. 670).

Mitunter ist es erwünscht, von einer einzigen Meßvorrichtung aus gleichzeitig oder in gewissen Zeitfolgen mehrere Zeitimpulse auszulösen. Das Meßgerät dient dann nur als Steuerorgan für besondere Hilfskräfte.

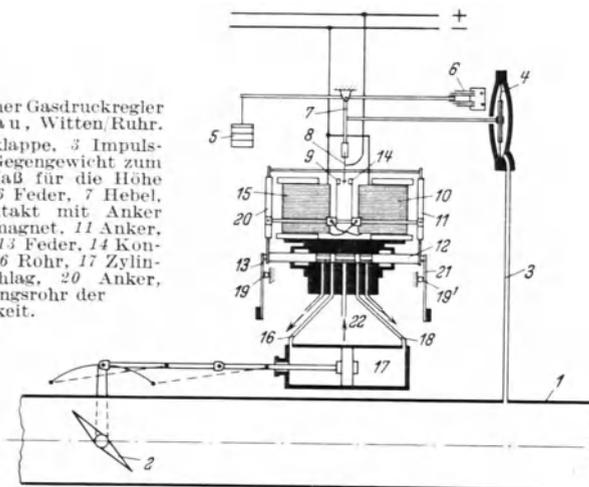
Tabello 4. Kraftverstärker.

Type	Kennzeichnung	Bemerkungen
a) mechanische Kraftverstärker: Hebelmechanismen Membranen Kraftzylinder (Servomotor)	Hebelgesetz Kraft = Druck x Fläche doppelseitig wirkender Kolben für Flüssigkeit, seltener Gase als Druckmittel	Gewichtbelastete Ventile als Druckregler, z. B. Abb. 185, S. 812. Mittler für direkte Regelung ausreicend; 1 mm WS erzeugt auf Membran von 300 mm Durchmesser 70 g mit Druckwasser: Biathroregler der Blauwerke, Menseburg, Arcaregler der Arcaregler A. G., Berlin; mit Drucköl: ICE-Niederdruckregler, Bauart Thoma der Fa. I. C. Eckardt A. G., Spitzart-Cannstatt, Araregler der Fa. Schumann, Leipzig; hydraulischer Reinekerregler, Askania-Strahlrohrregler (Druckwandler); mit Druckluft: Regler für Temperatur, Druck, Feuchtigkeit (1 at) der Gesellschaft für selbsttätige Temperaturregelung G. m. b. H., Berlin, auch ICE-Regler
b) direkte elektrische Kraftverstärker: Motoren als Hilfskraft	Ein- und Ausschaltung durch besondere Steuervorrichtungen Die Schaltleistung, hängt von der Konstruktion ab (s. unter c)	Reineke-Regler (s. Kap. IX B, S. 820). Regelbare Motoren für Gebläse Insbesondere in der Kesselregelung ausgiebig verwendet s. Kap. IX B, S. 824, Abb. 197.
c) elektrische Zwischenverstärker (Relais): a) elektrodynamische elektromagnetische Relais polarisierte Relais Drehspulrelais Ferrarisrelais Motorrelais β) rein elektrische: Elektronenrelais Glimmerrelais ¹ Photorelais ²	eine mechanische Bewegung auslösend stromdurchflossene Spule mit Weich-eisenkern und drehbarem Anker, schaltet Hilfsstrom mit permanentem Magnetfeld für Gleichstrom mit permanentem Magnetfeld; für Wechselstrom ähnlich den Elektrodynamometern Das Induktionsfeld eines Elektromagneten in einer Metallscheibe erzeugt ein Drehmoment mit durch Motorkraft angetriebenen Lautwerken Verwendung von Elektronenröhren ¹ Verwendung von Glimmröhren Verwendung von lichtelektrischen Zellen ³	Beispiele: Klappankerrelais 0,2 W Erregerleistung und 10 W Schaltleistung bei 60 V. Drehanke-relais. Tauchankerrelais Telegraphenrelais mit nur 0,01 bis 0,05 W Erregerleistung und 10 W bei 60 V Schaltleistung. Besonders für Differenzschaltungen. Zungenrelais Beispiele: Fallbügelrelais der Firmen Hartmann & Braun A. G., Frankfurt a. M. und Siemens & Halske A. G., Berlin, als sog. „Temperatur-regler“ oder als Doppelfallbügelregler für Kesselregelung von Siemens & Halske Überstromzeitrelais, Frequenzrelais, Scheinwiderstands- (Impedanz-) Relais, Energierichtungsrelais Der Motor kann auch durch ein Uhrwerk ersetzt werden Wechselstrom- und neuerdings auch Gleichstromverstärker Lieferfirma: Otto Preßler, Leipzig Vorteil: Trägheitsloses Arbeiten, jedoch nur mit Röhrenverstärkern verwendbar

¹ Barthausen, H.: Elektronenröhren. Leipzig 1929.
² Richter, H. u. H. Geffcken: Ztschr. techn. Physik 7, 601 (1926).
³ Kallum-, Natrium-, Cäsium-Zellen der Firma Otto Preßler, Leipzig, ferner Kupferoxydul-Photozellen.

Im besonderen kann über elektrische Kontakte ein Elektromotor ein- oder ausgeschaltet werden. Da die elektrischen Kontakte nur begrenzte Schaltleistungen haben, so müssen zwischen Kontakten und Motor passende Relais [R. Rüdberg: Relais und Schutzschaltungen in elektrischen Kraftwerken und -Netzen. Berlin 1929; ferner: Die Relaissteuerungen der modernen Starkstromtechnik. Berlin 1931] oder Schütze geschaltet werden, letztere als selbständige Schaltorgane. Man unterscheidet rasch schaltende und Verzögerungsrelais, die je nach Zweck auf eine bestimmte Verzögerung eingestellt werden können.

Abb. 6. Elektrohydraulischer Gasdruckregler der Firma Apparatebau, Witten/Ruhr.
 1 Gasleitung, 2 Drosselklappe, 3 Impulsleitung, 4 Membran, 5 Gegengewicht zum Membrandruck ist ein Maß für die Höhe des geregelten Druckes, 6 Feder, 7 Hebel, 8 Kontaktzunge, 9 Kontakt mit Anker, 11 verbunden, 10 Elektromagnet, 11 Anker, 12 Doppelkolbenschieber, 13 Feder, 14 Kontakt, 15 Elektromagnet, 16 Rohr, 17 Zylinder, 18 Rohr, 19 Anschlag, 20 Anker, 21 Feder, 22 Zuleitungsrohr der Druckflüssigkeit.



Durch Hintereinanderschaltung von Verstärkern können beliebig große Schaltleistungen erzielt werden.

In Tabelle 4 sind die verschiedenen Arten von Kraftverstärkern zusammengestellt. Außerdem sind kombinierte Verstärker bekannt, z. B. in dem elektrohydraulischen Regler von Sennlaub und Lampmann (hergestellt durch die Firma Apparatebau, Witten/Ruhr), der über eine federbelastete Membran einen elektrischen Kontakt betätigt und damit eine Klappe oder ein Ventil elektromagnetisch steuert (s. Abb. 6).

2. Regelorgane.

Sämtliche Regelorgane, mit denen der Chemie-Ingenieur (unter Chemie-Ingenieuren sollen alle in der chemischen Industrie tätigen Maschineningenieure, Elektroingenieure und technischen Physiker verstanden sein) zu tun hat, dienen letzten Endes dazu, einen Mengenstrom zu ändern. Tabelle 6 gibt eine Übersicht über die wichtigsten Typen von Regelorganen. Es ist ohne weiteres ersichtlich, daß es sich um längst bekannte Einrichtungen handelt, deren Ausführungsformen für Spezialzwecke jedoch mit der Entwicklung der Industrie immer mannigfaltiger geworden sind. Ihre systematische Einteilung und Beschreibung nach den zu regelnden Medien würde den Raum dieser Darstellung weit überschreiten.

Tabelle 5. Regelorgane.

Bezeichnung des Organs	Verwendungszweck	Bemerkungen
a) Klappen: mit festem Sitz durchschlagende	Explosionsklappen, Über- oder Unterdrucksicherungen, Rückschlagsicherungen für Flüssigkeiten, Gase und Dämpfe zum Drosseln von Mengenströmen	Größe etwa gleich Leitungsquerschnitt schwer abzudichten
b) Schieber: (Blenden)	für Flüssigkeiten, Gase und Dämpfe bei niederen bis zu hohen Drucken	besonders für große Rohrdurchmesser
c) Kolbenschieber:	besonders für Dampf und Flüssigkeiten bei mittleren und hohen Drucken	z. B. Copes-Regelventil der Deutschen Evaporator A.G., Berlin
d) Ventile: Einsitzventile Doppelsitzventile	} für Zufluß und Abfluß von flüssigen und gasförmigen Medien bis zu den höchsten Drucken	Man unterscheidet je nach dem Sitz: Nadel-, Kegel-, Teller-, Kugelventile. Doppelsitzventile sind schwieriger dicht zu halten
e) elektrische Widerstände	bei elektrischer Hilfskraft	—
f) Elektromotoren oder andere Kraftmaschinen	sehr mannigfaltig	—
g) Rückführungseinrichtungen: α) Hebelmechanismen oder Seilzüge β) hydraulische Kupplung (Olkatarakt) γ) Isodrom-Rückführung der Siemens-Schuckert-Werke	zur Stabilisierung des Regelvorganges zur starren Rückführung für einstellbare, nachgiebige Rückführung In der Turbinentechnik üblich, auf Temperatur- und Druckregler übertragen	bei Geschwindigkeitsreglern bei mechanischen oder elektrischen Reglern verwendbar Ein Nachdrehtmotor läuft synchron mit dem das Regelorgan (Ventil) steuernden Motor und öffnet die Kontakte des Steuerwerks, die selbsttätig auf Nulllage zurückgeben
h) Programm-Geber:	s. Programmregler (Tabelle 6, S. 595), insbesondere für Temperaturregler	Feder- oder motorangetriebenes Uhrwerk verstellt nach festliegendem Programm eine Meßgröße, auf die eingestellt wird
i) Zeit-Schritt-Geber:	s. Zeit-Schritt-Regler (S. 596)	Feder- oder motorangetriebenes Uhrwerk treibt ein Kontaktrah, auf dem die Schrittfrequenz durch die Nockendrehzahl, die Schrittlänge durch die Nockenbreite eingestellt ist

Ausführliche Darstellungen finden sich bei Th. Stein: Regelung und Ausgleich in Dampfanlagen. Berlin 1926; ferner in G. Wunsch: Regler für Druck und Menge. München und Berlin 1930 und P. Gmelin in „Chemie-Ingenieur“, Bd. II/1, S. 135f.

Als Grundforderung muß für alle Regelorgane aufgestellt werden, daß sie eine möglichst geringe Trägheit besitzen, denn je träger ein Regelorgan ist, um so mehr wird der damit ausgerüstete Regler zu Pendelungen neigen. Ferner muß jedes Regelorgan der Druckhöhe des Mediums, seiner Temperatur und seiner chemischen Beschaffenheit angepaßt sein und nicht zuletzt den Mengen, die geregelt werden sollen.

Für Drosselorgane strömender Medien gilt stets die Beziehung:

$$\Delta h \sim \frac{\gamma}{2g} (v_2^2 - v_1^2), \quad (5)$$

wo v_1 die Geschwindigkeit des Mediums vor dem Drosselorgan, v_2 die Geschwindigkeit in demselben, $\frac{\gamma}{g}$ die Dichte des Mediums und Δh das Druckgefälle in dem Drosselorgan bedeuten. Es muß also grundsätzlich mit einem Druckverlust im Drosselorgan gerechnet werden. Aus der Gleichung geht hervor, daß auch die strömenden Mengen und das Druckgefälle gesetzmäßig verkettet sind. In einer großen Zahl von Fällen gelingt es, die Arbeit der Verstellung eines Regelorgans über geeignete Kraftverstärker durch das zu regelnde Medium selbst leisten zu lassen. In anderen Fällen, z. B. bei sehr kleinen Mengen oder sehr hohen Drucken und entsprechend hohen Reibungskräften, muß eine Hilfskraft die Verstellarbeit im Regelorgan leisten.

Als Regelorgane sind ferner alle Vorrichtungen zur Stabilisierung des Regelvorgangs anzusprechen. Hier sind zu nennen die sog. Rückführungen: Es sind dies Vorrichtungen zwischen dem Impulsgeber und dem Stellmotor, die derart wirken, daß die vom Regler erzeugte Veränderung der zu regelnden Größe selbsttätig die Regelbewegung des Steuerorgans abbremst. Ein sehr elegantes Hilfsmittel dieser Art stellt das aus Tabelle 2, S. 586 bekannte, für elektrische Fernmessungen viel verwendete Siemens-Ringrohr in Brückenschaltungen und in Verbindung mit dem Brückenrelais dar. Ferner sind zu nennen die Geber für die sog. Programmregler und für das Zeit-Schritt-Regelverfahren (s. Tabelle 5, Abs. i, S. 593).

3. Regler-Gruppen.

Die verschiedenen Regelverfahren sind im Laufe der Jahre meist von Apparatebaufirmen, in selteneren Fällen vom Benutzer selbst entwickelt worden. Es ist daher verständlich, daß eine Herstellerfirma vorwiegend mechanische Regler, eine andere vorwiegend elektrische Regler baut. Die Entscheidung, welcher Regler für eine bestimmte Regelaufgabe am geeignetsten ist, erfordert eine sehr genaue Kenntnis der Betriebsbedingungen. Es ist Sache des Benutzers, die Vor- und Nachteile der einzelnen Regelmethoden in jedem Fall gegeneinander abzuwägen und wenn nötig, Neukonstruktionen zu schaffen. Jede Regel-

anlage muß zunächst richtig projiziert werden und kann nicht wie ein normiertes Meßgerät einfach übernommen werden. In der Hand des Betriebsführers ist ein Regler ein Feinwerkzeug ganz besonderer Art. Er nimmt dem Arbeiter an der Maschine oder an der technischen Apparatur mechanische Arbeit ab und macht seine Aufmerksamkeit frei für die Beobachtung und Bedienung des Betriebes im höheren Sinne als bisher. Was für jedes Werkzeug gilt, nämlich daß es richtig angewandt sein muß, das gilt im besonderen für alle Regelrichtungen.

Man kann die Regler nach ihrem Zweck in drei große Gruppen einteilen (s. Tabelle 6), unabhängig davon, welche Hilfsmittel benutzt werden, auch unabhängig davon, ob man eine Haupt- oder eine Nebenschlußregelung anwendet. Die Gruppe der Folgeregler umfaßt die komplizierteren Regelanlagen mit primären und sekundären Regelkreisen, für die im Abschnitt IX B, S. 825f. einige Beispiele gegeben sind. Sie werden sinngemäß auch als Berichtigungsregler bezeichnet.

4. Regel-Methoden.

In diesem Abschnitt sollen die Regler in ihrer methodischen Verschiedenheit gekennzeichnet werden. Von den sog. halb-

Tabelle 6. Reglergruppen.

		Anwendungsgebiete	Bemerkungen
a) Auf-Zu-Regler		Temperaturregelung elektrisch mit Dampf- oder mit Heiz- bzw. Kühlflüssigkeit	Abweichungen vom Sollwert öffnen oder schließen das Regelorgan
b) Mehr-Weniger-Regler: a) Festwert-Regler β) Programm-Regler γ) Verhältnis-Regler für konstantes Verhältnis d) Verhältnis-Regler für veränderliches (abhängiges) Verhältnis		Druck-, Temperatur-, Mengenregelung Desgl. hauptsächlich Temperaturregelung (Gummiindustrie, Metallveredlung), auch Mengenregelung Gemischregler für Komponenten fester Zusammensetzung Gemisch- und Mengenregler veränderlicher oder abhängiger Zusammensetzung	Abweichungen vom Sollwert verändern die Öffnung des Regelorgans (daher auch der Begriff der Grenzregelung). Der Sollwert ist konstant. Der Sollwert ist in vorgeschriebener Weise mit der Zeit veränderlich Beispiele: 1. Zwei reine Gase oder Gase konstanter Zusammensetzung sollen in festem (stöchiometrischem) Verhältnis gemischt werden. 2. Mischung flüssiger oder fester Medien in festem Verhältnis. Beispiele: 1. Ein veränderliches (N ₂ + H ₂)-Gemisch soll mit N ₂ auf einen bestimmten höheren N ₂ -Gehalt gebracht werden. 2. Bei einer Gasfeuerung soll Brennstoffmenge und Luftzufuhr so geregelt werden, daß der Heizwert des Gases berücksichtigt wird
c) Folge-Regler: α) 2 veränderliche Regelgrößen β) 3 veränderliche Regelgrößen		Dampfesselregelung, auch auf chemische Reaktionen übertragbar Desgl. Desgl.	Mehrere veränderliche, voneinander abhängige Größen sollen in Abhängigkeit von anderen Größen oder in gegenseitiger Abhängigkeit voneinander geregelt werden

automatischen Reglern soll hier nicht die Rede sein. Es sei nur erwähnt, daß man zur Kontrolle der Regeleinrichtungen diese stets so ausführt, daß man auch von Hand die einzelnen Reglerfunktionen willkürlich auslösen kann. Im allgemeinen wollen wir unter Reglern vollautomatische Einrichtungen verstehen. Man unterscheidet Regler ohne Hilfskraft und Regler mit Hilfskraft. Zu ersteren gehören die Druckregler, die mit gewichtsbelasteten Glocken, Schwimmern oder Membranen arbeiten, ferner Sicherheits- und Überströmventile, Überlaufregler für Flüssigkeiten und Tauchregler für Gase. Wegen seiner Einfachheit besonders erwähnt zu werden verdient der als Mariottesches Gefäß (Abb. 7) bekannte Tauchregler,

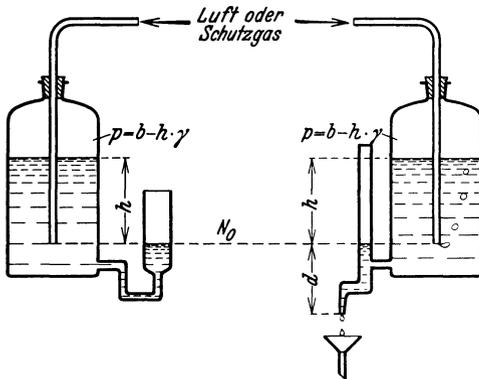


Abb. 7. Mariottesches Gefäß
als Niveauregler N_0 const.,
unabhängig vom Flüssigkeitsstand h .
als Druckdifferenzregler
 d const.,

der bei physikalischen Analysenverfahren sehr häufig Verwendung findet. Auch die Temperatur-Ausdehnungsregler erfordern häufig keine Hilfskräfte, da die durch Temperaturexpansion erzeugten Kräfte außerordentlich groß sind.

In der Regeltechnik werden eine Reihe von Kunstgriffen angewandt, um den im Regelsystem selbst zu suchenden Störungen, wie Trägheit und Reibungskräfte und den störenden Fremdeinflüssen, wie Spannungs- und Druckschwankungen im

Netz zu entgehen und die für den Betrieb erforderliche Stabilität des Regelvorgangs zu erreichen. Ein solcher Kunstgriff zur Vermeidung von Überregelungen ist die schon erwähnte Rückführung.

Von großer Wichtigkeit für alle Reglervorgänge ist die Dämpfung. Die Reibung in den Übertragungsorganen wird durch Flüssigkeitsbremsen (Ölkatarakt) künstlich verstärkt. Es muß auf alle Fälle vermieden werden, daß zwischen Regelfrequenz und Eigenschwingung des Regelorgans Resonanz und gefährliche Pendelungen oder Aufschaukelungsvorgänge auftreten.

Ein anderer Kunstgriff besteht in der schrittweisen Regelung. Durch eine Hilfseinrichtung, die mit Uhrwerks- oder Motorantrieb läuft, werden mehr oder minder große Regelstöße ausgelöst. Durch geeignete Wahl der Schrittfrequenz und der Schrittlänge paßt man die Regelorgane der jeweiligen Trägheit des Systems an. Sehr empfehlenswert für eine sehr rasche Regelung ist eine Unterteilung in Grob- und Feinregelung. Die Grobregelung läßt man mit großen Regelschritten und kleiner Frequenz, die Feinregelung mit kleinen Regelschritten und höherer Frequenz arbeiten. Eine andere Lösung verwendet das Brückenrelais von Siemens & Halske, indem es die Schrittlänge proportional den Abweichungen vom Sollwert macht.

II. Temperaturmessung¹.

A. Grundlagen der Temperaturmessung.

Die als gesetzliche Grundlage für die Temperaturmessung geltende thermodynamische Temperaturskala [s. F. Henning: Die Grundlagen, Methoden und Ergebnisse der Temperaturmessung. Braunschweig

Tabelle 7. Temperaturfixpunkte (s. Wärmetabellen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt).

Fixpunkt	Temp. in °C	Fixpunkt	Temp. in °C
Siedepunkt des O ₂ bei 760 mm Hg	— 183,00	Schmelzpunkt des Cd	320,9
Sublimationspunkt des CO ₂ bei 760 mm Hg	— 78,50	Schmelzpunkt des Pb	327,4
Schmelzpunkt des Hg	— 38,87	Schmelzpunkt des Zn	419,4
Schmelzpunkt des Eisens	0,00	Siedepunkt des S	444,6
Siedepunkt des Wassers bei 760 mm Hg	100,00	Schmelzpunkt des Sb	630,0
Schmelzpunkt des Sn	231,84	Erstarrungspunkt des Ag	960,5
Schmelzpunkt des Bi	271,0	Schmelzpunkt des Au	1063
		Schmelzpunkt des Cu	1083
		Schmelzpunkt des Pd	1557
		Schmelzpunkt des Pt	1764

1915] (Grad Kelvin) stimmt mit der Skala eines idealen Gasthermometers überein. Nach den Prüfungsbestimmungen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt [Zbl. für das Deutsche Reich (1909),

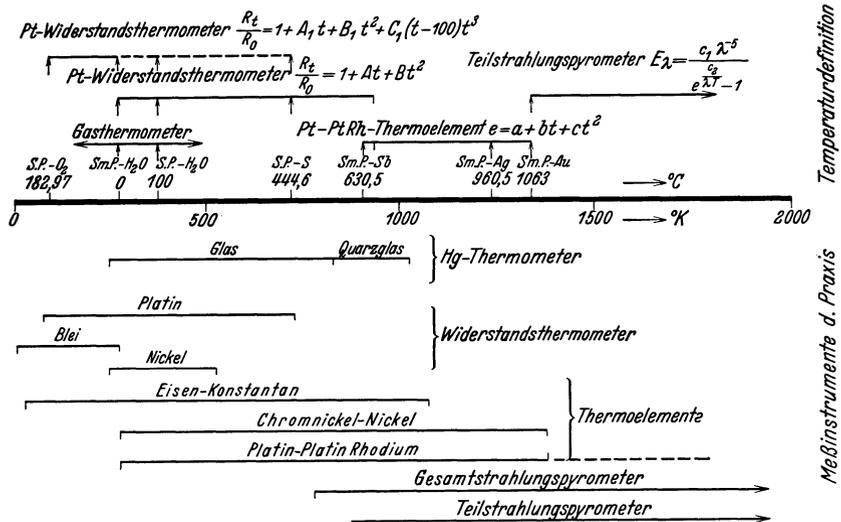


Abb. 8. Temperaturdefinition und Verwendungsbereiche der Temperaturmeßgeräte.

S. 193] sind alle Thermometer nach dieser Skala, bei Einhaltung bestimmter Fehlergrenzen eichfähig. Zur praktischen Verwirklichung zuverlässiger Fixpunkte für die gesetzliche Temperaturskala verwendet

¹ Bearbeitet von Dr. A. Ernst, Ludwigshafen a. Rh.

Tabelle 8. Technische Thermometertypen.

Typ	Kennzeichnung	Meßbereich und Genauigkeit in %	Bemerkungen
Gas thermometer	Abgesperrtes Gasvolumen: $V_t = V_0 (1 + \alpha t)$ für $p = \text{const}$ oder $p_t = p_0 (1 + \alpha t)$ für $V = \text{const}$; α rund $\frac{1}{273}$	praktisch nicht für hohe Temperaturen	Unhandlich und schwer transportabel, zur Selbsthilfe jedoch vorübergehend sehr brauchbar, mit Volumen- oder Druckregistrierung; Eichung empirisch
Flüssigkeitsthermometer	Quecksilberstahlthermometer Membrangekapselte Flüssigkeitsthermometer mit z. B. $\left. \begin{array}{l} \text{Petroleum} \\ \text{Toluol} \\ \text{Pentan} \end{array} \right\}$ wasserfrei	meist zwischen -30 und etwa $+500^\circ \text{C} \pm 1\%$ im allgemeinen nicht über 100°C	Bei größeren (bis 50 m) Fernleitungen (Kapillaren) ist eine Kompensationsleitung nötig, sonst erhebliche Fehler durch die Umgebungstemperatur Registrierung mit Hebelmechanismus, deshalb keine Fernleitung, beliebige Ausführung als Winkelthermograph
Dampfdruckthermometer	mit leicht siedenden, Flüssigkeiten (Äther, Aceton) und schwer siedenden als Spermflüssigkeit zum Druckmeßgerät mit Quecksilber	für niedrigere Temperaturen	Von Ernst in der I. G. Farbenindustrie A. G. 1921 für Sonderzwecke gebaut
Bimetallthermometer	2 Metalle mit stark verschiedenem Temperaturkoeffizienten	für Temperaturen bis 700° bzw. 800°C niedere und mittlere Temperaturen	Cambridge Instrument Company Ltd., London [Engin. 136, 680 (1933)] Koaxiale Anordnung (Stab in Rohr) bei Wärmeschränken von W. C. Heraeus; aufeinandergewalzt als Streifen, der sich durchbiegt, oder Spirale oder Wendel für Drehbewegungen. Sehr beliebt als Temperaturregler
Thermoelemente	2 thermoelektrisch verschiedene Metalle verlotet, die freien Enden mit Fernleitungsdrähten an Millivoltmeter angeschlossen Temperaturdifferenzmesser	mit unedlen Metallen bis $1200^\circ \text{C} \pm 1\%$ mit Edelmetallen bis $1700^\circ \text{C} \pm 0,5\%$	s. Tabelle der Thermokräfte (Tab. 9, S. 602) Strommessung mit Millivoltmeter, statische Messung mit Kompensograph
Widerstandsthermometer	Temperaturkoeffizient der elektrischen Leitfähigkeit reiner Metalle, besonders Platin, auch Nickel und Kupfer oder Eisen und Blei für tiefe Temperaturen	bis 500°C ; beliebige enge Meßbereiche, höhere Meßgenauigkeit	Vorwendung von spannungsabhängigen Brückenschaltungen, spannungsunabhängigen Kreuzspul- oder Brückenkreuzspulgeräten
Strahlungspyrometer	Messung der Gesamtstrahlung thermoelektrisch mit Vakuum-Thermoelement oder Thermosäule	für Temperaturen von 600°C ab	Ardometer von Siemens & Halske A. G., Berlin Pyrradio von Hartmann & Braun A. G., Frankfurt a. M., Pyrom. Schreiber von Dr. F. Hase, Hannover

man Schmelz- und Erstarrungspunkte von Metallen, Siedepunkte von Flüssigkeiten und Sublimationspunkte. Tabelle 7, S. 597 enthält die wichtigsten Temperaturfixpunkte und Abb. 8 eine Darstellung der Temperaturdefinition und der Verwendungsbereiche der Temperaturmeßgeräte.

B. Technische Temperaturmeßverfahren.

Wie in Kapitel I, S. 573 erwähnt, sollen hier nur objektive Meßverfahren beschrieben werden. Aus diesem Grunde liegen die für Kontrollzwecke noch sehr viel verwendeten Glas-Quecksilberthermometer außerhalb unserer Betrachtung. In Tabelle 8 sind die verschiedenen Thermometertypen aufgeführt. Die von einem Thermometer angezeigte Temperatur nähert sich der tatsächlichen nach einer Exponentialfunktion, wie Gleichung (6) ausdrückt:

$$t_e - t_T = e^{-\frac{z}{\alpha}} (t_e - t_{T_a}). \quad (6)$$

Hierin bedeutet: t_e die tatsächliche Temperatur des umgebenden Mediums, t_T die vom Thermometer angezeigte Temperatur, t_{T_a} die Ausgangstemperatur des Thermometers, z die Zeit und α den Trägheitsbeiwert des Thermometers. $t_e - t_T$ nennt man die Konvergenztemperatur. Der Trägheitsbeiwert von allen Thermometern muß möglichst klein gehalten werden.

Als die vollkommensten technischen Thermometer müssen die Thermolemente und die Widerstandsthermometer angesehen werden.

1. Thermolemente.

Die thermoelektrische Messung ist eine Temperaturdifferenzmessung. Die wirkliche Temperatur ist gleich der Temperatur der kalten Lötstellen, vermehrt um die Temperaturdifferenz zwischen warmer und kalter Lötstelle. Die Thermolemente haben den großen Vorteil, daß sie, sofern die Messung, die in den meisten Fällen mit Drehspulgeräten nach der Strommeßmethode erfolgt, keine Hilfsenergie benötigen. Ferner kann der Temperaturfühler beliebig fein oder beliebig robust ausgeführt werden. Die Zusammenfassung mehrerer Meßstellen an einem Mehrfachschreiber ist besonders beliebt (s. Firmenkataloge von Hartmann & Braun A.G., Frankfurt a. M. und Siemens & Halske A.G., Berlin). Hierbei ist man nicht gezwungen, nur gleichartige Thermolemente zu verwenden; es ist nur Voraussetzung, daß die Fernleitungen doppelpolig verlegt werden, was in allen chemischen Betrieben zu empfehlen ist. Man kann auch an einem Mehrfachschreiber teils Thermolemente, teils Widerstandsthermometer in Brückenschaltung anschließen. Bei gemeinsamer Rückleitung verschiedener Elemente treten besonders in feuchten Betrieben galvanische Effekte und Kontaktpotentiale auf, die eine Messung unmöglich machen können. Sorgfältige Gummiisolation der Fernleitungsdrähte, an sehr heißen Stellen Asbestisolation und Verlegung in Porzellanrohren sind notwendig. In der Praxis haben sich Thermolemente sehr bewährt, deren einer Schenkel als dünne Kapillare

ausgebildet ist und gleichzeitig als Schutzrohr für den mit Porzellan isolierten 2. Schenkel in Drahtform dient. Wo ein chemischer Angriff der Thermoelemente zu fürchten ist, müssen entweder keramische Schutzrohre oder Rohre aus widerstandsfähigen Metallegierungen verwendet werden; z. B. schützt alitiertes (s. S. 547) Flußeisenrohr bis 900°C gegen Schwefel, Kruppsches NCT-3-Material, ebenfalls alitiert, ist in Gegenwart von Schwefel bis 1200°C im Dauerbetrieb verwendbar. Über die elektrischen Meßgeräte vgl. G. Keinath: Elektrische Temperaturmeßgeräte. München und Berlin 1923. In Abb. 9 sind die beiden wichtigsten Schaltungsarten für Thermoelemente dargestellt. Prinzipiell ist hierzu zu bemerken, daß bei Stromentnahme aus einem

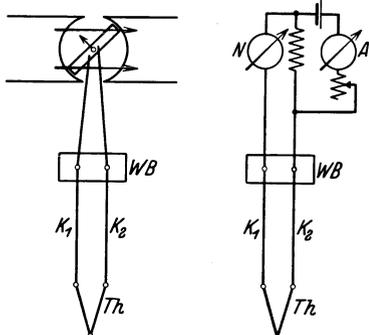


Abb. 9. Schaltarten für Thermoelemente. *Th* Thermoelement, *K*₁ Kompensationsdraht, *K*₂ Kompensationsdraht, *WB* Wasserbad, *N* Nullgalvanometer, *A* Ausschlagsgalvanometer.

Thermoelement durch ein Drehspulgalvanometer die Anzeige des letzteren abhängt vom Verhältnis des Thermoelementwiderstandes zu dem Widerstand des Galvanometers, also in jedem Falle besonders berücksichtigt werden muß, während man bei der Kompensationsmessung der thermoelektrischen Kraft unabhängig von dem Widerstand des Thermoelementes und der Meßeinrichtung ist.

a) Strommessung mit Drehspulinstrumenten.

Die beiden Schenkel des Thermoelementes sind entweder je mit demselben Material oder mit thermo-

elektrisch gleichartigen Legierungen, sog. Kompensationsdrähten bis zu den kalten Lötstellen im Wasserbad bzw. Thermostaten verlängert. Von dort aus sind die Fernleitungen mit Kupfer bis zum Drehspulinstrument verlegt. Man wählt den Widerstand des Drehspulinstrumentes möglichst hoch, so daß die Widerstände von Elementen und Fernleitungen dagegen klein sind. Sind letztere gegen die verlangte Meßgenauigkeit nicht zu vernachlässigen, so kann man aus dem Drehspulinstrument soviel Widerstand herausnehmen, als dem Außenwiderstand des Stromkreises entspricht; dann zeigt das Instrument richtig. Für die technischen Drehspulgalvanometer kann der Meßbereich von 6 mV praktisch nicht unterschritten werden. Je kleiner der Meßbereich, um so mehr wirkt sich die Temperaturabhängigkeit der Drehspule aus Kupferdraht (0,4% pro $^{\circ}\text{C}$) aus. Man ist daher bei Messung kleiner Temperaturdifferenzen auf Widerstandsthermometer oder auf Mehrfach-Thermoelemente angewiesen (Absatz d).

b) Technische Kompensationsschaltung.

Die Größe der Thermoelement- und Fernleitungswiderstände spielt bei der Kompensationsschaltung keine Rolle. Sie wird z. B. von dem

Potentiometer Recorder der Firma Leeds and Northrup Company, Philadelphia, und neuerdings von dem Siemens-Kompenso-graphen angewandt.

c) Halbpotentiometrische Schaltung.

Bei der halbpotentiometrischen Schaltung (Siemens-Ztschr. 1931, Heft 8 u. 9) wird der Nullpunkt des Meßbereichs unterdrückt, indem eine konstante elektromotorische Kraft gegen die Thermokraft geschaltet wird. Im praktischen Betrieb ist es nicht ganz leicht, diese Gegenspannung auf lange Dauer genügend konstant zu halten. Am sichersten ist immer noch ein gut gewarteter Akkumulator in Spannungsteilerschaltung.

d) Mehrfach-Thermoelemente.

Zur Messung kleiner Temperaturdifferenzen mit Thermoelementen kann eine beliebige Zahl von Elementen in Serie geschaltet werden. Es müssen nur sämtliche Leitungen zu den kalten Lötstellen bis zum Wasserbad bzw. Thermostaten geführt werden, was unter Umständen einen erheblichen Aufwand an Leitungen erfordert. Eine wichtige Anwendung findet diese Mehrfachschaltung in der sog. Thermosäule oder Thermokette in zahlreichen Analysenapparaten (s. Wärmetönungsapparat der I. G. Farbenindustrie A.G., Abschnitt VIIC, S. 671), ferner bei Heizwertschreibern und bei Psychometern.

e) Meßgenauigkeit der Thermoelemente.

Für eine zuverlässige Messung mit Thermoelementen ist Voraussetzung, daß man thermoelektrisch homogene Materialien verwendet. In manchen Fällen ist eine künstliche Alterung der Thermoelemente notwendig. Man kann jedoch auch ohne Alterung Toleranzen der Thermokraft bis zu 0,5% auch bei unedlen Metallen einhalten. Praktisch muß man also, bezogen auf das Thermoelement selbst, mit einer Toleranz von $\pm 1\%$ rechnen. Nicht einbezogen in diese Toleranz ist die Toleranz der Temperatur der kalten Lötstellen. Um diese möglichst klein zu halten, verwendet man vorteilhaft Wasserbäder mit dauerndem Durchfluß, die nötigenfalls eine selbsttätig geregelte Zusatzheizung bekommen. Eisbäder sind in der Praxis ebenso wie Dampfbäder für 100° C an der kalten Lötstelle meist zu teuer. Die kalte Lötstelle kann auf diese Weise mit Leichtigkeit auf 1° C konstant gehalten werden. Die tatsächliche Abweichung von der Bezugstemperatur der Thermoelementeichkurve muß berücksichtigt werden. Im allgemeinen bezieht man die Eichkurven auf 20° C. Die Temperaturkorrektur der tatsächlichen Temperatur der kalten Lötstellen ist dann bei allen Thermoelementen mit linearer Eichkurve gleich der Temperaturabweichung der kalten Lötstellen von 20° C und muß bei tieferen Temperaturen subtrahiert, bei Temperaturen über 20° C addiert werden. Für Thermoelemente mit gekrümmter Eichkurve trifft dies nicht zu. Für Platin-Platinrhodium-Elemente muß beispielsweise diese Korrektur mit 0,5, für Kupfer-Konstantan-Thermoelemente mit etwa 0,6 multipliziert werden.

Der Temperaturkoeffizient der Fernleitungen kann praktisch gegenüber den Meßfehlern des Registrierinstrumentes selbst vernachlässigt werden. Letzterer muß zu $\pm 1\%$ vom Höchstwert angenommen werden.

f) Größe der Thermokräfte.

In Tabelle 9 sind für eine Anzahl von Thermoelementen die Thermokräfte angegeben. Die wirklichen Zahlenwerte müssen jeweils durch Eichung festgelegt werden.

Tabelle 9. Elektromotorische Kraft der gebräuchlichsten Thermoelemente bezogen auf 20°C an der kalten Lötstelle.

Metallkombination	Obere Grenze ¹ °C	mV bei						
		300	500	700	1000	1200	1600	2000°C
Kupfer-Konstantan	600	14,34	26,84					
Eisen-Konstantan	600 (800)	15,85	27,4	39,75				
Nickelchrom-Nickel	1100(1200)	8,46	15,15	22,42	33,98	41,9		
Nickelchrom-Nickel (Hoskins)	1200	12,20	20,25	28,20	40,5	48,7		
Platin-Platinrhodium	1600	2,29	4,17	6,23	9,56	11,89	16,63	
{ H ₁ (Siebert, Hanau) (Platinrhodium)	1600	5,22	9,60	14,65	22,80	28,60	40,60	
Ir — Ir Rh ² (40%, 60%)	2000	1,63	2,74	3,83	5,50	6,60	8,72	10,85

Bei hohen Temperaturen ist es schwierig, für den Dauerbetrieb geeignete Isolierrohre zu finden. Es muß berücksichtigt werden, daß Platin in reduzierender Atmosphäre brüchig wird. Iridium verdampft leicht in oxydierender Atmosphäre. Je nach den Bedingungen muß darauf geachtet werden, gasdichte oder temperaturwechselbeständige Schutzrohre zu verwenden oder beides. Für rauhe Betriebe sollte man stets versuchen, hitzebeständige Metallschutzrohre zu benutzen. Wo auch diese nicht standhalten, ist man auf Strahlungs-pyrometer angewiesen (s. S. 603f.).

2. Widerstandsthermometer.

Die Temperaturmessung mit Widerstandsthermometern ist eine Messung der absoluten Temperatur im Gegensatz zu der thermoelektrischen Messung. Als Material für Widerstandsthermometer [s. G. Keinath: A. T. M. J. 221—1 (1933)] wird meist reines Platin verwendet, das pro °C eine Widerstandsänderung von etwa 0,4% seines Wertes erfährt. Die Widerstandsthermometer werden aus sehr feinen Drähten, meist spiralartig in Hartglas oder Quarz eingeschmolzen, oder auf Glimmer aufgewickelt. Das Platingewicht ist daher unbedeutend. Bei großen Instrumenten oder anderen robusten Ausführungen verwendet man auch Nickel-, Kupfer- oder Eisen-Widerstandsthermometer, unter der Voraussetzung, daß keine chemischen Angriffe zu befürchten sind. Bei tiefen

¹ Die in Klammern gesetzten Zahlen entsprechen den theoretisch erreichbaren Temperaturgrenzen.

² Feussner, O.: Elektrotechn. Ztschr. 54, 155 (1933).

Temperaturen wird auch Blei verwendet. Jede kleinste Verunreinigung des reinen Materials erzeugt eine merkliche Änderung des Temperaturkoeffizienten und damit erhebliche Meßfehler.

Normalerweise werden die Widerstandsthermometer mit 100Ω bei 0°C ausgeführt und sind ebenso wie die Thermoelemente unter sich austauschbar.

Die Meßgenauigkeit der Widerstandsthermometer kann außerordentlich weit gesteigert werden; praktisch hängt sie nur von der etwa 1% betragenden Genauigkeit des elektrischen Meßgeräts und bei den bekannten Brückenschaltungen mit Drehspulinstrument im Brückenzweig von den Spannungsschwankungen ab. Man benutzt daher vorteilhaft spannungsunabhängige Meßgeräte, wie das in Abb. 10

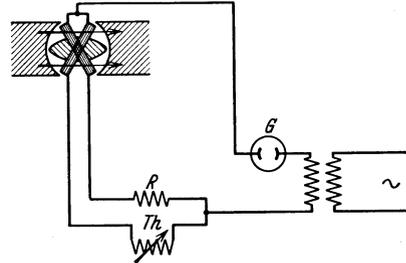


Abb. 10. Brugsches Gleichstrom-Kreuzspul-Ohmmeter für Widerstandsthermometer. Th Widerstandsthermometer, R Vergleichswiderstand, G Gleichrichter.

dargestellte Brugsche Gleichstrom-Kreuzspul-Ohmmeter mit Gleichrichteranschluß ans Wechselstromnetz oder neuerdings das Brückenkreuzspulinstrument von Siemens & Halske, Abb. 11. Die ebenfalls spannungsunabhängigen Wechselstrom-Ohmmeter

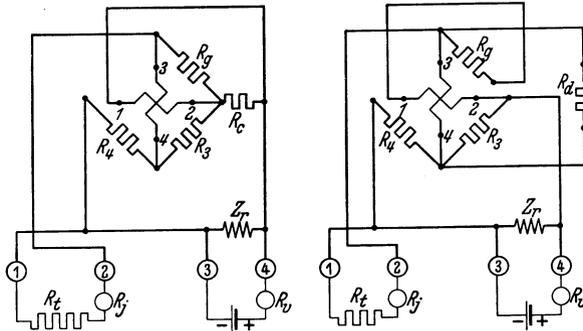


Abb. 11. Widerstandsthermometer mit Brückenkreuzspulgerät von Siemens & Halske. R_t Widerstandsthermometer, R_v Gegenwiderstand zum Widerstandsthermometer der Brücke, R_3, R_4 Brückenwiderstände, R_c Abgleichwiderstand für den Richtstrom, R_d Dämpfungswiderstand im Nebenschluß zum Hauptrahmen, Z_r Zeigerrückstellrelais, R_i Vorwiderstand zur Meßstromquelle, R_j Justierwiderstand für die Fernleitung. Allgemein: Bei Instrumenten für Anschluß an mehrere Meßstellen fällt Zeigerrückstellrelais Z_r fort. Der Vorwiderstand zur Meßstromquelle R_i fällt für 6 V fort.

von Hartmann & Braun, Frankfurt a. M. erfordern eine große Sorgfalt bei der Montage wegen induktionsfreier Leitungsverlegung; sie haben sich deshalb nicht allgemein eingeführt.

3. Strahlungs-pyrometer.

Für die Registrierung hoher Temperaturen kommen nur die Strahlungs-pyrometer in Frage. Ihre Wirkung beruht auf dem Stefan Boltzmannschen Gesetz, nach welchem die gesamte Strahlung eines Körpers

proportional der 4. Potenz seiner absoluten Temperatur ist. Diese ist der Messung leicht zugänglich. Die Strahlung eines Körpers ist jedoch nicht nur eine Temperaturfunktion, sondern hängt auch vom Emissionsvermögen des Strahlers ab. Der sog. schwarze Körper hat das Emissionsvermögen 1, blankes Eisen beispielsweise nur 0,5 [s. Technol. Pap. Bur. Stand. Nr. 170, S. 127]. Auch Strahlungsabsorption in Gasen und Dämpfen kann erhebliche Meßfehler hervorrufen, so daß die Gesamtstrahlungs-pyrometer nur für Relativmessungen brauchbar sind. Eine Eichung, sofern sie nicht thermoelektrisch durchgeführt werden kann, erfolgt mittels eines Teilstrahlungs-pyrometers. Diese nicht registrierenden Apparate sollen hier nicht beschrieben werden. Es sei erwähnt, daß von der Firma Siemens & Halske das sog. Kreuzfadens-pyrometer für 900—1800° C hergestellt wird, das gegenüber den älteren Teilstrahlungs-pyrometern von Holborn und Kurlbaum, Wanner und gegen das Pyropto der Firma Hartmann & Braun A.G., Frankfurt a. M. wesentliche Verbesserungen aufweist.

C. Thermometereinbau.

Die in Tabelle 8 angegebenen Werte für die Meßgenauigkeit der Thermometertypen beziehen sich nur auf einen völlig einwandfreien Einbau der Thermometer. Hierunter ist zu verstehen, daß die Thermometer tatsächlich die Umgebungstemperatur annehmen. Dies ist gelegentlich nur sehr schwierig zu erreichen. Die Wärmeübertragung, gleichgültig in welcher Richtung, kann nur durch Leitung, Konvektion und durch Strahlung erfolgen. Die Wärmeleitung wird berücksichtigt durch hinreichende Isolation des Thermometers gegen die kältere Umgebung. Die Wärmezufuhr erfolgt in der Hauptsache durch Konvektion. Wo dies nicht genügend gewährleistet ist, muß sie künstlich durch Rührer oder Vorbeisaugen des heißen Mediums erhöht werden. Je höher

Tabelle 10. Strahlungsmeßfehler an Thermoelementen.

Versuchsreihe	Gasgeschwindigkeit m/s	Temperaturen in °C					Strahlungsmeßfehler in °C	
		der Rohr- wand	des nicht geheizten Strahlungs- schutzes	des Thermoelementes			des Thermo- elementes	
				ohne	mit unge- heiztem	mit ge- heiztem ¹	ohne	mit unge- heiztem
1	2,34	116	208	211,4	215,3	217	5,6	1,7
2	2,80	142	261	262,5	271	275	12,5	4
3	2,56	200	388	389	420	429	40	9
4	4,65	254	450	456	480	496	40	16
5	4,52	258	464	466	494	510	44	16
6	0,97	168	350	369	380	440	71	60

¹ Wahre Gastemperatur.

die Temperatur, um so bedeutender ist die Rolle der Wärmeübertragung durch Strahlung, nicht nur für die Wärmezufuhr, sondern auch für die Wärmeabfuhr der Thermometer. Tabelle 10 erläutert die Größe der durch mangelnden Strahlungsschutz möglichen Meßfehler an Thermoelementen [s. Hildenbrand: Arch. Wärmewirtsch. 1926, 319]. Bei geringen Gasströmungsgeschwindigkeiten und Temperaturen von 800—900° C können mit Leichtigkeit Meßfehler von 200° C entstehen, wenn ein Thermometer frei an die umgebenden Wände, die 200—300° C heiß sind, abstrahlen kann. Für solche schwierige Fälle sind verschiedene Durchfluß- [Mitt. d. Wärmest. Düsseldorf Nr. 92], Ausblase- und Absaugepyrometer angegeben worden. Wegen Beschreibung dieser Meßgeräte sei auf Knoblauch und Hencky: Anleitung zur genauen technischen Temperaturmessung, München und Berlin 1926 verwiesen. Ein weiterer Fortschritt ist in dem Gaspyrometer von Schmidt [Mitt. Kais.-Wilh.-Inst. Eisenforsch., Düsseld. 9, Lieferung 14] geschaffen worden.

D. Temperaturregler.

Eine eingehende Darstellung ist in dem Buch von R. Stohn: Temperaturregler, Halle 1933, zu finden.

1. Regler für Raumtemperaturen.

Für Arbeitsräume in technischen Betrieben ist es oft nicht zu umgehen, die Temperaturschwankungen selbsttätig in engen Grenzen zu halten. Ebenso wird diese Forderung durch viele Arbeitsprozesse vorgeschrieben. Die Größe des Raumes und die zu steuernden Wärmemengen schreiben die Hilfsmittel und die Abmessungen der Reglerorgane vor.

Als Beispiel für einen elektrischen „Auf-Zu“-Regler ist in Abb. 12 der Raumregler von Siemens & Halske A. G., Berlin dargestellt.

Als Temperaturfühler wird ein Dampfdruckthermometer in Gestalt einer kleinen Dose benützt. Die Bewegung der Dosenwand wird unmittelbar auf einen Vakuumschalter [s. ATM, Blatt J 063—2] aus Glas mit außerordentlich kleinem Schaltweg übertragen. Ein Glasstab mit elastischem Wellrohr, ebenfalls aus Glas, betätigt schon bei einer Bewegung von 0,005 mm den Federkontakt. Dieser ist bis 10 A und 1500 W belastbar. Man kann also unter Verzicht auf Zwischenrelais, elektrische Antriebe und Schütze direkt steuern. Die Ansprechempfindlichkeit des Raumreglers beträgt 0,05° C. Derselbe Temperaturfühler wird auch in

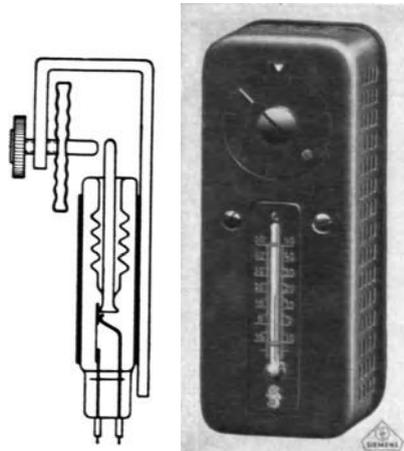


Abb. 12. Raumregler von Siemens & Halske, Schema und Ansicht.

dem Stabregler und im Oberflächenregler von Siemens & Halske verwendet.

Für hohe Raumtemperaturen werden Ausdehnungsregler aller Art benützt (s. z. B. die Temperaturregler der Firma W. C. Heraeus G. m. b. H., Hanau a. M.). Es eignen sich:

Aluminium gegen Invar	bis 250°C
Kupfer oder Messing gegen Invar	„ 250°C
Stahl oder Nickel gegen Quarz	„ 600°C
Chromnickel gegen Porzellan	„ 1000°C.

Das mit Ruhestrom arbeitende Temperatur-Feinrelais von Kieback und Peter ist sogar bis 1200° C verwendbar und regelt dann

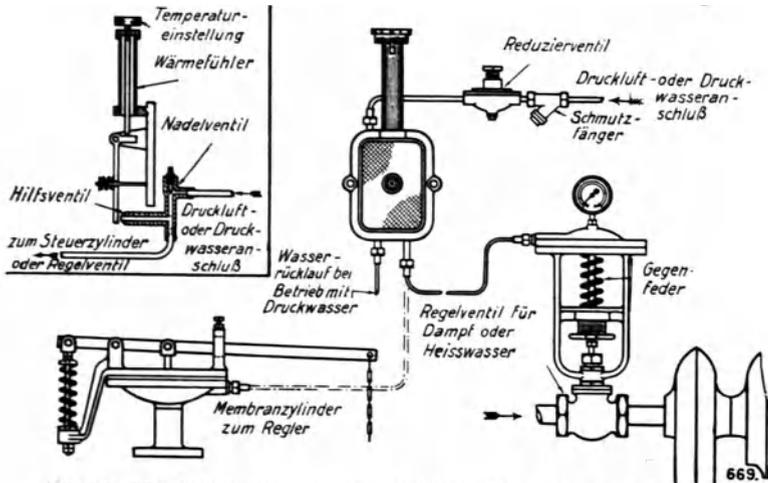


Abb. 13. ICE-Temperaturregler Bauart EM für Raumtemperaturregelung.
Hersteller: I. C. Eckardt A.G., Stuttgart-Cannstatt.

angeblich noch auf 1° C genau. Der Sigma-Stabthermostat von Brown, Boveri & Co. (Stotz-Kontakt G. m. b. H., Mannheim) betätigt durch ein Ausdehnungsthermometer über einen Hebelmechanismus eine Quecksilberschalttröhre.

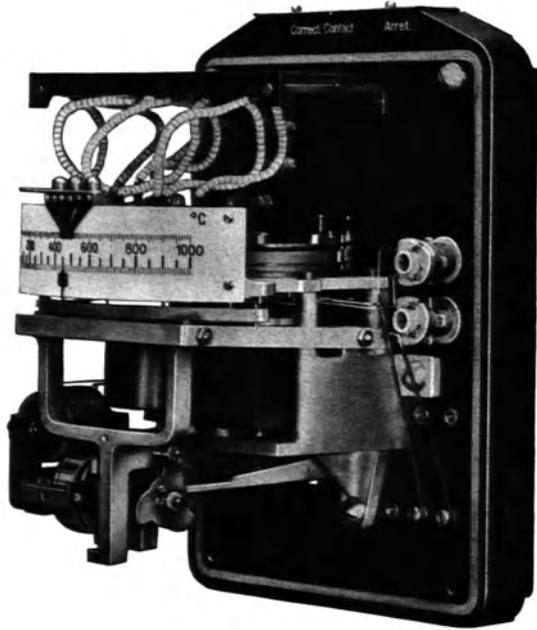
In Abb. 13 ist als Beispiel für mechanisch arbeitende Regler der ICE-Temperaturregler für Temperaturen zwischen — 30 und + 50° C dargestellt, ein Regler mit hydraulischem oder pneumatischem Kraftverstärker zum Anschluß an eine Dampf- oder Heißwasserheizung. Der Temperaturfühler besteht aus einem Dampfdruckthermometer, das mit steigender Temperatur eine Ausströmdüse für Wasser oder Druckluft schließt. Dadurch steigt der Druck in einem Regelventil und die Dampf- oder Wasserzufuhr wird abgedrosselt und umgekehrt.

2. Temperaturregler für Apparate und Industrieanlagen.

a) Elektrische Regler.

Hier sind in erster Linie die Fallbügelregler zu nennen, da ihre Anwendung in Verbindung mit Thermoelementen, einschließlich der

Strahlungspyrometer und mit Widerstandsthermometern sich auf alle Arten von Heizungen erstreckt. Für Raumheizungen wird man im allgemeinen mit den auf S. 605—606 aufgeführten billigeren Reglern auszukommen suchen, wenn man auf eine gleichzeitige Temperaturanzeige oder Registrierung verzichten kann. Abb. 14 ist die Innenansicht des Fallbügelreglers der Firma Hartmann & Braun A.G., Frankfurt a. M. Ein durch einen kleinen Synchronmotor angetriebenes Tastwerk hebt den Zeiger des Meßwerks periodisch an. Steht der Zeiger im Regelbereich, dann wird durch ein Druckstück auf dem Zeiger eine Kontaktwippe gekippt und eine



Quecksilberschaltröhre geschlossen oder geöffnet, und damit der entsprechende Regelvorgang eingeleitet.

Abb. 14. Fallbügelregler mit fünf Quecksilberschaltröhren der Firma Hartmann & Braun, Frankfurt a. M.

Senkt sich das Tastwerk, dann wird der Zeiger wieder frei und die Schaltröhre in ihre Anfangslage zurückgestellt. Der Regler enthält

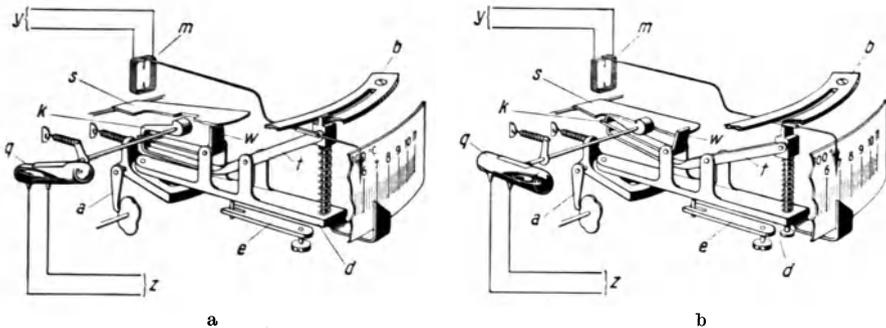


Abb. 15. Schema des Siemens-Reglers Typ Z. a) Temperatur unter dem Regelwert, Strom eingeschaltet; b) Temperatur auf Regelwert, Strom ausgeschaltet.

fünf Schaltröhren für maximal 6 A und 1,2 kW. Die mittleren drei Röhren sind die Regleröhren, während die beiden äußeren für Signalzwecke bestimmt sind. Diese Art von Regler arbeiten über Halteschütze, können

aber auch zur schrittweisen Steuerung von motorgetriebenen Ventilen verwendet werden. Die Ansprechempfindlichkeit der Regelkontakte von Fallbügelreglern beträgt etwa 0,3% des Skalenbereichs. Auch die Firma Siemens & Halske A.G., Berlin stellt einen ähnlichen Fallbügelregler her, jedoch mit offenen Kontakten. Eine kleinere Ausführung ist der Siemense Regler Typ Z für einfache Regleraufgaben. Er besitzt nur eine Quecksilberschaltröhre. Die Wirkungsweise dieses Reglers geht aus Abb. 15 hervor.

Eine ausgezeichnete Stellung unter den elektrischen Reglern nehmen die Programmregler ein. Sie regeln die Temperatur z. B. eines Apparates vollautomatisch nach einem vorgeschrie-

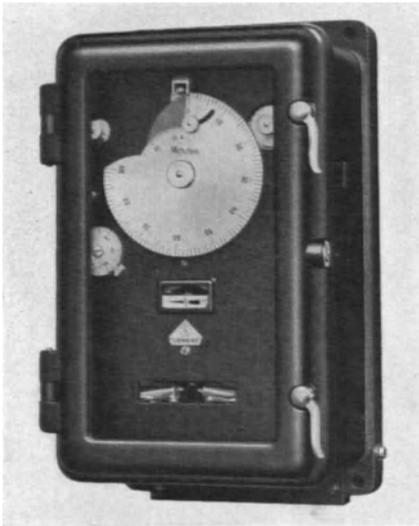


Abb. 16. Programmregler der Firma Siemens & Halske A.G., Berlin.

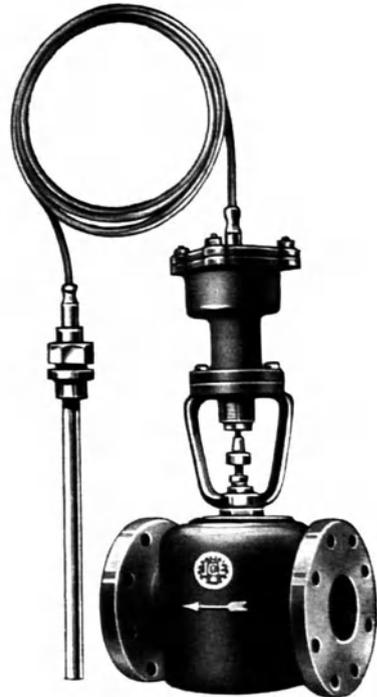


Abb. 17. Direkt wirkender ICE-Temperaturregler Bauart VI für Heizungsanlagen.

benen Programm. Abb. 16 zeigt den Programmgeber der Firma Siemens & Halske A.G., Berlin, bei welchem durch Auswechseln der Programmscheibe der Prozeßverlauf einfach geändert werden kann. Andere elektrische Programmregler werden von den Firmen Hartmann & Braun A.G., Frankfurt a. M., und Leeds and Northrup Company, Philadelphia [s. W. Boas: Gas 4, 250 (1932): Elektrische Regelung und Steuerung von Gasfeuerungen und wärmetechnischen Vorgängen] gebaut. Die Programmregler sind selbstverständlich nicht an elektrische Regler gebunden (vgl. Kurven-Kopierregler S. 609 unten).

b) Mechanische Regler.

Bei Verwendung der Flüssigkeitsausdehnung für Steuerimpulse bei direkt arbeitenden Reglern besteht die Gefahr des Festklemmens des

Ventilkörpers oder einer Beschädigung des Regelorgans. Durch eine sehr sinnreiche Konstruktion wird diese Schwierigkeit z. B. in dem Samson-Regler vermieden. In diesem Regler ist der Ventilkegel entlastet, sobald der Ventilsitz dicht abschließt. Die Entlastung erfolgt über ein Metallfederrohr (s. Firmenkatalog der Firma Samson Apparatbau A.G., Frankfurt a. M.).

Der in Abb. 17 abgebildete Eckardt-Regler enthält in dem Temperaturfühler eine leicht siedende Flüssigkeit, deren Druck auf einen Metallbalg übertragen wird. Dieser wird entgegen einer Federkraft mehr oder weniger zusammengedrückt und damit das Ventil mehr oder weniger geschlossen. Es liegt also ein Beispiel für einen Mehr-Weniger-



Abb. 18.
ICE-Kurven-Kopierregler MSTK.

Regler vor. Ähnlich arbeitet der DWM-Temperaturregler der Berlin-Karlsruher-Industrie-Werke A.G., Karlsruhe i. B.

Eine sehr interessante Ausführung eines mechanisch arbeitenden Programmreglers ist der Kurven-Kopierregler Bauart MSTK der Firma I. C. Eckardt A.G., Stuttgart-Cannstatt (Abb. 18). Dieser Regler registriert gleichzeitig die Meßgröße auf einem Kreisdiagramm. Die Kurvenscheibe, durch die der zeitliche Ablauf der Steuerung bestimmt wird, besitzt genau dieselbe Form wie die Registrierkurve. Außerdem kann der Regler als Einfach- oder als Mehrfachregler ausgeführt werden.

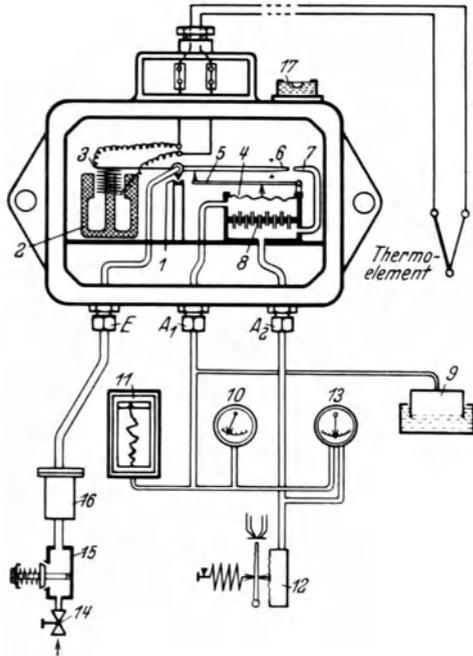


Abb. 19. Askania-Stromwaage mit Kapillardrossel (Bauart Wi-pk). 1 Lager des Waagensystems, 2 Magnet, 3 Spule, 4 Membran, 5 einarmiger Hebel, 6 Druckluft-Strahlrohr am Waagensystem, 7 feste Gegendüse, 8 Kapillardrossel, 9 Verdrängungsbehälter zur Volumenvergrößerung, 10 Druckanzeige hinter der Kapillardrossel 0—50 oder 0—100 mm WS, 11 Registriergerät (Tintenschreiber), 12 Strahlrohrregler, 13 Differenzdruckmesser für die Änderungsgeschwindigkeit der Temperatur, Anschluß vor und hinter der Kapillardrossel, 14 Drosselventil, 15 Überströmregler, 16 Filter für die Druckluft.

c) Kombinierte Regler.

Die Askania-Stromwaage (Abb. 19) ist ein charakteristisches Beispiel eines teils elektrischen, teils mechanischen Reglers. Das Gerät dient zur Regelung und gleichzeitigen Registrierung hoher und höchster Temperaturen und beruht auf der Stromwaage von Kelvin. Wenn der durch die Spule 3 fließende Thermostrom steigt, wird das Strahlrohr 6 mehr vor die Düse 7 gestellt und der Druck vor der Kapillardrossel 8 gesteigert. Die Membran 4 versucht über den Hebel 5 das Strahlrohr wieder zurückzuführen; es stellt sich ein Gleichgewicht ein. Der Luftdruck hinter der Kapillardrossel ist dem Spulenstrom und damit der Temperatur verhältnismäßig und unabhängig vom Vordruck, der durch das Strahlrohr selbsttätig ausgeglichen wird. Er wird gemessen

mit einem Anzeigergerät 10 oder mit einem Tintenschreiber 11, der auch rasche Temperaturschwankungen genau aufzeichnet. Der Regler 12 wird von dem Druck vor der Kapillardrossel gesteuert, spricht also auf den Wert:

Temperatur + Temperatur-
änderungsgeschwindigkeit

an. Dies ist gleichbedeutend mit einer Rückführung. Mit dem Differenzdruckmesser 13, der ebenfalls als Registriergerät ausgeführt sein kann, mißt man die Änderungsgeschwindigkeit des Spulenstromes und damit die Temperaturänderungsgeschwindigkeit. Durch einseitige Gewichtsauflage auf die Waage kann man den Nullpunkt des Meßbereichs verschieben. Es wird Druckluft von 300 mm WS benötigt. Der Luftverbrauch beträgt 0,2 m³/h.

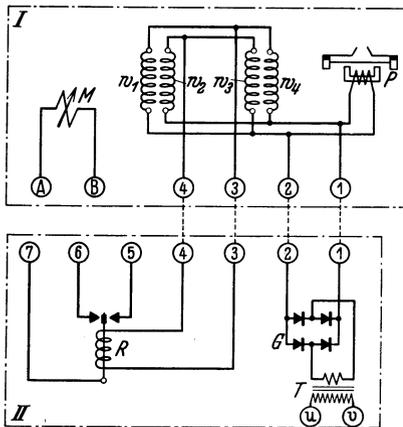


Abb. 20. Bolometeranordnung von Siemens & Halske für Kontaktgabe, Regelung und Großinstrumente. *T* Transformator, *G* Trokengleichrichter, *P* Membranblaswerk, *R* polarisiertes Relais, *w*₁, *w*₂, *w*₃, *w*₄ Bolometer, *M* Meßwerk mit Abdeckfahne, *u*, *v* Wechselstrom-Netzanschluß, *A*, *B* Meßwerkanschluß, 1, 2, 3, 4 zugeordnete Klemmen an Gehäuse I und II, 5, 7 Anschlußklemmen für Hilfsrelais 1 in besonderem Stromkreis, 6, 7 Anschlußklemmen für Hilfsrelais 2 in besonderem Stromkreis.

3. Regler für Sonderzwecke.

Die im Abschnitt D, 2, a) beschriebenen Fallbügelregler können unter Umständen von Nachteil sein, da sie nicht kontinuierlich regeln. Die in ATM J 23—1 und 23—2 beschriebene Bolometeranordnung [vgl. auch H. Sell: Ztschr. techn. Physik 13, 320 (1932); ferner 15, 112 u. 129 (1934)] der Firma Siemens & Halske A.G., Berlin, ermöglicht die Ausnützung kleinster Ströme, z. B. thermoelektrischer oder photoelektrischer Ströme oder winziger Bewegungen (in der Größenordnung 1/1000 mm), die durch irgendwelche Ursachen ausgelöst sein können, für Regelzwecke. Abb. 20 zeigt das Schaltbild für dieses Gerät. Vor zwei Schlitzdüsen liegen je zwei aus feinen Nickelspiralen bestehende

Bolometer w_1, w_2, w_3 und w_4 , die mit den beiden Wicklungen eines Relais R in Differentialschaltung verbunden sind. Ein Membranblaswerk wird über einen Trockengleichrichter und einen Transformator ans Wechselstromnetz angeschlossen. Der Zeiger des steuernden Meßwerks trägt eine Abdeckfahne, die schon bei 0,1 mm Abweichung vom Sollwert den durch das Blaswerk erzeugten Luftstrom der einen oder der anderen Schlitzdüse abdeckt. Dadurch werden die vor der Düse befindlichen Bolometer nicht mehr gekühlt und innerhalb 0,4 s steigt die Temperatur der Nickelspiralen von etwa 200 auf etwa 400° C. Das Stromverhältnis wird dadurch geändert und das Differenzrelais zum Ansprechen gebracht. Meßwerk, Bolometer und Gebläse sind zusammen in einem Gehäuse I , das Relais mit Gleichrichter und Transformator in Gehäuse II untergebracht. Der Stromverbrauch des Gerätes beträgt nur 6 W. Über zwei Hilfsrelais kann z. B. ein Regelmotor mit Rechts- und Linkslauf gesteuert werden. Dieselbe Einrichtung kann mit einer Nachlaufsteuerung zum Betrieb von Großinstrumenten dienen, wobei die Bewegung des Großzeigers auf das Bolometer zurückgeführt wird.

III. Druckmessung¹.

A. Allgemeines.

Der Druck ist ein wesentliches Kennzeichen für den Zustand eines Stoffes. Seine Messung ist daher eine allgemein wichtige Aufgabe. Die für Flüssigkeiten (Gase und Dämpfe) in Frage kommenden Meßmethoden sollen, soweit sie in der Technik vorwiegend angewendet werden, nachstehend kurz behandelt werden².

Einrichtungen zur Regelung des Druckes werden in dem Abschnitt „Regelung von Druck und Menge“ (S. 795) näher behandelt.

Ist eine Flächenkraft P auf einer Fläche F gleichmäßig verteilt, dann ist der Quotient

$$p = P/F \quad (1)$$

die Kraft pro Flächeneinheit oder kurz der Druck³.

Da im technischen Maßsystem die Einheit der Kraft das Kilogramm (kg)⁴, diejenige der Länge das Meter (m) ist, wird die Einheit des Druckes 1 kg/m². In der Praxis wird der Druck meistens auf die Fläche von 1 cm² bezogen, so daß sich die Druckeinheit zu 1 kg/cm² ergibt. Dieser Druck ist eine technische Atmosphäre (1 kg/cm² = 10⁴ kg/m² = 1 at).

¹ Bearbeitet von Dr. phil. C. Hilburg VDI, Ludwigshafen a. Rh.

² Von zusammenfassenden Darstellungen seien erwähnt H. Geiger u. K. Scheel: Handbuch der Physik, Bd. 2, S. 327f. Berlin 1926; Instruments, Pittsb. Pa. 4, 17, 55, 143, 225 (1931). — Eucken, A. u. M. Jakob: Der Chemie-Ingenieur, Bd. II/3, S. 1f. Leipzig 1933.

³ In ruhenden idealen Flüssigkeiten sind nur Normaldrücke wirksam. Der hydrostatische Druck ist unabhängig von der Richtung und ändert sich nur noch mit dem Ort. Strömende Flüssigkeiten üben auf ihre Berandung nicht den Druck aus, den sie in der Ruhe ausüben würden. Für die stationäre Bewegung idealer Flüssigkeiten ist nach der Bernoullischen Gleichung der Gesamtdruck p_g gleich der Summe aus dem statischen Druck (p_{st}) und dem dynamischen Druck ($p_d = \gamma w^2/2g$), also $p_g = p_{st} + \gamma w^2/2g$. Siehe auch S. 753.

⁴ Siehe S. 685.

Gleichwertig mit dieser Maßeinheit ist der Druck einer Quecksilbersäule von 0°C und 735,56 mm Höhe, den diese am Meeresniveau in 45° geographischer Breite auf ihre Unterlage ausübt¹. Es ist $1\text{ at} = 1,0\text{ kg/cm}^2 = 735,56\text{ mm QS}$.

Eine hiervon abweichende und zu beachtende Einheit ist die dem mittleren Barometerstand etwa entsprechende physikalische Atmosphäre ($1\text{ Atm} = 1,03323\text{ kg/cm}^2 = 760\text{ mm QS}$).

Einige in der Praxis oft verwendete Druckeinheiten² seien nachstehend zusammengestellt:

$1\text{ at} = 980,665\text{ b}^3 = 1\text{ kg/cm}^2 = 10^4\text{ mm WS von }4^{\circ}\text{C} = 735,56\text{ mm QS von }0^{\circ}\text{C} = 0,96784\text{ Atm} = 14,223\text{ lb/sq. in.}$

$1\text{ Atm} = 1,01325\text{ b} = 1,03323\text{ kg/cm}^2 = 10332,3\text{ mm WS von }4^{\circ}\text{C} = 760\text{ mm QS von }0^{\circ}\text{C} = 29,922\text{ in. QS} = 14,696\text{ lb/sq. in.}$

$1\text{ lb/sq. in.} = 0,07031\text{ kg/cm}^2 = 703,1\text{ mm WS von }4^{\circ}\text{C} = 51,715\text{ mm QS von }0^{\circ}\text{C} = 0,06805\text{ Atm.}$

$1\text{ mm WS von }4^{\circ}\text{C} = 1\text{ kg/m}^2 = 7,3556\cdot 10^{-2}\text{ mm QS von }0^{\circ}\text{C.}$

$1\text{ mm QS von }0^{\circ}\text{C} = 13,5951\text{ mm WS von }4^{\circ}\text{C} = 13,5951\cdot 10^{-4}\text{ kg/cm}^2 = 13,158\cdot 10^{-2}\text{ Atm.}$

Die zur Messung des Druckes benutzten Apparate werden Manometer genannt. Es sind dies im allgemeinen Differenzdruckmesser, da sie meistens den Unterschied des zu messenden Druckes gegenüber dem Luftdruck anzeigen. Drücke oberhalb bzw. unterhalb dieses atmosphärischen Druckes sind Überdrücke oder Unterdrücke. Als absoluter Druck wird der vom gasleeren Raum aus gerechnete Druck bezeichnet, er ist gleich dem Atmosphärendruck, vermehrt bzw. vermindert um den Über- oder Unterdruck.

In der folgenden Darstellung kann auf die mannigfaltigen Ausführungsarten der verschiedenen Manometertypen nicht eingegangen werden. Auch die besonderen Instrumente zur Druckentnahme im Inneren strömender Flüssigkeiten (Staugeräte wie Sersche Scheibe, Krellsche Stauscheibe, Pitot-Rohr, Prandtl-Staurohr usw.), wie sie bei der Geschwindigkeitsmessung verwendet werden, finden keine Erwähnung⁴. Eine bevorzugte Behandlung erfahren nur die Flüssigkeits-, Metall- und Kolbenmanometer — für deren Reihenfolge der maximale Meßbereich als bestimmend angesehen wurde — und die ausgesprochenen

¹ Durch die 3. Conférence internationale des poids et mesures (1891) wurde der hierbei zugrunde liegende Normwert der Fallbeschleunigung festgesetzt auf $g_n = 980,665\text{ cm/s}^2$.

² Druckeinheiten und ihre verschiedenen Beziehungen siehe DIN 1314, Deutsche Normen Dk 531.787.081, 1932, Beuthverlag Berlin S 14. Siehe auch H ü t t e, 26. Aufl., Bd. 1, S. 508. Berlin 1931. Umrechnungstabellen daselbst im Anhang.

³ $1\text{ Bar (b)} = 10^6\text{ dyn/cm}^2$.

⁴ Über Staugeräte siehe R. Winkel: Stauröhren zur Messung des Druckes und der Geschwindigkeit im fließenden Wasser. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. **67**, 568 (1923). — Gramberg, A.: Technische Messungen bei Maschinenuntersuchungen und zur Betriebskontrolle, S. 122f. Berlin 1933. — Litinsky, L.: Messung großer Gasmengen, S. 112. Leipzig 1922. — Prandtl, L. u. O. Tietjens: Hydro- und Aeromechanik, Bd. 2, S. 239. Berlin 1931. — Geiger, H. u. K. Scheel: Handbuch der Physik, Bd. 2, S. 296. Berlin 1926. Siehe auch S. 754.

Differenzmanometer, wegen ihrer besonderen Verwendung bei den wichtigen technischen Durchflußmessungen. Die übrigen, in der Praxis nur gelegentlich verwendeten Druckmesser werden nur kurz gestreift.

B. Manometer.

1. Flüssigkeitsmanometer.

a) U-Rohr- und Gefäßmanometer.

Die in der Technik sehr zahlreich verwendeten Flüssigkeitsmanometer sind kommunizierende Röhren, bei denen das Gewicht der Manometerflüssigkeit dem zu messenden Druck das Gleichgewicht hält.

Wirkt bei dem U-Rohr-Flüssigkeitsmanometer der Abb. 21 auf den einen Schenkel der Druck p_1 , auf den anderen der Druck p_2 , so wird der Überdruck

$$p_1 - p_2 = h \cdot \gamma_h \text{ kg/m}^2. \quad (2)$$

Hierbei ist h (m) die Druckhöhe, der Abstand der Menisken von beiden auf der Horizontalebene $A_1 A_2$ senkrecht stehenden Flüssigkeitssäulen und γ_h (kg/m^3) das spezifische Gewicht der Manometerflüssigkeit (meistens Wasser oder Quecksilber). Wenn p_2 (kg/m^2) der auf den offenen Manometerschenkel wirkende Atmosphärendruck ist, so wird der absolute Druck

$$p = p_2 + h \cdot \gamma_h \text{ kg/m}^2. \quad (3)$$

Das im Überdruckschenkel oberhalb der Manometerflüssigkeit befindliche Gewicht des Mediums (Füllflüssigkeit) ist dabei als gewichtslos angesehen. Ist eine tropfbare Flüssigkeit als Füllflüssigkeit vorhanden, wie z. B. bei einer Anordnung gemäß Abb. 22, so ist die Nullpunktverschiebung und die Änderung des wirksamen spezifischen Gewichtes zu beachten¹. Für den vorliegenden Fall wird mit den Bezeichnungen der Abb. 22 und p_2 als Atmosphärendruck der absolute Druck p im Niveau $A_1 A_2$

$$p = p_2 + h (\gamma_h - \gamma') - h_2 \gamma' \text{ kg/m}^2. \quad (4)$$

Ist in beiden Manometerschenkeln eine zu berücksichtigende Füllflüssigkeit vorhanden (Abb. 23), so wird entsprechend

$$p = p_2 + h (\gamma_h - \gamma') \text{ kg/m}^2. \quad (5)$$

Da bei den U-Rohrmanometern die Gleichheit der Schenkelquerschnitte nicht immer gewährleistet ist, sind stets beide Menisken abzulesen. Bei dem Gefäßmanometer (Abb. 24) kann diese Schwierigkeit umgangen werden.

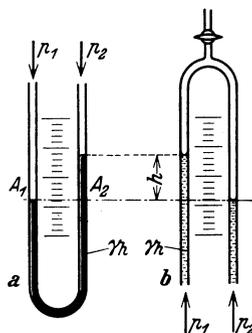


Abb. 21. U-Rohr-Flüssigkeitsmanometer.

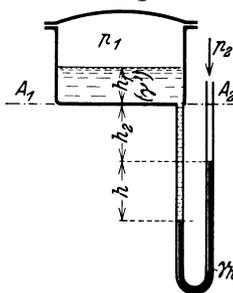


Abb. 22. U-Rohr-Flüssigkeitsmanometer, im Überdruckschenkel Füllflüssigkeit (γ' kg/m^3).

¹ Über verschiedene Anordnungen von Flüssigkeitsmanometern siehe Regeln für Leistungsversuche an Kreiselpumpen, S. 9. Berlin: VDI-Verlag 1928.

Der zu messende Überdruck ($p_1 - p_2$) wird hier, wenn wieder die Füllflüssigkeit in beiden Schenkeln als gewichtslos angesehen wird,

$$p_1 - p_2 = h \gamma_h = h' \left(1 + \frac{f}{F} \right) \gamma_h \text{ kg/m}^2. \quad (6)$$

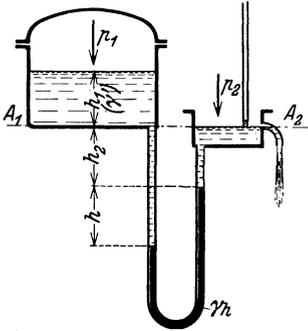


Abb. 23. U-Rohr-Flüssigkeitsmanometer, in beiden Schenkeln Füllflüssigkeit (γ' kg/m³).

Die eintretende Verschiebung des Nullpunktes ist entweder durch den Korrektionsfaktor $(1 + f/F)$ zu berücksichtigen oder bei der Einteilung der festen Skala gleich in Rechnung zu setzen [$h' = h F/(f + F)$]. Bei genügend kleinem Flächenverhältnis f/F kann auch in manchen Fällen von der Korrektur abgesehen werden. Gelegentlich werden auch Skala oder Gefäß zum Ausgleich der Spiegelabsenkung verschiebbar angeordnet.

Wird das Gefäßmanometer nach Abb. 22 oder 23 angeschlossen, so ergeben sich entsprechende Formeln wie (4) und (5), wobei nur an die Stelle der Druckhöhe h die

Höhe $h' (1 + f/F)$ tritt. Bei reduzierter Skala [nach Gleichung (6)] ist zu beachten, daß die Druckhöhe h_2 (Abb. 22 oder 23) dann mit normalem Maßstab abgemessen werden muß.

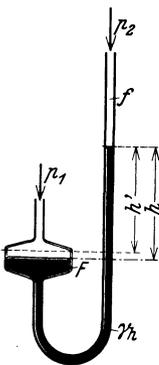


Abb. 24. Gefäßmanometer.

Die Gefäßmanometer lassen sich unter Benutzung eines Schwimmers als anzeigende oder registrierende Druckmesser verwenden. Hierbei wird das leicht zerbrechliche Glas durch betriebs sichereres Material ersetzt. Meßbereich und Schreibhöhe können leicht den Erfordernissen des Betriebes angepaßt werden. Ebenso können die Apparate mit Minimal- und Maximal-Alarmvorrichtung sowie mit Einrichtungen zur Fernmessung versehen werden.

Die Messung höherer Drücke mit Flüssigkeitsmanometern wird unbequem und auch schwierig. Das dem einfachen U-Rohr-Manometer gegenüber verschiedene Vorteile aufweisende Gefäßmanometer ist für diesen Zweck ebenfalls ungeeignet. In der Technik werden nur in Ausnahmefällen Flüssigkeitsmanometer zur Messung großer Drücke benutzt. Es sei nur angeführt, daß dann an Stelle von Glasrohren Stahlrohre Verwendung finden können, bei denen zur Abmessung der Meniskendifferenz an verschiedenen Stellen Schaugläser oder auch in entsprechend gewählten Abzweigungen absperrbare Standgläser angeordnet werden. Auch verkürzte Quecksilbermanometer, bei denen zur Erreichung einer möglichst kurzen Baulänge eine Unterteilung des zu messenden Druckes in mehrere Teildrücke durchgeführt [H. Grashof: Theoretische Maschinenlehre, Bd. 2, S. 816. Hamburg u. Leipzig 1883; H. Geiger u. K. Scheel: Handbuch der Physik, Bd. 2, S. 354. Berlin 1926] und die Übertragung des

Druckes von einem Manometer zum anderen mit Wasser vorgenommen wird, haben ebenfalls keine Verbreitung gefunden.

Es sind verschiedene Einflüsse zu beachten, die bei der einfachen Druckmessung mit Hilfe von Flüssigkeitsmanometern um so wichtiger sind, je größere Anforderungen an die Meßgenauigkeit gestellt werden.

Zunächst sei die Erscheinung der Capillarität angeführt. Je nachdem die Flüssigkeit ihre feste Berandung benetzt oder nicht, wird die Gestalt der Oberfläche und damit der Oberflächendruck verändert. Im Falle der Benetzung wird die Oberfläche konkav, sonst konvex. Da die im allgemeinen benutzten Flüssigkeitsmanometer keinen so großen Durchmesser haben, daß die Oberfläche der Flüssigkeit als eben angesehen werden kann, tritt bei konkaven Menisken eine Erhöhung, bei konvexen eine Erniedrigung des Niveaus ein. Die stets am Scheitel der Menisken parallaxefrei abzulesende Druckhöhe h wird daher zu hoch bzw. zu niedrig gemessen. In kommunizierenden Röhren können sich die Capillarwirkungen — die auch temperaturabhängig sind — unter gleichen Bedingungen aufheben. Sicherer ist die Verwendung von größeren Weiten bei den Beobachtungsröhren. Bei Quecksilbermanometern mit Rohrdurchmessern $D > 10$ mm hat die Depression praktisch keine Bedeutung mehr, bei $D > 15$ mm beträgt sie höchstens 0,1 mm. (Eine Tabelle der Capillardpression des Quecksilbers in Abhängigkeit von Durchmesser D und Meniscushöhe bei F. Kohlrausch: Lehrbuch der praktischen Physik, Tabelle 18, S. 825. Leipzig u. Berlin 1930.) Größer ist der Einfluß bei Wasser und Alkohol, hier sind etwa $30/D$ mm bzw. $11/D$ mm von der abgelesenen Druckhöhe abzuziehen. (Capillarkorrektion bei benetzenden Flüssigkeiten s. F. Kohlrausch: Lehrbuch der praktischen Physik, S. 244. Leipzig u. Berlin 1930.)

Besonders wichtig ist der Temperatureinfluß. Wie bereits angegeben, entspricht der Druck einer Quecksilbersäule von 760 mm bzw. 735,56 mm Höhe bei 0° C einer physikalischen bzw. technischen Atmosphäre. Es sind daher die an den sehr gebräuchlichen Quecksilbermanometern abgelesenen Druckhöhen auf 0° C zu reduzieren. Der Einfluß der Temperatur macht sich auch bei der zur Ablesung der Spiegeldifferenzen benutzten Manometerskala geltend. Diese meist in mm geteilte Skala, deren Einteilung natürlich in sich stimmen muß, besteht bei Präzisionsmanometern aus Metall.

Wird der kubische Ausdehnungskoeffizient der Manometerflüssigkeit mit 3α und der lineare Ausdehnungskoeffizient der Skala mit α' bezeichnet¹, so werden beide Temperatureinflüsse berücksichtigt durch die Näherungsgleichung

$$h'_0 = h [1 - (3\alpha - \alpha') t]. \quad (7)$$

Der scheinbare Ausdehnungskoeffizient der Manometerflüssigkeit gegen das Skalenmaterial ($3\alpha - \alpha'$) beträgt z. B. für Quecksilber-Messing $1,63 \cdot 10^{-4}$, für Quecksilber-Glas $1,74 \cdot 10^{-4}$. Bei einer Temperatur $t = 20^{\circ}$ C wäre demnach die abgelesene Flüssigkeitssäule um 0,33% bzw. 0,45% zu kürzen.

¹ Über lineare Ausdehnung fester Körper siehe Abb. 98, S. 679.

Einen Überblick über das spezifische Gewicht und den kubischen Ausdehnungskoeffizienten für verschiedene Manometerflüssigkeiten gibt Tabelle II wieder¹.

Tabelle II. Spezifisches Gewicht γ (kg/l bei 20°C) und der kubische Ausdehnungskoeffizient ($3\alpha \cdot 10^3$) einiger Manometerflüssigkeiten.

Substanz	γ	$3\alpha \cdot 10^3$ bei 20° C	Substanz	γ	$3\alpha \cdot 10^3$ bei 20° C
Äthyläther	0,714	1,66	Petroleum	~0,85	0,96
Äthylbromid	2,172	2,2	Quecksilber	13,546	0,18
Benzol	0,879	1,24	Schwefelkohlenstoff	1,263	1,22
Bromoform	2,903	0,9	Tetrachlorkohlenstoff	1,594	1,24
Chloroform	1,493	1,27	Toluol	0,866	1,10
Methylalkohol	0,792	1,26	Trikresylphosphat .	1,179	1,2
Nitrobenzol	1,203	0,84	Xylol, O-	0,863	0,97

Für Wasser bis zu 30° C kann in der Praxis das Gewicht der Raumeinheit gleich 1 kg/l gesetzt werden.

Um die an einem Ort mit der Schwerebeschleunigung g erhaltene Druckhöhe h'_0 auf die normale Schwere $g_n = 980,665 \text{ cm/s}^2$ zu reduzieren, ist sie mit g/g_n zu multiplizieren. Die reduzierte Druckhöhe wird also

$$h_0 = h'_0 g/g_n. \quad (8)$$

Die Kompressibilität der Manometerflüssigkeiten² ist praktisch zu vernachlässigen.

b) Barometer.

Ein fast ausschließlich mit Quecksilber gefülltes Flüssigkeitsmanometer ist das Barometer³, dessen Grundform ein Heberbarometer, Gefäßbarometer oder ein kombiniertes Gefäßheberbarometer ist. Die Abb. 25—27 veranschaulichen dieses zur Messung des atmosphärischen Luftdruckes benutzte Instrument, das auch zur Feststellung von absoluten Drücken $< 1 \text{ at}$ benutzt wird.

Im Gegensatz zu den bisher betrachteten Flüssigkeitsmanometern ist beim Barometer der eine Manometerschenkel geschlossen. Der in diesem befindliche Quecksilbermeniscus wird durch die „Toricellische Leere“ begrenzt, während der im anderen Schenkel befindliche mit der Atmosphäre in Verbindung steht.

Beim Heberbarometer sind beide Spiegel abzulesen, die Höhe der Quecksilbersäule ergibt sich als Differenz der beiden Ablesungen. Die beiden anderen Barometertypen erfordern, falls nicht — wie beim Gefäßbarometer bereits erwähnt — die Nullpunktverschiebung durch

¹ Zusammenstellung von Manometerflüssigkeiten mit ihren Eigenschaften siehe A. Gramberg: Technische Messungen, S. 82. Berlin 1933. Siehe auch R. Winkel: Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 67, 570 (1923). Über spezifische Gewichte auch S. 718.

² Nach Landolt-Börnstein, Roth-Scheel, Physikalisch-chemische Tabellen beträgt der Kompressibilitätskoeffizient $\beta \cdot 10^6$ für Drücke von 1—500 Atm und 0° C für Quecksilber 3,8, für Wasser 43,4.

³ Ausführliches und Literaturangaben über Messung des Luftdruckes siehe H. Geiger u. K. Scheel: Handbuch der Physik, Bd. 2, S. 328f. Berlin 1926.

entsprechende Verkürzung der Skala (reduzierte Skala) berücksichtigt ist, eine Einstellung des Nullpunktes.

Zu beachten ist die Reinheit des Quecksilbers, die richtige Einteilung der Maßstäbe und die senkrechte Anordnung der Quecksilbersäulen. Weiterhin ist die eingangs erwähnte Capillarität, deren Einfluß sich der genauen Berechnung entzieht, sowie der Temperatureinfluß auf Flüssigkeit und Skala zu berücksichtigen. Die mit Gleichung (7) angegebene Temperaturkorrektur¹ kann bei gewöhnlichem Barometerstand² für Barometer mit Messing-skalen von $t^{\circ}\text{C}$ in der Praxis mit genügender Genauigkeit dadurch in Rechnung gesetzt werden, daß von der sorgfältig abgelesenen Quecksilberhöhe $t/8\text{mm QS}$ abgezogen werden. (Bei Glasskalen etwa $t/7,5\text{mm QS}$.) Zur Vermeidung der beim Fallen und Steigen des Barometers auftretenden Störungen durch Kleben des Quecksilbers ist die Ablesung stets nach leichtem Klopfen oder Neigen des Barometers vorzunehmen. Zur Kontrolle des Barometers ist ein Vergleich mit einem Normalbarometer, einem Instrument besonderer Vollkommenheit, durchzuführen.



Abb. 25. Heberbarometer.



Abb. 26. Gefäßbarometer.



Abb. 27. Gefäßheberbarometer.

Der Vergleich verschiedener Barometerstände erfordert noch die schon erwähnte Berücksichtigung der Schwereänderung. Sie wird durchgeführt durch Multiplikation des örtlichen Barometerstandes mit $g/g_n = 1 - 0,0026 \cos 2\varphi - 0,0000003 H$, wobei φ die geographische Breite und H (m) die Höhe über dem Meeresspiegel bedeutet. Diese Korrektur ist für technische Messungen jedoch nicht erforderlich. Ebenso kann bei gewöhnlichen Temperaturen auch die durch Quecksilberdampf im geschlossenen Schenkel hervorgerufene Depression³ (bei 40°C erst $\approx 0,01\text{ mm}$) ganz unberücksichtigt bleiben.

¹ Tabellen zur Reduktion des Barometerstandes auf 0° siehe H. Holborn, K. Scheel u. F. Henning: Wärmetabellen, S. 30. Braunschweig 1919. — Landolt-Börnstein, Roth-Scheel: Physikalisch-chemische Tabellen, Bd. 1, S. 68—69. Berlin 1923. — Kohlrausch, F.: Lehrbuch der praktischen Physik, 16. Aufl., Tabelle 8, S. 814. Leipzig u. Berlin 1930. — Fick, H.: Barometerreduktion und Ermittlung des absoluten Luftdruckes. Wärme 54, 935 (1931).

² Der Barometerstand schwankt um den Normalwert von 760 mm QS um etwa $\pm 5\%$.

³ Sättigungsdruck von Quecksilber siehe F. Kohlrausch: Fußnote 1, Tabelle 15, S. 824.

Abgekürzte Barometer werden häufig als Vakuummeter verwendet. Bei ihnen ist der lange Schenkel gekürzt, so daß die Quecksilbersäule in dem geschlossenen Rohr erst nach Eintritt eines bestimmten Unterdruckes eine Messung gestattet. Zur Feststellung des Kondensatordruckes z. B. sind diese Manometer besonders zweckmäßig, da sie den gewöhnlichen Flüssigkeitsmanometern gegenüber nicht das Vakuum, sondern den absoluten Druck anzeigen und damit Angaben liefern, die unabhängig von dem jeweiligen Barometerstand und der Höhenlage des Ortes sind. Das Vakuum, der Unterdruck unter dem atmosphärischen Druck, ist wieder für andere Fälle maßgebend¹, wobei dann auch die Angabe umgerechnet in % des augenblicklichen Barometerstandes erfolgt. Die Ablesungen sind bei genauen Messungen mit den erwähnten Korrekturen zu berichtigen.

Die vorteilhafte Vereinigung des Quecksilberbarometers mit dem Quecksilber-Vakuummeter in einer Apparatur zu dem sog. Baro-Vakuummeter² ermöglicht durch entsprechende Einrichtungen die unmittelbare Ablesung des absoluten Druckes sowie auch die Angabe des Vakuums bezogen auf den Barometerstand.

Zur Registrierung des Vakuums werden die auf dem Prinzip der kommunizierenden Röhren beruhenden Vakuummeter in gleicher Art wie bei den Über- oder Unterdruckmessern mit einem Schwimmer versehen³, wobei durch entsprechende Wahl der Rohrquerschnitte die Schreibhöhe den betrieblichen Erfordernissen leicht angepaßt werden kann. Ebenso lassen sich die Anforderungen der Praxis nach Schreibinstrumenten zur Aufzeichnung von Über- und Unterdrücken befriedigen. Die Schwimmerbewegung wird direkt oder auch unter Verwendung einer magnetischen Kuppelung und Hebelübersetzung auf das Diagramm übertragen. Die mit diesen zuverlässigen Instrumenten erreichbare Anzeigegenauigkeit ist groß, da die großen verfügbaren Verstellkräfte eine große Empfindlichkeit bedingen.

c) Mikromanometer.

Mit kleiner werdenden Drücken wachsen die Anforderungen, die an die Ablesegenauigkeit eines Manometers gestellt werden müssen. Bei den erwähnten einfachen U-förmigen Flüssigkeitsmanometern lassen sich ohne besondere Hilfsmittel die Flüssigkeitssäulen bis auf einige $\frac{1}{10}$ mm nur bei sorgfältigster Schätzung bestimmen. Durch Verwendung von Manometerflüssigkeiten mit geringem spezifischen Gewicht — besonders von fettlösenden organischen Flüssigkeiten, bei welchen weniger Störungen durch Capillarkräfte auftreten —, kann in manchen Fällen eine für die Praxis ausreichende Genauigkeit erreicht werden.

¹ Faber, O. M. u. A. Wömpener: Vakuumuntersuchungen. Meßtechn. 5, 189 (1929). — Gramberg, A.: Technische Messungen bei Maschinenuntersuchungen und zur Betriebskontrolle. Maschinentechnisches Versuchswesen, Bd. 1, S. 73. Berlin 1933.

² Verschiedene Ausführungsformen von Quecksilber-Baro-Vakuummetern sowie von registrierenden Vakuummetern siehe O. M. Faber u. A. Wömpener, Fußnote 1 (S. 193).

³ Über die registrierende Barowaage siehe S. 626.

Bei Drücken von wenigen mm Wassersäule (WS) aber sind besondere Vorrichtungen erforderlich, um größere Meßfehler zu vermeiden. Die zum Messen kleiner Drücke benutzten Mikromanometer¹ gestatten eine Genauigkeit, die für technische Messungen im allgemeinen nicht ausgenützt wird. Hier begnügt man sich mit einer Genauigkeit von etwa $\frac{1}{20}$ bis $\frac{1}{100}$ mm, legt dabei aber besonderen Wert auf betriebs-sichere, bequem zu handhabende Meßgeräte.

Bei den auf dem Prinzip der kommunizierenden Röhren beruhenden Mikromanometern, die in verschiedenen Ausführungsformen käuflich sind, wird im einfachsten Falle die Steigerung der Meßgenauigkeit durch eine erhöhte Ablesegenauigkeit erreicht. Weitere Vergrößerungen der Empfindlichkeit werden erzielt durch Verwendung von zwei sich nicht mischenden Manometerflüssigkeiten mit nahezu gleichem spezifischen Gewicht, von Manometern mit unveränderlicher oder mit verstellbarer Neigung der Schenkel.

Werden z. B. die bisher erwähnten einfachen Flüssigkeitsmanometer mit senkrechten Schenkeln mit besonderen Ablesevorrichtungen versehen, dann lassen sich auch kleine

Spannungsunterschiede mit ausreichender Genauigkeit ermitteln. Häufige Anwendung finden „Visiere“, die durch eine einwandfreie Führung stets genau in derselben Horizontal-

ebene bewegt und auf die Flüssigkeitskuppe so eingestellt werden, daß die horizontale Tangente an die Kuppe in die Visierebene fällt. Mit Hilfe von optischen Einrichtungen, von Nonius, Mikrometer sowie unter Anwendung der Gesetze der Spiegelung bei der Methode der Spitzeneinstellung lassen sich die Höhen der Flüssigkeitssäulen mit großer Genauigkeit ermitteln [s. z. B. K. Scheel: Grundlagen der praktischen Metronomie, S. 50. Braunschweig 1911]. Von den verschiedensten Ausführungen seien hier besonders erwähnt das Mikromanometer von Prandtl [L. Prandtl u. O. Tietjens: Hydro- und Aeromechanik, Bd. 2, S. 251. Berlin 1931] (Abb. 28) und das Wasserminimeter²

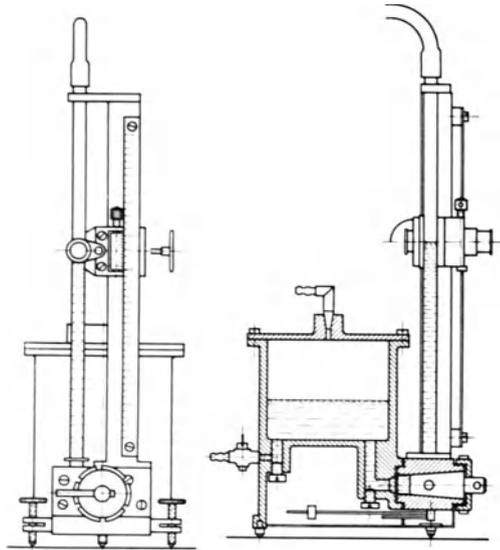


Abb. 28. Mikromanometer nach Prandtl.

¹ Näheres bei O. M. Faber: Mikromanometeruntersuchungen. Meßtechn. 5, 121 (1929). — Wien, W. u. F. Harms: Handbuch der Experimentalphysik, Bd. IV/1, S. 513f. Leipzig 1931.

² Askania-Werke A. G., Berlin-Friedenau. Näheres in den Mitteilungen der Wärmestelle, Mitt. Nr. 76, S. 412; Ref. Stach in Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 69, 1281 (1925).

der Askania-Werke (Abb. 29). Beide Manometer haben weite senkrechte Schenkel, von denen der eine zur Vermeidung der erwähnten

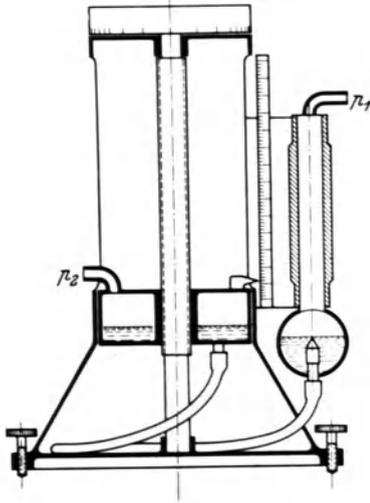


Abb. 29. Wassermanometer (Askania-Werke).

nachteiligen Capillarwirkung besonders stark erweitert ist. Während bei dem ersteren die Abmessung von Flüssigkeitssäulen bis etwa 300 mm WS unter Benutzung von Nonius, Hohlspiegel und Lupen bis auf 0,05 mm genau erfolgen kann, wird bei dem letzteren bei etwa 120 mm WS Meßbereich eine Genauigkeit von 0,01 mm erreicht. Dieses Minimeter ist ein Vertreter der Spitzenmanometer, bei dem das weite Gefäß durch eine Meßspindel mit besonderer Feinteilung von der zuvor festgestellten Nullage so weit gehoben bzw. gesenkt wird, bis wieder eine im feststehenden engeren Schenkel angebrachte feine Spitze ihr Spiegelbild an dem Meniscus gerade berührt. Von besonderem Vorteil ist hier die Unabhängigkeit von etwaigen ungleichen Weiten der beiden Manometerschenkel, sowie der Fortfall von besonderen Nacheichungen.

Eine Vergrößerung der Meßgenauigkeit wird weiter erreicht durch die Verwendung von zwei Manometerflüssigkeiten. Die eigentliche Sperrflüssigkeit wird hier mit einer Hilfsflüssigkeit überschichtet, deren spezifisches Gewicht γ' möglichst nahe dem Wert γ_h kommt. Bei dieser in der Praxis allerdings wenig benutzten Methode, welche die Beachtung besonderer Vorsichtsmaßregeln erfordert, werden beide Manometerschenkel etwa wie in der Abb. 30 mit Flüssigkeit gefüllt. Wirksam wird nur die Differenz der spezifischen Gewichte ($\gamma_h - \gamma'$) kg/m^3 . Es wird, wenn die abgelesene Höhe wieder mit h (m) bezeichnet und die in den Querschnittserweiterungen auftretende geringe Höhendifferenz vernachlässigt oder mit Hilfe der Hähne besonders ausgeglichen wird, der Über- bzw. Unterdruck

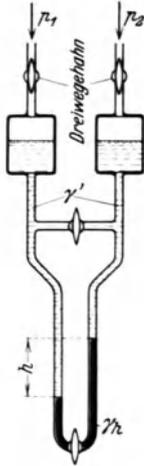


Abb. 30. Mikromanometer mit Hilfsflüssigkeit.

Die Methode erfordert zwischen den Flüssigkeiten eine scharfe Trennfläche, eine Bedingung, die bei Flüssigkeiten mit nahezu gleichem spezifischen Gewicht kaum zu erfüllen ist. Als praktisch brauchbar gegen Wasser haben sich zur Messung kleiner Drücke von den in der Tabelle 11 aufgeführten Flüssig-

$$\Delta p = h (\gamma_h - \gamma') = h \cdot n \text{ kg/m}^2. \quad (9)$$

Für $n = \gamma_h - \gamma' = 0,1 \text{ kg/m}^3$ wird bei einem Überdruck von $1 \text{ kg/m}^2 = 1 \text{ mm WS}$ die abzulesende Flüssigkeitssäule $h = 10 \text{ mm}$.

keiten erwiesen¹: Äthyläther, Äthylenbromid², Bromoform, Schwefelkohlenstoff, Toluol und Xylol.

Da einige Flüssigkeiten mehr oder weniger schnell durch Wasseraufnahme ihr spezifisches Gewicht ändern, sind sie öfters zu erneuern bzw. zu überprüfen. Günstig in dieser Beziehung ist die durch Abb. 31 wiedergegebene Anordnung nach H. Krey³. Hier wird mit den Bezeichnungen der Abb. 31, wenn das Einheitsgewicht des Wassers 1 ist, $\gamma' = 1 - a/b$. Damit wird

$$\Delta p = (1 - \gamma') h = \frac{a}{b} h \text{ kg/m}^2, \quad (10)$$

wobei das Verhältnis a/b das Einheitsgewicht der Übertragungsflüssigkeit im Augenblick der Messung kennzeichnet.

Bei den vorgenannten Mikromanometern läßt sich eine Änderung des Meßbereichs und eine Erhöhung der Genauigkeit durch Benutzung passender Manometerflüssigkeiten durchführen. Es ist dies aber nur in gewissen Grenzen und nicht bei allen Ausführungsarten leicht möglich. Um geringe Druckhöhen in erforderlichem Maße leicht zu vergrößern, gibt man entweder beiden Manometerschenkeln oder nur dem Meßschenkel eine bestimmte Neigung, wobei die Schenkel gerade oder auch gebogen ausgeführt werden.

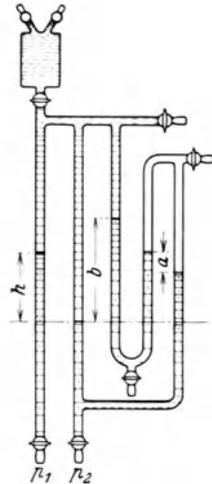


Abb. 31. Mikro-manometer nach Krey.

Das durch Abb. 32 z. B. dargestellte einfache Mikromanometer ist ein U-Rohrmanometer, dessen parallele Beobachtungsröhre um einen der gewünschten Empfindlichkeit entsprechenden Winkel ϵ gegen die Horizontale geneigt sind. Ebenso sind auch bei der Drucklibelle von Toepler [Über absolute Temperaturbestimmung mittels Messung barometrischer Druckdifferenz. Ann. Physik u. Chem. 56, 609 (1895)] (Abb. 33) die zwei geraden Meßschenkel (Durchmesser etwa 3 mm) um einen bestimmten Winkel geneigt.

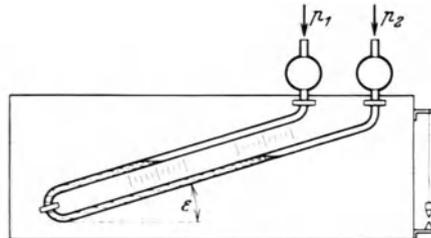


Abb. 32. Geneigtes U-Rohrmanometer.

Das Manometer der Abb. 32 wird in der Praxis nur gelegentlich verwendet, da die Ungenauigkeit der beiden Meßrohre und auch die Ablesung der beiden Menisken Schwierigkeiten bereitet. Sind h_1 und h_2 die Ausschläge, so beträgt die vorliegende Druckdifferenz

$$\Delta p = \sin \epsilon \gamma_h (h_1 + h_2) = C \cdot h \text{ kg/m}^2. \quad (11)$$

¹ Siehe Fußnote 1, S. 616.
² Näheres bei W. Pflaum: Beitrag zur Mengenmessung strömenden Dampfes mittels Stauringen. Forsch.-Arb. Ing.-Wes. 1928, Heft 298, S. 8–9.
³ Näheres vgl. R. Winkel: Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 67, 571 (1923).

Bei der Drucklibelle soll die leicht bewegliche Flüssigkeitssäule mindestens 200—300 mm lang sein. Die Verschiebung h der Flüssigkeitssäule wird mikroskopisch gemessen, wobei sich alsdann der Über- oder Unterdruck ergibt zu

$$\Delta p = 2 \sin \varepsilon \gamma_h h = C' \cdot h \text{ kg/m}^2. \quad (12)$$

Es wird auch bei entsprechender Einrichtung zur Erhöhung der Meßgenauigkeit nach Art der Nullmethode der Winkel ε gemessen, um den das Manometer bis zur Kompensation des zu messenden Druckes geneigt werden muß, bis der Spiegel im Ableseschenkel wieder die Ausgangsstellung eingenommen hat. Wenn hierbei der Abstand der beiden Flüssigkeitskuppen mit a bezeichnet wird, ist der herrschende Druckunterschied

$$\Delta p = a \gamma_h \sin \varepsilon = C \cdot \sin \varepsilon \text{ kg/m}^2. \quad (13)$$

Mit mikroskopischer Ablesung sollen hierbei noch 10^{-4} mm WS bemerkbar sein.

Mikromanometer, bei denen nur das Meßrohr geneigt wird, sind Gefäßmanometer, die den jeweiligen Meßzwecken entsprechend in einer Reihe von Ausführungen vorhanden sind. Das an dem weiten Gefäß (Durchmesser 80—100 mm) angebrachte Meßrohr (Durchmesser 2—3 mm) ist je nach der benötigten Empfindlichkeit mehr oder weniger stark geneigt. Die Abb. 34 zeigt ein einfaches Mikromanometer in schematischer Darstellung. Für die in diesem Falle festgelegte Empfindlichkeit wird der zu bestimmende Überdruck oder Zug

$$\Delta p = h \left(\sin \varepsilon + \frac{f}{F} \right) \gamma_h \text{ kg/m}^2. \quad (14)$$

Das Übersetzungsverhältnis $1 : (\sin \varepsilon + f/F)$ ist durch Eichung¹ genau zu ermitteln. Zu diesem Zwecke wird eine abgewogene Menge $G_0 = V_0 \gamma_h$ (kg) der Manometerflüssigkeit (γ_h kg/m³) in das weite Gefäß vom Querschnitt F gefüllt und die Verschiebung der Flüssigkeitssäule h_0 (m) im Meßrohr vom kleineren Querschnitt f durch Ablesung ermittelt. Ent-

¹ Näheres über die Eichung von Mikromanometern siehe M. Berlowitz: Neuerungen an Mikromanometern. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 61, 971 (1917). — Litinsky, L.: Messung großer Gasmengen, S. 49f. Leipzig 1922. — Levy, Fr.: Ein einfaches Verfahren zur Eichung von Mikromanometern. Ztschr. Instrumentenkunde 45, 515 (1925). — Gramberg, A.: Technische Messungen, S. 84. Berlin 1933.

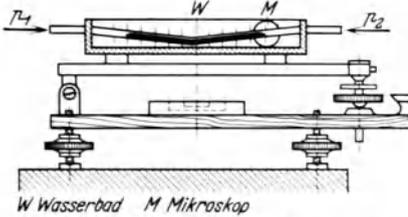


Abb. 33. Drucklibelle von Toepler.
W Wasserbad, M Mikroskop.

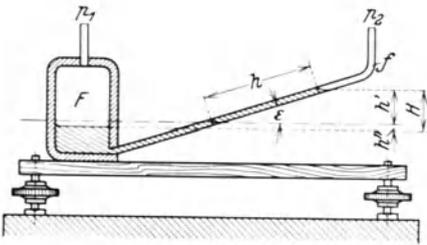


Abb. 34. Mikromanometer mit geneigtem, festem Meßrohr.

sprechend dem Neigungswinkel ε steigt die Flüssigkeit im Gefäß und Rohr senkrecht um $H = h_0 \cdot \sin \varepsilon$ (m). Da

$$V_0 = G_0/\gamma_h = F H + f h_0$$

$$V_0/F = G_0/\gamma_h F = h_0 \cdot (\sin \varepsilon + f/F),$$

wird der Druck ($p_1 - p_2$) bei einer beliebigen Meniscusverschiebung h

$$\Delta p = h \frac{V_0}{h_0 F} \gamma_h = h \frac{G_0}{h_0 F} \text{ kg/m}^2. \quad (15)$$

Wird G_0 in g, F in cm^2 und der Ausschlag h_0 des Flüssigkeitsfadens in mm gemessen, so wird die gesuchte Übersetzung $10 G_0/h_0 \cdot F$. Die Belastung der Flüssigkeit im weiten Gefäß ist hierbei $10 G_0/F \text{ kg/m}^2$ oder mm WS, sie ruft den Ausschlag von h_0 mm hervor.

Zu beachten ist die solide und sorgfältige Aufstellung der Mikromanometer, die mit Hilfe von Stellschrauben und

unter Benutzung von fest angebrachten Wasserwaagen erfolgt. Wegen des engen Meßrohres haben diese Instrumente eine lange Einstellzeit. Bei Neigungen unter 1:25 machen sich die unvermeidlichen Fehler des Meßrohres (Durchbiegung, ungleiche Weite, veränderliche Capillarität) bemerkbar. Es ist dann erforderlich, durch genaue, schrittweise Eichung der einzelnen Skalenabschnitte die Unregelmäßigkeit der Verschiebungen des Meniscus zu ermitteln. Für geringere Ansprüche an die Genauigkeit werden in der Praxis einfachere Mikromanometer nach Art der Abb. 35 benutzt (Neigung 1:10).

Da die Feindruckmesser mit festem Meßrohr nur für eine festgelegte Empfindlichkeit verwendet werden können, werden sie zur Vermeidung dieses Nachteils auch mit zwei festen Meßröhren versehen (Abb. 36). Ihre Neigungen werden entsprechend den betrieblichen Anforderungen und mit der Beziehung $\sin \varepsilon = H/h - f/F$ bestimmt. Ohne besondere Änderungen am Meßinstrument lassen sich dadurch kleine und auch größere Druckunterschiede ermitteln.

Um über beliebige Meßbereiche verfügen zu können, wird das Meßrohr schwenkbar angeordnet. Die bei den älteren Bauarten auftretende nachteilige Nullpunktverschiebung bei Änderung der Empfindlichkeit

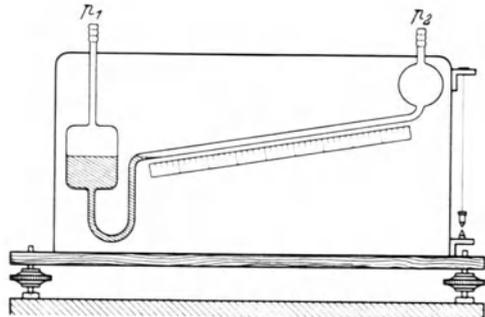


Abb. 35. Einfaches Schrägröhrmanometer.

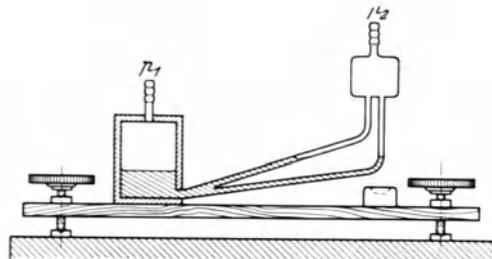


Abb. 36. Mikromanometer nach Rosenmüller mit zwei geneigten, festen Meßröhren.

ist bei der von Berlowitz [Neuerungen an Mikromanometern. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 61, 969 (1917)] angegebenen Anordnung vermieden. Der Nullpunkt des schwenkbaren Meßrohres (bei Berücksichtigung der Capillarerhebung) liegt hier in der Drehachse. Der Fortfall der zeitraubenden Nullpunktsbestimmung ist für die praktische Anwendung von besonderem Vorteil. An einem Kreisbogen sind entweder unmittelbar die Übersetzungen oder eine Kreisbogenteilung in $\frac{1}{2}^{\circ}$ eingerissen. Durch Anbringen einer weiteren Längslibelle auf dem schwenkbaren Meßrohr können Messungen bis auf 0,01 mm WS durchgeführt werden.

Noch größere Empfindlichkeiten (bis 10^{-3} mm WS) lassen sich erreichen, wenn die Neigung des Meßrohres ermittelt wird, welche erforderlich ist, um die Ausgangsstellung der Flüssigkeitskuppe wieder zu erreichen. Die angeführten störenden Fehler der Meßcapillaren werden hierdurch ausgeschaltet.

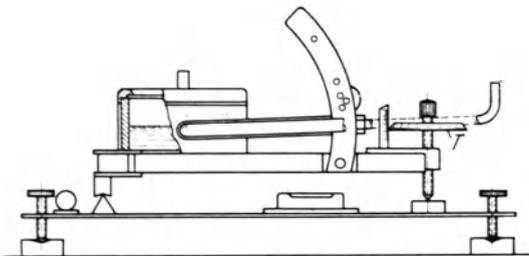


Abb. 37. Mikromanometer nach Rosenmüller.

Bei dem durch Abb. 37 im Schema wiedergegebenen Mikromanometer von Rosenmüller¹ wird z. B. mit Hilfe der Meßtrommel *T* die Neigungsänderung ermittelt. Die Apparatkonstanten sind dabei so gewählt, daß die Multiplikation der mit der Meß-

trommel festgestellten Änderung mit 10^{-3} den zu bestimmenden Druck gleich in mm WS ergibt. Bei schnell verlaufenden Druckschwankungen wird die notwendige Vergrößerung der Trägheit des Meßinstrumentes durch Capillarwiderstände, die linear dämpfen, herbeigeführt.

Die Länge des Meßrohres beträgt bei den Schrägrohrmanometern im allgemeinen 200 mm. Um den Meßbereich zu erweitern, werden an Stelle von geradlinigen auch gebogene Meßrohre verwendet. Die Krümmung dieser Rohre ist dabei entweder ungleichförmig oder gleichförmig.

Eine ungleichförmige Krümmung des Meßrohres besitzt das Mikromanometer von Neumann². Die Krümmung verläuft bei diesem Feindruckmesser zunächst flach, um alsdann nach oben in einen senkrechten Verlauf überzugehen. Neben dem Vorteil eines größeren Meßbereichs hat dieses Meßinstrument bei niedrigen Drücken eine größere absolute Empfindlichkeit als bei höheren Drücken. Es lassen sich demnach in dem ganzen Meßbereich Druckmessungen mit annähernd der gleichen prozentualen Genauigkeit durchführen. Für die Verwendung in technischen Betrieben ist die leichte Zerstorbarkeit des Manometers

¹ Firma A. Rosenmüller, Mechanische Werkstätten, Dresden-N 6. Siehe M. Rosenmüller: Neuere Meßgeräte zu Untersuchungen von Luftströmungen. Meßtechn. 2, 343 (1926).

² Vgl. O. M. Faber: Mikromanometeruntersuchungen. Meßtechn. 5, 125 (1929). — Wien, W. u. F. Harms: Handbuch der Experimentalphysik, Bd. IV/1, S. 523. Leipzig 1931. — Weitere Mikromanometer siehe L. Litinsky: Messung großer Gasmengen, S. 54. Leipzig 1922. — Over, E.: The Measurement of Air Flow, S. 175. London 1933.

von Nachteil. Die gänzliche Durchsichtigkeit wiederum ermöglicht die leichte Feststellung der störenden Gassäcke und die einfache Überwachung des Instrumentenzustandes während der Messungen.

Erwähnt sei auch das Mikromanometer von Faber¹, bei dem das Meßrohr schraubenförmig um einen Zylinder angeordnet ist. Zur bequemen Ablesung kann der Zylinder mit der Meßspirale, deren Gänge nach oben höher werden, gedreht werden.

Bei gleichförmiger Krümmung des Meßrohres wird eine gleichbleibende Empfindlichkeit für den ganzen Meßbereich erreicht. Von den Manometern mit kreisförmig gebogenen Schenkeln sei das in der Technik vielfach angewendete Kreisrohrmanometer (Ringwaage oder Druckwaage) angeführt. Wie die Abb. 38 und 39 erkennen lassen, sind dies Flüssigkeitsmanometer, deren Schenkel sich um den Kreismittelpunkt M drehen. Durch elastische Verbindungen werden die Drücke auf die Sperrflüssigkeit übertragen. Die Menge und Art der Sperrflüssigkeit richtet sich nur nach der Größe des zu messenden Druckes und der mit ihr in Berührung stehenden Füllflüssigkeit. Sie selbst übt kein Drehmoment aus. Ihr wirksames spezifisches Gewicht kommt nicht zur Geltung. Unter dem Einfluß des Über- bzw. Unterdruckes wird die Sperrflüssigkeit verschoben, bis bei dem Winkel ε die neue Gleichgewichtslage erreicht ist. Für diese gilt alsdann die Beziehung [A. Gramberg: Technische Messungen bei Maschinenuntersuchungen und zur Betriebskontrolle, 6. Aufl., S. 86. Berlin 1933]

$$\Delta p = \frac{G a \sin \varepsilon}{R q}, \quad (16)$$

wobei G das Gewicht des beweglichen Systems bedeutet, dessen Schwerpunkt S im Abstand a unter dem Drehpunkt M liegt. R ist der Radius des Kreisrohres vom Querschnitt q .

Die Proportionalität zwischen der Druckdifferenz Δp und dem Ausschlagwinkel ε besteht auch bei der nur halbkreisförmig ausgebildeten Druckwaage der I. G. Farbenindustrie A.G. (Abb. 39). Hier tritt ein zusätzlich wirkendes Moment auf, das von der nicht ausgeglichenen Füllflüssigkeit (γ' kg/m³) herrührt.

Die Empfindlichkeit der Kreismanometer kann durch einfache Schwerpunktsverlegung beliebig verändert werden, wobei natürlich stets die stabile Gleichgewichtslage erhalten bleiben muß.

Schreibende Manometer erfordern ein Mindestmaß an Verstellkraft. Da bei den Schrägrohrmanometern nur sehr kleine Volumenverschiebungen auftreten, ist hier im Gegensatz zu den Kreismanometern eine

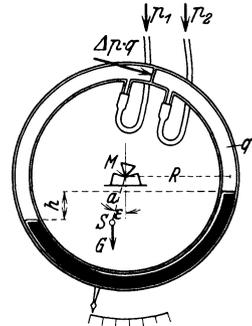


Abb. 38. Ringwaage.

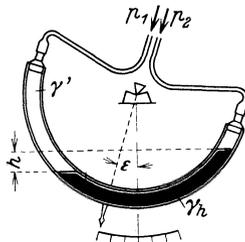


Abb. 39. Halbkreisförmige Druckwaage.

¹ Faber, O. M.: Fußnote 2, S. 624.

Registrierung oder auch Fernanzeige bzw. Fernregistrierung nicht leicht zu ermöglichen. Bei Mikromanometern mit Quecksilber als Sperrflüssigkeit lassen sich die von Simon und Fehér [Eine neue Methode zur Messung kleiner Drücke mit Fernanzeige. Ztschr. Elektrochem. 35, 162 (1929)] angegebenen Methoden verwenden. Das Meßrohr ist als Kondensator ausgebildet. Eine Druckveränderung durch Steigen der Quecksilbersäule verändert die Kapazität des Kondensators und verstimmt dadurch einen in Resonanz befindlichen Sende- und Empfängerschwingungskreis. Das im Schwingungskreis liegende Milliampèremeter zeigt daraufhin einen entsprechenden Ausschlag.

Für geringere Genauigkeit wurde ein gleichmäßig aufgewickelter Widerstandsdraht (Konstantendraht von 0,1 mm Durchmesser) in dem Meßrohr angeordnet. Dieser wurde entweder in den Heizstromkreis einer Elektronenröhre geschaltet oder auch direkt in den Stromkreis einer Heizbatterie. Die durch Druckänderungen herbeigeführten Widerstandsänderungen rufen eine am Milliampèremeter ablesbare Stromänderung im Anodenstromkreis bzw. in dem Gesamtstromkreis hervor¹. Die erreichte Genauigkeit wird bei diesen Anordnungen mit 0,1 bzw. 0,2 mm angegeben.

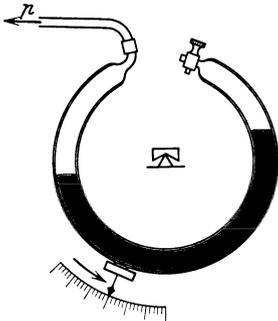


Abb. 40. Prinzip der Barowaage.

Erwähnt sei noch die Verwendung der Photozelle [H. Simon u. R. Suhrmann: Lichtelektrische Zellen und ihre Anwendung. Berlin 1932], die in der Meßtechnik zur Anzeige und

Fernmessung immer häufiger angewendet wird. Die Belichtung dieser Zelle wird vom Manometer aus gesteuert. Der hervorgerufene Photostrom ist dem Druck proportional und kann durch entsprechende Anordnung unabhängig gemacht werden von den Schwankungen der benutzten Lichtquelle².

Die Ringwaagen werden zum Zwecke der Zug- und Druckmessung in verschiedenen Ausführungen und Meßbereichen geliefert, und zwar als Anzeige- oder Registriergerät und mit Einrichtung zur Fernanzeige- oder Fernregistrierung. Als eine besondere Ausführung sei hier noch die Barowaage³ erwähnt. Ihr Prinzip läßt die Abb. 40 erkennen. Ein abgekürztes Barometer ist kreisförmig ausgeführt und drehbar gelagert. Die Anzeige oder Registrierung erfolgt hier erst nach Erreichen eines bestimmten (vom Kreisdurchmesser abhängigen) absoluten Druckes. Die Skalenteilung kann erfolgen in mm QS (kleinster Meßbereich 0—35 mm QS) oder in % Vakuum bezogen auf die technische oder auf die physikalische Atmosphäre.

¹ Siehe auch das Schrägrohr-Differentialmanometer von Hallwachs und Langen, S. 641.

² Über die Verwendung der Selensperrschicht-Photozelle zu physikalischen Messungen siehe L. Bergmann: Ztschr. techn. Physik 13, 568 (1932).

³ Firma Hartmann & Braun A.G., Frankfurt a. M.; siehe Meßtechn. 6, 229 (1930). — Möller, J.: Kondensationsüberwachung mit der Barowaage. Wärme 54, 711 (1931).

d) Glockenmanometer.

Zuverlässige Messungen kleiner Gasdrücke lassen sich mit dem Glockenmanometer durchführen. Bei diesem Feindruckmesser taucht eine Schwimmglocke in die Sperrflüssigkeit. Unter der Einwirkung des zu messenden Druckes hebt oder senkt sich die Glocke, bis das durch den Auftrieb geänderte Glockengewicht (G) der vom Druck ausgeübten Kraft das Gleichgewicht hält. Der Hub der Glocke ist somit ein Maß für die Größe des Druckes. Der Hub wird auf eine Schreibtrommel übertragen. Nach Abb. 41 folgt aus der Beziehung für die Gleichgewichtslage und aus derjenigen für die Erhaltung der Sperrflüssigkeit die allgemeine Gleichgewichtsbedingung:

$$G = h F \gamma_h + H_0 f \gamma_h + \left(h \frac{F}{F_1 - f} - H \right) f \cdot \gamma_h \text{ kg.} \quad (17)$$

Ist, wie im vorliegenden Falle, das Glockengewicht $G = H_0 \cdot f \cdot \gamma_h$ konstant, so wird das Übersetzungsverhältnis

$$\frac{H}{h} = \frac{F}{f} \frac{F_1}{F_1 - f} \approx \frac{F}{f}. \quad (18)$$

Da $p_1 - p_2 = h \cdot \gamma_h$, so ist der Überdruck

$$p_1 - p_2 = H \frac{f}{F} \cdot \left(1 - \frac{f}{F_1} \right) \cdot \gamma_h \text{ kg/m}^2. \quad (19)$$

Durch geeignete Wahl der Apparatekonstanten kann die benötigte Empfindlichkeit und die zur Registrierung erforderliche Verstellkraft erreicht werden. Die Empfindlichkeit wird vorwiegend durch die Größe des Glockendurchmessers bestimmt. Mit größer werdender Aufnahmefähigkeit verlängert sich auch die Einstellzeit, so daß besonders empfindliche Glockendurchmesser zur Messung rasch wechselnder Drücke unbrauchbar werden.

Für technische Messungen werden die Glockenmanometer in verschiedenen Ausführungen und Meßbereichen als Druck-, Zugmesser, Druck- und Zugmesser, als Einfach- oder Mehrfachschreiber (Abb. 42¹) gebaut. Vorrichtungen zur Betätigung von Signaleinrichtungen und zur elektrischen Fernübertragung lassen sich leicht anbringen.

Um kleinste Drücke registrieren zu können, werden Relaisapparate benutzt². Beim „Hydro“-Relais wird der Druck zunächst auf einen mit großer Verstellkraft und kleinem Tauchglockenhub ausgestatteten Primärapparat übertragen. Eine auf seiner Glocke befindliche Öltauchung, die sich proportional dem Druck hebt und senkt, steuert einen als Hilfsenergie benutzten Gasstrom, dessen Druck entsprechend der jeweiligen Eintauchtiefe auf einen Sekundärapparat beliebiger Übersetzung übertragen wird. Bei dieser Anordnung sind besondere mechanische Über-

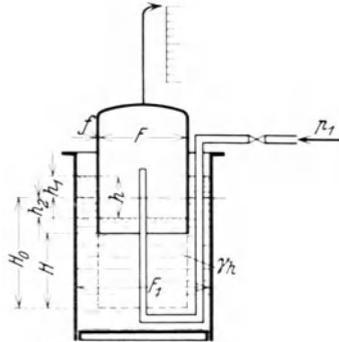


Abb. 41. Prinzip eines Glockenmanometers.

¹ Triplex-Druckzugmesser der „Hydro“-Apparate-Bauanstalt, Düsseldorf.

² Über den Druckwandler der Askania-Werke siehe S. 795.

setzungsmittel wie Hebel, Räderwerke usw. vermieden. Um bei Benutzung einer Hebelübersetzung die notwendigen Kräfte zur Anzeige oder Registrierung von geringen Drücken zu erhalten, werden — wie bei dem Minimaldruckmesser von Schultze-Dosch [L. Litinsky: Messung großer Gasmengen, S. 140. Leipzig 1922] — mehrere miteinander starr verbundene und übereinander angeordnete Tauchglocken benutzt.

Auch bei dem Glockenmanometer wird die Nullpunktmethode benutzt. In diesem Falle wird die an einer Waage aufgehängte und bei Druckausgleich in ihrer Nulllage genau austarierte Glocke nach Einwirkung des Meßdruckes durch Belastung mit G_1 kg wieder in die Anfangslage gebracht. Es ist hier also $H = 0$, so daß entsprechend Gleichung (17) nunmehr wird

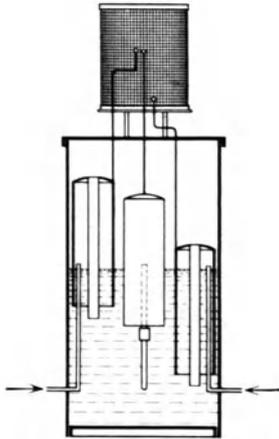


Abb. 42. Mehrfach-Druckzugmesser „Hydro“.

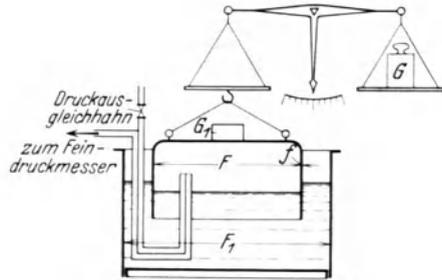


Abb. 43. Eichvorrichtung mit Glockenmanometer.

$$G_1 = h \gamma_h \left(F + \frac{F \cdot f}{F_1 - f} \right) \text{ kg} \quad (20)$$

und damit

$$p_1 - p_2 = \frac{G_1}{F} \left(1 - \frac{f}{F_1} \right) \text{ kg/m}^2. \quad (21)$$

Bei entsprechenden Abmessungen kann der Faktor f/F_1 vernachlässigbar klein werden.

Die Abb. 43 zeigt eine Anordnung zur gleichzeitigen Eichung mehrerer Feindruckmesser mittels Glockenmanometer nach der Nullmethode [F. Levy: Einfaches Verfahren zur Eichung von Mikromanometern. Ztschr. Instrumentenkunde 45, 519 (1925)].

Es sei bereits hier erwähnt, daß die Glockenmanometer auch zur Messung von Druckdifferenzen verwendet werden. Das die Tauchglocke umschließende Gefäß wird alsdann gasdicht ausgeführt¹.

2. Metallmanometer.

Für betriebsmäßige Messungen bleibt die Verwendung von Flüssigkeitsmanometern auf niedrige Drücke beschränkt. Größere Drücke —

¹ Ausführungsbeispiel siehe S. 638 u. 644.

bis 2000 kg/cm^2 und mehr — werden mit Metallmanometern gemessen. In besonderer Ausführung lassen sich mit diesen Druckmessern auch kleinere Drücke ermitteln¹. Die erreichbare Genauigkeit der Metallmanometer ist im allgemeinen nicht so groß wie bei Flüssigkeitsmanometern, da gewisse störende Nebenerscheinungen auftreten. Wegen ihrer Zuverlässigkeit und ihrer bequemen und in manchen Fällen allein möglichen Anwendung sind sie für praktische Messungen unentbehrlich geworden.

Metallmanometer sind mittelbare Druckmesser. Zur Messung werden hier die elastischen Eigenschaften von solchen Stoffen herangezogen, für die innerhalb der Proportionalitätsgrenze die Dehnungszahl verhältnismäßig den Spannungen ist (Hookesches Gesetz, s. S. 698). Die der Druckwirkung ausgesetzten elastischen Körper haben verschiedene Formen. Es werden daher die Metallmanometer je nach der verwendeten Feder unterschieden in Plattenfeder- oder Röhrenfedermanometer (Bourdonisches Manometer). Ihre geringen Deformationen, hervorgerufen durch den zu messenden Druck, werden, durch eine besondere Übertragungsvorrichtung vergrößert, zur Anzeige oder Registrierung gebracht. Die Schreibinstrumente können mit stehender Trommel, Kreisscheibe oder ablaufendem Papierstreifen, mit linearer Einteilung und Geradföhrung der Schreibvorrichtung versehen werden.

a) Plattenfedermanometer.

Beim Plattenfedermanometer wirkt der Druck auf eine gewellte Membran oder eine dünne, gehärtete Stahlblechplatte. Für die Güte der Membran sind Form der Membranwellung, Materialauswahl, Hub und Behandlung (künstliche Alterung) von Bedeutung. Die Platte wird am Umfang fest eingespannt, da bei der geringen Durchbiegung der Platte (1—2 mm) auch kleinste Lagenänderungen zur Vermeidung störender Verstellungen verhindert werden müssen. Abb. 44 zeigt die Konstruktion eines Plattenfedermanometers.

Verwendet werden die Plattenfedermanometer vorwiegend als Vakuummanometer und zur Messung kleiner Drücke. Bei höheren Drücken besteht keine Proportionalität mehr zwischen Hub und Druck. Dies ist ein Nachteil, der für einfache Zeigermanometer bei Herstellung der Skala berücksichtigt werden kann. Derartige Plattenfedermanometer werden daher auch für mittlere Drücke (maximaler Skalenbereich bis etwa 50 kg/cm^2) ausgeführt.

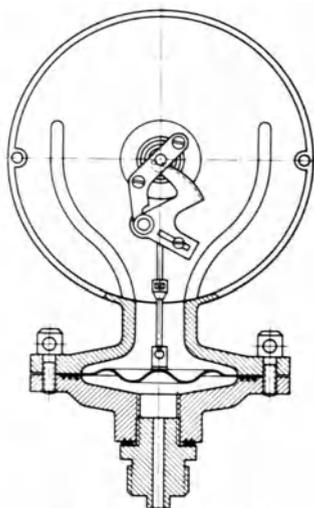


Abb. 44. J.C.E.-Plattenfedermanometer.

¹ Siehe S. 648.

Membranfeindruck- bzw. Zugmesser lassen sich als Kapselfeder-manometer (Abb. 45) für einen Meßbereich von etwa 20 mm WS an bauen. In besonderer Ausführung, z. B. mit einer Spezialbalgmembran¹, bei der mehrere stärkere Membranen hintereinandergeschaltet sind, wird der Meßbereich auch bis auf 10000 mm WS ausgedehnt.

Beeinträchtigt wird die Genauigkeit der Metallmanometer durch elastische Nebenerscheinungen, die praktisch durch Mittelbildung aus den bei Belastung und Entlastung durch Eichung erhaltenen Werten berücksichtigt werden. Ebenso ist der störende Temperatureinfluß zu beachten, der sowohl die Elastizität der Feder als auch die einzelnen Manometerteile verändert, und der bei Plattenfeder-manometern besonders groß ist. Es sind daher alle Manometer vor zu großer Wärme-einwirkung zu schützen, normale Temperaturschwankungen spielen praktisch keine Rolle.

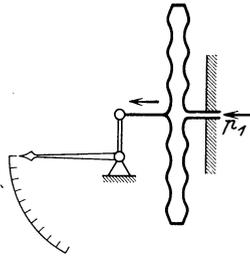


Abb. 45. Schema eines Kapselfeder-manometers.

Als eine besondere Art des Plattenfeder-manometers sei das zur Messung des atmosphärischen Luftdruckes benutzte Aneroidbarometer erwähnt. Bei diesem absoluten Druckmesser, der besonders als Registrierinstrument Verwendung findet und dann mit Aneroidbarograph bezeichnet wird, bilden wellenförmige Membranen den Boden und Deckel einer nahezu luftleeren Dose. Bei Verwendung von dünnen Membranen verhindert eine starke elastische Feder das Ein-drücken der Deckel. Zur Vergrößerung der durch Schwankungen des Luftdruckes verursachten Deformationen werden mehrere Aneriddosen übereinander angeordnet. Durch mehrfache Hebel-übersetzungen werden die geringen Formänderungen auf die Skala oder Registriertrommel übertragen. Die Teilung der Skala erfolgt — wie bei allen Metallmanometern — empirisch, entsprechend den Angaben eines Normal- oder Kontrollinstrumentes.

Die Dosenbarometer sind bequem in ihrer Anwendung. Sie besitzen aber nur bei Beachtung des Einflusses von Temperatur, Hysterese und elastischer Nachwirkung eine ausreichende Genauigkeit. Da sich eine völlige Unabhängigkeit von der Temperatur nicht erreichen läßt, ist der Temperatureinfluß durch besondere Versuche zu ermitteln und als Korrekturfaktor zur Reduktion auf die Eichtemperatur zusammenzustellen. Ebenso sind durch häufige Nacheichungen die störenden elastischen Nachwirkungen zu überwachen.

b) Röhrenfedermanometer.

Eine besonders vielseitige Anwendung für fast alle Drücke finden die durch große Zuverlässigkeit ausgezeichneten Röhrenfedermanometer [G. Klein: Der Genauigkeitsgrad der Federmanometer. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 54, 1283 (1910)] (Abb. 46). Bei ihnen besteht in weiteren Druckgrenzen als bei Plattenfedermanometern Proportionalität zwischen Formänderung und Druck. Die Feder ist kreisförmig gebogen und hat

¹ Firma Dreyer, Rosenkranz & Droop A. G., Hannover.

einen ellipsenähnlichen Querschnitt¹. Mit ihrem offenen Ende ist sie fest im Manometerzapfen gelagert und steht mit ihrem geschlossenen Ende über ein Übersetzungswerk mit dem Zeiger oder Schreibhebel in Verbindung. Wird die Feder von innen mit dem zu messenden Druck belastet, so tritt eine Querschnittsveränderung ein, welche eine Aufbiegung der Feder zur Folge hat. Der an dem beweglichen Ende der Röhrenfeder auftretende Ausschlag ist verhältnisgleich der Überdruckwirkung². Auch hier wird die Skala empirisch durch Vergleich mit einem Normal- oder Kontrollmanometer ermittelt. Die Anordnung der Feder ist verschieden. Material, Querschnitt und Wandstärke der Röhrenfeder richtet sich nach der Druckhöhe und Art der berührenden Flüssigkeit. Von besonderer Wichtigkeit für hoch beanspruchte Federn ist das Herstellungsverfahren [J. Wohlfahrt: Neuzeitliche Druckmessung unter besonderer Berücksichtigung der Schreibmanometer. Ztschr. techn. Physik 5, 361 (1924); 6, 78 (1925)], das mitbestimmend ist für die Größe der elastischen Hysterese. Der Temperatureinfluß auf Röhrenfedermanometer ist gering, er kann bei normalen Schwankungen bei Betriebsmessungen vernachlässigt werden.

Von den zahlreichen Ausführungsarten der Röhrenfedermanometer seien hier einige angeführt.

Für besonders wichtige Meßstellen werden Doppelmanometer verwendet, bei denen zwei voneinander unabhängige Röhrenfedern mit je einem Triebwerk auf einer gemeinsamen oder auf zwei getrennten Skalen spielen. Solange die Zeigerangaben übereinstimmen, kann mit einwandfreier Messung gerechnet werden. Auch die Kontrollmanometer — besondere Präzisionsinstrumente mit Feinteilung für die erforderliche regelmäßige Nachprüfung der Betriebsinstrumente — werden nicht nur als Einfach-, sondern auch als Doppelmanometer ausgeführt. Bis zu Skalenteilungen von 30 oder 50 kg/cm² werden diese Manometer mit einem besonderen Kontrollflansch zum leichten Anschluß an den unter dem Betriebsinstrument befindlichen zugehörigen Kontrollhahn versehen. Zu beachten ist, daß die Kontrollmanometer stets in der Lage (meistens seitlich) verwendet werden müssen, für die sie geeicht worden sind. Vereinzelt wird die Röhrenfeder zur Erhöhung ihrer Federkraft und zum Schutze gegen Überlastungen noch mit einem konzentrisch zur Feder angeordneten Stahldraht ausgerüstet. Zur bequemen Überwachung des Instrumentenzustandes erhalten Schreibmanometer ein

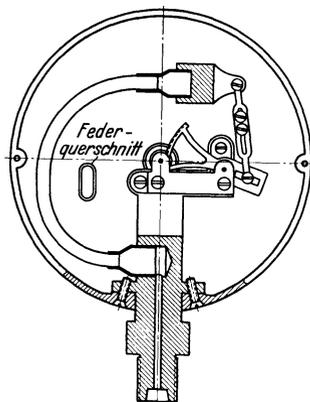


Abb. 46. Röhrenfedermanometer.

¹ Spiralförmig gebogene Federn werden selten benutzt.

² Näheres über die Bourdon-Feder und ihre Theorie siehe z. B. E. Wagner: Metallmanometer als Hochdruckpräzisionsmesser geprüft mit dem Amagatschen Manometer. Ann. Physik 15, 906 (1904). — Lorenz, H.: Theorie der Röhrenfedermanometer. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 54, 1865 (1910); Physikal. Ztschr. 18, 117 (1917).

besonderes Vergleichsröhrenfederanometer, wie dies die Abb. 47¹ veranschaulicht. Diese Schreibmanometer werden auch als Mehrfachinstrumente ausgeführt, wobei getrennte Röhrenfederanometer auf getrennte Diagramme oder auch — zur bequemen Beobachtung eines Druckunterschiedes — auf ein gemeinsames Diagramm arbeiten. Um in bestimmten Fällen für den Bereich des Betriebsdruckes eine größere Schreibhöhe zu erhalten, kann ein bestimmter Teil des unteren Meßbereiches unterdrückt werden. So läßt sich z. B. bei einem Gesamtmeßbereich von 0—250 kg/cm² der Schreibbereich auf 100—250 kg/cm² dadurch bringen, daß erst von 100 at an der Schreibhebel betätigt wird [s. z. B. A. Eucken u. M. Jakob: Der Chemie-Ingenieur, Bd. II/1, S. 22. Leipzig 1932].

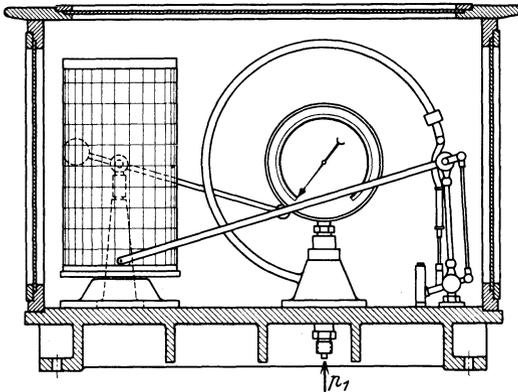


Abb. 47. Großes Schreibmanometer mit Vergleichsinstrument und Geradföhrung.

umgeben. Das Gehäuse steht mit dem Gewindezapfen in Verbindung und wird an den Unterdruckraum angeschlossen. Die Formänderungen der Feder sind alsdann Maße für den absoluten Druck. Auch läßt man eine Barometerfeder auf das Zeigerwerk eines einfachen Vakuummeters einwirken und führt dadurch eine praktische Unabhängigkeit von dem Luftdruck herbei².

Bei einer anderen Kombination der Baro-Vakuummeter, die allerdings in der Praxis kaum verwendet werden, spielt der Zeiger des Barometer- und derjenige des Vakuummeterwerkes auf einer besonderen, feststehenden Skala (System Naumann)³. Diese besitzt eine Reihe von konzentrischen Skalen für Luftdrücke von 720—780 mm QS. Die Ablesung des Vakuummeters erfolgt jeweils auf der vom Barometerzeiger angegebenen Skala. Die Einteilung kann in den verschiedensten Einheiten ausgeführt werden⁴.

¹ Firma Armaturenfabrik Schell & Wilkendorf, Merseburg, vormals Blancke-Werke G. m. b. H., Merseburg.

² Firma Schäffer & Budenberg G. m. b. H., Magdeburg-Buckau.

³ Firma J. C. Eckardt A. G., Stuttgart-Cannstatt. Siehe auch Wärmestelle Düsseldorf, Mitt. Nr. 38, S. 5 und 7.

⁴ Registrierende Baro-Vakuummeter stellt die Firma Dr. Kroeber & Sohn G. m. b. H., Treuenbrietzen her.

Auch zur absoluten Druckmessung werden Röhrenfederanometer benutzt. Die Verwendung bei den zur Messung des atmosphärischen Druckes bestimmten Instrumenten (Barometer und Barograph) ist jedoch vereinzelt. Um bei der Bestimmung des in Vakuumapparaturen herrschenden Druckes von den Schwankungen des Luftdruckes unabhängig zu sein, wird eine evakuierte, empfindliche Röhrenfeder mit einem luftdichten Gehäuse

Eine weitere Ausführung gestattet die direkte Angabe des tatsächlichen Vakuums ohne Umrechnung dadurch, daß der Zeiger des Metallbarometers durch eine Skala ersetzt wird. Diese bewegliche Skala trägt die Teilung für das normale Vakuummeter (System Frerichs)¹.

Die elektrische Fernübertragung der Meßwerte von Platten- und Röhrenfedermanometern kann mit Hilfe eines geeigneten Gebers vorgenommen werden.

Um gewisse Druckbereiche leicht einhalten zu können, werden die Manometer mit Kontaktvorrichtungen ausgerüstet. Besonders bewährt haben sich hierbei Quecksilber-Kipp- und Ringrohrkontakte.

Zur Feststellung von Minimal- und Maximaldrücken werden die Anzeigemanometer mit besonderen Schleppzeigern versehen. Hierbei ist darauf zu achten, daß diese mit geringer Kraft drehbar sind, sich aber nicht durch Erschütterungen des Manometers verstellen.

3. Kolbenmanometer.

a) Gewichtsbelastete Kolben.

Bequeme und genaue Messung hoher und höchster Drücke ermöglichen die Kolbenmanometer [A. Martens: Apparate zur Messung hoher Flüssigkeitsdrücke. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 53, 747 (1909)], von denen verschiedene Arten durchgebildet sind. Das Prinzip dieser Manometer ist folgendes: Auf einen Kolben, der sich in einem mit zäher Flüssigkeit gefüllten, senkrecht stehenden Hohlzylinder bewegt, wirkt der zu messende Druck. Die erforderliche Abdichtung wird erzielt entweder durch sorgfältiges Ineinanderschleifen von Kolben und Zylinder oder durch Benutzung besonderer Lederdichtungen. Zur weitgehenden Herabsetzung der Kolbenreibung werden die Kolben gedreht oder um ihre stets senkrechte Achse um einen kleinen Winkel (40°) pendelartig gleichmäßig hin- und herbewegt. Aus der schematischen Darstellung der Abb. 48 sind die verschiedenen Abdichtungsarten zu ersehen.

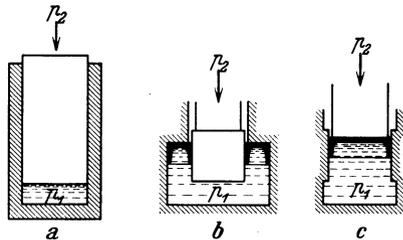


Abb. 48. Schema der Abdichtungen bei Kolbenmanometern. *a*) Eingeschliffener Kolben (Amagat); *b*) Abdichtung mit im Zylinder gelagerter Ledermanschette (Martens); *c*) Ledermanschette am Ende des Kolbens (Stückrath).

Das Gleichgewicht wird herbeigeführt durch bekannte Gewichte. Diese wirken auf den Kolben direkt — wie bei der einfachen Druckwaage² (Abb. 49) — oder bei größeren Drücken über eine geeignete Hebelübersetzung — wie bei der Stückrathschen Druckwaage [s. H. F.

¹ Siehe Fußnote 3, S. 632.

² Beschreibung siehe W. Wien u. F. Harms: Handbuch der Experimentalphysik, Bd. 1, S. 67. Leipzig 1926. — Geiger, H. u. K. Scheel: Handbuch der Physik, Bd. 2, S. 360. Berlin 1926. — Holborn, L.: Die Druckwaage, das Normalinstrument für hohe Drücke. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 67, 188 (1923).

Wiebe: Über die Genauigkeit der Druckmessung mit der Stückrath-schen Druckwaage. *Ztschr. Instrumentenkunde* 30, 205 (1910); *Handbuch der Physik*, Bd. 2, S. 364. Berlin 1926] (Abb. 50).

Eine günstige Reduktion hoher Drücke nach dem umgekehrten Prinzip der hydraulischen Presse wird bei dem durch Abb. 51 veran-

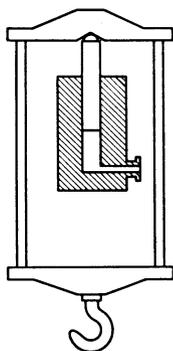


Abb. 49. Schema der einfachen Druckwaage.

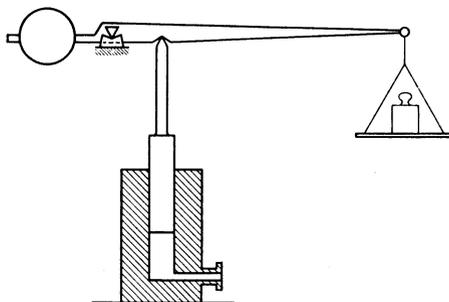


Abb. 50. Schema der Stückrath-schen Druckwaage.

schaulichten Manometer von Amagat [Geiger u. Scheel: *Handbuch der Physik*, Bd. 2, S. 359. Berlin 1926] erreicht. Die auf einen kleineren Kolben k wirkende Kraft wird auf einen größeren Kolben K übertragen, so daß der im Verhältnis der wirksamen Kolbenquerschnitte reduzierte Druck durch die Druckhöhe einer Flüssigkeit leicht und bequem gemessen werden kann.

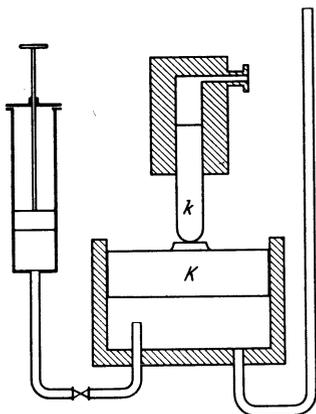


Abb. 51. Schema des Amagat-schen Manometers.

Da die Druckwaagen innerhalb einer gewissen Grenze gegen Druckänderungen unempfindlich sind (Indifferenzbreite), sind jedesmal zwei Wägungen zur Ermittlung des Druckes erforderlich. Die eine wird bei steigendem, die andere bei sinkendem Druck vorgenommen. Die Differenz ergibt die Indifferenzbreite, das Mittel der Bestimmungen den gesuchten Druck [H. F. Wiebe: Über die Genauigkeit der Druckmessung mit der Stückrath-schen Druckwaage. *Ztschr. Instrumentenkunde* 30, 205 (1910)].

Die Messungen setzen die genaue Kenntnis des wirksamen Querschnittes voraus.

Um bei größeren Drücken ($p > 200 \text{ kg/cm}^2$) die ins Gewicht fallenden Änderungen dieser Apparatekonstante durch Nachwirkungserscheinungen und elastische Änderungen möglichst gering zu halten, ist die Verwendung von Material besonders hoher Festigkeit für Kolben und Zylinder erforderlich [s. *Ztschr. Instrumentenkunde* 52, 208 (1932)].

Während für die Druckwaage mit künstlicher Abdichtung des Kolbens durch Ledermanschetten (Abb. 48b) der Kolbenquerschnitt für den wirk-

samen Querschnitt f_w maßgebend ist, ist es bei der Abdichtung des Kolbens mit einer Endstulpe (Abb. 48 c) die Zylinderfläche. Elastische Formänderungen — im ersten Falle bedingt durch die Änderung des Kolbens, im zweiten Falle durch die Zylindererweiterung — sind bei höheren Drücken besonders zu berücksichtigen. Diese Korrekturen sind bei dem Amagatschen Manometer kleiner. Hier ist der wirksame Querschnitt gleich dem Mittel aus dem Querschnitt von Kolben und Zylinder. Da durch den Einfluß des Druckes beide Flächen in entgegengesetzter Richtung beeinflußt werden, bleibt die Änderung des wirksamen Querschnittes f_w gering. Die Veränderung des Zylinderquerschnittes überwiegt.

Ist das Durchmesser Verhältnis D_i/D_a eines Hohlzylinders klein, so wird bei gleichmäßigem Innendruck p (kg/cm^2) die spezifische Dehnung des Zylinderdurchmessers¹ etwa

$$\varepsilon_z = \frac{p}{E} K', \quad (22)$$

wobei E der Elastizitätsmodul (für Stahl $2 \cdot 10^6 \text{ kg}/\text{cm}^2$) und $K' = 1,3$ für $D_i/D_a = 0$. Für den Kolben wird der Grenzwert

$$\varepsilon_K = -\frac{p}{E} (1 - 2\mu), \quad (23)$$

wobei μ die Poissonsche Zahl, für Stahl $\mu = 0,28$, ist. Die Gesamtkorrektur wird damit für das Amagatsche Manometer

$$c = -45 \cdot p^2 \cdot 10^{-8} \text{ kg}/\text{cm}^2. \quad (24)$$

Da eine Abhängigkeit des wirksamen Querschnittes von der Höhenlage des Kolbens vorhanden ist, muß der Kolben zur Vermeidung von Fehlern bei allen Druckmessungen stets die gleiche Normalstellung im Zylinder einnehmen. Die Kolbenstellung kann durch eine mechanische oder optische Anzeigevorrichtung festgestellt werden.

Die wichtige Bestimmung des wirksamen Querschnittes² kann erfolgen durch sorgfältige Abmessung des Kolbendurchmessers und Ermittlung des Zylinderquerschnittes durch Auswägung mit Quecksilber. Genauere Werte ergibt die direkte Eichung mittels der Gewichtsmethode. Dem mit einer bekannten Kraft P in Gewichten belasteten Kolben wird durch einen ebenfalls bestimmbaren Quecksilberdruck das Gleichgewicht gehalten, so daß

$$f_w = \frac{P}{p}. \quad (25)$$

Bei Drücken von $16 \text{ kg}/\text{cm}^2$ werden bei dieser Methode Genauigkeiten von $0,01$ — $0,02\%$ erreicht.

¹ Meißner, W.: Über den Einfluß der elastischen Dehnung des Hohlzylinders auf die Angaben der Stückrathschen Druckwaage. Ztschr. Instrumentenkunde **30**, 137 (1910). — Holborn, L.: Eine Vergleichung verschiedener Druckwaagen. Ann. Physik **54**, 503 (1917). — Wien, W. u. F. Harms: Handbuch der Experimentalphysik, Bd. 1, S. 68. Leipzig 1926. — Geiger, H. u. K. Scheel: Handbuch der Physik, Bd. 2, S. 367. Berlin 1926.

² Siehe z. B. E. Wagner: Metallmanometer als Hochdruckpräzisionsmesser, geprüft mit dem Amagatschen Manometer. Ann. Physik **15**, 906 (1904). — Holborn, L. u. H. Schultze: Über die Druckwaage und die Isothermen von Luft, Argon und Helium zwischen 0 und 200° . Ann. Physik **47**, 1089 (1915).

Durch Veränderung des Kolbenquerschnittes kann der Meßbereich der Kolbenmanometer verändert werden. Um zu kleine Durchmesser bzw. zu große Gewichtsbelastungen zu vermeiden, werden für besonders große Drücke Differentialkolbenmanometer (Abb. 52) benutzt. Bei diesen Manometern hat die bekannte Kraft dem auf die Differenz der beiden Kolbenflächen wirkenden Druck das Gleichgewicht zu halten. Die Empfindlichkeit dieser Manometer ist besonders bei kleinen Drücken gering, so daß eine Eichung mit dem Quecksilbermanometer nicht durchführbar ist.

Genauere Messungen mit Kolbenmanometern verlangen auch die Beachtung der Temperatur. Der Temperatureinfluß ist bei den gebräuchlichen Temperaturen gering, kann aber bei der Stückrathschenschen Druckwaage das Hebelverhältnis störend beeinflussen¹. Immerhin läßt sich bei dieser Waage bis zu Drücken von 500 kg/cm² eine Genauigkeit von 0,05% erreichen². Für das Amagatsche Manometer wurde bis zu Drücken von 100 kg/cm² eine Genauigkeit von 0,01% festgestellt³. Bei Verwendung eines Kolbenquerschnittes von 0,02 cm² erreichte Bridgman Drücke bis 13000 kg/cm², wobei die Empfindlichkeit bei 8000 kg/cm² 0,01% betrug.

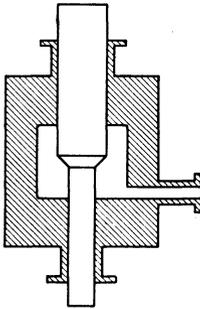


Abb. 52.
Schema des Differentialkolbenmanometers.

Die Kolbenmanometer werden vorwiegend zur Eichung von Druckmessern benutzt. Sie finden auch als Betriebsinstrumente Verwendung (s. z. B. S. 823).

b) Federbelastete Kolben.

Zur Messung periodischer Druckschwankungen in Flüssigkeiten findet der Indicator Verwendung. Von den verschiedenen Ausführungen⁴ sei hier nur der Kolbenindicator angeführt, der am häufigsten zur Aufzeichnung der im Zylinder einer Kolbenmaschine auftretenden Drücke benutzt wird.

Wegen seiner niedrigen Eigenfrequenz ist er jedoch nur für langsam verlaufende Druckänderungen brauchbar⁵. Rasch wechselnde Drücke sind mit Indicatoren hoher Eigenfrequenz aufzunehmen. So z. B. mit dem Mikroindicator, der ohne Hebelübersetzung arbeitet und nach

¹ Siehe S. 700.

² Siehe H. F. Wiebe: Zschr. Instrumentenkunde **30**, 217 (1910). — Geiger, H. u. K. Scheel: Handbuch der Physik, Bd. 2, S. 367. Berlin 1926.

³ Holborn, L. u. H. Schultze: Ann. Physik **47**, 1089 (1915). Siehe auch A. Michels: Genauigkeit und Empfindlichkeit einer Druckwaage mit einem sog. Amagatzylinder. Ann. Physik **73**, 577 (1924).

⁴ Siehe F. Seufert: Technische Untersuchungsmethoden zur Betriebsüberwachung, S. 212f. Berlin 1926. — Steuding, H.: Messung mechanischer Schwingungen, S. 357f. Berlin 1928. Dasselbst ausführliche Literaturangaben. — Gramberg, A.: Technische Messungen bei Maschinenuntersuchungen und zur Betriebskontrolle, S. 298f. Berlin 1933.

⁵ Siehe W. Wilke: Untersuchungen über die Grenzen der Verwendbarkeit des Indicators bei schnell laufenden Maschinen für elastische Medien. Diss. Hannover 1916; Ztschr. Ölmotor **5**, H. 5/6 (1916).

dem Ritzverfahren kleine, mikrophotographisch zu vergrößernde Diagramme aufzeichnet, mit dem optischen Indicator, der eine für den Betrieb umständliche optisch-photographische Registrierung erfordert, oder auch mit dem Punktindicator, dessen Masseneinflüsse weitgehend verringert sind¹. Einfacher ist die massenlose Vergrößerung der zur Druckmessung benutzten geringen Deformationen mit Hilfe der elektrischen Indicatoren².

Der Kolbenindicator ist ein Kolbenmanometer, bei dem die auf den Kolben wirkende Kraft durch eine Feder gemessen wird. Bei den Warmfederindicatoren befindet sich diese Feder im Zylinder des Druckmessers. Diese Instrumente werden durch die bevorzugten Kaltfederindicatoren, deren Feder außerhalb angeordnet ist, verdrängt. Die Erzeugung der Gegenkraft erfolgt meistens durch eine mehrgängige Schraubenfeder, für besondere Zwecke auch durch eine Stabfeder³. Der zeitliche Druckverlauf wird mit Hilfe eines Hebelwerkes durch einen Schreibstift auf die das Diagramm tragende bewegliche Trommel registriert. Die erforderliche Geradföhrung des Schreibzeuges wird vorwiegend durch den Grosby- oder den Thompson- (Ellipsen-) Lenker erzielt. Erforderlich ist Proportionalität zwischen dem Druck und dem Weg der Registrierfeder. Der Antrieb der möglichst leichten Trommel erfolgt zwangsläufig. Bei Kolbenmaschinen geschieht dies z. B. mittels einer Schnur (möglichst undehnbar und immer gespannt) und eines Hubverminderers von einem geeignet sich bewegenden Maschinenteil aus. Um das jedesmalige Auswechseln des Schreibpapiers nach jedem aufgenommenen Diagramm zu vermeiden, werden die Indicatoren auch mit einem Papierband zur fortlaufenden Diagrammaufnahme (Bandindicator) ausgerüstet. Die Verstellung der Schreibtrommel erfolgt dabei selbsttätig. Eine gleichzeitige Bedienung mehrerer Indicatoren oder auch die Entnahme von Diagrammen an schwer zugänglichen Stellen aus der Ferne wird ermöglicht durch elektromagnetische Auslösung.

Durch Eichung [s. A. Gramberg: Technische Messungen, 6. Aufl., S. 317f. Berlin 1933] ist der Federmaßstab, der Ausschlag des Schreibstiftes in mm für 1 at, zu ermitteln. Sie kann erfolgen durch eine Spannungseichung oder durch die vom Verein Deutscher Ingenieure empfohlene Gewichtseichung [s. z. B. Regeln für Abnahmeversuche an Dampfanlagen. VDI-Verlag 1925, S. 2]. Eine Abweichung der Betriebstemperatur t_B von der Eichtemperatur t_E macht wegen der Kolbenerwärmung eine Korrektur erforderlich (etwa 0,4% für $t_B - t_E = 100^\circ$).

4. Differenzdruckmanometer.

a) Einfache Differenzdruckmanometer.

Manometer messen Spannungsunterschiede, da sie den Druck entweder gegenüber dem Atmosphärendruck oder gegenüber dem luftleeren

¹ Näheres über mechanische Spezialindicatoren: Arch. techn. Messen 1931 — T 24, J 137—2.

² Siehe S. 644.

³ Z. B. bei dem Stabfeder-Schnellaufindicator von Maihak A.G., Hamburg.

Raum angeben. Sie sind ausgesprochene Differenzdruckmesser oder auch Differentialdruckmesser, wenn sie zur unmittelbaren Feststellung des Druckunterschiedes von zwei beliebigen Räumen verwendet werden. In besonderen Fällen werden die als anzeigende oder schreibende Instrumente durchgebildeten Differenzdruckmesser auch mit Einrichtungen zur Fernmessung versehen.

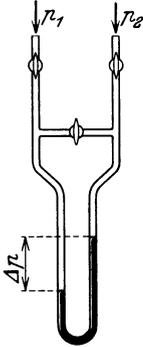


Abb. 53.
Einfacher
Differential-
druckmesser
mit Umgang.

Die angeführten Flüssigkeitsmanometer sind größtenteils ohne weiteres als Differenzdruckmesser brauchbar. Ihre Ausführung hängt dabei ab von der Art und dem statischen Druck der an die beiden Seiten des Meßorgans angeschlossenen Flüssigkeiten und von der Größe der zu messenden Druckdifferenz. Da aber die Differenzdruckmesser gegen Überlastung empfindlich sind (Überwerfen von Sperrflüssigkeit), wird hier, wie auch bei den anderen Ausführungen, ein besonderer Umgang vorgesehen. Abb. 53 veranschaulicht ein Ausführungsbeispiel. Neben den Absperrorganen der beiden Zuführungsleitungen — deren gleichzeitige Betätigung auch zwangsläufig erfolgen kann — wird ein weiteres vollkommen dicht schließendes Absperrorgan in eine die Plus- und Minusseite verbindende besondere Ausgleichsleitung eingebaut. Mit Hilfe dieses

Umgangventils kann ein Ausgleich der Drücke herbeigeführt werden, sei es zur Vermeidung der erwähnten Überlastung, zur Nullpunktskontrolle oder zur einwandfreien Abstellung oder Inbetriebnahme des Meßinstrumentes.

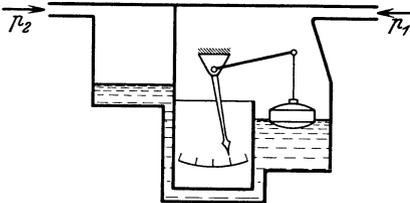


Abb. 54. Prinzip des Differentialschwimmermanometers mit gleichbleibenden Querschnitten der Flüssigkeitsspiegel.

Einige gebräuchliche Ausführungsarten von Differentialmanometern, die sich nur in der Konstruktion von den behandelten einfachen Druckmessern unterscheiden, seien nachstehend kurz erwähnt.

Weitverbreitet ist das in Abb. 54 dargestellte Differenzschwimmermanometer, dessen kommunizierende Röhren sehr oft auch

konzentrisch ineinander angeordnet werden. Die Schwimmerbewegung wird durch eine besondere Abdichtung nach außen auf das Meßwerk übertragen.

Bei dem Differenzglockenmanometer wird der die Sperrflüssigkeit enthaltende Behälter als gasdicht geschlossenes Gehäuse ausgeführt, wie dies der mit Abb. 55 wiedergegebene, zu den verschiedensten Meßzwecken verwendbare „Hydro“-Differenzdruckmesser¹ erkennen läßt.

Größere Druckunterschiede werden mit dem Differenzmetallfederanometer gemessen, insbesondere mit dem Plattenfederanometer. Das Prinzip eines Differentialplattenfederanometers²

¹ Firma „Hydro“-Apparatebauanstalt, Düsseldorf.

² Firma J. C. Eckardt A. G., Stuttgart-Cannstatt.

ist in Abb. 56 wiedergegeben. Bei Überschreitung des zulässigen Meßbereiches legt sich die Membran mit voller Fläche gegen die Matrize, so daß hierdurch eine Beschädigung der empfindlichen Membran vermieden und eine große Betriebssicherheit erreicht wird. Die Übertragung der Membranbewegung nach außen erfolgt hier durch eine stopfbüchsenfreie Wellrohrfeder.

Differenzröhrenfedermanometer werden weniger oft verwendet. Als Anzeigeeinstrument kann z. B. eine Ausführung¹ verwendet werden,

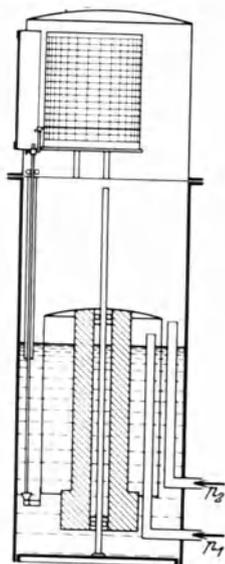


Abb. 55. „Hydro“-
Differenzdruckmesser.

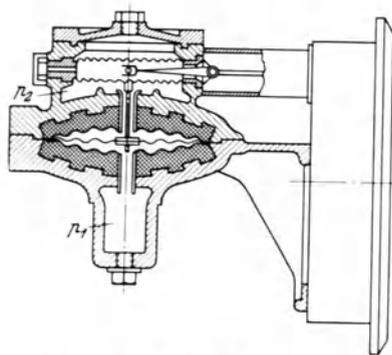


Abb. 56.
Differentialplattenfedermanometer.

b) Differenzdruckmanometer mit Radiziereinrichtung.

Neben diesen einfachen Differenzdruckmessern wird in der Meßtechnik in ausgedehntem Maße eine besondere Ausführungsart der Differentialmanometer benutzt, und zwar das Differentialmanometer mit Radiziereinrichtung. Wie bei der dynamischen Mengenmessung näher ausgeführt ist², tritt beim Durchströmen von Flüssigkeiten durch Rohrleitungen an Stau- oder Drosselgeräten eine Druckdifferenz, ein Wirkdruck h auf. Der Durchfluß ist dabei proportional der Wurzel aus diesem Wirkdruck. Bei Benutzung einfacher Differentialmanometer, deren Angaben dem Wirkdruck h verhältnismäßig sind, ergibt sich für den Durchfluß keine lineare Einteilung der Skala. Durch entsprechende Einrichtung läßt sich jedoch die zur vereinfachten Ermittlung der Gesamtmenge erforderliche Linearität von Instrumentenanzeige und Durchflußgeschwindigkeit bzw. Durchfluß erreichen.

¹ Firma Rosenthal & Schöde, Berlin.

² Siehe S. 753.

So wird die Befolgung des Wurzelgesetzes dem einfachen Differenzdruckmesser nachträglich aufgezwungen durch mechanische oder elektrische Hilfsmittel.

Eine mechanische Radizierung unter Verwendung einer entsprechend geformten Leitkurve wird bei der halbkreisförmigen I. G.-Differenzdruckwaage¹ (Abb. 57) durchgeführt. Die Abb. 57 zeigt die durch Leitrolle *a* und Leitkurve *b* vorgenommene Übertragung des Drehwinkels ε auf die Schreibtrommel mit einer gleichmäßigen, dem Durchfluß verhältnissgleichen Einteilung. Das gleiche Prinzip wird auch bei der Differenzringwaage und der Differenzspiralrohrwaage angewendet. Diese letztere Ausführung² ist insofern noch bemerkenswert, als hier eine Spiralrohrwaage benutzt wird, bei welcher die Drücke widerstandslos durch zwei feststehende Spiralrohre auf die Trennungswand übertragen werden. Die Verwendung dieser Konstruktion bleibt aber — im Gegensatz zu der für höchste Drücke brauchbaren Druckwaage (Abb. 39) — auf niedrige Drücke beschränkt. Bei der ebenfalls für höhere Drücke ausführbaren Ringwaage nach Abb. 38 wird die Kurve auf dem Umfang angeordnet³. In Verbindung mit einer Fühlrolle verwandelt sie die Drehbewegung des Ringrohres in lineare Ausschläge des Schreibhebels.

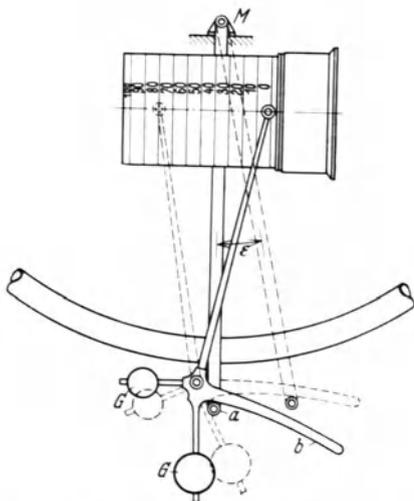


Abb. 57. Quadratwurzelübersetzung der Differenzdruckwaage. *M* Drehpunkt, *a* Leitrolle, *b* Leitkurve, *G* Ausgleichsgewicht.

Als letztes Beispiel für eine mechanische Umformung des Wirkdruckes sei das durch Abb. 58 wiedergegebene Schwimmermanometer⁴ angeführt. Die zwei kommunizierenden Gefäße sind hier konzentrisch ineinandergelegt. Zur Wurzelziehung wird ein durch Gewichte ausgeglichenes Wälzhebelpaar benutzt⁵, das die mit gewisser Reibung verbundene Bewegung der vorstehend beschriebenen Vorrichtungen mit Rolle und Kurve durch eine Abwälzung ersetzt. Die Wurzelziehung läßt sich theoretisch bis zum Nullpunkt durchführen, in der Praxis jedoch

¹ D.R.P. 396739. Siehe A. Eucken u. M. Jakob: Der Chemie-Ingenieur, Bd. II/1, S. 23. Leipzig 1932.

² Abbildung siehe bei A. Gramberg: Technische Messungen bei Maschinenuntersuchungen und zur Betriebskontrolle, S. 87. Berlin 1933.

³ Firma Hartmann & Braun A. G., Frankfurt a. M.

⁴ Klinkhoff-Zelenka-Messer der Firma Klinkhoff, Berlin SW 48; siehe Meßtechn. 6, 54 (1930).

⁵ Näheres bei O. Böhm: Mengenmesser für strömende Flüssigkeiten und Gase. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 69, 1523 (1925). — Ruppel, G.: Schwimmermanometer mit mechanischer Radizierung für Durchflußmessung. Arch. techn. Messen 1932 — T 10, J 1233—1.

weisen alle Instrumente mit Radiziereinrichtungen in der Nähe des Nullpunktes eine mehr oder weniger große Ungenauigkeit auf¹. Bei den praktischen Messungen ist der untere Bereich (etwa 20% des maximalen Meßbereiches) möglichst zu vermeiden.

Eine elektrische Einrichtung zur Umwandlung der vorliegenden Druckdifferenz in eine lineare Durchflußanzeige sei durch die Abb. 59 wiedergegeben. Durch den Ausschlag des Quecksilbers werden bei dem einfachen U-Rohr Platinkontakte, die in quadratisch wachsenden Abständen angeordnet und außen durch einen Stufenwiderstand miteinander verbunden sind, kurz geschlossen². An Stelle der Kontakte werden auch Kontaktstäbe verschiedener Länge benutzt³. Die Abstufung der Kontakte ist dabei ebenfalls so durchgeführt, daß die Widerstandsänderung bei konstanter Spannung den Strom im Meßstromkreis proportional der Wurzel aus dem Wirkdruck verändert.

Diese in ihrer Wirkungsweise einfachen, ohne bewegliche Teile arbeitenden Differentialmanometer werden auch für höhere statische Drücke ausgeführt. Ebenso findet die erste Art der Anzeige auf Quecksilberschrägröhrmanometern² Anwendung, die zweite auch bei Tauchglockendifferenzmanometern³. Hierbei tauchen dann die gemäß dem Strömungsgesetz abgestuften Kontaktstäbe in ein mit einer leitenden Flüssigkeit gefülltes und von der Glocke getragenes Gefäß.

Um den Ausschlag des Differenzmanometers nicht mehr nachträglich, sondern gleich proportional der Wurzel aus dem einwirkenden Druckunterschied zu machen, wird bei anderen Ausführungen die Radizierung



Abb. 58. Differenzdruckmesser nach dem Schwimmersystem mit Radiziervorrichtung.

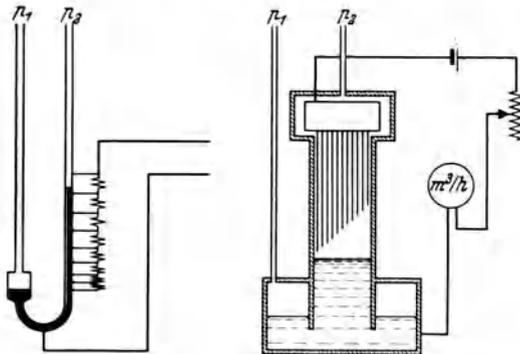


Abb. 59. Differenzdruckmesser mit elektrischer Radiziervorrichtung.

¹ Siehe z. B. G. Kreuzer: Statische und dynamische Untersuchung von Mündungsdampfmessern. Forsch.-Arb. Ing.-Wes. 1928, Heft 297.

² Firma Hallwachs & Langen G. m. b. H., Bensheim.

³ Firma Republic Flow Meters Company, Chicago.

durch Beeinflussung der Richtkraft [s. A. Gramberg: Technische Messungen bei Maschinenuntersuchungen und zur Betriebskontrolle,

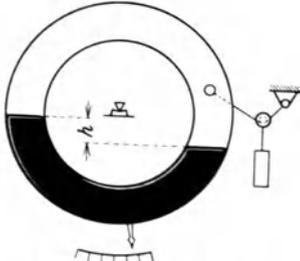


Abb. 60. Ringwaage mit Gewichtssteuerung zur Radizierung.

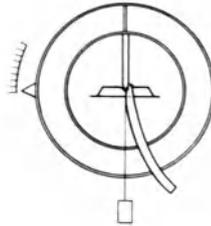


Abb. 61. Ringwaage mit einer gewichtsbelasteten Kurve zur Radizierung.

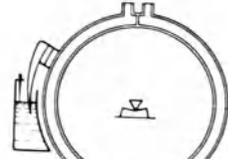


Abb. 62. Ringwaage mit Tauchkörper zur Radizierung.

6. Aufl., S. 12. Berlin 1933] durchgeführt. Als Beispiel mögen die in Abb. 60—64 dargestellten Differentialmanometer verschiedenen Prinzips dienen.

Bei der Ausführung gemäß Abb. 60 wird der Drehwinkel durch ein seitlich angebrachtes Gewicht¹ mit Lenkeranordnung oder auch durch ein gewichtsbelastetes Band², das über eine Kurve abrollt, gesteuert, wie dies aus Abb. 61 ersichtlich ist. Eine weitere gleichmäßige Änderung des Gegendruckmomentes in Abhängigkeit vom

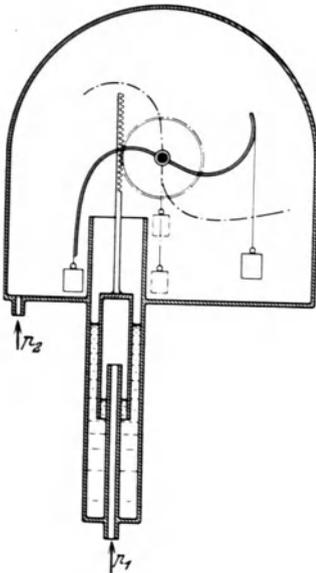


Abb. 63. Tauchglockenmanometer mit zwei gewichtsbelasteten Kurven zur Durchflußmessung.

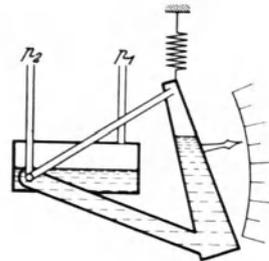


Abb. 64. Rohrdreieckmanometer.

Drehwinkel wird nach Abb. 62 durchgeführt unter Verwendung eines entsprechend dimensionierten Tauchkörpers³.

Nach Abb. 63 werden zur Umwandlung der Bewegung von Schwimmern oder Glocken in eine dem Durchfluß proportionale Angabe zwei

¹ Apparatebau Paul de Bruyn G. m. b. H., Düsseldorf-Oberkassel.

² Eta-Werkstätten, Essen-Bredeney.

³ Hartmann & Braun, Frankfurt a. M.

gewichtsbelastete Kurvenscheiben benutzt¹. Dadurch wird eine mit der Eintauchtiefe veränderliche Richtkraft geschaffen.

Das Differenzdruckmanometer der Abb. 64 ist ein U-Rohrmanometer, bei dem der eine Schenkel drehbar gelagert ist². Unter der Druckeinwirkung wird die Sperrflüssigkeit in den dreieckförmigen Meßschenkel gedrückt. Durch besondere Formgebung wird erreicht, daß die infolge der Gewichtsverlagerung entstehende Bewegung, der die Kraft einer Schraubenfeder entgegenwirkt, den Wurzelwerten der Spiegeldifferenzen stets verhältnismäßig ist.

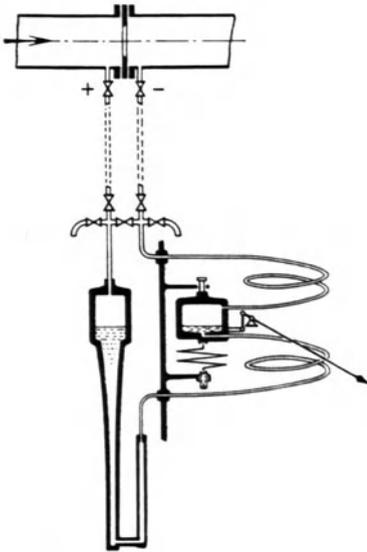


Abb. 65. Quecksilberwaage mit Radiziereinrichtung.

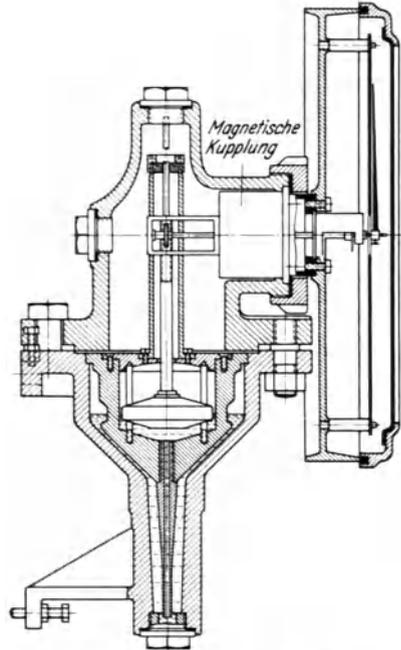


Abb. 66. U-Rohrmanometer mit parabolischem Verdränger.

Diese für Durchflußmessungen sehr oft erforderliche Bedingung wird bei Membrandruckmessern herbeigeführt entweder durch Verwendung einer Kurve oder auch dadurch, daß die Formänderungen der Membran durch geeichte Gegenfedern entsprechend beeinflusst werden³.

Bei verschiedenen Ausführungsarten von Durchflußmanometern wird durch besondere Formgebung eines Manometerschenkels die Radizierung durchgeführt (Abb. 65—67).

Das U-Rohrmanometer besitzt dann einen paraboloidförmigen Schenkel, wodurch in dem zweiten zylindrischen Meßschenkel eine in

¹ D.R.P. 425875, H. Niebuhr, Hannover.

² Manometer nach Gehre, jetzt hergestellt von der Firma Dr. Kroeber & Sohn G. m. b. H., Treuenbrietzen. Von gleicher Firma werden die Gehre-Messer neuerdings auch mit einer kombinierten Radizierung — Kurve im unteren, parabolischer Einsatz im oberen Meßbereich — ausgerüstet.

³ Askania-Werke A. G., Bambergwerk, Berlin-Friedenau.

verschiedener Weise übertragbare Niveauänderung des Flüssigkeitsspiegels eintritt, die dem Durchfluß proportional ist. Bei einer dem Gehrmanometer verwandten Ausführung¹ (Abb. 65) wird z. B. das bewegliche, hier aber zylindrische Gefäß durch eine federnde Gegenkraft getragen. Seine Bewegung ist der Wurzel aus der Druckdifferenz proportional. Das Wurzelgesetz wird auch durch Einbau eines parabolischen Verdrängers in den einen Schenkel eines U-Rohres erreicht, wofür Abb. 66 ein Ausführungsbeispiel liefert².

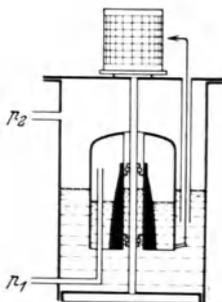


Abb. 67. Tauchglockenmanometer mit parabolischem Verdränger.

Die Anwendung auf Tauchglockenmanometer veranschaulicht Abb. 67. Der parabolische Verdränger verändert den Glockenauftrieb, so daß der Glockenhub dem Durchfluß verhältnismäßig ist.

5. Elektrische Manometer.

Zur Feststellung kleiner Verschiebungen, wie sie bei den zur Druckmessung benutzten elastischen Körpern auftreten, werden mehr und mehr elektrische Methoden benutzt. Der Vorteil der elektrischen Druckmessung liegt darin, daß sie neben der einfachen Anzeige und Registrierung auch leicht die Fernanzeige und Fernregistrierung ermöglicht, daß sie die Verwendung eines Druckgebers gestattet, der die Verhältnisse im Meßraum nur unwesentlich stört, und daß sie auch in bequemer Weise durch oszillographische Registrierung eine unverzerrte Wiedergabe sehr schnell schwankender Drücke, z. B. in Explosionsmotoren, ermöglicht. Die für die verschiedensten Meßzwecke durchgebildeten elektrischen Verfahren benutzen unter anderem die durch Einwirkung des Druckes auf eine für den Meßzweck besonders ausgewählte Anordnung hervorgerufene Änderung ihres Widerstandes, ihrer Kapazität³ oder Induktivität zur Ermittlung der Druckgröße. Nachstehend seien einige einfache Verfahren kurz angeführt. Nähere Angaben bzw. die sonst noch in Frage kommenden elektrischen Druckmeßmethoden sind der Literatur zu entnehmen⁴.

Die geringe Durchbiegung einer zur Messung von schnell wechselnden mechanischen Kräften benutzten Plattenfeder wird bei der Flüssigkeitsmeßdose nach Schmaltz [Über Methoden zur photographischen Registrierung geradliniger Schwingungsbewegungen. Maschinenbau/Ge-

¹ Askania-Werke A.G., Bambergwerk, Berlin-Friedenau.

² Siemens & Halske A. G., Berlin-Siemensstadt.

³ Näheres bei K. Schnauffer: Aufzeichnung rasch verlaufender Druckvorgänge mittels des Verfahrens der halben Resonanzkurve. Luftf.-Forschg. 6, 126 (1930); VDL-Jb. 1930, 304. Siehe auch Arch. techn. Messen 1931 — T 83, V 1344—2.

⁴ Übersicht über die Methoden der elektrischen Druckmessung siehe Arch. techn. Messen 1932, V 132—1. — Schnittdruckmessung an Werkzeugschneiden mit Kondensatormeßdose. Arch. techn. Messen 1931 — T 6, V 132—2. — Druckmessung mit der Kondensatormeßdose. Arch. techn. Messen 1932, V 132—5. — Elektrische Druckmessung durch Änderung einer Induktivität. Arch. techn. Messen 1932, V 132—4. — Druck in Flüssigkeiten. Arch. techn. Messen 1931 — T 7, V 133—2. — Dasselbst weitere Literaturangaben. Siehe auch: Die Physik in regelmäßigen Berichten, Heft 1, S. 18f. Berlin 1933.

staltung 2, 52 u. 104 (1922/23)], Wallichs und Opitz [Messen schnell wechselnder mechanischer Kräfte. *Ztschr. Ver. Dtsch. Ing.* 76, 240 u. 382 (1932); s. auch H. Steuding: Messung mechanischer Schwingungen, S. 116. Berlin 1928] gemessen durch die auftretende Widerstandsänderung eines Elektrolyten (Abb. 68). Der Elektrolyt befindet sich in der Meßdose, sein Leitungsquerschnitt wird entsprechend der Deformation der Stahlmembran verändert. Die Messung des Widerstandes erfolgt mit einer Wheatstonebrücke. Die Empfindlichkeit der Meßdose ist abhängig von der Dicke der verwendeten Membran und der auf die Membran wirkenden Fläche des Druckübertragungsstückes. Nach Martens [Apparate zur Messung hoher Flüssigkeitsdrücke. *Ztschr. Ver. Dtsch. Ing.* 53, 747 (1909)] kann bei einfachen Meßdosen ein Fehler $\leq \pm 0,5\%$ erwartet werden.

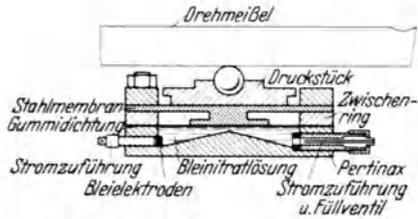


Abb. 68. Druckmeßdose für elektrische Widerstandsmessung.

Der Berührungswiderstand zwischen einer kurzen, starken Bourdonfeder und einem ihrer Krümmung genau angepaßten Widerstandsband *c* (Abb. 69) wird beim Druckmesser der Brown, Boveri & Cie. A. G., [BBC Nachr. 12, 89 (1925)] zur Druckmessung herangezogen. Tritt unter Einfluß des Druckes eine Streckung der Manometerfeder ein, so ändert sich der in einem Zweig der Wheatstonebrücke liegende Berührungswiderstand infolge Abwälzung der Manometerfeder von dem Band.

Bei dem Kohleldruckmesser¹ bildet die seit langem bekannte Änderung des Widerstandes von Kohleteilchen mit dem wirkenden Druck die Grundlage des Meßprinzips. Hier wird eine Reihe dünner Kohleblättchen übereinander geschichtet, ihr vom Druck abhängiger Übergangswiderstand bildet den Zweig einer Wheatstoneschen Brücke. Zur Verstärkung des Effektes werden zwei Kohlesäulen benutzt, wie dies aus Abb. 70 ersichtlich ist, die als Sonderausführung einen als Zündkerze ausgeführten Indicator für schnell veränderliche Drücke an Verbrennungsmotoren darstellt.

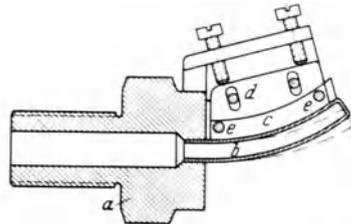


Abb. 69. Druckmesser für rasch verlaufende Druckstöße. *a* Schraubenschluß, *b* Bourdonfeder, *c* Widerstandsband, *d* Isolierstück, *e* Anschlußbolzen.

¹ *Automot. Ind.* 62, 230 (1930). Ref. H. E. Linckh: *Ztschr. Ver. Dtsch. Ing.* 74, 579 (1930). Auch *Arch. techn. Messen* 1931 — T 7, V 133—2 und 1932, V 132—1. Eine Darstellung der Abhängigkeit des Übergangswiderstandes bei Kohleringen vom Druck siehe H. Grob: Die elektrische Spannungsregelung mittels Kohle-druckwiderständen. *Elektrotechn. Ztschr.* 51, 2, 1717 (1930). — Untersuchungen über die meßtechnische Anwendbarkeit siehe W. Glammann u. H. Triebnigg: Der trägeheitslose elektrische Halbleiterindicator für Druckmessungen. *Forsch. Ing.-Wes.* 4, 137 (1933).

Die in eine Stromänderung umgewandelte Druckänderung reicht aus zur Anzeige oder Registrierung mit Schleifenoszillographen. Eine besondere Röhrenverstärkereinrichtung erübrigt sich. Bei der Anordnung läßt sich die gewünschte Proportionalität zwischen Druck und Anzeige erreichen. Nachteilig für die Genauigkeit ist vor allem der störende Einfluß der Nachwirkungserscheinungen (Hysterese). Der Weg der Kraft ist sehr klein, Größenordnung etwa 0,05—0,1 mm. Die vor jedem Versuch durchzuführende Eichung erfolgt statisch unter Verwendung von Druckluft und Kontrollmanometer.

Zur Ermittlung sehr hoher Drücke ist das handliche Metalldraht-

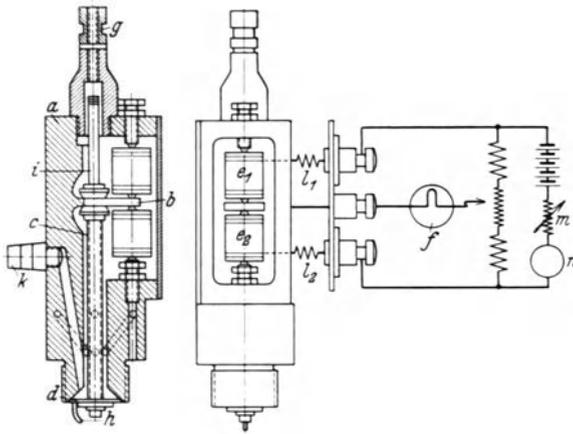


Abb. 70.

Kohle-Druckmesser für schnell wechselnde Drücke.
a Gehäuse, *b* Zunge, *c* Rohr aus Invarstahl, *d* Membran,
*e*₁, *e*₂ Säulen aus Kohleblättchen, *f* Oszillographenschleife,
g Hochspannungsklemme, *h* Elektrode, *i* Isolierrohr,
k Kühlluftzufuhr, *l*₁, *l*₂ Ausgleichwiderstände,
m Regelwiderstand, *n* Strommesser.

manometer [s. H. Geiger u. W. Scheel: Handbuch der Physik, Bd. 2, S. 370. Berlin 1926] geeignet. Es besteht aus einem in flacher Spule induktionsfrei gewickelten und gealterten Draht. Der Widerstand dieses Stromleiters ändert sich mit dem Druck. Wegen des geringen Temperaturkoeffizienten sind Manganindrähte besonders günstig. Sie ändern ihren Widerstand bis 10000 kg/cm² nahezu linear (Gesamtdruckkoeffizient etwa + 2,0 bis 2,3 · 10⁻⁶). Bei porenfreiem Material, Temperaturkonstanz und Messung des Widerstandes mit Wheat-

stonebrücke wird von ≈ 500 at aufwärts eine Genauigkeit von $1/1000$ als erreichbar angegeben [s. Fr. Kohlrausch: Lehrbuch der praktischen Physik, S. 120. Leipzig u. Berlin 1930]. Für Quecksilber gilt bis zu Drücken von 2000 kg/cm² die Beziehung

$$R = R_0 (1 + \alpha p), \quad (26)$$

wobei für den Druck $p = 0$ der Widerstand R_0 beträgt und der Druckkoeffizient $\alpha = 3,237 \cdot 10^{-5}$ ist, wenn die Temperatur durch Eisbad konstant gehalten wird.

Als weitere elektrische Meßmethode sei das piezoelektrische Druckmeßverfahren¹ erwähnt, daß die verschiedensten dynamischen Vorgänge bei festen Körpern, Flüssigkeiten und Gasen bei jeweils ent-

¹ Kluge, J. u. H. E. Linckh: Piezoelektrische Messungen von Druck- und Beschleunigungskräften. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 73, 1311 (1929). — Piezoelektrischer Indicator für schnellaufende Verbrennungsmotoren. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 74, 887 (1930); Forschg. Ing.-Wes. 2, 153 (1931); 4, 177 (1933).

sprechender Anordnung zu messen und registrieren gestattet. Das Prinzip dieser Methode beruht darauf, daß ein Piezoquarz den zu messenden Kräften ausgesetzt wird und unter ihrer Einwirkung den deformierenden Kräften proportionale elektrische Ladungen erzeugt. Diese Ladungen werden einem elektrostatischen Röhrenvoltmeter zugeleitet und mit einem Oszillographen registriert. In der durch Abb. 71 nach Kluge und Linckh [Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 74, 887 (1930)] wiedergegebenen Anordnung sind zwei Quarze Q in einer Druckmeßkammer (Abb. 72) eingeschlossen und dadurch gegen elektrische und magnetische Störungen, Verschmutzungen und Feuchtigkeit geschützt. Die Deformation des Quarzes ist praktisch zu vernachlässigen (Elastizitätsmodul $0,8 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2$). Der Meßbereich und die Empfindlichkeit lassen sich durch Zuschalten eines in das Röhrenvoltmeter eingebauten Kondensators verändern. Eichkurven bei verschiedenen Kapazitäten veranschaulicht die Abb. 73. Es lassen sich Drücke

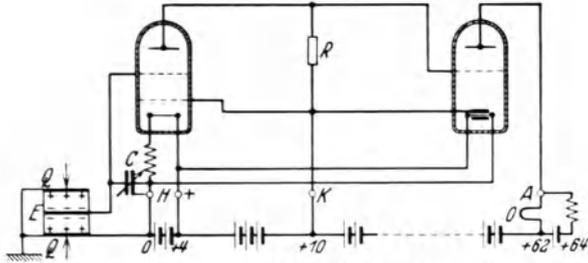


Abb. 71. Schaltung des Röhrenvoltmeters und des piezoelektrischen Druckmessers. A Anode, C Kondensator, E Meßelektrode, H Heizung, K Kathode, O Oszillographenschleife, Q Quarze, R Verstärkungswiderstand.

bis 1000 at (Bruchgrenze des Quarzes) messen. Vorteilhaft ist die weitgehende Unabhängigkeit von der Temperatur. Die Eichung erfolgt statisch durch Vergleich mit einem Kontrollmanometer.

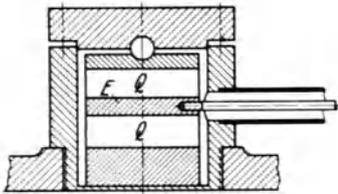


Abb. 72. Druckmeßkammer. Q Quarze, E Meßelektrode, p Meßdruck.

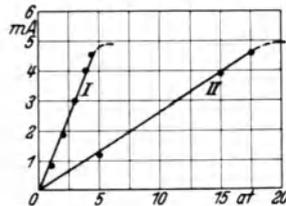


Abb. 73. Eichkurven des piezoelektrischen Druckmessers.

bis 1000 at (Bruchgrenze des Quarzes) messen. Vorteilhaft ist die weitgehende Unabhängigkeit von der Temperatur. Die Eichung erfolgt statisch durch Vergleich mit einem Kontrollmanometer.

6. Verschiedene Druckmesser.

Zum Schluß sei noch ein kurzer Überblick gegeben über einige besondere Methoden, die vorwiegend für kleinere Drücke in Frage kommen und zu ihrer Bestimmung die verschiedensten Gesetzmäßigkeiten heranziehen¹.

¹ Ausführlicheres bei A. Goetz: Physik und Technik des Hochvakuums, S. 54f. Braunschweig 1922. — Geiger, H. u. K. Scheel: Handbuch der Physik, Bd. 2, S. 398f. Berlin 1926.

Die schon erwähnte Beziehung zwischen Druck und Formänderung gewisser elastischer Stoffe wird auch zur Messung sehr kleiner Spannungen benutzt. Erwähnt sei hier nur die Verwendung eines Röhrenfedermanometers mit einer Feder aus Glas oder Quarz, oder eines Membranmanometers mit besonders dünner Membran. Mit einer Kupfermembran von 0,03 mm Dicke, deren Verschiebung nach der Fizeauschen Interferenzmethode gemessen wurde [K. Scheel u. W. Heuse: Über einen Apparat zur Messung sehr kleiner Drücke. Ztschr. Instrumentenkunde 29, 14 (1909)], konnte z. B. ein Meßbereich von 10^{-5} mm QS erreicht werden.

Für Dampfdruckmessungen von aggressiven Flüssigkeiten wie Schwefelsäure, Salpetersäure u. a. eignen sich vorzüglich die Glasfedermanometer nach Scheffer und Treub [Ztschr. physikal. Chem. 81, 308 (1913)].

Für die Praxis von Bedeutung ist die Ermittlung des Druckes, die auf Grund der Gesetzmäßigkeit von Zustandsänderungen erfolgt. Bekannt ist die Druckmessung unter Verwendung des Gesetzes von Boyle (oder Mariotte) mit dem von McLeod [s. Arch. techn. Messen, V 1341—1, J 136—1] angegebenen Manometer. Die Verwendung dieses Druckmessers, der zur Durchführung genauer Messungen (unter den nötigen Vorsichtsmaßregeln bis zum Druck von 10^{-5} mm QS) mehrfache Abänderungen erfahren hat, setzt die Gültigkeit des idealen Gasgesetzes voraus. Eine wesentliche Bedingung ist also die Abwesenheit von kondensierbaren Dämpfen in dem abgesperrten Gasvolumen. Wird die Methode auch bei höheren Drücken angewendet, wobei sich alsdann über dem Quecksilber des geschlossenen und kalibrierten Schenkels eines U-Rohrmanometers ein Gas befindet, so muß außerdem die Abweichung vom Gasgesetz bekannt sein. Bei gesättigten Dämpfen ist der Druck unabhängig vom Volumen und nur in bestimmter, durch Formeln nur unvollkommen wiederzugebener Weise von der Temperatur abhängig. Ist die Temperatur des Sattedampfes genau bestimmt worden, so kann die gesuchte zugehörige absolute Dampfspannung den Tabellen oder Dampfdruckkurven entnommen werden. Die Genauigkeit der Druckbestimmung nach den beiden letzten Methoden nimmt mit steigender Spannung ab.

Zur Messung von Drücken unterhalb 10^{-3} mm QS, wie sie für das Hochvakuum in Frage kommen, sind neben dem McLeod-Vakuometer noch eine Reihe von Manometern durchgebildet worden, die das Verhalten der Gasmoleküle zur direkten oder indirekten Bestimmung benutzen. Es sei angeführt, daß die äußere Reibung der Gasmoleküle, der von ihnen verursachte Crookesche Radiometereffekt oder die Wärmeleitfähigkeit in den verschiedensten Arten zur Druckbestimmung Verwendung finden¹. Auch auf die zur qualitativen Feststellung der Güte des Vakuums herangezogenen elektrischen Entladungserscheinungen kann hier nur hingewiesen werden.

¹ Näheres siehe H. Riegger: Über ein neues Vakuometer. Ztschr. techn. Physik 1, 16 (1920). — Goetz, A.: Fußnote 1, S. 647 (S. 65f.). — Eucken, A. u. M. Jakob: Der Chemie-Ingenieur, Bd. II/3, S. 44. Leipzig 1933.

C. Sicherung der Druckmessung.

Bei der Behandlung der verschiedenen Manometertypen sind bereits einige Bedingungen erwähnt worden, die für die einwandfreie Druckmessung von Bedeutung sind. Nachstehend soll noch auf allgemeine Gesichtspunkte zur Sicherung der Druckmessung hingewiesen werden.

Von Wichtigkeit für genaue Druckmessung ist die richtige Auswahl der Manometer. Meßzweck, Meßbereich, die Art der Flüssigkeit und die Eigenart des Betriebes sind hierbei mitbestimmend. Durch Einbau von Alarmvorrichtungen oder Ferngebern kann an wichtigen Stellen die Sicherheit des Betriebes erhöht und seine Überwachung wesentlich erleichtert werden. Für den Betrieb ist die Zuverlässigkeit der Manometer von besonderer Bedeutung. Die Empfindlichkeit der Manometer soll den Erfordernissen angepaßt sein, je empfindlicher die Messer, desto größer auch die Empfindlichkeit gegen Störungen. Bei Metallmanometern ist zu beachten, daß sie zur Vermeidung von vorzeitigen Ermüdungserscheinungen bei konstanter Belastung nicht viel höher als $\frac{2}{3}$ der höchsten Skaleneinteilung, bei schnell wechselnder Belastung nicht über $\frac{1}{2}$ derselben beansprucht werden sollen. Entsprechend den zu erwartenden chemischen Angriffen ist der Werkstoff zu wählen. Ebenso ist auf die Möglichkeit der Bildung explosiver Verbindungen zu achten. So z. B. sind bei verdichtetem Acetylen Kupfer und kupferhaltige Legierungen zu vermeiden. Ammoniak kann mit Quecksilber unter Umständen eine gefahrbringende Verbindung eingehen¹. Die Messung von Sauerstoff verlangt öl- und fettfreie Meßinstrumente und Leitungen usw. Um die unmittelbare Einwirkung von Flüssigkeiten zu vermeiden (bei dem vorerwähnten chemischen Angriff, bei heißen, zähflüssigen, leicht erstarrenden Medien usw.), ist eine Vorschaltung von besonderen Schutzflüssigkeiten eventuell eine kontinuierliche Einspritzung mit geringer Geschwindigkeit nach Art der pneumatischen Fernmessung vorzusehen (s. S. 732). Da es sich aus betrieblichen Gründen nicht immer vermeiden läßt, daß zur bequemen und sicheren Ablesung die Druckmesser gewissen Einwirkungen durch Staub, Feuchtigkeit, Erschütterungen usw. ausgesetzt werden müssen, hat die Auswahl der Instrumente stets unter Berücksichtigung der Eigenart des Betriebes zu erfolgen. Solide, staub- und wasserdichte Ausführungen tragen wesentlich bei zur Zuverlässigkeit der Messung und zur Herabsetzung der Wartungskosten.

Der Aufstellungsort der Anzeigeeinstrumente richtet sich nach den Erfordernissen des Betriebes, derjenige der zur Überwachung dienenden Registrierinstrumente vorwiegend nach den Gründen der Betriebsführung. In manchen Fällen ist die Vereinigung von Bedienungs- und Überwachungsinstrumenten vorteilhaft. Zur Erleichterung der Beobachtung und Überwachung sind die Instrumente an bequem zugänglichen und hellen Plätzen anzuordnen. Aus Gründen der Sicherheit empfiehlt sich bei Hochdruckmanometern die Anbringung oberhalb von Augenhöhe. Außerdem sind die Manometer vor zu starker Wärme- einwirkung zu schützen.

¹ Henderson, L. M.: Explosion an der Grenzschicht zwischen Quecksilber und Ammoniak. Ind. engin. Chem. 1932, 72.

Von besonderer Bedeutung ist die Anordnung der Druckmesser. Zur Druckentnahme im Innern von strömenden Flüssigkeiten wird das Prandtl'sche Staurohr¹ als Einheitsmeßgerät zur Messung des statischen Druckes empfohlen. In der parallelen Stellung zum Flüssigkeitsstrom liefert dieses Entnahmeggerät einen Höchstwert der Druckanzeige. An Rohrleitungen ist selbst bei gerader Leitungsführung und störungsfreier Strömung der Druckentnahme besondere Beachtung zu schenken. Die einwandfreie Messung des statischen Druckes erfordert zur Entnahme an der Rohrwand eine sorgfältige senkrechte Bohrung ohne Grat. Das benötigte Anschlußrohr darf in den Strömungsquerschnitt nicht hineinragen. Starke Störungen der Strömung durch ungünstige Leitungsführung, Querschnittsveränderungen, Ventile, Krümmer, Abzweigungen, Einbeulungen, Unebenheiten durch Ablagerung usw. beeinflussen das Meßergebnis beträchtlich, wenn der dynamische Druck² nicht vernachlässigbar klein ist. Muß an schwierigen Stellen eine Messung durchgeführt werden, so wird der statische Druck an mehreren Stellen des Querschnittes entnommen und das arithmetische Mittel der Ergebnisse gebildet. Weiterhin ist zu beachten, daß die Entnahmestellen so angebracht werden, daß keine Störungen durch Abscheidungen auftreten können. Es sind daher die Anbohrungen bei kompressiblen Flüssigkeiten möglichst so anzubringen, daß etwaige Kondensationen entweder in die Rohrleitung zurückgeleitet oder in besondere Flüssigkeitsabscheider abgeführt werden. Zur Vermeidung von Capillaritätserscheinungen ist dabei für ausreichenden Durchmesser der Anbohrung und der Meßleitung Sorge zu tragen.

Die Meßleitungen müssen stets dicht sein. Es ist daher auch hier der Materialfrage Aufmerksamkeit zu schenken. Bei der Messung von Dampfdrücken tritt in den kühleren Meßleitungen Kondensation ein. Hier wie auch bei Druckmessungen von inkompressiblen Flüssigkeiten sind die Meßleitungen so zu verlegen, daß Gasausscheidungen in die Rohrleitung zurücktreten oder in entsprechend angeordneten Gasabscheidern zur leichten Entfernung gesammelt werden. Bei gefüllten Meßleitungen ist die Druckanzeige durch eine Höhenkorrektur zu berichtigen, wenn von einem ganz bestimmten Niveau aus zu rechnen ist. Wenn der Druckmesser sich unterhalb der Rohrleitung befindet, kann für vollständige Füllung der Meßleitung leicht gesorgt werden. Schwieriger ist dies, wenn er oberhalb des Rohrstranges angeordnet werden muß. Eine einwandfreie Berücksichtigung der Flüssigkeitssäule ist dann wegen der unsicheren Füllung der Meßleitung nicht gewährleistet.

Dem Einbau von Differentialmanometern ist eine ganz besondere Sorgfalt zu widmen. Die einwandfreie Messung des Differenzdruckes verlangt gleiche Füllungen beider Meßleitungen. Bei Dampfmessungen werden daher zur Erfüllung dieser notwendigen Forderung bestimmte Vorkehrungen getroffen. Um bei Druckschwankungen einen Einfluß der verdrängten Flüssigkeitssäulen möglichst klein zu halten, wird die konstante Niveauhaltung angestrebt entweder durch besondere Ausgleichgefäße mit großem Querschnitt nach Anordnung der

¹ Siehe S. 754.

² Siehe Fußnote 3, S. 611.

Abb. 74¹, oder auch durch waagrecht geführte Rohrschlangen von entsprechender Länge in gleicher Höhe der Anbohrungen.

Um bei Dampfmanometern die schädigende Einwirkung hoher Temperaturen zu verhüten, ist hier der Einbau von besonderen Wassersäcken zweckmäßig.

Bei periodisch schwankenden Drücken ist die richtige Erfassung des Druckes mit Schwierigkeiten verbunden. Um die notwendige Dämpfung herbeizuführen, wird in den meisten Fällen das Absperrorgan gedrosselt.

Zweckmäßiger ist die Vergrößerung der Dämpfung durch besondere, symmetrische Drosselungen mit feiner Bohrung. Bei höheren Drücken empfiehlt sich dies auch unter normalen Verhältnissen. Druckstöße, die das Manometer beim Anfahren oder Abstellen gefährden, werden dann vermieden. Weiterhin wird dadurch auch bei etwa undicht gewordenen Manometern ein starkes, unter Umständen mit Gefahr verbundenes Abblasen verhindert. Diese üblichen Dämpfungsverfahren können aber zu ganz beträchtlichen Fehlmessungen führen², ganz besonders bei kompressiblen Medien, wenn sich zwischen der Drosselung und dem Meßinstrument ein größeres Volumen befindet. Die Unsicherheit wird noch dadurch vergrößert, daß bei dem geringen Drosselquerschnitt sehr leicht Verstopfungen auftreten. In manchen Fällen ist auch eine lineare Dämpfung durch Capillaren von bestimmten Dimensionen vorteilhaft.

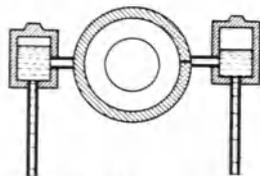


Abb. 74. Anordnung von Ausgleichgefäßen bei der Dampfdruckmessung mit Drosselgeräten.

Um bei Flüssigkeitsmanometern die störenden Schwankungen herabzusetzen, ist eine Veränderung der Eigenschwingungszahl durch entsprechende Abänderung der Länge der Flüssigkeitssäule vorzunehmen. Für die Gesamtlänge l der Flüssigkeitssäule gilt die Näherungsformel³

$$l_{(m)} \cong 0,5 (\beta T)^2, \quad (27)$$

wobei $\beta = T_0/T$ das Verhältnis der Eigenschwingungsdauer $T_0 = 2\pi \sqrt{l/2g}$ des Manometers zur Dauer T einer vollen Schwingung bedeutet. Zur Vermeidung des Resonanzgebietes muß $\beta > 1$ sein. Da $\beta = 2$ für die meisten Fälle ausreichend sein dürfte, wird mit diesem Wert die Länge der erforderlichen Flüssigkeitssäule

$$l_{(m)} \cong 2 T^2. \quad (28)$$

Die Druckmesser selbst sind stets in derselben Lage anzubringen, die sie bei der Eichung eingenommen haben. Durch regelmäßige Nachprüfung (im einfachsten Falle durch eine Nullpunktskontrolle) bzw. Eichung ist die erforderliche Richtigkeit der Manometer zu überwachen, da Fehlmessungen durch verschiedene Umstände leicht herbeigeführt

¹ Siehe S. 774 und Regeln für die Durchflußmessung mit genormten Düsen und Blenden, S. 18, VDI-Verlag 1930.

² Über Fehler gedämpfter Instrumente bei pulsierender Strömung und zahlreiche Literaturangaben siehe: Der Chemie-Ingenieur, Bd. II/2, S. 237. Leipzig 1933.

³ Nach L. Zipperer: Über Messung periodisch schwankender Drücke. Gas- u. Wasserfach 73, 581 (1930).

werden können ¹. Wichtig ist, daß die Eichungen stets unter den Betriebsverhältnissen durchgeführt werden. Versuchsinstrumente sind vor und nach jeder Verwendung einer Prüfung zu unterwerfen.

Einfach gestaltet sich die Nachprüfung der Flüssigkeitsmanometer. Die hier zu beachtenden Gesichtspunkte sind bereits eingangs näher behandelt worden. Bei geringen Drücken werden die Flüssigkeitsmanometer als Normalmanometer benutzt. Da die Empfindlichkeit der Eichinstrumente den Betriebsinstrumenten entsprechen muß, sind zur Nachprüfung der Feindruckmesser besondere Eichgeräte geschaffen

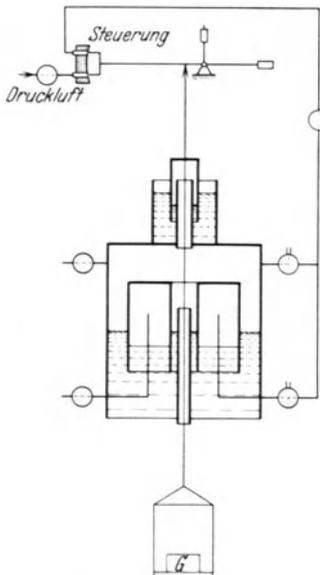


Abb. 75. Schema der „Hydro“-Eichwaage.

worden. Mit Abb. 43 wurde eine Eicheinrichtung wiedergegeben, bei der der eingestellte Druck in einfacher und genauer Weise durch Wägung bestimmt wurde. Nach gleichem Prinzip arbeitet auch die „Hydro“-Eichwaage ² (Abb. 75), die zur Prüfung von Druck-, Zug- und Differenzdruckmessern eingerichtet ist und einen Meßbereich von 0—100 mm WS besitzt. An Stelle eines durch die Glocke abgesperrten Luftvolumens

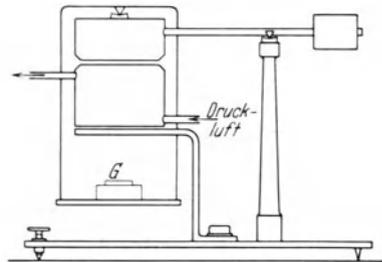


Abb. 76. Schema der Askania-Eichwaage.

wird hier mit Hilfe einer Steuerung von der ständig zuströmenden Druckluft (Überdruck 250 mm WS) selbsttätig immer nur so viel unter die Glocke geleitet, bis der Druck in derselben den durch Glockenquerschnitt und Belastungsgewicht G festgelegten Wert erreicht. Mit dieser von der Temperatur unabhängigen Eichwaage soll sich eine absolute Genauigkeit von 0,01 mm WS erreichen lassen. Für technische Zwecke ebenfalls geeignet und für Luftdrücke bis zu über 100 mm WS verwendbar ist die Askania-Eichwaage ³ (Abb. 76). Dieses Eichinstrument besitzt keine Sperrflüssigkeit, der Druck wird hier wiederum aus der Gewichtbelastung des an einem Waagebalken angebrachten Zylinders ermittelt. Unter

¹ Über Auswirkung verschiedener Fehler siehe Fr. Kretschmer: Betriebliche Erfordernisse wärmewirtschaftlicher Meßgeräte. Wärmestelle Mitt. Nr. 86, S. 459f. (1926).

² „Hydro“-Apparatebauanstalt, Düsseldorf-Rath.

³ Askania-Werke A. G., Bambergwerk, Berlin-Friedenau.

diesen Zylinder wird Druckluft (maximaler Überdruck 1000 mm WS) geleitet, die dauernd durch den unterhalb angeordneten zylindrischen Behälter strömt und durch einen schmalen, geschliffenen Ringspalt zwischen beiden Zylindern entweicht. Die Breite dieses Ringspaltes und damit auch der Druck in dem mit Entnahmestutzen versehenen Behälter richtet sich nach der Gewichtsbelastung. Die Gewichte sind so abgestuft, daß eine Eichung von $\frac{1}{4}$ zu $\frac{1}{4}$ mm WS durchgeführt werden kann.

Zur Eichung von Manometern für höhere Drücke werden als Normalinstrument die mit hoher Genauigkeit arbeitenden Kolbenmanometer benutzt, die auch in der Reichsanstalt zu den amtlichen Prüfungen Verwendung finden. Die Anwendung dieser Manometer bei einer einfachen Eicheinrichtung zeigt die Abb. 77¹.

Als zuverlässige Kontrollgeräte haben sich die Röhrenfedermanometer erwiesen, die — wie bei der Betrachtung dieser Manometertypen bereits erwähnt — für diesen Zweck als Doppelmanometer mit besonderer Feinteilung ausgerüstet werden². Zweckmäßig werden die Betriebsinstrumente mit dem be-

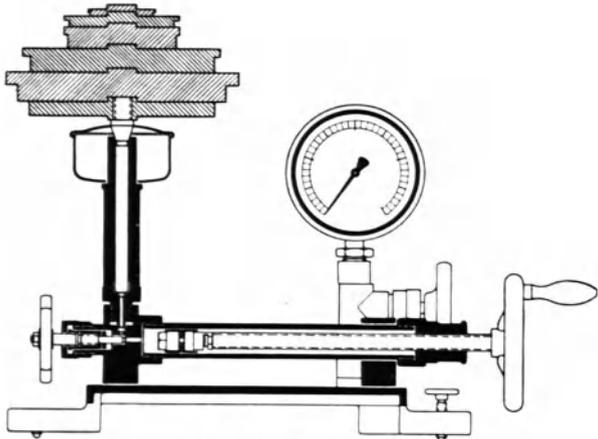


Abb. 77. Kolbenmanometer mit Öldruckpresse.

kannten Reichskontrollflansch oder bei höheren Drücken mit einem besonderen Prüfflansch versehen, um jederzeit leicht eine Überprüfung während des Betriebes durchführen zu können. Ist ein solcher Anschluß nicht vorhanden, so kann zum Vergleich eine kleine tragbare Prüfpumpe benutzt werden, an die das Kontrollmanometer und das zu prüfende Instrument angeschlossen werden. In diesem Falle lassen sich bequem verschiedene Vergleichsdrücke einstellen. Zur Herabsetzung der Reibung sind die Manometer leicht zu klopfen. Durch häufigeren Vergleich der Kontrollinstrumente ist ihr einwandfreier Zustand zu überwachen.

VI. Dichtemessung³.

A. Flüssigkeitsdichteschreiber.

Die Tabelle 12, S. 654 enthält die wenigen bekannten Ausführungsformen für Flüssigkeitsdichteschreiber. Die als Senkwaagen (Aräometer) ausgebildeten Meßgeräte beruhen auf dem archimedischen Prinzip:

¹ Firma Schäffer & Budenberg G. m. b. H., Magdeburg-Buckau.

² Siehe S. 631.

³ Bearbeitet von Dr. A. Ernst, Ludwigshafen a. Rh.

Auftrieb eines Schwimmers
 = Gewicht der verdrängten Flüssigkeit = $V \cdot \rho \cdot g$, wobei V das Volumen des Schwimmers, ρ die

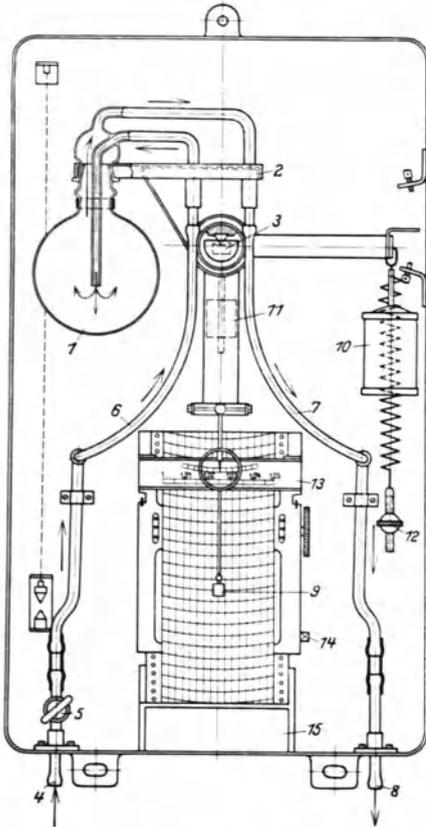


Abb. 78. Schema zur Hydro-Dichtewaage für Säuren und Laugen.

Dichte der Flüssigkeit und g die Erdbeschleunigung bedeutet. Die Temperatur muß konstant vorausgesetzt werden. Der Auftrieb ist also direkt proportional der Dichte. Die Abmessungen müssen so groß gewählt werden, daß durch den Schwimmer genügend große Kräfte erzeugt werden und die Fehler durch Oberflächenspannungen zu vernach-

Tabelle 12. Flüssigkeitsdichteschreiber.

Prinzip	Ausführungsform	Erläuterung
Senkwaage	1. mit austauschendem Hals 2. mit vollversenktem Schwimmer und Spiralfeder als Gegenkraft 3. wie 2., jedoch mit Hilfschwimmer in einer Flüssigkeit konstanter Dichte 4. Dichtekontroller; Bauart Scholz, Hersteller: I. C. Eckardt A. G., Stuttgart-Cannstatt	Sonderausführung der I. G. Farbenindustrie mit kontinuierlichem Durchfluß, Schreibfeder an dünner Führungsstange; Ausführung der Hydro-Apparatebau-Anstalt, Düsseldorf-Rath mit diskontinuierlichem Zu- und Ablauf. 1% Dichtänderung entspricht 10 mm Diagonalmhöhe System H. Contzen (D. R. P. 267 796) und System J. Hahn für Messung in geschlossenen Leitungen, wobei die Hilfsflüssigkeit spezifisch schwerer und nicht mischbar Das Gerät wird in einen Teilstrom von 0,5 l/min eingebaut. Alle 30 s wird der Stand des Aräometers abgelesen und auf das Registrierwerk übertragen. Meßfehler 1%
pneumatisch (s. Abschnitt I E, S. 584)	Bauart Hydro	Druckluft wird mit Wassertrömmelgebläse (Sprengelpumpe) erzeugt; Registrierung mittels Tauchglocke und Verdrängungszyylinder. Einfacher arbeiten Membrandruckmesser (A s k a n i a)
Wägung	konstantes Flüssigkeitsvolumen an Neigungswaage	Dauernder Durchfluß über bewegliche Zuleitungen. Ausführung Hydro-Apparatebau-Anstalt, Düsseldorf-Rath (s. Abb. 78, S. 654). Genauigkeit wird zu $\pm 1\%$ des Meßbereichs angegeben. Für warme Flüssigkeiten mit Temperaturkompensation

lässigen sind. Der von der Firma I. C. Eckardt A. G., Stuttgart-Cannstatt neuerdings hergestellte Dichtekontroller für Flüssigkeiten, Bauart Scholz, umgeht die Schwierigkeit der geringen Auftriebskräfte dadurch, daß der Stand des Aräometers alle 30 s selbsttätig abgetastet und auf einen Schreibhebel übertragen wird. Der Meßfehler soll angeblich kleiner als 1% sein. In Abb. 78 ist das Schema einer neueren Ausführung einer Flüssigkeitsdichtewaage dargestellt, der Hydro-Dichtewaage (Hydro-Apparatebau-Anstalt, Düsseldorf-Rath).

Fernmeßeinrichtungen können nach dem pneumatischen Prinzip oder mittels Induktions- oder Siemens-Ringrohr-Ferngeber (Tab. 2, S. 586/587) durchgeführt werden.

B. Gasdichteschreiber.

Die zuerst in der Leuchtgasindustrie benützten Luxschen Gaswaagen (D.R.P. 17356, vormals Friedrich Lux G. m. b. H., Ludwigshafen a. Rh.) haben nur noch historisches Interesse. In Tabelle 13, S. 656 sind die heute gebräuchlichsten Typen aufgeführt. Die Registrierung der Dichte ist für die Mengemessung von Gasen unentbehrlich (vgl. Abschnitt VIII C, S. 719f.). Man hat zwei Hauptarten von Dichteschreibern zu unterscheiden: die direkten Dichtemesser und die Dichteverhältnismesser. Letztere haben den Vorzug der Unabhängigkeit von Druck und Temperatur.

Ein direkter Dichtemesser ist z. B. der Dimeco-Apparat der Firma Junkers-Thermotechnik G. m. b. H., Berlin. Er beruht auf dem Druckabfall Δp an einer Drosselscheibe (Düse), für welche die Beziehung gilt:

$$\rho \sim \frac{\alpha^2 \cdot F^2}{V^2} \cdot \Delta p, \quad (29)$$

wo α der sog. Durchflußbeiwert, F der Querschnitt und V der Durchfluß ist. Durch eine geschützte Motorantriebsvorrichtung wird das Gas mit gleicher Geschwindigkeit durch die Drosselscheibe x gedrückt. In Abb. 79 ist das Schema des Apparates mit Legende dargestellt. Der Motor treibt gleichzeitig den Registrierstreifen an. Wenn die Kupplung e gelöst ist, fällt das Gefäß g ohne Stoß herab und die Meßräume

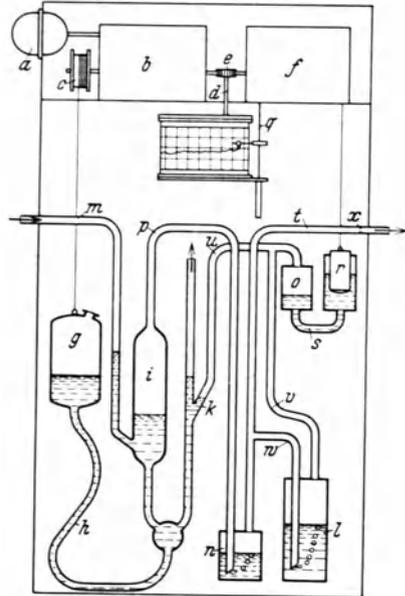


Abb. 79. Dimeco-Gasuntersucher von Junkers-Thermotechnik G. m. b. H., Berlin. *a* Antriebsmotor; *b* Getriebekasten; *c* Aufzugstrommel, *d* Antriebswelle für den Registrierstreifen; *e* Kupplung, durch Kurvenschreiber gesteuert, rückt die Trommel *c* ein und aus; *f* Kurvenschreibapparat mit elektrischem Ferngeber; *g* Antriebsgefäß an Trommel *c* aufgehängt; *h* bewegliches Rohr (oder Schlauch); *i* Meßgefäß, *k* Absperrorgan, *l* Tauchung (kommunizierende Gefäße); *m* Gasanschluß; *n* Rückschlagtauchung; *o* Druckraum; *p* Rohrleitung; *q* Schreibfeder; *r* Schwimmer; *s* Verbindungsrohr; *t* Rohrleitung; *u* Verbindungsrohr zwischen *i* und *o*; *v* Verbindungsrohr zwischen *l* und *u*; *w* Rohrleitung; *x* Drosselscheibe (keine Kapillare).

Tabelle 13. Gasdichteschreiber.

Prinzip	Ausführungsform	Erläuterung
Statische Meßmethoden: Gassäulenwaage	Union-Apparatabau-Gesellschaft m. b. H., Karlsruhe i. B. Hydro-Relais-Gaswaage	reg. Differential-Druckmesser nach Art einer Ringwaage (Wippe); Meßbereich: $\gamma = 0,4-1,0$; Einstelldauer etwa 1 min, Säulenhöhe 2-4 m mit Druckluft-Kraftverstärker [s. L. Litinsky: Meßtechn. 7, 123 (1931)]
Dynamische Meßmethoden: Druckmessung	Type Diméco der Firma Junkers Thermotechnik, G. m. b. H., Berlin	Patent-Hartung-Walter. Das Gas wird mit stets gleicher Geschwindigkeit durch eine Drosselscheibe (Düse) gedrückt (s. Abb. 79, S. 655)
Volumverhältnismessung	BASF-Gasdichteschreiber nach P. Gmelin. Verhältnisdichteschreiber mit Luft als Vergleichsgas nach dem Bunsenschen Ausströmungsgesetz, Trommelschreiber	s. Chemie-Ingenieur, Bd. 2, Teil 4, S. 29 und Chem. Fabrik 1930, 447, ur-sprünglich mit elektrisch gesteuerten, später mit mechanisch gesteuerten Ventilen. Arbeit diskontinuierlich; Diagramme meist in % statt in kg/m geeicht. Fernmessung durch elektrische Verstärkung eines z. ähnlichen Apparates. Keine Temperatur- und Druckkorrektur erforderlich
Druckverhältnismessung	I. G.-Dichteschreiber nach E. Lehrer; ebenfalls nach dem Bunsenschen Ausströmungsgesetz. Streifenschreiber (Tintenschreiber)	s. Chemie-Ingenieur, Bd. 2, Teil 4, S. 35. Verwendet eine magnetische Doppelpumpe, die gleiche Volumina Gas und Vergleichsgas ansaugt; schreibt kontinuierlich, vom Zustand des Gases ebenfalls unabhängig
Verhältnis der kinetischen Energie vom Gas und Vergleichsgas bei gleichem Anstrich (Geschwindigkeit)	Ranarex-Apparat der A.E.G. Berlin, Verhältnisschreiber, Druckbügel Streifenschreiber	Ursprünglich nur als Rauchgasprüfer, später auch für andere Gasgemische. Genauigkeit höchstens $\pm 2,5\%$ des Meßbereichs. Zwei motorangetriebene Flügelräder saugen Gas und Vergleichsgas (Luft) in die zwei Meßkammern; die kinetische Energie der Gase wird auf zwei miteinander gekoppelte Meßräder übertragen. Zeigerausschlag verhältnismäßig mit $\frac{\gamma}{\gamma_{\text{Luft}}}$. Meßkammern sind staubempfindlich
	Debro-Gasdichtemesser von Paul de Bruyn G. m. b. H., Düsseldorf-Oberkassel, Druckverhältnisschreiber mit Tintenregistrierung	Auf gemeinsamer Welle sitzen zwei Flügelräder, die das Gas und das Vergleichsgas ansaugen. Messung mit Druckverhältnisschreiber, bestehend aus stumpfwinkligem Waagebalken mit je einer Tauchglocke

werden über k mit der Außenluft verbunden; der Schwimmer kehrt in seine Nulllage zurück. Rückt die Kupplung e wieder ein, dann wird g gehoben und das zuvor in i eingesaugte Gas wird in die Rohre t und w gedrückt; dabei stellt sich ein Druckgleichgewicht ein, indem Gas über die Tauchung l auf den geschlossenen Schenkel eines Differentialmanometers drückt. Sobald das Gleichgewicht eingestellt ist, bleibt die Geschwindigkeit des einströmenden Gases konstant und die Endlage des Schwimmers r wird über das Schaltwerk als fortlaufende Kurve aufgezeichnet. Entsprechend Gleichung (7) ist die Skala linear. Die Meßgenauigkeit ist $\pm 1,5\%$.

Der BASF-Gasdichteschreiber und der I. G.-Dichteschreiber sind im Handel nicht erhältliche Apparate. Erläuternde Angaben sind in Tabelle 13, S. 656 enthalten.

Für chemisch nicht miteinander reagierende Gase gilt bei gleichem Druck und gleicher Temperatur der Komponenten die Mischungsregel:

$$\rho = \frac{a \cdot \rho_1 + (100 - a) \rho_2}{100}, \quad (30)$$

wobei ρ_1 und ρ_2 die Dichte der Komponenten und ρ die Dichte des Gasgemisches ist. Man kann daher die Gasdichteschreiber auch als Analysenschreiber betrachten und das Diagramm direkt in % der einen Komponente eines Gasgemisches einteilen. Es muß dabei nur die Bedingung erfüllt sein, daß die Beziehung zwischen %-Gehalt und Gasdichte eindeutig ist. Dies trifft z. B. nicht zu, wenn ein Ranarex-Apparat [Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft, Berlin; Abb. 80] für CO_2 geeicht ist und im Rauchgas Spuren unverbrannter Gase ($\text{CO} + \text{H}_2$) auftreten.

Zur Eichung von Dichteschreibern verwendet man Effusimeter [s. P. Gmelin: Chemie-Ingenieur, Bd. 2, Teil 4, S. 25; W. Schiller: Über die Bestimmung der Dichte und Zähigkeit von Gasen mit dem Schilling-Bunsenschen Gerät. VDI-Forsch.-Heft 4, 225 (1933)] oder die von E. Lehrer verbesserte Stocksche Gasdichtewaage mit elektromagnetischer Meßeinrichtung [vgl. E. Lehrer und E. Kuss: Ztschr. physikal. Chem. A 163, 73 (1933)].

Die kinetische Energie eines bewegten Gases wird durch den Ranarex-Dichteschreiber als Meßgröße benutzt, indem ein Vergleichsgas von bekannter Dichte auf dieselbe Geschwindigkeit gebracht wird und mit dem Meßwerk das Verhältnis der kinetischen Energien und damit die



Abb. 80. Ranarex-Gasdichteschreiber als Rauchgasprüfer mit eingeschalteter Beleuchtungsvorrichtung.

Dichte gemessen wird. Eine eingehende Beschreibung des Apparates findet sich bei P. Gmelin: Chemie-Ingenieur, Bd. 2, Teil 4, S. 38.

Eine ganz neue Ausführung stellt der sog. Debro-Gasdichtemesser der Firma Paul de Bruyn G. m. b. H., Düsseldorf, dar. Er beruht

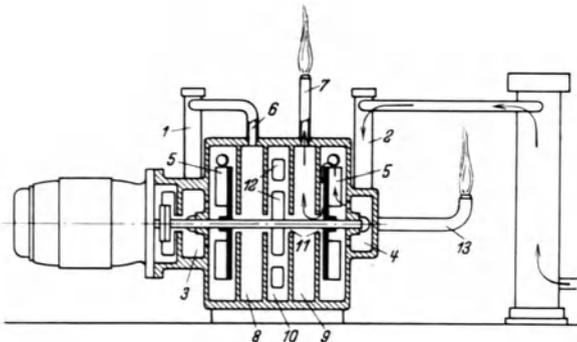


Abb. 81. Debro-Gasdichtemesser von Paul de Bruyn G. m. b. H., Düsseldorf-Oberkassel. 1 Lufttrockner, 2 Gas-trockner, 3 Saugraum Luft, 4 Saugraum Gas, 5 Flügel-räder, 6 Luftaustritt, 7 Gasaustritt, 8 Zwischenkammer Luft, 9 Zwischenkammer Gas, 10 Innenkammer, 11 Ring-spalte, 12 Fenster, 13 Überschuß zum Druckausgleich.

auf einem ganz ähnlichen Meßprinzip wie der Ranarex-Apparat.

Abb. 81 ist eine schematische Darstellung des Apparates. Das Meßwerk besteht aus einem Druckquotientenmesser, und zwar aus einer Waage, bei der die Arme des Waagebalkens einen stumpfen Winkel bilden und je eine Tauchglocke tragen. Auf diese Weise erhält man erhebliche Registrierkräfte, so daß das Re-

gistrierwerk als Tintenschreiber ausgebildet werden kann. Dies ist gegenüber dem Ranarex-Apparat, der als Punktschreiber arbeitet, ein Vorzug.

C. Dichtemessung fester Körper.

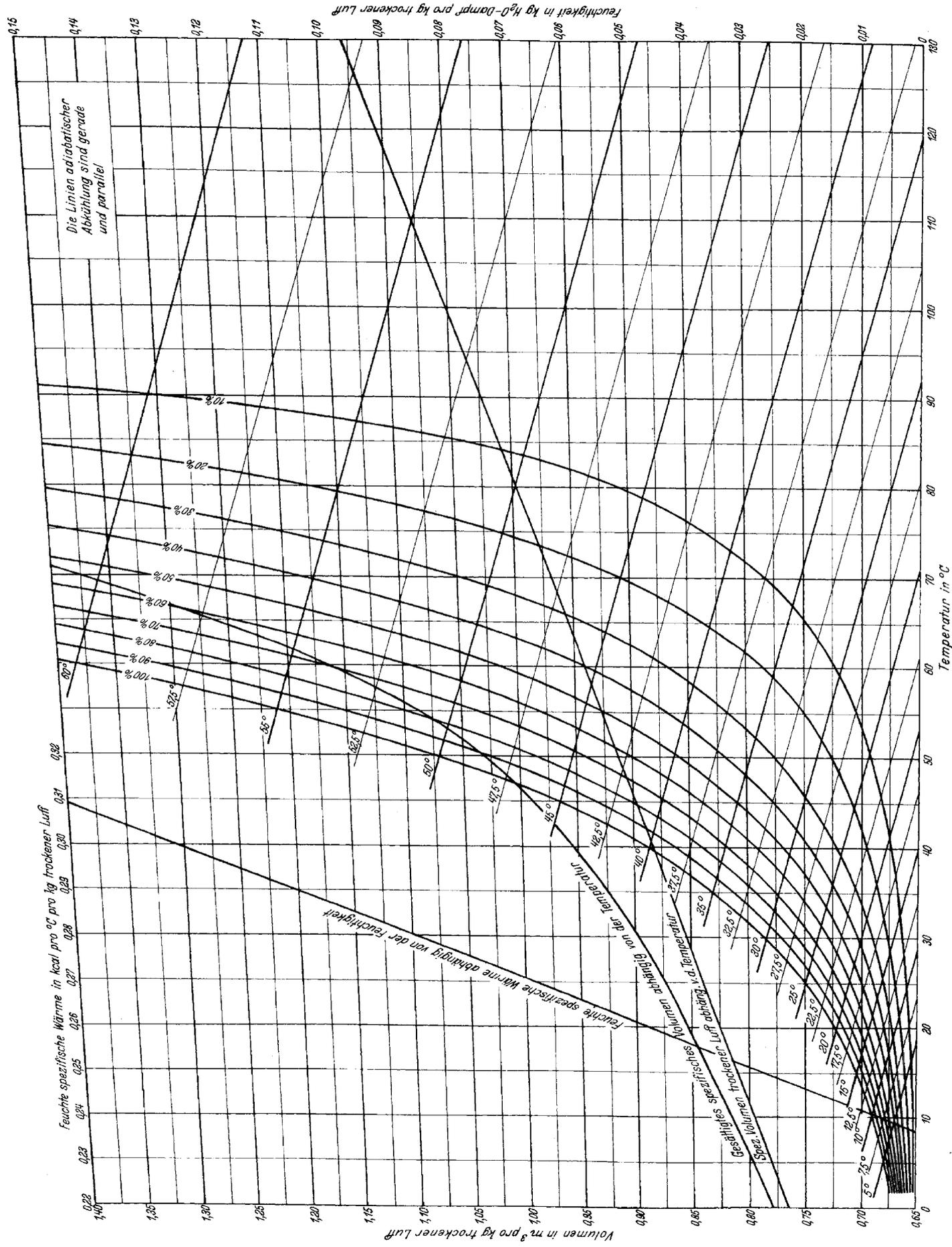
Für feste Körper kommt die Dichtemessung praktisch nur für rieselnde Medien wie Pulver, Salze und dergleichen in Betracht. Ein solches Meßgerät wird von der Firma Neue Apparatebau-Gesellschaft m. b. H., Ludwigshafen a. Rh. als „Getreideprüfer“ hergestellt. Hierbei wird das Volumen einer konstanten Gewichtsmenge G_{const} gemessen (spezifisches Volumen = $c \cdot \frac{G_{\text{const}}}{\rho}$), wo c eine Apparatekonstante ist. Es ist verwunderlich, daß Dichteschreiber für feste Medien noch kaum für die laufende Kontrolle des Schüttgewichtes chemischer Produkte verwendet werden.

D. Dichteregler.

Die Regelung der Dichte läßt sich grundsätzlich auf eine Mengenregelung, insbesondere auf eine Gemischregelung, zurückführen. Diese wird in Abschnitt IX B, S. 819f. behandelt. Mayer-Witten beschreibt [Chem. Fabrik 1933, 61] einen Gasgemischregler, der von einem Ranarex-Dichteschreiber gesteuert wird [vgl. hierüber auch Th. Stein: Luftüberschußregelung von Kohlenstaubfeuerungen. Arch. Wärmewirtsch. 8 (1927) und G. Wünsch: Regler für Druck und Menge, S. 194. München und Berlin 1930].

Feuchtigkeitstafel.

(Vgl. S. 659 „Technische Meß- und Regelverfahren“, Bd. I Abschn. V. Feuchtigkeitsmessung).



V. Feuchtigkeitsmessung¹

(s. auch Abschnitt „Trocknung“, Bd. II, S. 614).

A. Grundlagen der Feuchtigkeitsmessung.

Unter Feuchtigkeitsmessung versteht man die Bestimmung des Wassergehaltes in Gasen. Eine große Zahl chemisch-technischer Verfahren hat auf die stark wechselnde atmosphärische Feuchtigkeit Rücksicht zu nehmen, und zwar um so mehr, je hygroskopischer die verarbeiteten oder produzierten Stoffe sind. Die Feuchtigkeitsmessung gibt die Grundlage für die technische Beherrschung dieser Einflüsse durch Anwendung geeigneter Feuchtigkeitsregler. Die hervorragende Bedeutung dieses Gebietes der technischen Physik rechtfertigt seine Sonderbehandlung außerhalb des Rahmens der in Kapitel VII, S. 667f. behandelten physikalischen Analysenverfahren. Es soll vorausgeschickt werden, daß die hier zu behandelnden Meßverfahren sich prinzipiell übertragen lassen auf irgendwelche chemisch und physikalisch definierte Lösungsmittel, wie Aceton und Alkohol, die oft als Dämpfe in Luft oder technischen Gasgemischen enthalten sind. In der Praxis ist hiervon bis jetzt nicht Gebrauch gemacht worden.

In der beigefügten Tafel [Entnommen: Badger-McCabe: Elemente der Chemie-Ingenieur-Technik. Berlin: Julius Springer 1932] sind die wichtigsten physikalischen Größen, die bei der Feuchtigkeitsmessung eine Rolle spielen, in ihrem quantitativen Zusammenhang dargestellt. Unter Feuchtigkeit ist die Wasserdampfmenge im kg, bezogen auf 1 kg trockene Luft verstanden. Mit steigender Temperatur wächst entsprechend dem Wasserdampfdruck die Feuchtigkeit. Bei Sättigung sind Partialdruck des Wasserdampfes und Wasserdampfdruck für die betreffende Temperatur gleich. Das spezifische Volumen feuchter Luft kann aus der Tafel unter Benutzung der linken Skala ebenfalls direkt abgelesen werden. Unter prozentualer Feuchtigkeit [W. M. Grosvenor: Trans. Amer. Inst. Chem. Engr. B 1 (1908)] versteht man das Verhältnis der tatsächlichen Feuchtigkeit, bezogen auf das Wasserdampfgewicht, welches 1 kg trockene Luft bei Sättigung unter der betreffenden Temperatur aufnimmt, ausgedrückt in %.

Im allgemeinen ist in der Technik immer noch der von der Meteorologie übernommene Begriff der relativen Feuchtigkeit (in %) üblich. Hierunter versteht man den Ausdruck: $\varphi = \frac{100 \cdot p_D}{p_s}$, wo p_D den Partialdruck und p_s den Sättigungsdruck bedeutet. Unter absoluter Feuchtigkeit (s. die amtlichen Psychrometertafeln) ist im Sinne der Meteorologie der Partialdruck in mm QS, oder die Wassermenge pro Volumeinheit unter normalen Verhältnissen (0° und 760 mm) in g/m³ zu verstehen. Der Taupunkt eines Gases ist die Temperatur, auf welche das Gas abgekühlt werden muß, um den Sättigungspunkt zu erreichen. Er

¹ Bearbeitet von Dr. A. Ernst, Ludwigshafen a. Rh.

bestimmt die absolute Feuchtigkeit eines Gases. Unter psychometrischer Differenz versteht man die Temperaturdifferenz zwischen einem trockenen und einem feuchten, unter denselben Bedingungen einem Gasstrom ausgesetzten Thermometer. Außer von der Feuchtigkeit hängt diese Größe von der Gasgeschwindigkeit, vom Gas selbst, dessen Temperatur und Druck und von Apparatekonstanten ab. Theoretisch ist der psychometrische Effekt

$$p = p_f - \frac{b \cdot c_p \cdot (t - t_f)}{q \cdot r}, \quad (31)$$

wo p_f der Sättigungsdruck bei der Temperatur t_f des feuchten Thermometers, b der Barometerstand, c_p die spezifische Wärme des Gases, q das spezifische Gewicht des Wasserdampfes und r die Verdampfungswärme von Wasser ist. In der Praxis kommt man unter Zugrundelegung des für Eichungen zu empfehlenden Assmannschen Psychrometers (Hersteller: R. Fuess: Berlin-Steglitz und Wilhelm Lambrecht A.G., Göttingen) mit der vereinfachten Sprungschen Formel aus:

$$p = p_f - 0,5 \cdot \frac{b}{755} \cdot (t - t_f). \quad (32)$$

Diese wird oberhalb 100° ungenau. Die Psychometrie selbst ist jedoch auch bei Temperaturen oberhalb 100° noch anwendbar.

B. Technische Feuchtigkeitsmeßgeräte.

Die Tabelle 14 gibt eine Übersicht über die gebräuchlichsten Feuchtigkeitsmeßgeräte. Je nach dem Zweck der Messung wird man zu einem Gerät für absolute oder für relative Feuchtigkeitsmessung greifen. Die Taupunktgeräte zeichnen sich durch ihre Unabhängigkeit vom Druck und ihre Eignung auch für hohe Temperaturen und Drucke aus. Allerdings sind sie in der Ausführung nicht so einfach wie die Geräte für relative Feuchtigkeitsmessung.

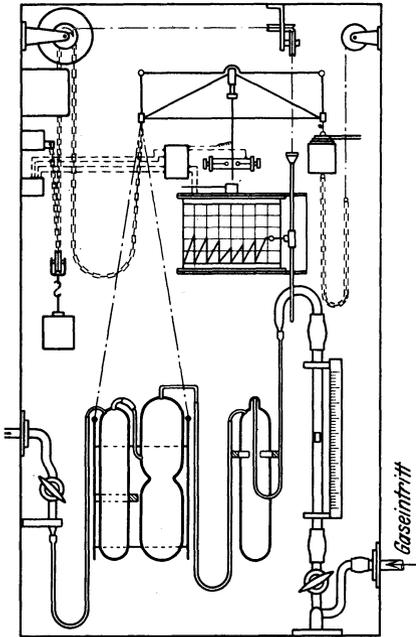


Abb. 82. Feuchtigkeits- und Gasspurenbestimmer der Thermotechnik G. m. b. H., Berlin-Lichterfelde.

Als Beispiel für ein Gerät zur Messung der absoluten Feuchtigkeit ist in Abb. 82 der Feuchtigkeitsbestimmer der Thermotechnik G. m. b. H., Berlin-Lichterfelde schematisch dargestellt.

Tabelle 14. Technische Feuchtigkeitsmeßgeräte.

Type	Ausführungsform	Kennzeichnung	Erläuterungen
I. Absolute Feuchtigkeitsmesser: a) Wägung	Thermotechnik G. m. b. H., Berlin-Lichterfelde (System Remmele) Abb. 82	Absorption durch Schwefelsäure; selbsttätige Gleichgewichtseinstellung an einer Waage; konstanter Gasstrom	s. Brüggemann: Glückauf 10 (1930); Addition der Wassermenge über eine gewisse Zeitdauer. Die Feuchtigkeitsmessung ist ein Maß für die Feuchtigkeitsmessung. Das Meßprinzip ist auch anwendbar für Benzol, CO ₂ , NH ₃ , Staub
b) Taupunkt	I. G. Farbenindustrie A. G. (System Gmelin, Ernst u. Ranke)	Der Beschlag eines Spiegels löst über eine lichtelektrische Zelle den Registriervorgang nur für den Taupunkt aus	s. P. Gmelin: Chem. Fabrik 3, 458 (1930) und A. Mittasch: Ztschr. angew. Chem. 41, 910 (1928). Abkühlung und Erwärmung des Metallspiegels folgen einander periodisch und selbsttätig Unverfänglich
c) Psychrometer	Kriechstrom-Hygrometer der I. G. Farbenindustrie A. G. (System Ranke) Cambridge Instrument Co. Ltd., London	Das Fließen eines Stromes durch den Beschlag auf einen Nichtleiter löst die Registrierung des Taupunktes aus ähnlich	s. Engineering 133, 480 (1931)
d) Dampfdruckschreiber	Siemens & Halske A. G., Berlin (nach F. Lieneweg) nach Lambrecht-Wenk, Wilhelm Lambrecht & G., Göttingen	Registrierung der berichtigten Temperatur des feuchten Thermometers mit Brückenkreuzspulgerät Kombination von Haarstrang und Bimetall	s. Siemens-Ztschr. 10, 584 (1930). Die Korrektur beträgt $\tau = t_f - 0,04(t - t_f)$ F. Wenk: Ztschr. Instrumentenkunde 54, 15 (1934). Mit logarithmischer Skala für den Dampfdruck
II. Relative Feuchtigkeitsmesser: a) Psychrometer	Hartmann & Braun A. G., Frankfurt a. M. Leeds & Northrup Comp., Philadelphia (nach Wood) USA.-Pat. 1493586 (1922) Siemens & Halske A. G. Berlin, D.R.P. 514539 (1929) I. G. Farbenindustrie A. G. (System Ranke) C. J. Tagliabue, Brooklyn	Thermoelektrische Temperaturdifferenzmessung. Berichtigung durch Quecksilberkontaktthermometer Schaltung s. Abb. 83, S. 662. Verwendung des Potentiometer Recorders Schaltung s. Abb. 84, S. 662 und Schema Abb. 85, S. 663. Verwendung des Brückenkreuzspulgerätes Temperaturberichtigtes Psychrometer mit Wechselstrom-Ohmmeter Feuchtes und trockenes Metall-Ausdehnungsthermometer in Spiralform	Enger Verwendungsbereich, ungenau s. auch L. Behr: Journ. opt. Soc. America. 12, 623 (1926), zwischen der trockenen und der feuchten Temperatur und der relativen Feuchtigkeit (F) besteht die Beziehung: $F = \varphi \left(\frac{t_f + a}{t + b} \right)$ Verwendungsbereiche - 5 bis + 10°, 10-40° und 40-120°, Spannungsunabhängig Unverfänglich Zu Regelzwecken verwendet, mit Druckluftkraftverstärker

Tabelle 14 (Fortsetzung).

Type	Ausführungsform	Kennzeichnung	Erläuterungen
b) hygroskopische Stoffe	Menschenhaare (gelegentlich auch Darmsaiten) Cellophan (Kalle & Co., Wiesbaden-Biebrich; Siemens & Halske, Berlin) Goldschlagerhaut (Cambridge Instrument Co. Ltd., London) Holzstreifen (Askaniawerke A.G., Berlin-Friedenau)	Von der Temperatur wenig abhängig Mit Vakuumschalter zum Regeln Größere Verstellkräfte als Haare, jedoch weniger zuverlässig	H. Saussure: Ostw. Klassiker, Bd. 115 und 119, Leipzig 1900. Bei niedriger Feuchtigkeit bleibende Längenänderungen (Regenerieren bei Sättigung) Noch wenig erprobt s. Griffiths u. Hatfield: Journ. Soc. Instr. A 90 (1932) Nicht temperaturabhängig, geeignet zum Betrieb von Registern, wenn in erster Linie Feuchtigkeitsänderungen durch Regelung kompensiert werden sollen
III. Indirekte Feuchtigkeitsmessung:	Ranarex-Apparat Wärmeleitfähigkeit von Gasen und Dämpfen	Dichtemessung (s. Abschnitt IV, S. 653) s. Abschnitt VII, S. 673. 1 % Änderung der relativen Feuchtigkeit bei 20° entspricht etwa 0,006 % Änderung der Wärmeleitfähigkeit	Eichung in absoluter Feuchtigkeit, z. B. 0—15 Vol.-% Wegen geringer Empfindlichkeit und beschränkter Anwendbarkeit wenig geeignet (s. H. Größ u. H. Schmidt: Wissenschl. Veröffentl. Siemens-Konzern 7, 202 (1928) u. Physikal. Ztschr. 29, 633 (1928))

Die Temperaturberichtigung der thermoelektrisch gemessenen psychometrischen Differenz wird von

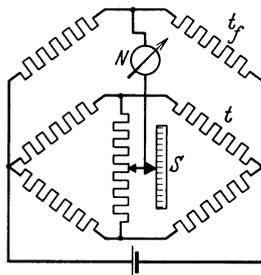


Abb. 83. Psychrometerschaltung nach Wood (Leed & Northrup Co., Philadelphia).

Hartmann und Braun durch Quecksilberkontaktthermometer in Stufen vorgenommen, was jedoch nur

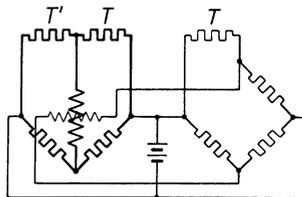


Abb. 84. Schaltschema zur Bestimmung der relativen Feuchtigkeit nach Größ-Lieneweg. T trockene Thermometer, T' befeuchtetes Thermometer.

für einen engen Temperaturbereich von etwa 10°C durchführbar ist. Einen wesentlichen Fortschritt bedeuten die beiden von Siemens & Halske in den Handel gebrachten und mit Widerstandsthermometern arbeitenden Feuchtigkeitsmesser, die über größere Temperaturbereiche (s. Tabelle 14, S. 661) die Feuchtigkeit unabhängig von der Temperatur richtig anzeigen.

Die nach dem ersten Eindruck verwunderliche Tatsache, daß wirklich brauchbare, auch für Regelzwecke verwendbare, technische Feuchtigkeitsmeßgeräte erst in jüngster Zeit geschaffen wurden, erklärt sich

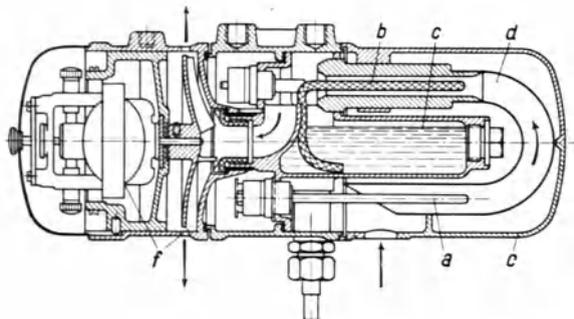


Abb. 85. Schnitt durch den Feuchtigkeitsmesser von Siemens & Halske A. G., Berlin. *a* Doppelthermometer, *b* befeuchtetes Thermometer, *c* Wasserbehälter, *d* Luftführungsrohr, *e* Gehäuseklappe, *f* Motor mit Ventilator.

daraus, daß die Feuchtigkeitsmessung letzten Endes eine äußerst feine Temperaturdifferenzmessung ist, die mit robusten Mitteln nicht bewältigt werden kann.

C. Feuchtigkeitsregler.

Alle elektrischen Feuchtigkeitsmesser können über den S. 606 f. bereits besprochenen Fallbügelregler (Abb. 14) entsprechende Regelorgane betätigen. Die übrigen Hygrometer benützen zum größten Teil mechanische Kraftverstärker. Die Firma W. C. Heraeus G. m. b. H., Hanau a. M. schaltet über eine Differentialanordnung eines trockenen und eines feuchten Ausdehnungsthermometers einen elektrischen Kontakt. Die Feuchtigkeitsregelung erfolgt mit den Mitteln der Temperatur- und Mengenregelung.

Einige Beispiele sollen zur Illustration dienen:

Beispiel 1: Die Raumluft soll bei dauernder Heizung nicht unter eine gewisse Grenze der relativen Feuchtigkeit sinken: Dieser einfache Fall tritt außerordentlich häufig auf und kann mit einem einzigen Regelorgan, z. B. einer Zerstäuberdüse über ein Druckluft- oder über ein Dampfventil beherrscht werden. Einen für diesen Zweck geeigneten mechanischen Regler auf psychometrischer Grundlage zeigt Abb. 86. Der von der Firma I. C. Eckardt A. G., Stuttgart-Cannstatt gebaute Feuchtigkeitsregler besitzt ein mit Druckluft betriebenes Regelventil. Steigt die Raumtemperatur, so dehnt sich die Membran *5a* aus und der Drehpunkt *7* und damit die Hebel *2*, *3* und *4* senken sich; das Regelventil wird geöffnet. Dadurch wird selbsttätig durch Feuchtigkeitserhöhung auf die entsprechend veränderte Temperatur des nassen Thermometers eingestellt. Je nachdem wird der Regler mittels Schließ- oder Öffnungsreglerwerk versehen; im Falle einer Befeuchtungsanlage schließt bei steigender

Feuchtigkeit das Reglerwerk selbsttätig, im Falle einer Trockenanlage wird das Regelventil geöffnet.

Beispiel 2: Die relative Feuchtigkeit eines Raumes ist bei steigender und fallender Temperatur konstant zu halten: Ist die relative Feuchtigkeit zu niedrig, so liegt das Beispiel 1 vor; ist sie zu hoch, so ist ein Luftstrom entsprechender Stärke im Kreislauf über eine Trocken- einrichtung zu führen. Beide Vorgänge erfolgen am besten schrittweise.

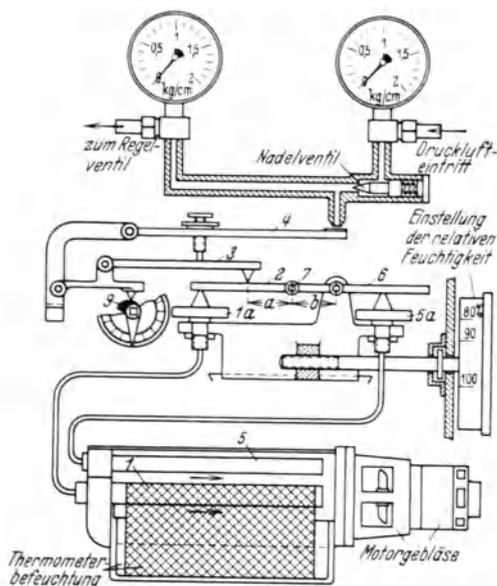


Abb. 86. ICE-Feuchtigkeitsregler auf psychrometrischer Grundlage. 1 nasser Temperaturfühler, 1a Membran, 2, 3 Hebel, 4 Scheibenhebel, 5 trockener Temperaturfühler, 5a Membran, 6 Hebel, 7 Drehpunkt des Hebels 2, a: b Hebelverhältnis, verstellbar damit die relative Feuchtigkeit, 9 Kurvenschreiber zur Justierung.

durch ein Dampfventil schrittweise zugegeben und das Luftvolumen mit einem Ventilator umgewälzt [s. A. Mittasch: Ztschr. angew. Chem. 41, 910 (1928)].

VI. Heizwertmessung¹.

A. Theoretische Grundlagen der Heizwertmessung

(s. auch S. 259 und Bd. II, S. 151).

Der Heizwert von Gasen wird im allgemeinen auf die Volumeneinheit (m^3) bezogen. Es ist zu unterscheiden zwischen dem in der Physik üblichen Normkubikmeter (Nm^3) bezogen auf 0° und 760 mm QS und den in der Technik üblichen praktischen Einheiten. Es gelten folgende Beziehungen:

1 $Nm^3 = 1/22,4$ Mol, danach ist

1 $Nm^3 = 1 m^3$ Gas bezogen auf 1 at und $-8,8^\circ C$.

Vgl. auch S. 717 und 720.

¹ Bearbeitet von Dr. A. Ernst, Ludwigshafen a. Rh.

Der der Praxis der Verbrennungsvorgänge entsprechende Heizwert ist der sog. untere Heizwert (H_u), bei welchem der durch die Verbrennung gebildete Wasserdampf dampfförmig bleibt. Der in den Handkalorimetern bestimmte Heizwert, bei welchem der gebildete Wasserdampf kondensiert, ist der obere Heizwert (H_0). Je nach dem Gehalt des Gases an Wasserstoff und an Wasserdampf unterscheiden sich beide Heizwerte mehr oder weniger. Zwischen oberem und unterem Heizwert, dem Verbrennungswasser w_v und der Brennstofffeuchtigkeit w_f besteht die Beziehung:

$$H_0 - H_u = 595 \cdot (w_v + w_f) \quad (33)$$

oder rund

$$= 600 \cdot (w_v + w_f).$$

Der Faktor 595 (abgerundet 600) entspricht der Kondensationswärme des Wasserdampfes zuzüglich der bei der Abkühlung des flüssigen Wassers auf Raumtemperatur freiwerdenden Wärme. Tabelle über Heizwertes. S. 263.

Als Maß für die Wärmeeinheit gilt die Kilogrammkalorie (kcal); es ist dies die Wärmemenge die notwendig ist, um 1 kg Wasser von 14,5° C auf

Tabelle 15. Heizwertschreiber.

Type	Ausführungsform	Kennzeichnung	Erläuterungen
I. direkte Messung: thermoelektrisch	Junkers Kalorimeterbau G. m. b. H., Dessau	Wassermenge = const Gasmenge	Trutorsky GWF (1932); mit Reduktionseinrichtung
Widerstandsthermometer	Burgess-Parr Co., East Moline, Illinois	mit Temperaturdifferenzschreiber von Leeds & Northrup Co., Philadelphia	Instruments, Pittsb. Pa. 2, 213 (1929) u. 3, 87 (1930) mit Reduktionseinrichtung
Gas thermometer und Ausdehnungsthermometer	Union Apparatebau-Gesellschaft m. b. H., Karlsruhe i. B. Simmance, „Positive-Record“ und Simmance Abbady, Calorigraph“ (Firma H. Wright & Co., Manchester) Johnson-Heizwertschreiber (Firma Gas Producer & Engineering Corp. Coatesville Pa.) Beasley-Sarco-Heizwertschreiber (Firma Sanders, Rehdes & Co. Ltd., London) Fearweather-Heizwertschreiber	diskontinuierliche Ringrohrregistrierung Dosen-Differenzthermometer mit mechanischer Registrierung Gasdruck konstant	reduzierter Heizwert, auch elektrische Fernübertragung mit Kreuzspulgerät möglich getrennte Konstanthaltung für Wasser und Gas Ein abgemessenes Gasvolumen wird verbrannt Instruments, Pittsb. Pa. 3, 91 (1930)
II. Indirekte Messung: Strahlungswärme	I. G.-Heizwertschreiber nach Gmelin und Seiferheld	Gasdruck konstant, unabhängig von Gasmenge Zeiteinheit. Strahlungsmessung eines glühenden Körpers (keine Selektiv-	Instruments, Pittsb. Pa. 3, 98 (1930) u. Bousquet, Vie techn. et ind. 8, 61 (1926) Gas Wld. 82, Nr. 1980, 12 (1922) Ann. Physik 76, 211 (1925), Messung mit Strahlungsthermosäule; Thermokraft proportional dem Heizwert; kleinste thermische Trägheit

15,5° C zu erwärmen. Sie entspricht der internationalen kcal = 1/860 internationale kWh. Für sämtliche direkt arbeitende Heizwertmesser gilt die Beziehung:

$$\text{Wärmemenge} = \text{Wassermenge} \times \text{Temperaturdifferenz.}$$

Für die theoretische Berechnung des Heizwertes aus der Elementaranalyse vgl. S. 261.

B. Heizwertschreiber.

In Tabelle 15, S. 665 ist eine Übersicht über die bekanntesten Heizwertschreiber gegeben, geordnet nach den ihnen zugrunde liegenden

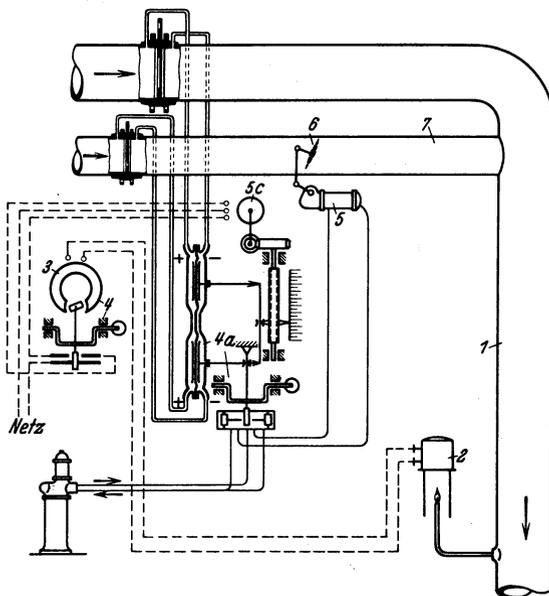


Abb. 87. Heizwertregelung mit hydraulischem Reineke-Kraftbügelregler (Thermotechnik G. m. b. H., Berlin-Lichterfelde). 1 Mischgasleitung, 2 Junkers-Heizwertschreiber, 3 Galvanometermeßsystem des hydraulischen Reineke-Kraftbügelreglers, 4 Reineke-Kraftbügelregler, 4a Gemischregler, 5 hydraulischer Kraftzylinder, 5c Elektromotor, 6 Drosselorgan, 7 Zusatzgasleitung.

Meßprinzipien. Das vollkommenste und seit vielen Jahren bewährte Gerät ist der Junkerssche Heizwertschreiber. Er besitzt eine Reihe sinnreicher Regeleinrichtungen.

Ein Trommelmesser ist mit einer Gasuhr durch eine Kette gekoppelt, so daß das Verhältnis Wassermenge Gasmenge konstant

bleibt und der Heizwert direkt proportional der thermoelektrisch gemessenen Temperaturdifferenz ist. Ferner liefert die Herstellerin eine Reduziervorrichtung für Bezug auf Normaldruck und Normaltemperatur, so daß also direkt der reduzierte Heizwert aufgezeichnet wird. Eine nicht unwesentliche Ver-

billigung des Anschaffungswertes bedeutet der mit mechanischer Registrierung ausgerüstete Union-Heizwertschreiber. Da das Leitungswasser vielfach für die Kalorimetergefäße nicht rein genug ist, empfiehlt es sich, destilliertes Wasser im Umlauf zu verwenden.

Eine besonders interessante Ausführung für indirekte Heizwertmessung stellt der I.G.-Heizwertschreiber dar. Er zeichnet sich durch eine sehr kleine thermische Trägheit aus und ist deshalb für Untersuchungen an Gasen mit rasch wechselndem Heizwert besonders geeignet.

C. Heizwertregler.

Das Problem der Heizwertregelung ist im allgemeinen Aufgabe einer Gemischregelung und wird als solche mit den in Abschnitt IX B, S. 819 und 825 behandelnden Mitteln beherrscht. Am einfachsten erfolgt die Regelung zweier Gase auf konstantem Heizwert im Mischgas durch die Querschnittveränderung der Zusatzgasleitung. In Abb. 87 ist ein hydraulischer Reineke-Kraftbügelregler dargestellt mit einleitender Mengenverhältnisregelung der zwei Gase und zusätzlicher Feinregelung nach dem Heizwert. Abb. 198, S. 825 zeigt das Schema einer entsprechenden Regeleinrichtung von Siemens & Halske.

VII. Physikalische Analysenverfahren.

A. Mechanisierte, chemische Analysenverfahren.

Die geschichtliche Entwicklung der physikalischen Analysenapparate knüpft an die Mechanisierung chemischer Analysenmethoden an. Hierunter soll verstanden werden, daß sowohl der Gang der Analyse als die Analysenfolge selbsttätig ist und das Ergebnis selbsttätig aufgezeichnet wird. In Tabelle 16, S. 669 sind einige solcher Analysenautomaten zusammengestellt, darunter der älteste Rauchgasprüfer, der Ados-Apparat, der in verbesserter Ausführung auch heute noch in vielen Kesselhäusern verwendet wird.

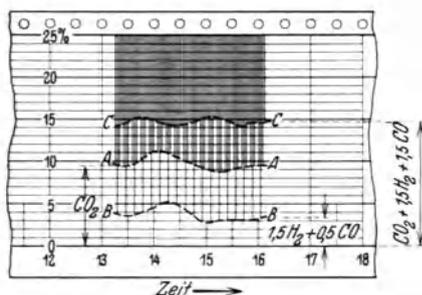


Abb. 88. Diagrammstreifen eines Triplex-Mono-Apparates.

B. Physikalische Analysenverfahren, nach vorausgegangenem chemischen oder physikalischen Reaktionen.

Eine andere Gruppe sind die Analysenapparate, die nach vorausgegangener chemischer Reaktion oder mehrerer, zeitlich aufeinanderfolgender Reaktionen, das Analyseergebnis mit physikalischen Mitteln fortlaufend aufzeichnen. Tabelle 17, S. 670 gibt eine Übersicht über eine Reihe erprobter Ausführungsformen dieser Art. Für die hierzu gehörigen Trübungsmesser ist Voraussetzung, nur solche Trübungen anzuwenden, bei denen keine merkliche Ausflockungen stattfinden. Bei den Farbänderungsmessungen kommen nur Farbstoffe in Betracht, die praktisch während der Analysendauer nicht verblassen und deren Ausgangsstoffe genügend lagerfähig sind, so daß die Lösungen für die Dauer einer Woche im voraus angesetzt werden können.

C. Physikalische Analysenverfahren, auf Grund gleichzeitiger chemischer Reaktionen.

Praktisch kommen hier nur Meßgeräte in Betracht, die Temperaturerhöhungen infolge chemischer Reaktionen messen. Zuerst war es die

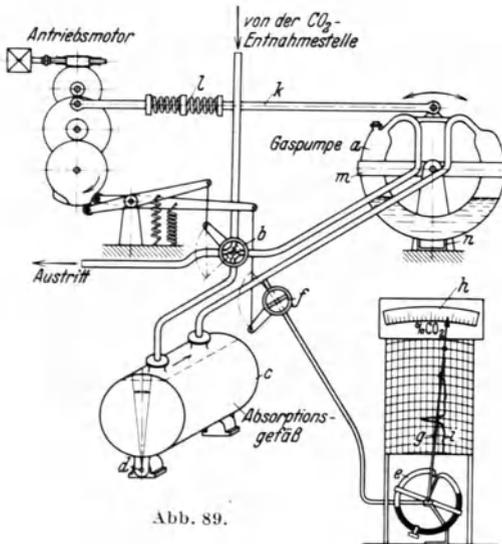


Abb. 89.

Abb. 89.
Rieco-Rauchgasprüfer der Firma Friedr. Riedel & Co., G. m. b. H., Essen.
a Ringrohr mit Sperrflüssigkeit als Gaspumpe, *b* Hauptfahnen, *c* Absorptionsgefäß, *d* Achse, um die *c* geschwenkt wird, *e* Ringwaage auf Schneiden gelagert, *f* Hahn, *g* Zeiger, *h* Skala, *i* fortlaufende Linie, *k* Kurbelstange, *l* Federung, *m* Halteklammer, *n* fester Anschlag.

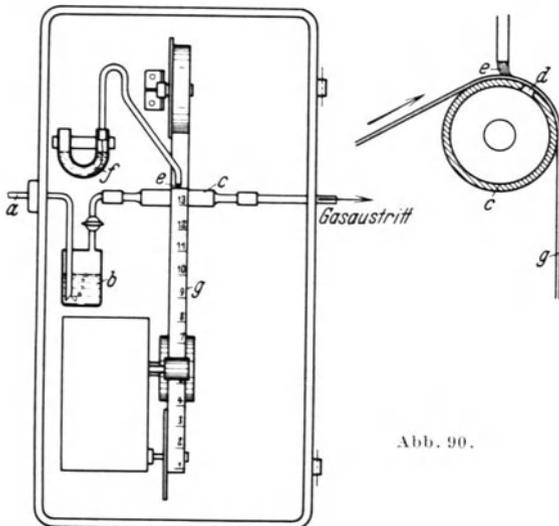


Abb. 90.

Abb. 90.
Kolorimetrischer Gasuntersucher der Thermo-technik G. m. b. H., Berlin-Lichterfelde.

a Gaseintritt, *b* Reinigungsvorlage, *c* Reaktionsrohr, *d* kleine Öffnung in *c*, *e* Reagenzflüssigkeit, *f* Vorratsgefäß der Reagenzflüssigkeit, *g* Papierband auf *d* aufliegend.

Hochdrucksynthese nach dem Haber-Bosch-Verfahren, die zur Überwachung der technischen Gasmische besondere Analysengeräte für Sicherheitsapparate erforderte. Der von P. Gmelin angegebene und

Tabelle 16. Mechanisierte chemische Analysenverfahren.

Type	Ausführungsform und Herstellerfirma	Erläuterungen und Literaturangaben
<p>I. Volumetrische Verfahren:</p>	<p>Ados-Apparate für CO₂, O₂ und N₂ (Ados G. m. b. H., Aachen) Eckardt-Rauchgasprüfer (I. C. Eckardt, Stuttgart-Cannstatt)</p> <p>Comeco-(CO₂) Omeco-(O₂) Zweifach-Meco- (CO₂+O₂) Cohameco- (CO+H₂)</p> <p>Apparate d. Thermo- technik G. m. b. H., Berlin-Lichterfelde</p> <p>Cocoo-Rauchgasprüfer (Kohlen- scheidungs-G. m. b. H., Berlin W 35) für CO₂ und CO+H₂</p> <p>Mono G. m. b. H., Duplex-Mono } Triplex-Mono } Hamburg 39</p>	<p>Mechanisierte Hempel'sche Gasanalyse, Ältester Rauchgasprüfer, 15 bis 20 Analysen pro h, bei I. C. Eckardt 40 pro h, Genauigkeit $\pm 0,2\%$ CO₂ bei Meßbereich 20% CO₂, Wasserantrieb. Pro Analyse ein Strich, dessen Endpunkt das Analyseergebnis darstellt</p> <p>Motorantrieb, auch für den Registrierstreifen, Fortlaufende Registrierkurve. Auch für Fernanzeige und Registrierung eingerichtet</p> <p>Arbeitet mit Wasserheber</p> <p>Mit Wasser von mindestens 1 atü angetrieben. H. D. Brasch: Wärme 1931 u. Gas- u. Wasserfach 1931. Diagramme eines Triplex-Mono siehe Abb. 88, S. 667. Anwendung auf die verschiedensten technischen Gasgemische. Fernanzeige möglich</p>
<p>II. Manometrische Verfahren:</p>	<p>Rieco-Rauchgasprüfer (Friedr. Riedel & Co., G. m. b. H., Essen)</p> <p>I. G.-Drosselscheibenapparat nach P. Gmelin</p>	<p>Drehstrommotorantrieb (80 W) für CO₂, O₂, CO verwendbar. Vorzug: Sehr kleiner Meßbereich z. B. 0—1,0% CO₂. 30—60 Analysen pro h. Der Zeiger bleibt auf dem letzten Analyseergebnis solange, bis eine neue Analyse durchgeführt ist, dadurch fortlaufende Kurve. Arbeitsweise siehe Abb. 89, S. 668</p> <p>Für Gase und Dämpfe, z. B. NH₃, das durch Wasser absorbiert wird. Das absorbierte Volumen wird als Differenzdruck gemessen. Siehe Chemie-Ingenieur, Bd. 2, Teil 4, S. 66, 1933</p>
<p>III. Kolorimetrische Verfahren:</p>	<p>Kolorimetrischer Gasspurenbestimmer (Thermotechnik G. m. b. H., Berlin-Lichterfelde)</p> <p>Kontinuierlicher Schwefelprober (Elster & Co., A.G., Mainz)</p>	<p>z. B. für H₂S in Kokereien, siehe Abb. 90, S. 668</p> <p>Nach H. Raupp, Verwendung eines stets feuchten Reagensbandes (Bleiacetat). Empfindlichkeit: 0,0001%. Siehe auch E. Ledig: Journ. Gasbel. 32, 929 (1889)</p>

Tabelle 17. Physikalische Analysenverfahren nach vorausgegangenem chemischen oder physikalischen Reaktionen.

Type	Ausführungsform und Herstellerfirmen	Erläuterungen und Literaturangaben
Wärmetönungsapparat	Wärmetönungsapparat der I. G. Farbenindustrie A.G. zur Messung des Wassergehalts in technischen Gasgemischen	Der Wasserdampf wird katalytisch in H_2 umgesetzt und dieser durch Verbrennung quantitativ gemessen. Beschreibung des Wärmetönungsapparates siehe P. Gmelin: Chem. Fabrik 1930, Nr. 245, 448, ferner Ann. Physik 76, 198 (1925)
Wärmeleitfähigkeitsapparate für Gase	Kohlenoxydmesser der Cambridge Instrument Comp. Ltd., London Sauerstoffprüfer der Gesellschaft für Meßtechnik m. b. H., Bochum Kohlenoxydmesser	CO wird in CO_2 übergeführt und in Differentialhaltung gegen das CO -haltige Gas die geänderte Wärmeleitfähigkeit des Gasgemisches gemessen Der in Wasser, z. B. Kesselspeisewasser, gelöste Sauerstoff wird in einem Wasserzestäubler mit elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff in Berührung gebracht und ausgefrieren. Die Messung des O_2 erfolgt in einem Wärmeleitgerät. Siehe K. Hofer: Wärme 1931, 236 K. Gordon, J. F. Lehmann: Forsch. Arb. Imper. Chem. Ind. Ltd., ferner Journ. scient. Instruments 5, 123 (1928) CO wird über Jodpentoxyd verbrannt und das CO_2 in einer Bariumcarbonataufschümmung durch deren Leitfähigkeit gemessen Zur Bestimmung der Gesamtkalorität des Kesselspeisewassers, oder der Natronlauge allein. Siehe P. Gmelin: Chem. Fabrik 45, 449 (1930). Der Neutralisationspunkt der Titration wird mittels Selen- oder Photozelle durch Abstoppen des Zulaufs der Titrerflüssigkeit angezeigt. Siehe Diagramm Abb. 91
Elektrische Leitfähigkeitsapparate für Flüssigkeiten	I. G.-Titrerautomat nach A. Ernst und E. Lehrer	Für Serientitration mit gleichzeitiger Registrierung des jeweiligen Elektrodenpotentials und der verbrauchten Titerlösung
Farbänderungsmeß-Apparate	Automatische Titrationseinrichtung nach Wulff-Kordatzi, F. & M. Lautenschläger G.m.b.H., München SW 6 I. G.-Sauerstoffschreiber	Technische Gase, z. B. acetylenhaltige Gase, werden mit einer reduzierenden Flüssigkeit behandelt und deren Farbänderung quantitativ gemessen
Trübungsmesser	Kohlenoxydschreiber Schwefelwasserstoffschreiber I. G.-Härtemesser nach A. Ernst und E. Lehrer	CO wird verbrannt und das CO_2 in Barytwasser aufgefangen, dessen Trübung quantitativ gemessen wird H_2S wird mit Bleiacetat aufgefangen und die Trübung gemessen. Kesselspeisewasser von extrem niedriger Härte wird durch geeignete Lösungen behandelt, derart, daß die Trübung ein Maß der Härte ist, die mit einem Fallhöheinstrument (ähnlich der Taupunktregistrierung) in einer fortlaufenden Kurve registriert wird

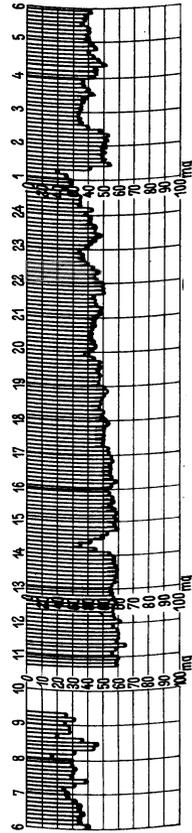


Abb. 91. Tagesdiagramm eines I. G.-Titrerautomaten.

Table 18. Physikalische Analysenverfahren auf Grund gleichzeitiger chemischer Reaktionen.

Type	Ausführungsform und Herstellerfirma	Erläuterungen und Literaturangaben
Katalytische Verbrennung reaktionsfähiger Komponenten in Gasgemischen	Sauerstoffspurenmessung in brennbaren Gasen oder brennbare Gase und Dämpfe in Luft durch den I. G.-Wärmetönungsapparat	Literatur siehe Tabelle 17, S. 670. Mit dem Apparat kann mit Leichtigkeit noch 1/100 Vol.-% gemessen werden. Sicherheitsapparate in Betrieben mit Hochdruckverfahren (Ammoniaksynthese). Schema, siehe Abb. 92, S. 671. Inerten Gasen wird Wasserstoff zugesetzt, so daß z. B. in Linde-Stickstoff laufend der Restsauerstoff gemessen werden kann
Meßgeräte für (CO + H ₂) in Rauchgasen	Kohlenoxydmesser der Dräger-Gesellschaft m. b. H., Lübeck Siemens-(CO + H ₂)-Geber, Siemens & Halske, Berlin Hartmann & Braun A. G., Frankfurt a. M. Klinkhoff-Apparatebau-Ges., Berlin SW 48 Dr. Martin Böhme, Berlin W 50	CO wird an Hopkalt bei 100° C verbrannt und die Verbrennungswärme thermoelektrisch gemessen. I. H. Katz, D. A. Reynolds, H. W. Frevert u. J. G. Bloomfield: Bur. Mines Techn. Pap. 366, Washington 1926. G. Stampe: Ztschr. Meßtechn. 6, 267 (1930) Auch für Abgase von Explosionsmotoren und als Gassucher in chemischen Betrieben. Platiniridium-Meßdraht in Brückenschaltung Verwenden ganz ähnliche Meßeinrichtungen

von A. Ernst für eine Reihe von Anwendungsbeispielen technisch durchkonstruierte Wärmetönungsapparat (Abb. 92)

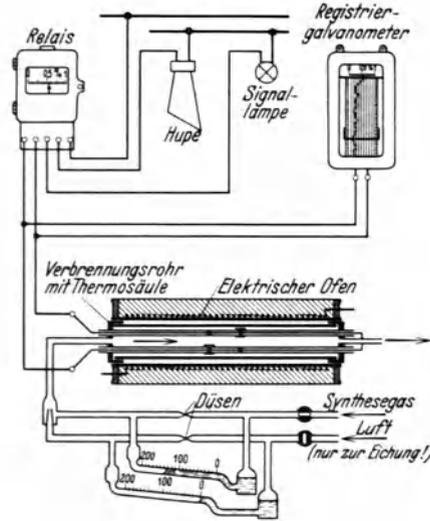
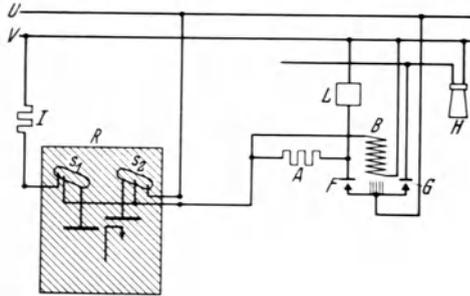


Abb. 92. I. G.-Wärmetönungsapparat für Spuren Sauerstoff in brennbaren Gasen.

erwies sich für die genannten Zwecke als außerordentlich betriebssicher. Die feinen Platinkatalysatoren müssen allerdings



gegen Kontaktgifte geschützt werden. In Abb. 93 ist eine besonders geeignete Alarmschaltung in Verbindung mit einem Fallbügelregler (s. Abb. 93) angegeben. Hierbei ist angestrebt, daß der Alarm solange aufrechterhalten wird, bis

Tabelle 19. Rein physikalische Analysenverfahren.

Type	Ausführungsform und Herstellerfirma	Erläuterungen und Literaturangaben
1. Mechanische Meßverfahren: für Dichte für Zähigkeit	Dichtemessung Union-Inertgasschreiber der Union- Apparatebaugesellschaft m. b. H., Karlsruhe i. B. I. G.-Zähigkeitsschreiber der I. G. Farben- industrie A. G., ähnlich dem I. G.-Gasdichte- schreiber (Tabelle 13, S. 656)	Siehe Abschnitt C Indirekte Näherungsmethode, praktisch hinreichend genau für CO ₂ und N ₂ in Steinkohlengas. Messung der Druck- differenz an einer Capillare Luft als Vergleichsgas, Zähigkeitsverhältnis wird auf ein Druckverhältnis zurückgeführt. Grundlage Poiseuil- lesches Gesetz angewandt für zwei Gase, die durch zwei gleich lange Capillaren strömen
2. Thermische Meßverfahren für Verdampfung und Kondensation: für Wärmeleitfähigkeit von Gasen	bis jetzt unbekannt Rauchgasprüfer vieler Firmen: Siemens & Halske, Berlin; Hartman & Braun A. G., Frankfurt a. M.; Charles Engelhardt, Ne- wark, New-Jersey; Klinikhoif-Apparatebau- gesellschaft, Berlin; Dr. Martin Böhme, Berlin	Nur für Handanalysenapparate verwendet, z. B. I. G.- Wasserbestimmungsapparat nach A. Ernst und K. Ackermann. Siehe Chem. Fabrik 2, 449 (1930)
3. Elektrische Leitfähigkeitsver- fahren:	1. Kondenswasserprüfer der Firma Gesell- schaft für Meßtechnik, Bochum 2. Leeds & Northrup, Philadelphia 3. Siemens & Halske A. G., Berlin 4. H. Wösthoff, Bochum 5. Evershed & Vignoles, London	{ Siehe Firmenkataloge; ferner G. Größ: Chemie-Inge- nieur, Bd. 2, Teil 4, S. 25f.
4. Elektrolytische Potential- meßverfahren: Kompensationsapparate	Leeds & Northrup, Philadelphia Siemens-p _H -Meßgerät für Aufzeichnung und Regelung des p _H -Wertes mit Platin-Wasser- stoffelektrode, Abb. 97, S. 675 Erstmal von K. A. Goode „Stationograph“ von F. und M. Lauten- schlager, München Antimon-Antimonoxid-Elektrode mit Kalomel-Bezugselektrode für p _H -Messungen Ionograph der Firma E. Leybold's Nachf., Köln-Bayenthal, zur Messung von Reduktions- potentialen	Auch für Laugen, Säuren und Abwässer Salzgehaltprüfer, temperaturkompensiert Vgl. Geyer: ATM V 3514 — 1 Dionic-Wasserprüfer
Röhrenvoltmeter	E. Mislowitzer: Die Bestimmung der Wasserstoffionen- konzentration, Berlin 1928 A. L. Holven: Ind. engin. Chem. 1929, 965 Registrierung mit Siemens-Kompensograph.	
Strommeßverfahren	Journ. Amer. chem. Soc. 44, 26 (1921); E. Berl, W. Her- bert, W. Wahlig: Chem. Fabrik 3, 445 (1930) P. Wulf u. W. Koratzki: Chem. Fabrik 3, 329 (1930) P. Gmelin: Chemie-Ingenieur, Bd. 2, Teil 4, S. 247. 1933	Photographische Registrierung der Art und der Menge in einer Lösung vorhandener Ionen. Die Höhe des Reduk- tionspotentials ist durch die Art des Ions, die Menge der kathodisch reduzierten Substanz durch die Höhe des Sprungs in der Strom-Spannungskurve bestimmt

<p>5. Dielektrizitätskonstanten-Messung:</p>	<p>Wegen Kompliziertheit für Registrierzwecke noch kaum angewendet. „Siccometer“ von Siemens & Halske A. G., Berlin „DK“-Apparat der Hellan G. m. b. H., Frankfurt a. M.</p>	<p>Papierfeuchtigkeitsmesser [Siemens-Ztschr. II, 31 (1931)]. Ähnlich dem „Idometer“ zur Dickenbestimmung von Gummibändern Zur Bestimmung von Wassergehalt in Braunkohle, Getreide und ähnlichen Körpern (nicht registrierend)</p>
<p>6. Optische Meßverfahren für Gase und Dämpfe: für Flüssigkeiten</p>	<p>Siemens-Rauchdichtemesser I. G.-Absorptionsschreiber für NO₂-Luftgemisch I. G.-Ultra-Absorptionsschreiber I. G.-Absorptionsschreiber für Flüssigkeiten Kipp & Zonen, Delft, baut einen ähnlichen Apparat</p>	<p>Zur Kontrolle des Wirkungsgrades von Entstaubungsanlagen (s. Abb. 94, S. 674) Für sichtbare Strahlung [P. Gmelin: Chemie-Ingenieur, Bd. 2, Teil 4, S. 121] Für Wärmestrahlung [P. Gmelin: Chemie-Ingenieur, Bd. 2, Teil 4, S. 122, 1933]. Differentialmessung mit Strahlungsthermosäulen; Schaltbild Abb. 95, S. 674</p>

die Gefahrzone durch den Zeiger des Meßgerätes wieder unterschritten wird. Weniger empfindliche Apparate sind die für Rauchgasanalysen entwickelten (CO + H₂)-Schreiber, die von einer Reihe von Firmen angefertigt werden (vgl. auch Tabelle 18, S. 671).

D. Rein physikalische Analysenverfahren.

Die rein physikalischen Analysenverfahren können teils vollwertig, teils mit größerer Meßgenauigkeit an die Stelle chemischer Analysenverfahren treten. Sie haben den unschätzbaren Vorteil der selbsttätigen Meßeinrichtungen. Dieser besteht darin, ununterbrochene Aufzeichnungen über Betriebsvorgänge zu erhalten und wo es von wirtschaftlichem Nutzen ist, an diese hochwertigen Meßgeräte Regeleinrichtungen anzuschließen, dadurch die Führung des Betriebes wesentlich zu erleichtern und zu vervollkommen.

In Tabelle 19 ist eine methodische Übersicht über die verschiedenen Verfahren gegeben und in den Abb. 94 und 95 zwei Beispiele schematisch dargestellt. Im übrigen sei auf die angegebene Originalliteratur und die Firmenprospekte verwiesen.

Zu einer sehr vielseitigen und fruchtbaren Anwendung gelangten die Wärmeleitgeräte für Gase. Ursprünglich nur für die CO₂-Messung in Rauchgasen benutzt, sind sie zur Analyse einer ganzen Reihe anderer technischer Gasgemische geeignet und auch in Verwendung, z. B. für SO₂-Anzeige. Neuerdings hat die Firma Siemens & Halske, Berlin einen elektrischen Sauerstoffmesser herausgebracht, der besonders für Mischgasfeuerungen von Interesse ist. Siehe ATM V 723—9 und 723—10. Man setzt dem Rauchgas Wasserstoff im Überschuß zu und arbeitet mit einem Differentialwärmeleitgerät, indem man das Gas mit dem zugesetzten Wasserstoff durch eine Kammer und nach der quantitativen Verbrennung des Sauerstoffs mit dem Wasserstoff durch eine zweite Kammer leitet. Als Meßbereich wird z. B. gewählt 0—8% O₂. Auf Wunsch größere oder kleinere Meßbereiche.

Es ist wichtig, im Einzelfall zu prüfen, ob die Anzeige durch das Wärmeleitgerät eindeutig ist, z. B. kann sich der Einfluß wechselnder

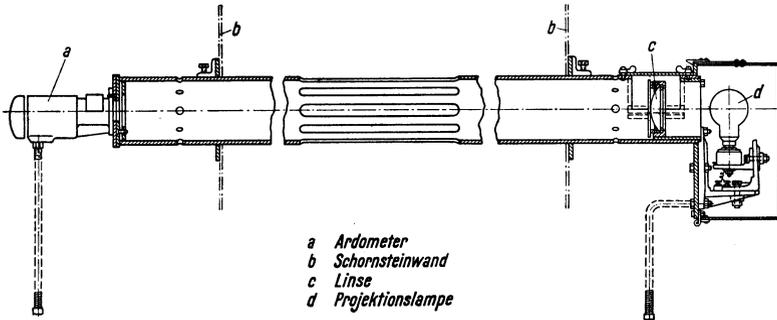


Abb. 94. Siemens-Rauchdichtemesser in einem Schornstein.

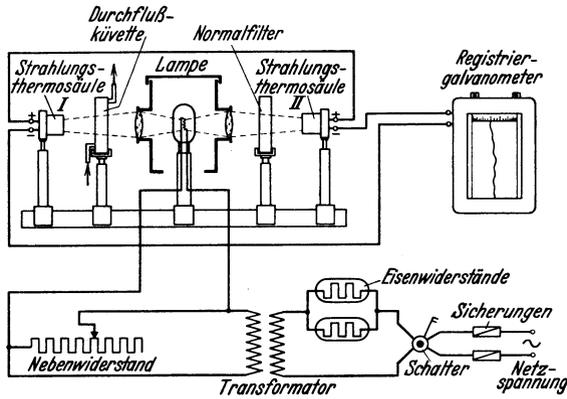


Abb. 95. I. G.-Absorptionsschreiber für Flüssigkeiten.

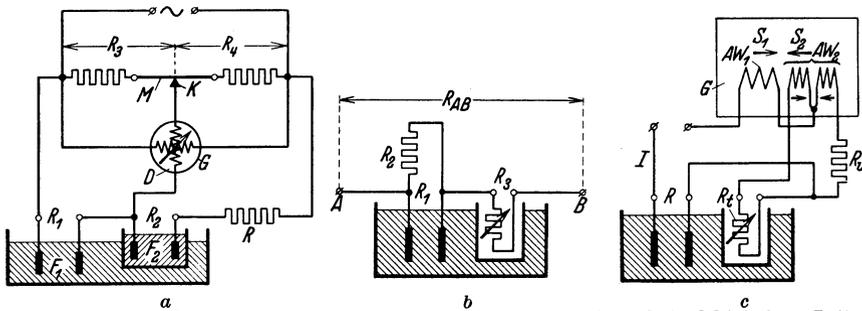


Abb. 96. Methoden der selbsttätigen Temperaturkompensation bei elektrischen Leitfähigkeitsmessungen. a) Durch einen temperaturempfindlichen Vergleichswiderstand. b) Nach E. Blamberg und K. Müller (Gesellschaft für Meßtechnik m. b. H., Bochum). c) Nach W. Geyger und W. Schmidts (H. Wüsthoff, Apparatebau, Bochum). [Vgl. W. Geyger: ATM V 3514 — 1.]

Gasfeuchtigkeit störend bemerkbar machen. Abhelfen kann man durch Trocknung der Gase, oder wie Siemens & Halske, durch gleich starke Befeuchtung des Gases und des Vergleichsgases mit Wasserdampf.

Ähnlich wie bei den elektrischen Leitfähigkeitsverfahren für Flüssigkeiten, spielt die Temperaturkompensation auch für die Wärmeleitfähigkeit von Gasen eine sehr wichtige Rolle. In D.R.P. 581800 ist eine Vorrichtung zum Ausgleich der verschiedenen Temperaturkoeffizienten der Wärmeleitfähigkeit von Gas und Vergleichsgas angegeben. Für die elektrischen Leitfähigkeitsverfahren sind in Abb. 96 drei verschiedene Kompensationsverfahren schematisch dargestellt.

Ein junger Zweig der technischen Meßverfahren ist die technische Potentialmessung. Ihrer Einführung stand bisher entgegen, daß man im Laboratorium lange nur die statischen Methoden in Anwendung brachte. Es hat sich jedoch gezeigt, daß man z. B. mit der Antimonelektrode auch ohne Röhrenvoltmeter oder Kompensationschaltungen zuverlässig messen kann.

Die Firma Siemens & Halske, Berlin stellt ein p_H -Meßgerät her, das mit einer Platin-Wasserstoffelektrode arbeitet, deren Potential gegen eine Kalomelektrode gemessen wird, siehe Abb. 97. Angeblich ist das Gerät für sämtliche p_H -Werte verwendbar. Zur Registrierung wird der auf S. 577 erwähnte Siemens-Kompensograph empfohlen.

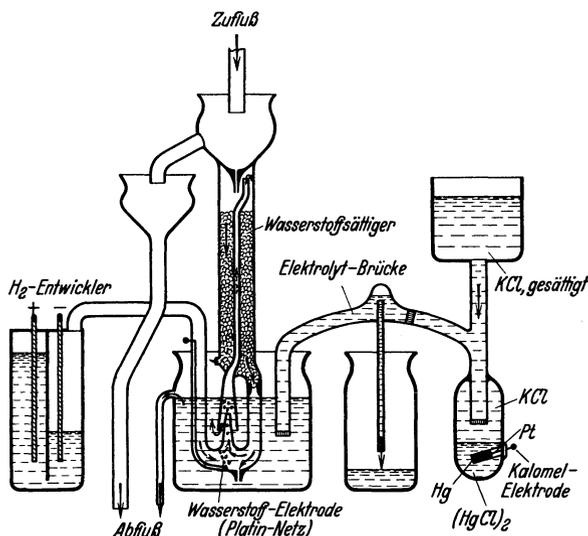


Abb. 97. Siemens - Meßgerät für Aufzeichnung und Regelung des p_H -Wertes.

Die zu untersuchende Flüssigkeit wird mit Wasserstoff gesättigt und erzeugt an einer Platin-Wasserstoffelektrode ein Potential, das gegen eine Kalomelektrode unter Verwendung des Siemens-Kompensographen, als besonders stromempfindliches Nullinstrument, gemessen wird. Die Anzeigeverzögerung beträgt etwa 1 min; das Gerät ist für sämtliche p_H -Werte verwendbar.

VIII. Mengenummessung¹.

A. Allgemeine Bemerkungen zur Mengenummessung.

1. Zweck der Messung.

Die Aufgaben der technischen Mengenummessung² sind verschieden. Von besonderer Bedeutung ist einmal die Erfassung des Istwertes einer Menge. Nicht nur die Verteilung von Aufbau und Hilfsstoffen, sondern auch die Ermittlung der Fertigungsstoffe und der

¹ Bearbeitet von Dr. phil. C. Hilburg VDI, Ludwigshafen a. Rh.

² Siehe P. Gmelin: Ztschr. techn. Physik 6, 241 (1929). — Kienzle, O.: Kontrollen der Betriebswirtschaft. Berlin 1931.

Enderzeugnisse ist durch die Mengenmessung zu überwachen. Der Vergleich des ermittelten Istwertes eines Stoffes mit seinem Sollwert läßt erkennen, ob die erforderliche Wirtschaftlichkeit des Betriebes gewährleistet ist, ob die zur Weiterentwicklung ergriffenen Maßnahmen richtig sind usw. Gleichzeitig werden durch die Messungen kalkulatorische und konstruktive Unterlagen erhalten. Die weitere Bedeutung der Mengenmessung liegt darin, daß mit ihrer Hilfe die Verarbeitung von Stoffen in bestimmt vorgeschriebenen Verhältnissen leicht durchgeführt und durch diese Sicherheit in vielen Fällen erst die erforderliche stets gleichmäßige Güte der Endprodukte erreicht werden kann. Die Mengenmessung in den verschiedensten Fabrikationsbetrieben ist daher ebenso notwendig wie jede andere produktive Arbeit, denn sie hilft mit zur richtigen Betriebsführung und dadurch zur Hebung der Wirtschaftlichkeit.

Die Menge eines Stoffes ist bestimmt durch sein Gewicht G oder sein Volumen V . Beide Größen stehen miteinander in Beziehung durch die allgemeine Formel

$$G = V \gamma, \quad (34)$$

wobei γ das spezifische Gewicht bedeutet. Im technischen Maßsystem wird G in kg, V in m^3 und γ in kg/m^3 gemessen. Die in der Zeiteinheit strömende Menge dG/dt wird der Fluß oder Mengenstrom genannt,

während in der Zeit von t_1 bis t_2 die Menge $G = \int_{t_1}^{t_2} \frac{dG}{dt} dt$ fließt. Bei

konstantem Durchfluß ergibt sich die Menge als das Produkt von Mengenstrom und Zeit. Ist der Durchfluß veränderlich, so wird die Menge erhalten entweder durch Verwendung eines Registrierinstrumentes und Berechnung nach Planimetrierung des hierzu geeigneten Diagramms oder mittels eines Zählers, welcher selbsttätig das Integral des Durchflusses über eine bestimmte Zeit bildet.

2. Verwertung der Meßergebnisse.

Die Mengenmessung erhält erst ihren richtigen Wert durch die Verarbeitung der Meßergebnisse. Eine einfache Zusammenstellung der Meßergebnisse zur Feststellung von Abweichungen vom normalen Betriebszustand, zur Durchführung eines Vergleiches oder zur Beurteilung von Betriebsverbesserungen genügt allein nicht. Das ganze Zahlenmaterial ist vielmehr einer umfassenden kritischen Betrachtung zu unterwerfen, und zwar nicht nur im Hinblick auf die einzelnen Betriebe, sondern auch auf das ganze Werk. Aus den erhaltenen Resultaten sind unbedingt die Folgerungen zu ziehen und die Ursachen etwaiger Sonderheiten restlos zu klären. Diese Gründe lassen es zweckmäßig erscheinen, das Meßwesen eines Werkes in eine Hand zu legen, und den verantwortlichen Leiter dieser Abteilung der Werksleitung unmittelbar zu unterstellen. Dadurch wird die Durchführung objektiver Messungen gewährleistet, die Verarbeitung des an der neutralen Stelle zusammenlaufenden Materials zu einer lückenlosen Stoff- und Energiebilanz, zur Erkennung der Ver-

lustquellen und zur wirtschaftlicheren Belastung der einzelnen Betriebe im Interesse des Werkes ermöglicht.

3. Wirtschaftlichkeit der Mengenmessung.

Zur Durchführung der Mengenmessung sind technische und wirtschaftliche Gesichtspunkte¹ zu beachten. Es ist daher notwendig, daß unter den zahlreichen Meßmethoden die jeweils für den vorliegenden Fall geeignetste ausgewählt wird. Für den Betrieb kommen nur gut durchgebildete Meßapparaturen in Frage, die durch ihre stabile Bauart auch für rauhe Betriebe geeignet sind und zu ihrer Bedienung und Wartung kein teures Personal benötigen. Durch die Messung darf keinesfalls eine Behinderung des Betriebes eintreten. Die Meßmethoden und Meßapparate sind stets entsprechend der erforderlichen Genauigkeit zu wählen. Auf möglichst vielseitige Anwendung der Meßgeräte ist Wert zu legen. Zur Vermeidung von erhöhten Reparaturkosten sind die Meßapparaturen an geschützten, aber doch gut übersichtlichen Stellen anzuordnen. Unsachgemäße Meßeinrichtungen sowie Durchführung von Dauermessungen, deren Kosten im Vergleich zu dem Wert des zu messenden Stoffes unverhältnismäßig groß sind, können die Wirtschaftlichkeit der Mengenmessung in Frage stellen. Während zur Sicherung der Mengenmessung an den wichtigsten Stellen Kontrollmesser ihre Berechtigung haben, ist in manchen Fällen die Durchführung einer Sammelmessung ausreichend. Hier ist durch vorübergehende Messungen, gelegentliche Stichproben mit einfachsten Meßmitteln, unter Umständen kurzfristige Vollmessungen in unregelmäßigen Zeiträumen die Richtigkeit des Verrechnungsschlüssels nachzuprüfen. Zur Überprüfung der Wirtschaftlichkeit ist es daher notwendig, die für die Mengenmessung aufgewendeten Kosten getrennt zu erfassen und sie mit dem Wert der vermiedenen Materialverluste zu vergleichen. Dieser Vergleich allein ist aber nicht immer ausschlaggebend, läßt sich doch z. B. die Wirtschaftlichkeit der Mengenmessung zur Sicherung einwandfreier Betriebsführung oder zur Gewährleistung einer gleichmäßigen Qualität der Erzeugnisse nicht in Geldwert ausdrücken.

Die verschiedenen Meßmethoden, von deren Vielseitigkeit die nachstehenden Abschnitte einen Überblick geben sollen, sind hier in zwei Hauptgruppen unterteilt. Die erste befaßt sich mit der Mengenermittlung fester Stoffe, die zweite mit der Messung von Flüssigkeiten und Gasen. Diese Einteilung wurde getroffen im Hinblick auf die technischen Methoden der Messung strömender Flüssigkeiten, da unter gewissen Voraussetzungen auch Gase und Dämpfe als inkompressible Flüssigkeiten angesehen werden können. Über die weitere Einteilung der Mengenmeßmethoden sei kurz aufgeführt, daß bei den festen Stoffen die volumetrischen Meßverfahren kurz, die gewichtsmäßigen dagegen wegen ihrer überragenden Rolle ausführlicher behandelt werden. Leider muß jedoch auf eine nähere Beschreibung der in der Praxis benutzten Wägeeinrichtungen verzichtet werden. Bei den tropfbaren und nicht

¹ Siehe O. Kienzle: Kontrollen der Betriebswirtschaft. Berlin 1931.

tropfbaren Flüssigkeiten wird neben der Raummessung und Wägung auf die namentlich in der Technik angewendeten dynamischen Mengemeßmethoden eingegangen. (Über Mengenregelung s. S. 795.)

B. Mengemessung fester Stoffe.

1. Allgemeine Beziehungen zwischen Volumen und Gewicht.

Ein Körper ist seiner Menge nach bestimmt, wenn sein Volumen V oder sein Gewicht G bekannt ist. Die Mengenermittlung kann daher durch eine volumetrische oder gewichtsmäßige Methode erfolgen. In der Technik gilt als Einheit des Volumens das Kubikmeter (m^3), als Einheit des Gewichts das Kilogramm (kg).

Gewicht und Volumen sind miteinander verbunden durch die auf S. 676 erwähnte allgemeine Beziehung

$$G = V \cdot \gamma = \frac{V}{v}; \quad v = \frac{1}{\gamma}. \quad (34a)$$

Hier ist γ das spezifische Gewicht, das in der Raumeinheit enthaltene Körpergewicht (kg/m^3) und $v = 1/\gamma$ das spezifische Volumen, das von der Gewichtseinheit eingenommene Volumen (m^3/kg). Bei festen porigen Körpern im Stück wird das Gewicht der Raumeinheit, das Raumgewicht, mit γ_r (kg/m^3) bezeichnet. Es ist das Einheitsgewicht des Körpers einschließlich der inneren Hohlräume. Für körnige Feststoffe in geschütteter Form kommt bei den Messungen das Schüttgewicht γ_s (kg/m^3), das Gewicht der Volumeneinheit einschließlich der äußeren Zwischenräume zwischen den einzelnen Stoffteilen, in Frage. Es ist zu beachten, daß das Schüttgewicht von verschiedenen Faktoren abhängig ist¹, so z. B. von der Herstellungsart der Schüttung (Locker-, Lager- und Rüttelgewicht), vom Verhältnis Korngröße zum Meßgefäßdurchmesser, von der Entmischung der Korngrößen, vom Wassergehalt, der Schichthöhe und dem Formfaktor des Schüttgutes.

Mit Hilfe der Gleichung (34) läßt sich die eine durch die andere Maßeinheit ausdrücken. Die Umrechnung verlangt aber in vielen Fällen die Berücksichtigung von Druck und Temperatur.

Feste Körper stellen den für sie in Frage kommenden normalen und tangentialen Druckkomponenten großen Widerstand entgegen. Steht ein Körper unter dem allseitigen Normaldruck p und wird sein Volumen V durch die Druckerhöhung $d p$ um $d V$ geändert, dann wird der Kompressibilitätskoeffizient (bei konstanter Temperatur)

$$\beta = - \frac{1}{V} \frac{dV}{d p} \quad (35)$$

oder angenähert

$$\beta = - \frac{\Delta V}{V} \frac{1}{\Delta p}. \quad (35a)$$

Wird der variable Kompressibilitätskoeffizient β durch den mittleren β' ersetzt, dann wird

$$V = V_0 (1 - \beta' p). \quad (35b)$$

¹ Rosin, P. u. H. G. Kayser: Feuerungstechnische Kenngrößen der Kohlen und ihre Bestimmung. Arch. Wärmewirtsch. 13, 179 (1932).

Da bei festen Körpern die Druckwirkung nur sehr gering ist, kann bei den technischen Messungen im allgemeinen von einer Berücksichtigung des Druckes abgesehen werden. Von größerer Wichtigkeit ist die Beachtung der Temperatur. Bei festen Körpern ist gelegentlich die Längenausdehnungszahl

$$\alpha = \frac{1}{l} \frac{dl}{dt}, \quad (35c)$$

die Zunahme der Längeneinheit des Körpers bei 1° Temperaturerhöhung, zu benutzen. Für die Flächenausdehnung ist der zweifache, für die Raumausdehnung der dreifache Zahlenwert der Ausdehnungszahl in Rechnung zu setzen. So z. B. wird das Volumen eines Behälters aus homogenem Material bei der Temperatur t^0 nahezu

$$V = V_0 (1 + 3 \alpha t), \quad (35d)$$

wenn V_0 das Volumen bei 0° und 3α der mittlere kubische Ausdehnungskoeffizient zwischen 0° und t^0 ist.

Für das spezifische Gewicht ergibt sich entsprechend

$$\gamma = \frac{\gamma_0}{1 + 3 \alpha t}. \quad (35e)$$

In der Abb. 98 ist nach den Versuchen der Physikalisch-Technischen Reichsan-

stalt¹ die lineare Ausdehnung α verschiedener fester Körper zwischen den Temperaturen 0° und t^0 graphisch dargestellt.

Die zur Umrechnung erforderlichen spezifischen Gewichte sind den bekannten tabellarischen Zusammenstellungen zu entnehmen. Sind die Einheitsgewichte nicht bekannt, dann sind sie besonders zu bestimmen. Streng genommen sind dabei die Gewichte auf den luftleeren Raum zu beziehen, doch genügt die Bestimmung in Luft den meisten technischen Anforderungen.

2. Volumetrische Mengenmessung.

a) Volumenermittlung durch Ausmessung.

a) Regelmäßig gestaltete Körper. Die Ermittlung des Rauminhalts homogener, regelmäßig gestalteter Körper erfolgt

¹ Holborn, L., K. Scheel u. F. Henning: Wärmetabellen. Ergebnisse aus den thermischen Untersuchungen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt. Braunschweig 1919.

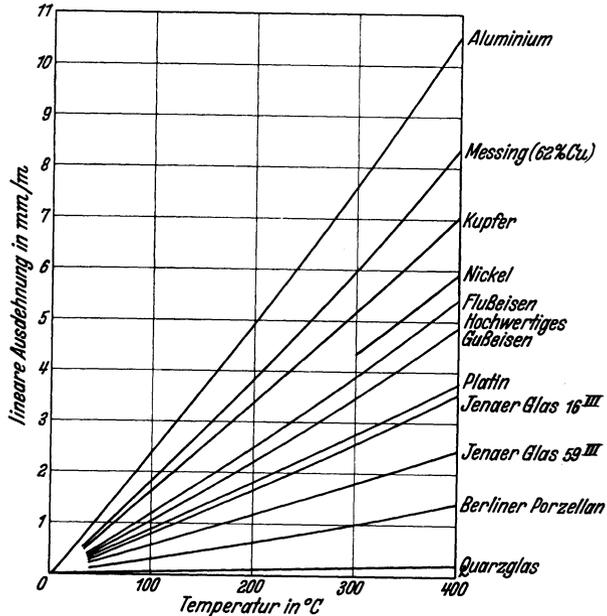


Abb. 98. Lineare Ausdehnung fester Körper in mm/m zwischen 0° und t^0 .

einfach durch Abmessung der Begrenzungslinien und Berechnung des Volumens nach geometrischen Regeln. Wenn das spezifische Gewicht bekannt ist, liegt mit dem Volumen auch das Gewicht des Körpers fest. Die Mengenermittlung stets gleicher Körper wird durch Bildung von Zählreihen und Schaffung größerer Zählseinheiten¹ erleichtert. Zur Vermeidung von Irrtümern werden zur Abmessung einer bestimmten stückförmigen Materialmenge besondere Vorrichtungen benutzt. So z. B. bei Tablettenform zweckmäßig Zählschaukeln, die so eingerichtet sind, daß sie nur die erforderliche Stückzahl aufnehmen können. Diese Art der Mengenbestimmung liegt auch bei den Zähl- und Abfüllmaschinen² zum Verarbeiten von Tabletten, Pillen usw. zugrunde. Hier wird z. B. das zugeführte Material durch eine Zählscheibe auf ein endloses Transportband und von diesem zum Zählapparat und der Abfüllstation befördert. Dabei wird von dem aneinander gereihten Material durch einen auf bestimmte Stückzahl einstellbaren Schieber stets nur die gleiche Menge Material in die in Magazinen befindlichen Behälter abgestreift.

β) Schüttgüter. Bei Schüttgütern werden zur Mengemessung zum Teil Gefäße bekannten Volumens verwendet. Die Genauigkeit der Bestimmung hängt dabei von der Genauigkeit dieses Volumens ab. Kleinere Behälter sind durch Vergleichung ihres Rauminhaltes mit dem eines Normals (Eichkolben) durch Umfüllung oder durch Auswägung mit Wasser nachzuprüfen, größere Behälter wie Bunker, Silos usw. werden ausgemessen. Bei der Mengenermittlung von Schüttgütern muß darauf geachtet werden, daß an der Oberfläche vorhandene Krater oder Erhöhungen richtig berücksichtigt werden. Lassen sich die Unebenheiten nicht glätten, wie dies z. B. im Baubetrieb bei Abmessungen von Sand, Kies usw. allgemein der Fall ist, so muß der obere geschichtete Teil besonders berechnet werden. Der Inhalt von Bunkern, welche mit rieseligen oder staubförmigen Materialien gefüllt sind, läßt sich durch Einbau von Bunkerstandsanzeigern³ sichtbar machen.

Bei lose geschütteten Gütern wird die Mengenermittlung erleichtert und einigermaßen gesichert, wenn schon bei der Lagerung auf eine regelmäßige, leicht ausmeßbare Form der Haufen⁴ und eine nach Korngröße (verschiedenem Schüttgewicht) getrennte Lagerung geachtet wird.

Wenn bei der Förderung von Massengütern die Durchführung einer Mengemessung erforderlich ist, so ist auch hier für die Art der Meßmethode die Form des Stoffes mitbestimmend.

b) Mengenermittlung durch Zählen.

Hat das Material Stückform, oder wird es, da ohne feste Gestalt, in besonderen Fördergefäßen transportiert, so kann unter gewissen Voraussetzungen eine Mengenermittlung durch Zählen erfolgen.

¹ Kienzle, O.: Kontrollen der Betriebswirtschaft. Schriften der Arbeitsgemeinschaft deutscher Betriebsingenieure, Bd. 8, S. 86. Berlin 1931.

² Firma A. Maul, Maschinenfabrik, Dresden-A 1.

³ Giesecke, P.: Bunkerstandsanzeiger. Feuerung 5, 29 (1929).

⁴ Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Wärmestelle Düsseldorf, Mitt. 48, S. 5. 1923.

Das einfache Abzählen ergibt bei laufendem Betrieb aber keine einwandfreien Werte, da erfahrungsgemäß selbst bei zuverlässigem Personal Fehler auftreten. Nur bei vorübergehenden Messungen oder Stichproben kann diese mittelbare Methode brauchbare Werte liefern.

Größere Sicherheit bietet diese Mengenmessung bei Verwendung von Zählwerken. Diese können entweder von dem zu bestimmenden Stoff selbst, von seinem Fördermittel oder von einer anderen mit ihm in Verbindung stehenden Vorrichtung betätigt werden. Wird an Stelle des Hubzählers ein Zeitmeßgerät [Arch. Eisenhüttenwes. 2, 272 (1928)] benutzt, läßt sich die Beschickung auch nachträglich noch feststellen.

Die gut durchgebildeten Zählwerke¹ der verschiedensten Art können mechanisch oder elektrisch betätigt werden; sie können anzeigend, registrierend oder auch fernanzeigend und fernregistrierend sein. Wenn sehr hohe Stückzahlen in der Zeiteinheit zu zählen sind, bis 1200 Stück in der min, finden lichtelektrische Schnellzähleinrichtungen [AEG-Mitt. 1932, Nr. 2, 60] Verwendung. Hier unterbricht der zu zählende Gegenstand einen auf eine Photozelle fallenden Lichtstrahl, wodurch ein besonderes Schnellzählrelais betätigt wird.

Die Mengenermittlung durch Zählen verlangt aber die Beachtung besonderer Vorsichtsmaßregeln. Es muß dafür gesorgt werden, daß die Angaben des Zählers nicht durch unbefugte Eingriffe beeinflusst werden können. Unregelmäßigkeiten durch Doppelzählung müssen, wenn der Transport nicht wie z. B. bei Seilbahnen zwangsläufig in einer Richtung erfolgt, durch besondere Maßnahmen wie Einbau von Sperren, Kontrollzählern an entfernten Stellen usw. verhindert werden. Grundbedingung bei der Mengenbestimmung durch Zählen ist weiter die Gleichartigkeit der Materialstücke und bei Schüttgütern die stets gleiche Füllung der Fördergefäße sowie die Kenntnis des Schüttgewichtes.

Um nicht leere oder unvorschriftsmäßige Fördergefäße zu zählen, werden in die Fahrschienen bewegliche Schienenstücke eingebaut, welche durch einstellbare Federn oder Gegengewichte in ihrer Lage gehalten werden. Eine Betätigung des mit den Schienen in Verbindung stehenden Zählwerkes tritt nur dann ein, wenn die eingestellte Mindestlast die Schiene passiert. Wenn dabei gleichzeitig in derselben Richtung zwei verschiedene Materialien gefördert werden, kann, wenn die Füllgewichte weit genug auseinanderliegen, bei Verwendung zweier hintereinandergeschalteter und sorgfältig eingestellter Zähler durch Differenzmessung eine getrennte Materialbestimmung erfolgen.

Zur Mengenermittlung von gleichmäßig, stetig geförderten Schüttgütern können auch die verschiedensten in der Technik benutzten Fördereinrichtungen herangezogen werden, wenn es sich um eine angenäherte Bestimmung der Fördermenge handelt.

c) Leistung verschiedener Fördereinrichtungen.

Wird ein Förderband durch eine Aufgabevorrichtung mit bekanntem Austrittsquerschnitt beschickt, so läßt sich die Bestimmung der Förder-

¹ Näheres siehe: Der Chemie-Ingenieur, Bd. II/1, S. 27. Leipzig 1932. — Kienzle, O.: Fußnote 1, S. 680, 97. — Wärmestelle Düsseldorf, Fußnote 4, S. 680, 8.

menge auf eine reine Geschwindigkeitsmessung zurückführen. Voraussetzung ist hierbei ein genügender Materialvorrat in der Zubringer- vorrichtung oder die Registrierung der einzelnen Beschickungsperioden. Wird angenommen, daß der Beschüttungsquerschnitt des Förderbandes begrenzt wird nach unten durch die Beschüttungsbreite b (m) und nach oben durch eine Parabel mit der Scheitelhöhe h (m), so ergibt sich das stündliche Fördergewicht¹ des mit einer Geschwindigkeit v (m/s) geförderten Materials vom Schüttgewicht γ_s (t/m³) zu

$$Q = 2400 b h \gamma_s v \text{ t/h.} \quad (36)$$

Bei der Beschickung von Kesseln tritt an die Stelle des Transportbandes der Wanderrost (Bd. II, S. 164). Hier ist der Brennstoffverbrauch proportional der Geschwindigkeit des Rostes. Da in diesem Falle der Schüttwinkel des Brennstoffes zwangsläufig 90° beträgt, ist das Fördervolumen abhängig von der Transportgeschwindigkeit und der Schichthöhe. Wenn diese zwei Faktoren auf ein Zählwerk entsprechend einwirken (Wärme- stelle Düsseldorf, Fußnote 4, S. 680, 6), kann bei gleichbleibendem Schüttgewicht das verfeuerte Brennstoffgewicht mit Annäherung ermittelt werden. Eine für viele Materialien, besonders auch für feinstückige Kohle brauchbare selbsttätige volumetrische Meßeinrichtung ist der Lea-Messer² [Chem. Fabrik 1930, 269], bei dem das zu messende Material über ein kurzes endloses Förderband von der Zulaufvorrichtung forttransportiert wird. Das geförderte Materialvolumen wird auch hier durch ein Zählwerk (D.R.P. 472010, Kl. 24e, Gr. 27, vom 22. 5. 1926) registriert. Um zuverlässige Messungen zu erhalten, muß der Messer sorgfältig geeicht werden. Die Meßgenauigkeit soll erfahrungsgemäß $\pm 2\%$ betragen.

Für den Kratzer ergibt sich das Fördergewicht, wenn i Liter von einer Schaufel gefördert werden und a (m) der Abstand der Kratzer- schaufeln ist, zu

$$Q = 3,6 \frac{i}{a} v \gamma_s \text{ t/h.} \quad (37)$$

Für Förderschnecken und Förderrohre wird bei n U/min, einem äußeren Durchmesser D (m) der Schnecke, einer Steigung s (m) und einem Füllungsgrad φ das Fördervolumen:

$$Q = 60 \varphi D^2 \frac{\pi}{4} s n \text{ m}^3/\text{h.} \quad (38)$$

Wenn bei Elevatoren mit Becherwerken mit i (l) der Inhalt und mit φ der Füllungsgrad eines Bechers bezeichnet wird, dann ergibt sich entsprechend wie vorher für das Fördergewicht:

$$Q = 3,6 \varphi \frac{i}{a} v \gamma \text{ t/h.} \quad (39)$$

Nach G. von Hanffstengel¹ wird der Füllungsgrad φ für Mahlprodukte 0,8—1,0, für Getreide bei mittlerer Geschwindigkeit 0,75—0,9, für Kohle geringer Stückgröße 0,6—0,7 und für großstückige Kohle 0,4—0,5.

¹ Hanffstengel, G. v.: Die Förderung von Massengütern, Bd. 1. Berlin 1921.

² Siehe Abb. 211, S. 833.

Für Pendelbecherwerke kann in den meisten Fällen $\varphi = 1$ gesetzt werden.

Rieseliges Material wird oft den Apparaturen zugeführt oder auch aus ihnen entnommen über einen durch Abb. 99 dargestellten Teil- oder Drehteller¹. Das mit dieser Fördereinrichtung abgestreifte Material ist bei konstanter Umdrehungsgeschwindigkeit des Teiltellers von der Stellung des Abstreifbleches abhängig, wenn sich die physikalische Beschaffenheit des Fördergutes nicht ändert. Durch Eichung läßt sich das Fördergewicht bei verschiedenen Stellungen des Abstreifers bestimmen.

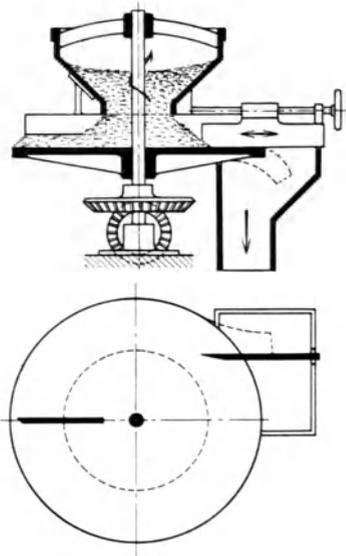


Abb. 99. Teilteller.

Eine unmittelbare volumetrische Messung bei diskontinuierlicher Materialförderung gestattet die in Abb. 100 ersichtliche Meßeinrichtung², die nur für feinpulvriges Material verwendbar ist. Das mit dem Meßrohr ge-

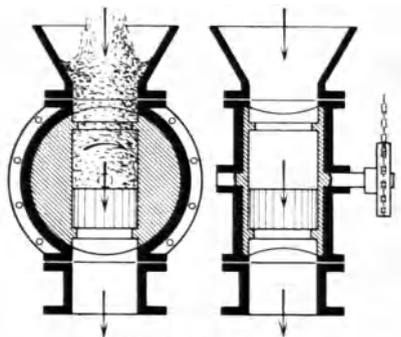


Abb. 100. Meßrohr.

förderte Material ist der Umdrehungszahl des Drehkörpers proportional. Die gleiche Meßmethode kommt in Frage bei den Zellenrädern oder Zellenwalzen³ und den volumetrischen Abfüllmaschinen⁴. Es sei hier auch noch hingewiesen auf die Bailey-Aufgabevorrichtung⁵. Bei dieser Apparatur wird ebenfalls das in einer gewissen Zeit durch ein Zellenrad hindurchgeführte Material volumetrisch bestimmt. Die besondere Ausführung des Zellenrades macht es möglich, fein gemahlene Materialien wie Kohlenstaub, Zement, Thomasmehl usw. ohne Störungen durch das zeitweise auftretende „Schießen“ zu messen. Die Einrichtung ist aber gegen Fremdkörper sehr empfindlich, so daß besondere Schutzmaßnahmen erforderlich sind.

¹ Aus M. Dolch: Betriebsmittelkunde für Chemiker, S. 106. Leipzig 1929.

² Aus M. Dolch: Betriebsmittelkunde für Chemiker, S. 104. Leipzig 1929.

³ Firma E. Rost, Maschinenbauanstalt Mainz. Siehe Abb. 209 auf S. 831.

⁴ Firma Dentler & Maass G. m. b. H., Düsseldorf; Fr. Hesser A. G., Stuttgart-Cannstatt; F. Kilian, Berlin-Hohenschönhausen; F. K. F. Apparatebau für Abfüll- und Paketiermaschinen. Frankfurt a. M.

⁵ Zu beziehen durch die Firma Cl. Peters, Hamburg; siehe Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 47, 14 (1930).

d) Genauigkeit volumetrischer Mengenmessung.

Bei festen Stoffen ist die Genauigkeit der volumetrischen Mengenmessung nicht groß, da sie von der einwandfreien Erfassung des Volumens und bei erforderlicher Umrechnung auf das Gewicht noch von der genauen Kenntnis der Einheitsgewichte γ , γ_r oder γ_s abhängig ist, wenn von dem Einfluß der Temperatur abgesehen wird. Schon die einfache Volumenermittlung regelmäßig gestalteter Körper ergibt nur bei sorgfältiger Ausmessung eine hinreichende Genauigkeit. Weit schwieriger ist die Mengenermittlung bei Schüttgütern. Hier ist eine volumetrische Messung nur dann zulässig, wenn es sich um die Erlangung von Überschlagswerten handelt oder um die Berücksichtigung einer Vorratsänderung, wenn diese sich über eine genügend lange Zeit erstreckt. Auf jeden Fall sollte von einer laufenden volumetrischen Mengenmessung Abstand genommen werden, selbst bei Verwendung raumgleicher Gefäße, da die Gleichmäßigkeit der Füllungen nicht gewährleistet ist und auch bei gleichartigen Stoffen das Schüttgewicht größeren Schwankungen ausgesetzt ist. Zur Beurteilung der Genauigkeit von volumetrischen Messungen sei angeführt, daß beim Transport von Brennstoffen mit raumgleichen Gefäßen einer Hängebahn über einen längeren Zeitraum Abweichungen festgestellt wurden, welche auf das durch Wägung festgestellte mittlere Füllgewicht bezogen betragen haben: bei Koksgruß $\pm 3,3\%$, bei Koks $\pm 2,8\%$, bei Förderkohle $\pm 2,0\%$ und bei Brikett $\pm 1,0\%$. Bei Verfeuerung von oberschlesischer Staubkohle wurde durch Zählung der Bunkerschüttungen [Stahl u. Eisen 51, 860 (1931)] mit Hilfe eines Hubzählers die Schwankung des durchschnittlichen Gewichtes einer Schüttung festgestellt zu $\pm 3,0\%$. Bei genaueren Bestimmungen ist das von der Feuchtigkeit, Korngröße und Pressung abhängige Schüttgewicht¹ mehrfach zu bestimmen, um genügend gesicherte Durchschnittswerte zu erlangen. Bei porösen Brennstoffen mit stark schwankendem Feuchtigkeitsgehalt kann unter Umständen die volumetrische Mengenmessung zuverlässigere Resultate liefern als die Gewichtsermittlung, wenn hierbei der Wassergehalt nicht besonders festgestellt und berücksichtigt wird.

Von diesem Sonderfall abgesehen, bleibt die sicherste Methode der Mengenbestimmung die Wägung, sie ist unabhängig von der physikalischen Beschaffenheit der Stoffe.

3. Mengenmessung durch Wägung.

a) Masse und Gewicht.

Zur Ausführung der Wägung bedient man sich der Waage. Mit ihrer Hilfe werden Massen miteinander verglichen.

Als Einheit der Masse ist das kg gewählt, das sich als internationales Prototyp im Bureau international des Poids et Mesures in Sèvres bei Paris befindet. An diese Prototypen sind die nationalen kg-Prototypen angeschlossen mit einem wahrscheinlichen Fehler, der zwischen $\pm 0,002$

¹ Feuerungstechnische Kenngrößen der Kohlen und ihre Bestimmung. Arch. Wärmewirtsch. 1932, Heft 7, 179.

und $\pm 0,003$ mg lag¹. Der Theorie nach sollte das aus Platiniridium hergestellte Urmaß des kg die Masse von einem dm³ reinen Wassers von 4° C und normalem Druck sein. Spätere genauere Messungen aber ergaben, daß das internationale Prototyp 28 mg schwerer ist, als es dem metrischen System entsprechend sein dürfte². Die von diesem, die Masseneinheit des metrischen Systems bildenden „kilogramme des Archives“ abgeleitete Raumeinheit ist das l, das also mit dem dm³ nicht genau übereinstimmt. Die Differenz ist aber so gering, daß in der Praxis dm³ und l einander gleich gesetzt werden können.

Für die Teile und die Vielfachen des Kilogramms (kg) gelten die Bezeichnungen³: das Gramm (g), das Milligramm (mg), das Hekto-gramm (hg), der Doppelzentner (dz) und die Tonne (t). Zwei Massen sind nun einander gleich, wenn ihre Gewichte⁴, das sind die durch die Anziehungskraft der Erde im luft- und gasleeren Raum in den Massen hervorgerufenen Kräfte, gleich sind. Ist m die Masse eines Körpers und g die Erdbeschleunigung, so ist das Gewicht P des Körpers:

$$P = m \cdot g. \quad (40)$$

Als Maßeinheit der Kraft wird in der Technik ebenfalls das Kilogramm (kg) benutzt. Hier ist also das kg der Druck, den die internationale Prototyp in Paris im leeren Raum auf eine Unterlage ausübt.

Im gewöhnlichen Sprachgebrauch wird unter dem kg ein Gewicht, also eine Kraft verstanden und nicht eine Masse, jene vom Körper erfüllte Stoffmenge, auf die es meistens ankommt. Für die praktischen Messungen ist eine Gleichsetzung von Gewicht und Masse solange belanglos, als die Körper nicht mit ihrer Trägheit in Frage kommen oder Gewichte zur Kraftmessung verwendet werden.

Zu beachten aber ist, daß das Gewicht keine konstante Größe ist, daß es vielmehr abhängig ist von der geographischen Lage des Beobachtungsortes, von seiner Höhe über dem Meeresspiegel und von der geologischen Beschaffenheit seiner Umgebung. Bei Gewichtsvergleichungen aber spielen diese Faktoren keine Rolle, da sie ja auf Gewicht und Vergleichungsgewicht gleichmäßig wirken. Meteorologische Verhältnisse aber müssen berücksichtigt werden. Da feste und tropfbare Körper mindestens 600mal schwerer sind als Luft, so bleibt der relative Fehler durch den Luftauftrieb kleiner als 1/600. Bei der Wägung dieser Körper verzichtet man daher in der Technik fast durchweg auf eine Reduktion auf den leeren Raum.

b) Übersicht über die verschiedenen Wägeeinrichtungen.

Das Gewicht eines Körpers läßt sich mit Hilfe einer Waage unmittelbar bestimmen durch den Vergleich mit dem Gewicht bekannter Massen

¹ Scheel, K.: Grundlagen der praktischen Metronomie, S. 103. Braunschweig 1911.

² Scheel, K.: Grundlagen der praktischen Metronomie, S. 159. Braunschweig 1911.

³ Maß- und Gewichtsordnung vom 30. 5. 08, § 5 (Reichsgesetzblatt S. 437 — Mitteilungen 3. Reihe, S. 43). Siehe auch Berl-Lunge: Taschenbuch für die anorganisch-chemische Großindustrie, Teil 1, S. 113. Berlin 1930. Dasselbst auch Maße und Gewichte verschiedener Länder (S. 114) und Reduktionstabellen zwischen englischen und Metermaßen und Gewichten.

⁴ Entscheidung des AEF siehe Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 78, 1225 (1934).

oder mittelbar durch Vergleich mit irgendeiner Kraft, deren Beziehung zu bekannten Gewichten festliegt. Die verschiedenen Möglichkeiten der Gewichtsermittlung und vor allem die verschiedenen Bedürfnisse der Praxis haben eine überaus große Zahl von Waagen entstehen lassen. Eine Einteilung der Waagen in verschiedene Gruppen kann nach dem folgenden Schema¹ vorgenommen werden (Abb. 101).

Bei weitem die wichtigste Gruppe ist diejenige der Hebelwaage. Hier wird unter Benutzung eines Hebels (einfache Waagen) oder geeigneten Hebelsystems (zusammengesetzte Waagen)² das von dem zu wägenden Körper herrührende Drehmoment durch ein entgegengesetztes Drehmoment ausgeglichen. Bei den meisten Waagen nimmt dabei der Hebel in der Gleichgewichtslage immer dieselbe Lage ein wie im unbelasteten Zustand. Man faßt daher einige Gruppen zusammen zu

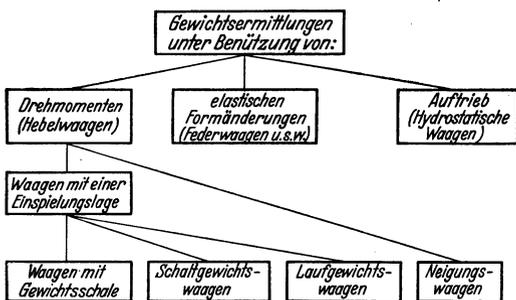


Abb. 101. Die Grundsysteme der Wiegeeinrichtungen.

der Hauptgruppe mit einer Einspielungslage. Hierzu gehören die nach Art der Gewichtsseite unterschiedenen Waagen, und zwar: Waagen mit Gewichtsschale, Schaltgewichtswaagen und Laufgewichtswaagen. Die Gleichgewichtslage wird hier herbeigeführt durch Benutzung von Gewichtsstücken, Einschaltung besonderer Schaltgewichte oder Verschiebung von Lauf- bzw. Rollgewichten.

Die bei diesen Untergruppen benutzte Wägungsmethode ist eine Nullmethode. Bei den ebenfalls zu den Hebelwaagen zählenden Neigungswaagen, für welche der Drehungswinkel des Neigungshebels ein Maß für die Größe der zu wägenden Last ist, liegt die Ausschlagsmethode vor.

Jede dieser vier Untergruppen läßt sich weiterhin noch nach der Ausführung der Lastseite unterscheiden in Balkenwaagen und Brückenwaagen. Bei ersteren ist die Lastschale pendelartig an der Lastschneide aufgehängt, bei den letzteren wird die mit Brücke bezeichnete Lastschale von mehreren Schneiden, die nicht in einer Geraden liegen, gestützt, oder von einer oder mehreren Schneiden getragen, vor dem Umschlagen aber durch besondere Führungsarme bewahrt. Neben diesen Grundformen sind die verschiedensten Kombinationen gebräuchlich, die schon bei der einfachsten und genauesten Waage — der gleicharmigen Hebelwaage (Analysenwaage) — benutzt werden. Bei dieser Waage wird nämlich das Gleichgewicht zum größten Teil mit Gegengewichten oder Schaltgewichten hergestellt, durch Benutzung des „Reiters“ als Laufgewicht korrigiert, und schließlich die letzte Ausgleichung durchgeführt

¹ Siehe auch E. Padelt: Waagen, Eigenschaften, Wartung, Instandsetzung. AWF-Mitt. 244, 12. Berlin 1931.

² Begriffsfestsetzung siehe Eichordnung, Berlin 1930, § 87, 2 und Instruktion VI, Waagen, A. Handelswaagen, Berlin 1932, Nr. 1a.

unter Verwendung der Balkenneigung, wie bei den Neigungswaagen. Ebenso erfolgt auch bei den in der Praxis so zahlreich vertretenen kombinierten Waagen Grob- und Feinverwiegung durch verschiedene Wiegearten (Dezimalwaage mit Laufgewichtseinrichtung, Hebelwaage mit Neigungsgewichtseinrichtung).

Mit den Wägeeinrichtungen lassen sich die Stoffe wägen und abwägen. Während beim „Wägen“ der Stoff gegeben und sein Gewicht zu bestimmen ist, ist umgekehrt beim „Abwägen“ das Gewicht gegeben und die entsprechende Stoffmenge abzugleichen. Diese Wägungen werden vorwiegend von Hand ausgeführt, bei Bewältigung größerer Mengen mit Hilfe von halb- oder ganz selbsttätigen Einrichtungen. Zu den angeführten Waagengruppen kommen daher noch Waagengattungen, welche Abwägungen von bestimmten Mengen selbsttätig ausführen und registrieren (automatische Balkenwaagen) und solche, welche beliebige Lasten selbsttätig wägen (ausgleichen), aufzeichnen, zusammenzählen oder auch fernmelden (automatische Laufgewichtswaagen).

Weniger genaue, aber bequeme Gewichtsermittlungen gestatten die Waagen, die nicht die Gewichtswirkung von Massen direkt vergleichen, sondern andere meßbare Kräfte hierzu heranziehen, wie z. B. die elastische Deformation oder den Auftrieb (Federwaagen, hydrostatische Waagen).

Wegen der Wichtigkeit der Gewichtsermittlung, welche in der Wissenschaft, in Handel, Gewerbe und Industrie wohl die am häufigsten ausgeführte Messung ist, seien kurz einige theoretische Grundlagen der hauptsächlichsten Waagengruppen gestreift¹. Zu eingehenderem Studium der Theorie muß jedoch auf die Spezialliteratur² hingewiesen werden.

c) Zur Theorie der Hebelwaagen.

a) **Einfache Hebelwaage mit Gewichtsschale.** I. Die Wägungsgleichung. Die Waage ist im Gleichgewicht, wenn die Summe der wirkenden Drehmomente nach Größe und Richtung gleich Null ist. Bei der einfachsten Waage, der Einhebelwaage (Abb. 102), sind die wirkenden

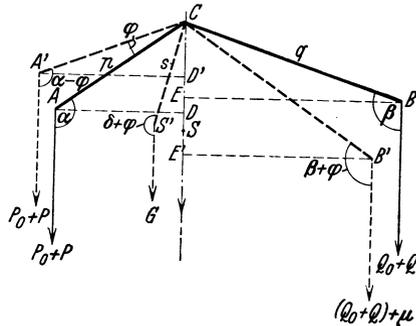


Abb. 102. Kräftebild der Einhebelwaage.

¹ Siehe auch A. Eucken u. M. Jakob: Der Chemie-Ingenieur, Bd. II/2, S. 51f. Leipzig 1933.

² Grashof, F.: Theoretische Maschinenlehre, Bd. 2, S. 722. Hamburg u. Leipzig 1883. — Brauer, E. u. F. Lawaczek: Die Konstruktion der Waage, 3. Aufl. Leipzig 1906. — Felgenträger, W.: Theorie, Konstruktion und Gebrauch der feineren Hebelwaage. Berlin 1932. — Zingler, J.: Theorie der zusammengesetzten Waagen. Berlin 1928. — Diehl, K.: Die Berechnung der Neigungswiegebalken mit festen Gegengewicht. Halle 1931. — Raudnitz, M.: Die Konstruktion der von Hand bedienten Waagen. Vierte, vollständig neubearbeitete und erweiterte Auflage von Brauer-Lawaczek: Die Konstruktion der Waage. Leipzig 1934.

Kräfte — bei Vernachlässigung der Reibung und der Hebeldurchbiegung — P (Gewicht), Q (Last), P_0, Q_0 (die toten Gewichte der Gewichts- und Lastschale) und G (das im Schwerpunkt S angreifende Gewicht des Waagebalkens). Werden mit α, β, δ die Winkel bezeichnet, welche die hier stets senkrecht wirkenden Krafttrichtungen mit den als starr angenommenen Balkenarmen p, q und s bilden, dann wird also die Gleichgewichtsbedingung der belasteten Waage:

$$(Q_0 + Q) q \sin \beta + G s \sin \delta - (P_0 + P) p \sin \alpha = 0 \quad (41)$$

und diejenige der unbelasteten Waage:

$$Q_0 q \sin \beta + G s \sin \delta - P_0 p \sin \alpha = 0. \quad (41a)$$

Damit ergibt sich die Wägungsgleichung zu:

$$P \frac{p \sin \alpha}{q \sin \beta} = PH = Q. \quad (42)$$

Wenn $\alpha = \beta = 90^\circ$, was in der Praxis angestrebt wird, wird

$$P \frac{p}{q} = PH = Q. \quad (42a)$$

Der Faktor $\frac{p}{q} = H$ bedeutet das Hebelverhältnis, also diejenige Zahl, mit welcher das Gewicht zu multiplizieren ist, um die Last zu erhalten.

II. Die Empfindlichkeit. Die Empfindlichkeit E ist für die Waage eine besondere Kenngröße, sie ist der Ausschlagswinkel des Waagebalkens für die Gewichtseinheit. Ihr Kehrwert $U = \frac{1}{E}$, die Stabilität [Handbuch der Physik, Bd. 2, S. 116. 1926] oder auch Trägheit (Unempfindlichkeit)¹ wird erhalten durch totale Differentiation der Gleichgewichtsbedingung für die um den kleinen Winkel φ aus der Gleichgewichtslage abgelenkte Waage. Für die Einhebelwaage wird

$$U = \frac{1}{E} = \frac{dQ}{d\varphi} = \frac{-(P_0 + P) p \cos \alpha - G s \cos \delta - (Q_0 + Q) q \cos \beta}{q \sin \beta} \quad (43)$$

und damit

$$E = \frac{q \sin \beta}{-(P_0 + P) p \cos \alpha - G s \cos \delta - (Q_0 + Q) q \cos \beta}. \quad (43a)$$

Im vorliegenden Fall ist E bezogen auf den Hebelarm der Last, eine ganz ähnliche Gleichung ergibt sich für den Gewichtshebelarm. Die Empfindlichkeit ist um so größer, je größer der Hebelarm, je kleiner das Balkengewicht, die Gesamtbelastung und die Pendelarme, das sind die senkrechten Abstände der wirkenden Kräfte von ihren Drehpunkten. Da diese Pendelarme je nach der Größe der Kraftwinkel positiv, Null oder negativ sein können, kann die Empfindlichkeit einen positiven, unendlichen oder negativen Wert annehmen. Zur Durchführung von Wägungen ist stets eine positive Empfindlichkeit erforderlich. In diesem allein in Frage kommenden Fall ist der Nenner der Gleichung (43a), die Direktions- oder Richtkraft der Waage, positiv. Der gemeinsame Schwerpunkt der Waage liegt unterhalb der Pendelachse, die Gleichgewichtslage ist stabil. Die abgelenkte Waage kehrt nach Aufhebung der äußeren Einwirkung von selbst in die Ruhelage zurück.

¹ J. Zingler: Fußnote 2, S. 687, 22.

Die Empfindlichkeit wird von der Belastung unabhängig, wenn die drei Schneiden des Waagebalkens in einer Ebene liegen, wenn also die Kraftwinkel α und β gleich 90° sind. Für diesen idealen Fall wird die Empfindlichkeit

$$E = \frac{q}{G s}, \quad (44)$$

somit direkt proportional dem Balkenarm, umgekehrt proportional dem Balkengewicht und dem Abstand des Balkenschwerpunktes von dem Drehpunkt.

Für Hebelwaagen mit Gewichtsschalen läßt sich die Empfindlichkeit berechnen¹ nach der allgemeinen Trägheitsformel

$$U = \frac{1}{E} = C_0 + C_1 Q + C_2 Q^2, \quad (45)$$

wobei die Trägheitskonstanten C_0, C_1, C_2 durch Feststellung der Trägheit der Waage für drei verschiedene Belastungen ermittelt werden.

Bei der Empfindlichkeit der Waagen muß noch zwischen positiver und negativer Empfindlichkeit unterschieden werden, je nachdem der Ausschlag der Waage bei Zulage oder Abnahme des Empfindlichkeitsgewichtes festgestellt wird. Praktisch sind beide Empfindlichkeiten einander gleichzusetzen. Bei feineren Waagen, deren Waagebalken kurz sind, da sie leicht und doch widerstandsfähig sein sollen, sind aber die Unterschiede zu beachten. Sie rühren hier daher, daß sich die Schneidenform geltend macht. Die Schneiden sind eben keine mathematischen Linien, sondern Zylinder mit kleinen Krümmungsradien², welche bei unsymmetrischer Ausführung Veranlassung zu Änderungen der Hebelarme geben können. Die Unregelmäßigkeit der Schneidenkrümmungsradien ist auch eine der Hauptursache mit für die Nullpunktsschwankungen bei größeren Empfindlichkeiten.

Empfindlichkeit und Schwingungsdauer stehen miteinander in Beziehung, die Empfindlichkeit ist dem Quadrat der Schwingungsdauer proportional.

III. Die Hebeldurchbiegung. Durch die Belastung der Waage tritt eine bisher vernachlässigte Durchbiegung der Hebel ein. Dadurch wird die Empfindlichkeit E und das Hebelverhältnis H beeinflusst. Die Summe der beiden in Bruchteilen der Hebellängen ausgedrückten Änderungen für die Einheit der Last an der Lastschneide

$$\xi = \frac{\Delta p}{p} - \frac{\Delta q}{q} \quad (46)$$

wird von Zingler³ Biegungsfehlerkoeffizient genannt. Unter Berücksichtigung der Durchbiegung wird die Wägungsgleichung der Einhebelwaage

$$P \frac{p}{q} = Q - 2 Q_0 Q \xi - Q^2 \xi. \quad (47)$$

¹ Zingler, J.: Fußnote 2, S. 687, 33.

² Näheres über den Einfluß des Schneidenradius auf die Empfindlichkeit der Hebelwaage bei G. Schmerwitz: Physikal. Ztschr. **33**, 234 (1932). Über die Messung von Schneidenkrümmungsradien. Ztschr. Instrumentenkunde **52**, 1 (1932). Siehe auch Referat Block in: Feinmech. u. Präz. **41**, 122 (1933).

³ Zingler, J.: Fußnote 2, S. 687, 62.

Es muß also der Bieigungsfehler ausgeglichen werden durch die aus zwei Teilen bestehende Bieigungsfehlerzulage

$$Z_{\xi} = -2 Q_0 Q \xi - Q^2 \xi. \quad (48)$$

Ist die Waage nicht richtig justiert, weicht der Hebelarm von seinem Sollwert p_s um den Betrag Δp ab, so wird mit dem Justierfehlerkoeffizient $\lambda = \Delta p/p_s$ die zum Ausgleich dieses Fehlers erforderliche Justierfehlerzulage

$$Z_{\lambda} = \lambda Q. \quad (49)$$

Unter Berücksichtigung beider Fehler ergibt sich für das Istgewicht Q , wenn das von der Waage angegebene Sollgewicht Q_s beträgt, die Sollwertgleichung

$$Q = Q_s + (\lambda + 2 \xi Q_0) Q + Q^2 \xi. \quad (50)$$

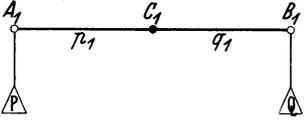
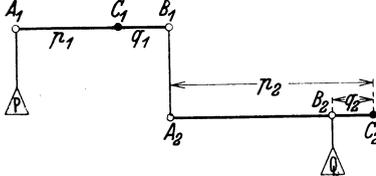
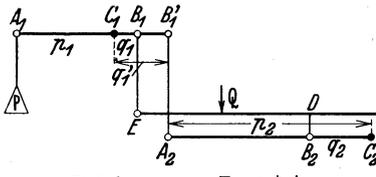
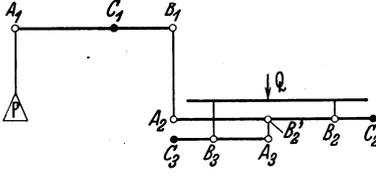
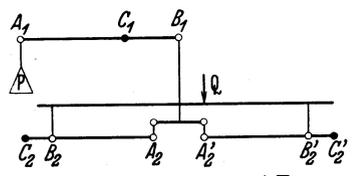
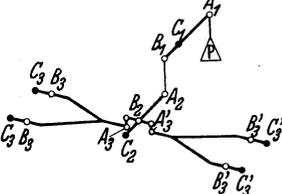
Damit wird dann die Fehlergleichung

$$Z = Q - Q_s = (\lambda + 2 \xi Q_0) Q + Q^2 \xi. \quad (51)$$

β) Die zusammengesetzte Hebelwaage. I. Wägungsgleichung. Bei den zusammengesetzten Waagen mit einer Einspielungslage sind mehrere Einhebelwaagen durch besondere Verbindungsstücke derart miteinander verbunden, daß die von einer jeden verwogene Teillast automatisch auf den Hauptgewichtshebel übertragen wird. Zum Unterschied gegen die Einhebelwaage, bei welcher nur senkrecht wirkende Kräfte auftreten, kommen hier noch neue, in den Verbindungsgliedern wirkende Kräfte hinzu. Auf die Ableitung der einzelnen Gleichungen muß verzichtet werden. Es sei aber erwähnt, daß zu der Möglichkeit der Veränderung der Stabilität und Empfindlichkeit durch die Verlegung des Schwerpunktes bei den zusammengesetzten Waagen noch eine weitere hinzukommt. Hier sind Stabilität und Empfindlichkeit noch abhängig von der Größe der Kraftwinkel, welche die Zugstange mit den Hebeln bildet. Bildet die Zugstange mit dem Oberbalken einen stumpfen bzw. einen spitzen Winkel, so wird mit diesem negativen bzw. positiven „Anzug“ dieselbe Wirkung erzielt, wie mit einer Vergrößerung bzw. Verkleinerung des Abstandes der Stützschnide von der Ebene der Tragschniden. Die der vereinfachten Wägungsgleichung (42) entsprechenden Gleichungen der zusammengesetzten Balken- und Brückenwaagen mit Gewichtsschale sind in der folgenden Zusammenstellung aufgeführt (vgl. Tabelle 20).

Der Zusammenstellung ist zu entnehmen, wie das Hebelverhältnis zusammengesetzter Waagen aus dem Hebelverhältnis der Einzelwaagen hervorgeht. So ist das Hebelverhältnis H zusammengesetzter Balkenwaagen, wie z. B. das der Zwei- oder Dreihebelwaage (bekannteste Ausführung die Kranwaage), gleich dem Produkt der Hebelverhältnisse der einzelnen hintereinandergeschalteten Waagen. Bei den Brückenwaagen ist H im allgemeinen von der Lage der Last auf der Brücke abhängig. Sind u und v die Lastanteile, welche von den in Frage kommenden zwei Schniden (z. B. B_1 und B_2 der Brückenwaage Bauart A)

Tabelle 20. Schematische Darstellung der Hebelwaagen mit einer Einspielungslage und die Wägungsgleichung der verschiedenen Bauarten.

Schematische Darstellung verschiedener Hebelwaagen	Wägungsgleichung
 <p style="text-align: center;">Einhebelwaage.</p>	$P \frac{p_1}{q_1} = Q.$
 <p style="text-align: center;">Zweihebelwaage.</p>	$P \frac{p_1}{q_1} \cdot \frac{p_2}{q_2} = Q.$
 <p style="text-align: center;">Brückenwaage, Bauart A.</p>	$P \frac{1}{u \frac{q_1}{p_1} + v \frac{q'_1 q_2}{p_1 p_2}} = Q.$ <p>Wenn: $\frac{q_1}{p_1} = \frac{q'_1 q_2}{p_1 p_2}$, dann</p> $P \frac{p_1}{q_1} = Q.$
 <p style="text-align: center;">Brückenwaage, Bauart B.</p>	$P \frac{p_1}{q_1} \frac{1}{u \frac{q_2}{p_2} + v \frac{q'_2 q_3}{p_2 p_3}} = Q.$ <p>Wenn: $\frac{q_2}{p_2} = \frac{q'_2 q_3}{p_2 p_3}$, dann</p> $P \frac{p_1}{q_1} \cdot \frac{p_2}{q_2} = Q.$
 <p style="text-align: center;">Brückenwaage, Bauart E.</p>	$P \frac{p_1}{q_1} \frac{1}{u \frac{q_2}{p_2} + v \frac{q'_2}{p'_2}} = Q.$ <p>Wenn: $\frac{q_2}{p_2} = \frac{q'_2}{p'_2}$, dann</p> $P \frac{p_1}{q_1} \cdot \frac{p_2}{q_2} = Q.$
 <p style="text-align: center;">Brückenwaage, Bauart D.</p>	$P \frac{p_1 p_2}{q_1 q_2} \frac{1}{u \frac{q_3}{p_3} + v \frac{q'_3}{p'_3}} = Q.$ <p>Wenn: $\frac{q_3}{p_3} = \frac{q'_3}{p'_3}$, dann</p> $P \frac{p_1}{q_1} \cdot \frac{p_2}{q_2} \cdot \frac{p_3}{q_3} = Q.$

getragen werden, so tritt das Hebelverhältnis parallel geschalteter Einzelwaagen auf mit dem reziproken Wert, und zwar in Verbindung mit dem entsprechenden Lastanteil.

II. Die Empfindlichkeit. Die Empfindlichkeit der zusammengesetzten Hebelwaagen ist von der Empfindlichkeit der Einzelwaagen abhängig¹. Bei hintereinandergeschalteten Waagen (z. B. Zweihebelwaage) mit den Empfindlichkeiten E_1 und E_2 wird die Gesamtempfindlichkeit E , wenn das Hebelverhältnis des hinzugefügten Hebels mit h_2 und das Verhältnis des Lastarmes des Gewichtshebels zum Gewichtarm des hintergeschalteten Lasthebels mit m (Schwingungsverhältnis) bezeichnet wird,

$$E = \frac{1}{\frac{h_2}{E_1} + \frac{m}{E_2}}. \quad (52)$$

Es ist also hier die Empfindlichkeit E , wenn E_1 und E_2 ungefähr gleich groß sind, vorwiegend von der Empfindlichkeit E_1 des Gewichtshebels abhängig. Bei Parallelschaltung der Einzelwaagen ist die reziproke Empfindlichkeit der zusammengesetzten Waage gleich der Summe der einzelnen reziproken Empfindlichkeiten, $\frac{1}{E} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}$. Die im allgemeinen bei den Brückenwaagen vorhandene Abhängigkeit der Empfindlichkeit von der Lage der Last verschwindet, wenn die Schneiden eines jeden Hebels in einer Ebene liegen.

III. Die Hebel durchbiegung. Der Biegungs- und Justierfehlerkoeffizient zusammengesetzter Waagen ist bei Hintereinanderschaltung der Hebel jeweils gleich der Summe der einzelnen Koeffizienten, bei parallel geschalteten Hebeln ebenfalls, jedoch tritt hier ξ und λ auf in Verbindung mit den von den einzelnen Hebeln getragenen Lastanteilen. Zum Vergleich seien die allgemeinen Sollwertgleichungen der Zweihebelwaage und der Brückenwaage (Bauart A) angeführt. Es ist

$$Q = Q_s + [\lambda_1 + \lambda_2 + (\xi_1 + \xi_2) 2 Q_0] Q + (\xi_1 + \xi_2) Q^2 \quad (53)$$

und

$$Q = Q_s + [u \lambda_1 + v (\lambda'_1 + \lambda_2) + (u \xi_1 + v \xi'_1 + v^2 \xi_2) 2 Q_0] Q + (u \xi_1 + v \xi'_1 + v^2 \xi_2) Q^2. \quad (54)$$

Bei der Brückenwaage (Bauart A) sind die Biegungskoeffizienten ξ_1 und ξ'_1 noch von der Lage der Last auf der Brücke abhängig².

γ) **Schaltgewichtswaagen.** Bei den bisher betrachteten Waagen mit Gewichtsschale kann die Ausführungs- der Gewichtsseite ersetzt werden durch eine Schaltgewichtseinrichtung. Die für Hebelwaagen mit Gewichtsschale erforderlichen Gewichte sind bei den Schaltwaagen nicht mehr von der Waage abtrennbar, sie werden durch Betätigung besonderer Schalthebel eingeschaltet. Die Wirkung der Schaltgewichte ist nach dem Dezimalsystem abgestuft. Die für die Gewichtswaagen gültigen Formeln gelten sinngemäß auch für die Schaltwaage. Wenn die Last-

¹ Näheres darüber in der Spezialliteratur, Fußnote 2, S. 687 und M. Raudnitz: Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 72, 43 (1928).

² Zingler, J.: Fußnote 2, S. 687, 67.

hebelwerke in gleicher Ausführung bei der Schaltwaage verwendet werden, so unterscheiden sich die Gleichungen dieser Waagenbauart von denen der Gewichtswaagen nur durch den Ausdruck für das Drehmoment der Gewichtssseite. So tritt an die Stelle des Drehmomentes $(P_0 + P) p \sin \alpha$ der früheren Gleichung (41) nun das Drehmoment der Schaltgewichte: $[(P'_0 + P_1) p_1 + (P'_0 + P_2) p_2 + \dots] \sin \alpha$ (Abb. 103), wobei die tote Last der einzelnen Gewichtsschalen (Kassetten) mit $P'_0, P'_0 \dots$ bezeichnet ist.

Die Gleichungen für die verschiedenen Fehlerkoeffizienten werden in ähnlicher Weise erhalten, wie bei den Waagen mit Gewichtsschalen.

d) Laufgewichtswaagen. Wie bei der Schaltwaage ist auch bei den Laufgewichtswaagen die lästige Verwendung von losen Gewichtsstücken vermieden.

An Stelle des konstanten Hebelverhältnisses und des veränderlichen Gewichtes tritt bei den Laufgewichtswaagen ein veränderliches Hebelverhältnis und ein konstantes Gewicht P , das Laufgewicht. Wird der Arm des Laufgewichtes in der Nulllage mit p_0 (toter Arm), die Länge der wahren Skala mit p_m (nutzbarer Arm) und der beliebige Abstand der Schwerpunktslage von seiner Nulllage mit p bezeichnet (Abb. 104), so wird der gesamte Hebelarm des Laufgewichtes:

$$(p_0 \sin \alpha_0 + p \sin \alpha).$$

Hier bedeuten α_0 und α die Kraftwinkel, unter denen das Laufgewicht in der Nulllage und in einer beliebigen Stellung zur Wirkung gelangt.

Bei gleicher Ausführung der Lastseite unterscheiden sich nun alle für die Gewichtswaage gültigen Bedingungsgleichungen nur durch den Ausdruck für das ausgleichende Drehmoment des Gewichtes. So z. B. wird für die Gleichgewichtsbedingung der belasteten Einhebellaufgewichtswaage entsprechend der früheren Gleichung (41) jetzt erhalten:

$$(Q_0 + Q) q \sin \beta + G s \sin \delta - P (p_0 \sin \alpha_0 + p \sin \alpha) = 0. \quad (55)$$

Daraus ergibt sich die Wägungsgleichung

$$P \frac{p}{q} = Q. \quad (56)$$

Die Wägungsgleichung hat demnach dieselbe Form wie diejenige der Einhebelwaage (42a), nur ist hier bei der Laufgewichtswaage das Gewicht P konstant, dagegen p und damit das Hebelverhältnis veränderlich.

Im allgemeinen liegen toter und nutzbarer Arm des Laufgewichtsbalkens in einer Linie, so daß also $\alpha_0 = \alpha$ ist. Für diesen Fall ist dann auch die Gleichung für die Trägheit bzw. Empfindlichkeit in voller Übereinstimmung mit der entsprechenden der Gewichtswaagen.

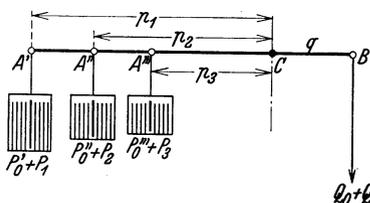


Abb. 103. Schema der Schaltwaage.

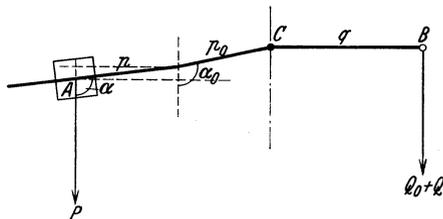


Abb. 104. Schema der Laufgewichtswaage.

Zu den durch Biegung und durch falsches Hebelverhältnis hervorgerufenen Fehlern tritt nun hier noch eine weitere Fehlerquelle auf. Wenn die Einteilung des Laufgewichtsbalkens fehlerhaft ist, dann macht dieser Teilungsfehler λ_t eine Teilungsfehlerzulage Z_t erforderlich von der Größe

$$Z_t = \lambda_t Q. \quad (57)$$

Damit wird der Gesamtfehler

$$Z = Z_\xi + Z_\lambda + Z_t$$

und die Sollwertgleichung der Einhebellaufgewichtswaage

$$Q = Q_s + (\lambda + \lambda_t + 2\xi Q_0) Q + Q^2 \xi. \quad (58)$$

ε) Neigungswaagen. Bei den Neigungswaagen wird ein konstantes Gegengewicht P benutzt, das sich aber im Gegensatz zu den Laufgewichtswaagen an einem konstanten Gewichtarm befindet. Für die durch Abb. 105 wieder-

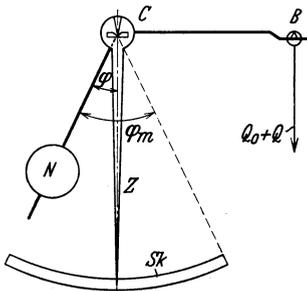


Abb. 105. Neigungswaage mit Stütz- und Lastschneide.

gegebenen einfachen Neigungswaage mit Stütz- und Lastschneide setzt sich z. B. dieses Neigungsgewicht P zusammen aus dem Gewicht von Balken, Gegengewicht N und Zeiger Z .

In der selbsttätig herbeigeführten Gleichgewichtslage weicht das System von der Nulllage um den Winkel φ ab. Die mit Hilfe von Zeiger und Skala Sk feststellbare Größe dieses Neigungswinkels ist ein Maß für die wirkende Last Q . Sein Maximalwert φ_m (bis $\sim 50^\circ$) stellt den Neigungsbereich der Waage dar.

Die diesem Winkel entsprechende Last Q_m und damit auch der Ausschlag für die Gewichtseinheit liegt bei der Konstruktion von vornherein fest. Wesentlich ist nun, daß erstens die Einteilung der Skala linear ist, daß also die Empfindlichkeit der Waage konstant und zweitens auch ausreichend ist. Die erste Forderung kann nur mit gewisser Annäherung erreicht werden. Zur Erfüllung der zweiten Forderung sind verschiedene Ausführungen entstanden. Da mit steigender Wägefähigkeit die Ablesegenauigkeit geringer wird, wird eine Vergrößerung der Skalenlänge angestrebt durch Unterteilung des Wägebereiches, Hintereinanderschaltung mehrerer Neigungshebel¹, durch optische Anzeigevorrichtungen², durch Vergrößerung des Zeigerauschlages mit Hilfe von Übersetzungswerken³ oder auch durch die Verbindung der reinen Neigungswaage mit einer oder mehreren Waagengruppen (kombinierte Waagen wie Neigungswaagen mit Laufgewichts- oder Schaltgewichtseinrichtungen).

¹ Z. B. bei der „Dewaage“ der Firma C. Schenck, Darmstadt und der „Verbund-Fridopa“ der Gebr. Dopp A. G., Berlin.

² „Leuchtbildwaage“ der Firma C. Schenck, Darmstadt; „Espera-Schnellwaage“ der Firma H. Sprokhorst, Duisburg; A. Bizer A. G., Balingen.

³ Bei der vollautomatischen Waage der vereinigten Waagenfabriken A. Sauter, Ebingen (Württemberg) und A. Bizer A. G., Waagen- und Maschinenfabrik, Balingen (Württemberg) macht der Zeiger normalerweise bei der Höchstlast fünf Umdrehungen. Die volle Gewichtszahl wird dabei jeweils mittels einer Gewichtskulisse eindeutig zur Anzeige gebracht.

In der folgenden Zusammenstellung (Tabelle 21, S. 696) sind die Wägungsgleichungen für die drei Grundarten der Neigungswaagen und als Beispiel diejenigen von zwei zusammengesetzten Neigungswaagen wiedergegeben. Während sich bei der einfachsten Waage mit Stütz- und Lastschneide die Proportionalität des Neigungswinkels φ mit der Last Q durch Einbau besonderer Zwischenglieder zwischen Neigungshebel und Zeiger mit genügender Genauigkeit erreichen läßt, wird dies bei Waagen mit Lastkurven bzw. Stütz- und Lastkurven einfacher und sicherer erreicht durch passende Wahl der Systemkonstanten¹. Es sei noch erwähnt, daß bei den besonders geeigneten Neigungswaagen mit Stütz- und Lastkurven das Neigungsgewicht P für eine vorliegende Waage einen genau festgelegten Wert besitzt, daß hier also gegenüber den beiden anderen Grundarten eine nachträgliche Berichtigung des wirksamen Gegengewichtes nicht mehr durchführbar ist.

Die Neigungswaagen haben in Verbindung mit den verschiedensten Lasthebelwerken als zusammengesetzte Neigungswaagen besondere Verbreitung gefunden. Bei dieser Waagengruppe wird nur ein Teil der Last durch die Zugstange auf den Neigungshebel übertragen. Da die Zugstange oder sonstige Verbindungsglieder ihre Richtung mit dem Neigungswinkel verändern, nehmen hier die verschiedenen Bedingungsgleichungen eine verwickelte Form an. Wegen Einzelheiten muß auf die Spezialliteratur² verwiesen werden.

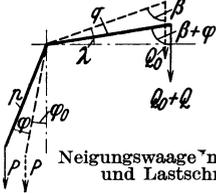
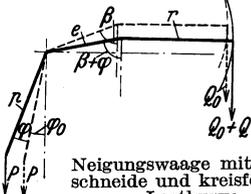
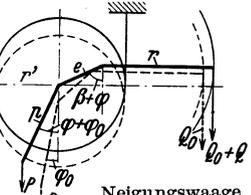
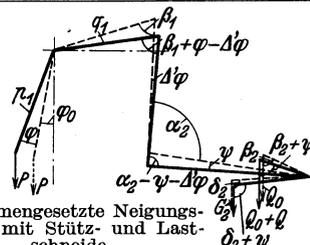
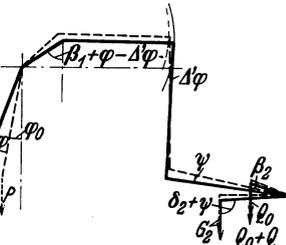
ζ) **Selbsttätige Waagen mit fester Einspiellage.** Bei der Wägung von Massengütern bedient man sich der selbsttätigen Waagen. In den Neigungswaagen haben wir bereits eine Art von selbsttätigen Waagen kennengelernt. Die aufgebrachte Last wird von ihnen ohne weitere Bedienung ausgeglichen und an einer Skala angezeigt. Wird nur ein Teil der Last selbsttätig verwogen, wie z. B. bei den Schaltneigungswaagen, so werden die Waagen halbselbsttätig genannt. Während nun bei diesen Waagen die Selbsttätigkeit auf die Anordnung des ausgleichenden Gegengewichtes zurückzuführen ist, wird bei den Waagen mit fester Einspiellage die Selbsttätigkeit durch besondere zusätzliche Einrichtungen erreicht. Insbesondere sind die automatischen Waagen in der Lage die erneute Zuführung des Wägegutes nach einer beendeten Wägung wieder zu veranlassen, die Gewichtsermittlung auszuführen, die Lastschale zu entleeren, sowie das Gewichtsergebnis anzuzeigen, zu addieren und auch selbsttätig zu registrieren³. Bei fortlaufender Wiederholung dieses Wägevorganges wird das zur Verfügung gestellte Material vollautomatisch verwogen. Wird der eine oder andere Arbeitsvorgang wie z. B. die Entleerung der Lastschale oder die Entfernung der zur Aufnahme der Last bestimmten Einrichtung (Absackwaagen)

¹ Näheres darüber siehe K. Diehl: Die Berechnung der Neigungswiegebalken mit festem Gegengewicht. Halle 1931.

² Diehl, K.: Fußnote 1 und J. Zingler: Fußnote 2, S. 687.

³ Näheres über die verschiedenen Konstruktionen siehe bei O. Tauchnitz: Automatische Registrierwaagen. München u. Berlin 1913; und in den „Mitteilungen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt“, Abt. I für Maß und Gewicht, Berlin.

Tabelle 21. Die Wägungsgleichungen verschiedener Neigungswaagen.

Kräftebilder der verschiedenen Neigungswaagen	Wägungsgleichung
 <p>Neigungswaage mit Stütz- und Lastschneide.</p>	<p>Für unsymmetrische Skala: $P \cdot \frac{p \cdot \sin(\varphi_0 + \varphi)}{q \sin(\beta + \varphi)} - Q_0 = Q.$ Für die Symmetrielage mit $\beta + \frac{\varphi_{\max}}{2} = 90^\circ$ $Q_{\max} \frac{\sin(\beta + \varphi_m)}{\sin \varphi_m} \cdot \frac{\sin \varphi}{\sin(\beta + \varphi)} = Q.$ </p>
 <p>Neigungswaage mit Stützschneide und kreisförmiger Lastkurve.</p>	$P \cdot \frac{p}{e} \cdot \frac{\sin(\varphi_0 + \varphi)}{r + \sin(\beta + \varphi)} - Q_0 = Q.$
 <p>Neigungswaage mit Stütz- und Lastkurve.</p>	$P \frac{\frac{p}{e} \sin(\varphi_0 + \varphi) + \frac{r'}{e}}{\frac{r}{e} + \sin(\beta + \varphi) - \frac{r'}{e}} - Q_0 = Q$ <p>Für $Q = 0$ wird hier das Neigungsgewicht $P = \frac{Q_0 (r + e \sin \beta - r')}{p \cdot \sin \varphi_0 + r'}.$ </p>
 <p>Zusammengesetzte Neigungswaage mit Stütz- und Lastschneide.</p>	$P \cdot \frac{p_1 p_2}{q_1 q_2} \cdot \frac{\sin(\varphi + \varphi_0) \sin(\alpha_2 - \psi - \Delta' \varphi)}{\sin(\beta_1 + \varphi - \Delta' \varphi) \sin(\beta_2 + \psi)} - \frac{G_2 s_2 \sin(\delta_2 + \psi)}{q_2 \cdot \sin(\beta_2 + \psi)} - Q_0 = Q.$
 <p>Zusammengesetzte Neigungswaage mit Stützschneide und kreisförmiger Lastkurve.</p>	$P \cdot \frac{p_1 p_2}{e \cdot q_2} \cdot \frac{\sin(\varphi + \varphi_0) \sin(\alpha_2 - \psi - \Delta' \varphi)}{\left[\frac{r}{e} + \sin(\beta_1 + \varphi - \Delta' \varphi) \right] \sin(\beta_2 + \psi)} - \frac{G_2 s_2 \sin(\delta_2 + \psi)}{q_2 \sin(\beta_2 + \psi)} - Q_0 = Q.$

von Hand ausgelöst, so arbeiten diese Waagen halbautomatisch. Es kann unterschieden werden zwischen selbsttätigen Balkenwaagen und selbsttätigen Laufgewichtswaagen.

I. Selbsttätige Balkenwaage. Mit den selbsttätigen Balkenwaagen wird immer eine gleiche, in gewissen Grenzen (bis etwa 50% der Wägefähigkeit) regulierbare Materialmenge verwogen, während die selbsttätigen Laufgewichtswaagen das jeweils zufällig zugeführte Material wägen.

Der wichtigste Teil eines jeden Wägevorganges ist das letzte „Ausgleichen“ oder „Abgleichen“. Für automatische Balkenwaagen kommt nur ein Abgleichen durch Hinzufügung von Material in Frage. Da das richtige Abgleichen von verschiedenen Faktoren abhängig ist, liegt hier eine gewisse Schwierigkeit für die selbsttätige Wägung vor.

Um den unproduktiven Wägungsvorgang möglichst abzukürzen, muß bei den selbsttätigen Balkenwaagen die Füllung der Lastschale bis zum Beginn des Ausgleichens möglichst schnell erfolgen und alsdann durch eine genaue Tarierung beendet werden. Für die hierzu erforderliche Abdrosselung des Materialstromes wird ein „Voreiler“ benutzt, welcher eine stufenweise Bewegung des Waagebalkens herbeiführt. Nach Erreichung der Gleichgewichtslage wird der Materialzufluß abgestellt. Der im Augenblick der Abstellung noch zwischen der Absperrvorrichtung und dem Material in der Lastschale befindliche Nachstrom wird durch ein in Grenzen einstellbares und stets gleichmäßig wirkendes Reguliergewicht ausgeglichen. Da bei großstückigen Materialien das Gewicht des Nachstromes nicht konstant genug ist, tritt hier an die Stelle des Nachstromreglers eine selbsttätige Hilfswaage, welche das überschüssige Materialgewicht registriert.

II. Selbsttätige Laufgewichtswaagen. Auch für selbsttätige Laufgewichtswaagen, deren mechanisch oder elektrisch betätigte Laufgewichtseinrichtung selbsttätig bis zur Erreichung der Gleichgewichtslage arbeitet, ist die einwandfreie letzte Abgleichung von Bedeutung. Nach Erreichung der Gleichgewichtslage wird hier die Antriebsvorrichtung des Laufgewichts durch eine Sperre stillgesetzt. Wie bei den Balkenwaagen der Nachstrom, muß hier bei den selbsttätigen Laufgewichtswaagen die Bewegung des Laufgewichtes konstant sein, um Fehler bei der Abgleichung zu vermeiden. Da durch das Nachlaufen des Laufgewichtes die Angabe der Waage zu hoch ausfallen würde, wird dieser Nachlauffehler durch eine Reguliervorrichtung ausgeglichen. Wenn das Gewicht der Wägegüter in weiten Grenzen schwankt, werden die Waagen zur Erreichung größerer Genauigkeit mit zwei getrennten Laufgewichten¹ ausgerüstet. Diese Laufgewichte werden nacheinander ausgelöst, dabei stellt das eine die großen, das andere die kleinen Gewichtseinheiten fest.

η) Selbsttätige Hebelwaagen zur Verwiegung von stetig geförderten Wägegütern. I. Band- und Becherwerkswaagen. Stetig geförderte Materialien lassen sich mit selbsttätigen Laufgewichtswaagen wägen.

¹ Firma C. Schenck, Darmstadt.

In diesem Falle wird entweder die Waagenbrücke entsprechend lang vorgesehen, oder es wird das zu wägende Fördergut automatisch angehalten [Fördertechn. 6, 231, 273 (1913)] und erst nach der vorschriftsmäßigen Wägung wieder freigegeben. Bei den Band- oder Becherwerkswaagen¹ [Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 72, 1132 (1928)] wird zur Verwiegung eine zusammengesetzte Neigungswaage benutzt. Das Fördermittel wird über die Waagenbrücke geleitet. Sein Gewicht wird entweder austariert oder in besonders schwierigen Fällen beim Rücklauf zurückgewogen und vom Zählwerk in Abzug gebracht. Das Fördergewicht wird ermittelt aus der Fördergeschwindigkeit und aus der Belastung des Transportmittels. Die Feststellung und Übertragung des Materialgewichtes auf das Zählwerk erfolgt durch Kuppelung mit dem Transportmittel, und zwar jedesmal dann, wenn die wirksame Länge des Transportmittels die Brücke der Waage durchläuft.

II. Die Balan-Kontrollwaage. Eine kontinuierliche Wägung von Schüttgütern — allerdings nicht ganz in der schonenden Form wie bei Förderbandwaagen — führt auch die Balan-Kontrollwaage [Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 74, 14 (1930)] durch. Die Lastschale ist hier eine durch einen Elektromotor gleichmäßig angetriebene Zellentrommel. Die Füllung der Zellen wird registriert (s. Abb. 217 auf S. 836).

9) Deformationswaagen. Den Deformationswaagen liegt das Hooke'sche Gesetz [Hütte: Des Ingenieurs Taschenbuch, Bd. 1, S. 588. 1931] zugrunde, wonach für gewisse Stoffe in einem begrenzten Bereich (Proportionalitätsgrenze) die Größe der relativen Deformation der deformierenden Kraft proportional ist. Die Zuverlässigkeit dieser Wägeeinrichtungen leidet jedoch darunter, daß die deformierten Körper infolge Ermüdungserscheinungen, elastischer Nachwirkungen und Temperatureinfluß bleibende wie auch vorübergehende Änderungen erfahren, welche die Größe der elastischen Deformation beeinflussen.

Die bekannteste Waage dieser Art ist die Federwaage, welche weniger oft als reine Federwaage verwendet wird, in Verbindung mit einem Lasthebelwerk aber größere Verbreitung gefunden hat. Bei den hydraulischen Waagen wird der Druck des zu wägenden Körpers über eine zwischengeschaltete Flüssigkeit auf den zur Messung benutzten elastischen Körper übertragen. Auch bei den in der Wissenschaft und auch in der Technik zur schnellen Bestimmung äußerst kleiner Gewichte benutzten Mikrowaagen² wird die Durchbiegung (Salvonische Waage) oder Torsion (Nernstsche Waage) elastischer Körper herangezogen.

Da das Gewicht eines Körpers von der Erdbeschleunigung g abhängig ist, können die Deformationswaagen nur dann zur Massenbestimmung benutzt werden, wenn g berücksichtigt wird. Die maximalen Abweichungen vom Mittelwert $g = 980,6 \text{ cm/s}^2$ betragen etwa $\pm 0,25\%$.

¹ Förderbandwaagen ausländischer Bauart siehe Albrecht: Fördertechn. 26, 296 (1933).

² Literaturangabe siehe O. D. Chwolsen: Lehrbuch der Physik, Bd. I, 1, S. 326. Braunschweig 1918. — Geiger, H. u. K. Scheel: Handbuch der Physik, Bd. 2, S. 127. 1926.

c) **Hydrostatische Waagen.** Eine Gewichtsermittlung unter Benutzung des Auftriebes erfolgt bei der hydrostatischen Waage oder Senkwaage von Nicholson. Hier wird der Auftrieb eines Schwimmers nach Auflegung des zu wägenden Körpers durch Entfernung einer entsprechenden Zahl von bekannten Gewichten wieder hergestellt. Die Masse der entfernten Gewichte ist dann gleich der Masse des zu wägenden Körpers. Diese Methode, welche zur Volumen- und Dichtebestimmung benutzt wird, kommt nur für kleine Gewichte in Frage.

Im Binnenschiffverkehrsverkehr¹ wird mit Hilfe des Archimedischen Prinzips die Schiffsladung ermittelt. Die Ladung ist gleich der Differenz der vom beladenen und leeren Schiff verdrängten Wassermenge. Von den Schiffseichämtern wird durch genaue Vermessung des Schiffes die Verdrängung dem Raume nach ermittelt. Die im Eichschein angegebenen Gewichte sind das Produkt aus der ausgemessenen Wasserverdrängung und dem spezifischen Gewicht des Wassers, in welchem die mittlere Eintauchung der Eichskalen ermittelt worden ist.

Es sei an dieser Stelle noch erwähnt, daß zur Messung geringer Gewichtsunterschiede Wägeeinrichtungen geschaffen worden sind, bei denen die Gewichtswirkung elektromagnetisch² ausgeglichen wird.

d) Sicherung der Wägung.

a) **Von Hand zu bedienende Waagen.** Das Wägungsergebnis kann durch die verschiedensten Fehler beeinträchtigt werden. Da einwandfreie Wägungen nur erzielt werden können, wenn die zahlreichen Fehlermöglichkeiten beachtet werden, soll kurz auf die wichtigsten Merkmale zur Sicherung der Wägung hingewiesen werden.

I. **Aufstellung der Waage.** Besondere Aufmerksamkeit ist der Aufstellung der Waagen zuzuwenden. Je feiner die Waage³, um so mehr Sorgfalt ist hier geboten. Die Unterlage für die Waage muß eben und fest sein, damit auch bei größerer Belastung die erforderliche Lage erhalten bleibt. Nicht ortsfeste Waagen sind stets unter Benutzung der angebrachten Hilfsvorrichtungen, wie Lot oder Wasserwaage⁴, auszurichten. Schrägstellungen über 2° fallen bereits stark ins Auge. Weicht die Waagensäule einer im Gleichgewicht befindlichen Hebelwaage mit fester Einspiellage um den Schrägstellungswinkel + oder $-\varepsilon$ von der normalen Lage ab (Abweichung parallel der Schwingungsebene des Waagebalkens), so ist zur Aufhebung des entstandenen Zeigerausschlages eine Tarierung um den Betrag ΔQ_0 auszuführen, da sonst ein Fehler

¹ Auf der europäischen Eichkonferenz in Paris wurde am 27.11.1925 das internationale Übereinkommen über die Eichung von Binnenschiffen abgeschlossen. Näheres siehe Taschenkalender für die Rheinschiffahrt. Mainz 1931.

² Angström, K.: Tva metronom hjälp apparater. Stockholm. Akad. Förhandl. 52, 643 (1895) und A. Stock u. G. Ritter: Ztschr. physikal. Chem. 119, 333; 124, 204 (1926); 126, 172 (1927). — Stock, A.: Ztschr. physikal. Chem. Abt. A, Haber-Band, S. 4. 1928. — Verbesserung der Gasdichtewaage (Stocksche Schwebewaage) bei E. Lehrer u. E. Kuß: Ztschr. physikal. Chem. Abt. A, 163, 73 (1933).

³ Näheres über die Aufstellung der feineren Hebelwaagen siehe W. Felgenträger: Fußnote 2, S. 687, 229.

⁴ Instruktion VI, Waagen, Berlin 1932, Nr. 10.

entsteht, welcher um so größer ist, je kleiner die Empfindlichkeit der Waage ist. Wenn die Schneiden der Hebel in einer Ebene liegen, was in der Praxis angestrebt wird, wird das Hebelverhältnis unabhängig von dem Schrägstellungswinkel. Es ist aber zu beachten, daß die Empfindlichkeit der fehlerhaft aufgestellten Waage von dem Winkel ε abhängig ist. So ist für die Einhebelwaage

$$E_s = \frac{E}{1 + \operatorname{tg}^2 \varepsilon} \quad (59)$$

Die Empfindlichkeit der einfachen Waage ist also stets kleiner als bei normaler Aufstellung. Die Empfindlichkeit der zusammengesetzten Waagen ist ebenfalls von der Schrägstellung abhängig. Bei positiver Schräglage ist die Empfindlichkeit kleiner, bei negativer größer und kann in diesem Falle sogar zu der unbrauchbaren labilen Gleichgewichtslage führen.

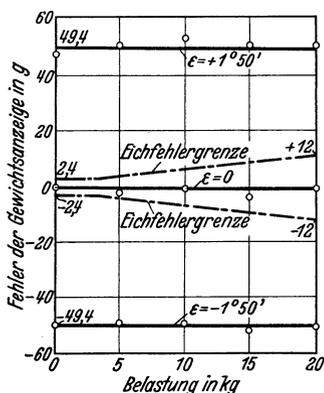


Abb. 106. Schrägstellungsfehler einer Laufgewichtswaage von 20 kg Tragkraft (stark ausgezogene Linien theoretische Fehler, Punkte Versuchswerte).

Als Beispiel seien in Abb. 106 die Schrägstellungsfehler einer zusammengesetzten Waage [K. Diehl: Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 75, 519 (1931) und Ztschr. Instrumentenkunde 51, 341 (1931)] nach Versuchen von K. Diehl wiedergegeben. Der Schrägstellungswinkel der Laufgewichtswaage von 20 kg betrug $\varepsilon = 0$ und $\varepsilon = \pm 1^\circ 50'$.

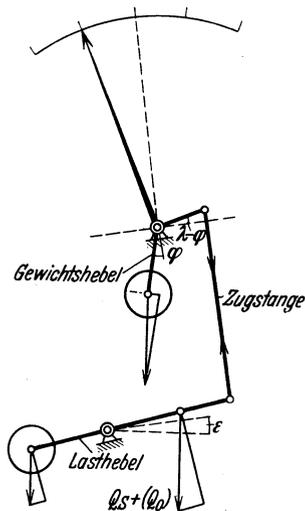


Abb. 107. Kräftebild einer schräggestellten Neigungswaage.

Bei den Neigungswaagen einfacher Bauart sind die durch ungenaue Aufstellung verursachten Fehler weit größer [K. Diehl: Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 75, 519 (1931)]. Hier ist der Fehler von der Belastung abhängig, er läßt sich nicht durch Austarierung beheben. Wie unverhältnismäßig groß die Schrägstellungsfehler bei einer zusammengesetzten Neigungswaage nach der durch Abb. 107 dargestellten Bauart schon bei $\varepsilon = \pm 1^\circ$ werden können, zeigen die Fehlerkurven der Abb. 108 (nach K. Diehl). Bei diesen Waagen ist demnach besonderer Wert auf einwandfreie Aufstellung zu legen. Zur Beseitigung dieser Fehler sind verschiedene Bauarten entstanden, von denen die Ausführung mit Doppelpendel die verbreitetste ist. Diese Neigungswaagen sind gegen Schrägstellung wenig empfindlich.

Daß die aufgestellte Waage vor Luftzug oder Winddruck sowie vor ungleicher Erwärmung einzelner Teile zu schützen ist, ist ebenso selbstverständlich, wie die Aufstellung an einem sauberen und hellen Platz.

II. Grundforderungen für richtige Wägungen. Zur Durchführung einer genauen Wägung sind weiterhin von der Waage noch zu fordern: Stabilität, Empfindlichkeit, Richtigkeit und Unveränderlichkeit.

Die Waage besitzt die notwendige Stabilität, wenn sie unabhängig von der Belastung bei jeder zwangsweise herbeigeführten Abweichung aus ihrer Gleichgewichtslage und allmählich erfolgender Wiederfreigabe in ihre Ausgangslage zurückkehrt.

Die Empfindlichkeit der Waage muß hinreichend sein, damit nicht durch zu große Reibung eine Falschwägung verursacht wird. Durch Auflage oder Abnahme des Empfindlichkeitsgewichtes (Eichordnung, Berlin 1930, § 95), bzw. durch entsprechende Einstellung der Laufgewichts- oder Schaltgewichtseinrichtung, muß eine deutliche, dauernde Abweichung der Zeigerspitze von der Ruhelage eintreten (Verschiebung der Zeiger gegeneinander um 2—4 mm)¹. Da bei den Waagen mit Gewichtsanzeige der Ausschlag für die Gewichtseinheit ganz bestimmt vorgeschrieben ist, erstreckt sich hier die Prüfung der Empfindlichkeit auf eine Nachprüfung des einwandfreien Waagenspieles (Beweglichkeit).

Wird von Konstruktionsfehlern abgesehen, dann ist die Richtigkeit der Waage² abhängig von der Beständigkeit der Hebelarme oder des Hebelverhältnisses. Bei Einhebelwaagen spielt die Ungleicharmigkeit der Waagearme keine Rolle, wenn es sich um relative Gewichtsermittlung handelt und die Last immer auf dieselbe Waagschale gebracht wird. Hierbei wird natürlich vorausgesetzt, daß die Ungleicharmigkeit konstant bleibt. Absolute Gewichtsbestimmungen verlangen die Beachtung der Ungleicharmigkeit. Die Prüfung der Richtigkeit der Waage erfolgt mit Normalgewichten, bei feineren Waagen mit Gewichten, deren Fehler bekannt sind und demnach berücksichtigt werden können. Die genau austarierte Waage wird auf der Lastseite mit Normalgewichten³ belastet und muß in die Gleichgewichtslage übergehen, wenn bei den Waagen mit Gewichtsschale diese mit einer dem Über-

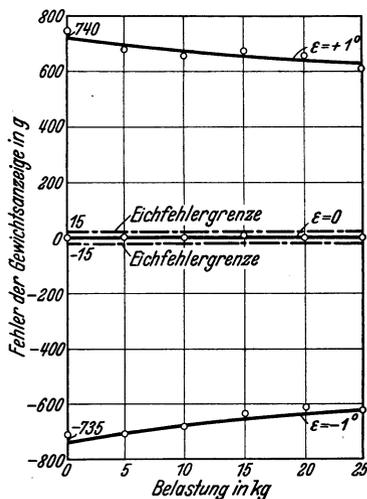


Abb. 108. Schrägstellungsfehler einer Neigungswaage.

¹ Instruktion VI, Waagen, A. Handelswaagen, Berlin 1932, Nr. 19, a 2. Für Waagen mit Neigungsgewichtseinrichtung mindestens 1 mm, siehe Instruktion VI, Nr. 82, c 2 und 3.

² Instruktion VI, Waagen, A. Handelswaagen, Berlin 1932, Nr. 20.

³ Normalgewichte für den Gebrauch (Gebrauchsnormale) dürfen nur einen Fehler aufweisen, der höchstens $\frac{4}{10}$ des für eichpflichtige Gewichte gleicher Größe zulässigen Fehlers beträgt. Siehe Instruktion zur Eichordnung, Berlin 1911, Allgemeine Instruktion Nr. 12.

setzungsverhältnis entsprechenden Zahl von Normalgewichten belastet wird, wenn bei Laufgewichtswaagen das Laufgewicht, bei Schaltwaagen die Schaltgewichte entsprechend eingestellt werden. Bei Waagen mit Gewichtsanzeige muß die Angabe mit der Belastung übereinstimmen. Die eventuell zur Herbeiführung der Gleichgewichtslage erforderliche Gewichtskorrektur stellt den Fehler der Waage bei der betreffenden Belastung dar. Da für Waagen mit großer Wägefähigkeit die Beschaffung des erforderlichen Normalgewichtes nicht leicht ist, können Prüfungen nach vollständigen oder abgekürzten Staffelfahren¹ ausgeführt werden. Hierbei ist nur ein Teil der Höchstlast (mindestens $\frac{1}{10}$) in genau bekannter Größe erforderlich. Bei Laufgewichtswaagen hat sich die Prüfung auch auf die Einteilung des Laufgewichtsbalkens zu erstrecken. Für größere Waagen bedient man sich bei dieser Kerbenprüfung einer besonderen Einrichtung² (Justierbank oder Skalenprüfer), in die der Laufgewichtsbalken eingebaut wird. Bei Brückenwaagen ist außerdem durch besondere Zusatzprüfungen der Einfluß der Lage der Last auf der Brücke zu untersuchen. Es sei bereits hier erwähnt, daß eine vorgenommene Berichtigung an wesentlichen Teilen der Waage (Schneiden, Kerben usw.) den amtlichen Eichstempel ungültig und eine Neu-eichung³ notwendig macht.

Die wiederholte Wägung von ein und derselben Last muß, wenn die erforderliche Unveränderlichkeit der Waage vorhanden ist, Werte liefern, deren Differenzen sich innerhalb gewisser Grenzen bewegen. Die genau austarierte Waage wird unter Betätigung der Belastungs-, Arretierungsvorrichtungen usw. mehrfach belastet. Für Brückenwaagen ist dabei die schon erwähnte Unabhängigkeit des Gewichtsergebnisses von der Lage der Last auf der Brücke von Wichtigkeit. Die einzelnen Gewichtsermittlungen bei den in der Technik benutzten Waagen dürfen das als zulässig erachtete Maß — bei Höchstlast im allgemeinen $\frac{4}{10}$, bei unbelasteter Waage $\frac{2}{10}$ * der Fehlergrenze⁴ bei der Höchstlast — nicht überschreiten. Der Vollständigkeit halber sei noch angeführt, daß bei äußerst feinen Wägungen die Änderung der Schwere mit der Höhe sowie der Einfluß der Dichte des die Massen umgebenden Mediums — meist atmosphärische Luft — zu berücksichtigen ist⁵.

III. Gewichte. Weitere Fehler können durch Benutzung unrichtiger Gewichte auftreten. Es ist daher auf die Unveränderlichkeit der richtiggestellten Gewichte zu achten. Die Gewichte sind vor Korrosion, welche den normal auftretenden Verschleiß der Gewichte

¹ Näheres darüber siehe Instruktion VI, Waagen, A. Handelswaagen, Berlin 1932; sowie J. Zingler: Fußnote 2, S. 687, 145 und M. Raudnitz: Theorie der Fehler von Großwaagen. Meßtechn. 6, 31 (1930).

² Zingler, J.: Fußnote 2, S. 687, 118. — Instruktion VI, Waagen, A. Handelswaagen, Berlin 1932, Anlage D, S. 322—332. Weitere Skalenprüfer daselbst, Anlage H, S. 333—339.

³ Instruktion zur Eichordnung, Berlin 1911, Allgemeine Instruktion 2 b, 3.

* Instruktion VI, Waagen, A. Handelswaagen, Berlin 1932, Nr. 18.

⁴ Eichordnung vom 8. 11. 1911 (E.O.), Berlin 1930, § 95.

⁵ Scheel, K.: Grundlagen der praktischen Metronomie, S. 111. Braunschweig 1911. — Felgenträger, W.: Fußnote 2, S. 687, 249. — Kohlrausch, F.: Lehrbuch der praktischen Physik, 16. Aufl., S. 50. Leipzig u. Berlin 1930.

übersteigen kann, sorgfältig zu schützen. Bei größeren Gewichten empfiehlt sich leichtes Einölen. Die Gewichte dürfen nicht geworfen und gestoßen werden, das Abstellen erfolgt zweckmäßig auf Holzunterlage. Kleinere Gewichte sind in besonderen Kästen aufzubewahren.

IV. Bedienung. Neben diesen Forderungen, welche die Wägevorrichtungen betreffen, verlangt die einwandfreie Gewichtsbestimmung auch unbedingte Zuverlässigkeit des Bedienungspersonals. Das Personal muß mit der Handhabung der Einrichtung genau vertraut sein. Durch Nachlässigkeit entstehen die meisten Fehler. Fehlerhaftes Austarieren, falsches Einstellen der Laufgewichte, falsche Einstellung der Dämpfung, Behinderung des freien Waagenspiels durch Berührung einzelner Waagenteile oder der Last hat Falschwägungen zur Folge. Fahrzeuge müssen abgekuppelt werden. Sie dürfen bei der Auffahrt auf die Waagenbrücke nicht mit Hilfe von Holzstücken abgebremst werden, da sehr leicht Holzsplitter die freie Beweglichkeit der Waage hemmen können. Um Beschädigungen der Waage zu vermeiden, sind Gewichte und Last ohne starke Erschütterung aufzubringen. Bei zusammengesetzten Waagen soll sich die Last innerhalb des Belastungsfeldes der Waage befinden. Überlastungen¹ der Waagen und unvollständige Betätigung der Entlastungsvorrichtungen sind unbedingt zu vermeiden. Laufgewichte sind unter möglichster Schonung der Kerben einzustellen, denn Abschleifungen der Kerben um ganz geringe Beträge machen sich bei der Gewichtsbestimmung bereits bemerkbar.

Um Irrtümer bei der Gewichtsbestimmung zu vermeiden, werden Laufgewichtswaagen und die neueren Waagenbauarten mit Druckapparaten versehen, die außerdem zum Teil noch besondere Sicherheitseinrichtungen zur Vermeidung von Falschwägungen besitzen. Die dadurch zu erreichende Sicherheit und Kontrolle kann durch die Verwendung von Registrierapparaten noch weiter gesteigert werden. Es muß aber erwähnt werden, daß dadurch bewußte Fälschungen nicht unterbunden werden können. Sichere Gewähr für richtige Gewichtsermittlung bietet die Bedienung einwandfreier Waagen durch unbedingt zuverlässiges Personal. Jede betrügerische Handhabung der Wägeeinrichtungen ist streng zu ahnden.

V. Beobachtung der Fehler. Zur Sicherung der Wägung gehört auch das rechtzeitige Erkennen etwaiger Fehler. Den sichersten Aufschluß ergibt die regelmäßige Prüfung mit Normalgewichten, die stets in genügender Zahl vorrätig zu halten sind. Für größere Waagen ist die Beschaffung besonderer Gewichtsertschaften² (Eichfahrzeug, Rollgewichte usw.) zweckmäßig, da mit ihrer Hilfe Beschädigungen der Wägeeinrichtung erkannt und unliebsame Gewichtsreklamationen vorzeitig vermieden werden können. Kontrollen liegen häufig dadurch vor, daß einzeln gewogene Lasten als Sammelladung auf größeren Waagen nochmals gewogen werden. Hierbei aber sind die Fehlergrenzen der verschiedenen Waagenarten zu beachten. Die Wägung

¹ Bei eichpflichtigen Waagen verstößt die Überlastung gegen § 6 der Maß- und Gewichtsordnung, Anhang zur Eichordnung, Berlin 1930.

² Instruktion VI, Waagen, A. Handelswaagen, Berlin 1932, Nr. 29—33.

der gleichen Last auf mehreren Waagen kann ebenfalls zur Beurteilung des Zustandes der Waagen herangezogen werden. Wie oft die Prüfungen vorzunehmen sind, richtet sich ganz nach der Beanspruchung der einzelnen Waagen. Eichpflichtige Wägeeinrichtungen sind nach dem Eichgesetz amtlichen Prüfungen in besonders festgesetzten Terminen unterworfen (s. S. 707). Für die selbsttätigen Waagen gelten sinngemäß die vorstehenden Ausführungen über die von Hand zu bedienenden Waagen. Da hier die Selbsttätigkeit durch besondere Zusatzeinrichtungen ermöglicht wird, so sind zur einwandfreien selbsttätigen Gewichtsermittlung noch weitere Vorschriften zu beachten.

β) Selbsttätige Waagen. Das genaue Arbeiten der automatischen Waagen ist vor allem von der Beschaffenheit des abzuwägenden Materials und von der Leistung der Waage abhängig. Dies ist bei der Auswahl des zweckmäßigsten Systems zu beachten.

I. Balken- und Laufgewichtswaagen. Beim Einbau der selbsttätigen Balkenwaagen ist Wert auf gute Zugänglichkeit zu legen, damit die oft unter schwierigen Verhältnissen arbeitenden Wägeeinrichtungen gut gewartet werden können. Über dem Waageneinlauf wird zweckmäßig ein Trichter zur Aufnahme einer Waagenfüllung angebracht. Unter den Gefäßwaagen ist ein Bunker anzuordnen. Der Bunker muß mindestens eine Ausschüttung aufnehmen können, ohne dabei die Waage in ihrem Arbeitsgang zu behindern. Um die Ausschüttung der Waage leicht auf einer Kontrollwaage nachwägen zu können, empfiehlt es sich, entweder den ganzen Auslaufbunker schwenkbar anzuordnen oder eine schwenkbare, dichtschießende Klappe einzubauen, damit ohne Betriebsstörung das ausgeschüttete Material vom Betrieb abgetrennt werden kann. Bei den selbsttätigen Balkenwaagen und den Laufgewichtswaagen ist die richtige Bedienung der Reguliervorrichtung zur Behebung des Nachstrom- bzw. Nachlauffehlers erforderlich. Da bei den ersteren die Regulierfähigkeit beschränkt ist, kann eine Waage im allgemeinen nur für Materialien annähernd gleichen Schüttgewichtes benutzt werden. Bei Änderung der Belastung — meistens nicht unter 50% der Höchstlast — ist eine erneute Regulierung notwendig. Der Wägemechanismus ist sauber zu halten, damit nicht die verminderte Beweglichkeit des Hebelsystems oder der vergrößerte Kraftbedarf zur Betätigung der verschiedenen Sondereinrichtungen die Empfindlichkeit der Waage und die Gleichmäßigkeit der einzelnen Wägungen stört. Wenn während der Füllung oder Entleerung der Gefäßwaagen unverwogenes Material aus- oder nachfließt, wird die Genauigkeit der Wägung beeinträchtigt.

Weitere Störungen werden oft dadurch verursacht, daß in der Lastschale Materialreste haften bleiben und wiederholt mitgewogen werden. Bei den Ausschüttwaagen lassen sich durch Abblase- und Klopfvorrichtungen — deren Betätigung durch die entleerende Waage selbst erfolgt — Staub- und Materialablagerungen in gewissen Grenzen halten. Die restlose Entfernung von Materialresten aus den Fördergefäßen der Hängebahn ist aber oft schwierig und besonders im Winter wegen Anfrieren des Materials kaum durchführbar. Daher ist namentlich bei

der Förderung und Wägung von feuchtem und kleinstückigem Material, wie z. B. Feinkohle, Koksgrus usw. eine einwandfreie Gewichtsermittlung oft nur möglich, wenn das Gewicht der benutzten Förderwaagen für sich durch Rückverwägung festgestellt wird. Allgemein wird von einer Rückverwägung abgesehen, da sie nicht immer leicht möglich und wirtschaftlich ist. Um das Nettogewicht der Ladung immer richtig ermitteln zu können, ist das Eigengewicht der Förderwagen stets konstant zu halten und durch regelmäßige Kontrollen zu überprüfen.

Die Bedienung der selbsttätigen Waagen ist einfach und erfordert kein besonders geschultes Personal.

Zur Hebung der Sicherheit der automatischen Wägungen werden die Waagen nicht nur mit einfachen Additionszählwerken, sondern auch noch mit Karten- oder Streifendruckapparaten versehen. Außerdem läßt sich das Wägeregebnis durch elektrische Übertragung fernanzeigen oder auch fernregistrieren. Durch den Einbau von besonderen Sicherheitsvorrichtungen werden Unregelmäßigkeiten wie z. B. die wiederholte Wägung eines Fahrzeuges durch Hin- und Herfahren oder die Durchfahrt eines Förderwagens ohne eine Wägung bei den selbsttätigen Laufgewichtswaagen vermieden. Zu diesem Zwecke werden vor und hinter der Waage Sperriegel eingebaut. Der Auffahrtsriegel sperrt nach Befahren der Waagenbrücke die Rückfahrt. Der Abfahrtsriegel wird erst nach der vorschriftsmäßigen Wägung zur Abfahrt des Fahrzeuges freigegeben. Nach erfolgter Abfahrt gibt der Auffahrtsriegel die Bahn wieder frei, während der Abfahrtsriegel seine Sperrstellung wieder einnimmt. Die Mengenermittlungen lassen sich noch weiter sichern durch Einbau von Einbruchschienen, die nur für leere Fahrzeuge die Durchfahrt gestatten, oder durch Anbringung von Kontrollzählern, welche in Verbindung stehen mit einem beweglichen Schienenstück, das durch die einstellbare Kraft einer Feder oder eines Gegengewichtes gehalten wird. Durch besondere Sperren am Hebelmechanismus der Waagen kann auch beim Unterschreiten des Mindestgewichtes oder Überschreiten des Höchstgewichtes die Tätigkeit der Wägeeinrichtung unterbunden werden.

Fehler der selbsttätigen Waagen lassen sich auch hier nur durch regelmäßige Kontrollen feststellen. Namentlich bei den automatischen Ausschüttwaagen darf eine regelmäßige Prüfung nicht versäumt werden, denn erfahrungsgemäß sind diese Waagen im Betriebe manchen störenden Einflüssen ausgesetzt, so daß in sehr vielen Fällen eine höhere Genauigkeit nur mit großer Sorgfalt zu erreichen ist. Diese Wägeeinrichtungen werden zweckmäßig wöchentlich einmal nachkontrolliert, ebenso wenn ein Wechsel des Materials erfolgt. Was von den selbsttätigen Handelswaagen zu verlangen ist, wie sie im einzelnen zu prüfen sind, darüber geben die von der Eichbehörde erlassenen Vorschriften¹ Aufschluß.

II. Förderband- und Becherwerkswaagen. Die zur Wägung und Mengenregelung von stetig geförderten Materialien benutzten

¹ Eichordnung, Fußnote 4, S. 702, §§ 101—106; Änderungen siehe Mitteilungen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, Abt. I für Maß und Gewicht, 13. Reihe, Nr. 2, S. 18 und Instruktion zur Eichordnung, Fußnote 1, S. 702.

Förderband- bzw. Becherwerkswaagen sind, da nicht eichfähig, nur in der internen Mengenkontrolle zu verwenden. Diese Waagen sollen das Nettogewicht ermitteln, es muß daher das Transportmittel einwandfrei austariert sein. Wenn auch bei diesen Wägungen die Staubentwicklung gering ist, so muß auch hier, wie bei jedem Meßinstrument, auf Sauberhaltung der Wägeeinrichtungen geachtet werden. Vor allem darf bei der Wägung von feuchten, anbackenden Materialien an dem Fördermittel kein Materialrest verbleiben, da dadurch die Genauigkeit wesentlich herabgesetzt werden kann. Bei zuverlässigem Arbeiten der angebrachten Säuberungsvorrichtungen wie Kratzer, Bürsten, Rüttler usw. hält sich dieser Fehler in erträglichen Grenzen. In besonders schwierigen Fällen werden selbsttätige Förderband- und Becherwerkswaagen mit Doppelbrücken ausgeführt, wobei die am zurücklaufenden Strang anhaftenden Materialreste zurückgewogen werden. Da bei den Förderbandwaagen die erforderliche Fördermittelstrecke zwischen der ersten Stützrolle vor der Waage und der ersten Stützrolle hinter der Waage liegt, muß beachtet werden, daß das Förderband auch stets von diesen beiden Rollen getragen wird. Stets gleichmäßige Bandspannung ist zu beachten.

Eine Prüfung der Wägeeinrichtung ist nur möglich durch Nachwägung des Fördergutes. Die zu kontrollierende Fördermenge darf nicht zu gering gewählt werden, damit ein sicherer Mittelwert erhalten wird.

In allen Fällen kann auch hier das Gewicht des geförderten Materials nicht nur durch ein Additionszählwerk angegeben, sondern auch durch einen Registrierapparat zur nachträglichen Beurteilung der Leistung aufgezeichnet werden.

e) Eichvorschriften.

a) **Eichpflicht und Eichfrist.** Da Messen und Wägen im täglichen Leben eine so überaus große Rolle spielen, sind zur Regelung des Maß- und Gewichtswesens besondere behördliche Vorschriften erlassen worden, deren rechtliche Grundlage in Deutschland die Maß- und Gewichtsordnung¹ (M.G.O.) bildet. Nach ihr ist dem Maß- und Gewichtssystem das metrische System zugrunde zu legen². Als deutsches Urmaß gilt der mit dem internationalen Prototyp des Meters³ verglichene Maßstab aus Platiniridium, als deutsches Urgewicht, wie bereits erwähnt, das mit dem internationalen Prototyp des Kilogramms verglichene Gewichtsstück aus derselben Legierung. Entsprechend dem Grundgedanken des Gesetzes — Schutz vor Übervorteilungen — werden die im handelsüblichen Verkehr benutzten Meßgeräte einer Eichpflicht⁴

¹ Anhang zur Eichordnung vom 8. 11. 1911, Berlin 1930. — Drewitz, C.: Das Maß- und Gewichtswesen Deutschlands in technischer und rechtswissenschaftlicher Beleuchtung. Berlin 1918.

² Seit dem 1. 1. 1872 im Deutschen Reich gesetzlich eingeführt.

³ Das „mètre des Archives“ und das „kilogramm des Archives“ werden aufbewahrt vom internationalen Maß- und Gewichtsbureau im Pavillon de Breteuil in Sèvres bei Paris. Näheres darüber siehe K. Scheel: Fußnote 5, S. 702, 5—10.

⁴ Von der Eichpflicht ausgenommen sind Wassermesser.

unterworfen. Nach § 6 der Maß- und Gewichtsordnung dürfen „zum Messen und Wägen im öffentlichen Verkehre, sofern dadurch der Umfang von Leistungen bestimmt werden soll, nur geeichte Maße, Gewichte und Waagen angewendet und bereit gehalten werden. Zum öffentlichen Verkehre gehört der Handelsverkehr auch dann, wenn er nicht in offenen Verkaufsstellen stattfindet. Auch zur Ermittlung des Arbeitslohnes in fabrikmäßigen Betrieben dürfen nur geeichte Maße, Gewichte und Waagen angewendet und bereit gehalten werden“.

Im eichpflichtigen Verkehr ist die Anwendung und Bereithaltung von unrichtigen Gewichten und Waagen untersagt (§ 13, M.G.O.) und strafbar (§ 22, M.G.O.). Nach den Mitteilungen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt — Abt. I für Maß und Gewicht¹ — wird diejenige Ausführung der Rechtsprechung als einwandfrei bezeichnet, die dahin geht, „daß das Tatbestandsmerkmal Bereithalten nicht erfordert, daß die Absicht besteht, unrichtige oder nicht vorschriftsmäßig geeichte Meßgeräte gegebenenfalls im öffentlichen Verkehr zu vermeiden, sondern es genügt, wenn die Möglichkeit der Verwendung erkannt ist, oder mit dieser Möglichkeit gerechnet werden mußte, es aber trotzdem unterlassen wurde, die zur Abwendung einer solchen Benutzung erforderlichen Maßnahmen zu ergreifen“.

Nach § 10 der M.G.O. besteht die Eichung „in der vorschriftsmäßigen Prüfung und Stempelung der Meßgeräte durch die zuständige Behörde; sie ist entweder Neueichung oder Nacheichung“. Für die Nacheichung, die dem Unrichtigwerden der im Handelsverkehr benutzten Meßgeräte und eventuellen Fahrlässigkeiten des Besitzers begegnen soll, sind besondere Eichfristen festgelegt. Sie betragen z. B. für Gewichte und Waagen für eine größte zulässige Last bis 3000 kg ausschließlich 2 Jahre, für Waagen von 3000 kg und darüber und für festfundamentierte Waagen 3 Jahre (§ 11, M.G.O.). Die Fristen beginnen erst nach Ablauf der auf dem Stempel angegebenen Jahreszahl. Haben starke Beanspruchung, Vernachlässigung oder Beschädigungen Reparaturen zur Folge, welche sich auf wesentliche Teile erstrecken (also den bei der letzten Eichung vorgelegten Zustand verändern), so müssen die Meßgeräte vorzeitig einer neuen Eichung unterworfen werden.

Die zur Maß- und Gewichtsordnung erforderlichen Ausführungsbestimmungen sind in der Eichordnung² (E.-O.) erlassen. Sie enthalten die Bestimmungen für die Eichfähigkeit, die Grundforderung der im Handelsverkehr benutzten Meßgeräte. Bei Prüfungen außerhalb der Amtsstelle gehört auch dazu die Bereitstellung der entsprechenden Hilfsmittel.

β) Fehlergrenzen. Nach der Eichordnung werden zweierlei Fehlergrenzen unterschieden, die Eichfehlergrenze und die Verkehrsgrenzen.

¹ Mitteilungen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, Abt. I, 13. Reihe, Nr. 2, S. 30. 1931.

² Eichordnung, Fußnote 4, S. 702. Weitere Anweisungen siehe Instruktionen zur Eichordnung, Fußnote 1, S. 702; sowie auch die bildlichen Darstellungen der eichfähigen Gattungen von Meßgeräten, Verlag Deutsches Reichsgesetzbuch, Berlin.

fehlergrenze. Die Eichfehlergrenze muß stets bei Neueichungen eingehalten werden, die Verkehrsfehlergrenze bei Nacheichungen, wenn hier nichts Gegenteiliges bestimmt ist (§ 7 E.-O.). So gilt z. B. auch bei der Nacheichung die Eichfehlergrenze für die Waagen mit einer Höchstlast von 3000 kg oder mehr, für die festfundamentierten Waagen, die Waagen mit Neigungsgewichtseinrichtung (§ 95, 6 E.-O.), für selbsttätige Waagen (§ 105, 4 E.-O.), für Waagen für Reisegepäck und Stückgüter und für Waagen für Postpakete ohne angegebenen Wert (§ 110, 3 E.-O.).

I. Bei Wägeeinrichtungen. Im allgemeinen beträgt die Verkehrsfehlergrenze das Doppelte der Eichfehlergrenze, für Federwaagen und automatische Waagen das 1,5fache.

Nach § 13 der M.G.O. ist ein Meßgerät falsch, wenn sein Fehler bei der Nacheichung die festgesetzte Verkehrsfehlergrenze überschreitet. In den Tabellen 22 und 23 sind für verschiedene Waagenarten und Höchstlasten die zugelassenen Eichfehlergrenzen zusammengestellt¹. Es ist zu beachten, daß die Eichfehlergrenzen nicht immer proportional der Höchstlast gehen. Nach § 95, 2 E.-O. darf für Waagen mit fester Einspiellage der Eichfehler bei $\frac{1}{10}$ der Höchstlast nicht kleiner sein als $\frac{1}{5}$ des bei Höchstlast zulässigen Fehlers. Für eine Brückenwaage von 40000 kg Höchstlast beträgt z. B. der Eichfehler ± 24 kg, der Kleinstwert der Fehlergrenze also $\pm 4,8$ kg, der hier bereits bei 8000 kg Belastung erreicht wird. Von dieser, dem Kleinstwert entsprechenden Last abwärts bleibt somit der Eichfehler konstant.

Bei den Waagen mit Neigungsgewichtseinrichtung sind die Verhältnisse schwieriger, da hier noch die Größe Q_m des Neigungsbereiches eine Rolle spielt. Auch hier beträgt allgemein der Kleinstwert $\frac{1}{5}$ des bei Höchstlast zulässigen Eichfehlers. Ist der Neigungsbereich Q_m kleiner als 2000 kg, so darf aber der Kleinstwert nicht geringer sein als der zu Q_m gehörige Eichfehler laut Tabelle 22. Ist der Neigungsbereich größer als 2000 kg, so darf der Kleinstwert der Fehlergrenze nicht kleiner sein als 1200 g².

Federwaagen haben in ihrem ganzen Bereich den für die Höchstlast zulässigen Eichfehler.

Die im Handelsverkehr zugelassenen selbsttätigen Waagen jeder Gattung bis zu einer Höchstlast von 100 g abwärts müssen laut eichbehördlicher Vorschrift zunächst nach Ausschaltung der selbsttätigen Einrichtungen den für entsprechende Handelswaagen vorgeschriebenen Anforderungen an Empfindlichkeit und Richtigkeit genügen. Alsdann darf bei der betriebsmäßigen Prüfung der Mittelwert aus 10 regelrecht zustande gekommenen Wägungen von dem Sollwert nur um einen für zulässig erachteten Betrag abweichen. Weiter dürfen die Abweichungen

¹ Siehe die bis auf geringe Abänderungen auch heute noch gültige Zusammenstellung von C. DREWITZ: Genauigkeitsforderungen im Eichwesen. Berlin 1925.

² Beispiele siehe Mitteilungen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, Abt. I, 11. Reihe, Nr. 12, S. 208. 1929. — Padel, E.: Waagen, Eigenschaften, Wartung, Instandsetzung. AWF-Mitt. 244, 70. Berlin 1931.

Tabelle 22. Eichfehlergrenzen der Präzisions-, Handels- und Federwaagen bei Höchstlast.

Höchstlast	Präzisionswaagen	Handelswaagen					Federwaagen	
	Gleich-armige Präzisionswaagen	Gleich-armige Waagen, Tafelwaagen	Dezimal- und Zentesimalwaagen	Schaltgewichts- und Laufgewichts- waagen	Waagen mit Neigungs- gewichts- ein- richtung	Römische Schnell- waagen (einfache Lauf- gewichts- Balken- waagen)	für Reise- gepäck und Stück- güter	für Post- pakete ohne Wert- angebe
g	mg	mg	g	g	mg	g	g	
1	1	2						
2	2	4						
5	5	10						
10	10	20						
20	10	40						
30	15	60						
40	20	80						
50	25	100			100			
75	37,5	150			150			
100	50	200			200			
125	50	200			250			
150	50	200			300			
200	50	200			400			
250	62,5	250			500			
300	75	300			600			
400	100	400			800			
					g			
500	125	500			1			
750	187,5	750			1,5			
kg		g						
1	250	1			2			
2	500	2			2			
3	750	3			3			
	g							
4	1	4			4			
5	1	5			5	5		
6	1	5			6	6		
7	1	5			7	7		
8	1	5			8	8		
9	1	5			9	9		
10	1	5	6	10	10	10	10	
12	1,2	6	7,2	12	12	12	12	
15	1,5	7,5	9	12	12	15	15	
20	2	10	12	12	12	20	20	
25	2,5	12,5	15	15	15	25	25	
30	3	15	18	18	18	30	30	
40	4	20	24	24	24	40	40	
50	5	25	30	30	30	50	50	
100	10	50	60	60	60	100	100	
150	15	75	90	90	90	150	150	
200	20	100	120	120	120	200	200	
500	50	250	300	300	300	500	500	
Für jedes weitere kg der Höchstlast	
	0,1	0,5	0,6	0,6	0,6	1,0	1,0	

Verkehrsfehlergrenze das 2fache der Eichfehlergrenze

Verkehrsfehlergrenze das 1,5fache der Eichfehlergrenze

der einzelnen Wägungen von dem ermittelten Durchschnittswert die hierfür festgesetzte Fehlergrenze nicht überschreiten. Die Genauigkeit der selbsttätigen Waagen¹ ist natürlich geringer als die Genauigkeit der von Hand zu bedienenden Waagen. Im allgemeinen beträgt die Eichfehlergrenze der selbsttätigen Balkenwaagen mit Nachstromregler je nach der Art des Wägegutes 0,1—0,15%, die Verkehrsfehlergrenze 0,15—0,225%. Bei den selbsttätigen Laufgewichtswaagen richtet sich die Eichfehlergrenze nach dem Bereich der Laufgewichtseinrichtung; der Fehler des aus 10 Wägungen ermittelten Durchschnittsgewichtes schwankt von 0,1—0,5% bzw. der Verkehrsfehler von 0,15—0,75%, je nach dem Bereich der Laufgewichtseinrichtung. Die zulässige Abweichung der Einzelwägung vom Durchschnittswert darf höchstens das 3fache des für die Normallast festgelegten Eichfehlers betragen. Für die selbsttätigen Balkenwaagen sind diese Fehlergrenzen kleiner, sie sind hier nicht nur von der Größe der Höchstlast, sondern wiederum von der Art des Wägegutes abhängig. Wegen der Eichfehler bei Belastungen der Waagen unterhalb der Höchstlast, sowie der zulässigen Fehler bei geringen Höchstlasten, muß auf die E.-O. und die Instruktion VI (Waagen) verwiesen werden.

In Tabelle 23 sind die Eichfehlergrenzen der selbsttätigen Balkenwaagen bei voller Belastung zusammengestellt.

Die in der E.-O. vorgeschriebenen Höchstsätze der Fehlergrenzen kommen nur für die Waagen im eichpflichtigen Verkehr in Frage, sie bieten aber auch einen Anhaltspunkt dafür, was von den im internen Betrieb benutzten Waagen zu verlangen ist. Auch sei erwähnt, daß die Verschiedenheit der Fehlergrenzen bei den Wägungen von ein und derselben Last auf Waagen verschiedenster Bauart bzw. Wiegefähigkeit zu berücksichtigen ist. Da die eine Waage hoch, die andere tief gehen kann, so sind Differenzen zu erwarten, die gleich der Summe der absoluten Eichfehlergrenzen sind. Bei den im Handelsverkehr benutzten von Hand zu bedienenden Waagen beträgt im allgemeinen die Fehlergrenze $\pm 0,06\%$. Die zu erwartenden Differenzen von zwei derartigen Waagen können somit $\pm 0,12\%$ betragen. Da weiterhin nach der M.G.O. die Waagen noch richtig sind, wenn sie die Verkehrsfehlergrenze von $\pm 0,12\%$ nicht überschreiten, so können im Streitfalle zwischen Verkäufer und Käufer die zwischen zwei Waagen auftretenden größten Differenzen von 0,24% rechtlich nicht beanstandet werden. Daraus geht hervor, daß namentlich bei der Wägung von hochwertigen Produkten nur einwandfreie und der Größe der Last angepaßte Waagen benutzt werden dürfen.

II. Für Gewichte. Für die im Handelsverkehr benutzten Gewichte sind im §§ 74—86 der E.-O. und Instruktion V (Gewichte) besondere Bestimmungen erlassen über Material, Gestalt, Einrichtung,

¹ Siehe Eichordnung, Fußnote 4, S. 702, §§ 101—106. Änderungen der für selbsttätige Balkenwaagen geltenden Bestimmungen und Fehlergrenzen in Mitteilungen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, Abt. I, 13. Reihe, Nr. 2, S. 18. 1931.

Tabelle 23. Eichfehlergrenzen der selbsttätigen Balkenwaagen bei Höchstlast.

Größte zulässige Last g	Waagen mit Nachstromregler				Waagen mit Überschußverwägung für klein- und großstückige Materialien Zulässige Einzelabweichung vom Sollwert g
	Für kleinstückige Materialien sowie den Waagen für Thomasmehl, Kohlenstaub, Zement und ähnliche staubende mineralische Stoffe		Für sonstige Materialien		
	Zulässiger Mittelwert aus 10 Einzelwägungen g	Zulässige Einzelabweichung vom Mittelwert g	Zulässiger Mittelwert aus 10 Einzelwägungen g	Zulässige Einzelabweichung g	
2—20			0,1	0,25	
20—100			0,2	0,5	
100			0,2	0,5	
125			0,25	0,625	
200			0,4	1,0	
250			0,5	1,25	
500			1,0	2,5	
kg					
1			2,0	5,0	
1,5			3	6	
2			4	8	
2,5			4	10	
3			4,5	12	
4			5	12	
5			5	15	
10			10	30	
15			15	30	
20	30	80	20	40	80
25	37,5	100	25	40	100
30	45	120	30	45	120
40	60	160	40	60	160
50	75	200	50	75	200
60	90	240	60	75	240
75	112,5	300	75	75	300
100	150	400	100	100	400
150	225	600	150	150	600
200	300	800	200	200	800
250	375	1000	250	250	1000
300	450	1050	300	300	1050
350	525	1100	350	350	1100
400	600	1150	400	400	1150
450	675	1200	450	450	1200
500	750	1250	500	500	1250
.
Für jedes weitere kg der Höchstlast Q_m	1,5	$\left(1 + \frac{750}{Q_m}\right)$	1	1	$\left(1 + \frac{750}{Q_m}\right)$

Verkehrsfehlergrenze das 1,5fache der Eichfehlergrenze.

Bezeichnung und Fehlergrenzen. Die höchstzulässigen Eichfehlergrenzen für Handels- und Präzisionsgewichte sind in der Tabelle 24 zusammengestellt.

Die mit dem internationalen Prototyp verglichene deutsche Prototype¹ (Nationale Prototype Nr. 22) besitzt eine wahrscheinliche Unsicherheit von $1 \cdot 10^{-9}$ des Gesamtbetrages. Mit diesem Prototyp wird das

Tabelle 24. Eichfehlergrenzen der Gewichte.

Größe	Eichfehlergrenze		Größe	Eichfehlergrenze
	Handels- gewichte	Präzisions- gewichte		
kg	g	g	mg	mg
50	10	2,5		
20	4	2		
10	2,5	1,25		
2	0,6	0,3		
1	0,4	0,2		
g	mg	mg		
500	250	125	500	1
250	125	65		
200	100	50	200	1
125	70	35		
100	60	30	100	1
50	50	25	50	0,5
20	30	15	20	0,5
10	20	10	10	0,5
5	16	6	5	0,25
2	12	3	2	0,2
1	10	2	1	0,1

Die Verkehrsfehlergrenze beträgt das Doppelte der Eichfehlergrenze.

4.), deren Fehlergrenze entsprechend eng gehalten ist, damit die Einhaltung der Fehlergrenze der Gebrauchsnormale gesichert ist.

f) Genauigkeit der Wägeeinrichtungen.

a) **Wägungsmethoden.** Die zur Verwendung kommenden Wägungsmethoden sind verschieden, je nachdem ob es sich um wissenschaftliche, chemische oder technische Wägungen handelt.

Es ist selbstverständlich, daß die Leistungsfähigkeit der in Frage kommenden Waage der geforderten Genauigkeit angepaßt sein muß. Besonders bei den feinen Wägungen zur Ermittlung absoluter Massen ist die Berücksichtigung der Fehler der Gewichte, die Reduktion der scheinbaren auf die wahre Masse² und unter Umständen die Änderung der Schwere mit der Höhe³ erforderlich. Der Luftauftrieb verursacht bei einem Körper mit der Dichte 1 einen Fehler von etwa 0,13%. Das ist ein außerordentlich großer Fehler im Vergleich zu der mit einer

¹ Aufbewahrt von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt Berlin.

² Felgenträger, W.: Fußnote 2, S. 687, 249 und 298. — Kohlrausch, F.: Fußnote 2, S. 702, 49. — Scheel, K.: Fußnote 5, S. 702, 112.

³ Scheel, K.: Fußnote 5, S. 702, 111; daselbst weitere Literatur.

Normal der Eichamtsaufsichtsbehörden verglichen, diese wiederum vergleichen ihr Normal mit dem Kontrollnormal der Eichämter, wobei die zulässige Abweichung nach der „Allgemeinen Instruktion“ 12 g zur E.-O. höchstens $\frac{1}{10}$ der Eichfehlergrenze des entsprechenden Handelsgewichtes betragen darf. Die Eichämter ihrerseits benutzen zu den amtlichen Eichungen Gebrauchsnormale, die höchstens $\frac{4}{10}$ der Eichfehlergrenze (Allgemeine Instruktion 12 g) erreichen dürfen. Die Eichämter prüfen die Richtigkeit ihrer Gebrauchsnormale auf besonderen Eichamtswaagen (Instruktion V,

chemisch-analytischen Waage von 200 g Maximalbelastung durchschnittlich erreichbaren Genauigkeit von $0,5 \cdot 10^{-4}\%$. Auch wo nicht absolute Gewichte, sondern — wie bei chemischen Analysen — Gewichtsverhältnisse zu bestimmen sind, ist sehr oft die Korrektur zur Reduktion der Wägung auf den leeren Raum anzubringen, wenn das Ergebnis Anspruch auf 0,1% Genauigkeit haben soll. Die Korrektur des scheinbaren Gewichtes Q (g) beträgt, wenn γ , s und σ die spezifischen Gewichte des verdrängten Mittels, des Körpers und der Gewichtsstücke in g/cm^3 bedeuten:

$$Q \left(\frac{\gamma}{s} - \frac{\gamma}{\sigma} \right) \text{ g.} \quad (60)$$

Wenn keine besondere Genauigkeit erforderlich ist, wird für Luft mit $\gamma = 0,0012 \text{ g/cm}^3$ im Mittel die Korrektur:

$$0,0012 Q \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{\sigma} \right) \text{ g.} \quad (61)$$

Da das Gewicht eines kg bei der Erhebung um einen m im Mittel um 0,3 mg abnimmt, ist die Korrektur zur Berücksichtigung der Schwereänderung bei a cm Höhendifferenz der Schwerpunkte und Q kg scheinbarem Gewicht:

$$Q \cdot a \cdot 0,003 \text{ mg.} \quad (62)$$

Eine Wägung kann nach verschiedenen Methoden durchgeführt werden. Besonderen Vorzug besitzen diejenigen Methoden, bei welchen die Fehler der zu benutzenden Waage nicht zur Geltung kommen. Durch richtige Auswahl der Wägungsmethode kann daher die Genauigkeit der Wägung gesteigert werden.

Die einfachste, für genauere Bestimmungen aber ungeeignete Methode ist die Proportionalmethode. Es werden normalerweise zwei Teilwägungen ausgeführt, eine mit unbelasteter Waage und eine, bei welcher die zu wägende Last durch entsprechende Belastung der Gewichtseite bis zur Gleichgewichtslage ausgeglichen wird. Diese bei Hebelwaagen benutzbare Wägungsmethode setzt voraus, daß die Konstanten der Waagen sich nicht ändern. Die Methode gestattet nicht die Bestimmung absoluter Massen, sondern nur die Ermittlung von Beträgen, die ihnen proportional sind. Dies ist bei chemischen Analysen der Fall.

Die Substitutionsmethode, Tara- oder Bordasche Methode, ist die einfachste gute Wägungsmethode, sie kann bei allen Waagen Verwendung finden. Die zu bestimmende Last wird genau austariert und hierauf durch Gewichte bis zur Erreichung der Einspiellage ersetzt. Die aufgesetzten Gewichte ergeben die Größe der Last. Das Wägevorgang ist also unabhängig von der Ungleicharmigkeit der Hebelarme. Die Methode wird besonders für hydrostatische Wägungen (zur Volumenbestimmung) benutzt.

Nach der Mendeljewischen Methode erfolgt die Gewichtsbestimmung bei konstanter Belastung oder konstanter Empfindlichkeit. Die benutzte Waage wird mit der zulässigen Höchstlast belastet und durch kleine Gewichte genau austariert. Die zu wägende Last wird dann auf die Gewichtsschale gebracht und durch Fortnahme von Gewichten

wieder Gleichgewicht hergestellt. Die entfernten Gewichtsstücke ergeben das Gewicht der Last.

Die Gaußsche Methode der Doppelwägung liefert die genauesten Ergebnisse, sie wird nur bei gleicharmigen Hebelwaagen angewendet zur Bestimmung des Hebelverhältnisses und zum Vergleich nahezu gleicher Massen. Es sind zwei Teilwägungen auszuführen. Der zu bestimmende Körper wird erst auf die eine, dann auf die andere Waagschale gebracht und in beiden Fällen die zur Herbeiführung der Gleichgewichtslage erforderlichen Gewichte P_1 und P_2 ermittelt. Da es sich hierbei um den Vergleich nahezu gleicher Massen handelt, kann das Gewicht P dem arithmetischen Mittel der beiden Bestimmungen gleichgesetzt werden, also $P = 0,5 (P_1 + P_2)$.

Bei technischen Gewichtsbestimmungen wird im allgemeinen die Proportionalmethode angewendet. Dabei werden Waage wie auch eventuell benutzte Gewichte als richtig vorausgesetzt.

β) Die praktische Genauigkeit. Wenn nachstehend Genauigkeitsgrade verschiedener Wägungseinrichtungen angeführt werden, so ist dabei zu beachten, daß neben dem einwandfreien Zustand der Einrichtungen bei den von Hand zu bedienenden Waagen eine sorgfältige Ausführung der Wägung Voraussetzung ist.

Die genaueste Waage ist die gleicharmige Balkenwaage. Für wissenschaftliche Untersuchungen lassen sich auf den hier benutzten Waagen von besonders hoher Empfindlichkeit und bei Berücksichtigung aller Nebenumstände Gewichtsbestimmungen ausführen mit einer Genauigkeit von $\pm 2 \cdot 10^{-7} \%$ *. Im allgemeinen kann man mit einer Fehlergrenze von $\pm 10^{-5}$ bis $\pm 10^{-6} \%$ rechnen. Diese große Genauigkeit wird für technische Messungen nicht verlangt, hier begnügt man sich mit einer geringeren Genauigkeit, legt dafür aber Wert auf eine große Schnelligkeit der Gewichtsbestimmungen. Die besseren chemischen Analysenwaagen lassen bei mittlerer Tragkraft (50—1000 g) eine Genauigkeit von $\pm 10^{-5} \%$ erreichen. Bei der Industrieschnellwaage¹, einer Waage mit mechanischer Gewichtsaufgabe, bei welcher durch Luftdämpfer die Schwingungsdauer wesentlich verkürzt und die Ablesung durch besondere Hilfseinrichtungen (optische Hilfsmittel) verfeinert ist, lassen Gewichte bestimmen mit einer Genauigkeit bis auf $\pm 5 \cdot 10^{-5} \%$. Selbst bei gleicharmigen Balkenwaagen größerer Tragkraft, wie sie zur Wägung hochwertiger Stoffe oder zur Eichung von Normalgewichten benutzt werden, lassen sich unschwer Genauigkeiten erreichen von $\pm 10^{-3} \%$ ². Für einen Teil der übrigen Waagenarten kann der vom Eichgesetz für Handelswaagen zugelassene Fehler (Verkehrsfelder) als größter Fehler angesehen werden. Bei einwandfreiem Zustand der

* Mit dieser großen Genauigkeit ist das deutsche kg-Prototyp an das internationale Prototyp angeschlossen. Beschreibung der benutzten Waage siehe K. Scheel: Grundlagen der praktischen Metronomie, S. 88. Braunschweig 1911.

¹ Sartoriuswerke A.G., Göttingen.

² Nach der Instruktion zur Eichordnung, Berlin 1911, muß die zur Prüfung der Gebrauchsnormalen bestimmte Eichamtswaage Nr. 1 bei 50 kg Belastung für 1 g Zulage einen deutlichen Ausschlag zeigen.

Waagen und besonders bei Verwendung geeigneter Wägungsmethoden ist natürlich eine größere Genauigkeit zu erreichen.

Für Hebelwaagen mit einer Einspiellage und mittlerer Tragkraft (Dezimal-, Zentesimal-, Schalt- und Laufgewichtswaagen) kann die Genauigkeit bis herab zu $\frac{1}{5}$ der Höchstlast angegeben werden zu $\pm 0,12\%$. Bei geringerer Belastung wird der prozentuale Fehler größer.

In der Abb. 109 sind für einige im Handelsverkehr zugelassene Waagenarten die Eich- und Verkehrsfehlergrenzen in % der jeweiligen Belastung graphisch dargestellt. Die größere Genauigkeit der Waagen mit einer Einspiellage tritt deutlich hervor. Bei reinen Neigungswaagen mit einem Neigungsbereich kleiner als 2000 kg wird der prozentuale Fehler ständig größer (Kurve 1), für die Höchstlast beträgt er $\pm 0,12\%$. Diesen Fehler haben auch die Waagen mit Neigungsgewichtseinrichtung (Höchstlast < 2000 kg),

und zwar bis zu ihrem Neigungsbereich, um von hier an mit fallender Belastung wieder zuzunehmen (Kurve 2). Ist der Neigungsbereich kleiner oder gleich $\frac{2}{10}$ der Höchstlast, so beträgt der Fehler von der Höchstlast bis zu diesem Neigungsbereich 0,2 Q_m konstant 0,12%, wie bei den Waagen mit einer Einspiellage (Kurve 3). Für Waagen mit Neigungsgewichtseinrichtung, deren Neigungsbereich größer als 2000 kg ist, beträgt die Genauigkeit bis zu dem konstanten Kleinstwert von 1200 g $\pm 0,12\%$.

Für Federwaagen, die allerdings in der Technik nur vereinzelt Verwendung finden, beträgt die Genauigkeit $\pm 0,15$ bis $\pm 0,3\%$.

Der Genauigkeitsgrad selbsttätiger Balkenwaagen läßt sich nur sehr schwer angeben, denn bei diesen Waagen ist der Fehler abhängig von der physikalischen Beschaffenheit des Wägegutes und auch im gewissen Grade von der Leistung der Waage. Für die im Handelsverkehr zugelassenen selbsttätigen Balkenwaagen ist für die Summe von 10 regelrecht zustande gekommenen Wägungen ein Verkehrsfehler zugelassen, welcher bei rieseligen, nicht staubenden Materialien $\pm 0,15\%$, bei kleinstückigen und staubenden Stoffen $\pm 0,225\%$ betragen darf. Entsprechend der Beschaffenheit der Materialien ist auch die Anforderung an die Genauigkeit der Einzelwägung verschieden. Die Abweichung vom Durchschnittsergebnis darf bei den erstgenannten Materialien nicht mehr als $\pm 0,15\%$ (bis zu einem Füllgewicht von 75 kg abwärts) betragen, bei den übrigen Stoffen und einem Füllgewicht Q_m bis

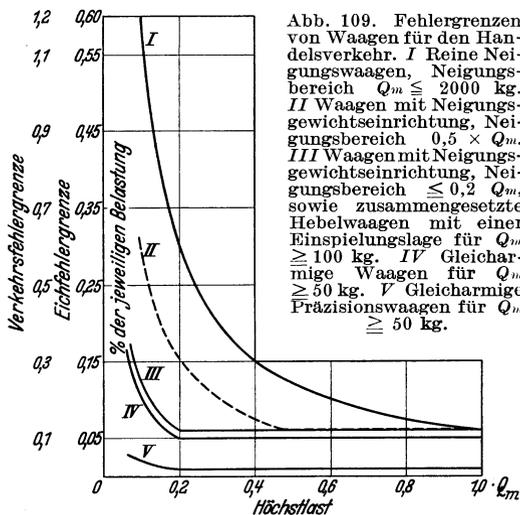


Abb. 109. Fehlergrenzen von Waagen für den Handelsverkehr. I Reine Neigungswaagen, Neigungsbereich $Q_m \leq 2000$ kg. II Waagen mit Neigungsgewichtseinrichtung, Neigungsbereich $0,5 \times Q_m$. III Waagen mit Neigungsgewichtseinrichtung, Neigungsbereich $\leq 0,2 Q_m$, sowie zusammengesetzte Hebelwaagen mit einer Einspiellage für $Q_m \geq 100$ kg. IV Gleicharmige Waagen für $Q_m \geq 50$ kg. V Gleicharmige Präzisionswaagen für $Q_m \geq 50$ kg.

250 kg \pm 0,6%, über 300 kg \pm 0,15 (1 + 750/ Q_m)%. Diese Genauigkeit wird aber bei den im internen Betrieb benutzten Waagen nicht immer erreicht, störende Faktoren wie das Anbacken von Material, Verstaubung des Hebelsystems, unregelmäßige Zuführung des Wägegutes usw. lassen sich im praktischen Betrieb nicht vermeiden. Hier wird man im allgemeinen mit einer mittleren Genauigkeit von \pm 0,7% bei guter Wartung der Wägeeinrichtungen zu rechnen haben.

Bei den Waagen mit selbsttätiger Abgleichung auf der Gewichtseite, den automatischen Laufgewichtswaagen, ist die Genauigkeit abhängig von dem Verhältnis: Bereich der selbsttätigen Laufgewichtseinrichtung/größte zulässige Last. Für das Mittel aus 10 Wägungen kann eine Genauigkeit angegeben werden von \pm 0,15% bis \pm 0,75%, für die Abweichung vom Durchschnittsgewicht \pm 0,45% bis \pm 2,25%.

Für Förderbandwaagen wird bei normalem Einbau in horizontale Anlagen eine Genauigkeit von \pm 1% garantiert, bei Einbau in schrägliegende Förderbänder (bis 20°) wird die gleiche Genauigkeit erreicht¹.

Das Ladegewicht von Schiffen läßt sich nach der Auftriebsmethode ermitteln mit einer Genauigkeit von \pm 1%*.

C. Mengenummessung von Flüssigkeiten, Gasen und Dämpfen².

1. Allgemeine Betrachtungen zur Mengenummessung von Flüssigkeiten.

a) Die Einheiten bei technischen Mengenummessungen.

Unter Flüssigkeiten werden im folgenden tropfbare wie auch gasförmige (dampfförmige) Stoffe verstanden.

Flüssigkeitsmengen werden entweder dem Raume oder dem Gewicht nach angegeben. Als Einheiten gelten dabei gemäß dem metrischen System das Kubikmeter (m³)** oder das Kilogramm (kg)***, gelegentlich auch die daraus abgeleiteten, im einfachen Zahlenverhältnis stehenden Einheiten. Bei den Flüssigkeiten ist aber mit der Raumeinheit (m³) unbedingt der Zustand anzugeben, damit die Stoffmenge genau bestimmt ist. In diesem Falle ist daher neben der Stoffart die Angabe von Druck (p) und Temperatur (t) erforderlich.

Als Einheit des Druckes gilt in der Technik der Druck³ (p) von

¹ Firma C. Schenck, Darmstadt.

* Nach § 12 der Eichordnung für Rheinschiffe, siehe Taschenkalender für die Rheinschiffahrt, S. 310. Mainz 1931.

² Bearbeitet von Dr. phil. C. Hilburg VDI, Ludwigshafen a. Rh.

** Das Urmaß der zugrunde liegenden Längeneinheiten ist das „mètre des archives“, das 1889 ersetzt wurde durch ein genau übereinstimmendes, biegungsfreies Strichmeter aus Platiniridium. Näheres siehe K. Scheel: Grundlagen der praktischen Metronomie, S. 5. Braunschweig 1911. — Geiger, H. u. K. Scheel: Handbuch der Physik, Bd. 2, S. 42. Berlin 1926.

*** Siehe S. 684.

³ Der Druck in kg/cm² wird mit p bezeichnet, der Druck kg/m² zur besondern Kennzeichnung mit P . Bei Druckverhältnissen kommt es auf die gewählte Druckeinheit nicht an.

1,000 kg auf 1 cm² (1 at = 1 kg/cm² = 10000 kg/m² = 735,5 mm QS bei 0° C). Im Gegensatz hierzu steht die physikalische Atmosphäre, für welche der Druck von 1,0332 kg auf 1 cm² festgelegt wurde (1 Atm = 1,0332 kg/cm² = 760 mm QS bei 0° C und $g = 980,665 \text{ cm/s}^2$).

Als Einheit der Temperatur gilt ein Grad der thermodynamischen Temperaturskala, nämlich der Temperaturbereich, bei dem sich ein eingeschlossenes ideales Gas um 1/273 seines Anfangsdruckes bei 0° erhöht. Die thermodynamische Temperaturskala ist der Celsiuskala, in welcher die Temperatur t gemessen wird, praktisch gleich [Näheres über das gesetzliche Maß der Temperatur s. M. Jakob: Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 68, 1176 (1924)]. Der absolute Nullpunkt liegt 273° unter dem Nullpunkt der Celsiuskala¹, die absolute Temperatur T wird daher $T = 273 + t$.

Zur einheitlichen Kennzeichnung der Mengeneinheit gegenüber der Raumeinheit (m³) wird die Reduktion auf einen Normalzustand [s. Hütte: Des Ingenieurs Taschenbuch, Bd. 1, S. 471. Berlin 1925] (nm³) durchgeführt. Als Normaldruck (p_n) wird 1 at (735,5 mm QS) oder auch 1 Atm (760 mm QS) benutzt, als Normaltemperatur t_n (T_n) sind in der Technik neben 20° C (293° K) auch noch 0° C (273°) und 15° C (288° K) gebräuchlich². Die Reduktion der Gasvolumina erfolgt stets auf den trockenen Zustand.

b) Allgemeine Eigenschaften der Flüssigkeiten.

Durch spezifisches Volumen v , Temperatur t und Druck p ist der Zustand eines Stoffes bestimmt. Die Beziehung dieser Zustandsgrößen ist durch seine Zustandsgleichung gegeben. Mit Hilfe dieser Gleichung wird das für die Mengenmessung wichtige Verhalten der Stoffe gegenüber Änderungen von Druck und Temperatur ermittelt.

Für tropfbare Flüssigkeiten geht die Einwirkung von Druck und Temperatur hervor aus der allgemeinen Formel

$$V = V_0 (1 - \beta' p) (1 + \alpha' t). \quad (63)$$

Der Koeffizient des Druckes (β') und der Temperatur (α') für die verschiedenen Flüssigkeiten muß bekannt sein, wenn eine Umrechnung durchführbar sein soll. Der Kompressibilitätsfaktor β' ist vom Zustand der Flüssigkeit abhängig; er nimmt mit wachsendem Druck ab, mit wachsender Temperatur im allgemeinen stark zu. Sein Zahlenwert ist abhängig von der gewählten Druckeinheit, er kann den Tabellenwerken entnommen werden. Da er jedoch gering ist (für Wasser von 20° und 1000 at ist z. B. der Kompressibilitätsfaktor $\beta' = 10^{-6} \cdot 38,6$), erlangt er erst bei hohen Drücken eine Bedeutung für die Mengenmessung.

Wichtiger ist der Einfluß der Temperatur auf das Flüssigkeitsvolumen. Von Bedeutung ist nur der kubische Ausdehnungskoeffizient α' . Der Zahlenwert von α' für tropfbare Flüssigkeiten ist ebenfalls

¹ Als wahrscheinlichster Wert der absoluten Temperatur des Eispunktes gilt $T_0 = 273,20^\circ \pm 0,03$. Siehe H. Geiger u. K. Scheel: Handbuch der Physik, Bd. 2, S. 496. Berlin 1926. — Plank, R.: Forsch. Ing.-Wes. 4, 262 (1933).

² ° K = Grad Kelvin.

nicht konstant, er wächst im allgemeinen mit steigender Temperatur an. Werte für α' bei bestimmter Temperatur oder für gewisse Temperaturbereiche sind in den bekannten Tabellenwerken zusammengestellt.

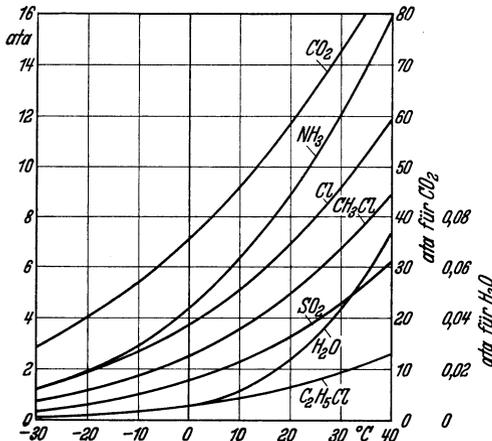


Abb. 110. Dampfdruckkurven verschiedener Flüssigkeiten.

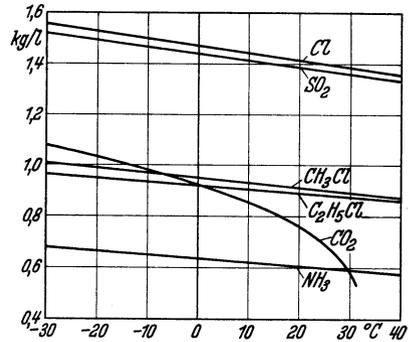


Abb. 111. Spezifisches Gewicht γ (kg/l) von Flüssigkeiten beim Sättigungsdruck.

Flüssigkeiten verdunsten, d. h. an der freien Oberfläche geht ständig der flüssige Zustand in den gasförmigen über. Geht dieser Übergang auch im Innern der Flüssigkeit vor sich, so findet Sieden oder Verdampfen statt. Diese Verdampfung ist an eine vom Druck abhängige bestimmte Temperatur, die Siedetemperatur, gebunden. Da verschiedene Meßverfahren homogene Beschaffenheit des zu messenden Stoffes voraussetzen, ist die Beachtung einer eventuellen Dampfentwicklung geboten. Die Abb. 110 gibt die Dampfdruckkurven einiger Flüssigkeiten, die Abb. 111 die spezifischen Gewichte von Flüssigkeiten beim Sättigungsdruck wieder¹.

Tabelle 25. Spezifisches Gewicht von tropfbaren Flüssigkeiten. (γ_n in kg/l bei 20° C.)

Substanz	kg/l	Substanz	kg/l
Amylalkohol (Gärungs-)	0,812	Olivenöl	0,898
Äthylalkohol (Gärungs-)	0,789	Petroleum	~ 0,847
Äthyläther	0,714	Quecksilber	13,546
Äthylbromid	2,172	Schwefelkohlenstoff	1,263
Benzol	0,879	Terpentinöl	0,87
Essigsäure	1,049	Tetrachlorkohlenstoff	1,594
Glycerin	1,260	Toluol	0,866
Methylalkohol.	0,792	Wasser	0,998
Nitrobenzol.	1,203	Xylol O	0,863

In Tabelle 25 sind die spezifischen Gewichte von verschiedenen tropfbaren Flüssigkeiten bei Atmosphärendruck von 20° C [nach Landolt-

¹ Werte nach Berl-Lunge: Taschenbuch für die anorganisch-chemische Großindustrie, S. 268. Berlin 1930. — Hütte, 25. Aufl., Bd. I, S. 490. Berlin 1925. — Regeln für Leistungsversuche an Kältemaschinen und Kühlanlagen. Berlin 1929.

Börnstein, Roth-Scheel: Physikalisch-chemische Tabellen] zusammengestellt.

Die Umrechnung auf den Normalzustand läßt sich ganz allgemein einfacher durchführen, wenn das in sehr vielen Fällen bekannte spezifische Gewicht γ (kg/m³) oder das spezifische Volumen v (m³/kg) zur Umrechnung benutzt wird. Der Zusammenhang von Gewicht G und Volumen V ist gegeben durch die allgemeine Beziehung:

$$G = V\gamma = V_n \gamma_n = V \frac{1}{v} = V_n \frac{1}{v_n} \text{ kg.} \quad (64)$$

Für das Volumen V_n wird damit

$$V_n = V \frac{\gamma}{\gamma_n} = V \frac{v_n}{v} \text{ nm}^3. \quad (65)$$

Für Gase ist die Beziehung p , v und t gegeben durch die Zustandsgleichung

$$p v = p_n v_n (1 + \alpha t) = p_n v_n \frac{T}{T_n}, \quad (66)$$

wobei α den für alle Gase gleichen Ausdehnungskoeffizienten ($\alpha = \frac{1}{273}$) bedeutet. Diese Beziehung gilt aber streng nur für ideale Gase. Die

wirklichen Gase befolgen weder das Gesetz von Boyle, noch das von Gay-Lussac; sie werden teils stärker, teils schwächer komprimiert als nach diesen idealen Gesetzen zu erwarten ist. Ihre Abweichungen sind um so kleiner, je weiter ihr Zustand von dem Kondensationspunkt entfernt ist, je kleiner also ihr spezifisches Gewicht ist. Die durch $p v/p_n v_n = k$ gegebene Kompressibilität der Gase wurde wiederholt bestimmt¹, ihr Verlauf wird besonders augenscheinlich, wenn das Produkt ($p v$) in Abhängigkeit von p graphisch dargestellt wird (Abb. 112).

Auf Grund der experimentell ermittelten Kompressibilitätswerte k kann das spezifische Gewicht $\gamma =$

$$\gamma_n \frac{p}{p_n} \frac{1}{(p \cdot v)}$$

bzw. das spezifische Volumen $v = 1/\gamma$ errechnet und tabellarisch oder graphisch dargestellt werden. Einfachere Darstellungen ergeben sich, wenn die Abweichungen

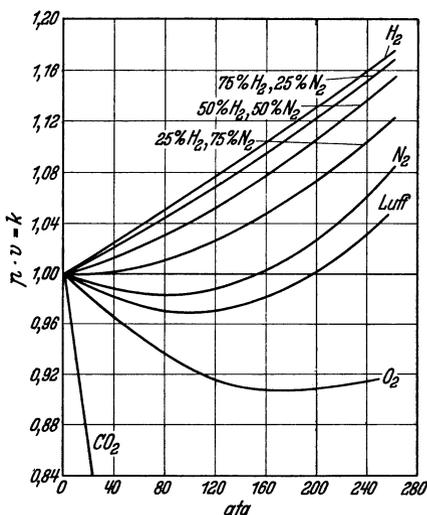


Abb. 112. Die Kompressibilität von Gasen und Gasmischen. Werte von $(p v)$ bei 0°, wenn $p v = 1$ bei 0° C und 1 ata.

¹ Literaturangabe siehe z. B. O. D. Chwolson: Lehrbuch der Physik, Bd. I, 2, S. 35. Braunschweig 1918. — Der Chemie-Ingenieur, Bd. II/2, S. 19. Leipzig 1933. Landolt-Börnstein, Roth-Scheel: Physikalisch-chemische Tabellen. — Intern. Crit. Tables, Bd. 3. London 1928.

von dem idealen Gasgesetz durch eine Berichtigungszahl K berücksichtigt werden, wenn also gesetzt wird

$$p v = p_n v_n \frac{T}{T_n} K, \tag{67}$$

wobei jetzt

$$K = \frac{p v}{p_n v_n} \frac{T_n}{T} = k \frac{T_n}{T} = \frac{\gamma_{ideal}}{\gamma_{real}}. \tag{68}$$

K ist nichts anderes als das Verhältnis des nach dem idealen Gasgesetz für p, t errechneten spezifischen Gewichtes (γ_{ideal}) zu dem bei gleichem Zustand vorhandenen wahren spezifischen Gewicht (γ_{real}). Da die Abweichung vom Gasgesetz für die gesamte Hochdrucktechnik von allgemeiner Wichtigkeit ist, sind in der Abb. 113¹ Werte von K für verschiedene Gase wiedergegeben.

Tabelle 26. Spezifisches Gewicht von Gasen.
(γ_n in kg/m^3 bezogen auf 20°C und $1 \text{ ata} = 735,5 \text{ mm QS}$.)

Gas	γ_n (kg/m^3)	Gas	γ_n (kg/m^3)
Acetylen . . .	1,0594	Methan	0,6463
Ammoniak . . .	0,6950	Neon	0,8117
Argon	1,6064	Sauerstoff	1,2886
Chlor	2,9009	Schwefeldioxyd . .	2,6390
Helium	0,1610	Schwefelwasserstoff	1,3879
Kohlendioxyd .	1,7825	Stickoxyd	1,2085
Kohlenoxyd . .	1,1273	Stickstoff (rein) . .	1,1278
Krypton	3,3435	Stickstoff (Luft-) . .	1,1330
Luft	1,1657	Wasserstoff	0,0810

Wichtigkeit ist, sind in der Abb. 113¹ Werte von K für verschiedene Gase wiedergegeben.

Für einige Gase sind in der Tabelle 26 die spezifischen Gewichte γ_n bezogen auf 20°C und

1 ata ($735,5 \text{ mm QS}$) zusammengestellt, die Umrechnung auf einen anderen Bezugszustand kann mit den Faktoren f der Tabelle 27 ausgeführt werden.

Tabelle 27. Umrechnungsfaktor f für verschiedene Bezugseinheiten.

γ_n bzw. V_n bezogen auf		$\gamma_{t,p} = f \cdot \gamma_n; V_{t,p} = V_n/f$		
		f		
t^0	$p \text{ ata}$	$t = 0^\circ \text{C}$ $p = 1,033 \text{ ata}$	$t = 15^\circ \text{C}$ $p = 1,0 \text{ ata}$	$t = 20^\circ \text{C}$ $p = 1,0 \text{ ata}$
0	1,033	1,0	0,9174	0,9017
15	1,00	1,09	1,0	0,9829
20	1,00	1,109	1,0173	1,0

Überhitzte Dämpfe verhalten sich wie Gase.

Trocken gesättigte Dämpfe dagegen zeigen eine besonders starke Abweichung von den Eigenschaften idealer Gase. Bei ihnen wird der Druck wie auch das Volumen allein durch die Temperatur bestimmt. Die Gesetzmäßigkeiten sind für verschiedene Dämpfe verschieden. Die in der Meßtechnik oft gebrauchten Werte von v bzw. γ werden daher zweckmäßig den bekannten Tabellen oder Zustandsdiagrammen

¹ Nach den verschiedenen Veröffentlichungen ausgeglichene Werte nach H. Speyerer, G. Sauer, K. Schwab und A. Nitsche: Betriebskontrolle Oppau der I. G. Farbenindustrie A.G.

entnommen¹. Einige in der Technik oft benötigte spezifische Gewichte bei Sattedampfdruck gibt Abb. 114 wieder.

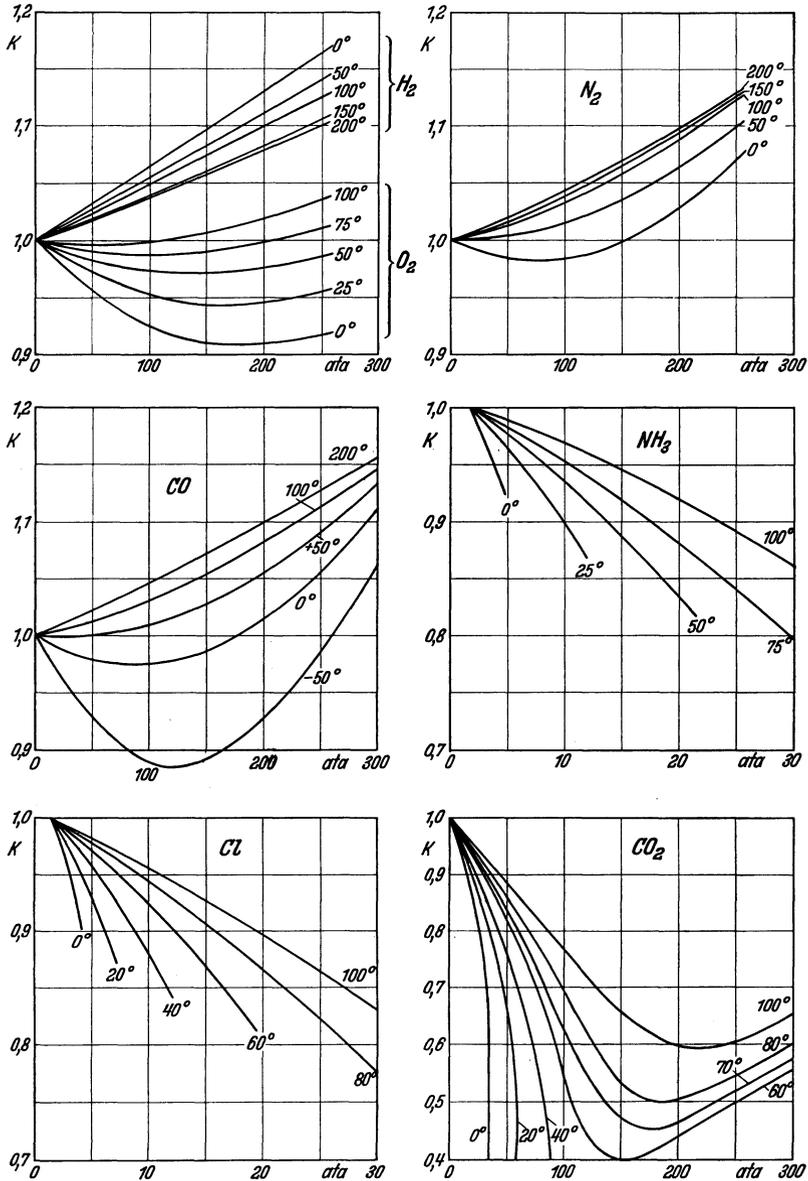


Abb. 113. K-Werte für Gase zur Berücksichtigung der Abweichung vom idealen Gasgesetz.

¹ Mollier, R.: Neue Tabellen und Diagramme für Wasserdampf. Berlin 1932. — Knoblauch, Osc., E. Raisch u. H. Hausen: Tabellen und Diagramme für Berl. Chem. Ingenieur-Technik. I.

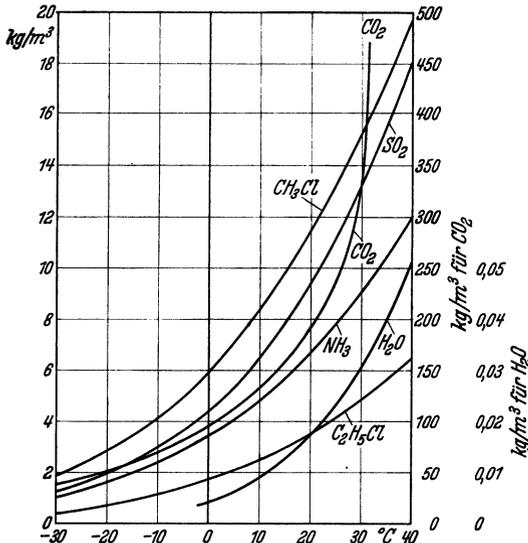


Abb. 114. Spezifisches Gewicht γ (kg/m^3) gesättigter Dämpfe.

Für den technisch wichtigen Wasserdampf ist die Abhängigkeit des spezifischen Volumens v (m^3/kg) von Druck und Temperatur aus der Abb. 115 zu ersehen (nach H. Speyerer u. G. Sauer: s. Fußnote).

In der Technik hat man es im allgemeinen weniger mit reinen Flüssigkeiten, sondern weit häufiger mit Gemischen oder Lösungen zu tun. Auch bei diesen kommt dem Druck und der Temperatur neben der üblichen Einwirkung auf das spezifische Volumen eine besondere Bedeutung zu. Eine Zustandsänderung kann die für verschiedene Meßmethoden

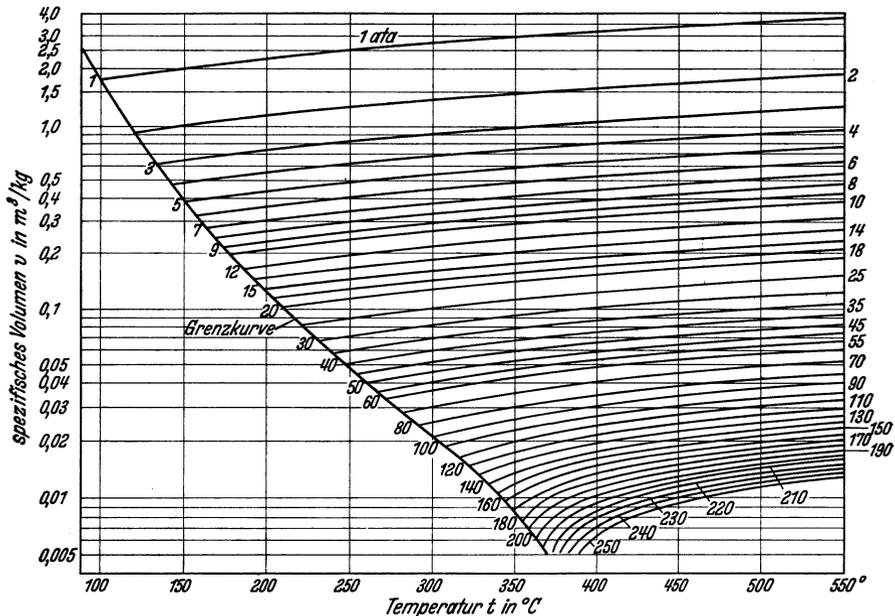


Abb. 115. Isobaren des Wasserdampfes im v, t -Diagramm.

Wasserdampf, berechnet aus der spezifischen Wärme. München u. Berlin 1932. — Speyerer, H. u. G. Sauer: Vollständige Zahlentafel und Diagramme für das spezifische Volumen des Wasserdampfes bei Drücken zwischen 1 und 270 ata. Berlin 1930. — Mehlig, H.: Wärmediagramme für Benzol (C_6H_6). Ztschr. techn. Physik 14, 86 (1933) usw.

erforderliche Homogenität der Flüssigkeiten in Frage stellen. Es sei daran erinnert, daß bei Mischungen von tropfbaren Flüssigkeiten die Kompressibilität wie auch das spezifische Gewicht nicht immer nach der Mischungsregel berechnet werden kann, und daß die gegenseitige Löslichkeit von der Temperatur (kritische Lösungstemperatur) abhängig ist. Ebenso ist zu beachten, daß bei Lösungen von festen Körpern oder von Gasen in Flüssigkeiten durch Änderung von Druck oder Temperatur Ausscheidungen und damit unerwünschte Störungen der Mengenmessung herbeigeführt werden können, falls die Messungen an den Löslichkeits- oder Sättigungsgrenzen durchgeführt werden müssen. Von dem für Lösungen von Gasen in Flüssigkeiten gültigen Henryschen Gesetz treten bei

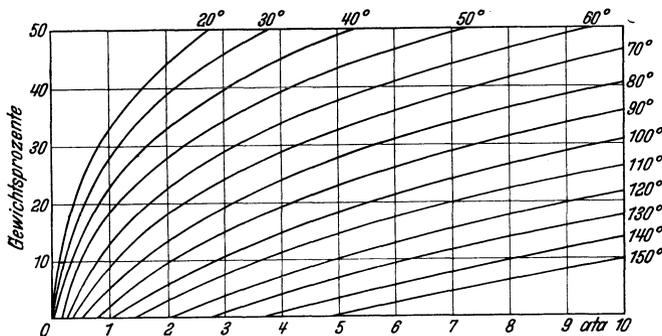


Abb. 116. Dampfdruck wäßriger Ammoniaklösungen.

hohem Druck und gut löslichen Gasen Abweichungen auf, wie dies aus der Abb. 116 [s. H. Mollier: Forsch.-Arb. Ing.-Wes. 63/64. Berlin 1909] zu ersehen ist.

Einfacher sind die Verhältnisse, wenn Mischungen von Gasen oder Mischungen von Gasen mit überhitzten Dämpfen vorliegen.

Gase lassen sich, wenn keine Reaktionen eintreten, in jeder beliebigen Menge mischen; die gegenseitige Durchdringung (Diffusion) kommt erst dann zum Stillstand, wenn die Gleichartigkeit der Mischung erreicht ist. Für Gasmischungen gelten die Gasgesetze der reinen Gase.

Der Druck des homogenen Gasgemisches (p) ist nach dem Gesetz von Dalton gleich der Summe der Partialdrücke, also $p = p_1 + p_2 + \dots$. Bei einem Gemisch aus Gas und Dampf mit dem Gesamtdruck p und den Teildrücken p_G und p_D wird somit der Druck des trockenen Gases $p_G = p - p_D$ und das bei gleicher Temperatur auf Trockenheit reduzierte Gasvolumen

$$V'_{p,T} = V_{p,T} \cdot \frac{p - p_D}{p}. \quad (69)$$

Bei Einführung der relativen Feuchtigkeit¹ φ und des Sattedampfdruckes p_s ($p_D = \varphi \cdot p_s$) wird dann die Reduktion der Volumina auf den Normalzustand ausgeführt nach der Beziehung

$$V_n = V_{p,T} \frac{p - \varphi \cdot p_s}{p_n} \frac{T_n}{T}. \quad (70)$$

¹ Registrierung der Feuchtigkeit siehe S. 660.

Das Daltonsche Gesetz gilt aber ebenso wie die Gasgesetze nur angenähert. Für hohe Drücke kommen andere Gesetzmäßigkeiten in Frage, welche für verschiedene Mischungen verschieden sind. Da sich die Kompressibilität der Gasmischungen nicht aus den Kompressibilitäten der einzelnen Komponenten errechnen läßt, ist bei den Werten von γ und v entweder auf die verschiedenen experimentellen Untersuchungen zurückzugreifen, oder aber eine besondere Bestimmung auszuführen¹.

In Abb. 117 sind für einige Gasgemische die Kompressibilitätswerte ($p v$) aufgenommen. Abb. 117 stellt die aus Versuchsergebnissen errechneten Korrekturfaktoren $K = \gamma_{\text{ideal}}/\gamma_{\text{real}}$ graphisch dar².

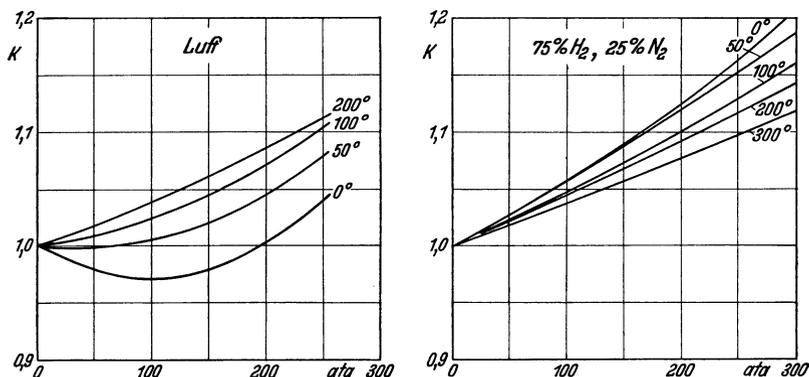


Abb. 117. K -Werte zur Berücksichtigung der Abweichung von dem idealen Gasgesetz bei Gasgemischen.

Das spezifische Gewicht γ einer dem idealen Gasgesetz folgenden Gasmischung wird aus ihrer durch Analysen ermittelten Zusammensetzung errechnet. Wenn v_1, v_2, \dots die Raumanteile von 1 m³ Gemisch und $\gamma_1, \gamma_2, \dots$ die zugehörigen spezifischen Gewichte bedeuten, wird

$$\gamma = v_1 \gamma_1 + v_2 \gamma_2 + \dots$$

oder auch, da bei gleichem Zustand die Molekulargewichte den spezifischen Gewichten proportional sind, mit m als mittleres oder scheinbares Molekulargewicht der Gasmischung ($m = v_1 m_1 + v_2 m_2 + \dots$)

$$\gamma_{0/760} = \frac{m}{22,41}, \gamma_{15/735,5} = \frac{m}{24,42}, \gamma_{20/735,5} = \frac{m}{24,85}.$$

Mischungen von Gasen mit Dämpfen sind entweder gesättigt oder ungesättigt, d. h. sie enthalten in der Volumeneinheit bei der vorliegenden Temperatur entweder dem Gewichte nach soviel Dampf, als den Dampftabellen entspricht (γ_s) oder nur einen bestimmten Teil desselben (γ_D). Ist die relative Feuchtigkeit oder der Dampfdruck φ bekannt³, dann ist mit

$$\gamma_D = \varphi \cdot \gamma_s \text{ kg/m}^3 \quad (71)$$

¹ Methoden zur Ermittlung von γ oder v siehe S. 653f.

² Siehe Fußnote 1, S. 720.

³ Über die Bestimmung des Wasserdampfgehaltes siehe z. B. R. Mollier: Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 67, 869 (1923).

das spezifische Gewicht des feuchten Gases

$$\gamma_{p,T} = \gamma_n \frac{p - p_D}{p_n} \frac{T_n}{T} + \varphi \cdot \gamma_s \text{ kg/m}^3. \quad (72)$$

Für den Fall der Sättigung wird $\varphi = 1$.

Das spezifische Dampfgewicht γ_s ist den Dampftabellen zu entnehmen oder auch unter Annahme des idealen Gasgesetzes mit Annäherung zu berechnen nach der Beziehung

$$\gamma_s = \frac{P_s}{T_s R} \text{ kg/m}^3, \quad (73)$$

wobei hier P_s der Sattedampfdruck in kg/m^2 und $R = 848/\text{m}$ die Konstante des gasförmigen Dampfes (z. B. für Wasserdampf $R = 47,1$) bedeutet. Das mit Hilfe der Näherungsformel (73) errechnete spezifische Gewicht γ_s von Wasserdampf ist bei 100°C und $1,033 \text{ ata}$ etwa $1,5\%$ kleiner als der durch Versuche ermittelte Wert. Da bei Mischungen der Teildruck des Dampfes aber meistens gering ist, kann der Dampf mit genügender Genauigkeit als eine gasförmige Beimengung angesehen und als solche dem idealen Gasgesetz folgend betrachtet werden. Für diesen Fall wird dann das spezifische Gewicht des Gasdampfgemisches

$$\gamma_{p,T} = \left(\gamma_n \frac{p - p_D}{p_n} + \gamma_{nD} \frac{p_D}{p_n} \right) \frac{T_n}{T} \text{ kg/m}^3, \quad (74)$$

wenn hier mit γ_{nD} das auf den Normalzustand bezogene spezifische Dampfgewicht bezeichnet wird.

Für Wasserdampf z. B. ist bei 20°C ($p_s = 0,0238 \text{ kg/cm}^2$) $\gamma_s = 0,01729 \text{ kg/m}^3$. Für den Normalzustand von 20°C und 1 kg/cm^2 ergibt sich dann der Wert $\gamma_{nD} = 0,7265 \text{ kg/m}^3$ [nach Gleichung (73) wird $\gamma_{nD} = 0,7241 \text{ kg/m}^3$].

Es ist zu beachten, daß bei verdünnten Lösungen nicht flüchtiger Stoffe der Dampfdruck p_D' der Lösung kleiner ist als der Druck p_D des reinen Lösungsmittels und daß die Berechnung dieser Dampfdruckerniedrigung nach dem Raoult'schen Gesetz für die meisten technischen Lösungen nur mit gewisser Annäherung möglich ist¹. Nach dem Raoult'schen Gesetz (s. Bd. III, S. 341) ergibt sich die relative Dampfdruckerniedrigung aus:

$$\frac{p_D - p_D'}{p_D} = \frac{n}{n + N}, \quad (75)$$

wobei n und N die Anzahl der Moleküle des gelösten Stoffes und des Lösungsmittels sind.

¹ Über Dampfdrücke wäßriger Ammoniaklösungen siehe z. B. H. Mollier: Forsch.-Arb. Ing.-Wes. 63/64 (1909). — Merkel, Fr. u. Fr. Bošnyaković: Diagramme und Tabellen zur Berechnung der Absorptionskältemaschinen. Berlin 1929. — Clifford, J., L. u. E. Hunter: The system ammonia-water at temperatures up to 150°C and at pressures up to twenty atmospheres. Journ. physical Chem. 37, 101 (1933).

c) Charakteristische Kenngrößen für dynamische Mengenmessungen.

a) **Zähigkeiten.** Die zwischen den einzelnen Teilchen realer Flüssigkeiten wirkenden Zusammenhängekräfte setzen der gegenseitigen Verschiebung einen Widerstand entgegen. Wenn sich zwei einander berührende ebene Flüssigkeitsschichten parallel zu ihrer Berührungsfläche bewegen, so ist nach dem Newtonschen Grundgesetz die auftretende Schubspannung

$$\tau = \eta \frac{dw}{dr} \cdot F. \quad (76)$$

Die Schubkraft ist umgekehrt proportional dem Abstand dr der beiden Schichten und proportional der Berührungsfläche F , der Geschwindigkeitsdifferenz dw und dem Proportionalitätsfaktor η . Dieser Faktor η ist eine Materialkonstante und wird der Koeffizient der inneren Reibung oder kurz Zähigkeit genannt.

Die Einheit der Zähigkeit besitzt diejenige Flüssigkeit, bei welcher zwei um die Einheit voneinander entfernte Flüssigkeitsschichten der Flächeneinheit durch die Einheit der Kraft mit einer gleichförmigen Geschwindigkeitsdifferenz von 1 bewegt werden. Im absoluten Maßsystem wird die Einheit der Zähigkeit nach Poiseuille mit Poise ($\text{cm}^{-1} \text{g}_{\text{Masse}} \text{s}^{-1}$) bezeichnet. Da diese Einheit zuweilen unbequem ist, wird η auch in Zentipoise angegeben. So z. B. hat η für Wasser von 20°C und normalem Druck den Wert von $0,01 \text{ Poise} = 1,0 \text{ Zentipoise}$. Für das technische Maßsystem ist η_{abs} umzurechnen, es wird $\eta_{\text{techn}} = \eta_{\text{abs}}/98,1 = 1,0197 \cdot 10^{-2} \eta_{\text{abs}}$ in der Dimension $\text{m}^{-2} \text{kg}_{\text{Gew.s}}$. Neben diesen Maßeinheiten sind noch willkürliche Einheiten gebräuchlich. So für das deutsche Sprachgebiet „Engler-Sekunden“, das ist die Ausflußzeit von 200 cm^3 Flüssigkeit im Engler-Viscosimeter, einem in ganz bestimmten Abmessungen hergestellten Apparat zur Ermittlung der dynamischen Zähigkeit nach der Capillarmethode. Ein „Engler-Grad“ E° ist die Ausflußzeit ϑ_W der gleichen Menge Wasser bei 20°C . Beträgt die Ausflußzeit bei der zu messenden Flüssigkeit ϑ_F , so gibt das Verhältnis $E = \vartheta_F/\vartheta_W$ die Anzahl Engler-Grade für die untersuchte Flüssigkeit an.

Die dynamische Zähigkeit η ist für viele einfache Stoffe bekannt und in Tabellenwerken zusammengestellt, für manche praktisch wichtige Gemische muß jedoch η experimentell ermittelt werden. Eine Berechnung nach der Mischungsregel ist wiederum nicht zulässig¹. Die starke Ab-

* Für England und seine Kolonien gelten die Redwood-Zeiten, für die Vereinigten Staaten die Saybolt-Universalzeiten. Faktoren zur Umrechnung der verschiedenen Zähigkeiten siehe E. Hatschek: Die Viskosität der Flüssigkeiten, S. 217. Dresden u. Leipzig 1929. — Erk, S.: Forsch.-Arb. Ing.-Wes. 288 (1927). — Zum internationalen Vergleich von Zähigkeitsmessern siehe Forsch. Ing.-Wes. 2, 113 (1931). — Berl-Lunge: Chemisch-Technische Untersuchungsmethoden, Bd. 4, S. 631. 1933.

¹ Bei Zähigkeitsbestimmungen nach der Durchflußmethode ist auf laminare Strömung und das Anbringen gewisser Korrekturen zu achten. Siehe z. B. L. Prandtl, u. O. Tietjens: Hydro- und Aeromechanik, Bd. 2, S. 30. Berlin 1931. — Erk, S.: Über Zähigkeitsmessungen nach der Capillarmethode. Ztschr. techn. Physik 10, 452 (1929). — Hatschek, E.: Fußnote *, S. 726. Über einen neuen Zähigkeitsmesser mit keramischem Porolithfilter (Capillarwand) der Firma Hydro-Apparatebauanstalt, Düsseldorf siehe Meßtechn. 8, 242 (1932).

hängigkeit der Zähigkeit von der Temperatur ist besonders zu beachten, ebenso darf bei größeren Drücken die Abhängigkeit vom Druck¹ nicht übersehen werden. Mit steigender Temperatur nimmt η bei tropfbaren Flüssigkeiten ab, bei Gasen zu; mit wachsendem Druck werden die Zähigkeitswerte mit wenigen Ausnahmen größer.

Häufiger als die Zähigkeit η tritt bei der hydrodynamischen Betrachtung von Flüssigkeiten das Verhältnis der dynamischen Zähigkeit zur Dichte ρ ($\rho = \gamma/g$) auf. Dieses wichtige Verhältnis $\nu = \eta/\rho = \frac{\eta \cdot g}{\gamma}$ wird Zähigkeitsmodul oder kinematische Zähigkeit genannt. Im C.G.S.-System hat ν die Dimension $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$, im technischen Maßsystem, für welches $\nu = \frac{\eta \cdot g}{\gamma} = \frac{\eta}{10 \cdot \gamma}$ ist, hat die kinematische Zähigkeit die Dimension $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$.

Während die dynamische Zähigkeit der Gase in gewissen Grenzen vom Druck unabhängig ist (solange wenigstens die Gase dem idealen Gasgesetz folgen), ist die kinematische Zähigkeit dem Druck umgekehrt proportional. Die Abb. 118—122 geben die dynamische Zähigkeit im technischen Maßsystem [$\text{m}^{-2} \text{kg s}$] als Funktion der Temperatur wieder für verschiedene Gase, Dämpfe und Flüssigkeiten².

Wie in Abb. 118 u. 120 zu ersehen ist, besitzt Luft von 20° und 1 ata gegenüber Wasser von gleicher Temperatur eine viel kleinere dynamische Zähigkeit. Die kinematische Zähigkeit ist ~ 14 mal größer.

β) Reynoldssche Zahl. Während somit die einzelnen Flüssigkeiten durch die

¹ Nähere Angaben z. B. bei F. Auerbach u. W. Hort: Handbuch der physikalischen und technischen Mechanik, Bd. 5, S. 435. Leipzig 1931. Über den Versuch für die Zähigkeit η eine „Zustandsgleichung“ aufzustellen in der Form

$\eta = f\left(\frac{\nu}{p}, T\right)$ siehe R. Plank: Über die Zähigkeit von Gasen und Dämpfen. Forsch. Ing.-Wes. 4, 1 (1933).

² Abb. 118 und Abb. 123 berechnet nach: Chemie-Ingenieur, Bd. I/1, S. 72—73. Leipzig 1933. Den Regeln für die Durchflußmessung mit genormten Düsen und Blenden, Berlin 1930 entstammen die Abb. 141, 142, 144, 150, 151 und 153—156.

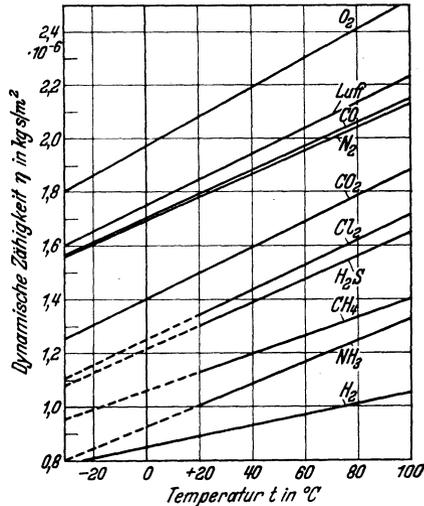


Abb. 118. Dynamische Zähigkeit $\eta = f(t)$ von Gasen.

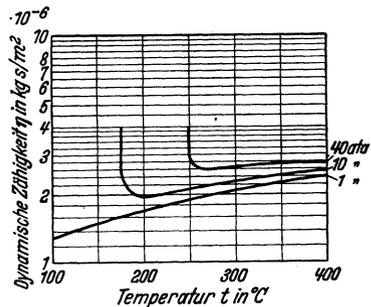


Abb. 119. Dynamische Zähigkeit η von Wasserdampf. [Nach Der Chemie-Ingenieur, Bd. II, 2, S. 182. Leipzig 1933.]

Zähigkeiten deutlich gekennzeichnet werden, ist für ihren Strömungszustand noch ein weiteres Kriterium maßgebend.

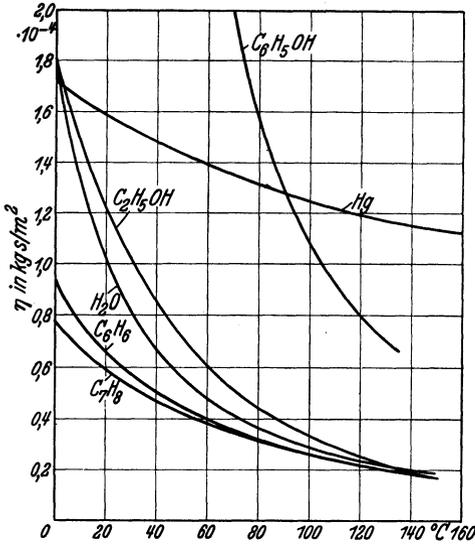


Abb. 120¹.

Treten bei der Strömung von Flüssigkeiten nur Trägheits- und Reibungskräfte auf, werden also Schwere und sonstige Kräfte wie auch die Kompressibilität vernachlässigt (also nur kleine Geschwindigkeit gegenüber der Schallgeschwindigkeit und nur kleine Höhendifferenzen zulässig), so führt das Verhältnis dieser beiden wirkenden Kräfte zu einer dimensionslosen Zahl. Diese wichtige Kennzahl wird Reynoldssche Zahl (s. auch Bd. II, S. 107) genannt und mit Re bezeichnet. Für die Strömung im Kreisrohr wird mit dem Durchmesser D als charakteristischer Länge und mit der mittleren Geschwindigkeit w

$$(Re)_D = \frac{w D}{\nu} \quad (77)$$

Bei anderen Querschnittsformen kommt an Stelle des Durchmessers der Profil- oder hydraulische Radius (s. S. 787), das Verhältnis des

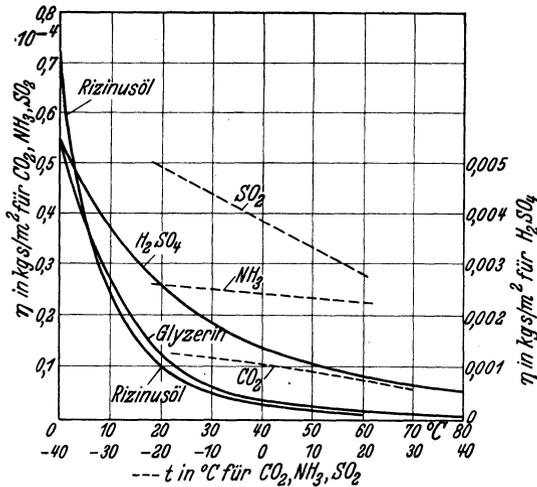


Abb. 121¹.

Querschnitts zum benetzten Umfang, in Frage. Die Reynoldssche Zahl ist für die Hydrodynamik und damit sowohl für die dynamischen Meßmethoden als auch für viele Probleme des chemischen Apparatebaus von wesentlicher Bedeutung. Bei großen Werten von Re überwiegt der Einfluß der Trägheitskräfte, bei genügend großen Reynoldsschen Zahlen kann also der Einfluß des Stoffes fast ganz zurücktreten. Sind die angeführten Voraussetzungen erfüllt, und werden weiterhin noch geometrisch ähnliche

Begrenzungen von Flüssigkeiten vorausgesetzt, dann ist bei gleichen Zahlenwerten von Re zu erwarten, daß auch die betrachteten Strömungen geometrisch ähnlich sind (mechanisches Ähnlichkeitsgesetz).

¹ Siehe Fußnote 1, S. 729.

Ist die stündliche Durchflußmenge Q^* (m³/h) oder $G^* = Q^* \cdot \gamma$ (kg/h) gegeben, und wird der Rohrdurchmesser D^* , wie in der Technik üblich, in mm eingesetzt, so wird die Reynoldssche Zahl berechnet nach:

$$(Re)_D = 0,354 \frac{Q^*}{D^* \nu} = 0,0361 \frac{Q^* \gamma}{D^* \eta} = 0,0361 \frac{G^*}{D^* \eta}. \quad (78)$$

Wird das Durchflußvolumen dagegen auf den Normalzustand, also nicht auf den Betriebszustand, bezogen, so wird mit

$$\nu = \frac{g \cdot \eta t}{\gamma_n} \cdot \frac{p_n \cdot T}{p \cdot T_n} = \nu' \frac{p_n T}{p T_n}$$

die Reynoldssche Zahl für Strömungen in Kreisrohren

$$(Re)_D = 0,354 \frac{Q_n^*}{D^* \nu'} = 0,0361 \frac{Q_n^* \cdot \gamma_n}{D^* \cdot \eta} \quad (79)$$

$$= 0,0361 \frac{G^*}{D^* \cdot \eta}.$$

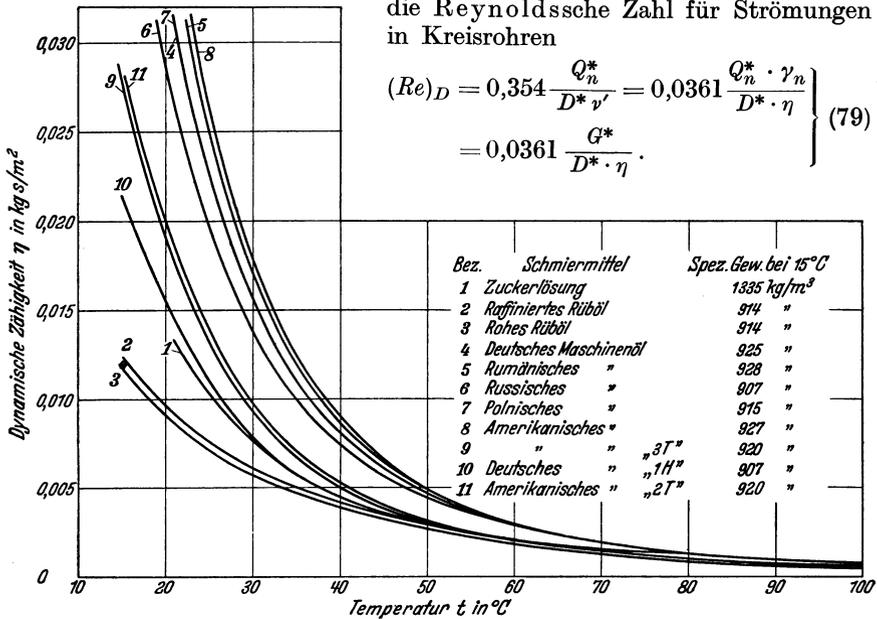


Abb. 120–122. Dynamische Zähigkeit $\eta = f(t)$ von Flüssigkeiten.

Die Größe ν' hat keine physikalische Bedeutung, sie ist eine reine Rechnungsgröße. In Abhängigkeit von der Temperatur t graphisch dargestellt (Abb. 123), erleichtert sie für kompressible Flüssigkeiten die Berechnung der Reynoldsschen Zahl.

γ) Grundarten der Strömungsformen. Bei der Strömung von Flüssigkeiten in Rohren und Kanälen sind grundsätzlich zwei Arten von Strömungen voneinander zu unterscheiden, die laminare und die turbulente Strömung [L. Prandtl: Neuere Ergebnisse der Turbulenzforschung. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 77, 105 (1933)]. Bei der laminaren Strömung sind die Stromlinien achsenparallel, bei der turbulenten geht die Fortbewegung unter starker Wirbelung vor sich. Die beiden Strömungsformen

¹ Werte nach Handbuch der Experimentalphysik, Bd. IV, 4, S. 539–540; Ztschr. ges. Kälteind. 1931, Heft 7, 160. Werte für die Schmiermittel nach Mitt. Hydr. Inst. Techn. Hochschule München, Heft 3, S. 150. München u. Berlin 1929.

werden getrennt durch ein von besonderen Bedingungen abhängiges labiles Strömungsgebiet. Die Grenze der verschiedenen Strömungsformen wird durch die Reynoldssche Zahl gekennzeichnet. Bis zur kritischen Reynoldsschen Zahl $(Re)_{kr}$ bzw. bis zu der ihr entsprechenden kritischen Geschwindigkeit w_{kr} liegt Laminarströmung vor. Diese Grenzwerte sind jedoch nicht feststehend, da sie abhängig sind von den in die Strömung

gebrachten Störungen. Nach den Versuchen von Schiller [L. Schiller: Ztschr. techn. Physik 3, 35 (1922)] ist für Luft in glatten und rauen Kreisrohren die kritische Reynoldssche Zahl, unter welcher sich keine Turbulenz behaupten kann,

$$(Re)_{D kr} = \frac{w_{kr} D}{\nu} = 2320.$$

Der technisch bedeutungsvolle Unterschied der beiden Strömungsarten liegt in dem Verteilungsgesetz der mittleren Geschwindigkeit und in der Abhängigkeit des Druckgefälles von dem Mengenstrom. Für die Technik kommt in weitaus den meisten Fällen die turbulente Strömung in Frage.

Die Ergebnisse der Strömungsforschung haben befruchtend auf die Methoden der Mengenmessung gewirkt. Gerade in den letzten Jahren sind die für die Technik so wichtigen dynamischen Mengenmeßmethoden durch die Beachtung der strömungstechnischen Grundprobleme so vervollkommenet

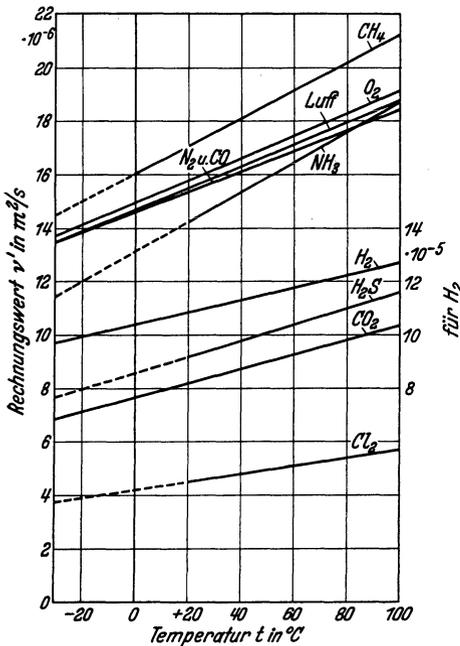


Abb. 123. Rechnungswert $\nu' = \frac{\eta_t \cdot g}{\gamma_n}$ für verschiedene Gase in Abhängigkeit von der Temperatur (γ_n bei 20° C, 1 ata).

worden¹, daß nunmehr für die Mengenmessung bei Beachtung der für den Zustand der Flüssigkeiten in Frage kommenden physikalischen Grundgesetze die erforderliche Sicherheit und Genauigkeit gewährleistet werden kann.

Die Methoden zur einwandfreien Erfassung der für die Mengenmeßverfahren grundlegenden Zustandsgrößen (v , p und t) werden an anderer Stelle besonders behandelt². Hier soll ein Überblick über die verschiedenen Verfahren zur Erfassung der Stoffmengen gegeben werden. Wegen der

¹ Witte, R.: Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 72, 1493 (1928); 74, 47 (1930); Techn. Mech. Thermodyn. 1, 34, 72, 113 (1930); Forsch. Ing.-Wes. 2, 245, 291 (1931). — Hansen, H. u. K. Jaroschek: Strömungsforschungen und praktische Wärmewirtschaft. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 76, 169 (1932).

² Messung des spezifischen Volumens bzw. Gewichtes siehe S. 653f. Messung von Druck und Temperatur siehe S. 611 bzw. 597.

Vielgestaltigkeit der Meßmethoden kann dabei jeweils nur das Grundsätzliche Erwähnung finden, Einzelheiten sind der Sonderliteratur zu entnehmen¹.

2. Unmittelbare Methoden zur Messung von Flüssigkeiten.

a) Volumetrische Mengenmessungen.

a) Raummessung bei gleichbleibendem Druck. I. Tropfbare Flüssigkeiten. Zur Messung ist jeder dichte Behälter verwendbar. Auf die vielgestaltigen chemischen Meßgeräte zur Messung tropfbarer Flüssigkeiten sei nur hingewiesen. Diese meistens aus Glas hergestellten Geräte sind entweder von ganz bestimmter Größe (Kolben, Pipetten usw.) oder mit Unterteilung versehen (Meßzylinder, Büretten usw.). Auch die automatischen Füllmaschinen, welche Flüssigkeiten volumetrisch abmessen, bis herab zu 1—2 cm³, sowie die im Handel benutzten Volumemesser in zahlreichen Ausführungsformen seien erwähnt. Für technische Mengenmessungen kommen meistens größere, stabile Metallbehälter in Frage, die offen oder auch geschlossen sind. Der Rauminhalt dieser Gefäße ist auch hier entweder von ganz bestimmter Größe, oder zur Abmessung beliebiger Mengen in Abhängigkeit von der Höhe des Flüssigkeitsspiegels bekannt. Zur Bewältigung größerer Flüssigkeitsmengen mit kleineren Meßgefäßen werden zwei Gefäße benutzt, wobei der Zufluß durch ein mit Hand oder Hilfsenergie betätigtes schwenkbares Rohrmundstück erfolgt. Die Füllung wird durch Überlauf begrenzt. Bei der Messung von warmen Flüssigkeiten, z. B. Kondensat, das zur Vermeidung von Nachverdampfung bis unter 100° gekühlt worden ist, ist die Verdunstung durch leichtes Abdecken der Behälter abzdämmen. Das bei t^0 Wassertemperatur in der Zeit τ (s) verdunstete Wassergewicht G (kg) wird, wenn F (m²) die freie Wasseroberfläche, x' (kg/kg) den Dampfgehalt von 1 kg gesättigter Luft bei t^0 *, x (kg/kg) den Wassergehalt über der Wasseroberfläche von 1 kg trockener Luft und k (kg/m² h) die Verdunstungsziffer² bedeutet:

$$G = k \cdot F \frac{\tau}{3600} (x' - x) \text{ kg.} \quad (80)$$

Ist ein verhältnismäßig kleines Flüssigkeitsvolumen in kurzer Zeit zu bestimmen, z. B. der Brennstoffverbrauch einer Dieselmachine, dann

¹ Von den zahlreichen ausführlichen Veröffentlichungen seien erwähnt: Der Chemie-Ingenieur, Bd. II/2. Leipzig 1933. — Gramberg, A.: Technische Messungen bei Maschinenuntersuchungen und zur Betriebskontrolle. Berlin 1933. — Jordan, H.: Die Mengenmessung von Gasen, Dampf und Flüssigkeiten auf Hüttenwerken, Wärmestelle Düsseldorf, Nr. 76. 1925. — Litinsky, L.: Messungen großer Gasmengen. Leipzig 1922. — Block, W.: Handbuch der technischen Meßgeräte. Berlin 1923. — Staus, A.: Maschinenuntersuchungen, Bd. 1. Berlin 1926. — Auerbach, F. u. W. Hort: Handbuch der Physik und technischen Mechanik. — Geiger, H. u. W. Scheel: Handbuch der Physik. — Wien, W. u. F. Harms: Handbuch der Experimentalphysik.

* Tabelle für Dampfgehalt x' siehe Hütte, 26. Aufl., Bd. 1, S. 538. 1931.

² Siehe J. Huber: Der Verlust durch Verdunstung beim Messen von heißen Dampf wässern. Ztschr. bayer. Revis.-Ver. 1927, 57. — Regeln für Leistungsversuche an Kreiselpumpen, S. 19. Berlin 1928.

wird der genau gewogene Brennstoff in das Entnahmegefäß gefüllt und der Verbrauch des Volumens mit Hilfe einer Abreibnadel festgestellt.

Bei größeren Behältern ist es üblich, die Spiegelhöhe mit Meßlatte oder Bandmaß zu bestimmen. Doch ist diese einfachste Methode mit

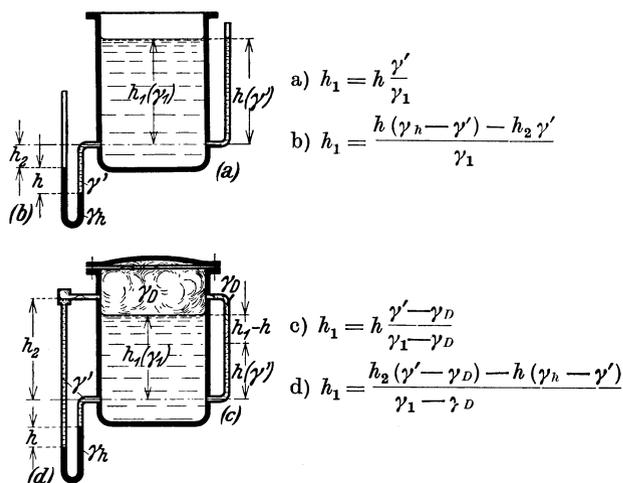


Abb. 124. Manometrische Flüssigkeitsstandmessungen am offenen und geschlossenen Behälter, ohne und mit Verwendung einer besonderen Sperrflüssigkeit.

besonderer Umsicht anzuwenden. Sehr oft werden Schwimmer zur Kenntlichmachung des Flüssigkeitsspiegels verwendet, wobei auf möglichst reibungsfreies Arbeiten der gesamten Vorrichtung zu achten ist.

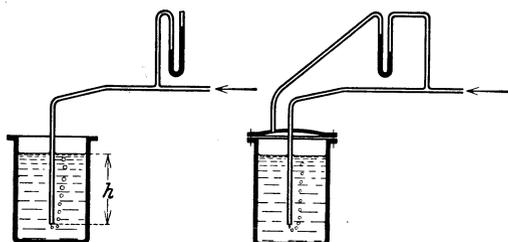


Abb. 125. Manometrische Flüssigkeitsstandmessung unter Verwendung einer Schutzflüssigkeit.

Verhältnisse anders. Diese für offene und geschlossene Behälter in Frage kommende Methode verlangt die Beachtung des Flüssigkeitszustandes.

Die Abb. 124 gibt einige einfache Anwendungen schematisch wieder. Die angegebenen Formeln für die Flüssigkeitshöhe h_1 lassen den Einfluß des spezifischen Gewichtes erkennen. Bei größeren Genauigkeitsansprüchen ist noch der Temperatureinfluß auf den Behälter selbst zu berücksichtigen. In besonderen Fällen kann die Spiegelhöhe auch unter

Diese angeführten Meßmethoden sind unabhängig vom spezifischen Gewicht, wenigstens solange eine Umrechnung des Volumens auf das Flüssigkeitsgewicht nach Gleichung (64) nicht erforderlich wird. Für manometrische Flüssigkeitsstandmessungen, die besonders vielseitig anwendbar sind (Fernmessung), liegen die

Verwendung eines Schutzgases oder einer Schutzflüssigkeit gemessen werden nach der durch Abb. 125 dargestellten Anordnung.

II. Gase. Für die volumetrische Mengenmessung von Gasen werden Glocken benutzt, deren Abschluß durch eine geeignete Flüssigkeit — meistens Wasser — gebildet wird. Der Druck des abgeschlossenen Gasvolumens, der durch das Gewicht der Glocke erzeugt wird, ist durch Auftriebsänderungen Schwankungen unterworfen. Bei kleinen Kubizierapparaten werden daher besondere mechanisch oder hydraulisch wirkende Druckausgleichsvorrichtungen benutzt, welche die Gewichtsänderungen der ein- oder austauchenden Glocke automatisch ausgleichen. Die Benutzung dieser Behälter zu Volumenmessungen ist schwierig, da die erreichbare Genauigkeit wesentlich von der richtigen Erfassung der Zustandsgrößen abhängig ist. Bei großen Gasometern ist die Messung der Fallhöhe der Gasometerglocke und Temperatur an mehreren Stellen gleichzeitig durchzuführen. Verluste durch Undichtigkeiten sind bei Absperrung der Ein- und Ausgänge durch Blindscheiben oder Wasserabschlüsse besonders zu ermitteln und entsprechend zu berücksichtigen. Zweckmäßig werden Messungen mit großen Gasbehältern erst nach Ausgleich der häufig beträchtlichen Temperaturdifferenzen des Gases und bei konstanter Außentemperatur durchgeführt¹.

Der Einfluß der Temperatur auf den Behälter, dessen Inhalt durch genaue Vermessung, bei kleinen Ausmaßen auch durch Eichung ermittelt werden kann, ist meistens vernachlässigbar. Die Umrechnung des aus der Fallhöhe errechneten Volumens erfolgt nach Gleichung (70).

β) Raummessung bei veränderlichem Druck. I. Auffüll- und Ausblasemethode. Zur Gasmessung kann auch ein Behälter konstanten Volumens herangezogen werden. Die zu messende Menge wird entweder in den Behältern bekannten Volumens gefüllt — Auffüllmethode — oder bei der Ausblasemethode aus dem gefüllten Behälter entnommen. Die erstere Methode kann z. B. zur angenäherten Bestimmung der Liefermenge eines kleineren Verdichters benutzt werden, dessen Enddruck durch entsprechende Drosselung ständig konstant zu halten ist. Aus den mit Hilfe der Zustandsgleichung errechneten Füllgewichten am Anfang und Ende des Versuches ergibt sich das in der gemessenen Zeit gelieferte Fördergewicht. Daraus wird durch Division mit dem spezifischen Gewicht vom Ansaugzustand das Ansaugvolumen erhalten. Es wird

$$G = G_2 - G_1 = \frac{V}{R} \left(\frac{P_2}{T_2} - \frac{P_1}{T_1} \right) \text{ kg} \quad (81)$$

und das angesaugte Volumen

$$Q_a = \frac{G}{\gamma_a} \text{ m}^3. \quad (81a)$$

Zu dem Behältervolumen ist auch der Inhalt der Rohrleitungen bis zum Regulierventil zu rechnen. Auch diese Mengenmeßmethode ist schwierig

¹ Über die von der Eichbehörde benutzten Kubizierapparate siehe die besonderen Instruktionen der Eichordnung, VIII. Gasmesser, Berlin. Siehe auch W. Wien u. F. Harms: Handbuch der Experimentalphysik, Ed. 4, S. 616. Leipzig 1932.

durchführbar, da die einwandfreie Erfassung der Zustandsgrößen sehr schwer ist. Dasselbe gilt für die Ausblasmethode¹.

II. Mengenmessung mit dem Indicatordiagramm. Bei Kolbenmaschinen läßt sich die angesaugte Menge mit einiger Annäherung aus dem Indicatordiagramm ermitteln. Aus dem Diagramm ergibt sich der volumetrische Wirkungsgrad η_v als das Verhältnis der wirklich angesaugten Menge zu dem Hubvolumen. Ist V das nach den Konstruktionsdaten oder durch besondere Vermessung festgestellte Hubvolumen, dann ist das bei einem Hub angesaugte Volumen $Q_a = V \cdot \eta_v \text{ m}^3$. Bei Kompressoren oder auch bei Dampfmaschinen, wenn der Dampf überhitzt ist, leidet der Genauigkeitsgrad darunter, daß eine einwandfreie Temperaturermittlung des Zylinderinhaltes nicht möglich ist. Ebenso wird die Messung durch Undichtigkeiten, welche im Diagramm nicht in Erscheinung treten, störend beeinflußt. Trotz dieser Unvollkommenheiten wird diese Methode der Mengenbestimmung häufig angewendet, da sie einfach durchführbar und in manchen Fällen die allein anwendbare ist. Die Messung verlangt einwandfreie Indicatoren² und unter anderem sorgfältige Einstellung der Schreibvorrichtung, damit ein deutliches Diagramm mit richtig aufgezeichneter Ansaugelinie erhalten wird. Zu beachten ist, daß durch gewisse, von den Schwingungen in der Ansaugleitung abhängige Aufladungserscheinungen der Druck am Ende des Hubes über der aufgezeichneten Atmosphärenlinie liegen kann.

γ) **Selbsttätige Raummessung.** I. Gasuhr. Alle diese Verfahren zur volumetrischen Flüssigkeitsmessung sind nur für vorübergehende Messungen geeignet. Wohl lassen sich durch Benützung von parallel oder hintereinandergeschalteten Meßapparaturen auch größere Flüssigkeitsmengen ermitteln, doch können diese Anordnungen nur als Notbehelf angesehen werden. Für Dauermessungen sind selbsttätig arbeitende Volumenmesser zweckmäßiger. Das Prinzip dieser automatischen Mengenmesser besteht in der Messung gleicher Räume oder — allerdings seltener — in der Messung von Räumen, deren Abhängigkeit von der Füllhöhe bekannt ist. Die von der Stoffart unabhängigen Meßeinrichtungen werden durch die Energie der Meßflüssigkeit betätigt und geben das Meßergebnis — in den meisten Fällen ohne Rücksicht auf Druck und Temperatur — durch besondere Zählwerke bekannt. Die Zählerangaben können auch auf Fernzähler oder Fernschreiber übertragen

¹ Wegen der Ungenauigkeiten sind diese Methoden für Abnahmeversuche an Gasverdichtern nicht zulässig.

² Näheres über Indicatoren und ihre Anwendung siehe J. Brand u. F. Seufert: Technische Untersuchungsmethoden zur Betriebsüberwachung, S. 213. Berlin 1926. — Seufert, F.: Versuche an Dampfmaschinen, -kesseln, -turbinen und Verbrennungskraftmaschinen, S. 2. Berlin 1932. — Gramberg, A.: Fußnote 1, S. 731, 169 und 298. — Wilke, W.: Der Indicator und das Indicatordiagramm. Leipzig 1916. — Untersuchungen über die Grenzen der Verwendbarkeit des Indicators bei schnell laufenden Maschinen für elastische Medien. Ölmotor 1916, Heft 65. — Holm, O.: Die dynamischen Fehler der Federindikatoren für schnell laufende Verbrennungskraftmaschinen. Auto-Technik 1927, Heft 19, 20, 22. — Ernst, P. W.: Die Genauigkeit der Planimetrierung von Indicatordiagrammen. Automob.-techn. Ztschr. 34, 399 (1931).

werden. Die Abb. 126—133 veranschaulichen verschiedene automatische Volumenmesser in einfacher Darstellung.

Der bekannteste Typ der Verdrängungsmesser ist die Gasuhr. Es werden nasse und trockene Gasuhren unterschieden, je nachdem der Abschluß der Meßkammern durch eine Flüssigkeit (Wasser, Wasser-Glycerinmischung, dünnflüssiges Öl) oder durch ein elastisches Material (Leder, Stoff, dünne Metallfolien) erfolgt.

Die nasse Gasuhr (Abb. 126) mit der bewährten Crosley-Trommel wird zur Messung stoßfreier Gasströme für die verschiedensten Leistungen (bis mehrere tausend m^3/h) und auch für höhere Drücke¹ ausgeführt. Die Meßgenauigkeit ist von der einwandfreien Erfassung des Druckes und der Temperatur sowie von der Konstanz der Spiegelhöhe der Sperrflüssigkeit abhängig. Da der Flüssigkeitsspiegel der Meßkammer außerdem durch Schrägstellung und den mit der Belastung sich ändernden Widerstand der Gasuhr beeinflußt wird, sind diese störenden Faktoren zu beachten. Unter der Voraussetzung dichter Kammern werden von der nassen Gasuhr auch die kleinsten Gasvolumina erfaßt. Die Meßgenauigkeit der sehr sorgfältig und unter Betriebsbedingungen geeichten Gasuhren liegt unter $\pm 2\%$.

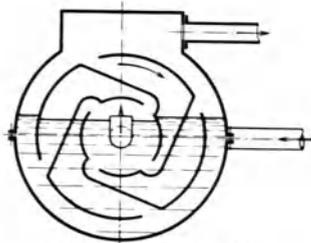


Abb. 126. Nasse Gasuhr.

Um für besonders große Leistungen die Baumaße der nassen Gasuhren (stündliche Umdrehungszahl etwa 70—80 gegenüber 120 bei den bekannten kleinen Experimentiergasuhren) herabzusetzen, werden auch mehrere parallele Kammersysteme in axialer Richtung angeordnet². Um von der durch den Widerstand der Gasuhr hervorgerufenen Spiegeldifferenz unabhängig zu werden, wurden nach Art der Glockengasmesser³ Taumelmesser⁴ bis 20000 m^3 Stundenleistung ausgeführt. Diese Bauart vermeidet die beim Glockengasmesser erforderliche Schiebersteuerung, da die Aus- und Eintrittskanäle bei der gleichmäßigen Taumbewegung der in mehreren Sektoren eingeteilten Glocke jeweils durch die Sperrflüssigkeit abgeschlossen bzw. freigegeben werden. Der infolge seines geringen Widerstandes mit größeren Umdrehungszahlen arbeitende Taumelmesser weist kleinere Abmessungen auf als eine Gasuhr mit der üblichen Crosley-Trommel gleicher Leistung, verlangt aber zum Einbau der Glocke eine bestimmte freie Bauhöhe.

Durch Vermeidung der Sperrflüssigkeit mit ihren Fehlerquellen und den sonstigen Übelständen wie Einfrieren, Gasabsorption, schweres Gewicht

¹ Schütz, J. Fr. v.: Großgasmesser. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. **76**, 521 (1932).

² Z. B. beim Trommelmesser der Firma Schirmer, Richter & Co., Leipzig.

³ Beschreibung eines Glockengasmessers siehe O. Peischer: Gas- u. Wasserfach **65**, 261 (1922).

⁴ Näheres siehe bei K. Barth: Gas- u. Wasserfach **73**, 721 (1930); auch J. Fr. v. Schütz: Fußnote 1.

usw. ist die trockene Gasuhr (Abb. 127) ausgezeichnet¹, die trotz ihrer geringeren Meßgenauigkeit die nasse Gasuhr mehr und mehr verdrängt hat.

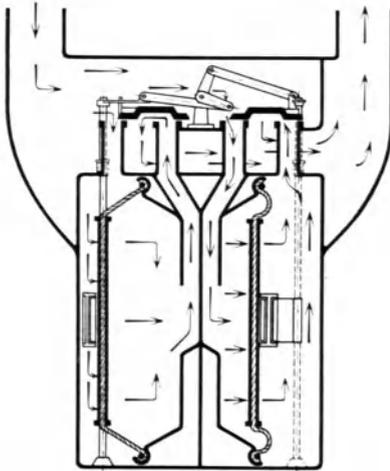


Abb. 127. Trockene Gasuhr.

Sie ist bis zu Stundenleistungen von etwa 600 m³ entwickelt worden und arbeitet bei 120—150 Umdrehungen pro h. Von Nachteil ist, daß bei der erforderlichen Schiebersteuerung kleine Gasmengen nicht immer sicher erfaßt werden und daß die Zuverlässigkeit abhängig ist von Verschmutzung, Schrumpfung der abdichtenden Membranen und eventuell Ansammlung von Kondensat. Regelmäßige Nachprüfung der auch hier von der Belastung abhängigen Eichkurve ist erforderlich.

II. Kipp- und Trommelmesser. Zur volumetrischen Messung tropfbarer Flüssigkeiten durch selbsttätige Umschaltung und Zählung der Meßkammerfüllungen, deren gleicher Rauminhalt V (m³) durch Überlauf

begrenzt ist, dienen die Kipp- und Trommelmesser ($Q = n \cdot V$ m³). Bei diesen Messern, bei welchen freier Zu- und Ablauf erforderlich ist,

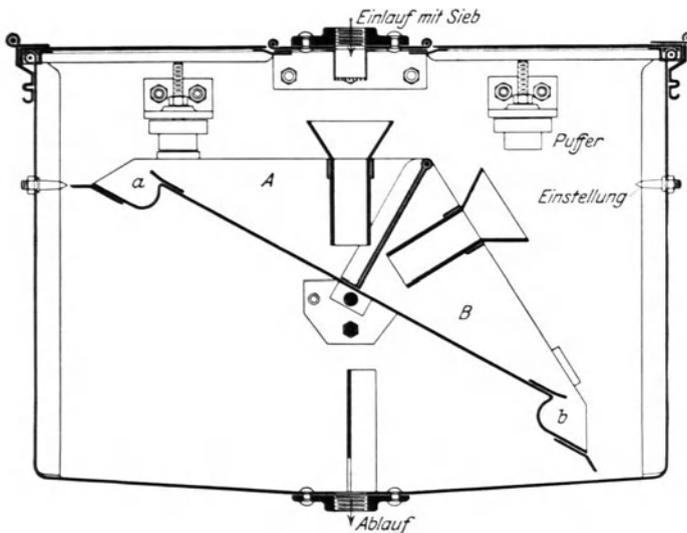


Abb. 128. Kippmesser (Firma Eckardt). A, B Meßkammer; a, b Überlaufrinne.

¹ Siehe L. Litinsky: Gesichtspunkte zur Wahl eines Gasmessers. Meßtechn. 5, 181 (1929). — Hochleistungsgasmesser, Probleme und Aussichten. Meßtechn. 7, 287, 315 (1931). — Müller, M.: Die trockenen Gasmesser. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 76, 699 (1932); über ihre Prüfung Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 77, 759 (1933).

erfolgt die Umschaltung des jeweils gefüllten Meßbehälters durch die infolge Überlaufs eintretende plötzliche Schwerpunktsverlagerung. Während beim Kippmesser (Abb. 128, normale Bauarten bis 6 m³/h) zwei Meßkammern abwechselnd hin und her bewegt werden, findet beim Trommelmesser (Abb. 129, Bauart bis 10 m³/h) die Umschaltung der Kammern wie bei der nassen Gasuhr im gleichen Drehsinn, aber im Gegensatz zur Gasuhr nicht kontinuierlich, sondern erst nach erfolgter Füllung statt. Die Genauigkeit des Kippmessers ist wesentlich von der Zulaufmenge abhängig, da während der Umschaltung durch das Fehlen einer besonderen Sicherung mehr oder weniger Flüssigkeit ungemessen abfließt. Günstiger in dieser Beziehung ist der Trommelmesser, da hier nach vorschriftsmäßiger Füllung der Meßkammer beim Beginn der Trommeldrehung der weitere Zufluß durch die besondere Kammeranordnung in den nächsten Meßraum geleitet wird. Immerhin hat auch dieser Messer einen mit steigender Belastung zunehmenden Korrekturfaktor (~ 1%). Überlastung der Messer und Zunahme der Lagerreibung verursachen Fehlmessungen.

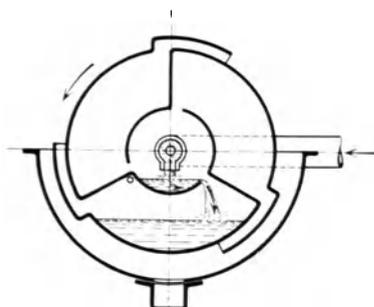


Abb. 129. Trommelmesser.

III. Kolbenmesser. Weiterhin werden zur direkten Volummessung von Flüssigkeiten Kolbenmesser verwendet, bei denen ein¹ oder mehrere Kolben² die im Zylinder vorhandene Meßflüssigkeit entweder mit veränderlichem oder mit konstantem Hub verdrängen. Es ist hier also pro Hub $Q = F \cdot H$ (m³), wenn F (m²) der Zylinderquerschnitt und H (m) der veränderliche oder auch konstante Kolbenweg bedeutet. Die zur Betätigung der Messer erforderliche Energie ist wiederum von der zu messenden Flüssigkeit zu liefern. Die Messer sind auch für höhere Drücke verwendbar.

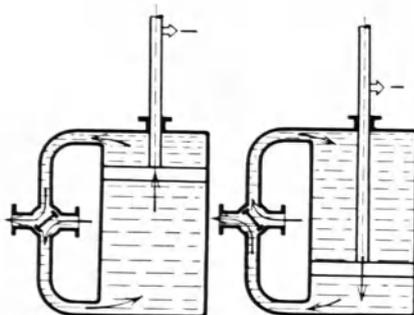


Abb. 130. I.C.E.-Kolbenmesser mit doppelt wirkendem Kolben.

Als ein Messer mit doppelt wirkendem Kolben sei der I. C. E.-Kolbenmesser¹ (Abb. 130) angeführt. Bei diesem Messer erfolgt die Umsteuerung durch einen Vierweghahn. Der vom Kolben bis zum Moment der restlosen Ventilumsteuerung zurückgelegte Weg (abhängig von der

¹ Sie werden von der Firma J. C. Eckardt, Stuttgart-Cannstatt in mehreren Größen für Normalleistungen von etwa 2—66 m³/h bei vorübergehenden Maximalleistungen von etwa 3—96 m³/h gebaut.

² Liefernde Firma E. Kessler, Wassermesserfabrik, Düsseldorf.

Belastung, daher nicht konstant) wird mit einem Wendegetriebe auf das Zählwerk übertragen. Da hier also das Zählwerk unabhängig von der Bewegungsrichtung des Kolbens ist, können eventuell Umkehrungen in der Strömungsrichtung beträchtliche positive Fehler verursachen. Der Schmidtsche Kolbenmesser¹ besitzt als Meßorgan zwei getrennte Zylinder, deren Kolben durch ein Kurbelgetriebe miteinander verbunden sind und damit einen festbegrenzten Hub besitzen. Infolgedessen sind auch die Kurbelumdrehungen ein Maß für die geförderte Flüssigkeitsmenge (Stundenleistung bis 1500 m³). Die Steuerung wird bewirkt durch besonders angeordnete Kanäle in jedem der beiden sich stets entgegengesetzt

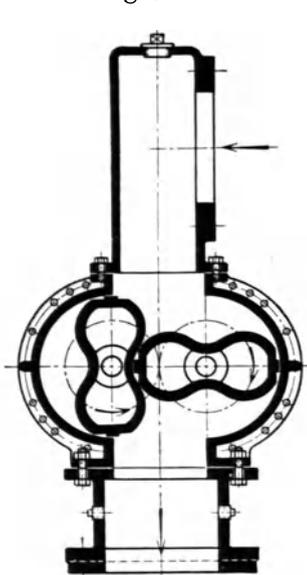


Abb. 131. Drehkolbengasmesser (J. Pintsch).

bewegenden Kolben und entsprechende Ein- und Austrittsöffnungen im Zylinder². Bei dem nur für ganz reine und säurefreie Flüssigkeiten (bis 50 m³/h) in Frage kommenden Bowser-Xacto-Messer³ werden fünf einfach wirkende Kolben durch eine Steuerscheibe, welche Taumelbewegungen ausführt, gesteuert. Die Kolben drücken nacheinander die Meßflüssigkeit aus ihren fest angeordneten Zylindern.

Bemerkenswert ist die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Kolbenmesser bei richtiger Einstellung. Selbst bei wenig schmierenden Flüssigkeiten (z. B. Benzin) arbeiten sie bei gleichmäßiger Belastung mit einer Genauigkeit von unter 1%, selbst über einige Jahre. Abgesehen vom Xacto-Messer, der nur einen geringen Widerstand besitzt und dessen Fehlerkurve im ganzen Meßbereich konstant bleibt, zeigen die angeführten Kolbenmesser unterhalb von etwa 10% der Normalbelastung einen Anstieg des Korrekturfaktors, da sich die Undichtigkeiten stärker auswirken. Je nach Größe dieser Messer werden 3—6 m WS und mehr Betriebsdruck notwendig.

Zur Gasmessung sind Kolbenmesser mit auf- und abgehendem Kolben kaum im Gebrauch. Neuerdings werden für größere Leistungen (bis 9000 m³/h) und größere Drücke (bis 7 m WS) Drehkolbenmesser⁴ gebaut (Abb. 131). Hier wird das Gas durch zwei gekuppelte, gegenläufige

¹ Siehe Fußnote 2, S. 738.

² Näheres über Arbeitsweise siehe: Der Chemie-Ingenieur, Bd. II/2, S. 149. 1933. Nach gleichem System arbeitet auch der Steinmann-Wassermesser (größte Normalleistung 250 m³/h) von der Firma H. Steinmann, Maschinenfabrik und Eisengießerei, Horst-Emscher, jedoch liegt das Kurbelgetriebe außerhalb des Messergehäuses.

³ Firma S. F. Bowser & Co., Berlin SW 48.

⁴ Von der Firma J. Pintsch, Berlin; siehe auch J. Fr. v. Schütz: Großgasmesser. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 76, 525 (1932). Über die Eichung eines Drehkolbenmessers von 1000 m³/h Höchstdurchsatz durch die Physikalisch-Technische Reichsanstalt siehe Gas- u. Wasserfach 74, 548 (1931).

Drehkolben verdrängt, wobei die besondere Formgebung von Kolben und Gehäuse ständig Ein- und Ausgang bis auf einen geringen Spalt (keine metallische Berührung), dessen Schlupf erst unterhalb von 5% der Belastung zur Geltung kommt, trennt. Auch hier soll die Genauigkeit bis herab zu 10% der Belastung innerhalb von $\pm 1\%$ liegen. Der Widerstand des Messers ist sehr gering und beträgt nur etwa 25 mm WS.

IV. Kapsel- und Scheibenmesser. Bekannte motorische Flüssigkeitsmesser zur unmittelbaren Volumenmessung sind der Kapselmesser und der Scheibenmesser. Diese Messer, welche nur für ganz reine Flüssigkeiten benutzt werden können, gestatten auch die Messung von geringen Mengen und sind daher als Kontrollmesser besonders geeignet.

Der Kapselmesser (Abb. 132) kommt vorwiegend zur Messung von reinem Wasser, in Sonderausführungen auch für heiße Flüssigkeiten (bis 200°C), Öle, Benzine usw. bis zu Stundenleistungen von 100 m^3 und für höhere Drücke in Frage. Bei diesem Messer verdrängt ein besonders ausgebildeter Ringkolben aus einem Meßraum durch eine zwangsläufige, gleitende und gleichzeitig drehende Bewegung die Flüssigkeit. Die Steuerung des sich gleichmäßig bewegenden Kolbens erfolgt durch die besondere Anordnung der Ein- und Austrittsöffnung. Die als Trocken- und Naßläufer ausgebildeten Messer haben geringere bewegte Massen und können daher mit größeren Drehzahlen (maximal 700) laufen, sie sind deshalb nicht so voluminös wie die erwähnten Flüssigkeitskolbenmesser. Ihre Genauigkeit beträgt in weiten Grenzen $\pm 2\%$, ihr zum sicheren Ansprechen erforderlicher Überdruck etwa 2 m WS.

Bei dem Scheibenwassermesser (Abb. 133) wird das Flüssigkeitsvolumen durch die unter der Wirkung der Druckdifferenz erfolgende zwangsläufige Taumelbewegung einer Scheibe aus einer entsprechend ausgeführten Meßkammer verdrängt. Dabei wird, ähnlich wie beim Kapsel-

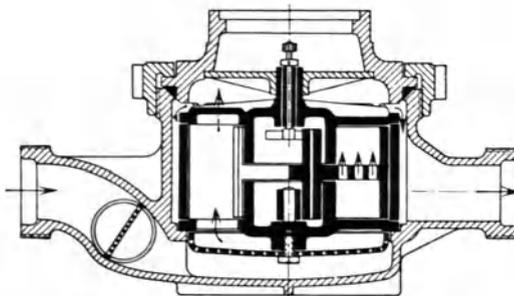


Abb. 132. Kapselmesser (Bopp & Reuther).

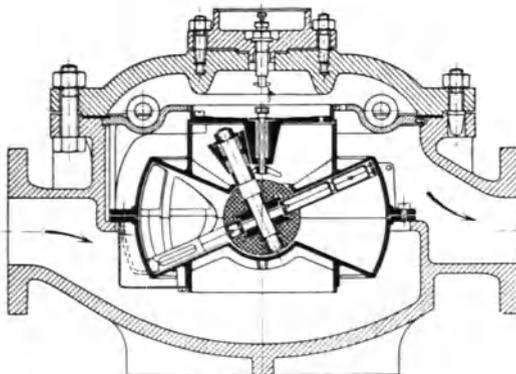


Abb. 133. Scheibenmesser (Siemens & Halske).

messer, die zu- und abfließende Flüssigkeit durch einen kleinen Spalt zwischen der Scheibenwand und dem Meßgehäuse getrennt. Dieser temperaturabhängige Spalt wird oberhalb einer gewissen Geschwindigkeit durch ein haftendes Flüssigkeitspolster abgedichtet¹. Die Meßfehler sollen bei horizontalem Einbau und reinen Meßflüssigkeiten nicht größer sein als $\pm 1\%$. Zur Vermeidung von Überlastung sind die bis zu normalen Dauerbelastungen von 40 m³/h gebauten Messer stets reichlich zu wählen.

Der Scheibenflüssigkeits- und Preßluftmesser „Exakt“² hat ein von der üblichen Meßkammer etwas abweichendes Gehäuse, arbeitet aber nach dem gleichen Prinzip, wird ausgeführt für Leistungen von 0,06 bis 6,0 m³/h und soll eine Genauigkeit von $\pm 0,5\%$ besitzen.

b) Gewichtsmäßige Mengenermittlung von Flüssigkeiten.

a) **Bedienung von Hand.** Die genaueste Mengenermittlung von Flüssigkeiten erfolgt durch Wägung. Für vorübergehende Messungen können die im Abschnitt über Mengenmessung fester Stoffe (s. S. 684) angeführten Hebelwaagen bei Verwendung entsprechender Behälter benutzt werden. Mit Hilfe der reinen Neigungswaagen kann auch leicht die in einer bestimmten Zeit angefallene Flüssigkeitsmenge festgestellt werden, während dies bei den einfachen Hebelwaagen nur durch Umsteuerung der Zulaufeinrichtung möglich ist. Hierbei kann die Umsteuerung mit Hilfsenergie unter gleichzeitiger Betätigung des anzeigenden oder registrierenden Zeitmessers erfolgen.

β) **Selbsttätige Einrichtungen.** Zur Bestimmung größerer Mengen oder für Dauermessungen werden selbsttätige Wägeeinrichtungen verwendet. Hierbei ist freier Zu- und Abfluß Bedingung.

Wie schon erwähnt, ist für die Genauigkeit der automatischen Balkenwaagen das einwandfreie „Abgleichen“ oder „Ausgleichen“ des dem Sollgewicht nahegekommenen Füllgewichtes wesentlich. Es sind daher auch die zur selbsttätigen Wägung in Frage kommenden Flüssigkeitswaagen wie z. B. automatische Balkenwaagen³ und Kippwaagen⁴ mit einer besonderen Zuflußeinrichtung versehen, welche den Hauptzufluß im geeigneten Augenblick auf einen von seiner Stärke unabhängigen, gleichmäßigen Nebenfluß abdrosselt. Bei Erreichung der Gleichgewichtslage erfolgt die gänzliche Abstellung des Zuflusses und die Entleerung. Bei entsprechender Auswahl des Baustoffes können die verschiedensten Flüssigkeiten wie Wasser, Öle, Säuren, Laugen usw. automatisch verwogen werden bis zu Stundenleistungen von 70000 kg. Die Genauigkeit der selbsttätigen Wägeeinrichtungen ist groß. Für die Kippwaage⁴

¹ Siehe A. Grunwald: Der Scheibenmesser als Kesselspeisewassermesser. Wärme 48, 309 (1925).

² Preßluftindustrie M. L. F. Froning, Dortmund-Körne.

³ Zu beziehen von den verschiedensten Waagenbaufirmen. Beschreibung selbsttätiger Flüssigkeitswaagen mit Kippgefäß siehe O. Tauchnitz: Automatische Registrierwaagen, S. 63 und 108. München u. Berlin 1913.

⁴ L. u. C. Steinmüller, Gummersbach. Beschreibung der Kippwaage siehe A. Gramberg: Fußnote 1, S. 731; S. 226.

wird eine Genauigkeit von $\pm 0,1\%$ garantiert, für die automatischen Balkenwaagen kann der Fehler bei guter Wartung und nicht zu zähen Flüssigkeiten ebenfalls unter $\pm 0,5\%$ gehalten werden.

c) Sicherung der unmittelbaren Mengenmessung.

α) Eichung der Meßgeräte. Bei den einzelnen Methoden zur direkten volumetrischen Flüssigkeitsmessung sind bereits einige die Genauigkeit und Zuverlässigkeit bestimmende Faktoren gestreift worden. Die angegebenen Genauigkeitswerte verlangen vorschriftsmäßige Anwendung und einwandfreien Zustand der verwendeten Meßgeräte. Um die Richtigkeit der Messungen zu gewährleisten, sind regelmäßige Kontrollen der stets gut zu wartenden Meßapparate erforderlich.

Für die einfache Rauminhaltsmessung ist die richtige Erfassung der Behälterinhalte Grundbedingung. Entsprechend der geforderten Genauigkeit sind die Gefäße zu eichen. Die genaueste Eichmethode ist die Wägung, welche bei kleinen Behältern unbedingt angewendet werden muß. Zur Erzielung größerer Genauigkeit wird hier an Stelle von Wasser Quecksilber verwendet, welches die Wandungen nicht benetzt. Größere Behälter werden ausgelitert mit Wasser unter Verwendung von kleineren, genau geeichten Gefäßen, wie z. B. mit Eichkolben entsprechender Größe nach Art des bekannten Kubizierapparates von Junkers oder mit zylindrischen Meßgefäßen mit fortlaufender Einteilung, wobei die Ablesung mit Hilfe von Wasserstandsglas oder Schwimmereinrichtung erfolgt [s. z. B. Instruktion zur Eichordnung III (Fässer), Berlin 1911; R. Witte: Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 72, 1496 (1928)]. Die Prüfung von größeren Gasbehältern und Gasuhren läßt sich leichter und genauer durchführen bei Verwendung der Kolbenwippe [Näheres s. Instruktion zur Eichordnung VIII (Gasmesser), Berlin 1911], ein aus zwei Kolben gleichen Inhalts bestehende Eichapparat, welche eine kontinuierlichere Auslitierung gestattet. In manchen Fällen kann das Volumen mit ausreichender Genauigkeit dadurch ermittelt werden, daß gefüllte Behälter durch einen oder mehrere parallel geschaltete Kontrollmesser [s. S. 739; W. Block: Meßtechn. 7, 145 (1931)], deren Eichfaktor für die entsprechende Belastung bekannt sein muß, entleert werden.

Von besonderer Wichtigkeit ist in allen Fällen die Temperatur, da sie auf die Behälter und auf die Flüssigkeiten einwirkt. Die Behälter sind daher entweder bei Betriebstemperatur zu eichen, oder aber ihr Volumen ist entsprechend der Temperaturdifferenz zu korrigieren. Sind z. B. V_1 und V_2 sowie t_1 und t_2 Volumen und Temperatur bei der Eichung bzw. beim Betriebszustand und sind α' und 3α die kubischen Ausdehnungskoeffizienten der Flüssigkeit bzw. des Behältermaterials, dann wird das auf Eichtemperatur umgerechnete Flüssigkeitsvolumen [J. Brand u. F. Seufert: Technische Untersuchungsmethoden zur Betriebsüberwachung, S. 344. Berlin 1926]

$$V_1 = \frac{V_2}{1 - (t_2 - t_1)(\alpha' - 3\alpha)}. \quad (82)$$

Über die Berücksichtigung der sonstigen Zustandsgrößen ist eingangs bereits das Erforderliche gesagt worden.

Erwähnt sei noch, daß bei den Gasuhren die oft schwierige Reduzierung des Gasvolumens auch automatisch durchgeführt werden kann, z. B. durch den Volumenreduktor [H. Brandl: Gas- u. Wasserfach 74, 995 (1931); J. Fr. v. Schütz¹: Fußnote 4, S. 738; S. 526]. Hier wird bei jeder Umdrehung die Summierung der reduzierten Gasvolumina in kleinen Zeiträumen ausgeführt durch eine mechanische Steuerung der Zählwerkübersetzung. Die Steuerung wird veranlaßt von eingebauten Druck- und Temperaturmessern entsprechend der angeführten Gleichung (41). Der Genauigkeitsgrad wird zu $\pm 1\%$ angegeben. Die angeführten Volumenmesser für Flüssigkeiten werden zweckmäßig in die Druckleitung eingebaut, damit bei höheren Temperaturen keine Dampf- bzw. Gasentwicklung (s. S. 723) zu Fehlmessungen (Mehranzeige) oder zu Beschädigungen Anlaß geben können. Wenn erforderlich, sind durch eingebaute Abscheider Gase, Wasser oder Schmutz von den Messern fernzuhalten. Je nach der Beschaffenheit der zu messenden Flüssigkeit sind die Volumenmesser in kürzeren oder längeren Zeitaabständen gründlich zu reinigen und zu überprüfen. Zur Durchführung der regelmäßigen Nacheichung unter Betriebsbedingungen bzw. Reinigung wird eine entsprechende Umgangsleitung vorgesehen. Auf einwandfreie Abdichtung dieser normalerweise außer Betrieb befindlichen Leitung ist besonders Wert zu legen, da andernfalls trotz richtiger Zählerangabe zu wenig gemessen wird. Auf richtige Belastung der Messer ist ebenfalls zu achten, die Höchstmengen wie die gewissen Minimalmengen (10—15% der Höchstlast) dürfen nicht über bzw. unterschritten werden, um Abnutzung oder Beschädigung bzw. größere Minderanzeigen zu vermeiden.

Die Eichung der selbsttätigen Volumenmesser geschieht entweder durch Wägung, durch genaue Ausmessung der durchgeflossenen Menge in Behältern bekannten Inhalts, oder auch unter Verwendung von besonders zuverlässigen Kontrollmessern mit bekannten Eichfaktoren. Zweckmäßig wird dabei die Fehlerkurve in Abhängigkeit von dem Durchfluß unter gleichzeitiger Ermittlung des Messerwiderstandes aufgenommen, um auch im laufenden Betriebe leicht etwaige Änderungen des Messers erkennen zu können.

Über die Sicherung der Mengenmessung durch Wägung kann auf den vorhergehenden Abschnitt verwiesen werden (s. S. 699).

β) Eichamtliche Bestimmungen. Für die im Handelsverkehr benutzten reinen Volumenmesser sind besondere eichamtliche Bestimmungen über Maßgrößen, Gestalt und Einrichtung sowie zulässige Fehlergrenzen² erlassen. Die amtliche Prüfung des Maßes erfolgt durch Vergleichung seines Raumgehaltes mit dem eines metallenen (metallenes Gebrauchsnormale) oder eines gläsernen Normales (Eichkolben) durch Umfüllung oder durch Auswägung mit Wasser [Besondere Instruktion II, 4 (Flüssigkeitsmaße)

¹ J. Fr. v. Schütz, Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 78, 875 (1934).

² Eichordnung vom 8. 11. 1911 in der Fassung vom 21. 2. 1930, Berlin 1930, §§ 31—52, 137—145. Nach dem durch Verordnung vom 14. XII. 1933 geänderten § 8 der Eichordnung müssen Meßgeräte, deren Sollgröße durch die Temperatur bestimmt werden, für $t = 20^\circ \text{C}$ richtig sein oder bei zulässigen Ausnahmen deutlich die Temperaturangabe tragen, bei der sie richtig sein sollen. Geschwindigkeitsmesser fallen bisher für den eichpflichtigen Verkehr noch aus.

zur Eichordnung, Berlin 1911. Dasselbst nähere Anweisungen für die Durchführung der Prüfungen.] In den Tabellen 28 und 29 sind die zulässigen Eichfehlergrenzen zur Messung tropfbarer Flüssigkeiten zusammengestellt; sie geben einen Überblick über die mindestens erreichbare Genauigkeit.

Die zur Eichung benutzten Gebrauchsnormalen, gläserne und metallene Eichkolben, werden ausschließlich durch Auswägung mit destil-

Tabelle 28. Eichfehlergrenzen der Flüssigkeitsmaße und Meßwerkzeuge für Flüssigkeiten.

Maßgröße	Meßgeräte des Verkehrs		
	Flüssigkeitsmaße (Eichordnung § 45, 1)	Meßwerkzeuge	
		a) Für den Gesamt- raumgehalt ohne, mit beschränkter oder mit gleich- mäßiger Einteilung (Eichordnung § 45, 3 a)	b) Für Teile des Gesamt- raumgehalts (Eichordnung § 45, 3 b)
l	cm ³	cm ³	cm ³
1 oder mehr	2,5 cm ³ f. jed. l	5 cm ³ f. jed. l	Ebensoviel, wie sich für den jeweiligen Raumgehalt gemäß Reihe a) ergibt, jedoch bei den Meßwerkzeugen mit gleichmäßiger Einteilung nicht weniger als die Hälfte der Fehlergrenze für den Gesamtraumgehalt
0,5	2,5	5	
0,2 und 0,1	1,0	2	
0,05	0,5	1	
0,02	0,4	0,8	
0,01	0,2	0,4	
1/4	1,25		

Verkehrsfehlergrenze ¹ das Doppelte dieser Beträge.

liertem Wasser [Besondere Instruktion II, 13] geprüft, ihr Fehler darf nur $\frac{4}{10}$ des für entsprechende Flüssigkeitsmaße zulässigen Eichfehlers betragen.

Auch für Gasuhren sind besondere eichamtliche Vorschriften erlassen [Eichordnung, Fußnote 1, S. 742, §§ 124—130 und besondere Instruktion VIII (Gasmesser), Berlin 1911]. Die zulässigen Fehlergrenzen betragen für Gasmesser mit Sperrflüssigkeit und Meßtrommel bis 150 m³ Stundenleistung ausschließlich, für Gasmesser mit Sperrflüssigkeit und hin- und herschwingender oder taumelnder Meßvorrichtung sowie für Balgengasmesser, Kolben- und Kapselgasmesser $\pm 2\%$, für Gasmesser mit Sperrflüssigkeit und Meßtrommel von 150 m³ Stundenleistung und mehr $\pm 1\%$ der bei normaler Geschwindigkeit durchgelassenen Gasmenge². Trockene Gasuhren und Gasmesser mit Sperrflüssigkeit müssen außerdem die Fehlergrenze auch bei $\frac{1}{2}$ — $\frac{1}{5}$ der angegebenen Stundenleistung entsprechenden Durchlaßgeschwindigkeit einhalten. Für Kolben- und Kapselgasmesser gilt die Fehlergrenze im ganzen Meßbereich. Die Verkehrsfehlergrenze beträgt das Doppelte der angegebenen Werte.

¹ Siehe S. 707.

² Eichordnung, Fußnote 1, S. 742, § 129 in der geänderten Fassung vom 14. 12. 1933.

Tabelle 29. Eichfehlergrenzen der Meßwerkzeuge für wissenschaftliche und technische Untersuchungen (Eichordnung § 144).

Maßgröße 1	Meßwerkzeuge ohne Einteilung				Meßwerkzeuge mit Einteilung	
	Kolben auf Einguß ¹ cm ³	Zylinder auf Einguß ¹ cm ³	Vollpipetten auf Einguß ² cm ³	Pyknometer (Dilatometer, Volumometer usw.) cm ³	Meßgläser auf Einguß ¹ cm ³	Büretten ³ auf Ablauf, Meßröhren auf Einguß cm ³
10	2,0		1,0			
5	1,2	10,0	0,6			
4	0,9	8,0	0,45			
3	0,6	6,0	0,3			
2	0,4	5,0	0,2		5,0	
1,5	0,25	4,0	0,125		4,0	
1	0,19	2,5	0,095		2,5	
0,6	0,14	1,5	0,07		1,5	
0,4	0,11	1,0	0,055		1,0	
0,3	0,11	1,0	0,055		1,0	0,4
0,25	0,11	0,5	0,04	0,025	0,5	0,2
0,20	0,08	0,5	0,04	0,020	0,5	0,2
0,15	0,08	0,5	0,035	0,015	0,5	0,12
0,100	0,05	0,2	0,025	0,012	0,2	0,08
0,075	0,05	0,2	0,025	0,010	0,2	0,06
0,05	0,03	0,1	0,018	0,008	0,1	0,04
0,03	0,03	0,06	0,013	0,008	0,06	0,03
0,025	0,015		0,013	0,005	0,06	0,03
0,02	0,015		0,01	0,005	0,06	0,03
0,01	0,008		0,008	0,003	0,03	0,02
0,005			0,005		0,02	0,01
0,004			0,005			0,01
0,002			0,003			

Die amtliche Prüfung dieser Volumennesser wird mit Kontrollgasmessern, in der Regel mit Kubizierapparaten (Gasometer, Eichkolben), eventuell in Parallelschaltung durchgeführt. Der Fehler dieser Kontrollinstrumente darf nur 0,8% der durchgelassenen Gasmenge bzw. des Sollinhaltes betragen. Er wird mit Hilfe kleinerer Kubizierapparate ermittelt, deren Inhalt bis auf $\pm 0,08\%$ [Besondere Instruktionen VII, 16, Berlin 1911] genau bekannt sein muß.

Für Wassermesser, welche von der Verpflichtung zur Neueichung und Nacheichung befreit sind [Eichordnung, Berlin 1930, S. 179], darf nach der Eichordnung für Belastungen bis herab zu 5% der angegebenen Durchlaßfähigkeit (stündlicher Durchfluß bei einem Druckverlust von 10 m Wasserhöhe) die Abweichung nicht mehr als $\pm 2\%$ der Durchflußmenge betragen. Bei 2% der Durchlässigkeit muß der Messer noch sicher angehen [Eichordnung § 161].

Die zulässigen Fehlergrenzen der Waagen sind in dem Abschnitt über Mengenmessung fester Stoffe bereits aufgeführt worden (s. Tabelle 22 und 23, S. 709 bzw. 711).

¹ Auf Ausguß (Wartezeit 30 s) das Doppelte der Beträge.

² Auf Ablauf (Wartezeit 15 s) das Doppelte der Beträge.

³ Wartezeit 30 s.

Es sei noch erwähnt, das die Eichfrist für die im eichpflichtigen Verkehr benutzten Flüssigkeitsmaße und Meßwerkzeuge für Flüssigkeiten zwei Jahre beträgt. [Nach § 11 der Maß- und Gewichtsordnung s. Eichordnung, Berlin 1930, S. 165. Über „Eichfrist“ s. S. 706.] Gasuhren sind nicht nacheichungspflichtig.

3. Mittelbare Verfahren zur Mengenummessung von Flüssigkeiten.

Ist die Anwendung der vorstehenden unmittelbaren Mengenmeßmethoden nicht möglich, so sind mittelbare Mengenmeßverfahren zu benutzen, deren Grundprinzip in der Ermittlung einer Größe besteht, die mit der zu messenden Stoffmenge in einem ganz bestimmten Zusammenhang steht.

Von diesen Verfahren sind die dynamischen Mengenmeßmethoden die wichtigsten. Diese spezifisch technischen Meßmethoden werden daher bei den folgenden Betrachtungen bevorzugt behandelt.

a) Stöchiometrische oder chemische Methoden.

Ebenso wie sich die bei einem Verarbeitungsprozeß durchgeführten Mengenummessungen durch regelmäßige Aufstellung der Bilanz des gesamten Stoffes oder eines analytisch bestimmten Grundstoffes kontrollieren lassen, kann auch in manchen Fällen aus der gemessenen Ausgangsmenge mit Hilfe der Analyse das erzeugte Produkt errechnet werden. Diese stöchiometrische oder chemische Meßmethode [vgl. L. Litinsky: Messung großer Gasmengen, S. 206. Leipzig 1922. — A. Gramberg: Technische Messungen bei Maschinenuntersuchungen und zur Betriebskontrolle, S. 141. Berlin 1933] verlangt, daß nicht nur die Aufbaustoffe, sondern auch die etwa benutzten Hilfsstoffe, Nebenprodukte und die im Betriebe unvermeidlichen Verluste ihrer Menge und Zusammensetzung nach genau bekannt sein müssen. Die Erfüllung dieser Grundforderung ist nicht immer leicht. Neben einwandfreier Probenentnahme ist auch ein gleichmäßiger Betriebszustand notwendig, um sichere Ergebnisse zu erlangen. Weiter kann auch einer zu bestimmenden Stoffmenge eine bekannte Menge eines leicht und sicher analysierbaren Stoffes zugesetzt werden, worauf nach einwandfreier Durchmischung und Ermittlung der Konzentration die Berechnung durchgeführt werden kann [s. bei O. Kirschmer u. B. Esterer: Wassermeßverfahren. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 74, 1501 (1930)].

b) Calorische Methoden.

In der Technik anwendbar ist auch die calorische Mengenmeßmethode, bei der als Meßgröße die einem System zu- oder abgeführte Wärmemenge benutzt wird. Die Zuverlässigkeit dieser Methode ist abhängig von der einwandfreien Erfassung aller für die Wärmebilanz erforderlichen Meßgrößen. Bei pulsierender Strömung lassen sich Mengenumbestimmungen mit einer in manchen Fällen ausreichenden Genauigkeit durchführen [G. Neumann u. H. Panse: Die Bestimmung des Gas-

verbrauches von Gasmaschinen aus den Wärme- und Energieausgaben. Arch. Eisenhüttenwes. 6, 13 (1932/33)].

Das Prinzip der calorischen Messung findet in der Meßtechnik Anwendung beim Thomas-Messer [s. L. Litinsky: Fußnote 1, S. 731; S. 192]. Hier wird einem elektrischen Widerstand, welcher in den zu messenden Gasstrom eingebaut ist, Wärme zugeführt. Der Einfachheit halber wird dabei der Heizstrom durch eine Zusatzeinrichtung auf eine konstante, mit Widerstandsthermometern gemessene Temperaturdifferenz einreguliert. Das Durchflußgewicht ist in diesem Falle direkt proportional der leicht zu registrierenden elektrischen Heizenergie. Die Genauigkeit des Messers ist abhängig a) von Änderungen der spezifischen Wärme der Meßflüssigkeit, die im allgemeinen weniger mit der im Betriebe oft nur gering veränderlichen Gaszusammensetzung als mit dem veränderlichen Wassergehalt variiert, b) von der Sauberhaltung der benutzten Widerstandsdrähte. Große Verbreitung hat der Thomas-Messer nicht gefunden.

c) Methoden der Geschwindigkeitsmessung.

a) **Mit Hilfe loser Fremdstoffe.** Eine vielseitige Verwendung zur Messung strömender Flüssigkeiten finden die Methoden der Geschwindigkeitsmessung. Für die Wahl der Methode ist die stoffliche Beschaffenheit des zu messenden Körpers maßgebend.

Die einfachste und älteste Methode dieser Art ist die mittelbare Geschwindigkeitsmessung, die aber nur für gelegentliche, kurze Versuche in Frage kommt. Die Geschwindigkeit ist gegeben durch das Verhältnis des von der strömenden Flüssigkeit zurückgelegten Weges zu der hierzu benötigten Zeit. Die Geschwindigkeitsmessung wird auf eine Zeitmessung zurückgeführt. Die Bewegung der homogenen Flüssigkeiten wird durch ihre Wirkung auf eingebrachte lose Fremdstoffe beobachtet.

I. Schwimmer. Messungen dieser Art werden z. B. durchgeführt mit dem Oberflächenschwimmer, mit feinem Aluminium- oder Lycopodiumpulver, mit Farbstoffen, Rauch usw. [Über die Sichtbarmachung von Strömungsvorgängen s. L. Prandtl u. O. Tietjens: Hydro- und Aeromechanik, Bd. 2, S. 281. Berlin 1931.] Wenn Geschwindigkeiten in beliebigen Tiefen zu messen sind, werden Tiefenschwimmer, an Oberflächenschwimmern mit dünnem Draht befestigte und mit Schrot usw. beliebig belastete Hohlkugeln, verwendet. Zur angenäherten Feststellung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit werden auch Stabschwimmer, am unteren Ende beschwerte Holzstäbe oder Blechrohre, benutzt. Die Meßmethode hat zur Voraussetzung eine gerade Meßstrecke von genügender Länge mit konstantem Querschnitt und geordneter Strömung. Sie kommt vorwiegend in Frage für Messungen in natürlichen oder künstlichen Kanälen. Wegen der ungleichen Geschwindigkeitsverteilung liefert die Mengenmeßmethode nur Näherungswerte, die jedoch für manche Erfordernisse der Praxis ausreichend sein können.

II. Meßschirm. Wesentlich genauere Werte lassen sich mit dem Meßschirm [E. Anderson: Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 51, 627 (1907);

52, 1835 (1908)] erreichen. Dies ist ein auf Schienen fahrbar angeordneter Schirm, welcher nahezu das ganze Querprofil des besonders erforderlichen Gerinnes erfüllt. Die von dem Meßschirm angenommene Strömungsgeschwindigkeit wird beobachtet oder auch registriert. Wird die durch Einführung des Meßschirmes verursachte Störung des Beharrungszustandes berücksichtigt [W. Wagenbach u. A. Krause: Verbesserung des Schirm-Wasser-Meßverfahrens. *Forsch. Ing.-Wes.* 3, 271 (1932)], so betragen die mittleren Streuungen der Versuchsergebnisse nur noch 0,1—0,15% gegenüber sonst 2—3%.

III. Salzgeschwindigkeits- und Impfvverfahren. Zu vorübergehenden Geschwindigkeitsmessungen kann auch das Salzgeschwindigkeits- oder Impfvverfahren [s. *Arch. techn. Messen* 17, V 1249—1 (1931); daselbst weitere Literaturangaben] herangezogen werden. Hier wird mit kurzen Unterbrechungen ein Fremdstoff durch besondere Ventile in die Flüssigkeit „geschossen“. Die dadurch z. B. veränderte Leitfähigkeit verursacht in dem Stromkreis eingebauter Elektrodenpaare Stromänderungen, welche registriert werden und dadurch die Zeit zum Durchströmen der Meßstrecke ermitteln lassen. Im Gegensatz zu dem angeführten chemischen Verfahren (s. S. 745) ist man hier von der Konzentration unabhängig. Das Salzgeschwindigkeitsverfahren kommt vorwiegend für turbulente Strömungen in Frage, und zwar für Strömungen in Rohren und offenen Gerinnen. Als Nachteil der Meßmethode wird die Abhängigkeit von der Meßstrecke bezeichnet. Nach dem vorliegenden deutschen Versuchsmaterial [O. Kirschmer u. B. Esterer: Die Genauigkeit einiger Wassermessverfahren. *Ztschr. Ver. Dtsch. Ing.* 74, 1499 (1930). — O. Kirschmer: Vergleichswassermessungen am Walchensee-Werk. *Ztschr. Ver. Dtsch. Ing.* 74, 521 (1930)] lassen sich nur angenäherte Ergebnisse mit dem Salzgeschwindigkeitsverfahren erzielen.

β) Mit Hilfe ortsfester Kraftwerke. Von größerer Bedeutung für die technische Mengenummessung ist die unmittelbare Geschwindigkeitsmessung, welche mit örtlichen Geschwindigkeitsmessern ausgeführt wird. Hier wirkt die zu messende Strömungsgeschwindigkeit auf ein am gleichen Ort des Geschwindigkeitsfeldes verbleibendes Kraftwerk. Als Kraftwerk dienen Flügelräder, deren Umdrehungsgeschwindigkeit zu der Anströmungsgeschwindigkeit w in bestimmter Beziehung steht. Wird mit n die Umdrehungsgeschwindigkeit bzw. die Drehzahl bezeichnet, dann ist bei nicht zu kleinen Geschwindigkeiten nach der Flügelgleichung¹

$$w = a \cdot n + b, \quad (83)$$

wobei a und b von Flügelform und Reibungswiderstand abhängige Konstanten bedeuten. Die Angaben des Kraftwerkes werden auf ein Meßwerk mit Drehungszähler übertragen. Das Meßwerk ist entweder rein mechanisch oder auch mit einer Kontaktvorrichtung zur elektrischen Signalgebung oder Registrierung versehen. Die Übersetzung ist so eingerichtet, daß unmittelbar der von der Flüssigkeit zurückgelegte Weg in m angegeben wird. Aus der beobachteten Zeit (Versuchsdauer etwa 2—3 min,

¹ Die allgemeine Flügelgleichung siehe bei L. A. Ott: Theorie und Konstantenbestimmung des hydrometrischen Flügels. Berlin 1925.

zweckmäßig unter Benutzung einer mit dem Meßwerk gekuppelten Uhr) und dem gemessenen Weg wird die Geschwindigkeit als zeitlicher Mittelwert erhalten. Da sich der Durchfluß als das Produkt aus Querschnitt und mittlerer Geschwindigkeit ergibt, sind Messungen in einer Reihe von Punkten des Querschnittes durchzuführen. Zu der in manchen Fällen erforderlichen schnellen Durchführung werden bei größeren Durchflußquerschnitten gleichzeitig mehrere Flügelräder benutzt. Der Querschnitt wird in gleiche Flächen eingeteilt, in dem Schwerpunkt einer jeden Fläche wird eine Messung vorgenommen und aus den Einzelwerten der Mittelwert berechnet. Bei graphischer Auswertung¹ ist wegen unsicherer Erfassung des starken Geschwindigkeitsabfalles an der Wand die Kurve der Geschwindigkeitsverteilung bis zur Rohrwand zu berechnen, und zwar entweder nach dem aus dem Blasiussschen Druckabfallgesetz gefundenen $1/7$ -Gesetz

$$\frac{w}{v_*} = 8,7 \left(\frac{v_* y}{\nu} \right)^{1/7} \quad (84)$$

oder nach dem von Prandtl auch für große Reynoldssche Zahlen angegebenen Verteilungsgesetz²

$$w = v_* (5,75 \log \frac{v_* y}{\nu} - 5,5). \quad (85)$$

In den Formeln bedeutet w die Strömungsgeschwindigkeit im Abstand y von der Rohrwand, ν die kinematische Zähigkeit und v_* die Schubspannungsgeschwindigkeit $= \sqrt{\tau/\rho}$ mit τ als Schubspannung und ρ als Dichte.

Bei Rohrströmungen mit einigermaßen gleicher Geschwindigkeitsverteilung werden Messungen über zwei oder drei Durchmesser ausgeführt.

Die Durchführung von Dauermessungen an einer bestimmten Stelle des Querschnittes mit ortsfesten Geschwindigkeitsmessern setzt störungsfreie Strömung sowie die Kenntnis der Geschwindigkeitsverteilung w/w_m voraus. Letztere ist durch Eichung zu bestimmen oder auch auf Grund der Gesetzmäßigkeiten bei Strömungen³ in Kreisrohren zu ermitteln.

I. Anemometer. Bei den zur Flüssigkeitsmessung benutzten Flügelrädern werden unterschieden Anemometer [für Geschwindigkeiten von 0,5—10 m/s Flügelradanemometer (Abb. 134), für etwa 2—50 m/s Schalenkreuzanemometer] und hydrometrische Flügel. Anemometer kommen vorwiegend für kompressible Flüssigkeiten in Frage, hydrometrische Flügelräder, durch besonders stabile Ausführung gekennzeichnete Flügelräder, für inkompressible Flüssigkeiten.

Die Flügelräder bedürfen einer besonders sorgfältigen Eichung und Behandlung. Anemometer für kleine Geschwindigkeiten (0,2—10 m/s)

¹ Über geeignete Integrationsverfahren siehe A. Gramberg: Technische Messungen bei Maschinenuntersuchungen und zur Betriebskontrolle, S. 174. Berlin 1933. — Litinsky, L.: Messung großer Gasmengen, S. 88. Leipzig 1922. — Regeln für Leistungsversuche an Ventilatoren und Kompressoren. Berlin 1929.

² Prandtl, L.: Neuere Ergebnisse der Turbulenzforschung. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 77, 105 (1933).

³ Nikuradse, J.: Gesetzmäßigkeiten der turbulenten Strömung in glatten Rohren. VDI-Forsch.-Heft 356 (1932). — L. Prandtl: s. vorstehende Fußnote 2, S. 110.

werden mit Rundlaufeinrichtungen unter Berücksichtigung des stets vorhandenen Mitwindes, oder auch durch gleichmäßige Bewegung in ruhender Luft¹ geeicht. Für große Geschwindigkeiten (2—50 m/s) werden ihre Angaben in gleichmäßigem Luftstrom verglichen mit den Werten eines genormten Drosselgerätes. Für die Eichung hydrometrischer Flügelräder kommen Schleppgerinne² in Frage, wobei ein sehr hoher Genauigkeitsgrad erreicht wird.

Die Flügelräder sind richtungsempfindlich, Flügelradanemometer mehr als Schalenkreuzanemometer, hydrometrische Flügel³ mit schrägkantigen Schaufeln mehr als die Flügel mit Schutzring. Schrägströmungen (längere Anlaufstrecken erforderlich) und stärkere Geschwindigkeitsschwankungen⁴ verursachen ebenso wie die Störung des Geschwindigkeitsfeldes durch das eingebrachte Instrument⁵ Meßfehler. Zur Berechnung des Durchflusses sind Meßquerschnitt und Zustand der strömenden Flüssigkeit genau zu ermitteln.

Bei Beachtung der verschiedenen Einflüsse lassen sich mit Anemometern brauchbare Mengenermittlungen durchführen. Die größere Zuverlässigkeit der hydrometrischen Flügel verdient besondere Erwähnung⁶.

Zur Messung von sehr kleinen Geschwindigkeiten werden Anemometer mit besonderer Hilfseinrichtung, bei welchen das Flügelrad in konstante Umdrehung versetzt und die zu messende Geschwindigkeit aus der Geschwindigkeitsänderung erhalten wird, oder auch Hitzdrahtanemometer benutzt. Bei diesen elektrischen Geschwindigkeitsmessern wird die Strömungsgeschwindigkeit durch die infolge Wärmeabgabe auftretende Widerstandsänderung eines elektrisch geheizten dünnen Platindrahtes gemessen. Durch Eichung ist die Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Widerstandsänderung zu ermitteln. Da dieses Meßverfahren vorwiegend für Strömungsuntersuchungen in Frage kommt, sei auf die Literatur verwiesen⁷.

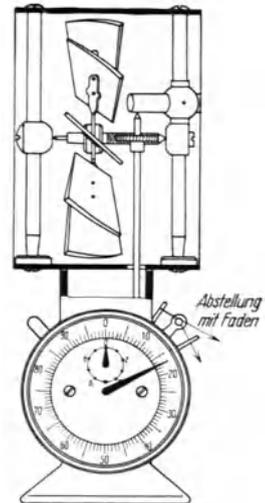


Abb. 134. Flügelradanemometer (Fueß).

¹ Loewenstein, R.: Freilaufeichung von Flügelradanemometern für kleine Geschwindigkeiten. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 77, 177 (1933).

² Wien, W. u. F. Harms: Handbuch der Experimentalphysik, Bd. IV, 3, S. 47. 1930.

³ Staus, A.: Der Genauigkeitsgrad von Flügelmessungen bei Wasserkraftanlagen. Berlin 1926.

⁴ Schrenk, O.: Über die Trägheitsfehler des Schalenkreuzanemometers bei schwankender Windstärke. Ztschr. techn. Physik 10, 57 (1929).

⁵ Vgl. Regeln für Leistungsversuche an Ventilatoren und Kompressoren. Berlin 1929.

⁶ Kirschmer, O. u. B. Esterer: Die Genauigkeit einiger Wassermeßverfahren. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 74, 1499 (1930).

⁷ Wien, W. u. F. Harms: Handbuch der Experimentalphysik, Bd. IV, 1, S. 637. Leipzig 1931. — Prandtl, L. u. O. Tietjens: Hydro- und Aeromechanik, Bd. 2, S. 255. Berlin 1931. — Gangadharan, G.: Mitt. Hydr. Inst. Techn. Hochschule München, Heft 4, S. 28. München u. Berlin 1931. — Ulsamer, J.: Die Grundlagen der Messung der Geschwindigkeit nach Größe und Richtung mit dem Hitzdrahtinstrument. Forsch. Ing.-Wes. 4, 121 (1933).

II. Flügelradmesser. Zur Durchführung von Dauermessungen in Rohrleitungen, und zwar vorwiegend zur Messung tropfbarer Flüssigkeiten, werden Flügelrad- und Woltmann-Messer¹ benutzt. Dies

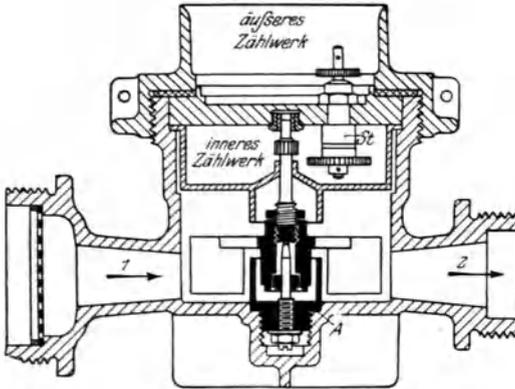


Abb. 135. Einstrahl-Flügelradmesser, Trockenläufer (Meinecke). 1, 2 Zufluß- und Abflußstutzen, St Stopfbüchse.

sind motorische Messer, auf die die lebendige Kraft der zu messenden Flüssigkeit wirkt und deren Nutzarbeit in der Betätigung des Zählwerkes besteht. Die verwendeten korrosionssicheren Baustoffe richten sich nach den Eigenschaften der Meßflüssigkeiten.

Die Beziehung zwischen Umdrehungsgeschwindigkeit des Flügels und der Strömungsgeschwindigkeit ist durch Eichung zu ermitteln.

Es sei erwähnt, daß zu Vergleichszwecken die

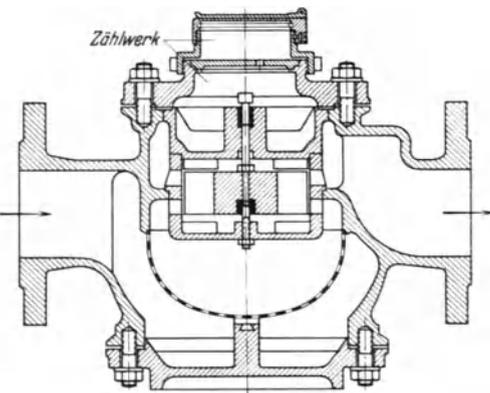


Abb. 136. Mehrstrahl-Flügelradwassermesser „Optima groß“ (Bopp & Reuther).

stündliche Durchlaßfähigkeit der Wassermesser bei einem Überdruck von 10 m WS mit Nennleistung bezeichnet wird. Die zulässige stündliche Höchstbeanspruchung liegt bei etwa 50% der Nennleistung, der praktische Meßbereich (für Dauerleistung) noch tiefer, da sich dieser nach dem zulässigen Druckverlust zu richten hat. Da der Druckverlust nahezu dem Quadrat der Geschwindigkeit proportional ist, läßt sich die Größe des Messers für die zweckmäßigste Beanspruchung leicht ermitteln. Als untere Meßgrenze wird die kleinste Durchlaßfähigkeit bezeichnet, bei welcher die normale Fehlergrenze von $\pm 2\%$ noch eingehalten wird (s. Abb. 138). Die Messer werden als Trockenläufer und Naßläufer ausgeführt,

d. h. in der zu messenden Flüssigkeit befindet sich entweder nur das schnell laufende Übersetzungsgetriebe, oder aber Übersetzungsgetriebe und langsam laufendes Zeigerwerk mit Zifferblatt in einem Meßwerk vereinigt. Bei Naßläufern besteht die Gefahr einer Verschmutzung der Ableser-

¹ Über neuere Bauarten motorischer Wassermesser siehe G. Eggers: Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 73, 557 (1929).

einrichtung. Der Einbau normaler motorischer Wassermesser hat waagrecht zu erfolgen.

Bei den Flügelradmessern (Bauarten für Anschlußweiten von 10 bis 150 mm lichter Weite und mehr) wird das Flügelrad entweder durch eine Düse tangential beaufschlagt (Einstrahlmesser, Abb. 135) oder durch einen Kranz von kleineren Düsen (Mehrstrahlmesser, Abb. 136). Wenn Eingangs- und Ausgangskanal symmetrisch angeordnet sind, sind die Messer für beide Strömungsrichtungen verwendbar. Durch die besondere Strahlführung ist der Flügelradmesser von dem Geschwindigkeitsprofil unabhängig. Die erforderliche Proportionalität zwischen der vom Flügel auf das Meßwerk übertragenen Drehzahl und der Geschwindigkeit der Flüssigkeit wird herbeigeführt durch die von außen ermöglichte Verstellung eines besonderen Regulierorganes.

Die Flügelradmesser sind bei entsprechender Ausführung auch zur Messung von kompressiblen Flüssigkeiten brauchbar, werden als solche jedoch in der Praxis weniger oft benutzt. Am bekanntesten ist noch der Flügelradmesser „Rotary“¹, dessen Genauigkeit (2—5 %) stark von der Reinheit des Gases abhängig ist². Das Zählwerk des Messers ist rein empirisch geeicht. Häufige Nacheichungen sind erforderlich³.

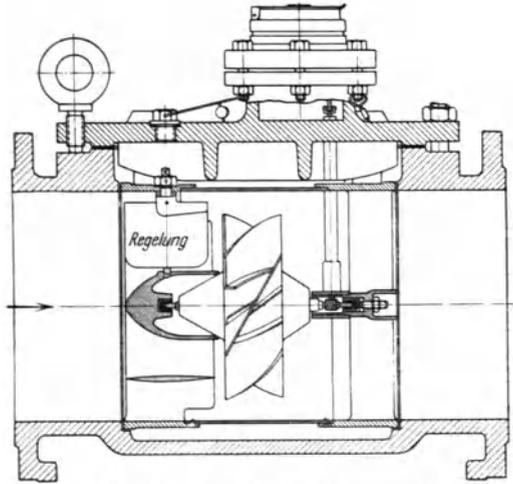


Abb. 137. Woltmann-Messer (Siemens & Halske).

III. Woltmann-Messer. Der Woltmann-Messer (Abb. 137) findet Verwendung zur Feststellung der Strömungsgeschwindigkeit von kalten und heißen Flüssigkeiten in größeren Rohrleitungen (50—1000 mm lichte Weite). Dieser Messer wird fast geradlinig durchflossen, eine Umlenkung der Flüssigkeit findet nicht statt. Wohl wird dadurch der Vorteil eines geringeren Druckverlustes erreicht, gleichzeitig wird die Gefahr einer Fehlmessung durch schräge Beaufschlagung der Schraubenfläche des hydrometrischen Flügels vergrößert. Wenn der Messer selbst nicht mit einer ausreichenden Stromführungseinrichtung versehen ist, muß an den Meßstellen, an welchen keine einwandfreie Strömung gewährleistet ist, der Einbau besonderer Strahlregler vorgesehen werden. Infolge der empfindlichen Abhängigkeit von der Geschwindigkeitsverteilung

¹ Messer englischen Ursprungs, wird hergestellt von der Firma Schirmer, Richter & Co., Leipzig-Connewitz für Stundenleistungen bis 20000 m³.

² Siehe A. Thau: Meßtechn. 5, 301 (1929).

³ Näheres über den Rotarymesser bei L. Litinsky: Fußnote 1, S. 748; S. 234.

ist die Eichung des Messers stets unter Betriebsverhältnissen durchzuführen. Daß die erforderliche Anlaufgeschwindigkeit des Woltmann-

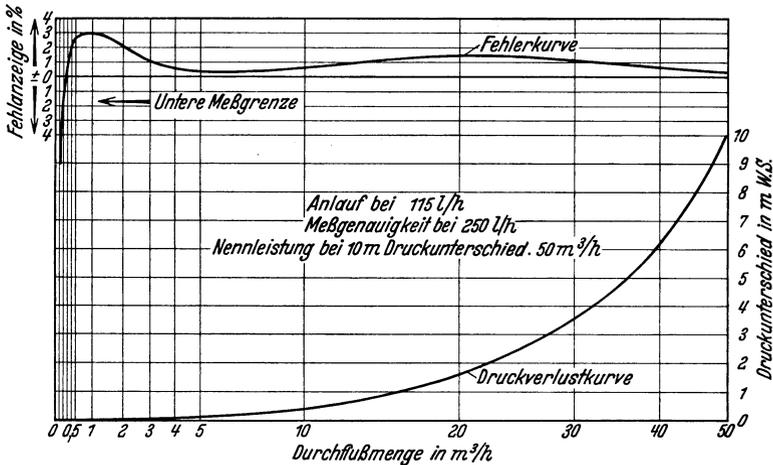


Abb. 138. Prüfkurven eines 75 mm-Protos-Großflügelrad-Wassermessers (Naßläufer) der Firma Siemens & Halske.

Messers verhältnismäßig groß ist, eine richtige Erfassung kleiner Durchflüsse mit ihm also nicht möglich ist, spielt keine allzu große Rolle, da er vorwiegend als Förder- oder Hauptmesser für größere Mengen benutzt wird.

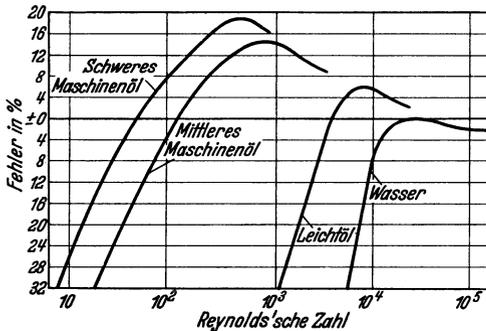


Abb. 139. Eichkurven eines Woltmann-Zählers als Ölzähler.

Bei der Auswahl eines Flüssigkeitsmessers ist neben der Eigenschaft der Meßflüssigkeit auch diejenige des Messers selbst zu beachten. Die Meßeigenschaft ist aus der für jeden Messer charakteristischen Prüfkurve ersichtlich. Der Eichkurve ist auch das für manche Fälle wichtige Verhalten des Messers bei kleinen Durchflüssen oder stärkeren Schwankungen zu entnehmen. Die Abb. 138 stellt des Eichergebnis

eines normalen Flügelradmessers dar. Die gleichmäßige Genauigkeit innerhalb der auch behördlich zugelassenen Fehlergrenze (s. S. 744) von $\pm 2\%$ wird bei den Flügelradmessern durch besondere, über oder unter dem Flügelrad eingebaute Staurippen erreicht. Die Eichkurve des Woltmann-Messers verläuft ähnlich. Hier ist jedoch der zu seinem Betrieb erforderliche Energieverlust kleiner, der Schlupf bei Belastungen unterhalb des erwähnten kleinen Durchflusses dagegen größer. Der Einfluß der Zähigkeit auf den Woltmann-Messer ist aus Abb. 139 zu ersehen. Die für jedes Öl als Funktion der Reynoldsschen Zahl Re

aufgetragene Fehlerkurve¹ geht bei größeren Geschwindigkeiten in eine einzige Kurve über.

γ) **Geschwindigkeitsmessung mit dem Staugerät.** Wie bereits betont, ist bei Messungen der Geschwindigkeit an den verschiedenen Punkten eines Strömungsquerschnittes darauf zu achten, daß die Geschwindigkeitsverteilung nicht merklich gestört wird. Da weiterhin die Geschwindigkeit in der Nähe der Rohrwand steil ansteigt, ist der Querschnitt des Meßgerätes klein zu halten im Vergleich zum Rohrquerschnitt. Meßgeräte, welche diese Bedingungen erfüllen, sind die Staugeräte.

Nach dem Grundgesetz der Hydrodynamik, dem Bernoullischen Gesetz, ist für eine stationäre Strömung einer reibungslosen und inkompressiblen Flüssigkeit der Zusammenhang von Druck und Geschwindigkeit² längs einer Stromlinie gegeben durch die Beziehung:

$$\frac{P}{\gamma} + h + \frac{w^2}{2g} = \text{const.} \quad (86)$$

Unter den gemachten Voraussetzungen ist also die Summe aus Druckhöhe (P/γ), Ortshöhe (h) und Geschwindigkeitshöhe ($w^2/2g$) konstant. Für zwei verschiedene Punkte der Stromlinie wird damit bei gleicher Ortshöhe:

$$P_1 - P = \frac{\gamma}{2g} (w^2 - w_1^2). \quad (87)$$

Beim Auftreffen der Flüssigkeitsströmung auf ein Hindernis wird die Geschwindigkeit im Staupunkt Null, es wird dann der Druckanstieg, der Staudruck, Geschwindigkeitsdruck oder der dynamische Druck (P_d):

$$P_d = P_1 - P = \frac{\gamma w^2}{2g} = P_g - P_{st}, \quad (88)$$

wenn der Gesamtdruck P_1 mit P_g (kg/m^2) und der statische Druck P mit P_{st} (kg/m^2) bezeichnet wird. Die Ermittlung des dynamischen Druckes ergibt alsdann die Strömungsgeschwindigkeit in dem betrachteten Punkt nach der Gleichung:

$$w = \sqrt{2g \frac{P_d}{\gamma}}. \quad (89)$$

Da für kompressible Flüssigkeiten das spezifische Gewicht γ (kg/m^3) eine Funktion des Druckes ist, muß die Veränderlichkeit jeweils berücksichtigt werden durch die Beziehung:

$$\int_{P_{st}}^{P_g} \frac{dP}{\gamma} = \frac{w^2}{2g}. \quad (90)$$

Eine Berücksichtigung hat erst bei größeren Geschwindigkeiten zu erfolgen. So z. B. ergibt sich für atmosphärische Luft bei $w = 60$ m/s gegenüber der Näherungsformel (88) erst ein Fehler von 0,75%³.

¹ Ergebnisse unveröffentlichter Versuche von K. J. Umpfenbach und G. Ruppel, entnommen dem Arch. techn. Messen V 1234—1 (1931).

² Die Geschwindigkeit wird hier mit w bezeichnet, zur Unterscheidung von dem spezifischen Volumen v .

³ Siehe Regeln für Leistungsversuche an Ventilatoren und Kompressoren, S. 12. Berlin 1926. — Der Chemie-Ingenieur, Bd. II/2, S. 194. Leipzig 1933.

Durch Feststellung der Geschwindigkeitsverteilung im Meßquerschnitt F und Berechnung der mittleren Geschwindigkeit w_m (s. S. 748) wird der Durchfluß $Q = F w_m$ erhalten bei dem vorliegenden Betriebszustand.

Bei gleichmäßiger Geschwindigkeitsverteilung läßt sich durch Einbau des Staugerätes in dem Punkte der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in bestimmten Fällen auch eine Dauermessung durchführen¹.

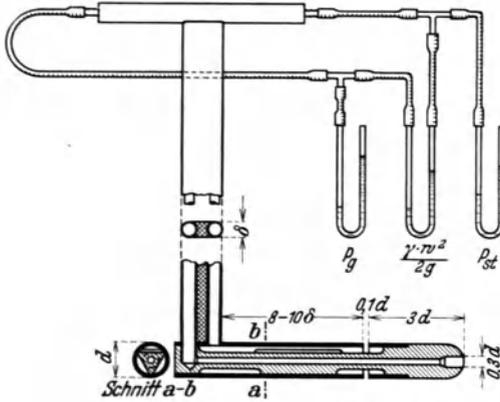


Abb. 140. Staugerät nach Prandtl.

Die Messung des Staudruckes, der sich als die Differenz zweier Drücke ergibt, wird ausgeführt mit den Staugeräten. Von den verschiedenen Ausführungsformen² sei hier nur das Staugerät nach Prandtl (Abbild. 140) angeführt. Dieses Staugerät erfüllt weitgehend die an ein solches Meßgerät zu stellenden Forderungen.

Durch Versuche sind die günstigsten Abmessungen ermittelt worden³, ihre genaue Einhaltung ist erforderlich für die Brauchbarkeit des Meßinstrumentes. Das Staugerät hat dann den Beiwert $\beta = 1$, gegen Schrägstellung ist es wenig empfindlich. Bis zu einem Winkel von etwa 17° gegen die Stromrichtung bleibt der gemessene dynamische Druck praktisch konstant.

Bei Wahrung der geometrischen Ähnlichkeit erübrigt sich eine besondere Eichung des Staugerätes.

Zuverlässige Geschwindigkeitsmessungen erfordern vorschriftsmäßigen Einbau und geordnete Strömung an der Meßstelle (lange gerade Rohrstücke, eventuell Einbau von besonderen Richtvorrichtungen). Bei stark turbulenten Querbewegungen in der Strömung nimmt der Beiwert — wie bei allen Staugeräten — um etwa 4% zu³.

Für feuchte, staub- oder teerhaltige Gase sind weite Bohrungen zur Verhinderung von störenden Verstopfungen notwendig.

Werden zur Druckmessung Flüssigkeitsmanometer mit Sperrflüssigkeiten vom spezifischen Gewicht γ_h (kg/m^3) benutzt und beträgt das Einheitsgewicht der Meßflüssigkeit γ (kg/m^3), dasjenige in der Manometerleitung γ' (kg/m^3), so wird mit h (mm) Druckdifferenz am Manometer

$$w = 0,14 \sqrt{\frac{\gamma_h - \gamma'}{\gamma} h} \text{ m/s.} \quad (91)$$

¹ Eine Einrichtung zur photographischen Registrierung des Staudruckes bei G. Bach: Forsch.-Arb. Ing.-Wes. 2, 218 (1931).

² Siehe z. B. L. Litinsky: Messung großer Gasmengen, S. 112. Leipzig 1922. — VDI-Regeln, Fußnote 3, S. 753.

³ Kumbuch, H.: Messung strömender Luft mittels Staugeräten. Forsch.-Arb. Ing.-Wes. 1921, Heft 240.

Zur Erhöhung der Meßgenauigkeit ist demnach die Sperrflüssigkeit für das Flüssigkeitsmanometer entsprechend der Strömungsgeschwindigkeit zu wählen. So z. B. wird für einen Zustand von 20° C und 1 at für die Messung von

Wasser	Luft
mit Quecksilber als Sperrflüssigkeit ($\gamma_h = 13564 \text{ kg/m}^3$)	
$w = 0,496 \sqrt{h} \text{ m/s}$	$w = 15,1 \sqrt{h} \text{ m/s}$
mit Äthylenbromid als Sperrflüssigkeit ($\gamma_h = 2172 \text{ kg/m}^3$)	
$w = 0,152 \sqrt{h} \text{ m/s}$	$w = 6,04 \sqrt{h} \text{ m/s}$
mit Wasser als Sperrflüssigkeit ($\gamma_h = 998 \text{ kg/m}^3$)	
$w = 0,14 \sqrt{h} \text{ m/s}^*$	$w = 4,0 \sqrt{h} \text{ m/s}$
mit Alkohol als Sperrflüssigkeit ($\gamma_h = 790 \text{ kg/m}^3$)	
	$w = 3,64 \sqrt{h} \text{ m/s}$

Um geringe Geschwindigkeiten bzw. Staudrücke zuverlässig erfassen zu können, läßt sich die nur für vorübergehende Messungen in Frage kommende Benutzung von Mikromanometern (s. S. 618) oder Druckwandlern¹ nicht immer umgehen.

Die Methode der Mengenummessung durch Ermittlung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit ist umständlich, erfordert längere Zeit, ist betriebsmäßig nur in bestimmten Fällen durchführbar und liefert aus den erwähnten Gründen im allgemeinen keine besonders große Genauigkeit. Zur Durchführung technischer Mengenummessungen sind die ebenfalls auf dem Bernoullischen Theorem beruhenden dynamischen Meßmethoden, welche zur Feststellung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit die an geometrisch ähnlichen Rohrverengungen auftretende Druckdifferenz benutzen, weit besser geeignet. Wegen der großen Bedeutung dieser Methoden für die Technik werden sie nachfolgend ausführlicher behandelt.

d) Geschwindigkeitsmessung bei Verwendung von Durchflußwiderständen. I. Die verschiedenen Drosselgeräte. Beim Durchströmen einer Flüssigkeit durch eine Rohrleitung tritt an jeder Querschnittsverengung eine Geschwindigkeitssteigerung ein, welche eine Änderung der vor und nach ihr gemessenen Drücke zur Folge hat. Die feststellbare Druckdifferenz, der Wirkdruck, kann zur Mengenummessung benutzt werden, wenn die strömungstechnischen Verhältnisse bekannt sind. Durch Eichung läßt sich in einem vorliegenden Fall der Zusammenhang zwischen dem Wirkdruck und dem Durchfluß ermitteln. Unter gewissen Voraussetzungen kann diese Abhängigkeit auf ein anderes Medium übertragen werden. Hierzu ist erforderlich, daß unter Beibehaltung der gleichen Drosselung, also bei Beachtung der geometrischen Ähnlichkeit der Anordnung, auch für die geometrische Ähnlichkeit der Flüssigkeitsbewegung (s. S. 728) gesorgt wird (gleiche Reynoldssche Zahlen). Geometrisch ähnliche Drosselungen, welche wegen ihrer Reproduzierbarkeit

* Bei Verwendung eines umgekehrten U-Rohrmanometers siehe Abb. 21, S. 613.

¹ Z. B. von den Askania-Werken, Berlin-Friedenau und Hydro-Apparatebauanstalt, Düsseldorf. Siehe z. B. Abb. 170, S. 795.

für die praktische Meßtechnik von besonderer Bedeutung sind, lassen sich leicht und sicher herstellen. Bei ihrer Verwendung lassen sich, wenn eindeutige Strömung vorausgesetzt wird, die einmal durch Eichung festgelegten Beziehungen zwischen dem Wirkdruck und der Durchflußgeschwindigkeit einwandfrei übertragen.

Von den vielen in der Meßtechnik entstandenen Drosselgeräten sollen an dieser Stelle nur die betriebswichtigsten erwähnt werden. Hierzu

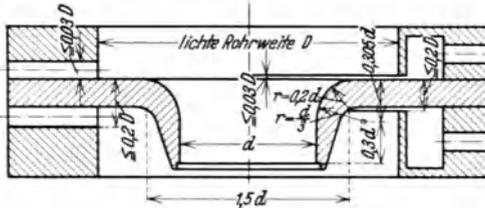


Abb. 141. Normdüse 1930.

gehören die Düsen und Blenden, deren Grundlagen soweit gesichert sind, daß sie in genormter Ausführung und, bei Beachtung gewisser Bedingungen, ohne besondere Eichung benutzt werden können. Weiterhin kommt das in manchen Fällen vorteilhaft zu benutzende Ven-

turirohr mit seinen Abarten in Frage. Bei diesen Drosselgeräten ist vorläufig noch eine jedesmalige Eichung erforderlich.

Eine besondere Förderung und Sicherung hat die Durchflußmessung mit Düsen und Blenden erfahren durch die genaue Ermittlung der Durchflußbeiwerte. Die für die chemische Großindustrie unbedingt erforderliche Messung der verschiedenartigsten Medien bis zu den höchsten

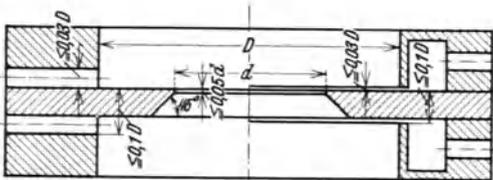


Abb. 142. Normblende 1930.

Drücken verlangte einwandfreie Grundlagen. Ausgedehnte Versuche wurden durchgeführt von F. Lappe¹ im Jahre 1910 an zwei von Weisbach angegebenen und seit 1912 in der damaligen BASF, der jetzigen I. G. Farbenindustrie, in

großem Umfange verwendeten Formen und neuerdings von R. Witte². Letztere haben die bis dahin gewonnenen Kenntnisse so grundlegend beeinflußt, daß die I. G.-Düse und die I. G.-Blende nicht nur von dem „Strömungsmesserausschuß“ des VDI als Deutsche Normdüse 1930 und Deutsche Normblende 1930 anerkannt, sondern auch von der International Federation of National Standardizing Associations (ISA) im Jahre 1932 als internationales Normgerät angenommen wurde³.

¹ Siehe Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. **72**, 1493 (1928).

² Witte, R.: Durchflußbeiwerte der I. G.-Meßmündungen für Wasser, Öl, Dampf und Gas. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. **72**, 1493 (1928). — Die Durchflußzahlen von Düsen und Staurändern. Techn. Mech. Thermodyn. **1**, 34, 72, 113 (1930). — Die Strömung durch Düsen und Blenden. Forsch.-Arb. Ing.-Wes. **2**, 245, 291 (1931); **5**, 205 (1934). — Weitere Literatur siehe Regeln für die Durchflußmessungen mit genormten Düsen und Blenden. Berlin 1932.

³ Arch. Wärmewirtsch. **13**, 223 (1932).

Die Abb. 141, 142 stellen Ausführungsarten der Deutschen Normdüse 1930 und der Deutschen Normblende 1930 dar¹. Von jeder Art sind zwei Formen gewählt, die sich dadurch unterscheiden, daß der Wirkdruck im einen Falle an zwei Einzelanbohrungen, im anderen Falle an zwei Ringkanälen gemessen wird. Es sind natürlich zur Druckentnahme auch andere Ausführungsformen zulässig. Wesentlich ist das Einhalten der Maße bei dem eigentlichen Drosselkörper und das Einhalten von Weite und Lage der Anbohrungen.

Die Normblende Abb. 142, ähnlich ausgeführt wie die frühere VDI-Normblende, ist für die Praxis durch ihre Einfachheit, leichte und genaue, mit nur geringen Kosten verbundene Herstellung besonders ausgezeichnet.

An Stelle der durch Abb. 142 dargestellten Normblende wird in der Praxis für größere Rohrdurchmesser auch eine ganz einfache Blende nach Abb. 143 benutzt. Das gut ausgerichtete Blech wird mit einer Lasche versehen zur Erleichterung des Ein- bzw. Ausbaus und zur Aufnahme der erforderlichen Daten (Durchmesser der Bohrung, Rohrdurchmesser, Strömungsrichtung). Wegen der Druckentnahmestellen sei auf die Ausführungen S. 772 hingewiesen. Durch die bewußt hervorgerufene starke Kontraktion liefert die Normblende einen wesentlich kleineren Durchfluß als die von gleichem Durchmesser (d) ausgeführte Normdüse bei gleichem Wirkdruck. Bei der Normdüse wird durch den allmählichen Übergang auf den engsten Düsenquerschnitt (d) mit dem zylindrischen Ansatzstück nahezu eine Kontraktionszahl $\mu = 1$ erreicht.

In dem Bestreben, die verschiedenartigen Düsen durch eine Normdüse zu ersetzen, hat der Verein Deutscher Ingenieure und der Verein Deutscher Maschinenbauanstalten bereits im Jahre 1912 eine von Prandtl und Regenbogen vorgeschlagene Form als VDI-Normdüse² mit geringen Abänderungen als Normdüse 1912³ ein-

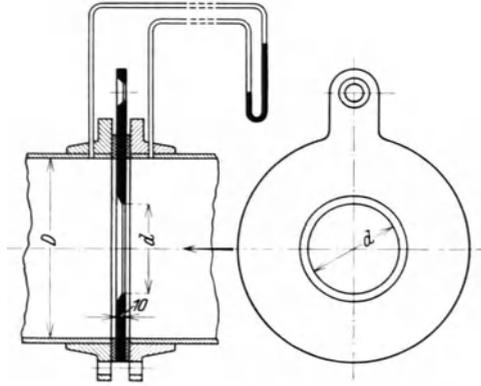


Abb. 143. Einfache Blende für große Rohrdurchmesser.

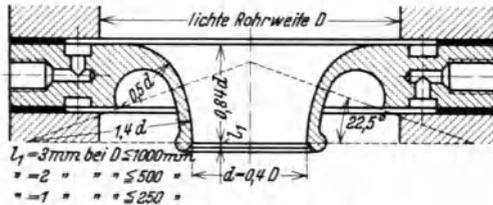


Abb. 144. Normdüse 1912.

¹ Über kleine Abänderungen siehe Regeln für die Durchflußmessung, 3. Aufl., 1934.

² Zeichnung der „VDI-Normaldüse“ siehe Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 56, 1838 (1912).

³ Zeichnung der „Normaldüse 1912“ siehe Regeln für die Durchflußmessung mit genormten Düsen und Blenden. Berlin 1930.

geführt. Die Abb. 144 stellt diese nur für ein konstantes Öffnungsverhältnis von $m = 0,16$ auszuführende Normdüse dar, bei welcher der Wirkdruck an zwei Ringkanälen entnommen wird.

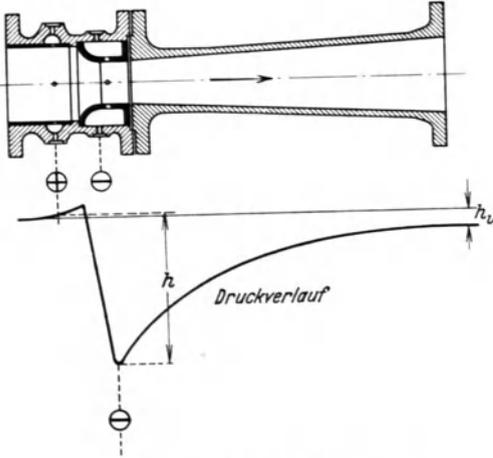


Abb. 145. Venturirohr (Bauart Bopp & Reuther).

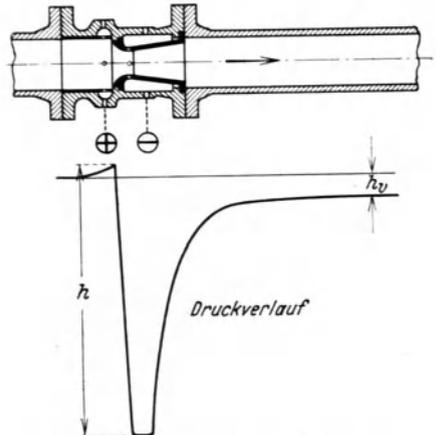


Abb. 146. Kurzventurirohr (Bauart Bopp & Reuther).

Bei dem Venturirohr und dem Kurzventurirohr (Abb. 145, 146) legt man im Gegensatz zu den Düsen und Blenden besonderes Gewicht auf den Rückgewinn des durch die Drosselung hervorgerufenen Druckverlustes.

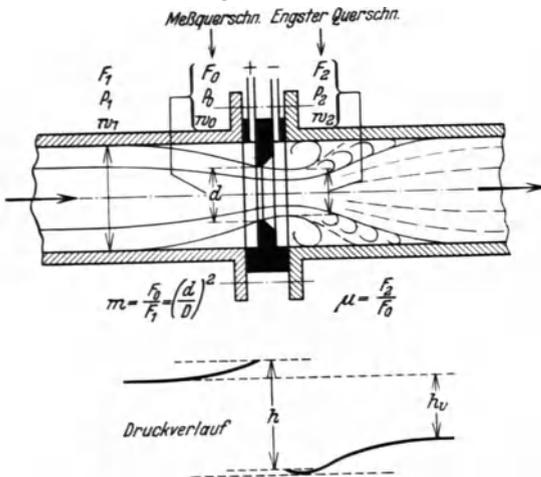


Abb. 147. Strömungsverlauf durch Drosselgeräte.

Als wesentlichstes Konstruktionselement ist dabei das Auslaufrohr zu betrachten, durch das ein geringer Energieverlust erreicht wird. Es kann also hier bei vorschriftsmäßigem Einbau ein größerer Wirkdruck unbedenklich zugelassen werden, da der Druck zum großen Teil wieder zurückgewonnen wird. Im Gegensatz zum Venturirohr weist das Kurzventurirohr einen steileren Kegelminkel auf, die konische Erweiterung wird dabei nicht bis zum vollen Rohrquerschnitt fortgesetzt (günstigere Baulänge), wobei der Energieverlust nur unwesentlich größer

ist als beim Venturirohr. Der Einlaufteil des Kurzventurirohres entspricht in dem durch Abb. 146 dargestellten Fall der Bauart der Normdüse „1930“.

II. Die Durchflußgleichungen. Die Grundgleichungen für die Durchflußmessungen von Flüssigkeiten. Der Strömungsvorgang tropfbarer Flüssigkeiten ist ein rein mechanischer, derjenige elastischer Flüssigkeiten (Dämpfe und Gase) ein thermodynamischer. Für den Fall, daß bei letzteren die infolge Druckänderungen auftretenden Raumänderungen vernachlässigbar klein sind, gelten auch für sie die für tropfbare Flüssigkeiten bestehenden Bewegungsgesetze.

Für eine volumbeständige Flüssigkeit bei stationärer (Geschwindigkeit nach Größe und Richtung unveränderlich), drehungsfreier Strömung ergibt sich nach dem Bernoullischen Gesetz, der Kontinuitätsgleichung sowie bei Einführung des Öffnungsverhältnisses $m = \frac{F_0}{F_1}$ und der Kontraktionszahl $\mu = \frac{F_2}{F_0}$ (Abb. 147) die theoretische Geschwindigkeit w_2 im engsten Strahlenquerschnitt zu:

$$(w_2)_{th} = \frac{1}{\sqrt{1 - m^2 \mu^2}} \sqrt{\frac{2g}{\gamma_1} (P_1 - P_2)} \text{ m/s.} \quad (92)$$

Da der Volumendurchfluß gleich dem Produkt ist aus der freien Fläche $F_2 = \mu F_0$ und der mittleren Geschwindigkeit w_2 , so wird der theoretische Durchfluß

$$(Q)_{th} = w_2 F_2 = w_2 \mu F_0 = \frac{\mu}{\sqrt{1 - m^2 \mu^2}} F_0 \sqrt{\frac{2g}{\gamma_1} (P_1 - P_2)} \text{ m}^3/\text{s}, \quad (93)$$

$$(G)_{th} = \frac{\mu}{\sqrt{1 - m^2 \mu^2}} F_0 \sqrt{2g \gamma_1 (P_1 - P_2)} \text{ kg/s.} \quad (93a)$$

Der Faktor

$$\frac{\mu}{\sqrt{1 - m^2 \mu^2}}$$

berücksichtigt die durch Kontraktion verursachte Verkleinerung des wirksamen Querschnittes F_0 und die Zulaufgeschwindigkeit. Alle bei inkompressiblen Flüssigkeiten neben der Kontraktion und der Zulaufgeschwindigkeit noch auftretenden und der Rechnung nicht zugänglichen Einflüsse werden mit ξ bezeichnet.

Beide Berichtigungsfaktoren lassen sich nur gemeinsam durch Eichung ermitteln, sie werden zusammengefaßt zu der Durchflußzahl α , die also die Form hat:

$$\alpha = \xi \cdot \frac{\mu}{\sqrt{1 - m^2 \mu^2}}. \quad (94)$$

Damit werden die für tropfbare Flüssigkeiten streng geltenden Durchflußformeln:

$$Q = \alpha F_0 \sqrt{\frac{2g}{\gamma_1} (P_1 - P_2)} \text{ m}^3/\text{s}, \quad (95)$$

$$G = \alpha F_0 \sqrt{2g \gamma_1 (P_1 - P_2)} \text{ kg/s.} \quad (95a)$$

Diese Formeln sind, wie oben erwähnt, auch für kompressible Flüssigkeiten gültig, wenn bei den Strömungsvorgängen durch das Drosselgerät nur kleine, vernachlässigbare Änderungen des spezifischen Volumens auftreten. In vielen Fällen aber ist eine Vernachlässigung der Expansionen nicht angängig.

Wenn die Volumenänderung in dem Drosselgerät ohne Wärmezufuhr und -abfuhr vor sich geht, ist nach der Poissonschen Adiabatengleichung der Zusammenhang des spezifischen Volumens gegeben. Es ist:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\gamma_2}{\gamma_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{\kappa}}.$$

Mit dieser Beziehung sowie mit μ_k als Kontraktionszahl der kompressiblen Flüssigkeiten ergibt sich für das Durchflußgewicht die Gleichung:

$$G = \xi \cdot \frac{\mu_k}{\sqrt{1 - m^2 \mu_k^2}} \sqrt{\frac{1 - m^2 \mu_k^2}{1 - m^2 \mu_k^2 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{2}{\kappa}}}} \cdot \sqrt{\frac{P_1}{P_1 - P_2} \frac{\kappa}{\kappa - 1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa}} \right]} F_0 \sqrt{2g(P_1 - P_2) \gamma_1} \text{ kg/s.} \quad (96)$$

Für die praktischen Messungen werden wiederum alle der theoretischen Betrachtung nicht zugänglichen Einflüsse in eine empirisch zu bestimmende Durchflußzahl zusammengefaßt, für kompressible Flüssigkeiten sei diese mit α_k bezeichnet, also:

$$\alpha_k = \xi \frac{\mu_k}{\sqrt{1 - m^2 \mu_k^2}}. \quad (97)$$

Führt man für sämtliche Einflüsse, welche bei den kompressiblen Flüssigkeiten durch die adiabatische Expansion hervorgerufen werden, den Berichtigungsfaktor ε ein und setzt

$$\varepsilon = \frac{\alpha_k}{\alpha} \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_1, \quad (98)$$

wobei

$$\varepsilon_0 = \sqrt{\frac{P_1}{P_1 - P_2} \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa}} \right]} \text{ und} \quad (98a)$$

$$\varepsilon_1 = \sqrt{\frac{1 - m^2 \mu_k^2}{1 - m^2 \mu_k^2 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{2}{\kappa}}}},$$

so wird nunmehr für alle Drosselgeräte und für alle Flüssigkeiten die ganz allgemein gültige Durchflußformel:

$$Q = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{2g \frac{P_1 - P_2}{\gamma_1}} \text{ m}^3/\text{s}, \quad (99)$$

wobei Q auf den Zustand vor dem Drosselgerät bezogen ist. Entsprechend ergibt sich für das Durchflußgewicht die allgemeine Gleichung:

$$G = \alpha \cdot \varepsilon F_0 \sqrt{2g(P_1 - P_2) \gamma_1} \text{ kg/s.} \quad (99a)$$

Allgemeine Gebrauchsformeln für die Durchflußmessung von Flüssigkeiten. Die praktische Meßtechnik gibt den abgeleiteten Grundformeln eine Form, wobei Nebenrechnungen möglichst vermieden werden.

An Stelle des engsten Querschnittes der Drosselgeräte wird der Durchmesser d (mm) eingeführt und für den in kg/m^2 einzusetzenden Wirkdruck $(P_1 - P_2)$ der leicht feststellbare entsprechende Druck einer Flüssigkeitssäule von h mm Höhe und dem spezifischen Gewicht γ_h

(kg/l) gesetzt. Dadurch wird das stündliche Durchflußvolumen auf den Zustand vor dem Drosselgerät bezogen:

$$Q = 0,012524 \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \sqrt{\frac{\gamma_h}{\gamma_1}} \sqrt{h} \text{ m}^3/\text{h} \quad (100)$$

und das Durchflußgewicht:

$$G = 0,012524 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \sqrt{\gamma_h \cdot \gamma_1} \sqrt{h} \text{ kg/h.} \quad (100a)$$

Wird außerdem noch berücksichtigt, daß sich in dem zur Messung des Wirkdruckes benutzten Differentialmanometer und in den Druckentnahmeleitungen die zu messende Flüssigkeit oder eine Schutzflüssigkeit vom spezifischen Gewicht γ' (kg/l) befindet, so ergeben sich nachstehende, für alle Flüssigkeiten ganz allgemein gültige Gebrauchsformeln: für das Durchflußvolumen vom Zustand vor dem Drosselgerät

$$Q = 0,012524 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \sqrt{\frac{\gamma_h - \gamma'}{\gamma_1}} \sqrt{h} \text{ m}^3/\text{h}, \quad (101)$$

für das Durchflußgewicht

$$G = 0,012524 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \sqrt{(\gamma_h - \gamma') \gamma_1} \cdot \sqrt{h} \text{ kg/h.} \quad (101a)$$

Spezielle Gebrauchsformeln für die Durchflußmessung von Flüssigkeiten. Aus den in der Praxis gebräuchlichen Grundformeln ergeben sich die in Tabelle 30 zusammengestellten speziellen Gebrauchsformeln für die Mengemessung der verschiedensten Flüssigkeiten.

Tabelle 30. Zusammenstellung der Formeln zur Flüssigkeitsmessung mit Drosselgeräten.

I. Allgemeine Grundformel:

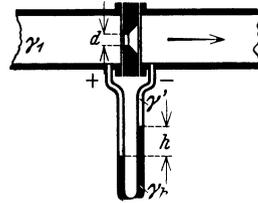
$$Q = \alpha \cdot \varepsilon \cdot F_0 \cdot \sqrt{2g \frac{P_1 - P_2}{\gamma_1}} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$G = \alpha \cdot \varepsilon \cdot F_0 \cdot \sqrt{2g (P_1 - P_2) \gamma_1} \text{ kg/s}$$

II. Allgemeine Gebrauchsformel:

$$Q = 0,012524 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \sqrt{\frac{\gamma_h - \gamma'}{\gamma_1}} \cdot \sqrt{h} \text{ m}^3/\text{h}$$

$$G = 0,012524 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \sqrt{(\gamma_h - \gamma') \cdot \gamma_1} \sqrt{h} \text{ kg/h}$$



III. Spezielle Gebrauchsformeln:

A. Für inkompressible Flüssigkeiten:

$$Q_{P,T} = 0,3961 \cdot \alpha \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{\gamma_h - \gamma'}{\gamma}} \cdot \sqrt{h} \text{ l/h}$$

$$Q_n = 0,3961 \cdot \alpha \cdot d^2 \sqrt{(\gamma_h - \gamma') \frac{\gamma}{\gamma_n^2}} \cdot \sqrt{h} \text{ nl/h}$$

$$G = 0,3961 \cdot \alpha \cdot d^2 \sqrt{(\gamma_h - \gamma') \gamma} \cdot \sqrt{h} \text{ kg/h}$$

Beispiel: Wasser von 20° C und Quecksilber als Sperrflüssigkeit

$$G = 1,4029 \cdot \alpha \cdot d^2 \sqrt{h} \text{ kg/h}$$

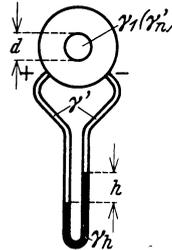


Tabelle 30. Zusammenstellung der Formeln zur Flüssigkeitsmessung mit Drosselgeräten (Fortsetzung).

<p>B. Für kompressible Flüssigkeiten:</p> <p>a) Dämpfe</p> $Q_{P_1, T_1} = 0,012524 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \sqrt{(\gamma_h - \gamma') \frac{1}{\gamma_1}} \cdot \sqrt{h} \text{ m}^3/\text{h}$ $G = 0,012524 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \sqrt{(\gamma_h - \gamma') \frac{1}{v_1}} \cdot \sqrt{h} \text{ kg/h}$ <p>Beispiel: Wasserdampf und Quecksilber als Sperrflüssigkeit bei 20°C</p> $G = 0,04436 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \sqrt{\frac{1}{v_1}} \cdot \sqrt{h} \text{ kg/h}$	
<p>b) Trockene Gase</p> $Q_{P_1, T_1} = 0,012524 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \sqrt{\frac{\gamma_h - \gamma'}{\gamma_1}} \cdot \sqrt{h} \text{ m}^3/\text{h}$ $Q_n = 0,012524 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \sqrt{\frac{(\gamma_h - \gamma')}{\gamma_n^2}} \cdot \gamma_1 \cdot \sqrt{h} \text{ nm}^3/\text{h}$ $Q_n = 0,012524 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \sqrt{\frac{(\gamma_h - \gamma')}{\gamma_n}} \cdot \sqrt{\frac{P_1 \cdot T_n}{P_n \cdot T_1}} \cdot \sqrt{\frac{1}{K}} \cdot \sqrt{h} \text{ nm}^3/\text{h}$ $G = 0,012524 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \sqrt{(\gamma_h - \gamma') \cdot \gamma_n} \cdot \sqrt{\frac{P_1}{P_n} \cdot \frac{T_n}{T_1}} \cdot \sqrt{\frac{1}{K}} \cdot \sqrt{h} \text{ kg/h}$	
<p>c) Feuchte Gase</p> $Q_n = 0,012524 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \sqrt{\gamma_h - \gamma'} \cdot \frac{P_1 - \varphi \cdot P_D}{P_n}$ $\cdot \frac{T_n}{T_1} \sqrt{\frac{1}{\frac{P_1 - \varphi \cdot P_D}{P_n} \cdot \frac{T_n}{T_1} \cdot \gamma_n + \gamma_D}} \cdot \sqrt{h} \text{ nm}^3/\text{h}$ <p>Näherungsformel</p> $Q_n = 0,012524 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{\gamma_h - \gamma'}{\gamma_n} \cdot \frac{P_1 - \varphi \cdot P_D}{P_1}} \cdot \sqrt{\frac{P_1 \cdot T_n}{P_n \cdot T_1}} \cdot \sqrt{h} \text{ nm}^3/\text{h}$	

In der Zusammenstellung bedeuten:

- Q das Durchflußvolumen im Zustand vor dem Drosselgerät. $\text{m}^3/\text{s}, \text{m}^3/\text{h}$
- Q_n das Durchflußvolumen bei Normalzustand $\text{nl}/\text{h}, \text{nm}^3/\text{h}$
- G das Durchflußgewicht. $\text{kg}/\text{s}, \text{kg}/\text{h}$
- α die Durchflußzahl
- ε die Expansionsberichtigung
- F_0 der freie Querschnitt in. m^2
- P_1 der absolute statische Druck vor dem Drosselgerät in . . kg/m^2
- P_2 der absolute statische Druck nach dem Drosselgerät in . . kg/m^2
- $P_1 - P_2$ der Wirkdruck in kg/m^2

h	der Wirkdruck gemessen mit Sperrflüssigkeit in	mm
P_D	der Sättigungsdruck des Dampfes bei T_1 in	kg/m ²
P_n	der absolute statische Normaldruck vor dem Drosselgerät in	kg/m ²
T_1	die absolute Temperatur vor dem Drosselgerät	° K
T_n	die absolute Normaltemperatur vor dem Drosselgerät	° K
d	der freie Durchmesser des Drosselgerätes bei Betriebs- temperatur in	mm
γ_h	das spezifische Gewicht der Sperrflüssigkeit im Differential- manometer bei Umgebungstemperatur in	kg/l
γ'	das spezifische Gewicht der Flüssigkeit in der Druck- entnahmeleitung bei Umgebungstemperatur in	kg/l
γ_1	das spezifische Gewicht der strömenden Flüssigkeit im Zustand vor dem Drosselgerät in	kg/m ³
γ	das spezifische Gewicht der strömenden Flüssigkeit im Zustand vor dem Drosselgerät in	kg/l
γ_n	das spezifische Gewicht der strömenden Flüssigkeit im Normalzustand in	kg/nm ³
γ'_n	das spezifische Gewicht der strömenden Flüssigkeit im Normalzustand in	kg/nl
γ_D	das spezifische Gewicht des Dampfes bei T_1	kg/m ³
v_1	das spezifische Volumen der strömenden Flüssigkeit im Zustand vor dem Drosselgerät in	m ³ /kg
φ	die relative Feuchtigkeit	
K	Korrektur zur Berücksichtigung der Abweichung vom Gasgesetz	

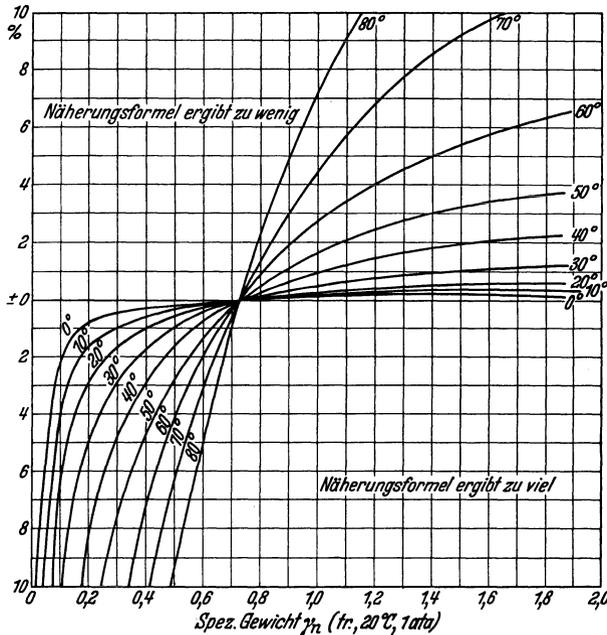


Abb. 148. Korrektur der Näherungsformel für mit Wasserdampf gesättigte Gase bei $P_1 = 760$ mm QS Gesamtdruck. (Spezifisches Gewicht γ_n des trockenen Gases bezogen auf 20° C und 1 ata.)

Die Berichtigungsfaktoren α und ϵ sind den Abb. 149—156 zu entnehmen. Wenn es sich um Messungen bei höheren Betriebstemperaturen

handelt, ist der Temperatureinfluß auf das Öffnungsverhältnis $m = (d/D)^2$ zu beachten, da sich dieses bei verschiedenartigen Materialien ändern kann. Außerdem ist die Änderung des freien Querschnittes durch die Betriebstemperatur zu berücksichtigen. Bei Gasmessungen wird in den meisten Fällen der über der Sperrflüssigkeit befindliche Stoff vom

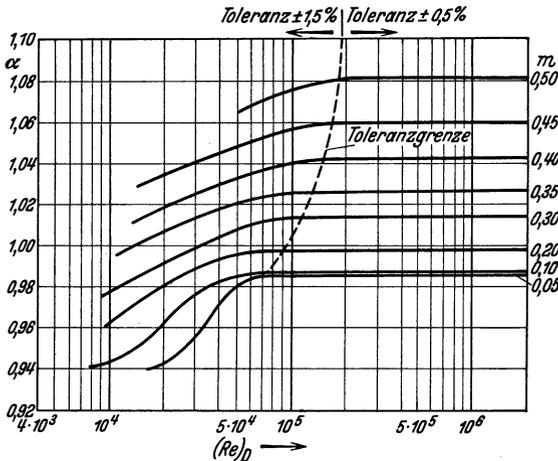


Abb. 149. Durchflüßzahlen α der Normdüse 1930 als Funktion von $(Re)_D$. (Nach Witte.)

spezifischen Gewicht γ' (kg/l) zu vernachlässigen sein (also $\gamma' = 0$), da er erst bei höheren Drücken die Differenz $(\gamma_h - \gamma')$ kg/l merklich beeinflusst. Ebenso tritt auch das Korrektionsglied K wie aus den Abb. 113 und 117 zu ersehen ist, erst bei höheren Drücken in Erscheinung. Für feuchte Gase kann weiterhin in vielen Fällen von einer Änderung des spezifischen Gewichtes des trockenen Gases durch den Dampfgehalt abgesehen werden, so daß die aufgeführte Näherungsformel mit der bekannten Beziehung zur Reduktion auf Trockenheit Ergebnisse mit ausreichender Genauigkeit liefert. Der graphischen Darstellung (Abb. 148) ist zu entnehmen, bis zu welchen Betriebstemperaturen die Näherungsformel verwendet werden darf, ohne einen nennenswerten Fehler zu begehen.

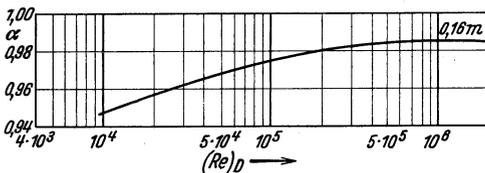


Abb. 150. Durchflüßzahlen α der Normdüse 1912 als Funktion von $(Re)_D$.

formel verwendet werden darf, ohne einen nennenswerten Fehler zu begehen.

III. Die Berichtigungsfaktoren. Die vorstehend abgeleiteten Durchflüßformeln enthalten Berichtigungsfaktoren zur Angleichung der theoretischen an die tatsächliche Durchflüßmenge, und zwar die Durchflüßzahl α und die Expansionsberichtigung ϵ .

die tatsächliche Durchflüßmenge, und zwar die Durchflüßzahl α und die Expansionsberichtigung ϵ .

Die Durchflüßzahl α ist nur empirisch zu bestimmen. Für günstige Einbauverhältnisse und Verwendung der genormten Drosselgeräte liegen die Durchflüßzahlen nunmehr fest.

Die Kontraktionszahl μ , welche bei den Blenden 0,6—0,7 und bei den Düsen ~ 1 ist, ist kennzeichnend für die Größe der Durchflüßzahl α . Der Wert α beträgt bei den Blenden etwa 0,6—0,84, bei den Düsen und Venturirohren etwa 0,96—1,1, und zwar je nach dem Öffnungsverhältnis m . Eine Abhängigkeit der Durchflüßzahl von dem Rohrdurchmesser besteht nicht, weder bei den Normdüsen noch bei den Normblenden,

wenn hier die Einlaufkante streng scharf und das Rohr glatt ist [R. Witte: Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 74, 47 (1930)]. Als glatte Rohre können die Betriebsrohre mit einem Durchmesser $D > 300$ mm angesehen werden.

Von besonderer Wichtigkeit ist noch der Einfluß der Zähigkeits- und Trägheitskräfte auf die Durchflußzahl. Durch sie wird eine ungleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt und unter Umständen eine Strahlablösung verursacht. Ihr Einfluß kommt deutlich zur Geltung, wenn die durch Versuche ermittelten Durchflußzahlen als Funktion von der Reynoldsschen Zahl aufgetragen werden. Bei dieser Darstellung zeigt sich, daß α für die verschiedenen Drosselgeräte keine Konstante ist. Die für die praktische Meßsicherheit erforderliche Konstanz der

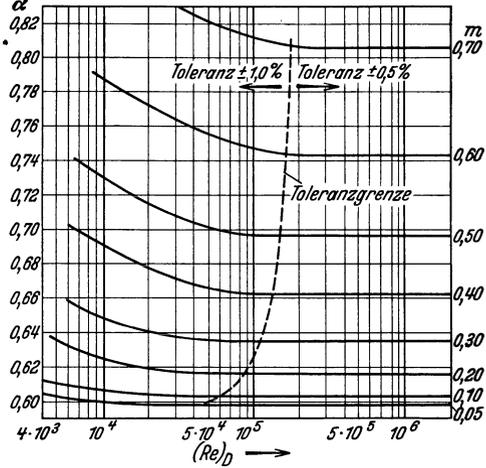


Abb. 151. Durchflußzahlen α der Normblende 1930 als Funktion von $(Re)_D$.

Durchflußzahl ist vielmehr erst von einer gewissen Reynoldsschen Zahl ab¹ vorhanden. Bei kleineren Reynoldsschen Zahlen führen die hierbei überwiegenden Zähigkeitskräfte zu einer Veränderung der Durchflußzahl, welche — wie aus den folgenden Abb. 149—151 zu ersehen ist — je nach der Art des Drosselgerätes verschieden ist.

Für Venturirohre und Kurzventurirohre ist der Verlauf der α -Kurven ähnlich. Diese Meßgeräte verlangen jedoch eine jedesmalige Eichung.

Die Konstanz der Beiwerte liegt erst oberhalb der eingezeichneten „Toleranzgrenze“ vor. Im konstanten Gebiet sind die Durchflußzahlen bis auf $\pm 0,5\%$ genau, wenn vorschriftsmäßige Ausführung, günstiger Einbau und einwandfreie Strömungsverhältnisse² vorliegen. Für

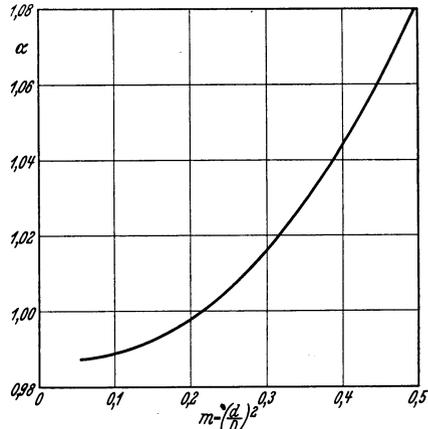


Abb. 152. Durchflußzahlen α der Normdüse 1930 als Funktion von m oberhalb der Toleranzgrenze.

¹ In Abb. 149 und 151 wird die Grenze der konstanten Durchflußbeiwerte durch die „Toleranzgrenze“ angegeben.

² Siehe Regeln für die Durchflußmessung mit genormten Düsen und Blenden. Berlin 1932 und die in Vorbereitung befindliche Neuauflage 1934. — Witte, R.: Durchflußzahlen von Düsen und Staurändern. Techn. Mech. Thermodyn. 1, 78 (1930). — Euler, H.: Blenden für die Strömungsmessung. Arch. Eisenhüttenwes. 6, 95 (1932—33).

den konstanten Bereich können die Durchflußzahlen in Abhängigkeit von dem Öffnungsverhältnis m dargestellt werden (Abb. 152—154).

Grundbedingung ist die einwandfreie Herstellung der Drosselgeräte und die Beachtung der geometrischen Ähnlichkeit, zu der auch die Beschaffenheit der Oberflächen (Rauigkeit) gehört. Die Rohrrauigkeit ist nach Witte bei den Düsen bis $m = 0,4$ ohne Einfluß, bei den Blenden erst oberhalb von 300 mm Rohrdurchmesser. Für Blenden in

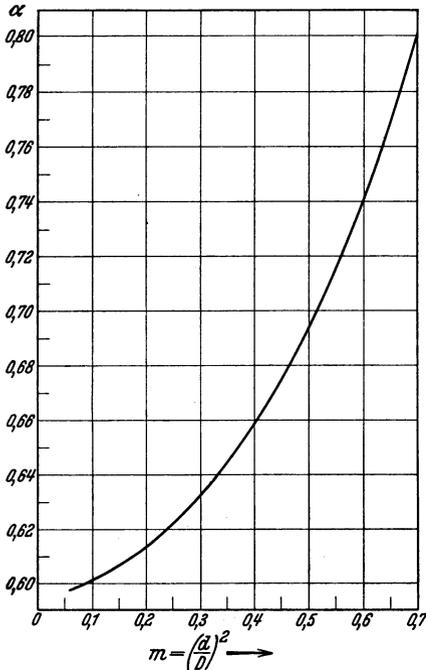


Abb. 153. Durchflußzahlen α der Normblende 1930 als Funktion von m oberhalb der Toleranzgrenze für scharfe Kante und glatte Röhre.

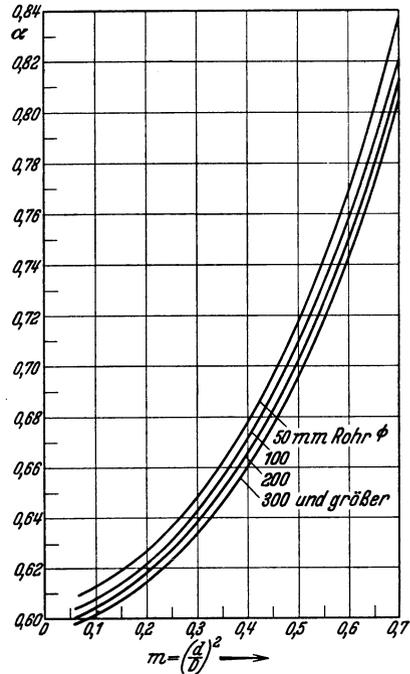


Abb. 154. Durchflußzahlen α der Normblende 1930 normaler Werkstattaussführung als Funktion von m für betriebsraue Röhre von 50–300 mm und größere Rohrdurchmesser.

glatten Röhren kleineren Durchmessers ist eine streng scharfe Einlaufkante von besonderer Wichtigkeit. Bei normaler Werkstattaussführung bis zu Rohrdurchmessern von 300 mm sind sonst die Durchflußzahlen der Abb. 154 zu entnehmen¹.

Bei den technischen Messungen kommen im allgemeinen Reynoldsche Zahlen oberhalb der Toleranzgrenze in Frage. Eine überschlägige Berechnung von $(Re)_D$ (s. S. 729) genügt hier zur Feststellung des Grenzwertes. Sehr kleine Werte von $(Re)_D$, wie sie vorliegen bei Flüssigkeiten großer Zähigkeit, heißen Gasen oder kleinen Geschwindigkeiten und Rohrdurchmessern, führen in den Bereich der veränderlichen Durchflußzahlen. Hier

¹ Näheres siehe R. Witte: Durchflußzahlen von Düsen und Staurändern. Techn. Mech. Thermodyn. 1, 35f. (1930).

sind sorgfältige Eichungen der genormten Meßgeräte zur Feststellung der α -Werte erforderlich. Durch besondere Profilgebung¹ läßt sich bei den Drosselgeräten eine Konstanz der Durchflußzahlen auch für kleinere Reynoldssche Zahlen erreichen.

Die Expansionsberichtigung ε umfaßt sämtliche Einflüsse, welche bei den kompressiblen Flüssigkeiten durch die adiabatische Expansion hervorgerufen werden. Sie ist abhängig von κ , P_2/P_1 , m und μ . Für kontraktionsfreie Drosselgeräte, für welche $\mu \approx \mu_k \approx 1$ und damit

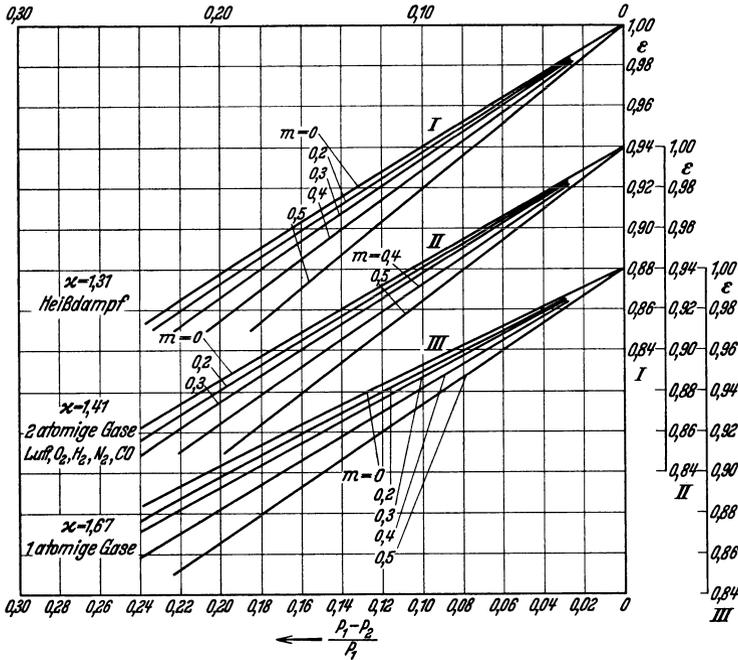


Abb. 155. Expansionsberichtigung ε für kontraktionsfreie Drosselgeräte (Düsen) abhängig von κ , $(P_1 - P_2)/P_1$ und m .

$\alpha_k/\alpha = 1$, wird nach Gleichung (98) $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_1$. Die für diesen Fall mit Gleichung (98a) berechnete Korrektur ε ist in voller Übereinstimmung mit den bei Düsen erhaltenen experimentellen Ergebnissen bis herab zum kritischen Druckverhältnis². Abb. 155 gibt die Werte von ε für $\kappa = 1,31$, $\kappa = 1,41$ und $\kappa = 1,67$ wieder für Reynoldssche Zahlen oberhalb der Toleranzgrenze.

¹ Siehe Der Chemie-Ingenieur, Bd. II/2, S. 207. Leipzig 1933. — Witte, R.: Durchflußzahlen von Düsen und Staurändern. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 74, 50 (1930); Forschg. Ing.-Wes. 2, 299 (1931). — Giese, H. G.: Mengemessung mit Düsen und Blenden bei kleinen Reynoldsschen Zahlen (Re)_d. Forschg. Ing.-Wes. 4, 11 (1933). — Hansen, M.: Düsen und Blenden bei kleinen Reynoldsschen Zahlen. Forschg. Ing.-Wes. 4, 64 (1933).

² Beim kritischen Druckverhältnis $(P_2/P_1)_{kr} = [2/(\kappa + 1)]^{\kappa/(\kappa - 1)}$ erreicht die Geschwindigkeit in gewöhnlichen Drosselgeräten ihren größten Wert, und zwar die Schallgeschwindigkeit in der Flüssigkeit beim Mündungszustand. Siehe z. B. W. Schule: Technische Thermodynamik, Bd. I, S. 322. Berlin 1921.

Für Blenden ($\mu < 1$) dagegen muß noch eine Vergrößerung des engsten Strahlquerschnittes durch radiale Expansion berücksichtigt werden. Versuche zur theoretischen Deutung der nach Gleichung (98 a)

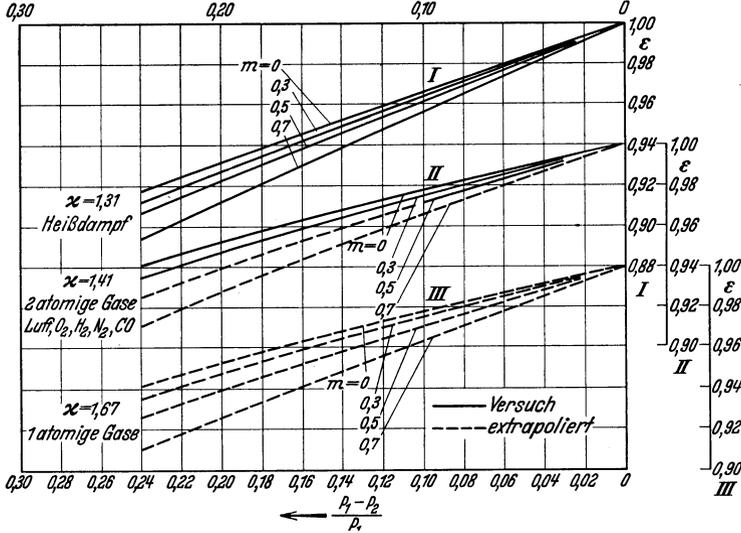


Abb. 156. Expansionsberichtigung ϵ für Blenden abhängig von κ , $\frac{P_1 - P_2}{P_1}$ und m .

errechneten und von den Versuchsergebnissen abweichenden Werte sind mehrfach unternommen¹ worden, haben aber noch nicht restlos befriedigt. In der Abb. 156 sind die empirisch ermittelten Expansionsberichtigungen ϵ für die Normblende und Werte von $(Re)_D$ oberhalb der Grenzwerte graphisch dargestellt.

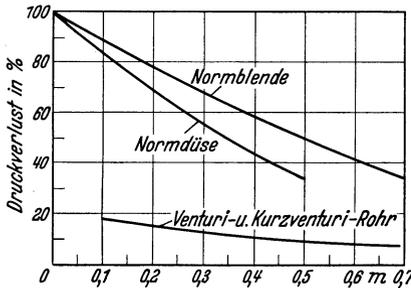


Abb. 157. Bleibender Druckverlust für verschiedene Drosselgeräte in % des Wirkdruckes $P_1 - P_2$. (Für Venturirohre und Kurzventurirohre nach Bopp & Reuther².)

IV. Der bleibende Druckverlust. Der Einbau von Drosselgeräten in Rohrleitungen verursacht einen bleibenden Druckverlust, dessen Größe in vielen Fällen für die Wirtschaftlichkeit der Mengemessung ausschlaggebend ist. Der Verlust kann mit hinreichender Genauigkeit berechnet werden nach der Carnotschen Stoßgleichung

$$\Delta P_v = (P_1 - P_2) \frac{1 - \mu m}{1 + \mu m} \tag{102}$$

oder für Blenden nach der Faustregel

$$\Delta P_v = (P_1 - P_2) (1 - m) \tag{103}$$

¹ Literaturangabe siehe Der Chemie-Ingenieur, Bd. II/2, S. 205. Leipzig 1933. — Forschg. Ing.-Wes. 4, 186 (1933).

² Werte nur zur vorläufigen Beurteilung des Druckverlustes, da diese in vielen Fällen — besonders bei großen Durchmessern — günstiger liegen.

Zur Beurteilung des Druckverlustes kann die Darstellung der Abb. 157 dienen, wo der experimentell ermittelte Druckverlust in % des Wirkdruckes in Abhängigkeit von m dargestellt ist. Es sei jedoch betont, daß bei gleichem Durchfluß und (durch entsprechende Wahl der freien Mündungsdurchmesser) bei gleichem Wirkdruck Düse und Blende gleichen Druckverlust hervorrufen.

V. Die Differenzdruckmesser. Zur Messung des Wirkdruckes werden Manometer benötigt, die in verschiedensten Bauarten entsprechend den jeweils zu erfüllenden Aufgaben ausgeführt werden. Es kommen für technische Messungen in Frage: Anzeigeeinstrumente, Registrierinstrumente, Zähler, Kombinationen aus diesen Grundarten ohne und mit besonderer Einrichtung zur Fernübertragung. Auf die einzelnen Konstruktionen kann hier nicht eingegangen werden¹. Es sei nur darauf hingewiesen, daß bei den einfachen Anzeigeeinstrumenten im allgemeinen

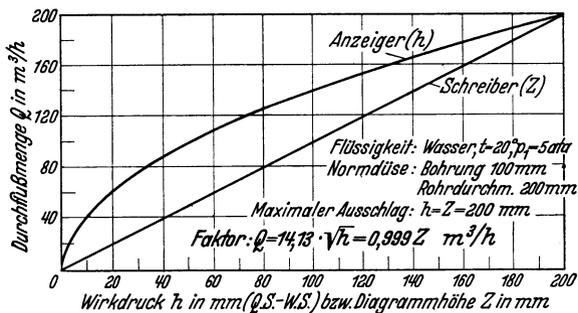


Abb. 158. Wirkdruck h und Diagrammhöhe Z eines Differenzdruckanzeigers und -schreibers in Abhängigkeit von dem Durchfluß Q .

der Ausschlag des Differenzdruckmessers proportional dem Wirkdruck h ist (z. B. beim U -Rohr)², daß jedoch bei den Registrierinstrumenten, den Zählern usw. durch besondere Radiziereinrichtungen Proportionalität zwischen dem Durchfluß Q und der auf das Meßinstrument übertragenen Größe (z. B. Diagrammhöhe Z) herbeigeführt werden muß.

Gemäß der Bedingung

$$\sqrt{h} = c Z, \quad (104)$$

wobei c der Proportionalitätsfaktor, wird damit

$$Q = C c Z = C' Z, \quad (105)$$

wo wieder C und C' Konstanten sind.

Die Abb. 158 läßt für ein Registrierinstrument³, bei dem für normale

¹ Siehe S. 637. Weiter sei auf die Druckschriften der verschiedensten Herstellerfirmen verwiesen. Zusammenfassungen siehe Der Chemie-Ingenieur, Bd. II/2, S. 222—227, 246—251. Leipzig 1933. — Gramberg, A.: Technische Messungen bei Maschinenuntersuchungen und zur Betriebskontrolle, S. 91, 241. Berlin 1933. — Siemens-Ztschr. 1916, Heft 3. — Mitteilung der Wärmestelle Düsseldorf, Mitt. Nr. 76, Ausgabe 4 usw. Siehe auch Fußnote 1, S. 731.

² Bei den mit Zifferblatt ausgerüsteten Anzeigegeräten, den sog. Meßuhren, ist die Skala für die Durchflußmenge meistens gleichmäßig eingeteilt.

³ Z. B. für die normale I.G.-Differenzdruckwaage, siehe A. Eucken u. M. Jakob: Der Chemie-Ingenieur, Bd. II/1, S. 23. Leipzig 1932; Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 77, 313 (1933).

Empfindlichkeit die maximale Diagrammhöhe $Z = 200$ mm einem Ausschlag $h = 200$ mm der Sperrflüssigkeit eines parallel geschalteten U-Rohres entspricht, diese Beziehung ohne weiteres erkennen.

Bei den Diagrammen mit gleichmäßiger Einteilung wird die mittlere Diagrammhöhe leicht und genau durch Planimetrierung ermittelt und mit der Beziehung (104) und der Durchflußformel die durchgeflossene Menge errechnet. Zur Ersparung dieser Arbeit werden die Registrierinstrumente ersetzt (auch ergänzt) durch Geräte mit unmittelbarer Planimetriervorrichtung, mit Zählleinrichtungen. Die mit dem Instrument direkt verbundenen mechanischen Integriereinrichtungen werden bisher weniger häufig benutzt als die zur Summierung bzw. Integrierung weit besser geeigneten elektrischen Zähler¹. Bei diesen ist nur der zur elektrischen Abbildung² benötigte, möglichst reibungsfrei arbeitende Geber, meistens ein Wechselstrom- oder Gleichstromwiderstand, mit dem Differenzdruckmesser gekuppelt. Hierbei ist neben der leichten Fernübertragung (Fernzählung und Fernregistrierung) eine Registrierung mehrerer miteinander in gewisser Beziehung stehender Größen (z. B. Menge, Druck, Temperatur usw.) auf einem Diagramm, die Addition mehrerer Meßwerte (z. B. Dampfaufnahme mehrerer Verbrauchsstellen)³, sowie die wichtige Korrektur der vom Normalzustand abweichenden Zustandsgrößen automatisch durchführbar⁴.

VI. Sicherung der Durchflußmessung mit Drosselgeräten. Die Drosselgeräte sind infolge ihrer vielseitigen Verwendungsmöglichkeit zur Mengenummessung für die Technik unentbehrlich geworden. Mit ihrer Hilfe lassen sich Mengenermittlungen von Flüssigkeiten beliebigen Zustandes durchführen, solange homogene Beschaffenheit vorliegt und die Strömung frei von Pulsation ist. Da die Mengenummessung bei pulsierenden Strömungen noch nicht zuverlässig durchgeführt werden kann, bleibt sie wie bisher auch weiterhin außer Betracht⁵. Die in der

¹ Selbsttätige mechanische Integrierwerke siehe A. Eucken u. M. Jakob: Der Chemie-Ingenieur, Bd. II/1, S. 31. Leipzig 1932. — Schaack, M. u. H. Lohmann: Doppelzählerwerke für Durchflußmesser. Meßtechn. 9, 23 (1933). — Lohmann, H.: Orts-, Fern- und Summenzählung strömender Mengen industrieller Stoffe mittels mechanischer Zählwerke. Wärme 55, 381 (1932). — Ein neues mechanisches Zählwerk für Strömungsmeßgeräte. Siemens-Ztschr. 1931, Heft 4, 180. — Rein mechanisches Rastenzählwerk für Strömungsmesser. Meßtechn. 9, 168 (1933). — Elektrisch zählende Mengenummesser: Der Chemie-Ingenieur, Bd. II/2, S. 247. Leipzig 1933.

² Elektrische Abbildung von Meßwerten siehe A. Gramberg: Fußnote 1, S. 769; S. 36. Der Chemie-Ingenieur, Bd. II/1, S. 67. Leipzig 1932.

³ Groß, K.: Grundzüge und Anwendungsgebiete der Fernmessung. Wärmestelle des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute, Mitt. Nr. 109. — Sothen, B. v.: Fernmessungen auf Eisenhüttenwerken, Wärmestelle, Mitt. Nr. 152 u. 153. — Allgemeines über Fernmessung siehe Der Chemie-Ingenieur, Bd. II/1, S. 33f. Leipzig 1932. — Geyger, W.: Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 76, 298 (1932); 77, 75 (1933). — Wunsch, W.: Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 77, 658 (1933).

⁴ Der Chemie-Ingenieur, Bd. II/1, S. 28f. Berlin 1933.

⁵ Über Mengenmeßverfahren bei zeitlich rasch veränderlicher Strömung siehe Der Chemie-Ingenieur, Bd. II/2, S. 237f. Leipzig 1933. Dasselbst weitere Literatur. — Sauer, G.: Staudruckmessung bei pulsierenden Stoffströmen, in „Einzeldarstellung aus dem Gebiet des Messungs- und Materialprüfungswesens“, herausgeg. von L. Litinsky, Heft 4. Halle 1930.

Praxis mit der Durchflußmethode im Dauerbetrieb erreichbare Genauigkeit beträgt $\pm 1\%$. Zuverlässige Meßergebnisse setzen die Kenntnis und Beachtung der verschiedensten Faktoren voraus, so daß es zweckmäßig ist, nur geübtes Personal mit der Durchführung der Mengemessung zu betrauen.

Von den Erfordernissen zur Erlangung gesicherter Mengemessungen können hier nur die wichtigsten kurz angeführt werden. Die gesamte Meßanordnung besteht aus dem Drosselgerät, den zur Übertragung des Wirkdruckes notwendigen Verbindungsleitungen, dem Differenzdruckmesser und den zur einwandfreien Erfassung des Flüssigkeitszustandes benötigten Hilfseinrichtungen. Entsprechend vielseitig sind daher die für zuverlässige Messungen zu beachtenden Gesichtspunkte und die Ursachen etwaiger Fehlmessungen.

Das Drosselgerät wird berechnet unter Annahme des vorliegenden mittleren Betriebszustandes. Der Durchmesser d des freien Querschnittes ist so zu wählen, daß auch Abweichungen von dem normalen Durchfluß einwandfrei erfaßt werden können. Da zur sicheren Ablesung des Wirkdruckes bzw. zur Erlangung genügend großer Verstellkräfte für registrierende oder zählende Differenzdruckmesser ein bestimmter Wirkdruck erforderlich ist, muß dieser kleinste Wert bei Festlegung des Meßbereiches ebenso beachtet werden, wie die zu erwartende größte Druckdifferenz. Bei Dauermessungen ist eine sich unwirtschaftlich auswirkende große Druckdifferenz möglichst zu vermeiden. Ist der durch Normdüse oder Normblende verursachte Druckverlust (s. Abb. 157) nicht erträglich, so ist das Venturirohr oder das Kurzventurirohr zu wählen. Unter Umständen kann auch in solchen Fällen das Staurohr (s. Abb. 140) zur Messung herangezogen werden, wenn keine zu große Genauigkeitsansprüche gestellt werden. Für die Zuverlässigkeit der Messung mit Drosselgeräten ist die Konstanz des Durchflußbeiwertes erforderlich, man hat sich daher durch überschlägliche Berechnung der Reynoldsschen Zahl $(Re)_D$ an Hand der Abb. 149—151 zu überzeugen, ob für den in Frage stehenden Fall Düse oder Blende das geeignetste Drosselorgan ist. Mitunter ist auch durch Einbau einer besonderen Meßstrecke von kleinerem Rohrdurchmesser bei Düsen eine bessere Konstanz der Durchflußzahl α zu erreichen. Da weiterhin aus Gründen der Meßsicherheit im allgemeinen bei Düsen nicht über ein Öffnungsverhältnis $m = 0,5$, bei Blenden $m = 0,7$ hinauszugehen ist, so läßt sich auch der Einbau einer Meßstrecke von größerem als dem vorliegenden Rohrdurchmesser nicht immer umgehen.

Die Herstellung der Normgeräte hat zur Vermeidung besonderer Eichungen genau nach den gemachten Angaben zu erfolgen. In diesem Falle sind die Durchflußbeiwerte auch für Abnahmeversuche mit einer Toleranz von $\pm 0,5\%$ bzw. $\pm 1,5\%$ für Normdüsen und $\pm 0,5\%$ bzw. $\pm 1,0\%$ für Normblenden zulässig, wobei der Gültigkeitsbereich durch die in Abb. 149 und 151 eingezeichnete Toleranzgrenze gekennzeichnet ist. Bei Rohrdurchmessern $D < 50$ mm ist eine jedesmalige Eichung der Drosselgeräte notwendig. Es ist dies besonders zu beachten, da Fehler im Beiwert α in voller Größe zur Wirkung gelangen. Ebenso ist

die genaue Ermittlung des freien Durchmessers d der sorgfältig vor Beschädigungen zu schützenden Drosselgeräte erforderlich, da Fehler von d mit dem doppelten Betrag in Rechnung gehen. Bei höheren Betriebstemperaturen ist auch die Änderung von d durch Wärmeausdehnung zu berücksichtigen¹.

Zur Druckentnahme sind Ringkammern sehr zweckmäßig, da bei ihnen Einbaustörungen weniger zur Geltung kommen, jedoch sind auch Einzelanbohrungen durchaus brauchbar, wenn geordnete Rohrströmung vorliegt. Bei Verwendung der einfacheren und billigeren Drosselgeräte

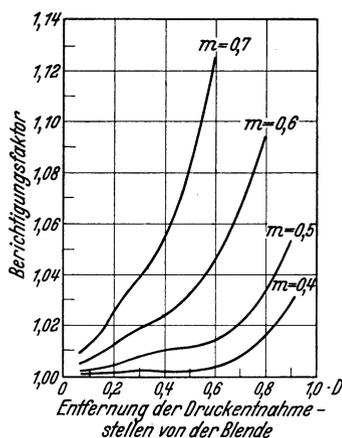


Abb. 159. Berichtigungsfaktoren für Blenden in normalrauhem Rohren bei verschiedenen, jeweils gleichen Abständen der beiden Druckentnahmestellen von der Blende.

mit Einzelanbohrungen kann man sich in Zweifelsfällen durch Anbringung von zwei weiteren versetzten Anbohrungen davon überzeugen, da bei einwandfreier Rohrströmung an beiden angeschalteten Differenzdruckmessern der gleiche Wirkdruck herrschen muß. Capillarwirkungen an den engsten Druckentnahmestellen (Einzelanbohrungen oder Ringkammerschlitz) sind zu vermeiden, da sie den Wirkdruck fälschen. Andererseits sind aber auch zu weite Anbohrungen bzw. Schlitz wegen der Druckverhältnisse an dem Drosselgerät nicht zulässig. Der an der Rohrwand gemessene Druck unmittelbar hinter dem Drosselgerät weist nur geringe Veränderlichkeit auf, derjenige vor dem Drosselgerät aber erfährt infolge Umsetzung der Vorgeschwindigkeit in Druck einen beträchtlichen Anstieg (besonders bei großem Öffnungsverhältnis m), es ist daher der Lage und Weite der Druckentnahmestellen besondere Aufmerksamkeit zu schenken². Bei den Normgeräten ist Lage wie auch Weite vorgeschrieben. Bei den einfachen Blenden (Abb. 143) für größere Rohrleitungen sind die Druckentnahmestellen so dicht als möglich an die Blenden heranzurücken³. Dabei ist bei Anbohrungen der Rohrwandung darauf zu achten, daß die benutzten Rohrstutzen ($3/8''$ bis $1/2''$) nicht in die Rohrleitung hineinragen und auch keinen Grat besitzen. Wie groß die Minusanzeige bzw. die Berichtigungsfaktoren werden, wenn bei normalrauhem Rohren die Druckentnahmestellen in verschiedenen, aber jeweils gleichen Abständen von der Blende angebracht werden, läßt die Abb. 159 erkennen. Es sei auch noch erwähnt, daß die Stirnfläche der aus 6 bis 10 mm starkem Blech hergestellten einfachen Blende in der Nähe der Einlaufkante glatt sein muß.

Bei Düsen ist auf einwandfreie Beschaffenheit des zylindrischen

¹ Lineare Ausdehnungskoeffizienten verschiedener Metalle siehe Abb. 98, S. 679.

² Siehe bei R. Witte: Die Strömung durch Düsen und Blenden. Forsch. Ing.-Wes. 2, 245, 291 (1931).

³ Euler, H.: Einteilige Blenden schmalere Einbaubreite für die Mengemessung. Wärmestelle, Mitt. Nr. 180 (1933).

Ansatzstückes, bei Blenden¹ auf scharfe Einlaufkante, namentlich bei Rohrdurchmessern $D < 150$ mm, unbedingt Wert zu legen. Das zur Herstellung der Drosselgeräte benutzte Material muß selbstverständlich den Eigenschaften der zu messenden Flüssigkeiten angepaßt sein.

Von Wichtigkeit für zuverlässige Messungen sind auch die Einbaubedingungen, die um so schärfer sind, je größer das Öffnungsverhältnis m ist. Konzentrischer Einbau des Drosselgerätes, dessen größerer Durchmesser mit dem wirklichen Rohrdurchmesser (nicht Nenndurchmesser) übereinstimmen muß, einwandfreier Sitz der Dichtungen [innerer Durchmesser ($D + 10$) mm] und einwandfreie Beschaffenheit der Rohrleitungen (kreisförmiger Querschnitt, keine Erhebung durch Schweißnähte, Nietköpfe, Schmutzansammlungen) in der Nähe der Drosselgeräte, sind zu fordern. Um Störungen durch Krümmer, Rohrbogen, Ventile usw. zu vermeiden, ist weiter noch Sorge zu tragen für eine Meßstrecke von genügender Länge. Wie bereits erwähnt, erweisen sich hierbei Drosselgeräte mit Ringkammern als besonders zweckmäßig, da bei ihnen im allgemeinen eine Einlaufstrecke von $10 D$ ausreichend ist. Für Einzelanbohrungen, besonders bei größerem Öffnungsverhältnis, sind dagegen etwa je $15 D$ für den Ein- und Auslauf notwendig. In beiden Fällen aber hat nach Ventilen die Einlaufstrecke mindestens $30\text{--}35 D$ zu betragen². Wenn möglich, sind daher Regulierventile hinter das Drosselgerät zu setzen. Über die Größe und Richtung des Einflusses durch Einbaustörungen kann nur durch Versuche genauer Aufschluß erhalten werden. Fehler bis $\pm 6\%$ bei Raumkrümmern und Ventilen können leicht bei großem m und zu kurzen Einlaufstrecken auftreten. Selbstverständlich fordert die Zuverlässigkeit der Messung saubere Drosselgeräte und Meßstrecken. Bei verschmutzten Gasen (feuchte Gase mit Teer und Staub) und bei kleinen Rohrleitungen sind die Düsen den Blenden häufig vorzuziehen, da das zylindrische Ansatzstück der Düsen infolge erhöhter Geschwindigkeit leichter sauber bleibt und der am abgerundeten Einlauf etwa haftenbleibende Ansatz weniger von Bedeutung ist. Wenn periodischer Ausbau nicht möglich ist, muß durch eine besondere Spritzvorrichtung³ für Sauberhaltung gesorgt werden. Insbesondere ist dies bei den Normblenden erforderlich, da sich bei diesen oft innerhalb weniger Tage an der Stirnfläche Schmutz absetzt und die scharfe Einlaufkante überdeckt wird mit einer mehr

¹ Siehe auch Fr. Kretzschmer und G. Wälzholz: Versuche über die Einbaufehler der Normblenden. *Forsch. Ing.-Wes.* 5, 25 (1934); *Ztschr. Ver. Dtsch. Ing.* 78, 360 (1934).

² Zahlreiche Versuchsergebnisse über Einbaustörungen bei Düsen und Blenden siehe R. Witte: *Techn. Mech. Thermodyn.* 1, 34, 72, 113 (1930). — Ruppel, G. u. H. Jordan: *Durchflußzahlen der Normblenden mit und ohne Störung des Zuflusses.* *Forsch. Ing.-Wes.* 2, 207 (1931). — *Regeln für die Durchflußmessung mit genormten Düsen und Blenden.* Berlin 1932. — Über Einfluß von Krümmern bei Venturiröhren siehe H. Müller: *Mitt. Hydr. Inst. Techn. Hochschule München* 1928, Heft 2.

³ Eine Darstellung der in der I. G. Farbenindustrie A.G., Ludwigshafen a. Rh. benutzten Abspritzvorrichtung befindet sich bei H. Euler: *Blenden für die Strömungsmessung.* Wärmestelle des Vereins deutscher Eisenhüttenleute, *Mitt.* Nr. 167, S. 160 (1932) und *Regeln für Durchflußmessungen*, 3. Aufl. Berlin 1934.

oder weniger stark abrundenden Ablagerung, wodurch ein beträchtlicher Anstieg des Beiwertes verursacht wird. Abscheidungen von Wasser und sonstigen störenden Stoffen kurz vor oder hinter den Drosselgeräten müssen durch Abscheider möglichst entfernt werden, da sie sonst Fehlmessungen verursachen.

Die Verbindung zwischen Drosselgerät und Differenzdruckmesser wird hergestellt durch die beiden Druckübertragungsleitungen (Plus- und Minusleitung) von etwa $\frac{3}{8}$ " bis $\frac{1}{2}$ " lichter Weite. Die Leitungen müssen unbedingt dicht sein; Undichtigkeiten in der Plusleitung führen zu Minusanzeigen, solche in der Minusleitung zu Plusanzeigen. Durch Abschaltung des Drosselgerätes von der Meßapparatur mit Hilfe der unmittelbar am Drosselgerät angebrachten Abschlußorgane ist in regelmäßigen Zeitabschnitten auf Dichtheit (konstanten Ausschlag des Differenzdruckmessers) zu prüfen. Um Störungen durch Kondensatniederschläge bei Gasmessungen oder Gasansammlungen bei Messungen tropfbarer Flüssigkeiten oder Dampf in den Druckübertragungsleitungen zu vermeiden, sind die Leitungen stets mit Gefälle und ohne scharfe Biegungen zu verlegen, da die an sich unschädlichen horizontalen Leitungen sehr oft durch äußere Einflüsse Störungen verursachende Durchbiegungen (Säcke!) erhalten. An den tiefsten bzw. höchsten Punkten der Meßleitungen sind zur Ausscheidung bzw. leichten Entfernung der störenden Ansammlungen Abscheider vorzusehen. Wenn der Differenzdruckmesser oberhalb des Drosselgerätes angeordnet werden muß, ist es zweckmäßig, die Meßleitungen bei Messungen feuchter Gase zunächst auf Abscheider dicht bei dem Drosselgerät, oder bei Messungen tropfbarer Flüssigkeiten zunächst etwa 1 m abwärts zu führen, um schnellstens störende Ausscheidungen entfernen bzw. in die Rohrleitungen zurückbringen zu können. Bei Dampfmessungen sind besondere Niveaueinrichtungen (Kondensgefäße¹ oder waagerechte Rohrstrahlen angemessener Länge und Größe) erforderlich, um bei Schwankungen des Durchflusses den Eintritt des nicht sofort kondensierenden Dampfes in die Meßleitung und damit einen Fehler durch verschieden hohe Kondensatsäulen möglichst zu verhindern. Gelegentliches kräftiges Ausblasen der Druckübertragungsleitungen bei abgeschlossenem Differenzdruckmesser ist im Interesse einer zuverlässigen Messung geboten. Bei ausgeblasenen Dampfleitungen ist vor dem Anfahren des Differenzdruckmessers natürlich die restlose Füllung der gesamten Meßleitung mit Kondensat abzuwarten. Durch Isolierung oder mäßige Heizung ist die Meßapparatur vor Frost zu schützen.

Die in zahlreichen Ausführungsarten käuflichen Differenzdruckmesser sind sorgfältig auszuwählen. Neben der Wirtschaftlichkeit ist zu beachten, daß nur solche Apparate Verwendung finden, die den Eigenschaften der zu messenden Flüssigkeiten und den Eigenarten des Betriebes Rechnung tragen. Wünschenswert ist stets eine vielseitige Verwendungsmöglichkeit. Die Differenzdruckmesser müssen für Flüssigkeiten der verschiedensten Art und für kleinere und größere statische

¹ Siehe Schema in der Zusammenstellung S. 762. — Schaack, M. u. H. Lohmann: Neue Kondensationsgefäße für Dampfmesser. Wärme 53, 950 (1930).

Drücke brauchbar sein¹. Sie müssen auch eine weitgehende Anpassungsfähigkeit an die im praktischen Betriebe oft auftretenden Belastungsänderungen besitzen, d. h. sie müssen eine leichte Umstellung auf verschiedene Meßbereiche gestatten. Wohl besteht bei den Differenzdruckgebern — den Drosselgeräten — die Möglichkeit, durch Auswechslung oder Abänderung des Durchmessers einen geeigneten Wirkdruck zu beschaffen, doch ist der hierzu erforderliche Ausbau des Gerätes nicht immer ohne empfindliche Störung des Betriebes möglich. In solchen schwierigen Fällen wird häufig eine von der in Betrieb befindlichen Meßstrecke einwandfrei abgeschlossene Umgangsleitung mit entsprechendem Drosselgerät, oder wohl auch eine verstellbare Meßblende² verwendet. Bei Änderung des Öffnungsverhältnisses m oder der Empfindlichkeit des Differenzdruckmessers ist selbstverständlich festzustellen, ob die Konstanz der Durchflußzahl α noch vorhanden ist, da bei α leicht Änderungen von 3—5% eintreten können.

Der Meßbereich (das Verhältnis des kleinsten zum größten Durchfluß) des Differenzdruckmessers wird eingeschlossen von der unteren und oberen Meßgrenze. Er ist nach unten durch die erwähnten Bedingungen für eine konstante Durchflußzahl des Drosselgerätes und durch den kleinsten Wirkdruck begrenzt, bei welchem durch die ausreichenden Verstellkräfte des Differenzdruckmessers noch einwandfreie Messungen gewährleistet sind, nach oben hingegen durch den größten für das Meßinstrument noch zulässigen Wirkdruck, der seinerseits wiederum abhängig ist von dem zulässigen Druckverlust am Drosselgerät. Im allgemeinen liegen bei Betriebsmessungen große Werte der Reynoldsschen Zahl $(Re)_D$ vor, so daß der untere Meßbereich vorwiegend von der Größe des noch richtig angezeigten kleinsten Wirkdruckes abhängig ist. Wegen der quadratischen Beziehung zwischen Durchfluß und Wirkdruck treten in der Nähe des Nullpunktes, also bei kleinen Durchflüssen (etwa 10—20% der maximalen Menge, also Meßbereich 1:10 bzw. 1:5) verhältnismäßig große Fehler auf. Da diese Fehler bei allen Konstruktionen wohl vorhanden³, aber verschieden groß sind, ist namentlich bei nicht gleichmäßigem Durchfluß der untere Meßbereich der Differenzdruckmesser zu berücksichtigen.

Für die Wahl des Differenzdruckmessers ist maßgebend, ob nur der Durchfluß oder aber die in einer bestimmten Zeit durchgeflossene Menge zu erfassen ist.

¹ Die Abbildung eines in der I. G. Farbenindustrie für Flüssigkeiten aller Art und für statische Drücke bis 1000 at ausgeführten und bewährten Differenzdruckmessers (Quecksilberdruckwaage) siehe bei C. Bosch: Über die Entwicklung der chemischen Hochdrucktechnik bei dem Aufbau der neuen Ammoniakindustrie. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 77, 313 (1933). — Einzelheiten: Der Chemie-Ingenieur, Bd. II/1, S. 23. Leipzig 1932; Bd. II/2, S. 225. Leipzig 1933. — Siehe auch S. 625.

² Eine verstellbare Blende für 710 mm lichte Rohrweite siehe Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 77, 155 (1933).

³ Siehe den Abschnitt über Eigenschaften der Meßinstrumente bei A. Gramberg: Technische Messung bei Maschinenuntersuchungen und zur Betriebskontrolle, S. 12—50. Berlin 1933. — Über die Fehlergröße bei geringen Anzeigen verschiedener Mengemesser siehe z. B.: Der Chemie-Ingenieur, Bd. II/1, S. 23. Leipzig 1932. — Kreuzer, S.: Statische und dynamische Untersuchungen von Mündungsdampfmengemessern. Forsch.-Arb. Ing.-Wes. 1928, Heft 297.

Zur Bestimmung des Durchflusses allein genügt in dem einfachsten Falle ein Differentialmanometer, ein mit geeigneter Sperrflüssigkeit (Alkohol, Öl, Petroleum, Äthylenbromid, Wasser, Quecksilber usw.) gefülltes U-Rohr von etwa 8—10 mm lichter Weite, dessen Ausführung sich vorwiegend nach dem statischen Druck zu richten hat. Diese Anzeigeeinstrumente kommen in Frage als Einstellinstrumente, zur Beobachtung oder auch Regelung des Momentanwertes. Zur leichten Ablesung, auch auf größere Entfernungen, werden mechanische Anzeigegeräte mit Zifferblatt (Mengenmeßuhren) benutzt, wobei dann meistens der Zeigerausschlag proportional dem Durchfluß ist. Wenn durch eine besonders weit sichtbare Skala die Durchflußleistung angezeigt werden muß, werden auch optische Anzeiger, die Lichtpunkt- oder Lichtsäuleninstrumente¹, verwendet (ablesbar bis ~ 100 m).

Die Ermittlung der durchgeflossenen Menge kann aus kalkulatorischen oder auch betriebstechnischen Gründen erfolgen. Dementsprechend ist die Auswahl unter den Durchflußmessern zu treffen. Wenn es nur auf die innerhalb einer bestimmten Zeit durchgeströmte Menge ankommt, nicht aber auf den für die Wirtschaftlichkeit mancher Betriebszweige wichtigen Verlauf der Durchflußleistung, werden Zähler an Stelle der Differenzdruckschreiber benutzt. Die einfachen Zähler haben den Nachteil, daß sich bei ihnen Überschreitungen des Meßbereiches nicht ohne weiteres feststellen lassen, während mit Hilfe der registrierenden Meßapparate Überbeanspruchung nicht nur festgestellt, sondern auch die Belastungsschwankungen eines einzelnen Betriebes jederzeit kontrolliert² werden kann. Außerdem können an Hand der an planmäßig verteilten Meßstellen aufgenommenen Diagramme wichtige Maßnahmen für die Wirtschaftlichkeit des Gesamtbetriebes ergriffen werden. Da der maximale Meßbereich der Differenzdruckmesser begrenzt ist, werden aber auch hier größere Mengen als die Maximalmengen nicht erfaßt (Minusfehler). Bei Überlastungen besteht außerdem die Möglichkeit, daß Meßapparate, welche zur Messung des Wirkdruckes Membranen benutzen, beschädigt werden, solche, welche besondere Sperrflüssigkeiten verwenden, infolge Durchschlagens zu Falschmessungen führen. Besteht Gefahr, daß durchgeschlagene und fortgerissene Sperrflüssigkeit die angeschlossene Apparatur beschädigt, so sind besondere Vorrichtungen zum Auffangen der Sperrflüssigkeit vorzusehen. Die Art und Menge der erforderlichen Sperrflüssigkeit muß genau bekannt sein, damit sie leicht nachgemessen und eventuell ergänzt werden kann. Zur Vermeidung von Über- oder Unterschreitungen bestimmter Durchflüsse werden Differenzdruckmesser auch mit optischer oder akustischer Signaleinrichtung versehen³. Häufige Nullpunktsüberprüfung durch Abschaltung des Meßapparates von den Druckübertragungsleitungen und durch Herstellung des Druckausgleiches im Innern des Differenzdruck-

¹ Z. B. Profilux von Hartmann & Braun, Frankfurt a. M., Lichtsäuleninstrumente von Siemens & Halske A. G., Berlin.

² Siehe P. Gmelin: Technische Physik in der chemischen Industrie. Ztschr. techn. Physik 10, 241—244 (1929).

³ Über Siemens-Dampfmesser mit Grenzkontakten zur Überwachung von Braunkohlen-Röhrentrocknern siehe z. B. Siemens-Ztschr. 1929, Heft 2, 132.

messers sind unbedingt erforderlich. Aus der Schnelligkeit, mit welcher der Nullpunkt erreicht wird, wie auch aus der ganzen Schreibart des Messers, lassen sich bei einiger Übung Störungen leicht erkennen. Je nach Art und Beanspruchung des Differenzdruckmessers sind in bestimmten Zeitabständen Eichungen und Überprüfungen durchzuführen. Bei geringen statischen Drücken kann die Eichung unter Benutzung eines ständig oder nur zu Vergleichszwecken parallel geschalteten einfachen Differentialmanometers leicht und ohne Betriebsstörung durchgeführt werden. Auch bei höheren Drücken läßt sich unter besonderen Vorsichtsmaßregeln dieser Vergleich im Betrieb mit Spezialdifferenzmanometern durchführen. Im allgemeinen werden aber die für hohe statische Drücke bestimmten Differenzdruckmesser außer Betrieb geeicht. Zu diesem Zwecke wird der Meßapparat langsam drucklos gemacht und auf die Überdruckseite (Plusseite) zweckmäßig unter Verwendung eines kleinen Windkessels der Prüfdruck gesetzt, während die Minusseite mit der Atmosphäre in Verbindung steht. Das gleichzeitig an die Plusseite angeschlossene Kontrollmanometer gestattet den Vergleich mit den Angaben des Betriebsinstrumentes.

Häufig sind bestimmte Forderungen des Betriebes wie z. B. seine Sicherung, bessere oder zentrale Überwachung, Summierung mehrerer Meßwerte usw., mit elektrischen Hilfsmitteln zu erfüllen. Es sind dann die hierzu benutzten Einrichtungen zur Übertragung der Meßwerte¹, die meistens mit einfachen Zusatzapparaten erfolgt, für sich besonders zu prüfen. Hierbei ist zu beachten, daß durch das zusätzliche Zwischengerät keine Rückwirkung auf das Meßgerät eintritt, denn zur erforderlichen Umwandlung der Meßgröße in eine für elektrische Übertragung brauchbare Form wird ein Geber mit dem Meßgerät mechanisch oder magnetisch gekuppelt. Wegen Einzelheiten der elektrischen Fernübertragung muß auf die Literatur verwiesen werden. Es sei hier nur erwähnt, daß als Geber meistens Ohmsche Widerstände² in Frage kommen, die durch den Differenzdruckgeber proportional dem Durchfluß verändert werden. Gelegentlich werden auch Stufenwiderstände benutzt, die direkt oder indirekt durch die Sperrflüssigkeit über Kontakte mehr oder weniger kurz geschlossen werden, oder induktive und kapazitive Widerstände usw. Die einwandfreie Beschaffenheit der Geber ist laufend zu überwachen. Ebenso ist auch der Stromversorgung im Interesse der Sicherheit und Genauigkeit der Fernmessung Beachtung zu schenken. Für die Brückenschaltung, die unter anderem für die Mengenzählung in Frage kommt, ist zur Vermeidung von Fehlern die Spannung konstant zu halten. Bei der Wahl der erforderlichen Gleichstromquelle ist darauf besondere Rücksicht zu nehmen. An Stelle der stets gut zu wartenden Akkumulatoren läßt sich der zur Übertragung notwendige Gleichstrom

¹ Einzelheiten und Literatur siehe B. v. Bothen: Fernmessen auf Eisenhüttenwerken. Wärmestelle, Mitt. Nr. 152. — Der Chemie-Ingenieur, Bd. II/1, S. 38f. Leipzig 1932; Bd. II/2, S. 248. Leipzig 1933. — Groß, K.: Grundzüge und Anwendungsgebiete der Fernmessungen. Wärmestelle, Mitt. Nr. 109.

² Lohmann, H. u. O. Sieber: Die elektrische Ringrohrfernübertragung. Siemens-Ztschr. 1928, Heft 12, 761.

aus vorhandenem Wechselstrom durch Motorumformer oder namentlich Trockengleichrichter beschaffen. Die direkte Verwendung von Wechselstrom, dessen Spannung unter Benutzung von Transformatoren leicht herabgesetzt werden kann, ist natürlich einfacher. Es ist hier aber bei der Leitungsführung auf den Einfluß der Induktion zu achten. Spannungsschwankungen sind, wenn die verwendeten Instrumente nicht spannungsunabhängig sind, durch besondere Spannungsregler möglichst zu beseitigen. Die erforderlichen Empfangsinstrumente zur Anzeige, Registrierung, Zählung und Summierung sind der verwendeten Stromart entsprechend zu wählen. Dabei werden, wenn möglich, bei Gleichstrom an Stelle der Drehspulinstrumente die spannungsunabhängigen Kreuzspulmeßgeräte bevorzugt, wenn es sich um die Registrierung verschiedener Bezugsgrößen auf ein Diagramm handelt, die Brückenkreuzspulinstrumente¹, und bei Wechselstromübertragung z. B. die praktisch spannungs- und frequenzunabhängigen Induktionsgeräte². Über Registrierinstrumente siehe S. 575.

Bei Verwendung eines Differenzdruckschreibers mit zusätzlicher Fernzählung besteht eine leichte Kontrollmöglichkeit. Im allgemeinen kann bei guter Wartung der Fernmeßeinrichtungen mit einer Genauigkeit von $\pm 2\%$ gerechnet werden.

Zur einwandfreien Erfassung der strömenden Menge ist die genaue Kenntnis des Flüssigkeitszustandes erforderlich. Zu der Mengenmeßapparatur gehören daher noch Hilfseinrichtungen wie Druck- (siehe S. 611), Temperatur- (s. S. 597) und häufig Dichte- (s. S. 653) und Feuchtigkeitsmesser (s. S. 659), um das in der allgemeinen Durchflußformel enthaltene spezifische Gewicht γ_1 richtig zu ermitteln. Da die Durchflußformeln für alle Meßgeräte jeweils nur für einen bestimmten Zustand angegeben werden, sind Abweichungen von den zugrunde gelegten Werten durch Korrektionsfaktoren zu berücksichtigen. Für die Auswertung werden der Einfachheit halber diese auf einen Normal- oder mittleren Betriebszustand bezogenen Berichtigungen für Druck, Temperatur und spezifisches Gewicht tabellarisch oder graphisch dargestellt. Nach der Zusammenstellung der Durchflußformeln S. 761 sind die einzelnen Berichtigungszahlen und ihr Einfluß auf das Meßergebnis leicht zu berechnen. Solange nur kleine Schwankungen des spezifischen Gewichtes bzw. des Druckes und der Temperatur auftreten, ist die übliche Auswertung mit Planimetrien der Diagramme von Hand unbedenklich. Die Rechnung mit den erhaltenen Mittelwerten, die sich im allgemeinen über 24 h erstrecken, ist aber falsch, wenn größere Schwankungen, die im praktischen Betrieb nicht immer vermeidbar sind, vorliegen. Der Durchfluß ist stets mit dem dazu gehörigen Momentanwert des spezifischen Gewichtes zu berechnen. Es sind daher die aufgenommenen Diagrammflächen passend zu unterteilen und die einzelnen Teilflächen für sich auszuwerten. Aus den Einzelbelastungen ist dann die Gesamtbelastung

¹ Größ, H.: Eine neue Form von Kreuzspulinstrumenten. *Wissenschl. Veröffentl. Siemens-Konzern* 10, 137 (1931).

² Lohmann, H. u. F. v. Grundherr: Strömungsmanometer mit Wechselstrom-Fernübertragung. *Siemens-Ztschr.* 1930, Heft 1, 37.

zu berechnen. Da in der Technik häufig die Beschaffenheit der Flüssigkeit an Hand von Sammelproben ermittelt wird, sei erwähnt, daß auch hierbei einwandfreie Mittelwerte bei Schwankungen in der Zusammensetzung und der Menge nur dann erhalten werden können, wenn die Probenmenge stets proportional dem Durchfluß entnommen wird. Um daher diese Fehler, welche leicht die Größe von mehreren Prozent erreichen, zu vermeiden, werden auch besondere Hilfsvorrichtungen benutzt. Als solche seien hier nur angeführt die automatischen Probeentnehmer¹ und die namentlich für Durchflußmessungen mit Drosselgeräten in Frage kommenden selbsttätigen mechanischen und elektrischen Vorrichtungen zur Berücksichtigung von Druck und Temperatur².

Daß bei tropfbaren Flüssigkeiten der Leitungsquerschnitt stets gefüllt sein muß (Düker!), bedarf eigentlich keiner besonderen Erwähnung; daß die Homogenität der Flüssigkeiten stets vorliegen muß, wurde bereits mehrfach betont. Diese letztere Forderung ist besonders bei Flüssigkeiten in der Nähe des Sättigungsdruckes zu beachten. Hier sind unter Umständen Meßvorrichtungen zu verwenden wie bei den Füllungs- und Leistungsprüfern für flüssiges Ammoniak³, wo der störende Einfluß von Dampf oder Fremdgas nicht zur Geltung kommt bzw. die Feststellung der reinen Flüssigkeitsphase ermöglicht ist. Sind aggressive Flüssigkeiten, für welche das Material des Differenzdruckmessers nicht geeignet ist, oder sehr zähe Flüssigkeiten zu messen, so kann eine inerte Flüssigkeit, mit welcher Meßleitungen und Messer gefüllt sind, ständig nach Art der pneumatischen Fernmessung durch die Anbohrungen des korrosionsfesten Drosselgerätes eingeführt werden. Auch korrosionsbeständige Zwischengefäße in den Druckübertragungsleitungen können verwendet werden. Hier wird die erforderliche Trennung durch eine Flüssigkeit oder richtkraftlose Membran durchgeführt⁴. Bei pulsierender Strömung kann man durch den Einbau von großen Puffergefäßen in manchen Fällen die Strömung an dem Drosselgerät stationär machen⁵. Wenn die Förderleistung von Kolbenmaschinen zu messen ist, kann auch nach überkritischer Entspannung des Gases die Durchflußmethode angewendet werden.

Zum Schluß sei nochmals betont, daß die großen Vorteile, welche die in manchen Fällen oft allein brauchbare Methode der Durchflußmengenmessung bietet, nur dann recht zur Geltung kommen können, wenn die erzielten Meßergebnisse einwandfrei sind. Beachtung der theoretischen Grundlagen und der verschiedenen Bedingungen, sachgemäße Wartung durch geübtes Personal, sind für die Sicherung der

¹ Einige Ausführungsbeispiele siehe: *Der Chemie-Ingenieur*, Bd. II/2, S. 33. Leipzig 1933.

² Fußnote 4, S. 770; Lohmann, H., *Siemens-Ztschr.* 14, 274 (1934).

³ Über die Messung umlaufender Ammoniakmengen in Kältemaschinen siehe bei R. Stückle: *Ztschr. ges. Kälteind.* 33, 169 (1926). — Korrekturtafel für Leistungsmesser die in Normalkalorien geeicht sind, für Ammoniakkälteanlagen, bei K. Heinze: *Ztschr. ges. Kälteind.* 39, 201 (1931).

⁴ Siehe z. B. *Der Chemie-Ingenieur*, Bd. II/2, S. 229. Leipzig 1933.

⁵ Lutz, O.: Über Gasmengenmessung bei Kolbenmaschinen mittels Düsen und Blenden. *Ing.-Arch.* 3, 138 (1932).

Durchflußmessung ebenso erforderlich, wie die ständige Durchführung von direkten oder indirekten Kontrollen.

ε) **Geschwindigkeitsmessung mit Ausflußöffnungen.** I. Düsen und Blenden. Zur Bestimmung der Geschwindigkeit bzw. Menge von Flüssigkeiten werden auch Ausflußöffnungen (Düsen oder Blenden) benutzt. Zweckmäßig werden dieselben nicht an die Seitenwände des benutzten größeren Behälters, sondern an den Boden angeschlossen. Zur Berechnung des Ausflusses¹ sind die gleichen Ansätze wie für die vorstehende Durchflußmessung maßgebend. Die Ausflußzahl α ist aber durch besondere Eichung in Abhängigkeit von der Spiegelhöhe und der Zähigkeit² zu ermitteln. Zu beachten ist, daß bei Düsen mit geringer Abrundung infolge ungleichmäßiger Kontraktion Störungen der Ausflußzahl eintreten können³ (Oberflächenspannung) und daß bei den Blenden (Ponceletöffnungen) mit fallender Druck- oder Standhöhe die

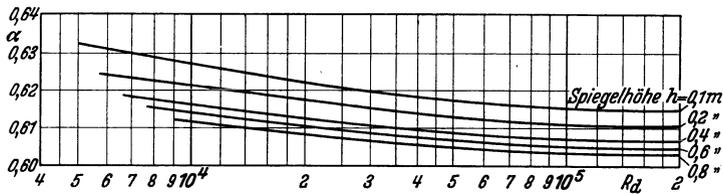


Abb. 160. Ausflußzahlen für scharfkantige Stauränder.

Ausflußzahl ansteigt⁴. Wenn der Ausflußquerschnitt F_0 (m^2) in genügender Tiefe unter dem Flüssigkeitsspiegel liegt und unbeeinflusst von den Gefäßwandungen ist, wird mit h (m) als Druckhöhe das Durchflußvolumen für inkompressible Flüssigkeiten

$$Q = \alpha F_0 \sqrt{2gh} \text{ m}^3/\text{s}. \quad (106)$$

Die Standhöhe h wird bei senkrechten Ausflußöffnungen von ihrer Mitte aus gemessen, bei waagerechten von der Trennungsstelle Öffnung-Flüssigkeit aus. Von K. Jaroschek sind nach dem Versuchsmaterial von A. Schneider die Ausflußzahlen scharfkantiger Blenden von 20—50 mm Durchmesser in der durch Abb. 160 wiedergegebenen Darstellung geordnet worden⁴.

Einwandfreie Messung von h erfordert gleichmäßigen Zufluß und ruhigen Spiegel. Bei Verwendung von (nicht zu engen!) Wasser-

¹ Siehe z. B. W. Schüle: Technische Thermodynamik, Bd. I, S. 314f. Berlin 1921. — Zeuner, G.: Technische Thermodynamik, Bd. I, S. 221f. Leipzig 1905. — Nußelt, W.: Die Strömung von Gasen durch Blenden. Forsch. Ing.-Wes. **3**, 11 (1932).

² Untersuchungen „Über den Einfluß der Zähigkeit auf Ausflußerscheinungen“ siehe H. Beckmann: Dissert. Danzig 1927.

³ Witte, R.: Die Strömung durch Düsen und Blenden. Forsch. Ing.-Wes. **2**, 300 (1931); daselbst weitere Literaturangaben.

⁴ Schneider, A.: Ausflußkoeffizienten von Ponceletöffnungen. Forsch.-Arb. Ing.-Wes. **1919**, Heft 213. — Jaroschek, K.: Messungen von Flüssigkeitsmengen mittels Ausflußöffnungen. Techn. Mech. Thermodyn. **1**, 423 (1930).

standsgläsern sind Abweichungen von der Temperatur des Behälterinhaltes zu beachten. Durch sorgfältige Beobachtungen lassen sich Genauigkeiten von $\pm 1\%$ leicht erreichen. Zur Ermittlung größerer oder stark schwankender Flüssigkeitsmengen wird nach der Teilmessung von Brauer¹ die Danaide mit mehreren unter sich gleich großen Ausflußöffnungen versehen², wobei die einfachen Blenden oft bevorzugt werden. Alle Öffnungen haben in einer Ebene zu liegen, so daß durch jede Öffnung die gleiche Flüssigkeitsmenge ausfließt. Zur Vermeidung gegenseitiger Beeinflussung ist für genügenden Abstand ($3-4d$) der einzelnen Öffnungen zu sorgen. Von den vorhandenen Öffnungen werden jeweils so viele abgedichtet, bis der Staudruck h die zur sicheren Messung erforderliche Höhe erreicht hat.

Die Ausflußmessung wird bei Gasen und Dämpfen seltener benutzt, es sei deshalb nur auf die Literatur verwiesen (s. Fußnote 1, S. 780), wo auch die besondere Bedeutung des Druckverhältnisses P_2/P_1 für einfache Düsen und Blenden nachgelesen werden kann³.

II. Überfälle. Als letzte Methode der Geschwindigkeitsmessung mit fest eingebauten Widerständen sei die Messung mit Überfällen

kurz angeführt. Diese Methode ist eine Ausflußmethode, bei der aber die Ausflußöffnung bis über den Flüssigkeitsspiegel hinausreicht. Es ist zu unterscheiden zwischen dem vollkommenen und unvollkommenen Überfall. Bei ersterem

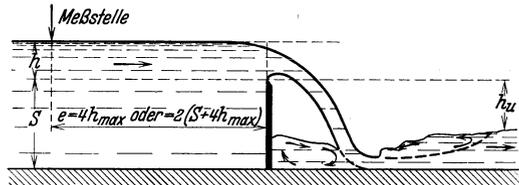


Abb. 161. Schnitt durch ein scharfkantiges, lotrechtes Meßwehr mit waagerechter Überfallkante.

liegt der Unterwasserspiegel tiefer, bei letzterem höher als die Wehrkrone. Von den verschiedenen Wehren wird das in ein Zulaufgerinne mit senkrechten, parallelen Wänden und waagrecht verlaufender Kanalsohle eingebaute scharfkantige Wehr ohne Seiteneinschnürung am häufigsten zur Mengemessung benutzt. Wesentlich ist der senkrecht zur Kanalachse erfolgende Einbau des Plattenwehres, die scharfe und waagerechte Überfallkante und die gute Belüftung (Atmosphärendruck), damit die Flüssigkeit frei und unbehindert überfällt. Diese Bedingungen, sowie die Forderung geordneten Zulaufs sind maßgebend für den zur Angleichung der theoretischen an die tatsächliche Flüssigkeitsmenge Q erforderlichen Koeffizienten μ . Wird wie in Abb. 161 die Wehrbreite, welche gleich der vollen Rinnenbreite ist, mit b (m), die Überfallhöhe

¹ Brauer, E.: Ein neues Verfahren zur Wassermessung. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. **36**, 1492 (1892).

² Schematische Darstellungen von Danaiden siehe Regeln für Leistungsversuche an Kreiselpumpen, S. 10. Berlin: VDI-Verlag 1928. — Staus, A.: Die hydraulischen Einrichtungen des Maschinenlaboratoriums der Staatlichen Württembergischen Höheren Maschinenbauschule in Eßlingen am Neckar, S. 10—19. Berlin 1925.

³ Siehe auch E. Stach: Die Beiwerte von Normdüsen und Normblenden im Einlauf und Auslauf. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. **78**, 187, 394 (1934).

mit h (m) bezeichnet, dann ist mit g (m/s²) als Erdbeschleunigung nach der Grundformel von Poleni der Abfluß:

$$Q = \frac{2}{3} \mu b h \sqrt{2gh} \text{ m}^3/\text{s}. \quad (107)$$

Unter der Überfallhöhe h ist dabei der Höhenabstand zwischen der Überfallkante und Punkten des Flüssigkeitsspiegels verstanden, welche noch keine merkliche Senkung erfahren haben. Die mit Stechpegel, kommunizierenden Röhren oder Schwimmer durchzuführende Messung muß in einem Abstand von mindestens $4h_{\max}$ von der Wehrkrone flußaufwärts mit größter Genauigkeit vorgenommen werden¹. Der Beiwert μ , die Grundlage für zuverlässige Wehrmessungen, hat zahlreiche Bestimmungen und verschiedene formelmäßige Darstellungen erfahren². Rehbock³ hat seinen älteren Abflußformeln eine neue Form gegeben, die den alten an Zuverlässigkeit und Genauigkeit nicht nachsteht, aber einen dimensionsrichtigen und leichter bestimmbaren Abflußwert μ enthält. Die von der Polenischen Grundformel etwas abweichende, auf zahlreichen Versuchsergebnissen beruhende neue Abflußformel Rehbock (1929) lautet:

$$Q = \frac{2}{3} \left(0,6035 - 0,0813 \frac{h_e}{S} \right) b h_e \sqrt{2gh_e} \text{ m}^3/\text{s}, \quad (108)$$

$$Q = \left(1,782 - 0,24 \frac{h_e}{S} \right) b \sqrt{h_e^3} \text{ m}^3/\text{s}. \quad (108a)$$

Hier ist an Stelle der tatsächlichen Überfallhöhe h der Grundformel die Ersatzüberfallhöhe

$$h_e = h - 0,0011 \text{ m}$$

getreten, welche dadurch gemessen wird, daß man die Skala 1,1 mm unter der Wehrkante beginnen läßt.

Die neuen Rehbockschen Werte liegen etwa 2,4% tiefer als die früher viel benutzten Werte nach der Formel von Frese (1890):

$$Q = 2,953 \left(0,615 + \frac{0,0031}{h} \right) \left[1 + 0,55 \left(\frac{h}{S+h} \right)^2 \right] b \sqrt{h^3} \text{ m}^3/\text{s}. \quad (109)$$

Nach der Formel des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (S.I.A.) 1924 ist

$$Q = 2,953 \left[0,615 \left(1 + \frac{1}{1000 \frac{h}{S} + 1,6} \right) \right] \left[1 + 0,5 \left(\frac{h}{S+h} \right)^2 \right] b \sqrt{h^3}, \quad (110)$$

wobei S (m) die Wehrhöhe bedeutet. Die Formel ist gültig für $S \geq 0,3$ m, $h \leq S$ und $0,025 \text{ m} \leq h \leq 0,8$ m. Sie ergibt für kleinere Überfallhöhen h etwas kleinere Werte als die durch Eichung ermittelte Abflußmenge, stimmt für mittlere Höhen (h von 0,075—0,20 m) gut und liegt bei größeren Überfallhöhen über dem Eichwert. Kirschmer und Esterer [O. Kirschmer u. B. Esterer: Die Genauigkeit einiger Wassermessverfahren. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 74, 1503 (1930)] erhielten beim

¹ Siehe auch Regeln für Leistungsversuche an Kreiselpumpen, S. 18. Berlin: VDI-Verlag 1928.

² Siehe bei Ph. Forchheimer: Hydraulik, S. 373f. Leipzig u. Berlin 1930.

³ Rehbock, Th.: Wassermessung mit scharfkantigen Überfallwehren. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 73, 817 (1929).

Vergleich verschiedener Wassermessverfahren unter anderem für den Beiwert μ eines Überfalls mit vollgelüftetem Strahl bei $S = 0,523$ m Wehrhöhe und $b = 2,5$ m Wehrbreite die in Abb. 162 als Funktion von h dargestellten Werte. Während Modellversuche (Maßstab rund 1 : 7) genau übereinstimmende Ergebnisse mit der Formel von Rehbock (1929) lieferten, lagen die Betriebsversuche im Mittel etwa 1,5% höher und zwischen den Werten nach Rehbock und den älteren nach Frese.

Obwohl die Rehbocksche Formel in sehr guter Übereinstimmung ist mit einer großen Zahl der verschiedensten Wehreichungen, wird man bis zur Klärung der bestehenden Differenzen¹ unter Zulassung einer Unsicherheit von etwa $\pm 1\%$ zweckmäßig mit der Schweizer Formel (110)

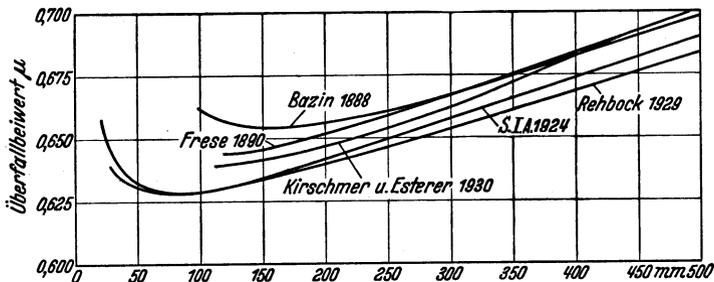


Abb. 162. Beiwerte für den Überfall mit 523 mm Wehrhöhe. (Nach Kirschmer und Esterer.)

rechnen, da ihre Werte für Überfallhöhen $h > 0,075$ m zwischen den Werten von Kirschmer-Esterer und Rehbock liegen.

Überfälle mit seitlicher Strahleinschnürung haben nicht die Zuverlässigkeit des vorstehenden scharfkantigen Überfalls ohne Strahleinschnürung, sie sind daher zu Mengenmessungen weniger geeignet².

5) Geschwindigkeitsmessung mit Schwimmermessern. Während bei den bisher erwähnten Geschwindigkeitsmessern — den Mündungsmessern — an gleichbleibenden Drosselungen veränderliche Wirkdrücke auftreten, liegt bei der Gruppe der Schwimmermesser eine konstante Druckdifferenz bei veränderlichem Querschnitt vor. Bei diesen zur Messung aller Arten von Flüssigkeiten verwendbaren Schwimmermessern wird ein Schwimmkörper durch die strömende Flüssigkeit in einem senkrechten, besonders ausgebildeten Rohr so weit gehoben, bis die auf den Schwimmer ausgeübte Kraft im einfachsten Falle gleich ist dem wirksamen Schwimmergewicht. Der jeweilige Stand des Schwimmers ist dann ein Maß für den Durchfluß. Die Schwimmerstellung wird zur Beobachtung des Durchflusses sichtbar gemacht oder zur Erfassung der durchgeflossenen Menge registriert. Ebenso werden die Messer zur automatischen Integration des Durchflusses mit besonderen Zählrichtungen versehen.

¹ Vgl. hierzu R. Hailer: Fehlerquellen bei der Überfallmessung. Mitt. Hydr. Inst. Techn. Hochschule München 1929, Heft 3, S. 1. — Dillmann, O.: Untersuchungen an Überfällen. Mitt. Hydr. Inst. Techn. Hochschule München 1933, Heft 7, S. 26. — Dietrich, W.: Schweiz. Bauztg. 99, 1, 20 (1932).

² Beiwerte für verschiedene Wehrformen siehe Hütte, Des Ingenieurs Taschenbuch, Bd. I, S. 393. Berlin 1931.

Für die Gleichgewichtslage des Schwimmers mit dem wirksamen Gewicht K gilt mit Einführung des Staudruckes $\gamma_1 w_1^2/2g$ die Beziehung:

$$f(P_1 - P_2) = K = \varphi f \frac{\gamma_1 w_1^2}{2g} \text{ kg}, \quad (111)$$

wenn f (m²) der maximale Querschnitt des Schwimmers, γ_1 (kg/m³) das spezifische Gewicht der Flüssigkeit, w_1 (m/s) ihre auf f bezogene mittlere Geschwindigkeit, g (m/s²) die Erdbeschleunigung und φ die dimensionslose Widerstandszahl des angeströmten Schwimmerkörpers bedeutet. Ist F (m²) der Querschnitt des Düsenkörpers, so beträgt das durch den Ringspalt strömende Durchflußvolumen vom Durchflußzustand

$$Q = \alpha_S (F - f) \sqrt{2g \frac{K}{f\gamma_1}} \text{ m}^3/\text{s} \quad (112)$$

bzw. das Durchflußgewicht

$$G = \alpha_S (F - f) \sqrt{2g \frac{K\gamma_1}{f}} \text{ kg/s}, \quad (112a)$$

wobei α_S der alle Einflüsse einschließende und durch die Eichung festzustellende Durchflußbeiwert der Schwimmermessers ist. Durch besondere Formgebung der Düse kann der Schwimmerhub Z dem Durchfluß proportional gemacht werden, so daß bei Konstanz der Durchflußzahl mit der neuen Messerkonstanten C

$$G = C' Z \sqrt{2g \frac{K}{f} \gamma_1} = C Z \cdot \sqrt{\gamma_1} \text{ kg/s} \quad (113)$$

wird. Es ist aber hierbei zu beachten, daß die ausgeübte Widerstandskraft K des Schwimmers von dem Auftrieb der Flüssigkeit abhängig ist. Bei dem im Gas- oder Dampfraum befindlichen Teil des Schwimmers kann der Auftrieb im allgemeinen vernachlässigt werden, der in tropfbare Flüssigkeit eintauchende Schwimmerteil muß jedoch berücksichtigt werden (mittleres spezifisches Gewicht). Die Messerkonstante wird normalerweise auf einen bestimmten oder mittleren Zustand bezogen. Bei stark wechselnden spezifischen Gewichten ist es daher empfehlenswert, die Einteilung der Skala nicht in m³, sondern in mm auszuführen. Abweichungen vom zugrunde gelegten Flüssigkeitszustand werden durch Berichtigungsfaktoren in Rechnung gesetzt.

Der Zähigkeitseinfluß ist bei den Schwimmermessern nur bei geringen Geschwindigkeiten von Bedeutung. Für Schwimmer mit kreisförmiger, scharfkantiger Scheibe in einer nahezu konischen Düse ist der Einfluß der Zähigkeit auf den Widerstandsbeiwert untersucht worden¹. Bis herab zu Reynoldsschen Zahlen² von $(Re)_d = 800$ wurden für φ konstante Werte gefunden, wobei die Größe der Wandnähe selbst ohne Einfluß auf diesen Grenzwert war. Störende Wirbelablösungen scheinen sich jedoch bis zu $(Re)_d = 1000$ zu erstrecken.

¹ Ruppel, G. u. K. J. Umpfenbach: Messung der Strömung und der Zähigkeit von Flüssigkeiten mit Widerstandskörpern. Ztschr. techn. Physik 10, 647 (1929). Siehe auch ATM, V 1247—1.

² $(Re)_d = w d/\nu$, wo w die ungestörte gedachte Relativgeschwindigkeit des Widerstandskörpers gegen die Flüssigkeit, d der größte Durchmesser der Kreisscheibe, ν die kinematische Zähigkeit ist.

Die Widerstandszahl wird von $(Re)_d = 400$ an abwärts kontinuierlich größer, ähnlich wie bei den Normblenden unterhalb des dort gültigen Grenzwertes (Abb. 151). Bei Messung von kleinen Durchflüssen mit Schwimmermessern ist daher die Veränderlichkeit des Beiwertes durch Eichung zu ermitteln.

Von den im praktischen Betriebe benutzten Schwimmermessern (Abb. 163) seien als Beispiel angeführt der Rotamesser¹, der Durchflußmesser von Grefe² und der Bayer-Siemens-Messer³.

Bei den Rotamessern, welche für alle Arten von Flüssigkeiten hergestellt werden, von 0,1 l pro h aufwärts, schwebt der Schwimmer frei, ohne Führungsstange in dem Strom. Damit der Schwimmer ruhig und zentriert in dem konisch erweiterten Durchflußrohr (meistens aus Glas) arbeitet, sind in seinem oberen zylindrischen Randteil schräge Einkerbungen angebracht, wodurch er in Rotation versetzt wird. Die Messer werden bis etwa 80 mm lichte Weite als Hauptstrom-Rotamesser geliefert, als Staurand-Rotamesser⁴ in Verbindung mit einer Blende für größeren Durchfluß. Bei diesem letzteren wird durch den an dem Drosselgerät vorliegenden Wirkdruckeine zu vernachlässigende Menge durch

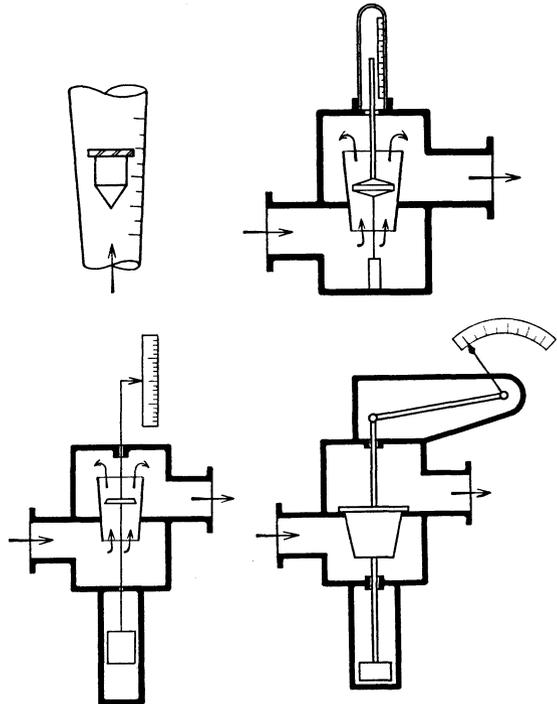


Abb. 163. Schematische Darstellung verschiedener Schwimmermesser.

den hier als Differenzdruckmesser benutzten Rotamesser geleitet. Als Rotameßventil steht der nur mit einem Eichstrich versehene Messer in Verbindung mit einem die Eichskala tragenden Ventil. Die vornehmlich als Anzeigegerät benutzten Rotamesser werden auch als

¹ Deutsche Rotawerke G. m. b. H., Aachen, ähnliche Ausführungen von verschiedenen Firmen zu beziehen.

² L. Grefe, Maschinenfabrik, Lüdenscheid i. Westf.

³ Messer der I. G. Farbenindustrie (Farbenfabriken Bayer), heute hergestellt und vertrieben durch Siemens & Halske, Berlin. Beim Schwimmermesser von E. Claaßen, Schwedt a. O. (Abb. 163), besitzt z. B. der Schwimmer eine konische Form, welche zur Erlangung der Proportionalitäten von Hub und Durchfluß empirisch oder rechnerisch ermittelt wird.

⁴ Über den Staurand-Rotamesser siehe Meßtechn. 5, 89 (1929); siehe auch S. 792.

Registrierapparate (mit elektromagnetischer Kupplung) und automatische Regelapparate ausgeführt. Sie sind bei Verwendung von metallenen Meßrohren auch für höhere statische Drücke brauchbar.

Die erforderliche, jeweils konstante Druckdifferenz beträgt je nach Größe, Verwendungszweck und Schwimmermaterial 5—50 mm WS.

Die Genauigkeit der Rotamesser ist von der sorgfältigen Eichung und Beachtung der Zustandsgrößen abhängig und beträgt etwa $\pm 2\%$.

Der Grefe-Schwimmermesser, ein Leistungsanzeiger für Rohrleitungen bis etwa 300 mm lichter Weite, hat das konische Metallrohr in einem Ventilkörper und macht die Schwimmerstellung in einem Glasrohr durch eine Schwimmerstange kenntlich. Der Messer arbeitet ohne Stopfbüchse, ist auch für höhere Drücke verwendbar und bedarf ebenfalls der jeweiligen Eichung.

Der Bayer-Siemens-Messer¹, ein für alle Flüssigkeiten brauchbarer Schwimmermesser, besitzt eine scharfkantige, kreisförmige Scheibe als Schwimmer, deren Hub dem Durchfluß proportional ist. Die Schwimmerbewegung wird nach außen übertragen durch eine Stopfbüchse. Infolgedessen tritt bei Druckänderungen zu den eingangs angeführten und zu berücksichtigenden Einflüssen noch eine Druckabhängigkeit hinzu. Diese Abhängigkeit, die um so größer ist, je kleiner die von 25—200 mm Anschlußweiten ausgeführten Messertypen sind, läßt sich aber ebenso wie die Auftriebsänderung durch Berichtigungsfaktoren korrigieren. Durch entsprechende Änderung des an der unteren Schwimmerstange in einem besonderen Bremskolben angebrachten Ausgleichgewichtes läßt sich bei größeren Druckänderungen eine weitgehende Anpassung an den normalen Betriebsdruck durchführen. Die Reibung der Stopfbüchse und die zusätzliche Belastung durch eine mechanische Anzeige-, Registrier- oder Summierungsvorrichtung sind ebenfalls nicht ohne Rückwirkung auf das wirksame Schwimmergewicht.

Der zur Messung erforderliche konstante Wirkdruck ist gering (etwa 0,05 at). Einschließlich der Strömungsverluste im Messergehäuse beträgt der maximale Druckverlust etwa 0,15 at. Infolgedessen ist bei Dampfmessungen, für welche der Bayer-Siemens-Messer vorwiegend benutzt wird, eine Expansionsberichtigung bei den normalen statischen Drücken zu vernachlässigen.

Für die Genauigkeit der einwandfrei ausgeführten und geeichten Messer ist die richtige Erfassung des wirksamen Schwimmergewichtes und des Flüssigkeitszustandes maßgebend. Infolge der großen Verstellkraft in der Nähe des Nullpunktes ist der Messer zur Messung von stark schwankendem Durchfluß besonders geeignet. Die einfache Kontrolle der Übereinstimmung von Schwimmerhub und Diagrammhöhe durch Anheben des Schwimmers bis zum Endausschlag, die stabile Bauart und die gefahrlose Überlastungsfähigkeit sind weitere bemerkenswerte Vorteile. Die Wartung des Messers ist gering. Die Bremsflüssigkeit (Wasser oder Öl), welche zur Dämpfung der Schwimmerbewegungen

¹ Ruppel, G.: Schwimmermesser als Mengemesser für Flüssigkeiten, Gase und Dämpfe. Siemens-Ztschr. 1931, Heft 6, 290. Ausführliche Theorie bei A. Gramberg: Technische Messungen, 5. Aufl., S. 247. Berlin 1923.

erforderlich ist, muß ebenso wie der leichte, einwandfreie Gang der Meßeinrichtung in gewissen Zeiträumen geprüft werden. Daß die Messer stets in waagerechte Rohrleitungen eingebaut werden müssen, daß zur eventuellen Nachkontrolle des im Gehäuse befindlichen Meßwerkes die Rohrleitung außer Betrieb genommen werden muß, wenn nicht eine besondere Umgangsleitung vorgesehen wird, sei ebenfalls noch angeführt.

η) Mengenermittlung aus dem Druckabfall bei glatten, geraden Rohrleitungen. Bei der Strömung von Flüssigkeiten durch Rohrleitungen und Kanäle tritt ein Druckabfall ein, der zur mittleren Durchfließgeschwindigkeit und damit zum Durchfluß in Beziehung steht. Ist diese Gesetzmäßigkeit bekannt, dann läßt sich aus dem Druckabfall der Durchfluß berechnen. Für gerade, glatte Rohre ist das Widerstandsgesetz soweit gesichert, daß mit seiner Hilfe einwandfreie Mengenermittlungen durchgeführt werden können¹. Es soll nachstehend dieses Druckabfallverfahren kurz betrachtet werden. Wegen der angenäherten Bestimmung des Durchflusses bei rauhen Rohren nach den verschiedensten empirischen Formeln sei auf die Literatur verwiesen².

Es ist bereits auf den Unterschied der laminaren und turbulenten Strömung aufmerksam gemacht worden (s. S. 729), der darin besteht, daß im allgemeinen bei der kritischen Geschwindigkeit $(Re)_{Dkr} = 2300 - 2400$ eine Änderung der Geschwindigkeitsverteilung im Rohrquerschnitt und ein ziemlich plötzlicher Anstieg des Druckabfalls längs der Rohrleitung eintritt. Die Gesetzmäßigkeiten für den Widerstand sind also je nach der Strömungsart verschieden.

Für gefüllte kreisförmige Rohrleitungen gültige Beziehungen sind auch auf andere Querschnittsformen und nicht gefüllte Leitungen (mit Ausnahme von stark gestreckten Formen) zu verallgemeinern, wenn hier an Stelle der für die Weite der Rohrleitung charakteristischen Größe (Radius oder Durchmesser) eine andere geometrische Bezugsgröße eingeführt wird. In der Hydrodynamik ist als solche der hydraulische Radius R_h gebräuchlich. Er stellt das Verhältnis dar der Querschnittsfläche F zum benetzten Umfang U , also $R_h = F/U$; dabei ist bei den offenen Gerinnen der freie Spiegel nicht zu dem benetzten Umfang zu rechnen. Da nach dieser Angabe für den gefüllten kreisförmigen Querschnitt $R_h = R/2$ ist, also mit dem geometrischen Radius nicht übereinstimmt, wird als kennzeichnende Weite auch $2F/U$ bzw. $4F/U$

¹ M. Jakob hat erstmalig aus dem Druckabfall in glatten Rohren die Geschwindigkeit gemessen. Siehe Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. **66**, 178 u. 864 (1922); Wissensch. Abh. physikal.-techn. Reichsanstalt **5**, 433 (1922).

² Siehe z. B. W. Wien u. F. Harms: Handbuch der Experimentalphysik, Bd. IV, 4, S. 297. Leipzig 1932. — Geiger, H. u. W. Scheel: Handbuch der Physik, Bd. VII, S. 146f. u. 173f. Berlin 1927. — Auerbach, F. u. W. Hort: Handbuch der Physik und technischen Mechanik, Bd. 5. Leipzig 1931. — Forchheimer, Ph.: Hydraulik. Leipzig u. Berlin 1930. — Hütte, 26. Aufl., S. 370. Berlin 1931. — Prandtl, L.: Neuere Ergebnisse der Turbulenzforschung, Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. **77**, 105 (1933); daselbst weitere Literaturangaben. Über das Widerstandsgesetz turbulenter Flüssigkeitsströmungen in rauhen Rohren siehe J. Nikuradse: Strömungsgesetze in rauhen Rohren. Forsch. Ing.-Wes. **1933**, Heft 361; Auszug in Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. **77**, 1075 (1933).

benutzt, wobei zur Vermeidung von Verwechslungen diese Verhältnisse nach Jakob¹ mit „gleichwertiger Radius“ R_g bzw. „gleichwertiger Durchmesser“ D_g bezeichnet werden.

Für die stationäre laminare Strömung in hinreichend langen und engen Röhren von der Länge l (m), dem Durchmesser D (m) und der Zähigkeit η (kg s/m²) strömt unter der Druckdifferenz $P_1 - P_2$ (kg/m²) nach dem Hagen-Poiseuilleschen Gesetz das Durchfließvolumen:

$$Q = \frac{\pi D^4}{128 \eta} \frac{P_1 - P_2}{l} \text{ m}^3/\text{s}. \quad (114)$$

Der Durchfluß ist demnach unter gewissen Voraussetzungen proportional dem zur Überwindung der inneren Flüssigkeitsreibung erforderlichen Druckabfall und umgekehrt verhältnismäßig der stark temperaturabhängigen Zähigkeit η . Erforderlich ist eine parabolische Geschwindigkeitsverteilung, wozu eine Anlaufstrecke von

$$l_1 > 0,065 \cdot D \cdot (Re)_D \text{ m}$$

benötigt wird².

Der Druck wird bei den engen Capillaren am einfachsten in Erweiterungsstücken an den Enden der Meßstrecke gemessen. Es sind dann Berichtigungen anzubringen, und zwar zur Berücksichtigung der notwendigen Beschleunigung der Flüssigkeit bis zum stationären Zustand und zur Berücksichtigung des zusätzlichen Druckverlustes in der Anlaufstrecke. Beide Korrekturglieder — nach Hagenbach und Couette bezeichnet — zusammengefaßt, ergeben eine Vergrößerung des Druckabfalles um den wahrscheinlichen Betrag von $1,1 \cdot \gamma w^2/g$. Für Gase und Dämpfe tritt bei größerem Druckabfall noch eine weitere Expansionskorrektur hinzu, welche bis einige Prozent des Gesamtdruckabfalles betragen kann³.

Das Poiseuillesche Gesetz, „die klassische Bestätigung der hydrodynamischen Ansätze“, wird sehr oft benutzt für die Zähigkeitsmessung, da es die einwandfreiesten Bestimmungen der Zähigkeitszahl ermöglicht. Für die technische Mengenmessung kommt es nur gelegentlich bei sehr geringen Durchflüssen in Frage. Die erwähnte Korrektur ist möglichst unter $0,1 (P_1 - P_2)$ zu halten, es sind also nur kleine Geschwindigkeiten zulässig. Wegen der begrenzten Gültigkeit des Gesetzes und der schwierigen Erfassung des Durchmessers sind Capillarmesser⁴ empirisch zu eichen. Zur Messung größerer Flüssigkeitsmengen werden beim Capomesser⁵ und bei der Capillarpatrone des Strömungsteilers

¹ Siehe A. Eucken u. M. Jakob: Der Chemie-Ingenieur, Bd. I/1, S. 34. Leipzig 1933. Auch M. Jakob: Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 76, 896 (1932); daselbst auch Bemerkung von A. Schack, daß bei ungewöhnlichen Querschnittsformen Vorsicht bei Anwendung von D_g geboten ist.

² Prandtl, L. u. O. Tietjens: Hydro- und Aeromechanik, Bd. 2, S. 24f. Berlin 1931.

³ Erk, S.: Über Zähigkeitsmessung nach der Capillarmethode. Ztschr. techn. Physik 10, 452 (1929).

⁴ Einfacher Capillargasmesser bei E. H. Riesenfeld: Gas- u. Wasserfach 61, 617 (1918).

⁵ Siehe L. Ubbelohde u. H. Hofsäß: Gas- u. Wasserfach 55, 557 (1912); Ztschr. Elektrochem. 19, 32 (1913).

(s. S. 794) von den Askania-Werken mehrere parallel geschaltete Capillaren benutzt. An Stelle des kreisförmigen Querschnittes sind auch enge Ringspalte¹ in Verwendung.

Bei der laminaren Strömung ist der Druckabfall in geraden und glatten Kreisrohren, wenn von den erwähnten Korrektionsgliedern abgesehen wird,

$$P_1 - P_2 = \eta \frac{32 l w}{D^2} \text{ kg/m}^2, \quad (115)$$

bei der turbulenten Strömung oberhalb von $(Re)_{Dkr}$ dagegen mit der von $(Re)_D$ abhängigen Widerstandszahl ψ

$$P_1 - P_2 = \psi \frac{l}{D} \frac{\gamma w^2}{2 g} \text{ kg/m}^2. \quad (116)$$

Die Ausdehnung dieses Widerstandsgesetzes auch auf die laminare Strömung führt dann unter Benutzung von Gleichung (115) zu der bekannten dimensionslosen Darstellung des Hagen-Poiseuilleschen Gesetzes

$$\psi = 64 (Re)_D^{-1} = a (Re)_D^{-1}. \quad (117)$$

Für andere Strömungsquerschnitte und nicht gefüllte Rohrleitungen² (Kanäle) ist nun der Durchmesser D zu ersetzen durch den gleichwertigen Durchmesser $D_g = 4 F/U$. In dem laminaren Gebiet ändert sich aber die Konstante a der Gleichung (117). So z. B. wird für die Ellipse mit dem Achsenverhältnis $h/b = 0,5$ die Konstante $a = 68$ ($D_g = 1,3 h$), für das Rechteck mit dem Seitenverhältnis $h/b = 0,5$ $a = 62$ ($D_g = 1,33 h$) und für das Quadrat mit der Seitenlänge h $a = 57$ ($D_g = h$)³. Die damit durchgeführte Berechnung der mittleren Geschwindigkeit w nach Gleichung (116) ergibt alsdann durch Multiplikation mit dem Strömungsquerschnitt den sekundlichen Durchfluß.

Im Übergangsbereich der laminaren zur turbulenten Strömung sind wegen der periodisch einsetzenden Turbulenz Druckabfallmessungen zur Mengenbestimmung ungeeignet.

Die Widerstandszahl ψ setzt sich zusammen aus einem Reibungsglied ψ_R und einem Beschleunigungsglied ψ_B , das für kompressible Flüssigkeiten in Frage kommt, da hier infolge des durch Reibung hervorgerufenen Druckverlustes eine Ausdehnung und damit Beschleunigung eintritt. Der angenäherte Wert von ψ_B beträgt bei Annahme isothermischer Expansion:

$$\psi_B = \frac{4 D}{l} \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2}.$$

Bei inkompressiblen Flüssigkeiten ist $\psi_B = 0$ und damit $\psi = \psi_R$.

Für die ausgebildete turbulente Strömung in glatten Kreisrohren, zu deren Ausbildung für große Reynoldssche Zahlen und bei störungslosem Zustrom eine Strecke von $l_2 = 5 \cdot 10^5 D/(Re)_D$ erforderlich ist,

¹ Siehe L. Ubbelohde u. R. Anwandter: Gas- u. Wasserfach **60**, 228 (1917). — Hofsäb, M.: Gas- u. Wasserfach **70**, 293 (1927).

² Über „Wassermengemessung mit offenen seitlich eingeschnürten Kanälen (Venturikanälen)“ siehe F. Engel: Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. **77**, 1285 (1933).

³ Siehe A. Eucken u. M. Jakob: Der Chemie-Ingenieur, Bd. I/1, S. 103. Leipzig 1933.

wird nach Blasius¹ die Widerstandszahl ψ des Widerstandsgesetzes [Gleichung (116)] in der dem Ähnlichkeitsgesetz entsprechenden Form:

$$\psi = 0,3164 (Re)_D^{-0,25} \quad (118)$$

Bis zu Reynoldsschen Zahlen $(Re)_D = 10^5$ werden mit diesem einfachen Potenzansatz die tatsächlichen Strömungsverhältnisse sehr gut wiedergegeben. Abb. 164 zeigt die Widerstandszahl ψ als Funktion der Reynoldsschen Zahl in logarithmischer Darstellung. Gleichzeitig ist in der Abbildung als Beispiel der ψ -Verlauf eines rauhen Rohres vom Typ der „Wandwelligkeit“ [ψ abhängig von $(Re)_D$, aber unabhängig von D

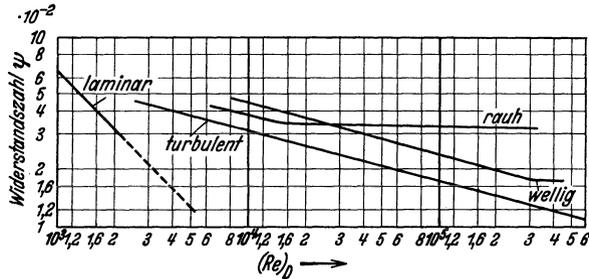


Abb. 164. Widerstandszahl ψ als Funktion von $(Re)_D = wD/\nu$.

bzw. D_g] und der „Wandrauhigkeit“ [ψ unabhängig von $(Re)_D$, aber abhängig von der relativen Rauigkeit k/D] dargestellt. Oberhalb des angegebenen Grenzwertes gilt für glatte Rohre das erweiterte Potenzgesetz von Nikuradse²

$$\psi = 0,0032 - 0,221 (Re)_D^{-0,237} \quad (119)$$

Nach den neueren Untersuchungen wird das Widerstandsgesetz turbulenter Rohrströmung für den ganzen Bereich oberhalb der kritischen Reynoldsschen Zahl wiedergegeben nach Prandtl³ in einer von v. Kármán gewählten Darstellung durch die Formel

$$\frac{1}{\sqrt{\psi}} = 2,0 \log [(Re)_D \sqrt{\psi}]^{-0,8} \quad (120)$$

Hierbei ist die Widerstandszahl ψ in schrittweiser Annäherung zu berechnen.

Diese für turbulente Strömung in Kreisrohren gültigen Beziehungen lassen sich bei Einführung des gleichwertigen Durchmessers D_g auch auf andere Berandungen übertragen. Für Gerinne wird dabei mit dem Gefälle $I = (P_1 - P_2)/\gamma l$ die Strömungsgeschwindigkeit

$$w = \sqrt{\frac{2g}{\psi} D_g \cdot I} \text{ m/s} \quad (121)$$

¹ Blasius, H.: Das Ähnlichkeitsgesetz bei Reibungsvorgängen in Flüssigkeiten. Forsch.-Arb. Ing.-Wes. 1933, Heft 131.

² Nikuradse, J.: Gesetzmäßigkeiten turbulenter Strömung in glatten Rohren. Forsch. Ing.-Wes. 1932, Heft 356. Ein Vergleich der verschiedenen Widerstandsformeln siehe bei H. Richter: Druckverlust im glatten geraden Kreisrohr. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 76, 1273 (1932). Siehe auch H. Richter: Rohrhydraulik, S. 109. Berlin 1934.

³ Prandtl, L.: Neuere Ergebnisse der Turbulenzforschung. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 77, 111 (1933).

oder auch (Chezysche Formel)

$$w = C \cdot \sqrt{D_g \cdot I} \text{ m/s,} \quad (121a)$$

wobei Chezys Zahl C ($\text{m}^{1/2}\text{s}^{-1}$) je nach Wassertiefe und Wandbeschaffenheit verschiedene Werte annimmt¹.

Bei der Mengemessung aus dem Druckabfall strömender Flüssigkeiten in geraden und glatten Rohren ist eine Genauigkeit von $\pm 0,6\%$ erreichbar. Als Betriebsmessung ist das Verfahren nicht geeignet, da die Genauigkeit der Messung durch veränderliche Wandbeschaffenheit störend beeinflußt wird und die Berechnung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit² nicht einfach durchführbar ist.

4. Mengemessung mit Messerkombinationen.

In manchen Fällen der praktischen Meßtechnik haben sich Kombinationen gleichartiger oder verschiedener Meßmethoden bewährt. Der

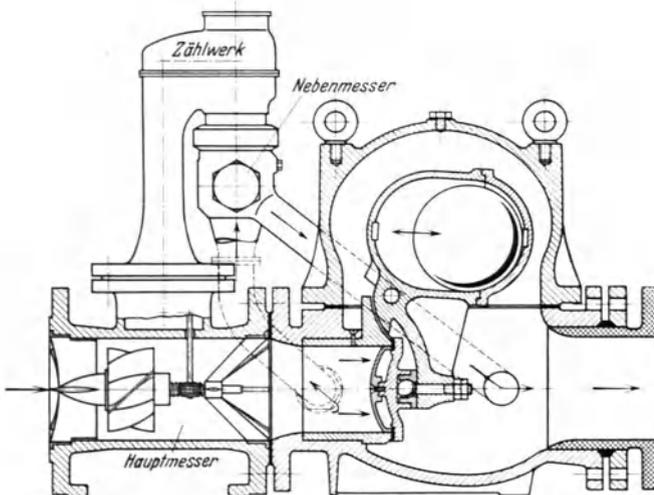


Abb. 165. Woltmann-Wassermesserkombination.

Zweck der Messerkombinationen kann entweder die Vergrößerung des Meßbereiches oder die Vereinfachung der Messung größerer Flüssigkeitsmengen sein. Bei der ersten Kombinationsart handelt es sich um die zweckmäßige Vereinigung der Meßempfindlichkeit kleiner Messertypen mit der Durchlaßfähigkeit großer Messer, bei der zweiten, als Teilstromverfahren bekannt und häufig benutzt, um die Messung eines vom Hauptflüssigkeitsstrom abgezweigten Nebenstromes unter bestimmten Bedingungen. Voraussetzung für das letzte Meßprinzip ist nämlich ein

¹ Siehe bei Ph. Forchheimer: *Hydraulik*, S. 139f. Leipzig u. Berlin 1930.

² Siehe bei M. Jakob u. S. Erk: *Der Druckabfall in glatten Rohren und die Durchflußziffer von Normaldüsen*. *Forsch.-Arb. Ing.-Wes.* 1924, Heft 267. — Richter, H.: *Ztschr. Ver. Dtsch. Ing.* 76, 1274 (1932).

konstantes Verhältnis zwischen Teilstrom und Gesamtstrom, da hier der Hauptdurchfluß stets erhalten wird durch Multiplikation der gemessenen Teilstrommenge mit einem Proportionalitätsfaktor. Es sind daher bei einigen Ausführungsformen besondere Vorrichtungen zur Gewährleistung der erforderlichen Genauigkeit notwendig. Von den verschiedenen Messerkombinationen seien nachstehend einige kurz angeführt.

Am einfachsten ist die für inkompressible Flüssigkeiten benutzte Kombination gleichartiger motorischer Messertypen. Die Messer verschiedener Größen werden hintereinander oder parallel geschaltet, arbeiten

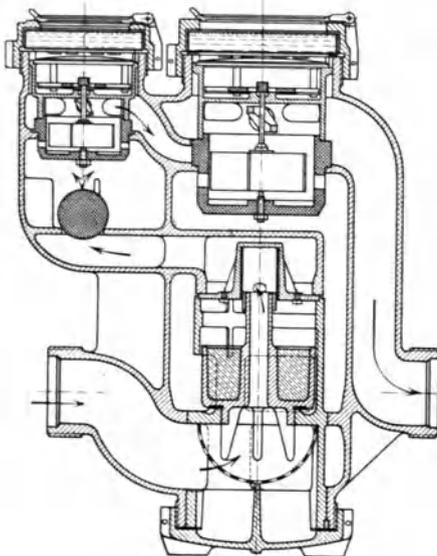


Abb. 166. Flügelrad-Wassermesserkombination in Parallelschaltung mit getrennten Zeigern.

auf ein gemeinsames Zählwerk oder auf Einzelwerke. Durch Klappenventile oder hydraulisch entlastete Umschaltventile, die bei einwandfreier Ventilherstellung und bei entsprechender Beschaffenheit der Meßflüssigkeit schnell und sicher erst nach Überschreitung der unteren Genauigkeitsgrenze des Hauptzählers öffnen, werden Fehler in der Umschaltzone vermieden. Für größere Rohrleitungen kommen Woltmann-Messerkombinationen (Abb. 165), für kleinere Flügelrad-Messerkombinationen (Abb. 166) in Frage¹.

Bei kombinierten Woltmann-Messern für 100/40 mm Anschlußweite lassen sich z. B. Durchflußmengen von 150 l/h bis 90 m³/h (also Meßbereich 1 : 600) mit der normalen Fehlergrenze von $\pm 2\%$ durchführen, wobei der Druckverlust 1,5 m WS nicht übersteigt. Während hier bei Hintereinanderschaltung der Nebemesser nach dem Hauptmesser angeordnet ist, ist bei der kleinsten Type der Flügelrad-Messerkombinationen (Zwillingswassermesser) für 40/13 mm Anschlußweite der Nebemesser vorgeschaltet. Außerdem sind hier die beiden Messertypen und das Umschaltventil in einem Gehäuse untergebracht.

Eine weitere Kombination von Geschwindigkeitsmessern wurde bereits erwähnt. Es ist der Staurand-Rotamesser², bei dem ein mit konstanter Druckdifferenz arbeitender Schwimmermesser dem in der Hauptleitung befindlichen Drosselgerät parallel geschaltet ist. Um ihn aber zur Anzeige der Druckdifferenz verwendbar zu machen, muß in die Nebenleitung eine kleine entsprechende Drosselung eingebaut werden,

¹ Ausführungen siehe bei G. Eggers: Neuere Bauarten motorischer Wassermesser. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 73, 561 (1929).

² Siehe Fußnote 1, S. 785.

welche derselben Druckdifferenz unterliegt wie das Hauptmeßgerät. Da erst in diesem Falle der vernachlässigbar kleine Durchfluß durch die im Umgang befindliche Drosselung im bestimmten Verhältnis zum Hauptwirkdruck steht, ist dann auch die Schwimmerstellung ein Maß für den Gesamtdurchfluß. Darin, daß der Schwimmer auch bei kleinen Wirkdrücken genau und zuverlässig arbeitet, liegt der Vorteil dieser Kombination. Durch Vergleich mit einem der Hauptdrosselung parallel geschalteten Differentialmanometer wird die Eichung durchgeführt. Bei dieser Abart des Teilstromverfahrens läßt sich durch elektromagnetische Übertragung der Schwimmerbewegung auch die Mengenregistrierung durchführen.

Bei den Teilstrommeßverfahren wird der zu messende Teilstrom entweder dem Hauptstrom wieder zugeführt oder abgeleitet.

Der bekannteste Teilstrommesser ist der Venturi-Partialmesser (Abb. 167), bei dem zwischen den beiden Druckentnahmestellen eines

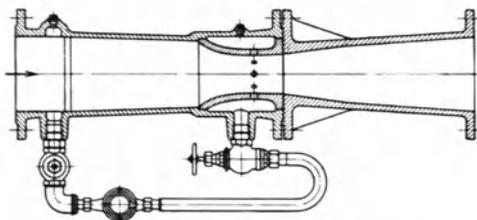


Abb. 167. Venturi-Partialmesser
(Siemens & Halske).

Venturirohres ein motorischer Messer zur Ermittlung des Zweigstromes verwendet wird. Die erforderliche Proportionalität zwischen dem Haupt- und Nebenstrom bleibt gewahrt, da für das Venturirohr wie auch für den motorischen Messer die quadratische Beziehung zwischen Widerstand und Durchfluß besteht. Wird der Proportionalitätsfaktor in das Meßwerk des parallel geschalteten Messers verlegt, so wird der Durchfluß dann ohne weiteres erhalten. Auch das bereits erwähnte Brauersche Meßverfahren (s. S. 781) wird zur Teilstrommessung von Flüssigkeiten benutzt. Die ausgeflossene Menge einer tropfbaren Flüssigkeit bei der Mehrfachlochdanaide mit n unter sich gleichen Ausflußöffnungen ergibt sich nach Abfangen eines einzigen frei austretenden Flüssigkeitsstrahles und Feststellung seiner Menge Q' mit einem der üblichen Flüssigkeitsmesser zu $Q = n Q'$, wenn der Teilstrom dem Hauptstrom wieder zugeführt wird. Die Messung ist hier einfach, da der Ausfluß aller Öffnungen unter gleichen Bedingungen vor sich geht. Das gleiche Meßprinzip wird auch bei der Gasmessung angewendet. Bei diesem Proportionalgasmesser¹ wird eine Durchflußöffnung von den übrigen abgetrennt und der durch sie strömende Teilbetrag ermittelt, und zwar mit einer Gasuhr. Dabei ist erforderlich, daß die Strömung durch alle Drosselungen unter gleichen Bedingungen erfolgt, daß also die bei ihnen vorliegenden Druckverhältnisse stets gleich sind. Es muß daher der Widerstand der Umgangsleitung und der durch die Gasuhr verursachte störende Druckverlust, der von der Belastung abhängig ist, durch eine automatische Regelung oder im einfachsten Falle durch Regelung von Hand behoben werden.

¹ Von der Firma J. Pintsch A.G., Berlin.

An Stelle der zahlreichen engeren Drosselungen im Hauptstrom wird zur Teilstrommessung (Abb. 168) zweckmäßiger ein einziges weiteres Drosselgerät nach den bekannten Ausführungen benutzt. Die Druckentnahmestellen sind durch eine Umgangsleitung mit eingebauter Gasuhr verbunden. Zur Herbeiführung der proportionalen Teilströmung befindet sich vor der Gasuhr eine geometrisch ähnliche kleine Drosselung, die zur bequemen Sauberhaltung leicht auswechselbar oder herausklappbar angeordnet ist. Die Durchflussszahlen beider Drosselgeräte müssen natürlich im ganzen Meßbereich verhältnismäßig gleich sein. Um die auch hier wieder auftretenden Fehler durch Widerstandsänderungen der Gasuhr zu beheben und den Durchflußwiderstand des Meßgerätes zu beseitigen, werden Gasuhren mit Doppeltrommel benutzt^{1,2}. Die Dreharbeit der eigentlichen Meßtrommel wird durch die Antriebstrommel geleistet. Der erforderliche Arbeitsstrom für die Antriebstrommel wird dabei durch eine vom Ein- und Ausgangsdruck der Meßtrommel gesteuerte Regeleinrichtung entsprechend beeinflusst. In diesem Falle kann das durchgeflossene Volumen wiederum direkt an dem Gasmesser abgelesen werden. Bei stark schwankendem Durchfluß wird der Teilstrommesser auch mit einem Volumenmesser kombiniert². Der parallel

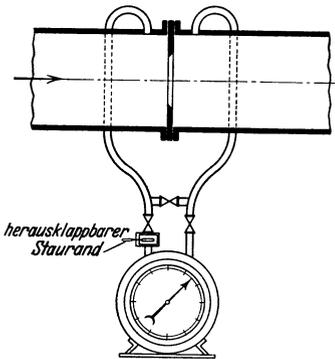


Abb. 168. Teilstrommesser.

geschaltete Volumenmesser wird durch eine automatische Umschaltvorrichtung in Betrieb gesetzt, sobald der Meßbereich des Teilstrommessers unterschritten wird. Ein für höhere statische Drücke und in besonderer Ausführung auch für Dampf verwendbarer Teilstrommesser ist der Askania-Stromteiler³ (Abb. 169). Hier wird eine dem Hauptstrom verhältnismäßige Menge abgezapft und nach erfolgter Messung in die Atmosphäre entspannt bzw.

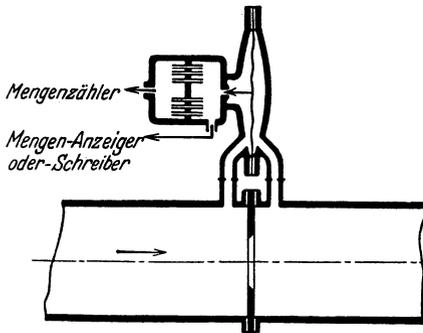


Abb. 169. Askania-Stromteiler.

kondensiert. Das erforderliche Meßprinzip, die Proportionalität von Haupt- und Nebenstrom, wird erreicht durch eine empfindliche Membran-nadelsteuerung, welche den Druck hinter dem Hilfsdrosselgerät stets gleich dem Druck hinter dem geometrisch ähnlichen Hauptdrosselgerät hält.

¹ Siehe Fußnote 1, S. 793.

² Siehe J. Fr. v. Schütz: Großgasmesser. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. **76**, 523 (1932).

³ Askania-Werke A. G., Berlin-Friedenau. Siehe A. Closterhalfen: Druckluftmesser für den Wettbewerb des Reichskohlenrats. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. **70**, 1160 (1926); auch Fußnote 2.

Die Membran ist also völlig entlastet. Zur Anzeige bzw. Registrierung wird hinter den Strömungsteiler eine Capillarpatrone geschaltet. Zahl und Durchmesser der Capillaren sind so bemessen, daß bei ihnen stets Laminarströmung vorliegt und infolgedessen die an der Capillarpatrone auftretende Druckdifferenz dem Durchfluß immer linear ist (Poiseuillesches Gesetz). Es ist aber zu beachten, daß die Anzeige wegen der temperaturempfindlichen Zähigkeit von Temperaturschwankungen abhängig ist, wenn nicht der Teilstrom auf konstanter Temperatur gehalten wird. Außerdem ist die Kenntnis der Zähigkeit erforderlich. Die Messung ist unabhängig von dem statischen Druck in der Hauptleitung. Zur Mengenzählung kann wiederum die Gasuhr benutzt werden. Wird diese hinter die erwähnte Capillarpatrone geschaltet, so ist hier der Fehler durch wechselnden Widerstand des Gasmessers im allgemeinen zu vernachlässigen.

Für kleine Druckdifferenzen benutzt der Druckwandler für Gasmesser¹ (Askania-Werke) das bekannte Strahlrohrprinzip zur Herstellung der gleichen Druckverhältnisse an Haupt- und Nebendrosselgerät (Abb. 170).

Die Methode gestattet auch die Anzeige bzw. Registrierung des Durchflusses über größere Entfernungen.

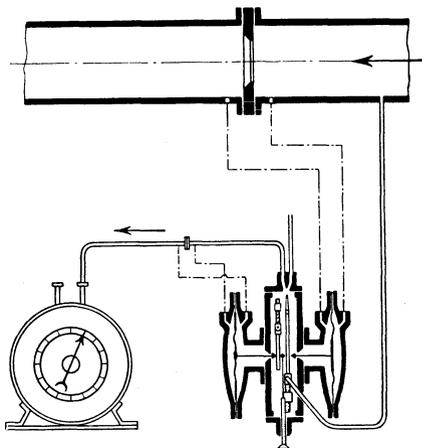


Abb. 170. Druckwandler für Gasmesser (Askania-Werke).

IX. Regelung von Druck und Menge².

A. Allgemeine Bemerkungen zur Regelung von Druck und Menge.

1. Vorbemerkung.

Die Regelung von Druck und Menge ist für die verschiedensten Industriezweige ein Arbeitsvorgang, auf dessen große Bedeutung nicht besonders hinzuweisen ist. In vielen Fällen ist nur auf Grund sorgfältiger Regelung dieser Größen eine in jeder Hinsicht zufriedenstellende Durchführung betrieblicher Vorgänge möglich.

Um einen Zustand (Druck, Menge) auf einen konstanten oder von irgendeiner zweiten oder mehreren Größen abhängigen Sollwert bringen

¹ Über einen Askania-Mengenzähler bei kleinen Druckdifferenzen unter Verwendung eines Druckwandlers siehe Meßtechn. 5, 27 (1929). Über den Druckwandler siehe auch Ann. Kraft- u. Wärmewirtsch. 1929/30, Heft 1.

² Bearbeitet von Dr. phil. C. Hilburg VDI, Ludwigshafen a. Rh.

zu können, müssen Zu- und Abfluß einer Anlage in Übereinstimmung gebracht werden. Hierzu werden Regelorgane benutzt, deren Betätigung entweder von Hand oder selbsttätig erfolgt. Bei der Regelung von Hand wird die Bedienung der Steuerorgane nach Maßgabe der Beobachtung des Bedienungspersonals durchgeführt, das in den Angaben betriebssicherer Meßgeräte eine wesentliche Unterstützung findet. Zur Erhöhung der Zuverlässigkeit werden die Meßinstrumente mit Alarmeinrichtungen versehen. Bei der selbsttätigen Regeleinrichtung wirken diese Meßgeräte unmittelbar oder mittelbar auf das zu steuernde Organ ein.

Alle Regler regeln eine Menge, denn stets ist bei einer Anlage der Durchfluß eines Mediums den jeweiligen Betriebsverhältnissen entsprechend zu beeinflussen. Im allgemeinen pflegt man mit Mengengerät nur einen Regler zu bezeichnen, bei dem die Mengenregelung Selbstzweck ist, doch ist auch bei allen anderen Reglern die Regelung einer Menge das Mittel zum Zweck.

Nachstehend soll ein Überblick über die verschiedenen Möglichkeiten zur Regelung von Druck und Menge gegeben werden¹. Einzelheiten, sowie die theoretischen Grundlagen zur Beherrschung der zahlreichen Regelaufgaben können dabei nicht berücksichtigt werden². Ebenso muß auf die Behandlung der Einrichtungen zur Regelung von Kraftmaschinen verzichtet werden. Die Druck- und Mengenregelung von Flüssigkeiten ist hier der Mengenregelung fester Stoffe vorangestellt. Bevor jedoch auf die eigentliche Regelung eingegangen wird, mögen einige allgemeine Grundfragen Erwähnung finden.

2. Die Drosselorgane.

Die bei der Regelung vorwiegend verwendeten Drosselorgane sind Schieber (bei größeren Nennweiten Ringschieber), Drosselklappen und Ventile. Von diesen eignen sich die Schieber für beide Strömungsrichtungen, die Ventile im allgemeinen nur für eine Strömungsrichtung. Die neueren Schrägspindelventile³ sind jedoch meistens auch für beide Strömungsrichtungen brauchbar. Während Schieber und Drosselklappen für niedere Drücke in Frage kommen, sind Ventile für höhere Drücke und Druckgefälle anwendbar. Ist in der Schließstellung dichter

¹ Allgemeiner Überblick über die Grundlagen der Regeltechnik und ihrer Hilfsmittel S. 590.

² Über Grundfragen siehe M. Tolle: Regelung der Kraftmaschinen. Berlin 1921. — Stodola, A.: Dampf- und Gasturbinen. Berlin 1924. — Stein, Th.: Regelung und Ausgleich von Dampfanlagen. Berlin 1926. — Wunsch, G.: Regler für Druck und Menge. München und Berlin 1930. (Diesem Werk, das vorwiegend auf mechanische Regeleinrichtungen abgestellt ist, entstammen mehrere der in diesem Abschnitt wiedergegebenen Abbildungen.) — Neumann, G. und G. Wunsch: Regler. Wärmestelle des Vereins deutscher Eisenhüttenleute, Mitt. 168, 171, 188, 193, 194. 1932/34.

³ Versuche über den Strömungswiderstand an einer Reihe neuerer Ventilbauarten siehe C. Pfeleiderer u. A. Closterhalfen: Wärme 53, 813, 956 (1930); 54, 78 (1931); sowie Arch. Wärmewirtsch. 12, H. 1 (1931). — Über Hochdruckdampfventile oder Schieber siehe M. Pichler: Ventil oder Schieber? Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 76, 227 (1932). — Stach, E.: Druckverlust in Formstücken und Absperrungen. Arch. Wärmewirtsch. 13, 259 (1932).

Abschluß erforderlich, so scheidet die bewährte durchschlagende Drosselklappe aus. Einsitzventile dichten besser ab als Doppelsitzventile, sie benötigen aber eine größere Verstelleistung als die leicht zu entlastenden Ventile der letzten Art.

3. Der Drosselquerschnitt.

Wie man bei der Handregelung sehr häufig festzustellen Gelegenheit hat, ist die Charakteristik des zur Drosselung benutzten Regelorganes für die Durchführung der Regelung von besonderer Bedeutung [über den Durchlaß normaler Ventile s. Wärme 53, 93 (1930); Power 70, 494 (1929)]. Der gewünschte Regelzustand läßt sich leicht und sicher nur dann erreichen, wenn die Drosselquerschnitte richtig bemessen sind. Auch nur in diesem Falle kann von einem selbsttätigen Regler einwand-

freies Arbeiten erwartet werden.

Die Berechnung der Drosselquerschnitte stößt aber auf gewisse Schwierigkeiten, da hier nicht die gleichen sicheren Ver-

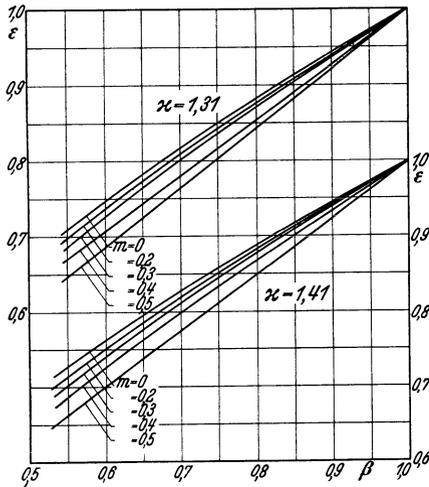


Abb. 171. Expansionsberichtigung $\varepsilon = f(\beta, m, \kappa)$ für kontraktionsfreie Drosselgeräte (Normdüsen, $\mu = 1$) bei adiabatischer Expansion.

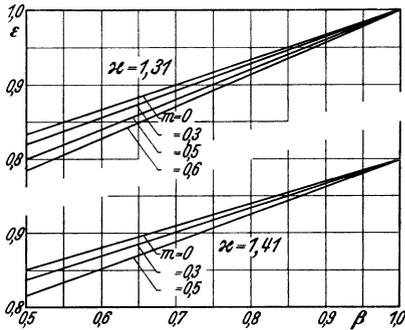


Abb. 172. Expansionsberichtigung $\varepsilon = f(\beta, m, \kappa)$ für Normblenden.

hältnisse vorliegen wie bei der an anderer Stelle behandelten Strömung von Flüssigkeiten durch genormte Drosselungen (S. 755). Immerhin aber besteht die Möglichkeit, mit den bei den Düsen und Blenden herrschenden Gesetzmäßigkeiten einen Drosselquerschnitt zu berechnen, der mit Annäherung dem erforderlichen Querschnitt des Regelorganes gleichwertig ist. Zu beachten ist hierbei, daß die Gültigkeit der für einfache Drosselgeräte entwickelten Beziehungen zwischen Durchfluß Q , engstem Querschnitt F_0 und dem Druckgefälle¹ oder Wirkdruck ($P_1 - P_2$) begrenzt ist. Während nämlich bei den zur Mengemessung verwendeten Drosselorganen vorwiegend nur mit kleinen Druckgefällen gearbeitet wird, treten bei Regelvorgängen auch so große Druckgefälle auf, daß der Gültigkeitsbereich der einfachen Durchflußgleichungen überschritten wird.

¹ Druck P_1 vor, P_2 nach der Drosselung in kg/m^2 , der Druck in kg/cm^2 wird mit p bezeichnet.

Für den Durchfluß kompressibler Flüssigkeiten wurde die allgemeine Gleichung [Gleichung (99), S. 760] abgeleitet:

$$Q = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{2g} \sqrt{(P_1 - P_2) v_1} m^3/s. \tag{122}$$

Der hier auftretende Berichtigungsfaktor ε (für inkompressible Flüssigkeiten $\varepsilon = 1$) enthält das Druckverhältnis $P_2/P_1 = \beta$ [s. Gleichung (98), S. 760], das in bestimmtem Falle maßgebend für den Gültigkeitsbereich dieser

Durchflußformel ist. Zum Zwecke der normalen Mengenmessung mit Düsen und Blenden ist ε experimentell ermittelt worden. Für kleinere Expansionen ist diese Größe bereits in den Abb. 155 und 156 auf S. 767 bzw. S. 768 als Funktion von $(P_1 - P_2) = 1 - \beta$, κ (Exponent der Adiabate) und dem Öffnungsverhältnis $m = F_0/F_1$ graphisch dargestellt. Die beiden Abb. 171 und 172 geben ε auch für größere Druckgefälle in Abhängigkeit von β , κ und m wieder [nach R. Witte: Die Strömung durch Düsen und Blenden. Forsch. Ing.-Wes. 2, Nr. 7 u. 8 (1931) bzw. A. Eucken u. M. Jakob: Der Chemie-Ingenieur, Bd. II/2, 203 u. 204. Leipzig 1933].

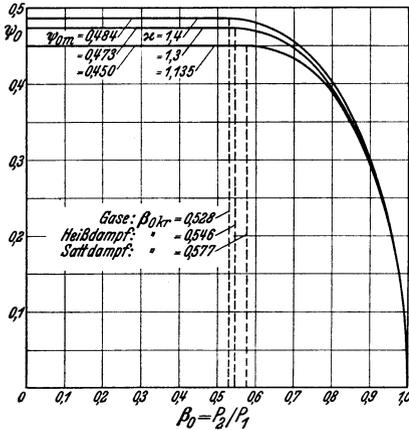


Abb. 173. Ausflußwert $\psi_0 = f(\beta_0, \kappa)$ für Düsen ($\mu = 1$, $m = 0$) bei adiabatischer Expansion.

Wie aus den früheren Darlegungen hervorgeht (vgl. S. 760) läßt sich die Gleichung (122) auf die Form bringen:

$$G = \alpha \varepsilon_1 \psi_0 F_0 \sqrt{2g} \sqrt{\frac{P_1}{v_1}}, \tag{123}$$

$$= \alpha \psi F_0 \sqrt{2g} \sqrt{\frac{P_1}{v_1}}, \tag{123a}$$

wobei der Durchflußwert

$$\psi = \sqrt{\frac{1 - m^2 \mu_k^2}{1 - m^2 \mu_k^2 \beta^\kappa}} \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa - 1} \left(\beta^{\frac{2}{\kappa}} - \beta^{\frac{\kappa + 1}{\kappa}} \right)}. \tag{124}$$

Für den Sonderfall des Ausflusses aus einem unendlich großen Raum ($w_1 = 0$, $m = F_0/F_1 = 0$) wird $\psi = \psi_0$ (Abb. 173).

Mit $\alpha = 1$ ergibt sich damit aus Gleichung (123a) die von de Saint-Venant und Wantzel und später auch von Weisbach für reibungs- und kontraktionsfreien Ausfluß kompressibler Flüssigkeiten aufgestellte Ausflußgleichung [Näheres s. bei G. Zeuner: Techn. Thermodynamik 1, 233. Leipzig 1905. — W. Schule: Techn. Thermodynamik 1, 319. Berlin 1921]:

$$G = \psi_0 F_0 \sqrt{2g} \sqrt{\frac{P_1}{v_1}}. \tag{125}$$

Erreicht das Druckverhältnis β den durch den Exponenten der Adiabate bestimmten kritischen Wert

$$\beta_{0kr} = \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}, \tag{126}$$

so geht der Ausflußwert ψ_0 über in seinen maximalen Wert (Abb. 174):

$$\psi_{0m} = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa + 1} \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{2}{\kappa - 1}}}. \tag{127}$$

Bei diesem Grenzwert hat die Geschwindigkeit im Mündungsquerschnitt ihren Höchstwert, die Schallgeschwindigkeit beim Mündungszustand, erreicht.

Das sekundliche Ausflußgewicht wächst demnach bei konstantem Enddruck P_2 mit steigendem Anfangsdruck P_1 an, um beim kritischen Druckverhältnis β_{0kr} einen nur noch vom Anfangszustand abhängigen maximalen Wert anzunehmen. Ebenso wird bei festgehaltenem Anfangszustand und fallendem Enddruck der Ausfluß ansteigen bis zu der durch Gleichung (126) bestimmten Grenze des Druckverhältnisses, jede weitere Drucksenkung wird alsdann ohne Einfluß bleiben.

Für den allgemeinen Fall ist nach Gleichung (124) der Durchflußwert ψ noch vom Öffnungsverhältnis m und der Kontraktionszahl μ abhängig.

Während bei den kontraktionsfreien Drosselungen (Düsen, $\mu_k = \mu = 1$) von einem dem Öffnungsverhältnis m jeweils entsprechenden kritischen Druckverhältnis β_{kr} ab ein maximaler Durchflußwert ψ_m erreicht wird, steigt bei den Blenden der ψ -Wert ständig an [s. W. Schiller: Überkritische Entspannung kompressibler Flüssigkeiten. Forsch. Ing.-Wes. 4, 128 (1933)].

Die für Blenden und überhitzten Wasserdampf bisher nur vorliegenden Versuchsergebnisse (vgl. W. Schiller) veranschaulicht Abb. 175. Zur besseren Kennzeichnung des grundverschiedenen Verhaltens der genormten Drosselungen bei überkritischer Entspannung sind hier auch die entsprechenden ψ -Werte der Düsen aufgenommen.

Da bei den Düsen im Falle überkritischer Entspannung der ψ -Wert einen Festwert ψ_m erreicht, kann dieser maximale Durchflußwert mit der bekannten Durchflußzahl α (s. Abb. 152, S. 765) zusammengefaßt werden. Wird außerdem in Gleichung (123a) an Stelle F_0 (m²) der Düsendurchmesser d (mm) eingeführt und P_1 (kg/m²) ersetzt durch p_1 (kg/cm²), so wird das stündliche Maximaldurchflußgewicht:

$$G = C d^2 \sqrt{\frac{p_1}{v_1}} \text{ kg/h.} \tag{128}$$

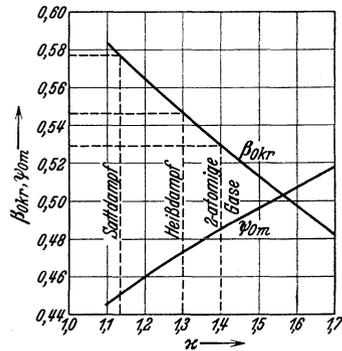


Abb. 174. Kritisches Druckverhältnis β_{0kr} und maximaler Ausflußwert ψ_{0m} bei adiabatischer Expansion und kontraktionsfreien Düsen ($\mu = 1, m = 0$).

Nach dem bisher vorliegenden Versuchsmaterial wird für die Normdüse die Abhängigkeit der Rechengröße $C = 0,2827 \alpha \psi_m \sqrt{2g}$ von dem Öffnungsverhältnis m und κ durch Abb. 176 dargestellt.

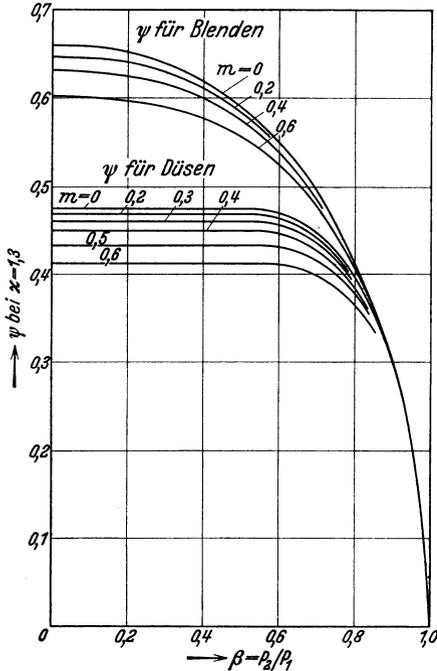


Abb. 175. Durchflußwert $\psi = f(\beta, m)$ für Normblenden und Normdüsen ($\mu = 1$) bei $\kappa = 1,3$ (berechnet nach W. Schiller).

Bei Blenden steigt der Durchflußwert ψ ständig an (bis $\beta = 0,14$ experimentell bei Heißdampf von W. Schiller festgestellt). Hier gilt auch bei überkritischer Entspannung die Gleichung (123a) oder entsprechend der Gleichung (128) für das stündliche Durchflußgewicht:

$$G = 1,2518 \cdot \alpha \cdot \psi \cdot d^2 \sqrt{\frac{P_1}{v_1}} \text{ kg/h. (128a)}$$

Die ψ -Werte für $\kappa = 1,3$ sind der Abb. 175 zu entnehmen. Für $\kappa = 1,4$ ist vorläufig noch nach Gleichung (122) zu rechnen, wobei die ϵ -Werte mit Annäherung durch Extrapolation aus Abb. 172 erhalten werden können.

Zu erwähnen ist noch, daß meistens nicht der hier bei der Berechnung des Drosselquerschnittes in Frage kommende Mündungsdruck, sondern der um gewissen Druckverlust verkleinerte, leicht zu erfassende Druck P_2 gemessen wird.

Dieser Druckunterschied ist in manchen Fällen wohl zu beachten. Um bei besonders großen Druckgefällen unzulässig hohe Strömungsge-

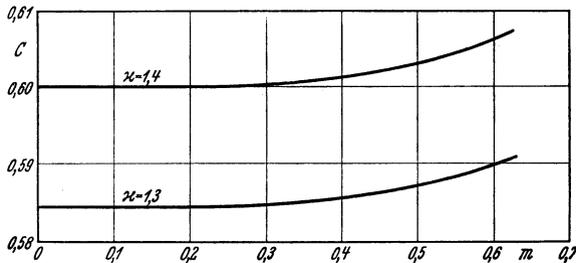


Abb. 176. Rechenkonstante C für Normdüsen bei Durchflußmessungen im überkritischen Gebiet.

schwindigkeiten zu vermeiden, wird auch eine mehrstufige Drosselung angewandt. So z. B. kann eine stufenweise Entspannung durch Hintereinanderschaltung eines Drosselventiles und einer den Verhältnissen entsprechend dimensionierten Düse [Th. Stein: Regelung und Ausgleich von Dampfanlagen, S. 41. Berlin 1926] herbeigeführt werden.

B. Druck- und Mengenregelung von Flüssigkeiten (Gasen und Dämpfen).

1. Handregelung.

a) Handbetätigte Einstellorgane.

Bei der Regelung von Hand kommen zur Aufrechterhaltung eines gewünschten Gleichgewichtszustandes zwischen Zu- und Abfluß einer Anlage die üblichen Drosselorgane in Frage.

Die Beobachtung des zu regelnden Zustandes ist hierbei in den meisten Fällen unerläßlich. Gestatten die benutzten Drosselorgane nicht gleichzeitig eine Kontrolle, wie es z. B. bei dem Hahn-, Klappen- und Ventildurchflußmesser (Deutsche Rota-Werke G. m. b. H.,

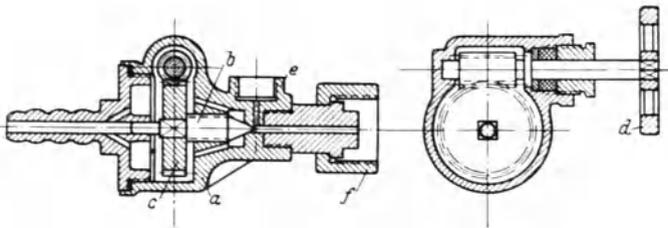


Abb. 177. Feinregelventile für Druckgase. *a* Ventilgehäuse, *b* Absperriegel, *c* Schneckenrad, *d* Handrad, *e* Stutzen für Manometer, *f* Sechskantmutter. (A.G. für Kohlensäure-Industrie Berlin.)

Aachen) oder dem Ringschieber (Gebr. Reuling, G. m. b. H., Mannheim-Neckarau, s. Abb. 180) der Fall ist, so sind zur Rückmeldung besondere Meßinstrumente einzubauen.

Örtliche und betriebliche Verhältnisse lassen sich bei den Reguliereinrichtungen durch Sonderausführungen wie z. B. verlängerte Antriebsspindel, Antrieb mit Kettenrad und Handkette usw. berücksichtigen. Wenn die einfache Antriebsart wegen der verfügbaren Kraft oder zur leichteren Feineinstellung nicht ausreicht, werden auch besondere Übersetzungselemente zwischengeschaltet. So zeigt z. B. die Abb. 177 ein kleines Ventil für Druckgase mit Feineinstellung [Ventil der Aktiengesellschaft für Kohlensäure-Industrie, Berlin. Siehe Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 70, 961 (1926)].

Die Handregelung kann auch bei größeren Nennweiten angewandt werden, wenn eine Betätigung dieser Regelorgane nur in größeren Zeiträumen erforderlich ist und die hierbei nicht zu vermeidende längere Schließzeit unbedenklich ist. Sind jedoch häufigere Regelungen durchzuführen, und ist vor allem eine kurze Schließzeit notwendig, dann ist die halbsselbsttätige Regelung, bei der nur die Einschaltung des benutzten hydraulischen, hydraulisch-elektrischen oder elektrischen Antriebes von Hand erfolgt, angebracht.

Bei hydraulischer Steuerung wird dann z. B. auf dem Schieberdeckel ein Zylinder mit Arbeitskolben (Gaspolster stets vermeiden!) angeordnet,

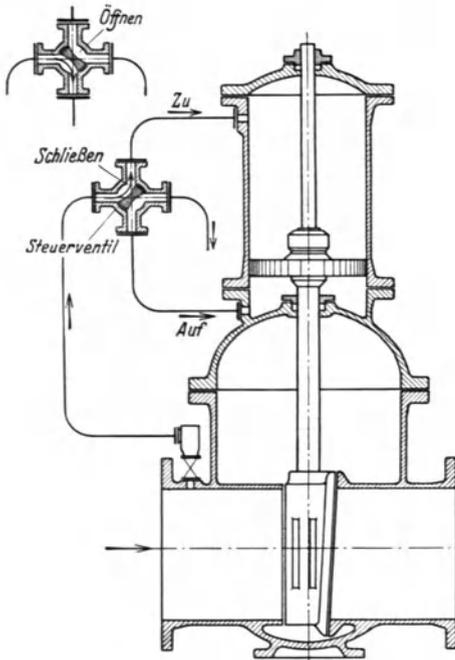


Abb. 178. Anordnung des hydraulischen Antriebs für Keilschieber (Gebr. Reuling, G. m. b. H., Mannheim-Neckarau).

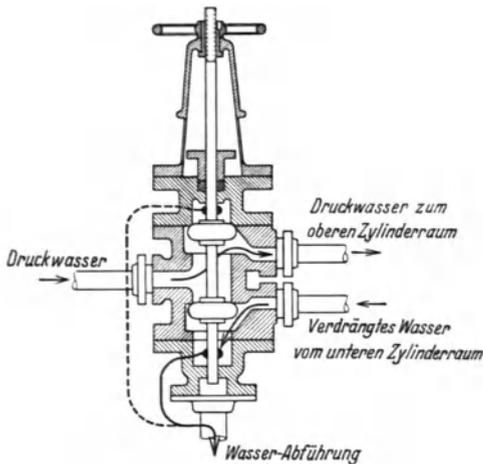


Abb. 179. Hydraulisches Steuerventil (Gebr. Reuling, G. m. b. H., Mannheim-Neckarau).

wie dies die Prinzipskizze der Abb. 178 erkennen läßt (Gebr. Reuling, G. m. b. H., Mannheim-Neckarau). Das erforderliche Druckwasser von mindestens 1 atü wird bei diesem Beispiel der Druckleitung vor dem Hauptschieber entnommen. Das durch Abb. 179 dargestellte Steuerventil, das durch Handrad oder Hebel betätigt werden kann, arbeitet, wie aus Abb. 178 ohne weiteres ersichtlich ist, wie ein Vierweghahn.

An Stelle von Druckwasser ist bei zu geringem oder stark schwankendem Netzdruck und Frostgefahr die Verwendung von Drucköl oder einer sonstigen frostsicheren Flüssigkeit erforderlich.

Ist das Regelorgan zur Entlastung mit einem kleinen Umföhrungsventil versehen, so muß dieses ebenfalls mit fremder Hilfskraft angetrieben werden. Eine Vereinfachung dieser Steuerung läßt sich dann durch Verwendung einer besonderen automatischen hydraulischen Steuervorrichtung erreichen, bei der die Bedienung von Haupt- und Entlastungsventil in der erforderlichen Abhängigkeit mittels eines einzigen Handrades erfolgt (Gebr. Reuling, G. m. b. H., Mannheim-Neckarau).

Für größere Entfernungen kommt die hydraulisch-elektrische oder die elektrische Steuerung in Frage. Das hydraulische Steuerventil wird durch einen angebauten Elektromotor oder Elektromagneten, deren Einschaltung von Hand durch Druckknopf- oder Hebelschalter erfolgt, entsprechend eingestellt. Der rein elektrische Antrieb zeichnet sich durch größere Einfachheit aus. Hier wirkt der Motor über ein Getriebe direkt auf die Antriebswelle des Absperrorganes. Endschalter

und ein besonderer Sicherheitsschalter, der im Falle mechanischer Störungen anspricht, sichern einwandfreies Arbeiten des ferngesteuerten Ventils.

Wenn bei größeren Entfernungen die jeweilige Schieberstellung nicht mehr zu überblicken ist und die erforderliche Rückmeldung durch einfache Beobachtung nicht mehr durchführbar ist, kann mittels entsprechender Anordnung (z. B. elektrische Widerstandsänderung) auch der durch die Einschaltung des Motors sich ändernde Öffnungsgrad fernangezeigt und damit zurückgemeldet werden. Auf Grund dieser Meldung ist eine sichere Steuerung von Hand leicht durchzuführen.

b) Handbetätigte Sicherheitsabsperrorgane.

Zur Vermeidung gefahrbringender Zustände, wie unzulässige Überlastung von Rohrleitungen und Apparaturen, Bildung explosibler Gemische usw., werden besondere Sicherheitsabsperrorgane verwendet. Sie haben die Aufgabe, im gegebenen Augenblick ein zuverlässiges und möglichst schnelles Schließen oder Öffnen des angeschlossenen Aggregates herbeizuführen. Dabei ist der Schließzeit, die vom Rohrdurchmesser, Betriebsdruck und Schließweg abhängig ist, besondere Aufmerksamkeit zu schenken, damit bei längerer Leitung und rascher Absperrung unzulässige Druckstöße zurückgehalten werden.

Als Absperrorgane kommen vorwiegend Keilschieber, Drosselklappen und für größere lichte Weiten Ringschieber in Frage. Von diesen sind besonders die beiden letzteren als Schnellschlußorgane brauchbar, da sie einen kurzen Schließweg haben und nur geringen Kraftbedarf erfordern.

Welche Auslösevorrichtung, Antriebsart und Schließgeschwindigkeit zu wählen ist, richtet sich nach den jeweiligen Bau- und Betriebsverhältnissen.

Mit Hilfe zweckentsprechender Meßinstrumente kann man den zu beachtenden Betriebszustand leicht verfolgen, um im richtigen Augenblick von Hand einzugreifen. Die einfache Beobachtung ist jedoch für die meisten Fälle nicht zuverlässig genug. Eine größere Sicherheit wird erreicht durch die Verwendung von Meldeorganen mit elektrischen Kontakten, die beim Über- oder Unterschreiten der einstellbaren Grenzwerte durch optische oder akustische Signale das Bedienungspersonal zum Schließen oder Öffnen der Absperrorgane auffordern. Die dann zu ergreifenden Maßnahmen beschränken sich nicht immer auf die Bedienung eines einzigen Ventils. Meistens sind zur Aufrechterhaltung des Betriebes noch weitere Sondermaßnahmen zu treffen. Liegen dann die zu steuernden Organe räumlich weit auseinander, sind sie schwer oder nur unter Gefahr zugänglich, so ist die Fernsteuerung anzuwenden. Die hierzu benötigte Hilfskraft ist auch häufig schon deshalb notwendig, weil trotz Verwendung von Absperrorganen mit zwischengeschalteten Übersetzungselementen eine Betätigung von Hand zu große Öffnungs- bzw. Schließzeiten mit sich bringt.

Die hier verwendbaren Einrichtungen sind zum Teil in vorstehendem Abschnitte bereits erwähnt worden. Während dort aber eine Einstellung

des Drosselorganes vorwiegend auf einen beliebigen, den jeweiligen Anforderungen entsprechenden Öffnungsgrad herbeizuführen war, kommen hier nur die Grenzstellungen der Steuerorgane in Frage. Ein Ausführungs-

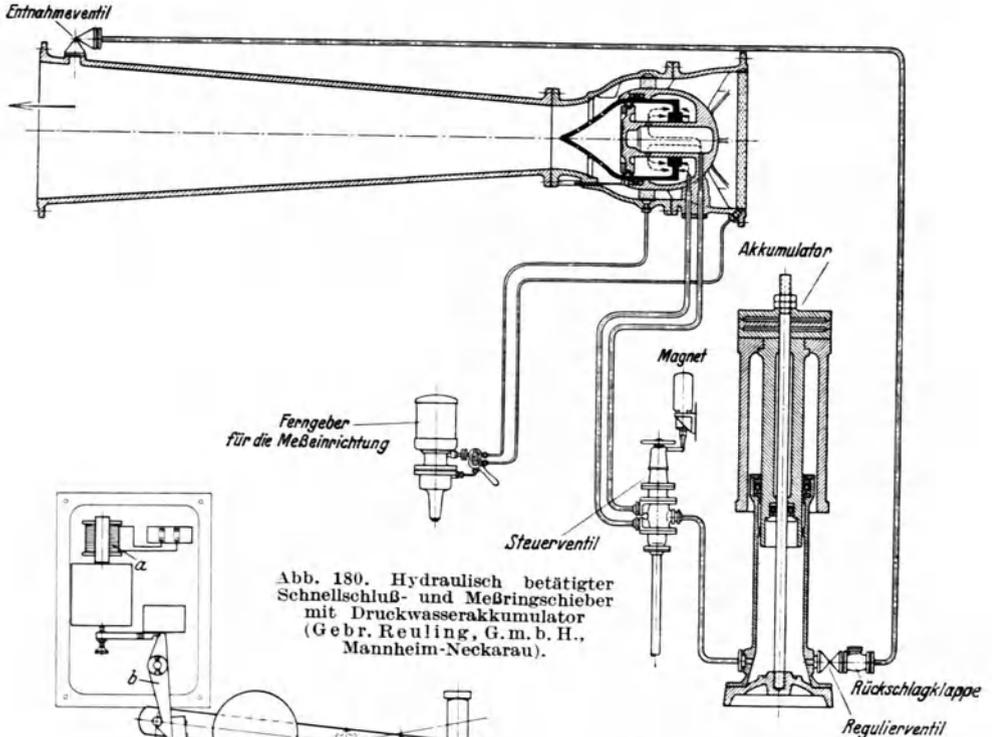


Abb. 180. Hydraulisch betätigter Schnellschluß- und Meßringschieber mit Druckwasserakkumulator (Gedr. Reuling, G. m. b. H., Mannheim-Neckarau).

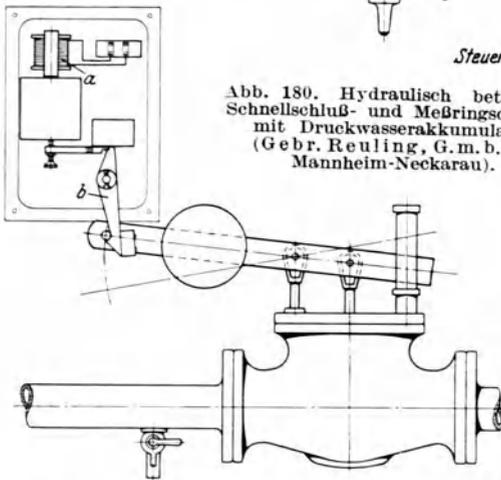


Abb. 181. Dampfventil der AEG mit elektrisch gesteuertem Fallgewichtsantrieb. a Elektromagnet, b Klinkhebel.

beispiel veranschaulicht die Abb. 180, bei der als Absperrorgan ein durch Elektromagnet gesteuerter Ringschieber (Gebr. Reuling, G. m. b. H., Mannheim-Neckarau) angewendet wird. Dieser Ringschieber¹ liefert in allen Drosselstellungen praktisch wirbelfreie Strömung, arbeitet daher erschütterungsfrei und verlangt wegen der nahezu vollständigen Entlastung des Abschlußkörpers nur geringe Antriebskräfte. Außerdem vereinigt er sehr zweckmäßig das Absperr- mit dem Meßorgan in einem gemeinsamen Gehäuse.

¹ Über einen ferngesteuerten Doppelringschieber siehe bei W. Wunsch: Die elektrische Fernmessung im Dienste der Gasfernversorgung. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 77, 661 (1933).

Hierdurch ist der Ringschieber auch als Einstellorgan sehr gut geeignet, zumal auch sein geringer Druckverlust in manchen Fällen von besonderem Vorteil ist. Durch das an seinem Ausflußstutzen angebrachte Diffusorrohr wird (wie beim Venturirohr) die durch Einschnürung erzeugte Geschwindigkeitsenergie mit nur geringen Verlusten wieder in Druckenergie umgesetzt. Der Einbau eines besonderen Druckwasserakkumulators in die Druckentnahmeleitung empfiehlt sich aus Sicherheitsgründen.

An Stelle des Steuerventils kann auch ein federbelastetes Ventil mit Elektromagnet geöffnet oder auch geschlossen werden. Es kann dies entweder direkt, über einen Zwischenhebel¹, oder auch — wie bei Fallgewichtsantrieb — über ein besonderes Klinkensystem erfolgen. Für den letzteren Fall gibt Abb. 181 ein Ausführungsbeispiel (selbsttätiges Dampfventil für Kleinturbogeneratoren der AEG, Berlin).

2. Selbsttätige Regelung von Druck und Menge.

a) Allgemeine Betrachtungen.

Mit der Regelung von Hand läßt sich auf kurze Zeit stets ein bestimmt vorgeschriebener Regelzustand einhalten. Bei längerer Dauer wird die Zuverlässigkeit dieser Regelart durch die menschlichen Schwächen und Fehler beeinträchtigt, so daß die von dieser Unvollkommenheit befreiten selbsttätigen Regler im praktischen Betrieb in immer größerem Umfang zur Einhaltung bzw. Befolgung eines gewollten Regelzustandes Verwendung finden.

Der Hauptvorteil der selbsttätigen Regelung liegt nicht in der Ersparnis an Bedienungspersonal, sondern in der Steigerung der Wirtschaftlichkeit durch Verbesserung der Ausbeute einer Anlage sowie in der Gewährleistung stets gleicher Qualität der Produkte infolge des durch automatische Regler genau eingehaltenen Regelzustandes.

a) **Reine Selbstregelung.** Bei jeder Regelung von Druck und Menge ist der Durchfluß den Betriebsverhältnissen genau anzupassen. Wird ein vorliegender Beharrungszustand gestört, so tritt fast immer eine Gegenwirkung auf, die von sich aus auf einen Ausgleich der Gleichgewichtsänderung hinarbeitet. So z. B. wird bei einer Ausflußmessung durch Drosselung des Zuflusses die Flüssigkeitsstandhöhe der Danaide absinken, der Ausfluß dadurch geringer werden, bis sich bei einer gewissen Druckhöhe von selbst wieder ein neuer Gleichgewichtszustand eingestellt hat. Nach Beendigung dieses Ausgleichsvorganges liegt dann wohl eine mehr oder weniger große Abweichung von dem Sollzustand vor, die aber in manchen Fällen in Kauf genommen werden kann. Durch diese Selbstregelung [s. z. B. bei G. Neumann u. G. Wünsch: Wärme-stelle, Mitt. Nr. 188, S. 2. 1933] ist somit die Möglichkeit gegeben, gewisse Anlagen auch ohne besondere Regeleinrichtungen zu betreiben.

¹ Beispiel siehe A. Eucken u. M. Jakob: Der Chemie-Ingenieur, Bd. II/1, S. 116. Leipzig 1932. — Bosch, C.: Über die Entwicklung der chemischen Hochdrucktechnik bei dem Aufbau der neuen Ammoniakindustrie. Ztsch. Ver. Dtsch. Ing. 77, 314 (1933).

Sind aber die hierbei auftretenden Änderungen des gewünschten Regelzustandes nicht mehr erträglich, so ist eine Nachregelung erforderlich, die entweder von Hand oder mit Hilfe der hier zu betrachtenden selbsttätigen Regler durchzuführen ist.

β) Die verschiedenen Reglerarten. Der Regler besteht aus einem der Art der gewünschten Regelung entsprechenden Fühlorgan (steuernde Meßwerke, wie z. B. Manometer, Differentialmanometer usw.), dem zu steuernden Regelorgan (Schieber, Ventil, Drosselklappe usw.) und einer Einrichtung zur Übertragung des vom Fühlorgan ausgehenden Impulses auf das Steuerorgan. Der unmittelbare Regler (Regler ohne Hilfskraft) erhält die zur Verstellung seines Regelteiles notwendige Kraft von dem zu regelnden Medium. Ein starkes Meßwerk und leicht verstellbares Regelorgan sind hier erforderlich. Wenn die Verstellkraft nicht mehr zur einwandfreien Regelung ausreichend ist, werden mittelbare Regler, d. h. Regler mit Hilfskraft verwendet. Bei diesen fällt dem Fühlorgan nur die Aufgabe zu, diese Hilfskraft (Druckluft, -wasser, -öl, Dampf, elektrischer Strom usw.) zu steuern, die dann ihrerseits über ein oder auch mehrere Relais beliebig große Kräfte auf den Regelteil zu übertragen gestattet. Je nach der verwendeten Hilfskraft können dann noch hydraulische Regler, elektrische Regler usw. unterschieden werden.

Welche dieser Reglerarten Verwendung findet, richtet sich nach den jeweiligen Betriebsverhältnissen. Da sich mit den hydraulischen und hydraulisch-elektrischen Reglern große Verstellgeschwindigkeiten erzielen lassen, werden sie besonders bei sehr schnell verlaufenden Zustandsstörungen benutzt.

Es ist erforderlich, daß auftretende Störungen von den Reglern möglichst schwingungsfrei oder wenigstens mit stark gedämpften Schwingungen (stabile Regelung) in den Sollzustand übergeführt werden. Verläuft der Regelvorgang mit ungedämpften oder sogar mit aufschaukelnden Schwingungen (labile Regelung), dann ist die Regelung unzureichend, da in diesem Falle Betrieb wie auch Regeleinrichtung gefährdet sind.

Für den Regelvorgang ist nun nicht nur die Regeleinrichtung, sondern auch die Regelstrecke (nach G. Neumann und G. Wünsch derjenige Teil der Anlage, der auf den bereits erwähnten Ausgleichsvorgang Einfluß nimmt) maßgebend. Die hier vorliegenden Gesetzmäßigkeiten machen die Anwendung von zwei verschiedenen Reglergruppen — Regler ohne und Regler mit Rückführung — erforderlich.

Die unter α (S. 805) angeführte Selbstregelung übt eine dämpfende Wirkung und damit einen günstigen Einfluß auf den Regelvorgang aus. In vielen Fällen der Druckregelung von Flüssigkeiten (Gasen und Dämpfen) ist diese Unterstützung der Regler so weitgehend, daß eine zusätzliche Dämpfung durch Brems- oder Rückführungseinrichtungen nicht nur entbehrlich, sondern in manchen Fällen sogar schädlich für die Regelstabilität ist. Die in diesen Fällen zu verwendenden Regler mit natürlicher Dämpfung gehören zur ersten Gruppe, zur Gruppe der Regler ohne Rückführung. Ist die unterstützende Ausgleichswirkung

aber so unzureichend, daß ein stabiler Regelvorgang nicht aufrechterhalten werden kann, so wird eine künstliche Dämpfung erforderlich, da die Dämpfung mit Bremsrichtungen (z. B. Flüssigkeitsbremsen) nicht ausreichend ist, wird auf den Impulsgeber in verschiedener Art und Weise ein direkter, den jeweiligen Verhältnissen entsprechender Einfluß ausgeübt. Auf den Impulsgeber wird z. B. die Verstellung des Kraftgetriebes, der gesteuerten Menge, der Antriebsdrehzahl usw. zurückgeführt und dadurch erreicht, daß eine rechtzeitige Unterbrechung oder Abbremsung eines eingeleiteten Regelvorganges eintritt. Diese zur Stabilisierung des Regelvorganges mit einer besonderen künstlichen Rückführung (mechanische, Mengen-, Antriebsrückführung usw.) arbeitenden Regler fallen unter die zweite Gruppe, unter die Regler mit Rückführung.

Durch die Dämpfung mittels künstlicher Rückführung wird aber eine Abhängigkeit des einzuhaltenden Sollwertes von der Stellung des Regulierorganes und damit von dem Durchfluß (Ungleichförmigkeit) herbeigeführt, wenn die Rückführung durch starre Übertragungsglieder (Gestänge) erfolgt. Bei einem Druckregler kann z. B. der Druck bei Nulllast (Regelorgan ganz geschlossen) p , bei Vollast (Regelorgan ganz geöffnet) aber um Δp geringer sein, so daß dadurch ein Ungleichförmigkeitsgrad $\Delta p/p$ entsteht. Zur möglichst völligen Beseitigung dieser Ungleichförmigkeit muß dann die starre Rückführung durch eine nachgiebige oder elastische Rückführung ersetzt werden.

γ) Die Arbeitsweise der Regler. Für die richtige Auswahl der Regler, die in allen Fällen dem Charakter einer vorhandenen Anlage angepaßt werden müssen, sowie auch für die nach ihrem Einbau eventuell zu treffenden Verbesserungsmaßnahmen, sind Gesetzmäßigkeiten maßgebend, auf die hier nicht eingegangen werden kann. Einige grundsätzliche Bemerkungen über die Arbeitsweise der für die Druck- und Mengenregelung in Frage kommenden wichtigsten Reglerarten seien jedoch angeführt.

Regelung ohne Zwischenstellung. Bei dem einfachsten Regler wird das Regelorgan (z. B. Ventil) entweder voll geöffnet oder ganz geschlossen mit etwa gleicher Geschwindigkeit (z. B. bei elektromagnetischer Betätigung des Ventils). Stellungen zwischen den Endlagen gibt es bei diesem „Auf-Zu-Regler“ nicht. Je nach der Empfindlichkeit des Reglers und den Verhältnissen der Anlage wird das Regeldiagramm einer „gezahnten“ Kurve mit mehr oder weniger tiefer Zahnung entsprechen. Infolge der unstetigen Arbeitsweise ist dieser Regler nur beschränkt verwendbar, denn das fortwährende Schwanken zwischen einem höchsten und tiefsten Wert ist nicht immer brauchbar. Wird er als Nebenstromregler benutzt, so kann er in vereinzelt Fällen eine ausreichende Regelung herbeiführen.

Regelung mit Zwischenstellung. Zur ständigen Anpassung des Zuflusses an den Abfluß ist es notwendig, daß das Regelorgan zwischen seinen Endlagen jede Zwischenstellung einnehmen kann. Von Wichtigkeit für den stabilen Regelvorgang ist die Geschwindigkeit, mit der das

Regelorgan die jeweils erforderliche Stellung einnimmt. Die Verstellgeschwindigkeit kann konstant oder variabel, d. h. von der Größe der Störung unabhängig oder abhängig sein.

Ein Regler mit konstanter Verstellgeschwindigkeit ist z. B. ein Druckregler, dessen Regelorgan von einem Elektromotor nach Angaben des Fühlorgans entsprechend gesteuert wird, sobald das eingestellte Unempfindlichkeitsgebiet (zwischen Minimal- und Maximalkontakt) überschritten wird. Sehr schnellen Störungen kann ein Regler nicht folgen. Es wird daher zu Beginn der Störung eine beträchtliche Zustandsänderung auftreten, die bei ausreichender Dämpfung des Selbstaustausgleiches von dem Regler erst nachträglich wieder auszuregulieren ist. Bei allmählich verlaufenden Störungen aber, wie dies praktisch die Regel ist, kann der Regler zu große Abweichungen von dem Sollzustand vermeiden. Je langsamer die Störungen verlaufen, um so mehr besteht die Möglichkeit, die Verstellgeschwindigkeit des Regelorgans der Störungsgeschwindigkeit anzupassen. Da die dämpfende Wirkung des Selbstaustausgleiches, die fördernd für den stabilen Regelvorgang ist, durch unvermeidliche aufschaukelnde Einflüsse (Resonanzen) geschwächt wird, kann immerhin eine labile Regelung (Pendeln, Aufschaukelung) eintreten. Durch Verminderung der Verstellgeschwindigkeit läßt sich dann wohl wieder die erforderliche Regelstabilität erreichen, es treten jetzt aber beim Eintritt einer Störung größere Zustandsabweichungen ein. Um diese in gewissen Grenzen zu halten, werden in solchen Fällen die Regler mit konstanter Verstellgeschwindigkeit zweckmäßig durch solche ersetzt, deren Verstellgeschwindigkeit der Größe der Störung verhältnismäßig ist.

Bei dem angeführten Beispiel des elektrischen Druckreglers wäre jetzt der dort erforderliche Minimal- und Maximalkontakt durch je einen weiteren mit größerem Abstand vom Sollwert zu ergänzen, so daß beim Überschreiten der Feinkontakte diese Grobkontakte betätigt werden, die eine Verstellung des Regelorgans mit größerer Geschwindigkeit veranlassen. In besonderen Fällen werden auch mehrere Geschwindigkeitsstufen benutzt. Dieses Abfangen der groben Zustandsänderung beim Eintritt einer Störung wird bei dem Zeit-Schritt-Verfahren durch eine einfachere Ausbildung des Antriebes ermöglicht. Bei dem hierzu benutzten Schrittreger steuert ein Unterbrecher den Motor schrittweise, so daß dieser z. B. bei Feinregelungen wenige, bei Grobregelungen viele Schritte macht. Die Verstellgeschwindigkeit des Antriebsmotors ist konstant, die Schrittgröße aber ist der Zustandsänderung verhältnismäßig und damit auch die mittlere Verstellgeschwindigkeit des Regelorgans. Häufigkeit und Größe der Schritte sind wiederum dem Charakter der Anlage genau anzupassen.

Solange ausreichende Eigendämpfung vorliegt, läßt sich der durch sie bedingte stabile Regelvorgang aufrechterhalten. Diese in der Anlage selbst liegende dämpfende Wirkung kommt um so mehr zur Geltung, je kleiner die Verstellgeschwindigkeit des Regelorgans und je größer das Unempfindlichkeitsgebiet des Reglers, das der Selbstregelung die Gelegenheit zur Auswirkung verschafft, ist. Der Regelvorgang wird nur dann labil, also unbrauchbar, wenn zwischen der Verstellung des

Regelorganes und der Zustandsabweichung eine Phasenverschiebung auftritt.

Anders liegen die Verhältnisse bei fehlendem oder unzureichendem Einfluß des Selbstaugleiches. Hier sei das bekannte Beispiel der Regelung des Wasserstandes bei Dampfkesseln angeführt. Infolge des vorhandenen Speichervolumens bleibt eine Änderung der Dampfabnahme (Abfluß) ohne Einfluß auf die Speisung (Zufluß), während der Wasserstand (Regelzustand) sich dauernd ändert. Der Regelvorgang würde hier in dauernden Pendelungen verlaufen. Bei Anwesenheit von schwingungserzeugenden Einflüssen können auch Aufschaukelungen auftreten. Auch bei der Regelung kompressibler Flüssigkeiten kann dieser labile Zustand eintreten, wenn das Speichervolumen, für dessen Größe die Anlaufzeit¹ und der Ungleichförmigkeitsgrad bestimmend ist, merklich wird. In diesen Fällen wird dann eine künstliche Dämpfung durch Rückführung herangezogen. Die Verwendung der Regler mit starrer Rückführung führt durch die direkte Beeinflussung des Reglers zu der bereits erwähnten Abhängigkeit des Regelzustandes von dem Durchfluß (Mengenabhängigkeit). Der Ungleichförmigkeitsgrad ist den Betriebsverhältnissen anzupassen und immer so groß zu wählen, daß auch störende Einflüsse kein Aufschaukeln bewirken können. Die Verstellgeschwindigkeit wird hier ebenso wie die Empfindlichkeit möglichst groß gewählt, damit der Zustandsänderung ohne Verzögerung gefolgt werden kann.

Die durch starre Rückführung bedingte mehr oder weniger große Abweichung von dem Sollzustand ist ein Nachteil, der in vielen Fällen ohne Bedeutung ist. Die Abhängigkeit von der Stellung des Regelorganes aber läßt sich beheben durch die Anwendung der nachgiebigen Rückführung. Diese spricht nur bei schnellen Zustandsänderungen an und kehrt je nach der Einstellung (s. einstellbare Kataraktzeit bei der Anordnung nach Abb. 189, S. 815) mehr oder weniger schnell wieder in ihre neutrale Lage zurück.

b) Verschiedene Regelaufgaben und Reglerausführungen.

Bei der selbsttätigen Regelung von Druck und Menge wird ein bestimmter Regelzustand dadurch eingehalten, daß ein Drosselorgan entsprechend der vom Impulsgeber oder Fühlorgan erteilten Anweisung verstellt wird. Dieser feinfühligere Impulsgeber² steht unter dem Einfluß des Regelzustandes. Er ist nach Regelart (Druck- oder Mengenregelung) und der Eigenschaft des zu regelnden Mediums auszuwählen. Tritt eine Abweichung vom Sollwert auf, so hat er mit seinen verfügbaren Kräften sofort die Regelung zu veranlassen. Die Steuerung erfolgt alsdann solange, bis wieder Gleichgewicht eingetreten ist zwischen der auf das Meßsystem wirkenden Kraft und der von dem Einstellsystem herrührenden

¹ Unter Anlaufzeit wird die Zeit des Durchströmens der Regelstrecke bei ganz geöffnetem Regelorgan verstanden.

² Eine schematische Darstellung der verschiedensten hier als Fühlorgane vorwiegend in Frage kommenden Druckmeßsysteme befindet sich bei W. Kniehahn: Wärmetechnisches Messen und Regeln. Wärme 53, 697 (1930); Maschinenschau 9, 450 (1930).

Gegenkraft. Diese Gegenkraft richtet sich nach der durchzuführenden Regelung und kann konstant oder veränderlich sein. Soll ein gleichbleibender Regelzustand aufrechterhalten werden, so bleibt der Einstellwert konstant, bis er von Hand eventuell unter Fernsteuerung auf einen anderen Wert gebracht wird. Besondere Betriebsverhältnisse aber können es erforderlich machen, daß der Regelzustand bestimmte Werte annimmt, die von der Zeit (Programmregelung) oder von einer oder auch mehreren beliebigen Größen wie z. B. spezifischem Gewicht, Heizwert usw., abhängig sind. So mannigfaltig wie die Regelaufgaben sind auch die Reglerausführungen. Die nachstehenden Beispiele der Druck- und Mengenregelung mögen die vielseitige Verwendungsmöglichkeit selbsttätiger Regeleinrichtungen dartun.

a) Einhaltung eines bestimmten, vorher einstellbaren Zustandes.

I. Einzelregelung von Drücken. Im einfachsten Falle handelt es sich um die Sicherung eines gleichbleibenden Druckes oder einer gleichbleibenden Menge. Da die Einrichtungen der Druckregelung auch für andere Regelaufgaben in Frage kommen, wenn sich hierbei der Impuls in Druck bzw. in eine von Manometern stets gemessene Druckdifferenz umwandeln läßt, sollen die Druckregler etwas ausführlicher betrachtet werden.

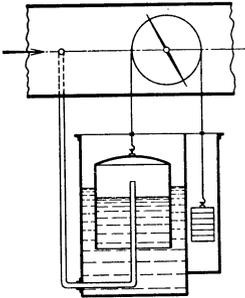


Abb. 182. Schema eines unmittelbaren Gasdruckreglers (Allgemeine Vergasungsgesellschaft m. b. H., Berlin-Halensee).

Verwendung unmittelbarer Druckregler. Um den Flüssigkeitsstand eines Behälters konstant zu halten, kann der Behälter an der erforderlichen Höhe mit einem Überlauf versehen werden, der die von einer Pumpe im Überschuß geförderte Menge in den Ansaugbehälter wieder zurückführt.

An Stelle dieses unwirtschaftlichen Verfahrens kann die Standregelung mit der bekannten Schwimmermethode durchgeführt werden. Der vom Flüssigkeitsstand geführte Schwimmer steuert hierbei in einem gewissen Hubbereich unmittelbar das Zufluß- oder Abflußventil. Für höhere Behälterdrücke ist eine druckdichte Übertragung der Schwimmerbewegung auf das Steuerorgan erforderlich. Diese Regelung kommt vor allem für die Wasserstandsregelung in Dampfkesseln in Frage. Von den hierzu verwendeten direkt wirkenden Schwimmerreglern sei nur der Hannemann-Regler [s. G. Wunsch: Fußnote 2, S. 796 (S. 160). — K. Hannemann: Speiseregelung von Dampfkesseln. Wärme 55, 324 (1932)] erwähnt.

Der unmittelbare Copes-Regler [s. G. Wunsch: Fußnote 2, S. 796 (S. 160), sowie der Wasserstandsregler der Campbell Co., Los Angeles [Power 75, 182 (1932)], benutzt die Wärmeausdehnung eines je nach dem Wasserstand mit mehr oder weniger Dampf bzw. Wasser angefüllten Rohres zur Einstellung des Speiseventils.

Zur Regelung eines geringen Gasdruckes kann der mit Abb. 182 dargestellte Gasdruckregler Verwendung finden. Bei diesem unmittelbaren

Regler dient das Gewicht der Glocke zum selbsttätigen Ausgleich. Durch Änderung der Glockenbelastung mittels Gewichtsplatten, die an dem einen Ende des zur Übertragung der Glockenbewegung auf die Drosselklappe benutzten Stahlbandes wirksam sind, läßt sich der Druck in gewissen Grenzen beliebig einstellen. An die Stelle dieses nassen Druckreglers kann der auch für tropfbare Flüssigkeiten brauchbare Membranregler treten. Die mit leicht verstellbarem Gewichts- oder Federdruck belastete Membran steuert meistens ein entlastetes Doppelsitzventil.

Hier, wie auch bei dem Glockendruckregler, entspricht jeder Abweichung von dem einzuhaltenden Regelzustand (Sollwert) eine bestimmte Hubhöhe der Membran bzw. der Glocke. Dadurch tritt ein Ungleichförmigkeitsgrad (Schwankung um den Sollwert) auf, der bei Federbelastung noch infolge der Zusammendrückung der Feder vergrößert wird. Durch entsprechende Anordnung eines Pendelgewichtes oder einer Kippfeder läßt sich der Ungleichförmigkeitsgrad in weiten Grenzen beeinflussen [s. G. Wünsch: Regler für Druck und Menge, S. 32. München und Berlin 1930. — A. Eucken u. M. Jakob: Der Chemie-Ingenieur, Bd. II/1, S. 149, 150. Leipzig 1932]. Von den zahlreichen Ausführungen unmittelbarer Membrandruckregler sei der durch Abb. 183 dargestellte I. G.-Druckregler [Hersteller Schäffer & Budenberg G. m. b. H., Magdeburg; s. Wärme 54, 872 (1931)] (Bauart Hofmann)

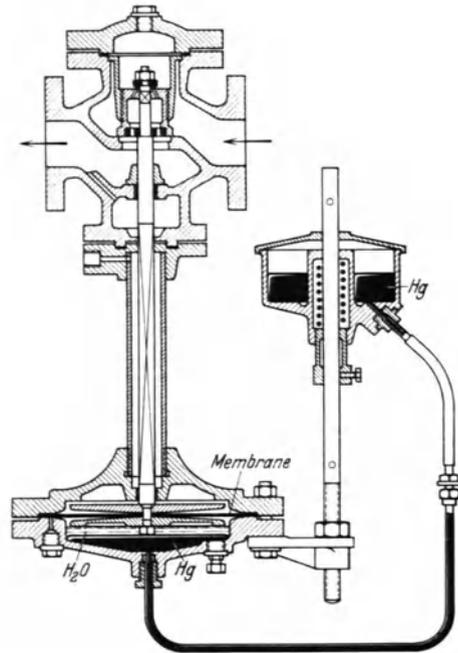


Abb. 183. I. G.-Druckminderer (Bauart Hofmann).

angeführt. Bei diesem mit praktisch entlastetem Kolben arbeitenden Regler wird die ausgleichende Gegenkraft durch den Druck einer statischen Flüssigkeitssäule (Quecksilber, Trikresylphosphat usw.) erzeugt. Die geringen Änderungen der Flüssigkeitssäule infolge Durchbiegung der Membran werden durch die federnde Lagerung des Flüssigkeitsbehälters ausgeglichen.

Zur Vergrößerung der Arbeitsleistung werden Balgmembranen verwandt. Die Abb. 184 zeigt den Samson-Regler (Samson: Apparatebau A.G., Frankfurt a. M.), bei dem die erforderlichen Verstellkräfte ebenfalls von der zu regelnden Flüssigkeit selbst aufgebracht werden. Bei steigendem Druck hinter dem Regelorgan wird der durch eine Balgmembran entlastete Einsitzventilkegel durch die entsprechend der

Gewichtshebelbelastung erfolgende Einwirkung des Impulsfederbalges gegen seinen Sitz geführt und umgekehrt.

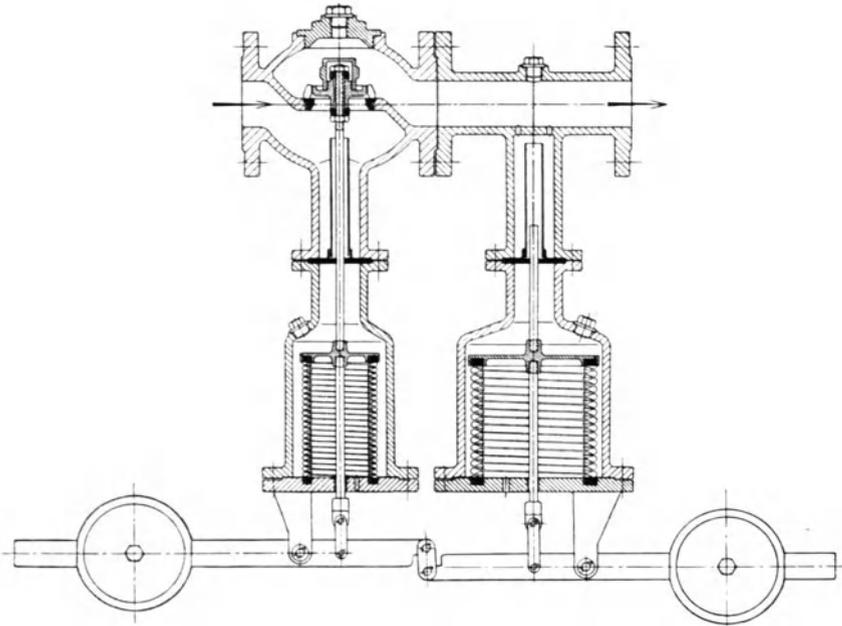


Abb. 184. Druckminderer „Samson“ (Samson Apparatebau A.G., Frankfurt a.M.).

Zur Reduktion beliebig hoher Anfangsdrücke auf einen gewünschten konstanten Enddruck werden Druckminderer oder Reduzierventile mit

Kolbensteuerung benutzt. Ein Ausführungsbeispiel (A. Lob: Maschinen- und Apparatebau G. m. b. H., Düsseldorf) veranschaulicht Abb. 185. Die Steuerung erfolgt hier durch den vom zu steuernden Medium auf den Kolben ausgeübten Druck. Die Verstellimpulse werden über den Ventiltgewichtshebel auf das Durchflußventil unmittelbar übertragen.

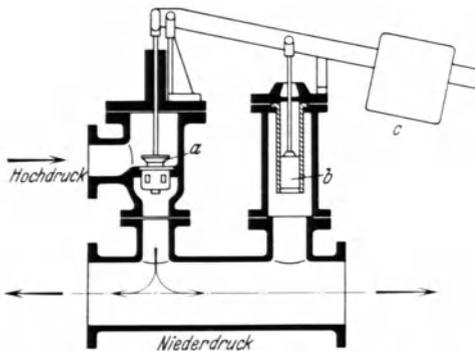


Abb. 185. „Allo“-Druckminderer mit Kolbenantrieb (A. Lob, Düsseldorf). a Durchflußventil, b Steuerventil, c Belastungsgewicht.

Während das Reduzierventil bei sinkendem Druck das Regelorgan öffnet, um den Druck hinter dem Regler konstant zu halten, wird dieses bei dem Überströmregler bei steigendem Druck geöffnet, damit der Regelzustand vor dem Regler den erforderlichen gleichen Wert beibehält. In besonderen Fällen

hat der Druckregler unter Einfluß des Anfangs- und Enddruckes zu stehen. Es wird dann eine Kombination mehrerer Regler benutzt. Ein solcher Grenzdruckregler findet z. B. Anwendung, wenn von der Hochdruckseite ein Überschuß auf die Minderdruckseite nur so lange abzuführen ist, als hierfür Bedarf vorhanden ist. Bei dem aus Abb. 186 ersichtlichen und für Kesselanlagen mit verschiedenen Drücken und Speicheranlagen in Frage kommenden Überström- und Druck-

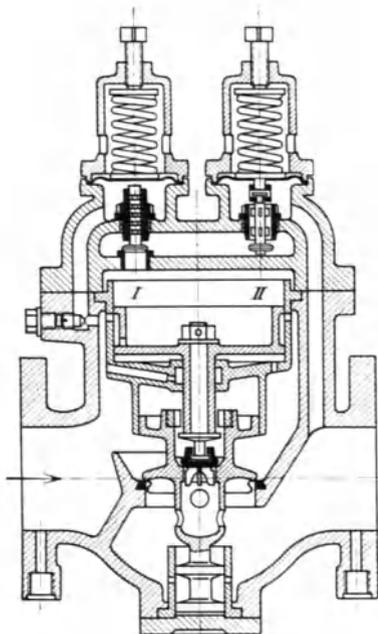


Abb. 186. Überström- und Druckbegrenzventil mit zwei Regelimpulsen (Hübner & Mayer, Wien). *I* Überströmregler, *II* Grenzdruckregler.

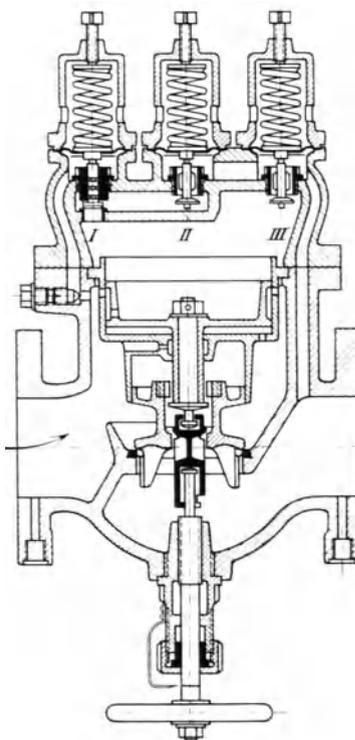


Abb. 187. Überströmventil mit Grenzbereichregelung (Hübner & Mayer, Wien). *I* Überströmregler, *II* Regler für oberen, *III* Regler für unteren Grenzdruck.

begrenzventil [Näheres s. bei R. Klanner: Neuerungen im Armaturenbau für das Kesselhaus. Wärme 53, 210 (1930)] sind zwei Impulsgeber vorhanden. Das Membranregelventil *I* gibt den Überströmimpuls. Bei Überschreiten des zulässigen Hochdruckes wird es geöffnet, worauf es das Überströmen des Dampfüberschusses durch den entlasteten einsitzigen Hauptkegel zur Niederdruckseite veranlaßt. Sobald aber der Überströmdruck auf den Einstellwert gesunken ist, wird das Hauptventil wieder geschlossen. Auf der Niederdruckseite erfolgt die Druckbegrenzung durch das Membranregelventil *II*. Mit geringer werdendem Niederdruck (Dampfabfluß) steigt der Druck, bis er den hier eingestellten Grenzwert erreicht hat. Das bis dahin offene Grenz-

impulsventil wird alsdann geschlossen. Ein Dampfüberschuß der Hochdruckseite kann nicht mehr überströmen. Um zu erreichen, daß auch ohne Rücksicht auf eventuell überschüssigen Hochdruckdampf nach dem Niederdrucknetz Dampf überströmt, wenn hier der Druck einen bestimmten unteren Grenzwert unterschreiten will, wird ein weiteres Impulsventil erforderlich. Ein solches Überströmventil mit Grenzbereichregelung [Th. Stein: Regelung und Ausgleich von Dampfanlagen, S. 18 und 56. Berlin 1926] stellt die Abb. 187 dar. Der Regler *II*

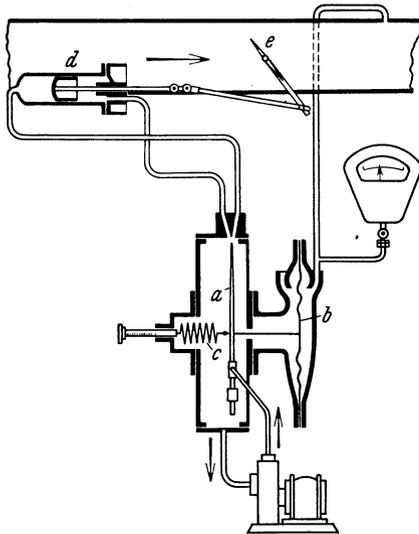


Abb. 188. Mittelbarer Druckregler für Niederdrücke nach dem Strahlrohrprinzip (Askania-Werke). *a* Strahlrohr, *b* Membran des Steuerwerkes, *c* einstellbare Membrangegebfeder, *d* Steuerzylinder, *e* Regelorgan.

wenige mm Wassersäule einzuregulieren ist, muß zur entsprechenden Verstellung einer Klappe oder einer Gebläseleistung eine Hilfskraft verwendet werden. Auf die Benutzung eines mit Gewicht bzw. Feder belasteten Glockenzugmessers als Fühlorgan bei dem Zugregler von Carrick und Roučka sei hingewiesen [s. Th. Stein: Regelung und Ausgleich von Dampfanlagen, S. 186. Berlin 1926]. Bei diesen Reglern wirkt bei Abweichungen von dem Einstellwert über einen Steuerschieber die hydraulische Hilfskraft stetig auf das Kraftgetriebe [Elektrischer Glockendruckregler mit absatzweise arbeitender Kontaktvorrichtung; s. Siemens-Ztschr. 10, 265 (1930)].

Von den Ausführungen hydraulischer Feindruckregler sind das Strahlrohrprinzip der Askania-Werke [Askania-Werke A.G., Berlin-Friedenau. Über die Verwendung des Strahlrohrreglers als Druckregler im Turbinenbau s. K. Blasig: Wärme 53, 649 (1930)] (Abb. 188) und das Arca-Prallplattenprinzip (Arca-Regler A.G., Berlin-Schöneberg) (Abb. 190) die beiden grundlegenden Regelarten.

begrenzt wie vorher den Druck nach oben, das Membranreglerventil *III* den Druck nach unten und zwar dadurch, daß es bei Erreichung des eingestellten unteren Grenzwertes das Hauptventil als Druckminderventil einschaltet.

Zum Schutze gegen unzulässige Drucksteigerungen bei einer Störung des Reglers sind besondere Sicherheitsventile (s. S. 827) von ausreichender Größe vorzusehen.

Verwendung mittelbarer Regler. Reichen bei den vorstehenden unmittelbaren Druckreglern die Verstellkräfte zur sicheren Steuerung des Regelorgans nicht mehr aus, so wird hierzu eine stetige oder schrittweise wirkende Hilfskraft herangezogen.

Stetige Druckregelung. Bei der Kesselzugregelung, bei der ein an einer Stelle des Feuerraumes zu messender Druck auf

Bei den Askania-Druckreglern wirkt der zu regelnde Druck auf eine empfindliche Membran. Im Sollzustand halten sich die Kräfte der Membran und des Einstellsystems, die auf das um eine feste Achse schwenkbare Strahlrohr wirken, das Gleichgewicht. In der Mittellage trifft die von einer Pumpe durch das Strahlrohr geförderte Druckflüssigkeit (Öl, Wasser usw.) auf die Gegendüse so auf, daß der mit dem Steuerorgan verbundene Arbeitskolben in Ruhe bleibt. Jede Abweichung von dem Regelzustand aber führt eine Ablenkung des Strahlrohres und damit eine entsprechende Verstellung des Kolbens bzw. der Drosselklappe herbei. Zur Betätigung schwer gehender Regelorgane wird zur Erreichung der erforderlichen Verstellgeschwindigkeit noch die Einschaltung einer Verstärkereinrichtung (Folgeschieber) notwendig¹.

Die Anwendung des Strahlrohrprinzips zur Wasserstandsregelung, bei der als feinfühligere Impulsgeber eine Quecksilberdruckwaage² und zur Verhinderung dauernden Überregelns eine künstliche Dämpfung durch nachgiebige Rückführung Verwendung findet, zeigt Abb. 189.

Der Arca-Regler³ (Abb. 190) arbeitet nach dem Prallplattenprinzip, und zwar ebenfalls mit stetiger Steuerenergie. Hier ist der Steuerschieber durch eine Prallplatte ersetzt, auf die der Impulsgeber (Membranbalg mit Gegenfeder) wirkt und durch mehr oder weniger Freigabe der Ausflußdüse den Druck des Drucköls und damit den Kolben im Druckzylinder steuert. Die Steuerung durch die Druckflüssigkeit erfolgt hier aber nur nach einer Richtung, die entgegengesetzte wird durch eine mechanische Kraft (Gewicht, Feder usw.) durchgeführt.

In ähnlicher Weise arbeitet eine Reihe von Druckreglern⁴.

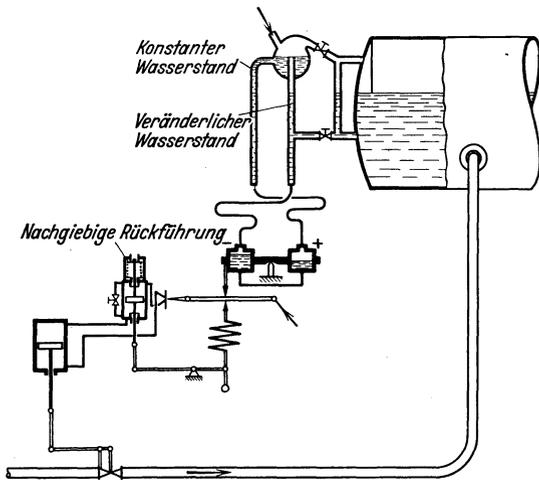


Abb. 189. Wasserstandsregelung nach dem Strahlrohrprinzip (Askania-Werke) mit nachgiebiger Rückführung.

¹ Zusammenstellung der verschiedenen Bauarten der in der Steuertechnik verwendeten Verstärker bei W. Kniehahn: *Masch.-Bau* 10, 239, 272 (1931).

² Mit Quecksilberwaage arbeitet ebenfalls der Speisewasserregler der Smoot Engineering Corporation, New York; siehe *Feuerung* 1929, H. 12, 158.

³ Gebräuchliche Fühlorgane für den Arca-Regler siehe F. Heinrichs: *Arch. Wärmewirtsch.* 14, 241 (1933). — Beschreibung eines vereinfachten Arca-Reglers bei J. Mugler: *Wärme* 55, 91 (1932). — Über einen Arca-Gasdruckregler mit Grenzimpulsen und selbsttätiger Verblockung siehe A. Heinig: *Wärme* 55, 336 (1932).

⁴ Z. B. der I. C. E.-Niederdruckregler (Bauart Thoma), sowie Bauart MSN und I. C. E.-Hochdruckregler (Bauart MSH) der Firma I. C. Eckardt, Stuttgart-

Druckregelung in Schritten. Im Gegensatz zu diesen Reglern mit stetiger Steuerung der Hilfsenergie wird bei anderen hydraulischen Einrichtungen eine schrittweise Verstellung des Regelorgans durchgeführt. Die hierbei verwendeten Verstärkereinrichtungen werden mechanisch

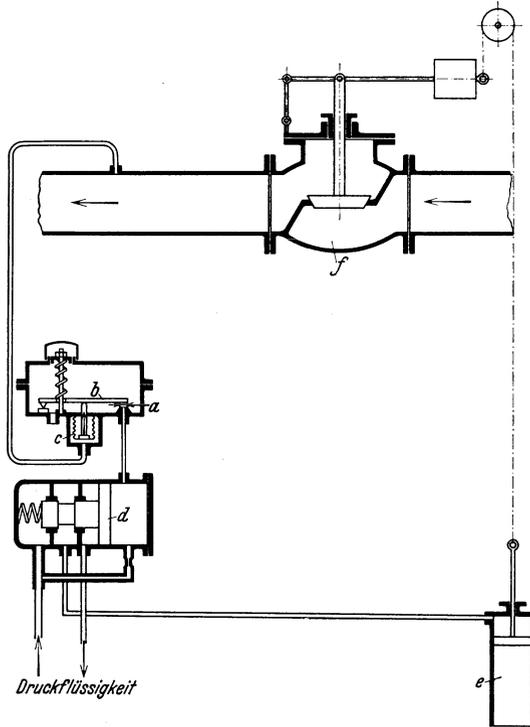


Abb. 190. Area-Druckregler mit Verstärkereinrichtung. *a* Düse, *b* Prallplatte, *c* Membranbaug, *d* Steuerschieber, *e* Kraftgetriebe mit Arbeitskolben, *f* Regelorgan.

oder elektrisch betätigt. Je nach der Abweichung vom Sollwert wird der federnde Zeiger des Impulssystems von dem Fallbügel auf den einen oder anderen mit angemessenen Stufen versehenen Schalthebel gedrückt und über einen Steuerschieber die entsprechende Betätigung des Verstärkerkolbens bzw. des Regelorganes herbeigeführt.

Der Eta-Regler der Eta-Werkstätten, Essen-Bredeney (Abb. 192) verwendet als Impulsgeber die empfindliche Ringwaage, deren Zeiger sich frei bewegt über zwei getrennte Stufenkontakte, die auf einer von Hilfsenergie angetriebenen und exzentrisch gelagerten Walze angeordnet sind. Bei Abweichung von dem Einstellwert werden beide Verstärker-

Cannstatt, der AVA-Regler der Allgemeinen Vergasungsgesellschaft m. b. H., Berlin-Halensee [s. Wärme 53, 220 (1930)], der Blatho-Regler der Armaturenfabrik Schell und Wilkendorf, vorm. Blancke-Werke Merseburg, der RC-Druckregler von E. F. Baurichter, Feuerung- und Apparatebau G. m. b. H., Berlin, u. a. m.

¹ Heizwertregelung mit hydraulischem Reineke-Kraftbügelregler s. Abb. 87, S. 606. Ein Fallbügelgerät findet ebenfalls bei den Regeleinrichtungen der Siemens & Halske A. G., Berlin, Verwendung. Siehe S. 821 und 824.

oder elektrisch betätigt. Als Beispiel mögen die beiden Schrittreger der Abb. 191 und 192 dienen [s. W. Kniehahn: Masch. - Bau 10, 273 (1931)].

Bei dem Reineke-Kraftbügelregler der Junkers-Thermo-Technik G. m. b. H., Berlin (Abb. 191) wird die hydraulische Hilfsenergie schrittweise eingeschaltet durch eine mechanische Hilfsenergie, die von einem durch Motor periodisch betätigten Fallbügel¹ geliefert wird. Je nach der Abweichung vom Sollwert wird der federnde Zeiger des Impulssystems von dem Fallbügel auf den einen oder anderen mit angemessenen Stufen versehenen Schalthebel gedrückt und über einen Steuerschieber die entsprechende

stufen eingeschaltet mit einer der jeweiligen Abweichung proportionalen Schaltzeit¹.

Als Beispiel für einen mit rein elektrischer Hilfskraft arbeitenden Schrittreger sei der Zugregler von Bailey (s. Th. Stein: Regelung und Ausgleich von Dampfpanlagen, S. 187. Berlin 1926) angeführt. Hier betätigt

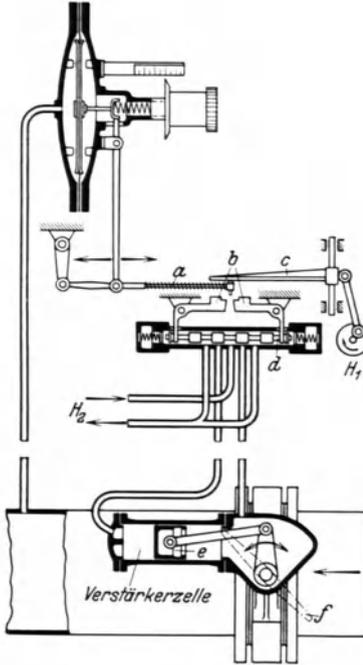


Abb. 191. Reineke-Kraftbügelregler. *a* Federnder Zeiger, *b* Schalthebel, *c* Kraftbügel vom Motor auf- und abbewegt, *d* Kolbenschieber zur Steuerung der hydraulischen Hilfsenergie H_2 , *e* Verstärkerkolben, *f* Regelorgan, H_1 mechanische Hilfsenergie, H_2 hydraulische Hilfsenergie.

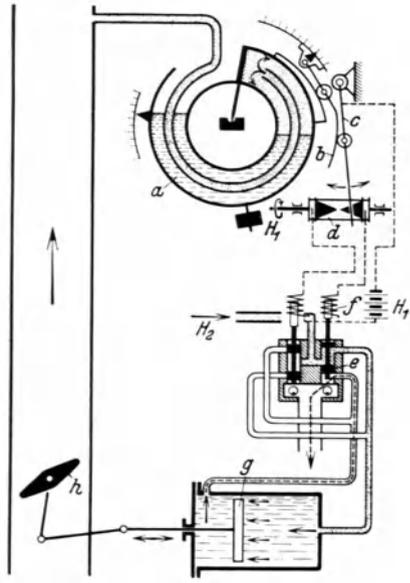


Abb. 192. Eta-Regler. *a* Ringwaage als Fühlorgan, *b* Einstellvorrichtung auf Regelwert, *c* Übersetzung vor dem Verstärker, *d* Schalter (Kontaktwalze) zur Steuerung der Verstärkerzellen der 1. Verstärkerstufe, *e* Schalter (Steuerschieber) zur Steuerung der Verstärkerzellen der 2. Verstärkerstufe, *f*, *g* Verstärkerzellen, *h* Regelorgan, H_1 elektrische Hilfsenergie, H_2 hydraulische Hilfsenergie.

der mit Stufenkeil versehene Zeiger des benutzten Glockenmanometers bei Abweichung von der Gleichgewichtslage Kontakte. Durch diese wird ein Umkehrgetriebe entsprechend auf einen Motor mit konstanter Drehgeschwindigkeit geschaltet und dadurch eine mehr oder weniger starke Drosselung durchgeführt. Die Schaltzeiten des periodisch hin und her bewegten Stufenkeils sind abhängig von der Druckabweichung.

Auf die übrigen Ausführungen elektrischer Regler, bei denen meistens über elektrische Kontakte ein Umkehrmotor geschaltet wird², sowie auf die mittelbaren Überström- und Grenzbereichregler³ kann nicht weiter eingegangen werden.

¹ Über den elektro-hydraulischen Regler der Firma Sennlaub & Laupmann s. S. 592.

² Über ein Druckminderventil mit Rückführung und elektrischer Steuerung für 230 kg/cm² Betriebsdruck siehe Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 75, 1435 (1931).

³ Z. B. der ölgesteuerte Dampfdruckregler der AEG-Berlin.

II. Einzelmengenregelung. Zur Mengenregelung sind teilweise dieselben Einrichtungen verwendbar, wie zur Druckregelung.

Ausflußregelung. Zur Aufrechterhaltung eines bestimmten, frei aus einem Behälter durch eine Poncelet-Öffnung ausfließenden Flüssigkeitsvolumens genügt die Konstanthaltung der Standhöhe mit dem bereits erwähnten Schwimmerregler. Der Schwimmer kann hierbei entweder unmittelbar auf das Steuerorgan der Zuflußleitung wirken oder mittelbar wie z. B. bei dem hydraulisch Speisewasserregler¹ von E. Roučka in Blansko, Mähren [Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. **69**, 365 (1925)]. Voraussetzung für konstantes Durchflußgewicht ist der gleichbleibende Flüssigkeitszustand.

Durchflußregelung. Von größerer Bedeutung für die Technik ist die Durchflußregelung strömender Flüssigkeiten (Gase und Dämpfe). Einfacher als die auf eine Geschwindigkeitsregelung des Verdrängungskörpers hinauslaufende Mengenregelung bei Verwendung der bekannten selbsttätigen Volumenmesser ist die Regelung strömender Mengen bei Benutzung von Düsen, Blenden, Venturirohren oder Staurohren. Bei diesen Geschwindigkeitsmessern tritt eine Druckdifferenz (Wirkdruck) $P_1 - P_2 = \Delta P$ auf, die mit der Strömungsgeschwindigkeit w im Zusammenhang steht [$\Delta P = f(w^2)$]. Es lassen sich daher die bereits angeführten Druckregleinrichtungen zur Mengenregelung verwenden, wenn die zur Messung der hier bewußt hervorgerufenen Druckdifferenzen dienenden Differentialmanometer als Fühlorgan herangezogen werden. Da sich die Wirkungsweise der Regler nicht weiter ändert, soll als Beispiel einer Einzelmengenregelung der Askania-Regler² (Abb. 193) wiedergegeben werden.

Die Berechnung der Drosselgeräte erfolgt nach den auf S. 759 näher angegebenen Grundlagen. Die Beachtung konstanter Durchflußbeiwerte sei auch hier betont.

Gewichtsregelung bei tropfbaren Flüssigkeiten. Bei sauberen, frei ausfließenden Flüssigkeiten kann ein bestimmter Ausfluß mit der Dosierwaage der Hydro-Apparatebauanstalt, Düsseldorf oder dem „Rotastat“, dem Ausflußregler der Deutschen Rotawerke G. m. b. H., Aachen aufrechterhalten werden. In beiden Fällen wird ein Ausflußgefäß mit Bodenöffnung verwendet, das als Lastschale unterhalb der Zuflußeinrichtung an einem Waagebalken aufgehängt ist. Das bei bestimmter Füllhöhe austarierte Gefäß ist bei der für kleine Mengen (5—1000 cm³/min) verwendbaren Dosierwaage an einem gleicharmigen Waagebalken angeordnet. Bei Abweichungen aus der Gleichgewichtslage wird von der im geringen Überschuß stetig zugeführten Flüssigkeit durch ein am Waagebalken angeordnetes Verteilerstück eine kleinere oder größere Menge der Danaide zugeführt, bis der Gleichgewichtszustand wieder erreicht ist.

¹ Näheres über Speiseregler siehe G. Wunsch: Wärme **55**, 321 (1932).

² Über Speisewasser-Differenzdruckregler mit dem Askania-Strahlrohrregler siehe Wärme **54**, 638 (1931). Über den Bailey-Speisewasserregler der Bailey Meter Co., Cleveland, siehe Arch. Wärmewirtsch. **13**, 97 (1932).

Der Rotastat besitzt eine Neigungsgewichtseinrichtung und steuert durch die Bewegung des Waagebalkens eine Drosselklappe in dem Zuflußrohr. Gewichtsänderungen im Zu- oder Abfluß führen zur Verstellung des Regelorganes und zur Einregelung der Flüssigkeitsmenge auf den Sollwert.

In beiden Fällen sind Abscheidungen, die eine Fälschung des Taragewichtes und damit eine Änderung der Sollmenge veranlassen, zu beachten.

Zur Regelung größerer Flüssigkeitsmengen können die bekannten automatischen Wägeeinrichtungen benutzt werden, die fortlaufend eine ihrer Gewichtsbelastung entsprechende Flüssigkeitsmenge abwägen und diese bei abgestelltem Zufluß zur Entleerung bringen (s. S. 695). Die Füllzeit der Waage hängt von der Zuflußgeschwindigkeit ab. Ändert sich der Druck vor dem Zuflußventil nur unwesentlich, so kann von Hand leicht die vom Betrieb geforderte Menge eingestellt werden. Bei stark wechselndem Druck wird die Verwendung eines Druckreglers zweckmäßig. Unter Umständen genügt aber auch eine von einem Zeitgeber aus gesteuerte elektromagnetische Aus-

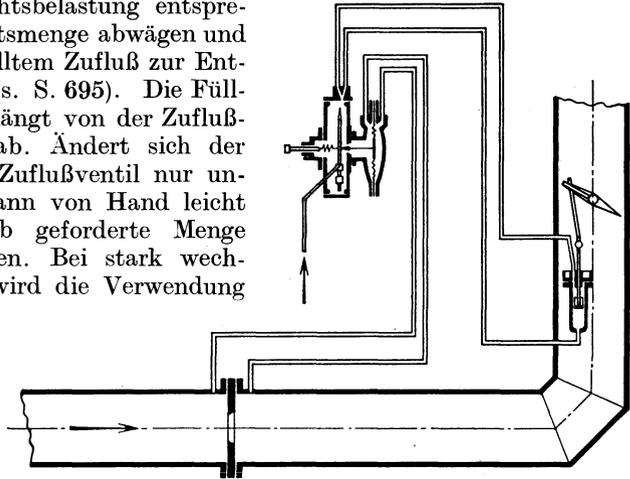


Abb. 193. Askania-Regler für Mengenregelung.

lösung der Waage nach jeder einwandfrei beendeten Wägung (s. S. 840).

Bei Verwendung zu Mischzwecken können die Waagen mechanisch oder elektrisch gekuppelt werden. Eine Auslösung der entsprechend dem Mischungsverhältnis belasteten Waagen findet dann stets gleichzeitig statt.

Das stoßweise Arbeiten dieser selbsttätigen Balkenwaagen ist nicht in allen Fällen brauchbar.

III. Einfache Gemischregelung. Von besonderem Interesse für die Technik ist die Gemischregelung, bei der es sich darum handelt zwei oder mehrere Komponenten in einem bestimmten Verhältnis zu mischen. Das Anwendungsgebiet der hierzu benutzten Gemischregler ist so groß und auch so bekannt, daß sich eine Aufzählung einzelner Aufgaben erübrigt.

Die einfache Gemischregelung setzt voraus, daß sich die Zusammensetzung der einzelnen Komponenten nur innerhalb der für die jeweiligen Betriebsverhältnisse zulässigen Grenzen ändert. Sind z. B. Analyse und Temperatur von zwei zu mischenden Heizgasen konstant, so kann im einfachsten Falle durch Einzeldruckregelung nach irgendeinem der vorerwähnten einfachen Verfahren das erforderliche Mischungsverhältnis aufrechterhalten werden. Solange in beiden Leitungen die Widerstandsverhältnisse hinter den Reglern immer gleich bleiben, also nicht etwa in

einer Leitung durch Drosselung geändert werden, wird an der Verbraucherstelle ein Mischgas entsprechend dem Einstellwert verfügbar sein. Bei nicht zu häufigen Heizwertänderungen kann von Hand das Mischungsverhältnis wieder auf den verlangten gleichbleibenden Mischgasheizwert eingestellt werden. Auch eine Verhältnisdruckregelung kann zur Gemischregelung herangezogen werden. Hierbei wirkt alsdann auf den Impulsgeber (Differentialdruckregler) z. B. der nahezu konstante Druck der einen Komponente (Gasometer, Akkumulator) und der auf etwa gleicher

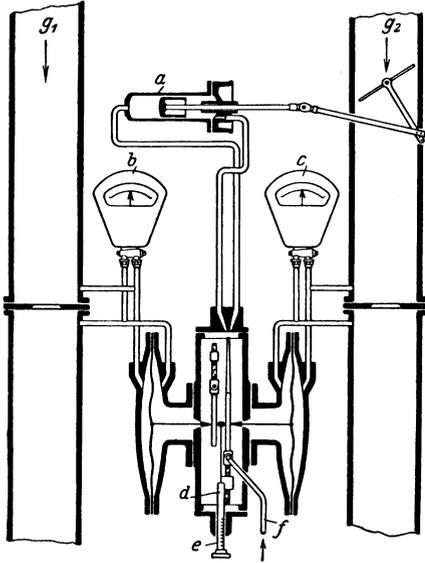


Abb. 194. Strahlrohr-Gemischregler (Askania-Werke). *a* Steuerzylinder, *b* Mengenmeßgerät I, *c* Mengenmeßgerät II, *d* Steuerwerk, *e* Gemischeinstellung, *f* Druckmittel, g_1 Gas I, g_2 Gas II.

Höhe zu haltende Druck der zweiten Komponente, der hinter dem bei Änderung des Druckverhältnisses zu steuernden Regelorgan entnommen wird.

Sicherer ist die Mengenregelung, bei der die zuströmenden Mengen einzeln gemessen werden. Das Mengenverhältnis wird durch ein Verhältnissteuerwerk ständig kontrolliert und bei eintretenden Änderungen durch mehr oder weniger starke Drosselung der einen Menge das notwendige Verhältnis wieder auf den Einstellwert gebracht. Von den verschiedensten Ausführungsarten ist in Abb. 194 der Askania-Gemischregler [E. Stach: Regelung von Gasmengen mit dem Strahlrohr. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 70, 1032 (1926)] wiedergegeben. Seine Arbeitsweise ist nach dem Vorhergehenden ohne weiteres verständlich.

Neben diesem hydraulischen Gemischregler sollen zwei elektrische Gemischregler angeführt werden.

Bei dem Reineke-Zweimotorenregler (Junkers Thermo-Technik G. m. b. H., Berlin) wird die Regelung auf ein konstantes Mischungsverhältnis dadurch erreicht, daß die an den Drosselgeräten auftretenden Wirkdrücke auf ein Doppeldifferenzdrucksteuerwerk wirken. Stehen die Wirkdrücke infolge eingetretener Änderung nicht mehr in dem erforderlichen Verhältnis, so wird durch ein Kontaktwerk bei den ständig laufenden Motoren ein Geschwindigkeitsunterschied herbeigeführt, der über ein Differentialgetriebe den Regelteil solange verstellt, bis das richtige Mengenverhältnis wieder erreicht ist.

Ebenso kann der Wirkdruck der beiden Drosselgeräte auf Ringwaagen übertragen werden, die wie bei der Siemens-Mengenregelung mit Ringrohren versehen sind. Die Platinwiderstandsdrähte der Ringrohre befinden sich hierbei in den Zweigen einer Wheatstoneschen Brücke und betätigen bei Störung des Mengenverhältnisses über das

in die Meßdiagonale der Brücke eingebaute Brückenrelais¹ schrittweise das Regelorgan der einen Leitung bis zur Gleichgewichtslage.

Die Durchführung der Mengengemischregelung der verschiedensten Flüssigkeiten beschränkt sich natürlich nicht nur auf die Verwendung von Drosselgeräten, vielmehr lassen sich bei den erwähnten Einrichtungen alle Mengemesser verwenden, deren Angaben in Druck oder elektrische Widerstandsänderungen umgeformt werden können.

Bei den Ölfeuernungen ist z. B. die Messung besonders zähflüssiger Brennstoffe mit Hilfe der Durchflußmethode nicht mehr einwandfrei durchführbar. Die Steuerung des Öls kann dann nach der von G. Wünsch angeführten und in Abb. 195 wiedergegebenen Methode durchgeführt werden. Die Messung des Brennstoffes erfolgt mit einer Zahnradschleuse. Um den Meßwert für diese Ölsteuerung zu erhalten, ist auf der Welle der mit regelbarem Motor angetriebenen Pumpe ein kleines Zentrifugalgebläse (Meßgebläse) angeordnet (s. auch S. 823 und 839).

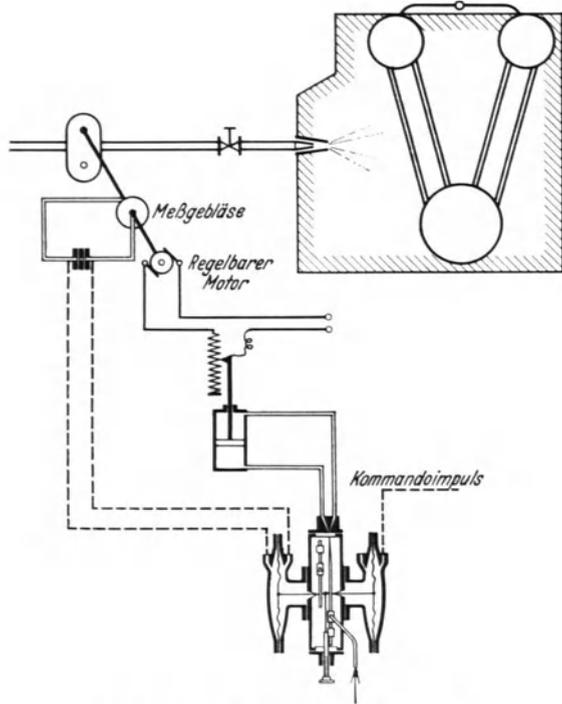


Abb. 195. Meßgebläse für Ölfeuernungen (Askania-Werke).

IV. Feuerungsregelung. Bei der selbsttätigen Regelung von Feuerungsanlagen sind gleichzeitig mehrere voneinander abhängige Regelungen auf die den jeweiligen Einstellwerten entsprechenden Meßwerte durchzuführen. Von den verschiedenen Regelverfahren sollen hier die durch Abb. 196 (AEG-Askania-Werke) und Abb. 197 (Siemens-Werke) dargestellten kurz betrachtet werden. Näheres über die Kesselregelungen der Bauart Carrick, Bailey, Roučka [s. F. Niethammer: Gemischte Kraft- und Wärmeanlagen. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 69, 861 (1925)], Smoot und Hagan [P. Kaufmann: Hagan-Kesselregelung. Wärme 53, 345 (1930)] ist der Fachliteratur [Th. Stein: Regelung und Ausgleich in Dampfanlagen. Berlin 1926] zu entnehmen. Von den

¹ Näheres über das Brücken- oder Doppelfallbügelrelais von Siemens & Halske siehe Der Chemie-Ingenieur, Bd. II/1, S. 97. Leipzig 1932.

zur wirtschaftlichen Fahrweise der Feuerungsanlagen noch notwendig werdenden selbsttätigen Berichtigungen der von Hand eingestellten Fühlorgane soll an dieser Stelle abgesehen werden, da diese Einrichtungen im nachfolgenden Abschnitt (S. 825) für sich behandelt werden. Auch auf die Regelung der Brennstoffzufuhr wird an anderer Stelle eingegangen (S. 839).

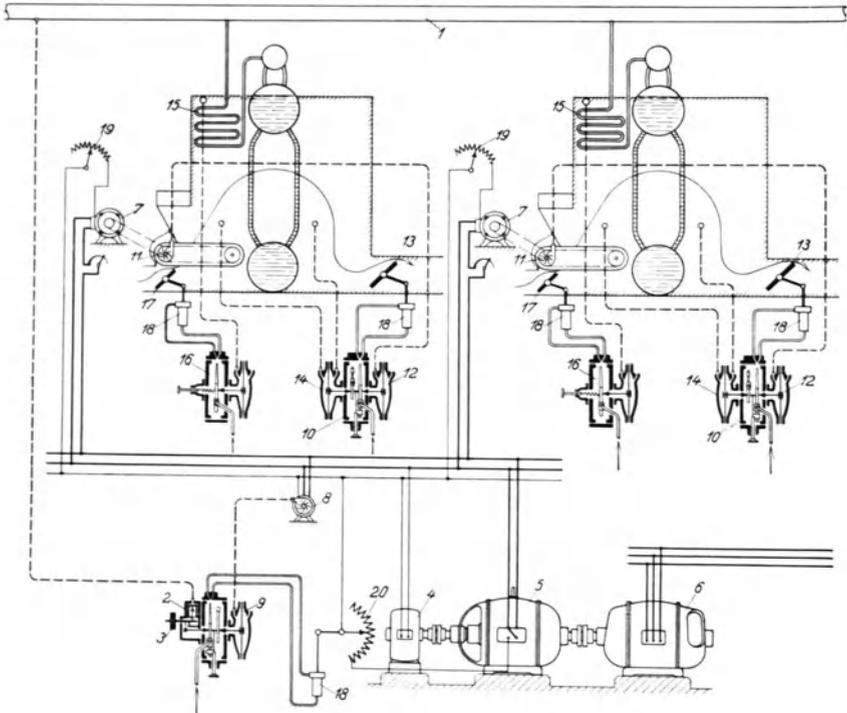


Abb. 196. Schaltschema für vollautomatische Wanderrostkessel (AEG-Askania-Werke). 1 Dampfsammelleitung, 2 Hochdruck-Wellrohrmembran, 3 Ausgleichgewicht, 4 Erregermaschine des Leonard-Aggregates, 5 Gleichstromgenerator des Leonard-Aggregates, 6 Drehstromantriebsmotor des Leonard-Aggregates, 7 Gleichstrom-Rostantriebsmotor, 8 Gleichstromhilfsmotor mit Rückführungsgebläse, 9 Rückführmembran, 10 Verbrennungsregler, 11 Meßgebläse, 12 Impulsmembran, 13 Rauchgasklappe, 14 Rückführmembran, 15 Überhitzer, 16 Unterdruckregler, 17 Luftzutrittsklappe, 18 Steuerzylinder, 19 Nebenschlußwiderstand, 20 feinstufiger Regelwiderstand.

Die selbsttätige Feuerungsregelung hat die Aufgabe, die Dampferzeugung dem Verbrauch stets mit höchstem Wirkungsgrad anzupassen.

Zwischen Dampfkessel (Kesseldruck) und Dampfsammelleitung (Dampfdruck) besteht ein Druckunterschied, der wie bei den Drosselgeräten mit dem Durchfluß, mit dem Dampfbedarf, in Zusammenhang steht. Wird der Kesseldruck konstant gehalten, dann ist der Dampfdruck ein Maß für die Belastung. Der Druckunterschied des Dampfdruckes gegenüber dem Sollwert des Kesseldruckes wirkt bei der hydraulischen Askania-Regelung wie auch bei der rein elektrischen Siemens-

Regelung eines Kohlenstaubkessels auf das Hauptsteuerwerk bzw. auf den Hauptregler.

Bei der Askania-Regelung [E. Dücker: Selbsttätige Feuerregler in Industriekraftwerken. AEG-Mitt. 1930, H. 2, 127] (Abb. 196) wird von dem Hauptregler der Impuls an die Steuerwerke der einzelnen Kessel weitergegeben. Die Brennstoffregelung in Abhängigkeit von der Dampfantnahme (Belastungsregelung) ist auf S. 839 näher beschrieben. Der Anpassung des Brennstoffes an die Dampferzeugung hat unbedingt eine richtige Anpassung der Verbrennungsluft (Verbrennungsregelung) parallel zu gehen. Wie bei dem Gemischregler werden hierzu die Meßwerte für den Brennstoff und die Verbrennungsluft auf den Regler übertragen. Die Luftmenge steht zur Rauchgasmenge in einem bestimmten Verhältnis. Da letztere mit Hilfe eines Differenzzugmessers, dessen Zugenahmestellen an zwei verschiedenen Stellen des Rauchgasweges angeordnet sind, leicht gemessen werden kann, wird dieser Wirkdruck auf das erforderliche Verhältnisreglersteuerwerk (10) geleitet. Außerdem wirkt auf dieses der Druck des mit dem Rostantrieb gekuppelten Meßgebläses (11). Beide Größen ändern sich quadratisch mit der Belastung. Mit einer eventuell vom Belastungsregler befohlenen Änderung der Brennstoffzufuhr ändert sich auch der Druck des Meßgebläses. Dieser Druck beeinflußt das Strahlrohr solange, bis durch die mittels des Steuerzylinders (18) erfolgende Verstellung der Rauchgasklappe (13) ein Wirkdruck erzeugt wird, der ihm das Gleichgewicht hält. In diesem Falle ist alsdann das erforderliche Verhältnis Brennstoff zu Luft in Übereinstimmung mit dem Dampfbedarf gebracht. Die Auswirkung der Regelung wird abgewartet und eine erneute Verstellung erst dann wieder vorgenommen, wenn es die Belastung fordert.

Um Kohlen- und Verbrennungsluftzufuhr in möglichst gute Übereinstimmung zu bringen, wird der Zug im Feuerraum durch ein Druckreglersteuerwerk (16) konstant gehalten. Dieses regelt die Luftzufuhr zum Rost durch entsprechende Verstellung einer Drosselklappe.

Zur Berücksichtigung des Kesselzustandes kann jeder einzelne Belastungsregler mit Hilfe des Einstellschiebers am Steuerwerk eingestellt werden.

Die Siemens-Regelung [s. C. Himmler: Wissenschl. Veröffentl. Siemens-Konzern 12, 110 (1933); Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 78, 29 (1934). — H. Moeller: Siemens-Ztschr. 9, 408, 457 (1929). — J. Krönert u. M. U. Büchting: Siemens-Jb. 1930, 236] (Abb. 197) ist ein rein elektrisches Regelverfahren. Als Hauptregler (A) wird ein sehr empfindliches gewichts- und federbelastetes Kolbenmanometer verwendet. Die Kolbenreibung wird durch langsames Drehen des Kolbens aufgehoben. Die größte Druckdifferenz, die zwischen dem Kesseldruck und dem bei Höchstlast vorhandenen Druck in der Sammelleitung auftreten kann, wird von Federn aufgenommen. Der Hub des Manometers — wie auch der Ausschlag der sonst noch benutzten Meß- oder Geberinstrumente — wird mechanisch auf ein Siemens-Ringrohr übertragen. Zur Steuerung der Brennstoffzufuhr in Abhängigkeit von der Belastung liegt dieser Ringrohrwiderstand in einer Wheatstone-Brücke. Bei dem Kohlen-

staubkessel nur in der Brennstoffbrücke. Bei der Regelung eines Wanderrostkessels ist das Kolbenmanometer noch mit einem zweiten Ringrohr ausgerüstet, dessen Widerstand sich in der zur Steuerung der Verbrennungsluft verwendeten Luftbrücke befindet. Wie aus der Abb. 197 ersichtlich ist, wird in der Luftbrücke des Kohlenstaubkessels der Widerstand der Brennstoffmenge mit dem zur Rückmeldung dienenden Widerstand der Verbrennungsluftmenge verglichen. Hier ist das zur Messung der

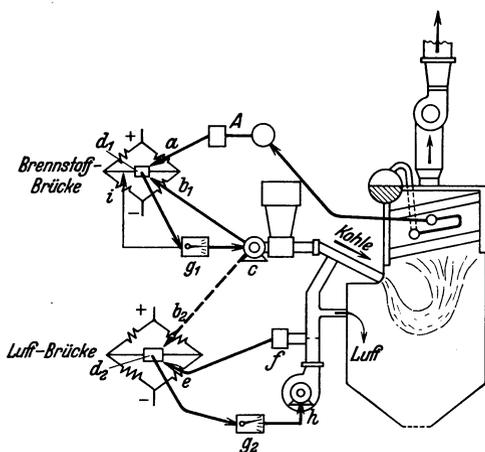


Abb. 197. Siemens-Mengenregelung bei einem Kohlenstaubkessel. *a* Widerstand, eingestellt vom Hauptregler *A*; *b*₁, *b*₂ Widerstände, eingestellt entsprechend der Drehzahl des Motors *c*, d. h. entsprechend der zugeführten Kohlenstaubmenge; *c* Antriebsmotor für die Kohlenstaubförderschnecke; *d*₁, *d*₂ Relais; *e* Widerstand, eingestellt entsprechend der Anzeige des Meßgerätes *f*, d. h. entsprechend der zugeführten Verbrennungsluftmenge; *f* Luftmesser; *g*₁, *g*₂ Geschwindigkeitsregler; *h* Antriebsmotor für Luftzufuhr; *i* elastische Rückführung.

Ausschlag werden über zwei im Instrumentennullpunkt getrennte, von einem Synchronmotor periodisch gehoben und gesenkte Fallbügel geschlossene Quecksilberkippskontakte betätigt, um die notwendige Vermehrung oder Verminderung der Verbrennungsluft zu veranlassen. Diese in einzelnen Schritten erfolgende Kontaktgabe, deren Häufigkeit und Dauer für jede einzelne Regelung dem Bedarfsfalle angepaßt wird, erfolgt solange, bis die Brücke durch die erwähnte Rückmeldung wieder ins Gleichgewicht gebracht ist. Die Brennstoffmenge steht alsdann wieder in dem der Einstellung entsprechenden Verhältnis mit der Luftmenge. Um dieses Verhältnis der Kohlenart anpassen zu können, ist in der Brückenschaltung noch ein besonderer Widerstand angebracht, der selbsttätig verstellt werden kann (s. S. 826).

Der Unterdruck im Feuerraum wird durch eine Ringwaage mit Kontakteinrichtung, die den Rauchgasschieber in Abhängigkeit von dem Zug steuert, konstant gehalten. Eine besondere Einrichtung gestattet jederzeit die Umschaltung der selbsttätigen Regelung auf die Handfernsteuerung und umgekehrt.

Brennstoffmenge verwendete und besonders ausgerüstete Tachometer mit zwei Ringrohren versehen. Das eine dient zur Antriebsrückführung bei der Steuerung des Brennstoffes, das andere zur vorerwähnten Steuerung der Verbrennungsluft. Gemessen wird die Luftmenge mit einem Drosselgerät, dessen Wirkdruck mit einer Ringwaage bestimmt und ebenfalls mit Ringrohr auf die Luftbrücke übertragen wird. Wird das eingestellte Brückengleichgewicht z. B. durch eine vom Hauptregler geforderte Brennstoffzufuhr gestört, so weicht der Zeiger des in der Brückendiagonale liegenden Relais von der Nullage (Skalenmitte) ab. Je nach der Richtung des

β) Beeinflussung des Reglereinstellwertes durch bestimmte Meßgrößen. Das Arbeiten selbsttätiger Regeleinrichtungen allein, entsprechend der von Hand vorgenommenen Einstellung ihres Steuerwerkes, ist nicht immer ausreichend. Bestimmte Prozesse verlangen die Regelung von Drücken oder Mengen in Abhängigkeit von der Zeit. In anderen Fällen wiederum ist zur einwandfreien und wirtschaftlichen Durchführung betrieblicher Vorgänge eine von den jeweiligen Verhältnissen abhängige Berichtigung der Einstellwerte erforderlich. Es sind dann zusätzliche Einrichtungen notwendig, deren Verstellkräfte zur Beeinflussung des Steuerwerkes ausreichend sein müssen.

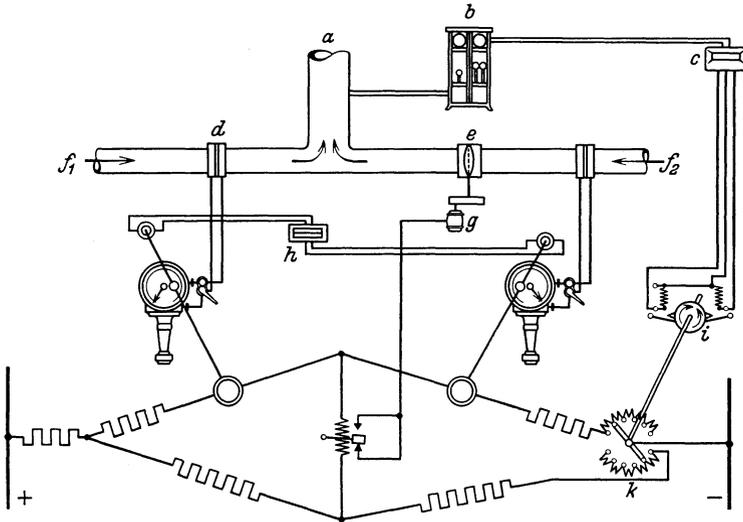


Abb. 198. Wheatstone-Brücke für Mischregelung auf konstanten Misch-Heizwert. *a* Mischgas nach dem Heizwert geregelt, *b* Calorimeter, *c* Kontaktregler, *d* Drosselgerät, *e* Drosselklappe, f_1, f_2 Gas I und II, *g* Getriebe, *h* Anzeiginstrument, *i* Schrittwerk, *k* Mischungsverhältniswiderstand.

I. Programmregelung. Bei der Programmregelung handelt es sich darum, einen Regelzustand herbeizuführen, der in Abhängigkeit von der Zeit ganz bestimmt vorgeschriebene, eventuell sich ständig wiederholende Werte durchläuft. Zu diesem Zwecke wird eine dem gewünschten Verlauf des Zustandes entsprechend ausgeführte und mit dem Steuerwerk (z. B. Strahlrohr oder Prallplatte) in Verbindung stehende Kurvenscheibe verwendet, die von einem Uhrwerk oder auch Synchronmotor gedreht wird.

II. Regelzustand in Abhängigkeit von einer oder mehreren beliebigen Meßgrößen. Die einfache Gemischregelung wird komplizierter, sobald die zu regelnden Komponenten veränderliche Zusammensetzung haben. Eine volumetrische Gasgemischregelung, z. B. zu dem Zwecke der Aufrechterhaltung eines konstanten Gemisch-Heizwertes, kann natürlich nur dann zufriedenstellende Ergebnisse zeitigen, wenn neben den Gaszuständen die Heizwerte der zu mischenden Gase nahezu konstant bleiben. Änderungen der Heizwerte für längere Zeit auf einen

neuen konstanten Wert lassen sich wohl durch Einstellung des Gemischverhältnisses berücksichtigen. Dauernde Heizwertschwankungen aber verlangen eine selbsttätige Änderung des volumetrischen Mischungsverhältnisses. Es ist alsdann dem Heizwert des Gasgemisches Einfluß auf das Steuerwerk der Regleranlage zu verschaffen. Abweichungen vom

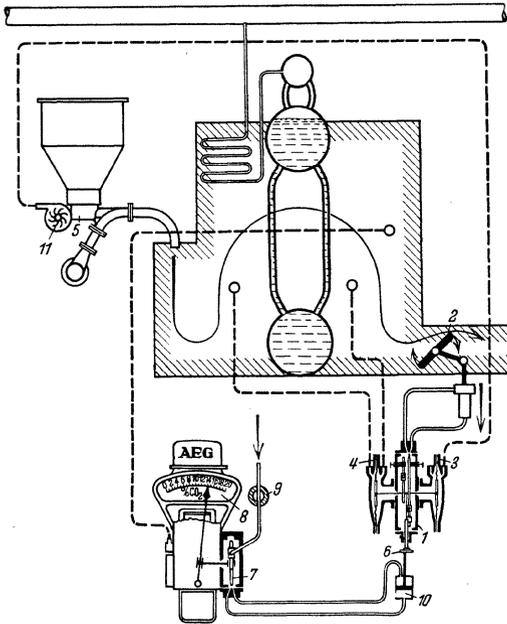


Abb. 199. Nachstellung im Mengenverhältnis von Kohle und Luft durch Ranarex-Rauchgasprüfer bei Kohlenstaubfeuerung. 1 Verhältnisregler, 2 Rauchgasklappe mit Steuerzylinder, 3 Rückführmembran für Antrieb, 4 Rückführmembran für Luftmenge, 5 Brenner, 6 Einstellschieber, 7 Strahlrohr, 8 Zeiger des Ranarex-Apparates, 9 Zeitsteuerhahn, 10 Hilfskraftzylinder für Änderung des Mengenverhältnisses Kohle-Luft, 11 Meßgebläse für Brennerdrehzahl.

Sollwert bedingen eine entsprechende Nachverstellung des Regelteiles der einen Leitung, bis wieder ein Mischgas von vorgeschriebenem Heizwert geliefert wird. Die Beeinflussung des Reglers ist dabei wiederum nur eine mittelbare.

Es sei hier erwähnt, daß der Heizwert z. B. bei den hydraulischen Reglern das Strahlrohr oder die Prallplatte entsprechend nachverstellt. Bei dem elektrischen Reineke-Gasgemischregler wird mittels eines kleinen Hilfsmotors das Einstellsystem des normalen elektrischen Kontaktwerkes beeinflusst. Bei dem in Abb. 198 wiedergegebenen Siemens-Verfahren wird der in die Wheatstonesche Brücke eingebaute, auch bei der Kesselregelung benutzte Verhältnisschieber [s. J. Krönert u. M. U. Büch-

ting: Prinzipien der elektrischen Regelung in der Wärmetechnik. Siemens-Jb. 1930, 229] verstellt.

Bei der letzterwähnten Anordnung wird durch geeignete Wahl der Brückenwiderstände erreicht, daß bei Abweichungen des Mischgasheizwertes von dem einstellbaren Sollwert die vom Kontaktregler des Calorimeters veranlaßte schrittweise Verstellung des Verhältniswiderstandes das Brückengleichgewicht entsprechend gestört wird. Das in der Meßdiagonale befindliche Brückenrelais sorgt alsdann durch Nachregelung der einen Komponente für die Wiederherstellung des Gleichgewichtes, also des vorgeschriebenen Widerstandverhältnisses, und damit für die Einhaltung des konstanten Mischgasheizwertes.

In ähnlicher Weise läßt sich eine Gemischregelung auf konstantes spezifisches Gewicht usw. durchführen.

Luftüberschußregelung bei Kesselfeuerungen. Die einfache Regelung der Kohlenmengen in einem festen Verhältnis zu den Luftmengen unterliegt verschiedenen Einflüssen, die eine wirtschaftliche Verbrennung beeinträchtigen. So entsteht bei der Steuerung der Verbrennungsluft nach der Antriebsdrehzahl eine fehlerhafte Einstellung, wenn sich die Beschaffenheit des Brennstoffes ändert. Da die richtige Einstellung des Luftüberschusses durch die Rauchgasanalyse überwacht werden kann, so werden zur selbsttätigen Berichtigung des eingestellten Verhältnisses automatische Rauchgasprüfer herangezogen. Die Anordnung bei einer schrittweise erfolgenden Einwirkung des Ranarex-Rauchgasprüfers auf das Übersetzungsverhältnis der Membrankräfte bei dem Askania-Verhältnisregler läßt die Abb. 199 erkennen.

Bei der selbsttätigen Kesselregelung nach dem Siemens-Verfahren [Der Chemie-Ingenieur, Bd. II/1, S. 185. Leipzig 1932] wird zur Steuerung des richtigen Luftüberschusses die Wheatstone-Brücke (Luftbrücke) mit einem bei der Gemischregelung (Abb. 198) bereits angeführten Verhältniswiderstand ausgerüstet. Gesteuert wird dieser Widerstand von einem Siemens-CO₂ und (CO + H₂)-Messer. Der letztere kehrt beim Auftreten unverbrannter Bestandteile den Regelsinn des Verhältnisschiebers um, überläßt aber dem CO₂-Messer wieder die Berichtigungssteuerung, sobald sein Fallbügelregler den Wert Null wieder erreicht hat.

γ) Selbsttätige Sicherheits- und Absperrrichtungen. Zur Sicherung von Rohrleitungen und Apparaturen werden unmittelbar oder mittelbar wirkende Einrichtungen verwendet, die entweder auf unzulässige Änderung des Druckes, der Strömungsgeschwindigkeit oder auch auf einen Wechsel in der Strömungsrichtung selbsttätig ansprechen.

I. Unmittelbare Sicherheitseinrichtungen. Die bekanntesten Einrichtungen sind die Sicherheitsventile an Dampfkesseln, Druckgefäßen und Rohrleitungen aller Art. Sie haben die Aufgabe, bei Erreichung des festgesetzten Druckes p selbsttätig einen Querschnitt f zu öffnen, der nach den teilweise gesetzlich vorgeschriebenen Bestimmungen [Hütte: Des Ingenieurs Taschenbuch, 26. Aufl., Bd. 2, S. 371. 1931]

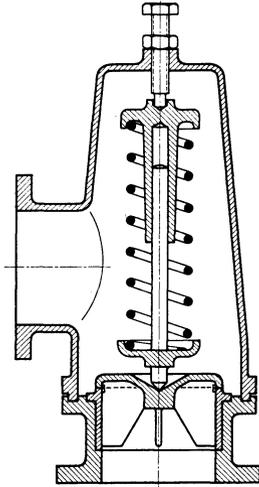


Abb. 200. Einfaches Sicherheitsventil mit direkter Federbelastung.

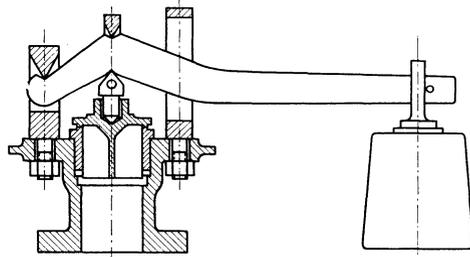


Abb. 201. Einfaches Sicherheitsventil mit Gewichtsbelastung (Dreyer, Rosenkranz & Droop).

so groß sein muß, daß eine Überschreitung des Solldruckes nur von höchstens 10% eintreten kann. Der Ventilkörper wird durch eine einstellbare Gegenkraft (P) (Feder oder Gewicht) auf seine Sitzfläche ge-

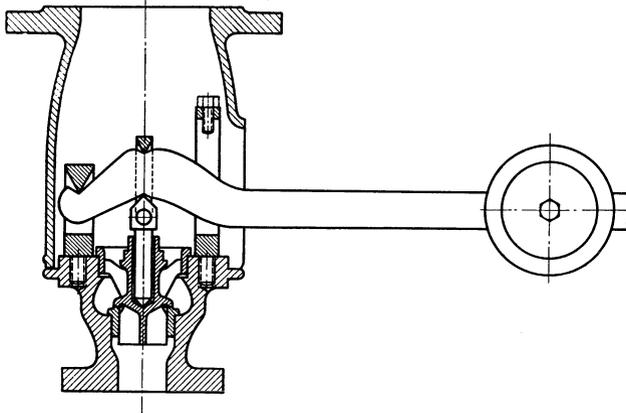


Abb. 202. Vollhub-Sicherheitsventil nach Rosenkranz.

drückt. Wenn der Druck $p > P/f$ wird, beginnt das Ventil mit dem Öffnen, schon bei geringem Ventilhub tritt dann meistens ein Gleichgewichtszustand ein. Die Ventile werden mit und ohne besonderem

Ablaßstutzen ausgeführt. Die Abb. 200 und 201 geben zwei einfache Ausführungsbeispiele wieder.

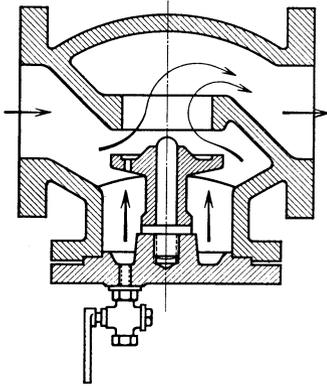


Abb. 203. Selbstschlußventil (Dreyer, Rosenkranz & Droop).

Um ohne eine wesentliche Steigerung des Überdruckes eine Vergrößerung des Ventilhubes zu erlangen, wird bei den meistens verwendeten Hochhub- oder Vollhub-Sicherheitsventilen (Hub mindestens ein Viertel des Durchmessers) der abströmende Dampf zur Erhöhung des Strömungsdruckes herangezogen (größere Platte oder Stoßfänger in verengtem Kanal). Abb. 202 zeigt ein Vollhub-Sicherheitsventil mit gewichtsbelastetem Hebel, das seiner größeren Zuverlässigkeit wegen dem federbelasteten Ventil allgemein vorgezogen wird.

Die Vollhub-Sicherheitsventile lassen eine Drucksteigerung von etwa 0,3—0,5 at zu, bevor der Vollhub eintritt. Zur Vermeidung großer Dampfverluste durch zu häufiges Abblasen wird das Vollhubventil der Abb. 202 noch mit einer Rollgewichtsbremse [P. H. Rosenkranz: Neuerungen an Sicherheitsventilen mit vollem Kegelhub. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 54, 594 (1910)] versehen. Die Dämpfung tritt aber erst in Kraft, nachdem eine den normalen Sicherheitsventilen entsprechende Öffnung stattgefunden hat. Mit weiter steigendem Druck steigt dann auch die

Bremswirkung, bis bei Erreichung der Toleranzgrenze die volle Hochhubwirkung des Ventils zur Geltung kommt.

Bei dem Selbstschlußventil der Abb. 203 wird bei unzulässiger Steigerung der Strömungsgeschwindigkeit (Rohrbruch) ein selbsttätiger Abschluß herbeigeführt.

Zur Verhinderung von Rückströmungen werden Rückschlagventile und -klappen verwendet. Von den zahlreichen Ausführungen dieser Sperrschalter sei je eine durch Abb. 204 und 205 wiedergegeben.

Erwähnt sei auch das gelegentlich benutzte Kugel-Rückschlagventil, bei dem bei plötzlichem starken Durchstrom eine Kugel, die in beiden Strömungsrichtungen wirken kann, gegen ihren Sitz gedrückt wird.

II. Mittelbare Sicherheitseinrichtungen. Wenn fest vorgeschriebene Grenzwerte genau einzuhalten sind, ist die Betätigung der Absperrorgane durch eine fremde Hilfskraft zuverlässiger. Von den bereits erwähnten halb selbsttätigen (S. 803) zu den selbsttätig arbeitenden Sicherheitseinrichtungen ist nur ein kleiner Schritt. Bei diesen kommt die Hilfskraft durch die von einem Fühlorgan betätigte Auslösevorrichtung zur Wirkung.

Die Auslösevorrichtungen selbst können mechanischer oder elektrischer Art sein. Auf richtige Einstellung der druck- oder geschwindigkeitsabhängigen Fühlorgane ist zu achten. Es muß einerseits eine Auslösung bei gelegentlichen Spitzenleistungen vermieden, andererseits eine rechtzeitige Betätigung der selbsttätigen Einrichtungen auf jeden Fall erreicht werden.

Zwei mit mechanischer Hilfskraft arbeitende druckabhängige Auslösevorrichtungen veranschaulichen Abb. 206 und 207.

Bei dem Membran-Druckschalter der I. G. Farbenindustrie wird bei Erreichung der unteren Druckgrenze ein Fallgewicht zum Absperrn der Rohrleitung mittels Ventilteller *a* freigegeben. Die Auslösung des Fallgewichts *c* bei dem federbelasteten Kolben-Druckschalter [s. G. Eggers: Rohrbruchsicherungen. Gas- u. Wasserfach 74, 724 (1931)] erfolgt bei einer bestimmten Kolbenstellung durch Freigabe des Führungskörpers *a* und der damit verbundenen Lüftung des Ausklinkhebels *b*. Wie im ersten Falle, kann auch beim Kolben-Druckschalter das Fallgewicht auf das Absperrorgan direkt oder über einen Zwischenhebel wirken.

Ebenso können solche Einrichtungen auch bei Verwendung hydraulischer oder elektrischer Hilfskraft zur Betätigung der Steuerventile oder Schalter Verwendung finden.

Bei Anwendung des elektrischen Prinzips sind die Ausführungsmöglichkeiten überaus zahlreich. Die hier benötigten Grenzkontakte können

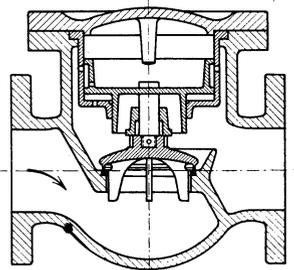


Abb. 204. Rückhaltventil mit gestuftem Bremskolben (Hübner & Mayer).

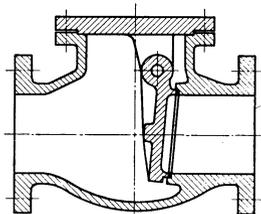


Abb. 205. Rückschlagklappe (Schäffer & Budenberg).

an den Fühlorganen selbst oder bei Ausrüstung mit Ferngebern auch an ihren Fernmeßinstrumenten angebracht werden. Durch die Betätigung des Minimal- oder Maximalkontaktes wird ein Stromkreis geschlossen, wodurch das Schließen oder Öffnen des Absperrorganes veranlaßt wird. Unbedingte Zuverlässigkeit der Kontaktvorrichtungen ist natürlich eine Grundforderung¹.

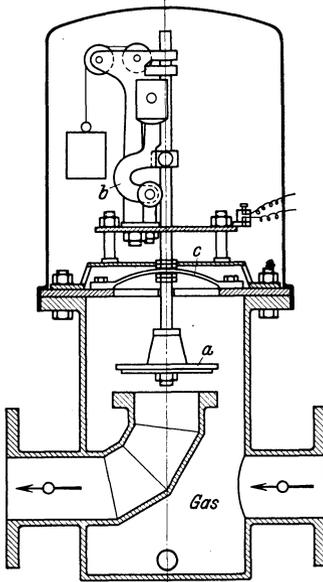


Abb. 206. Gas-Schnellschlußventil (I. G. Farbenindustrie A. G.). *a* Ventilteller, *b* Gewichtshebel, *c* Membran.

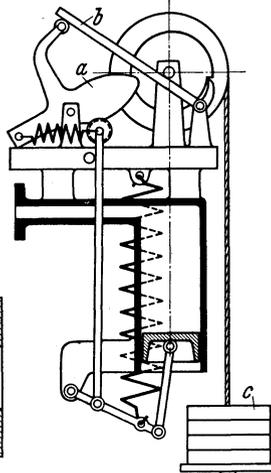


Abb. 207. Siemens-Kolbendruckschalter (Prinzipskizze). *a* Führungskörper, *b* Auskinkhebel, *c* Fallgewicht.

Hierher gehörende Einrichtungen sind z. B. die auf S. 804 angeführten elektrisch bedienten Absperrorgane, die durch ein entsprechendes Fühlorgan selbsttätig eingeschaltet werden.

Von den mechanisch betätigten geschwindigkeitsabhängigen Auslösevorrichtungen sei die Stau-Pendelscheibe und die Quecksilber-Kippwaage erwähnt [s. G. Eggers: Rohrbruchsicherungen. Gas- u. Wasserfach 74, 724 (1931)]. Häufigere Anwendung finden die elektrischen Einrichtungen.

Sie betätigen in Verbindung mit den bekannten Durchflußmeßgeräten automatisch die Sicherheitsorgane, wenn eine bestimmte Strömungsgeschwindigkeit über- oder unterschritten wird.

C. Mengenregelung fester Stoffe.

Die Mengenregelung fester Stoffe verdient besondere Beachtung.

Für manche Zwecke ist die mit der volumetrischen Materialzuteilung erreichbare Genauigkeit ausreichend (über die Genauigkeit volumetrischer Mengemessung s. S. 684). Größere Genauigkeitsansprüche sind in den meisten Fällen nur durch eine Zuteilung nach Gewicht zu erfüllen. Die Zuteilung oder Regelung kann entweder von Hand oder selbsttätig durchgeführt werden.

1. Mengenregelung von Hand.

a) Volumetrische Mengenregelung.

Eine volumetrische Mengenregelung kann bei der Verarbeitung von geringen Mengen fester Stoffe in diskontinuierlichen Betrieben am

¹ Näheres über Kontakte, offene und explosionsichere Ausführungen siehe A. Eucken u. M. Jakob: Der Chemie-Ingenieur, Bd. II/1, S. 95f. Leipzig 1932.

einfachsten durch Abmessen der Stoffe mit Gefäßen bekannten Rauminhaltes vorgenommen werden. Die Zuteilung erfolgt in dem von den Betriebsbedingungen vorgeschriebenen Maß. Verstellbare Raumgefäße [O. Kienzle: Kontrollen der Betriebswirtschaft, S.105. Berlin 1931] nach der durch Abb. 208 dargestellten Art bieten hierbei gewisse Vorteile.

Sind größere Materialmengen zu bewältigen, so sind zur Zuteilung besondere selbsttätige Vorrichtungen zu verwenden. Hierzu werden z. B. bereits früher erwähnte Volumenmesser (s. S. 681), wie Meßrohr und Zellenrad (s. S. 683) benutzt, deren Antriebsvorrichtung durch Zwischenschaltung einer von Hand zu bedienenden Regeleinrichtung ergänzt wird. Die Abb. 209 gibt einen während des Stillstandes in Stufen leicht verstellbaren Walzenzuteiler (Firma E. Rost: Maschinenbauanstalt Mainz) wieder. Die Gefahr falscher Abmessungen durch unvollständiges Füllen der einzelnen Meßräume infolge Gewölbebildung in dem Zuführungsrrohr wird durch ein mechanisches Klopfwerk gemildert. Zur Sicherung der Zuteilung kann außerdem eine Alarm- und Abstellvorrichtung angebracht werden, die bei Materialmangel in Tätigkeit tritt.

Für klebrige, schmierige und pastenförmige Stoffe finden Zellenpeiser Verwendung, bei denen ein Zellenrad durch ein Maltheserkreuz schrittweise bewegt wird. Nach jedem einmaligen Fortschritt findet eine zwangsweise Verriegelung der Zellenwalze statt, worauf ein gut eingepaßtes Abstreifmesser den Zelleninhalt sauber abschneidet (Firma Gebr. Pfeiffer, Barbarossawerke A.G., Kaiserslautern).

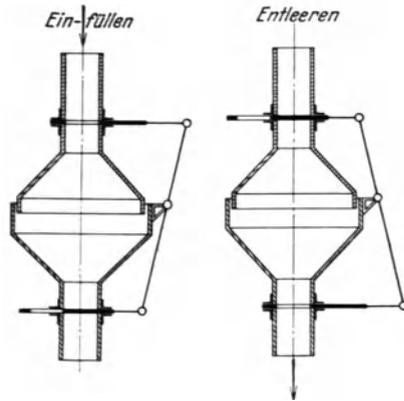


Abb. 208. Raumgefäß für gemahlene und rieselige Stoffe.



Abb. 209. Zuteiler mit Zellenwalze, mit Kontakt und selbsttätiger Abstellung bei eintretendem Materialmangel (E. Rost, Maschinenbauanstalt, Mainz).

Eine sichere Anpassung der Materialmenge an die Erfordernisse des Betriebes läßt sich bei diesen mit Hilfe der Geschwindigkeit regelbaren Dosierapparaten durch die Verwendung von stufenlos regelbaren Getrieben¹, die in der Technik vielfache Anwendung finden, ermöglichen.

Bei den zur kontinuierlichen Materialzuteilung verwendbaren Fördermitteln wie Teilteller (s. Abb. 99, S. 683), Transportband, Schnecke, Kratzer usw. besteht bei entsprechender Anordnung eine

zweifache Regelmöglichkeit. Hier läßt sich die Beschickung (Schütthöhe) und, wenn erforderlich, auch die

Transportgeschwindigkeit regeln. Bekannt ist z. B. die Handregelung der Kohlenzufuhr bei Dampfkesseln, bei denen zum Rostantrieb hauptsächlich Stirnrädergetriebe mit bis zu zehn Geschwindigkeitsstufen verwandt werden. Einen stufenweise verstellbaren Bandzuteiler (Firma E. Rost: Maschinenbauanstalt Mainz), der wie der vorerwähnte Walzenzuteiler mit besonderen Sicherheitseinrichtungen versehen werden kann, veranschaulicht Abbildung 210.

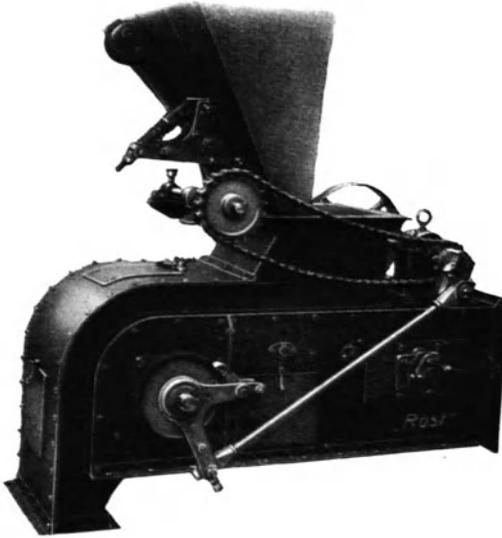


Abb. 210. Zuteiler mit endlosem Band, in geschlossener Ausführung, mit Reduktionsgetriebe und mechanischem Klopferwerk (E. Rost, Maschinenbauanstalt, Mainz).

Anzuführen ist hier auch der Lea-Volumenmesser (s. S. 682) (Abb. 211), der

das von Hand regelbare Fördervolumen mit Hilfe eines Staffelwalzenwerkes registriert [Lieferfirma C. H. Weck, Maschinenfabrik, Greiz-Döläu; s. Meßtechn. 9, 136 (1933)].

Für die Herstellung von Gemengen aus verschiedenen Stoffen können mehrere Apparate dieser Art in Gruppen angeordnet werden.

Zur gleichzeitigen volumetrischen Zuteilung mehrerer Materialien kann auch ein durch Abb. 212 wiedergegebener Meßrahmen [s. M. Dolch:

¹ P.I.V.-Kettengetriebe der P.I.V.-Ketten und Getriebe G. m. b. H., Bad Homburg v. d. H., siehe P. Kaufmann: Antriebsfragen im Kesselhaus vom Standpunkt der selbsttätigen Kesselregelung. Wärme 54, 1 (1931); Flender-Variator der Firma A. Fr. Flender & Co., Düsseldorf; Roggatz-Getriebe der C. Wirth & Co. G. m. b. H., Essen-Altenessen, siehe Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 77, 28 (1933). Über ein Reibradgetriebe der Firma Escher Wyss, Ravensburg siehe H. Presser: Arch. Wärmewirtsch. 11, 132 (1930). Über den stufenlos regelbaren Rostantrieb der vereinigten Kesselwerke Düsseldorf siehe Fr. Schulte u. E. Tanner: Konstruktive Neuerungen im Feuerungsbau. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 77, 823 (1933).

Betriebsmittelkunde für Chemiker, S. 105. Leipzig 1929] dienen. Durch Regelung der Schichthöhen mit Hilfe der Schieber S werden die Mengen der einzelnen Komponenten von Hand auf das den betrieblichen Erfordernissen entsprechende Maß gebracht.

b) Gewichtsmäßige Mengenregelung.

Für die gewichtsmäßige Materialregelung von Hand steht die große Zahl der gebräuchlichen, gut durchgebildeten Wägeeinrichtungen zur Verfügung. In besonderen Fällen weiterhin noch Waagen, die in einer dem Verwendungszweck angepaßten Bauart ausgeführt sind bzw. ausgeführt werden können.

Handelt es sich um die diskontinuierliche Verarbeitung geringer Materialmengen, dann können hierzu alle die im Abschnitt über Mengemessung fester Stoffe erwähnten Waagen (s. S. 684) der üblichen Bauart benutzt werden.

Bei der Herstellung von Gemengen oder bei der Verarbeitung großer Materialmengen empfiehlt sich die Verwendung besonderer Spezial-

waagen. Hingewiesen sei auf die in den verschiedensten Ausführungen hergestellte Gattierungswaage¹. Es ist eine meistens in Laufgewichtsbauart ausgeführte Waage, deren normal ausgeführte Auswiegevorrichtung aus einem Laufgewichtshebel besteht. Außerdem sind noch weitere Laufgewichtshebel angeordnet, die nicht mit der Zugstange in Verbindung stehen, sondern durch besondere Schaltervorrichtungen auf den zuerst erwähnten, mit dem Lasthebelwerk verbundenen Gewichtshebel geschaltet werden. Ihre Zahl richtet sich nach der Zahl der zu verarbeitenden Stoffe. Nur das Zungenspiel des mit der Zugstange verbundenen Hauptgewichtshebels ist durch eine Öffnung in dem die Balken umschließenden Blechkasten sichtbar. Das Gewicht der

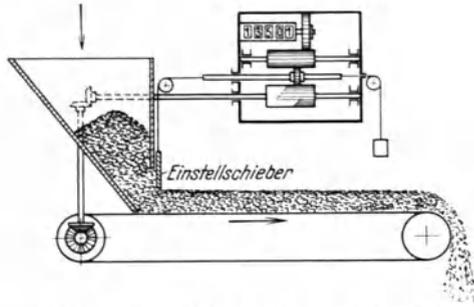


Abb. 211. Lea-Volumenmesser (C. H. Weck, Maschinenfabrik, Greiz-Dölan).

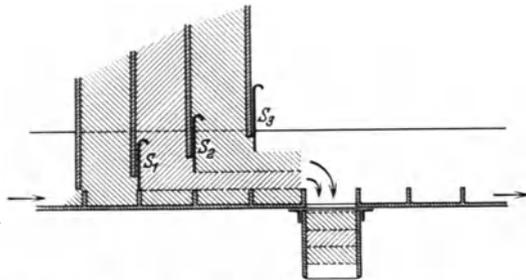


Abb. 212. Meßrahmen mit einstellbaren Schiebern S_1, S_2, S_3 .

¹ Eine Spezial-Laufgewicht-Gattierungswaage von 6000 kg Gesamttragkraft siehe G. Garbotz: Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 72, 287 (1928). — Eine fahrbare Schaltwaage der Dinse-Maschinenbau A. G.: Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 73, 508 (1929).

verschiedenen Materialien wird an den einzelnen Laufgewichtshebeln eingestellt, die Kenntnis seiner Größe kann bei dieser Anordnung dem

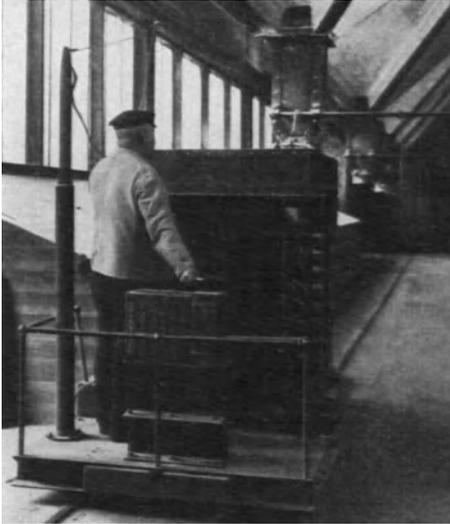


Abb. 213. Gattierungswaage mit elektrischem Antrieb (Schenck, Darmstadt).

Bedienungspersonal vorenthalten bleiben. Die Gattierungswaagen werden auch in fahrbarer Ausführung eventuell mit elektrischem Fahrtrieb (Abb. 213) (Firma C. Schenck, Eisengießerei und Maschinenfabrik Darmstadt, G. m. b. H.) hergestellt. Auch auf Hängebahnen können fahrbare Gattierungswaagen Verwendung finden (Firma C. Schenck, Eisengießerei und Maschinenfabrik Darmstadt, G. m. b. H.).

Um bei Laufgewichtswaagen das Einspielen des Waagebalkens bei der Beschickung gut und sicher herbeiführen zu können, wird gelegentlich an dem Waagebalken ein kleines Neigungsgewicht angebracht. An einer

besonderen Skala ist dann leicht die Annäherung an die Gleichgewichtslage festzustellen.

Die Verwendung der reinen Neigungswaagen als Gemengewaaagen

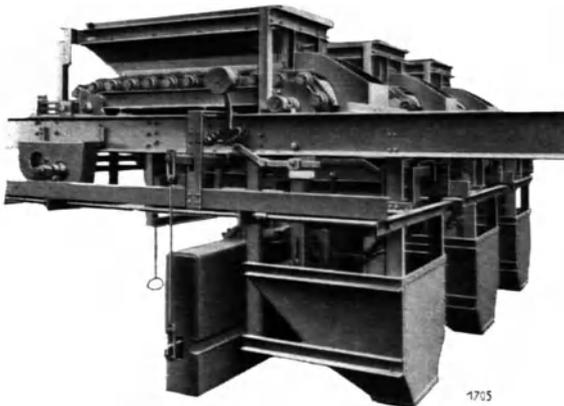


Abb. 214. Wiegeanlage mit drei Spezial-Gefäßwaagen (Schenck, Darmstadt).

macht besondere Bedienungsmaßnahmen beim Übergang von dem einen auf das andere Material überflüssig. Die Genauigkeit dieser Waagen ist aber nicht in allen Fällen so groß wie die der Laufgewichtswaagen (s. S. 715).

In besonders gelagerten Fällen werden Spezialgefäßwaagen den betrieblichen Verhältnissen gerecht. Bei diesen Waagen ist die Lastschale den Erfordernissen entsprechend als Behälter ausgeführt.

Die Gewichtseinrichtung stimmt mit derjenigen der üblichen Bauarten überein. Die Arbeitsweise dieser Spezialwaagen wird den örtlichen Verhältnissen angepaßt. Es kann z. B. die Einrichtung so getroffen werden,

daß die von Hand zu veranlassende Materialzufuhr bei Erreichung der Gleichgewichtslage selbsttätig durch ein besonderes Schaltwerk abgestellt wird, die Entleerung ebenfalls von Hand in den vorgeschriebenen Zeiträumen herbeizuführen ist.

Bei der Dosierung von mehreren Materialien kommt oft für jede Komponente eine besondere Waage in Frage [s. z. B. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 73, 464 (1929)]. Zur Sicherung der Zuteilung kann eine Vorrichtung mechanischer oder elektrischer Art angebracht werden, um nur bei einwandfreier Wägung eine gleichzeitige Entleerung der gekuppelten Waagen durch Hand möglich zu machen. Diese Handauslösung ist unter Umständen vorteilhafter als eine durch die Kraft des zu wägenden

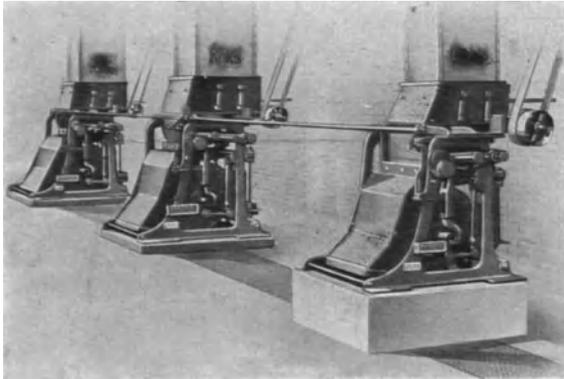


Abb. 215. Automatische Balkenwaagen „Libra“ mit mechanischer Verriegelung (Librawerke m. b. H., Gliesmarode-Braunschweig).

Materials erfolgende Auslösung (halbautomatische Waage). Sie kann auch hier durchgeführt werden. Eine Gewähr für gleichzeitige Ausschüttung ist aber nicht ohne weiteres gegeben. Bei gleichzeitiger Ausschüttung der Wägegüter in einen gemeinsamen Ablaufbunker wird bereits eine sehr zweckmäßige Vormischung herbeigeführt. Die Abb. 214 läßt eine Anordnung von drei Spezialgefäßwaagen (Firma C. Schenck, Eisengießerei und Maschinenfabrik, Darmstadt, G. m. b. H.) erkennen.

Das Arbeitsprinzip dieser in den verschiedensten Ausführungen hergestellten Spezialwaagen nähert sich demjenigen der bekannten automatischen Balkenwaagen. Ein besonderer Vorzug der Spezialgefäßwaagen liegt darin, daß ihre jeweilige Ausschüttung in weiten Grenzen geändert werden kann. Bei den automatischen Ausschüttwaagen ist dies nur bis etwa 50% der Höchstlast möglich, wenn ein einwandfreies Arbeiten gewährleistet werden soll (s. S. 704).

Wird die automatische Balkenwaage zur Regelung einer Materialmenge benutzt, so kann bei konstanter Gewichtsbelastung die Entleerung von Hand in den vom Betrieb geforderten Zeiträumen veranlaßt werden. Außerdem aber kann bei der vollautomatischen Arbeitsweise die periodische Zuteilung sowohl durch Änderung der Materialzuflußgeschwindigkeit

als auch durch Änderung der Gewichtsbelastung in dem vorerwähnten Bereich geregelt werden. Wenn Wägungen mehrerer Materialien, die in genau vorgeschriebenem Gewichtsverhältnis stehen, vorgenommen werden müssen, werden die entsprechend belasteten Waagen mechanisch oder elektrisch verriegelt [(Abb. 215),

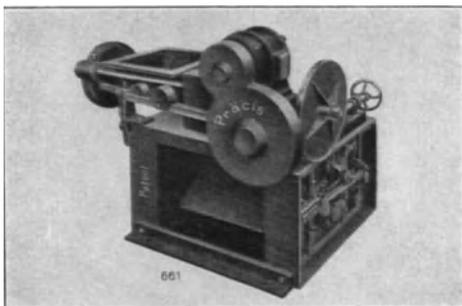


Abb. 216. Automatische Staubwaage „Präzis“ mit Leistungsregelung durch Reibscheibengetriebe [V. Bauer, Siegburg (Rhld.)].

Librawerke m. b. H., Gliesmarode-Braunschweig]. Hierdurch wird auch bei selbsttätigem Betrieb erreicht, daß eine gleichzeitige Entleerung der Waagengruppe nur dann eintritt, wenn jede einzelne Waage die vorschriftmäßige Wägung beendet hat. In diesem Falle richtet sich die Fördermenge nach der Waage mit der längsten Füllzeit. Wird stets für ausreichenden und gesicherten Materialzufluß bei allen Waagen

Materialzufluß bei allen Waagen Sorge getragen, dann kann z. B. durch eine mehr oder weniger schnelle Beschickung dieser Waage die automatische Materialwägung regelbar gestaltet werden. Eine selbsttätige Balkenwaage mit einer von Hand leicht einstellbaren Leistungsregelvorrichtung wird durch Abb.

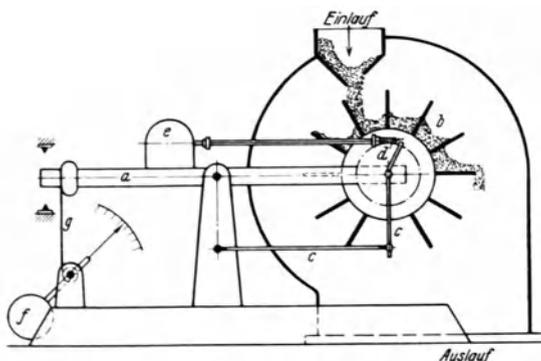


Abb. 217. Schema der Balan-Waage (Polysius A.G., Dessau). *a* Waagebalken, *b* Zellenrad, *c* Geradführungsstäbe, *d* Schneckengetriebe, *e* Motor und Vorgelege, *f* Neigungsgewicht, *g* Stahlband.

216 dargestellt (Firma V. Bauer, Registrierwaagenfabrik, Siegburg).

Das stoßweise Arbeiten dieser Wägeeinrichtungen ist nicht für alle Betriebsverhältnisse geeignet. Schwierigkeiten bereitet zuweilen die Kontrolle der Fördermenge, da diese jeweils nur in gewissen Zeiträumen durchführbar ist. Günstiger in dieser Beziehung ist die selbsttätige Waage, deren Gewichtseinrichtung nach dem Prinzip der Neigungs-

waage ausgeführt ist. Bei diesen automatischen Förderwaagen kann die Konstanz des Fördergewichtes durch die ständig ablesbare Belastung leicht überwacht werden. Mit Hilfe einer regelbaren Zuteilvorrichtung kann das Fördergut bequem von Hand auf das Sollgewicht oder auf ein durch veränderte Betriebsbedingungen gefordertes neues Materialgewicht gebracht werden. Als solche die Handregelung wesentlich unterstützende Waagen seien angeführt die Balan-Kontrollwaage, die Becherwerks- und Förderbandwaage (s. auch S. 698).

Wenn auf eine Registrierung verzichtet werden kann, genügt zur einfachen Überwachung bzw. Handregelung der stetigen Zuteilung eine Gewichtseinrichtung einfacher Art nach der aus Abb. 224 zu entnehmenden Ausführung. Ein Schema der Balan-Waage und der Förderbandwaage sei durch die Abb. 217 und 218 wiedergegeben.

Diese selbsttätigen Wägeeinrichtungen lassen sich ebenfalls in Gruppen anordnen und dann zur Herstellung von Mischungen in festem Gewichtsverhältnis verwenden.

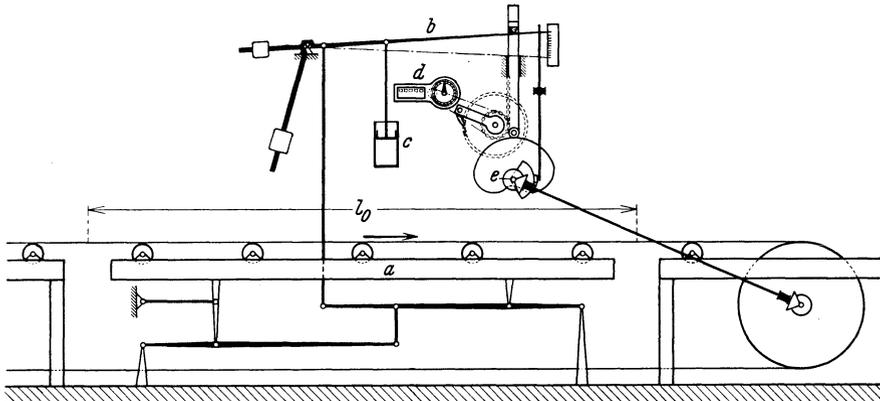


Abb. 218. Schema der Förderbandwaage (Schenk, Darmstadt). *a* Waagenbrücke, *b* Neigungswiegebalken, *c* Luftbremse, *d* Additionszählwerk, *e* Steuerwelle, l_0 theoretische Brückenlänge.

2. Selbsttätige Mengenregelung fester Stoffe.

Die Mengenregelung von Hand wird durch die Unterstützung einwandfrei und selbsttätig arbeitender Meßinstrumente erleichtert und die Genauigkeit der Zuteilung wesentlich erhöht. Werden diese Apparate außerdem noch mit Alarmvorrichtungen versehen, die z. B. bei Überschreitung der als zulässig erachteten Abweichungen von der Sollmenge dem Bedienungspersonal den Befehl zum Eingreifen erteilen, dann kann bei rechtzeitiger und ordnungsmäßiger Ausführung der Anweisung eine weitere Steigerung der Genauigkeit erreicht werden. Die auch bei dieser Arbeitsweise noch bestehende Unvollkommenheit wird ausgeschaltet, wenn eine selbsttätige Mengenregelung zur Anwendung kommt. Sie steuert gleichmäßig und zuverlässig die Materialzuteilung entsprechend der vorgenommenen Einstellung, bis diese von Hand oder automatisch geändert wird.

Zur Mengenregelung von festen Stoffen werden fast ausschließlich mittelbare Regler benutzt. Die benötigte Verstärkerenergie kann mechanischer oder elektrischer Art sein.

a) Selbsttätige Volumenregelung.

Um bei diskontinuierlichem Betrieb durch selbsttätige Volumenregelung einen festen Stoff der Verarbeitungsapparatur stetig zuzuführen,

kann z. B. das vorerwähnte Zellenrad- oder der Bandzuteiler benutzt werden. Es wird dann durch ein Schaltwerk nach einer ganz bestimmten Laufzeit die Förderung automatisch unterbrochen. Der durch Abb. 219 wiedergegebene periodisch arbeitende selbsttätige Volumenmesser [s. O. Habild: Hochgebirgsbaustelle „Sperrmauer Vermunt“. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 75, 785 (1931)] wird stillgesetzt, wenn der Schaltkontakt durch das Klemmsperrgetriebe betätigt wird. Unter der Voraussetzung störungsfreien Zuflusses wird hier die von Hand mittels Hub- und Hebelübersetzung des Getriebes oder Regelschiebers einstellbare Menge stets in gleichen Zeiträumen geliefert.

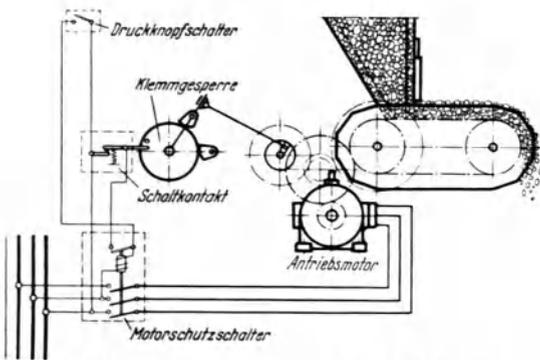


Abb. 219. Schaltbild eines periodisch arbeitenden Bandzuteilers.

Wenn erforderlich, läßt sich bei entsprechender Durchbildung des Schaltwerkes die Förderzeit und damit die Menge auch nach einem fest vorgeschriebenen Schema regeln (Programmregelung).

Die kontinuierliche Zuteilung eines Materialvolumens kommt weit häufiger in Frage.

Wenn ein stetig gefördertes Material dem Volumen nach konstant

zu halten ist, so kann z. B. bei dem mit gleichmäßiger Geschwindigkeit angetriebenen Bandförderer ein über die Oberfläche des Fördergutes streifender Tasthebel als Fühlorgan benutzt werden. Dieser Zustandsfühler veranlaßt bei Abweichungen von der erforderlichen Schichthöhe bzw. bei Überschreitung bewußt zugelassener enger Grenzstellungen über einen Verstärker (z. B. umschaltbarer Motor) die Verstellung des Regelorganes (z. B. Schieber an der Zubringeröffnung). Je nach der Richtung der Abweichung wird das Regelorgan geöffnet oder geschlossen, also mehr oder weniger Material auf das Förderband gebracht. Infolge Reibung und der absichtlichen Einstellung des Fühlorganes entsteht ein kleineres oder größeres Unempfindlichkeitsgebiet. Die Steuerung erfolgt schrittweise. Bei richtiger Anpassung von Größe und Häufigkeit der Schritte wird erreicht, daß praktisch nicht zu vermeidende Einflüsse, wie Reibung, Trägheit der Anlage und der Massen usw. weniger zur Geltung kommen und dadurch störende Pendelungen vermieden werden.

Um das Materialvolumen in Abhängigkeit von einer anderen Größe (z. B. Temperatur, Feuchtigkeit usw.) zu steuern, wird dieser Größe ein entsprechender Einfluß auf das steuernde Meßwerk eingeräumt. Bei konstanter Geschwindigkeit des Förderbandes kann sie die Stellung des an der Auslauföffnung der Zubringervorrichtung angeordneten Schiebers, bei gleichbleibender Schichthöhe die Fördergeschwindigkeit verändern. Die zur Geschwindigkeitsregelung notwendige feinstufige

Verstellung wird ermöglicht durch hydraulische oder elektrische Steuerung stufenlos regelbarer Getriebe.

Der gleiche Zweck wird durch Regelung des Antriebsmotors erreicht, wie dies z. B. bei der Regelung der Materialzufuhr selbsttätiger Ventil-sackfüllmaschinen [s. Elektrotechn. Ztschr. 53, 389 (1932)] oder bei der nachfolgend betrachteten Regelung der Brennstoffzufuhr von Rost- und Kohlenstaubfeuerungen durchgeführt wird.

Die beschrittenen Wege zur Anpassung des Brennstoffbedarfs an die Kesselbelastung als ein Teil der vollautomatischen Kesselregelung [Schrifttumsverzeichnis über „Regelung in Dampfanlagen s. Arch. Wärmewirtsch. 14, 248 (1933)] sind verschieden. Zur Regelung werden Einrichtungen benutzt, die auf hydraulischer oder rein elektrischer Grundlage beruhen.

Die Regelung der Brennstoffzufuhr erfolgt entsprechend der Druckdifferenz, die zwischen dem Sollwert des Kesseldruckes und dem Dampfdruck in der Sammelleitung auftritt (s. S. 822)¹.

Der Lastanzeiger ist z. B. bei Regelanlagen der Bauart AEG-Askania (s. Abb. 196) und Arca ein Membranbalgmanometer. Im Sollzustand halten sich die vom Dampfdruck und Gegengewicht bzw. Feder auf die Membranfläche ausgeübten Kräfte das Gleichgewicht. Abweichungen von der einstellbaren Gegenkraft haben eine Verstellung des Strahlrohres bzw. der Prallplatte und damit eine entsprechende Einwirkung der benötigten hydraulischen oder pneumatischen Kraft (Drucköl oder Druckluft) auf das Fördermittel des Brennstoffes zur Folge.

Um Pendelungen infolge der Trägheit der Anlage zu vermeiden, ist eine Rückführung erforderlich. Sie führt eine Unterbrechung der Regelung herbei, sobald eine ausreichende Änderung der Brennstoffzufuhr stattgefunden hat. Zu diesem Zwecke benutzen Askania-Werke und Arca-Werke ein mit dem Antrieb von Rost, Kohlenstaubbrennern usw. gekuppeltes Meßgebläse (Antriebsrückführung). Der Druck dieses Gebläses ändert sich quadratisch mit der Antriebsdrehzahl und damit mit der Brennstoffmenge. Es liegt hier die gleiche Gesetzmäßigkeit vor, wie zwischen Druckdifferenz und Dampfmenge bei dem Belastungsanzeiger. Der Rückführdruck wirkt ebenfalls auf das Fühlorgan (vgl. Abb. 196). Eine eingeleitete Änderung der Brennstoffzufuhr (Antriebsgeschwindigkeit) wird daher unterbrochen, wenn sich die auf das Fühlorgan wirkenden Kräfte das Gleichgewicht halten. In diesem Falle hat dann z. B. das Strahlrohr seine Mittellage wieder erreicht. Da das Endergebnis der Steuerung auf die Regeleinrichtung zurückgeführt wird, scheidet alle Fehler, die etwa im Kraftgetriebe, Verbindungsgestänge usw. liegen, aus. Eine erneute Regelung setzt erst dann wieder ein, wenn die Druckdifferenz eine andere geworden ist als es der geänderten Brennstoffzufuhr entspricht. Dabei kann der Druck innerhalb enger Grenzen schwanken, also eine gewisse „Ungleichförmigkeit“ des Regeldruckes auftreten.

¹ Ein Schema der Selbstregelung des Rostgetriebes in Abhängigkeit von der Rauchgas- bzw. Verbrennungsluftmenge siehe Wärme 53, 937 (1930).

Für die rein elektrische Brennstoffregelung benutzt die Siemens & Halske A.G. als Belastungsmesser das bereits auf S. 823 erwähnte sehr empfindliche Kolbenmanometer. Es ist mit einem Ringrohr ausgerüstet, dessen Widerstand in dem einen Zweig einer Wheatstone-Brücke liegt. In dem anderen Brückenweig befindet sich der zur Rückführung benötigte Ringrohrwiderstand des zur Messung der Brennstoffmenge (Antriebsgeschwindigkeit des Fördermittels) verwendeten Tachometers. Die Anordnung ist so getroffen, daß bei richtigem Verhältnis der Brennstoffzufuhr zur Dampferzeugung Brückengleichgewicht vorliegt. Jede Belastungsänderung ruft eine Änderung des Widerstandsverhältnisses und damit einen Ausschlag bei dem Brückenrelais in der Brückendiagonale hervor. In Schritten wird daraufhin die Brennstoffzufuhr entsprechend verändert, bis die Durchführung einer ausreichenden Verstellung von der Rückführung durch Wiederherstellung der Stromfreiheit des Brückenrelais zurückgemeldet wird.

Um auch bei besonders großen und schnellen Schwankungen des Energiebedarfs einen ruhigen Betrieb gewährleisten zu können, wird zum Ausgleich der Kesselträgheit noch eine zusätzliche elastische Rückführung verwendet.

Die Aufgabe dieser Rückführung ist die Verhinderung erneuter Impulse, bevor nicht die Auswirkung der letzten Verstellung restlos erfolgt ist. Zu diesem Zwecke ist in der Brennstoffbrücke ein dritter veränderlicher Widerstand angeordnet, der mit dem Steuerorgan der Brennstoffzubringervorrichtung gekuppelt ist (s. Abb. 197). Dieser mit dem Steuerorgan gleichzeitig verstellte Widerstand wird durch eine Rückzugsfeder immer wieder in seine feste Nullage zurückgebracht. Durch eine besondere Dämpfung wird dabei erreicht, daß die Rücklaufzeit um so größer ist, je größer die Steuergeschwindigkeit ist. Bei kleinen Verstellungen beeinflußt der schnell zurückgedrehte Widerstand die Brücke kaum, bei größeren Ablenkungen ist jedoch die Widerstandsänderung beträchtlich. Sie verschwindet aber allmählich wieder, während sich der Brennstoffringrohrwiderstand (b_1) auf seinen neuen Wert einstellt. Hat sich in der gleichen Zeit die Brennstoffregelung völlig ausgewirkt und als ausreichend erwiesen, so ist Brückengleichgewicht vorhanden. Die dem Kessel zugeführte Kohlenstaubmenge ist dann dem Bedarf angepaßt.

b) Selbsttätige Gewichtsregelung.

Ist die mit der Volumenregelung erreichbare Genauigkeit nicht ausreichend, so wird die selbsttätige Gewichtsregelung zur Durchführung einer einwandfreien Zuteilung herangezogen.

Hierzu lassen sich z. B. die automatischen Ausschüttwaagen verwenden. Im einfachsten Falle wird diesen Waagen ständig Material in genügender Menge zur Verfügung gestellt und die erforderliche periodische Ausschüttung herbeigeführt mittels eines in feinen Stufen verstellbaren mechanischen Schaltwerkes (z. B. angetrieben von der Transmission) oder eines besondern elektrischen Zeitgebers.

Die elektrische Auslösung ist immer dann vorteilhaft, wenn es sich um die Kuppelung mehrerer Waagen handelt, die wegen örtlicher Verhältnisse oder Betriebsbedingungen eine räumlich getrennte Aufstellung

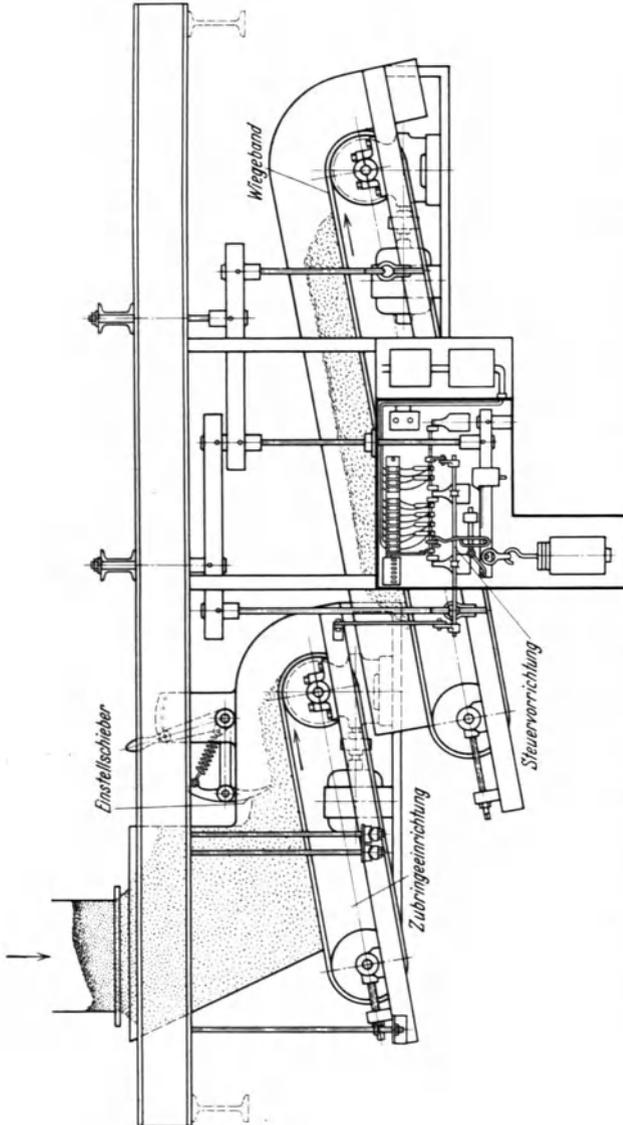


Abb. 220. Automatische Dosierwaage (Richardson Scale Company, Clifton, New Jersey, USA.).

erfahren haben. Zur Betätigung der Auslösevorrichtung werden Elektromagnete verwendet. Zur Sicherung der Materialzuteilung kann dabei die Einrichtung getroffen werden, daß eine vom Zeitgeber geforderte

Erregung der Magnete nur nach der vorschriftsmäßigen Wägung einer jeden Komponente möglich ist.

Die Belastung der Waagen entspricht hierbei natürlich dem erforderlichen Gewichtsverhältnis.

Die diskontinuierliche Materialzuteilung in großen Einzelmengen ist nicht für jeden angeschlossenen Arbeitsgang zuträglich. Durch Zwischenschaltung von besonderen Verteilern kann wohl das abgeworfene Wägegut in einem einigermaßen gleichmäßigen Strom weitergeleitet werden.

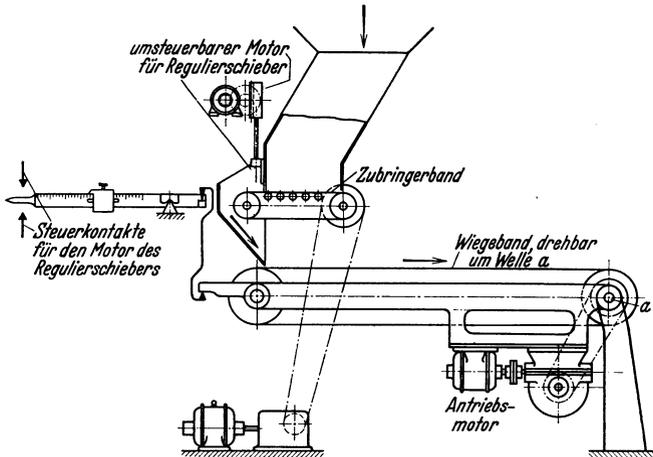


Abb. 221. Schema der automatischen Dosierwaage Losenhausenwerk, Düsseldorf-Grafenberg.

Dieses Verfahren wird aber durch die zusätzliche volumetrische Regelung umständlich und besitzt nur bei gut rieselnden Stoffen eine gewisse Zuverlässigkeit.

Für fließende Fertigung sind die automatischen Dosierwaagen, die das Material in kontinuierlichem Strom und gleicher Menge pro Zeiteinheit der Verarbeitung zuführen, weit besser geeignet.

Die Regeleinrichtungen sind hierbei im Prinzip die gleichen, wie bei der kontinuierlichen volumetrischen Zuteilung, nur führt hier das von der physikalischen Beschaffenheit des Fördergutes unabhängige Gewicht über die zur Steuerung verwendete Wägeeinrichtung eine notwendig werdende Änderung der Fördermenge herbei.

Bei der vollautomatischen Waage nach Abb. 220 (Richardson Scale Company, Clifton, New Jersey, USA.) wird das Material dem Vorratsbunker mit Hilfe eines Zubringerbandes entnommen. Über ein ständig mit konstanter Geschwindigkeit laufendes endloses Wiegeband wird es der angeschlossenen Apparatur mit nur kurzen Unterbrechungen zugeleitet. Das Wiegeband ist an einem Hebelsystem mit Laufgewichtseinrichtung aufgehängt. Bei Belastung dieses Bandes mit einer der Einstellung entsprechenden Menge wird durch die Gewichtseinrichtung die Stillsetzung des Zubringerbandes veranlaßt. Diese

Abstellung dauert solange, bis die eintretende Entlastung des Wiegebandes zur selbsttätigen erneuten Einschaltung der Zubringervorrichtung führt.

Eine stetige Materialzuführung gestattet die mit Abb. 221 (Losenhausenwerk A. G., Düsseldorf-Grafenberg) im Schema dargestellte

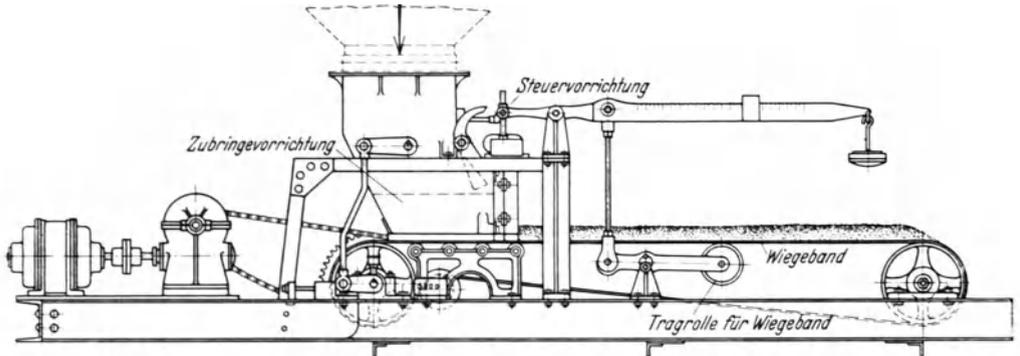


Abb. 222. Schaffer-Poidometer (Schaffer Poidometer Company, Pittsburgh, Pa, USA.).

Wägeeinrichtung [s. E. Franke: Neuartige Dosierwaage. Chem. Fabrik 5, 528 (1929)]. Auch hier dient das endlose Wiegeband gleichzeitig als Transportvorrichtung für das aus dem Bunker durch ein besonderes Band entnommene Material. Die Bandgeschwindigkeiten sind konstant. Bei Abweichungen von dem am Laufgewichtsbalken einstellbaren Sollzustand erfolgt eine durch den Waagebalken beeinflusste Regelung des Materialzufflusses bis zur Erreichung der verlangten Gleichgewichtslage. Der Regelteil ist ein Schieber an dem Bunkerauslauf; er wird durch einen umsteuerbaren Motor betätigt, welcher über elektrische Kontakte vom Waagebalken aus gesteuert wird. Neuerdings wird an Stelle dieser elektrischen Steuerung auch ein mechanisch wirkender Regler zur Schieberbetätigung verwendet.

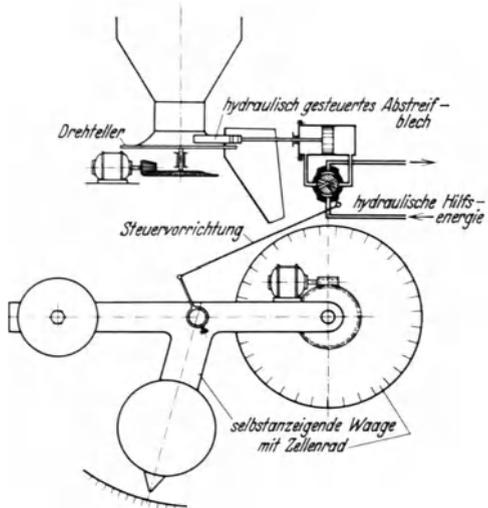


Abb. 223. Dosiereinrichtung der Firma Polysius A. G., Dessau.

Auch bei der mit Abb. 222 wiedergegebenen automatischen Wägeeinrichtung [Schaffer Poidometer Company, Pittsburgh, Pa, USA., zu beziehen durch die Firma Claudius Peters, Hamburg; s. Meßtechn. 7, 34 (1931)] wird eine Abweichung von der Gleichgewichts-

lage durch entsprechende Änderung der Schichthöhe ausgeglichen. Bei dem vorgeschriebenen Fördergewicht steht der mit einem Laufgewicht versehene Waagebalken, der durch ein Gestänge mit einer das Wiegeband tragenden Rolle und mit einem Schieber in der Auslauföffnung des Zuteilgehäuses verbunden ist, waagrecht. Bei Belastungsänderung wird durch das Heben oder Senken des Waagebalkens der mit diesem gekuppelte Schieber betätigt und dadurch die Förderung auf den eingestellten Sollwert gebracht.

Die Dosiereinrichtung nach dem Schema der Abb. 223 (s. französische Patentschrift Nr. 714754. POLVSIUS A. G., Dessau) verwendet zur Kontrolle des vorgeschriebenen

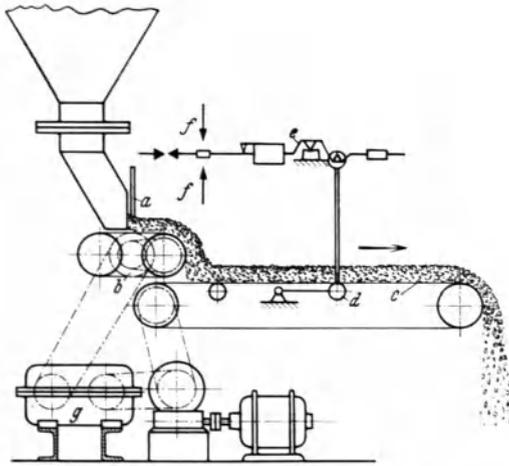


Abb. 224. Schema der automatischen Dosierwaage Bauart Schenck, Darmstadt. *a* Einstellschieber, *b* Zubringerband, *c* Wiegeband, *d* Tragrolle des Wiegebandes, *e* Laufgewichtshebel, *f* Steuerkontakt für Zubringerband, *g* stufenlos regelbares Getriebe.

Fördergewichtes eine Neigungswaage nach Art der Balan-Waage (s. Abb. 217). Die Zuführung des Dosiergutes zur Wägeeinrichtung erfolgt mit Drehteller. Änderungen in der Materialzufuhr werden durch Verstellung des Abstreifbleches selbsttätig behoben. Die Steuerung wird dabei in Abhängigkeit vom Ausschlag der selbstanzeigenden Waage durchgeführt unter Verwendung einer hydraulischen oder pneumatischen Hilfskraft. Je nach der Stellung des mit der Waage ständig in Verbindung stehenden Steuerorgans für

die zusätzliche Hilfskraft gelangt diese zur Einwirkung auf den Arbeitskolben der Verstärkerzelle und verstellt ihrerseits das Abstreifblech. Die Regelungen erfolgen zwangsläufig bis zur Erreichung der Gleichgewichtslage.

Im Gegensatz zu diesen beiden Wägeeinrichtungen, bei denen die Grenzwertregelung durch entsprechende Veränderung der Schichthöhe durchgeführt wird, führt die in Abb. 224 schematisch dargestellte automatische Dosierwaage [C. Schenck, Eisengießerei und Maschinenfabrik Darmstadt, G. m. b. H., s. K. Diehl: Dosierwaage zur stetigen Förderung gleichmäßiger Mengen. Ztschr. Ver. Dtsch. Ing. 76, 1108 (1932)] eine notwendig werdende Materialregelung aus durch Änderung der Geschwindigkeit des Zubringerbandes. Der Antrieb des als Wiegeband ausgebildeten kurzen endlosen Förderbandes erfolgt mit konstanter Geschwindigkeit durch einen Motor, der gleichzeitig über ein stufenlos regelbares Kettengetriebe auch das Zubringerband bewegt. Das Fördergewicht ist am Laufgewichtsbalken einstellbar. Weicht es von diesem

Beträge ab, so löst der Waagebalken einen Impuls aus, der mit Hilfe einer Drehzahlstellvorrichtung das Regelgetriebe in passend einstellbaren Schritten verstellt. Dadurch wird die Geschwindigkeit des Zubringerbandes langsam vergrößert oder verkleinert, bis die Gleichgewichtslage wieder erreicht ist. Die neuere Ausführung der selbsttätigen Dosierwaage Bauart Schenck besitzt nur ein Transportband. Auch hier wird durch elektrische Steuerung die Bandbelastung den Bedingungen eines konstanten Fördergewichtes angepaßt.

Der besondere Vorteil der automatischen Dosierwaagen liegt nicht allein in der ununterbrochenen, zuverlässigen und schonenden Zuteilung von Materialien ohne besondere Bedienung, sondern auch darin, daß sie in Gruppenanordnung bei Herstellung von Gemengen die Mischapparatur infolge der vorhandenen stetigen Vormischung bedeutend vereinfachen.

Die von den angeführten Wägeeinrichtungen vorgenommene Regelung ist eine Grenzwertregelung, da sie das Fördergewicht auf den von Hand eingestellten festen Wert regeln. Die Durchführung einer Regelung nach einem bestimmten Programm (Änderung des Fördergewichtes nach der Zeit) oder in Abhängigkeit von einer oder auch mehreren beliebigen Größen, läßt sich durch Fernregelung des Laufgewichtes durchführen. Zu diesem Zwecke kann z. B. die Dosierwaage mit einer besonderen elektrischen Antriebsvorrichtung zur Betätigung der Laufgewichtsspindel ausgerüstet werden. Der hierzu benötigte kleine umsteuerbare Motor befindet sich am Waagebalken und verstellt das Laufgewicht entsprechend der ihm durch besondere Impulsgeber erteilten Befehle. Der Impulsgeber kann sich in beliebiger Entfernung von der Dosierwaage befinden.

Namenverzeichnis.

- Abel 160.
 Acheson 544.
 Ackermann, K. 672.
 AEG (Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft) 383, 447, 589, 656, 804, 821, 822, 839.
 Afa 437.
 Aktiengesellschaft für Kohlensäure-Industrie 801.
 Albrecht 698.
 Aller 331.
 Allgemeine Vergasungsges. m. b. H. 816.
 Allner 310, 311.
 Althoff, F. W. 183.
 Altwicker 528.
 Aluminiumindustrie A. G. 463.
 Aluminium-Taschenbuch 1933, 514.
 Amagat 633, 634, 635, 636.
 Anderson, E. 746.
 Angewandter, R. 789.
 Angström, K. 699.
 Apparatbau Paul de Bruyn G. m. b. H. 642.
 Arcaregler A. G. 591, 814, 815, 816.
 Arcawerke G. m. b. H. 839.
 Archbutt 509.
 Archimedes 29.
 Armaturenfabrik Schell u. Wilkendorf 632.
 Arrhenius, S. 144, 150, 152.
 Askania-Werke A. G., 619, 620, 627, 643, 644, 652, 654, 755, 789, 794, 795, 814, 815, 818, 819, 820, 821, 822, 823, 827, 839.
 Aten, A. H. W. 184.
 Auerbach, F. 727, 731, 787.
 Aufhäuser 331.
 Ausschuß für wirtschaftliche Fertigung 484.
 Avogadro 83.
 Badische Anilin- und Soda-fabrik (B.A.S.F.) 180, 575, 756.
 Bäckström 290.
 Bahlecke, F. 24, 44.
 Bailey 817, 818, 821.
 Bakhuis Roozeboom 184, 185.
 Bancroft, W. D. 184.
 Baralke 480.
 Barkhausen 51.
 — H. 591.
 Barth, K. 297, 304, 309, 735.
 Bauer 513.
 — V. 836.
 Baur, F. 71, 78.
 Baurichter, E. F. 816.
 Bausch 305.
 Becker 477.
 — R. 71.
 Behr, L. 661.
 Behrens, W. U. 71.
 Bemmann, R. 287, 288, 297.
 Bengough 513.
 Benrath 184.
 Benson 201.
 Berg 480.
 Bergmann, L. 626.
 Berl, E. 14, 15, 17, 18, 23, 38, 160, 166, 167, 168, 175, 179, 182, 183, 249, 258, 261, 282, 286, 287, 288, 293, 297, 302, 304, 305, 309, 331, 335, 336, 337, 481, 535, 538, 672, 685, 718, 726.
 Berlin-Karlsruher-Industrie-Werke, A. G. 609.
 Berlowitz, M. 622, 624.
 Bermbach 430.
 Bernoulli 611, 755, 759.
 Berthelot, M. 126, 131, 138.
 Berzelius 166.
 Betts 546.
 Biermanns, J. 368.
 Bizer, A. A. G. 694.
 Blaeß, V. 50.
 Blanckewerke 591.
 Blasdale 184.
 Blasig, K. 814.
 Blasius 748.
 — H. 790.
 Bleibtreu 330.
 Block, W. 731, 741.
 Bloomfield, J. G. 671.
 Blum 320, 321.
 Bodenstein 158, 160, 182, 289, 290, 297.
 Böhm, O. 640.
 Böhme, M. 671, 672.
 Boeke, H. E. 184.
 Boeseken 5, 8, 9.
 Bollée 29.
 Boltzmann, Stefan 111, 150, 159, 289, 446, 603.
 Bone 292, 293, 313, 320, 321.
 Bonhoeffer 158, 289, 297, 298.
 Bopp u. Reuther G. m. b. H. 579, 587, 739, 750, 758, 768.
 Borbeck 523.
 Borda 713.
 Born 105, 106.
 Bornemann 586.
 Bosch, C. 177, 180, 567, 668, 775, 805.
 Bošnyaković, Fr. 725.
 Bosse 444.
 Boßhard 463.
 Bothen, B. v. 777.
 Boudouard 274, 275.
 Bourdon 629, 631.
 Bourquet 665.
 Bowser u. Co. S. F. 738.
 Boyle 83, 648.
 Brand 575.
 — J. 734, 741.
 Brandl, H. 742.
 Bragg 103.
 Brasch, H. D. 669.
 Brauer 181, 793.
 — E. 687.
 — F. 781.
 Bredig 178.
 Bridgman 192, 197.
 Bridman 636.
 Briggs 5.
 Brinell 474, 511.
 Bronn 315.
 Brown, Boveri & Co. 420, 606, 645.
 Brückner 319.
 Brüggemann 661.
 Brugger 582, 585, 603.
 Bruni, G. 184.
 Brunsviga 29.
 Bruyn, Paul de 656, 658.
 Buchholz 377.
 Buchmann 477.
 Büchner, E. H. 184.
 Büchting, M. U. 823, 826.

- Bültemann 346.
 Bundschuh 586.
 Bunsen 656, 657.
 Bunte 293, 313.
 Burgess Parr Co. 665.
- Callendar 336.
 Cambridge Instrument
 Company, Ltd. 598, 661,
 662, 670.
 Cammerer, J. S. 449.
 Campbell Co. 810.
 Cannizaro 297.
 Carnot 117, 118, 768.
 Caro 181.
 Carrick 814, 821.
 Casale 180.
 Charles 83.
 — Engelhardt 672.
 Charlier, C. V. L. 71.
 Charpy 472, 504.
 Chezy 791.
 Christiansens 290.
 Chwolsen, O. D. 698.
 Claaßen, E. 785.
 Clapeyron 123, 132, 133,
 191, 192.
 Claude 180.
 Claudius, Peters 843.
 Clausius 117, 123, 132, 133,
 191, 192.
 Clibbens, D. A. 184.
 Clifford, J. 725.
 Closterhalphen 794, 796.
 Cohen, E. 166.
 Conette 788.
 Conradi 55.
 Contzen, H. 654.
 Coslett 548.
 Coulomb 342, 346, 363, 439.
 Courant, R. 45.
 Coward 316.
 Crooke 648.
- Daeves, K. 71.
 Dahmen 476.
 Dalton 83, 86, 723, 724.
 D'Ans 184.
 Darwin 101, 107.
 Dary 166, 320, 321.
 Deacon 166.
 Debye 105, 106, 107, 130,
 134.
 Delius 427.
 Dentler u. Maass G.m.b.H.
 683.
 Deutawerke 586.
 Deutsch 441, 442.
- Deutsche-Edison-Akku-
 mulatoren-Company =
 DEAC 436, 437.
 Deutsche Evaporator A.G.
 593.
 Deutsche Gesellschaft für
 Metallkunde 483.
 Deutsche Rotawerke
 G.m.b.H. 785, 801, 818.
 Deutscher Ausschuß für
 Eisenbeton 542.
 Deutscher Dampfkessel-
 ausschuß 502, 503.
 Deutscher Kalender für
 Elektrotechniker 352,
 355, 362, 365.
 Deutscher Normen-
 ausschuß 468, 492, 493,
 517, 519.
 Deutscher Verband für die
 Materialprüfung 336.
 Diehl, K. 687, 695, 700, 844.
 Dillmann, O. 783.
 DIN 1605 468.
 — 1629 503.
 — 1691 511.
 — 1705 522.
 — 1709 518, 519.
 — 1774 520.
 — 1775 520.
 — 1776 520.
 — 1779 523.
 Dinse-Maschinenbau A.G.
 833.
 Dixon 292, 293, 296.
 d'Ocagne, M. 18.
 Döbereiner 166, 320.
 Dohse 168.
 Dolch, M. 683, 832.
 Dolezalek 431.
 Dopp, Gebr. A.G. 694.
 Dräger-Geräte G.m.b.H.
 671.
 Dreyer, Rosenkranz und
 Droop 630, 827, 828.
 Drewitz, C. 708.
 Drosch 628.
 Dücker, E. 823.
 Duffek 484.
 Duftschmid, F. 357.
 Dulong 104, 106, 261, 263.
 Dummer, E. 165.
- Earle 433.
 Eashmann 272.
 Eckardt, I. C. A.G. 578,
 587, 591, 606, 609, 632,
 638, 654, 655, 663, 669,
 736, 737, 815.
 Eckert 302.
- Eckert, G. 513.
 Edison 437.
 Eggers, G. 750, 793, 829,
 830.
 Eggert 12.
 — J. 87, 145.
 Ehrenberg 107.
 Einstein 105, 106, 165, 289.
 Eldrige 89.
 Elster & Co. 669.
 Emde 90, 345, 346.
 Enders 476, 477, 507.
 Engel 354.
 — F. 789.
 Engler 299, 726.
 Eötvös 98.
 Erftwerke A.G. 463.
 Erk, S. 788.
 Ernst, A. 573, 576, 587,
 597, 598, 653, 659, 661,
 664, 667, 671, 672.
 Ernst, P. W. 734.
 Escher Wyss 832.
 Esterer 782, 783.
 — B. 745, 747, 749.
 Eta-Werkstätten 642, 816.
 Eucken 297.
 — A. 87, 92, 141, 611,
 632, 640, 648, 687, 769,
 770, 788, 789, 798, 805,
 811, 830.
 Euler, H. 765, 772, 773.
 Evershed und Vignoles
 672.
- Faber, O. M. 618, 619, 624,
 625.
 Fajans 264.
 Faraday 342, 343, 345, 359,
 363.
 Fauser 180.
 Fearweather 665.
 Fedotieff 256, 257.
 Fehér 626.
 Felgenträger, W. 687, 699,
 702, 712.
 Ferraris 587.
 Feuerung und Apparate-
 bau G.m.b.H. 816.
 Feußner, O. 602.
 Fick, H. 617.
 Fiesel, H. 443.
 Findlay, A. 184.
 Fischer, F. 175, 181, 282,
 285, 286, 293, 304, 443.
 Fisher, R. A. 71.
 Fizeau 648.
 F.K.F. Apparatebau für
 Abfüll- und Paketier-
 maschinen 683.

- Flender, A. Fr. & Co. 832.
 Föppl 477.
 Förster 430.
 Forchheimer, Ph. 782, 787, 791.
 Forrest 562.
 Fourier 363.
 Fraenkel, A. 367, 368.
 Francis 280.
 Frank 181.
 Frankenberger, W. 168, 172, 180.
 Frerichs 633.
 Freundlich 5, 8, 9.
 Frevert, H. W. 671.
 Friemann und Wolf 437.
 Frohlich 176.
 Froning, M. L. F. 740.
 Fürstl. Hohenzollernsche Hüttenverwaltung Lauchatal 524.
 Fuess, R. 576, 579, 749.
 Fuß 515.

 Gangadharan 749.
 Garbotz, G. 833.
 Gas Producer and Engineering Corp. 665.
 Gauß 74, 75, 76, 77, 78, 355, 714.
 Gay-Lussac 83.
 Geffcken, H. 591.
 Gehre 643.
 Geibel 531.
 Geiger, H. 264, 611, 612, 614, 616, 633, 634, 635, 636, 646, 647, 698, 716, 717, 731, 787.
 Gerdien 587.
 Gesellschaft für Meßtechnik 670, 672, 674.
 Gesellschaft für selbsttätige Temperaturregelung 591.
 Geyer 672.
 Geyger, W. 674, 770.
 Gibbs 120, 124, 127, 129, 133, 139, 185, 535.
 — J. W. 184.
 Giese, H. G. 767.
 Giesecke, P. 680.
 Ginsberg, H. 513.
 Glamann, W. 645.
 Glaser 430.
 Glöckner 377, 395, 401.
 Gmelin P. 576, 581, 587, 594, 657, 661, 665, 668, 669, 670, 672, 673, 675, 776.
 Goebel 543.
 Goerens 252, 482.
 Goetz, A. 647, 648.
 Goldschmidt 159.
 Gollnow 483.
 Goode, K. A., 672.
 Gordon, K. 670.
 Gough 477.
 Gradstein, S. 44.
 Graf 477, 542, 543.
 Gramberg, A. 575, 612, 616, 618, 622, 625, 636, 637, 640, 642, 731, 734, 740, 745, 748, 769, 770, 775.
 Gramisch 420, 421.
 Grammel 10.
 Grashof, H. 614.
 — F. 687.
 Grebel 329.
 Grefe, L. 785, 786.
 Griffiths 549, 662.
 Grimm 264.
 Gröber, H. 445.
 Grob, H. 645.
 Groß, K. 770.
 Grube 251.
 Grün 300.
 Grünzweig und Hartmann 449.
 Grüss, H. 587, 662, 778.
 Grundherr, F. 580.
 — F. v 587, 778.
 Grunwald, A. 740.
 Güntherschulze 347.
 Güntler 214.
 Gütschow, W. 18.
 Guillet 524.
 Guldberg 98.
 Gumlich 356.
 Guthmann 444.

 Haas, A. 53, 64.
 Haber, F. 179, 180, 276, 289, 290, 298, 308, 313, 567, 668.
 Habild, O. 838.
 Hagan 821.
 Hagenbach 788.
 Hahn, J. 654.
 — O. 276.
 Hailer, R. 783.
 Hallmann 515.
 Hallwachs 626.
 — und Langen 641.
 Hamann 29.
 Hamann-Manns 29.
 Hanffstengel, G. v. 682.
 Hannemann, K. 810.
 Hansen 111.
 — H. 730.
 — M. 767.
 Happach, V. 30, 70.
 Harbon, E. v. 51.
 Harms, F. 619, 624, 633, 635, 731, 733, 749, 787.
 Harries 299.
 Hartek 298.
 Hartmann 309.
 — und Braun, A.G. 447, 576, 577, 578, 587, 589, 591, 598, 599, 603, 604, 607, 608, 626, 640, 642, 661, 662, 672, 776.
 Hartung 656.
 Hase, R. 598.
 Hatfield 662.
 Hatschek, E. 726.
 Hausen, H. 721.
 Haveg 43, 545.
 Heilan, G.m.b.H. 673.
 Heinig, A. 815.
 Heinrich, R. 438, 443.
 Heinrichs, F. 815.
 Heinze, K. 779.
 Heise 304, 336.
 Helmholtz 120f., 124, 129, 133, 138, 139.
 Hempel 669.
 Henderson, L. M. 649.
 Hencky 605.
 Henning 84.
 — F. 597, 617, 679.
 Henry 183, 298, 723.
 Hense, W. 648.
 Heraeus, W. C., Vakuum-schmelze 357, 447, 448, 528, 588, 589, 598, 606, 663.
 Herberg 270.
 Herbert, W. 14, 15, 17, 18, 23, 38, 672.
 Herzfeld 152.
 Heß 264, 296, 316.
 Hesser, Fr. A.G. 683.
 Heusler 356, 524, 525.
 Hevesy 107.
 Heydekampf 477.
 Heyn 482.
 Hilburg, C. 573, 611, 675, 716, 795.
 Hildenbrand 604.
 Hilditsch 172.
 Himmler, C. 823.
 Hirschelwood 168.
 Hirsch 538.
 Hirschfeld 539.
 Hoecken, K. 51.
 Hofer, K. 670.

- van t' Hoff 136, 137, 142, 184, 208, 239, 246, 250, 253, 288.
 Hofmann 282, 811.
 Hofsaß, H. 788.
 Hohorst 525.
 Holborn 84.
 — H. 604, 617, 633, 635, 636, 679.
 Holdt, H. 451, 477, 507, 543.
 Holm, O. 734.
 Holven, A. L. 672.
 Holzhauer 478.
 Hooke 454, 629, 698.
 Horn, Th. 586.
 Hort, W. 727, 731, 787.
 Hoß 442.
 Houben 531.
 Huber, J. 731.
 Hübner und Mayer 813, 829.
 Hütte 12, 31, 356, 370, 403, 435, 698, 718, 731, 783, 787.
 Hull 424.
 Hunter, L. und E. 725.
 Hydro-Apparate-Bauanstalt 627, 638, 652, 654, 655, 726, 755, 818.
 I. G. Farbenindustrie A.G. 175, 177, 179, 181, 184, 277, 285, 286, 337, 357, 515, 549, 576, 587, 598, 601, 625, 654, 661, 669, 670, 672, 756, 773, 775, 785, 811, 829, 830.
 Ilgner 390.
 Imhof, A. 51.
 International Federation of National Standardizing Associations 756.
 Jäger 587.
 Jänecke, E. 17, 184, 185, 214, 236, 239, 246, 253.
 Jahn 319.
 Jakob, M. 611, 632, 640, 648, 687, 769, 770, 787, 788, 789, 791, 798, 805, 811, 830.
 Jancke 90.
 Jansen 382.
 Jaroschek, K. 730, 780.
 Jellinek 180.
 Jentzsch 302, 303.
 Joffé Polangi 107.
 Jordan, H. 731, 773.
 Josephi, E. 176.
 Jost 180.
 Joule 109, 352, 364.
 Jüngling 175, 286.
 Jungner 436.
 Junkers 261, 740.
 Junkers Calorimeterbau G. m. b. H. 665.
 Junkers Thermotechnik G. m. b. H. 655, 656, 816, 820.
 Kälberer 168.
 Kailan 159, 160.
 Kaiser-Wilhelm-Institut für Eisenforschung 476, 477, 496, 507.
 Karmann 106.
 Karsten 214.
 Katz, J. H. 671.
 Kaufmann, P. 821, 832.
 Kayser, H. G. 678.
 Kegler, E. 737.
 Kemath, G. 581, 586, 587, 600, 602.
 Kelvin 84, 610.
 Kempf, R. 18.
 Keramchemie 549.
 Kienback 606.
 Kienzle, O. 675, 677, 680, 681, 831.
 Kilian, E. F. 683.
 Kipp und Zonen 673.
 Kirchhoff 115, 124, 134, 353, 365.
 Kirschmer, O. 745, 747, 749, 782, 783.
 Klanner, R. 813.
 Klein, G. 630.
 Klenke 183.
 Klinkhoff 640.
 Klinkhoff-Apparatebau-Ges. 671, 672.
 Klobbie 212.
 Kluge, J. 646, 647.
 Kniehahn 808.
 — W. 815, 816.
 Knietsch 182, 217.
 Knoblauch 111, 605.
 — Osc. 721.
 Koch und Sterzel 382.
 Kögel 549.
 Kölner Akkumulatorenwerke (KAW) 437.
 König, H. 29, 30, 65, 71, 81.
 Körber 476.
 Kohlenscheidungs-G. m. b. H. 669.
 Kohlrausch, F. 615, 617, 702, 712.
 — Fr. 646.
 Kohnstamm 185.
 Kommers 477.
 Kordatzki, W. 672.
 Krämer 429.
 Kraiss, Paul 549.
 Kramers 290.
 Krause, A. 747.
 Kremann 217.
 — R. 185.
 Kretschmar 430, 433.
 Kretschmer, Fr. 652, 773.
 Kreuzer, G. 641, 775.
 Krey 621.
 Kroeber & Sohn G.m.b.H., 632, 643.
 Krönert 581.
 — J. 823, 826.
 Krukowsky, W. v. 579.
 Krupp 302, 447, 448, 494, 505, 506, 509, 524, 547, 600.
 Kubierschky 256.
 Kübler, J. 381.
 Kühlewein 359.
 Kuenen, J. P. 185.
 Küster 217.
 Kuhlmann 181.
 Kumbruch, H. 754.
 Kurnakow 214.
 Kuß, E. 657, 699.
 Kußmann 359.
 Laar, van 185, 192, 208, 214.
 Lagally, M. 53, 64.
 Lambert 51.
 Lambrecht A.G. 17, 661.
 Lampmann 592.
 Landolt-Börnstein-Roth-Scheel 616, 617, 719.
 Langen 626.
 Langmuir 152, 354.
 Lantal 515.
 Laplace 74.
 Lappe 180.
 — F. 756.
 László 474.
 Lautenschläger, F. und M. 672.
 Lawaczek, F. 687.
 Le Blanc 431.
 Leblanc 538.

- Le Chatelier 274, 286, 292, 293.
 Leeds und Northrup Co. 577, 601, 608, 661, 672.
 Lechase 44.
 Lehmann, J. F. 670.
 Lehrer, E. 656, 657, 670, 699.
 Leibniz 29.
 Lenz 29.
 Leod Mc 648.
 Leonard 390, 428.
 Levy, F. 628.
 — Fr. 622.
 Lewis 271.
 Leybold, E. 672.
 — P. 18.
 Librawerke m.b.H. 836.
 Liebenow 431.
 Liesche 15.
 — O. 18, 23, 29, 30, 70.
 Linckh, H. F. 645, 646.
 Lindemann 105, 106.
 Lindow, M. 65.
 Litinsky, L. 612, 622, 624, 628, 656, 731, 736, 746, 748, 751, 754, 770.
 Litterscheid 313.
 Liwshitz 371, 377, 395, 400, 401, 402, 403, 408, 412.
 Löbl 429.
 Löblein, F. 535, 538.
 Löwenherz 239.
 Löwenstein, R. 749.
 Lohmann, H. 580, 587, 770, 774, 777, 778.
 Lorenz, H. 631.
 Losenhausenwerk 842, 843.
 Luckey 24.
 — P. 18, 44.
 Lunge, G. 14, 15, 160, 182, 261, 302, 335, 481, 685, 718, 726.
 Lurgi-Apparatebau G. m. b. H. 441, 443.
 Lux G. m. b. H. 655.

 Maaß 483.
 Mach 252.
 Maihak A.G. 637.
 Mallard 292, 293.
 Marc, R. 185.
 Mariotte 83, 648.
 Mark 168.
 — H. 81, 166.
 Martens 476, 482, 645.
 — A. 633.

 Marti 420, 421.
 Martin, E. 29.
 Marx 417.
 Masing 107.
 Materialprüfungsanstalt Darmstadt 478, 496.
 Mathesius 12.
 Matthesius 276.
 Matuschek 546.
 Maul, A. 680.
 Maxwell 89, 90, 106, 355, 363.
 Mayer 296, 658.
 — J. Robert 109.
 Mehlig, H. 722.
 Mehmke, R. 23.
 Meinecke 750.
 Meißner, W. 635.
 Méker 319.
 Mendel 76.
 Mendeljew 713.
 Menking 528.
 Menzel 269, 272, 274, 275.
 Merkel, Fr. 725.
 Meßkin 359.
 Meyer, L. 297.
 Meyer-Delius 421, 427.
 Meyerhoffer 239, 257.
 Michels 636.
 Midgley 179.
 Mises, R. v. 71.
 Mislowitzer, E. 672.
 Mittasch, A. 166, 167, 177, 180, 661, 664.
 Möbius 17.
 Moeller, H. 823.
 Möller, J. 585, 626.
 Möllinger, A. 579.
 Mollier, R. 721, 723, 724.
 Mono G. m. b. H. 669.
 Monroe 29.
 Monypenny 507.
 Moore 477.
 Morell 586.
 Moureu 336.
 Müller, Fritz 442.
 — H. 773.
 — K. 674.
 — M. 736.
 Mugler, J. 815.

 Naumann 632.
 Neper 5.
 Nernst, W. 45, 87, 105, 123, 125, 127, 131, 132, 134, 135, 138, 139, 141, 179, 180, 271, 272, 276, 289, 698.
 Neubert, P. 576.

 Neue Apparatebau-Gesellschaft 658.
 Neufeld und Kuhnke 587.
 Neumann 340, 341, 590, 624.
 — B. 174, 273.
 — G. 745, 796, 805, 806.
 Nicholson 699.
 Niebuhr, H. 643.
 Niethammer, F. 821.
 Nikuradse, J. 748, 787, 790.
 Nitsche, A. 720.
 Norton 726.
 Nußelt, W. 317, 780.

 Odhner 29.
 Olsson 160.
 Opitz 645.
 Opl 183.
 Orthmann, W. 345.
 Ostwald 297.
 — Wi. 181, 185, 192.
 Ott 55.
 — L. A. 747.
 Over, E. 624.

 Padelt, E. 686, 708.
 Packfong 527.
 Paneth 298.
 Panse, H. 745.
 Paschkis, P. 447, 449.
 Passauer 317.
 Piescher, O. 735.
 Peter 606.
 Peters 282.
 — Cl. 683.
 Petersen 183, 370.
 — W. 429.
 Petit 104, 106.
 Pfeiderer, C. 796.
 Pfeiffer, Gebr. 831.
 Pflaum, W. 721.
 Pflizer, P. M. 587.
 Physikalisch-Technische Reichsanstalt 597, 653, 679, 695, 707, 712, 738.
 Pichler, M. 796.
 Pietsch 176.
 Pintsch 738.
 — J. A.G. 793.
 Pirani 51, 52.
 — M. 18.
 Piwowarsky 512.
 Planck 105, 117, 118.
 Plank, R. 717, 727.
 Planté 434.
 Plaut, H. 71.

- Pohl 182, 503.
 Poiseuille 726, 788, 795.
 Poisson 760.
 Polanyi 158.
 Poleni 782.
 Pollitzer 265.
 Polya, G. 71.
 Polysius A.G. 836, 843, 844.
 Pomp 476, 477, 507.
 Poncelet 818.
 Praetorius 330, 575.
 Prandtl, L. 612, 619, 726, 746, 748, 749, 754, 757, 787, 788, 790.
 Prebler, O. 591.
 Presser, H. 832.
 Preuner 146.
 Priestley 146.
 Pyrowerk Dr. Rudolf Hase 577.
- Rabald 483, 541, 549.
 Rachel 425, 426.
 Raisch 111.
 — E. 721.
 Rammler 328.
 Randal 271.
 Ranke 661.
 — F. 576.
 Raoult 725.
 Raudnitz, M. 687, 692, 702.
 Raupp, H. 669.
 Rehbock, Th. 782, 783.
 REA 406.
 REM 392.
 Reiche, v. 444.
 Reichsausschuß für Metallschutz 462, 483.
 Reinecke 665, 667.
 Reinganum 111.
 Reinglas 525.
 Republic Flow Meters Company 641.
 Retzow 346.
 Reuling, Gebr. G. m. b. H. 801, 802, 804.
 Reynold 727, 748, 752, 755, 765, 766, 767, 771, 784, 789, 790.
 Reynolds, D. A. 671.
 Ricardo 335, 336.
 Richardson Scale Company 841, 842.
 Richter 371, 372, 394, 400.
 — H. 591, 790.
 — M. 44.
 — R. 382.
 Richter-Altschäffer, H. 71.
- Ridder, de 528.
 Riedel & Co. 668, 669.
 Riegger, H. 648.
 Riesenfeld, E. H. 788.
 Rietz, H. L. 71, 78.
 Ritter, G. 699.
 Rivett, A. C. D. 185.
 RIKW-Veröffentlichungen 44.
 Robinson, G. 65, 71, 81.
 Rockwell 474.
 Röhrig 513.
 Röntgen 103.
 Roetheli 562.
 Rohrberg, A. 24.
 Roozeboom 201, 202, 204, 208, 218, 220.
 Rosenmüller 624.
 Rosenthal und Schade 639.
 Rosin 322, 328.
 — P. 678.
 Rost, E. 683, 831, 832.
 Roth 131.
 Rothe, R. 44.
 Rothmund 212.
 — V. 185.
 Roučka 814, 818, 821.
 Rüdenberg, R. 368, 592.
 Ruhrmann 528.
 Runge, C. 18, 29, 30, 51, 60, 65, 71, 81.
 Ruppel, G. 640, 753, 773, 784, 786.
- Sabatier 172, 181.
 Sachs 526.
 Saenger, H. H. 167.
 Saint-Venant, de 798.
 Samson-Apparatebau A.G. 579, 609, 811, 812.
 Sanden, H. v. 65, 71, 80.
 Sanders, Rehdes & Co. 665.
 Sandonini 214.
 Sartoriuswerke A.G. 714.
 Sass 338, 340.
 Saue., G. 720, 722, 770.
 Saussure, H. 662.
 Sauter, A. 694.
 Schaack, M. 770, 774.
 Schaarwächter 526.
 Schack, A. 788.
 Schäfer 507.
 Schäffer und Buddenberg 632, 653, 811, 829.
 Schaffer Poidometer Co. 843.
 Scheel, K. 611, 612, 614, 616, 617, 619, 633, 634,
- 635, 636, 648, 679, 685, 698, 706, 712, 714, 716, 718.
 Scheel, W. 646, 647, 731, 787.
 Scheffer 648.
 Schell und Wilkendorf 816.
 Schenck, C. 694, 697, 716, 834, 837, 844, 845.
 Schenk, C. 478.
 Schenkel 424.
 — M. 416.
 Schering 346.
 Scheuer 515.
 Schiffer 481.
 Schiller, W. 657, 730, 799, 800.
 Schilling 657.
 Schirmer, Richter und Co. 735, 751.
 Schlecht, L. 357.
 Schlötter 546.
 Schmaltz 644.
 Schmerwitz, G. 689.
 Schmidt 605.
 — H. 662.
 — J. 18.
 Schmidts, W. 674.
 Schmiedel 183.
 Schmieden 489.
 Schnabel 320, 321.
 Schnauffer, K. 644.
 Schneider, A. 780.
 Schöller-Bleckmann 447.
 Schoenflies 45.
 Scholz 654.
 Schoop 545, 547.
 Schott 541.
 — und Gen. 580.
 Schottky 354.
 Schrauth 183, 184.
 Schreib 257.
 Schreiber, W. 18.
 Schreinemakers, F. A. H. 185, 212.
 Schrenk, O. 749.
 Schrutka, L. 24.
 Schubhardt, W. 357.
 Schüle 271, 295.
 — W. 767, 780, 798.
 Schütz, J. Fr. v. 735, 738, 743, 794.
 Schütze 592.
 Schulte 302, 327, 339, 340, — Fr. 832.
 Schultze 628.
 — H. 635, 636.
 Schumann 591.
 Schuster 168.
 Schwab 168, 176.

- Schwab, K. 720.
Schwaiger 346.
Schwarz 475.
Schweinitz, v. 290.
Schweizerischer Ingenieur-
und Architektenverein
782.
Schwerdt, H. 18, 40, 44.
Scott 381.
Seco de la Garza, R. 18.
Securit, G. m. b. H. 549.
Seeliger, R. 439.
Seiferheld 665.
Sell, H. 610.
Senlaub 592.
— und Laupmann 817.
Seufert, F. 636, 734, 741.
Seuffert 575.
Siebel 477.
Sieber, O. 777.
Siebert 602.
Siemens & Halske A. G.
447, 577, 578, 585, 586,
588, 591, 596, 598, 599,
603, 604, 605, 606, 608,
644, 661, 662, 663, 667,
670, 671, 672, 673, 675,
676, 751, 752, 785, 793,
816, 821, 822, 824, 827,
830, 840.
Siemens-Lurgi-Cottrell-
Elektrofilter G. m. b. H.
441.
Siemens-Schuckert - Werke
s. SSW 417.
Sievverts 174.
Simmance-Positive-Record
665.
Simon 623.
Singer 533, 539, 540, 541.
Slaby 52.
Smekal 101, 107, 176.
Smiths 218.
Smoot 821.
Smoot Engineering Corpo-
ration 815.
Solvay 257.
Soreau, R. 18.
Sothen, B. v. 770.
Speidel, W. 342.
Speyerer, H. 720, 722.
SSW, Siemens-Schuckert-
Werke 383, 411, 417,
438, 441, 580, 593.
Stach, 619.
— E. 781, 796.
Stampe, G. 671.
Staus, A. 731, 749, 781.
Stavenhagen 309.
Steenbeck 354.
Steiger 29.
Stein, Th. 594, 658, 796,
814, 817, 821.
Steinmann, H. 738.
Steinmüller, L. und C. 740.
Stella-Werke A. G. 549.
Stern 88, 89.
Steuding, H. 636, 645.
Steuler 549.
Stock 201, 657.
— A. 699.
Stodola, A. 796.
Stohn, R. 605.
Store 475.
Strigel 442.
Stückle, R. 779.
Stückrath 633, 634.
Sugden 98.
Suhrmann, R. 626.
Sulz, O. 779.
Svenska-Akkumulator-
Aktiebolaget-Jungner
436.
Tafel 214.
Tagliabue, C. J. 661.
Tammann, G. 133, 185,
192, 197, 214.
Tanner, E. 832.
Tapsell 476.
Tauchnitz, O. 695, 740.
Tauss 303, 339, 340.
Taylor 47, 168, 169.
Technische Hochschule
Breslau 530.
Thau, A. 751.
Theiss, R. 166.
Thermotechnik G. m. b. H.
660, 661, 665, 668, 669.
Thoma 815.
Thomälen 403.
Thomas 29, 746.
Thomson, W. 99.
Thum, A. 451, 477, 478,
507, 543.
Thury 389.
Tietjens 612, 619, 726, 788.
— O. 746, 749.
Toepler 621, 622.
Towsend 347.
Traub 648.
Trautz 150, 152.
Triebnigg 645.
Tröger 429.
Tropsch 175, 181, 286.
Trouton 97.
Trutovsky 665.
Tubandt 107.
Ubbelhode, L. 788, 789
Udny Yule, G. 71.
Ulich 271, 272, 279.
Ullmann 172.
Ulrich 477.
Ulsamer, J. 749.
Umpfenbach, K. J. 753,
784.
Umstätter 331.
Union-Apparatebau G. m.
b. H. 656, 665, 672.
Verein Deutscher Eisen-
hüttenleute 474, 481,
483, 486.
Verein Deutscher Eisen-
hüttenleute, Wärme-
stelle Düsseldorf 680,
681, 682.
Verein Deutscher Elektro-
techniker 371, 406.
Verein Deutscher In-
genieure 637, 756, 757.
Verein Deutscher Maschi-
nenbauanstalten 757.
Vereinigte Aluminium-
werke 513.
Vereinigte Stahlwerke 496.
Vereinigung der Groß-
kesselbesitzer 501, 502.
Vidmar 371, 377.
Vogel 513.
Waals van der 93f., 111,
185, 194.
Wälzholz, G. 773.
Wärmestelle Düsseldorf
632.
Wagenbach, W. 746.
Wagner 579.
— B. E. 631.
— E. 635.
Wahlig, W. 14, 15, 17, 18,
23, 38, 672.
Wallach 131.
Wallichs 645.
Walter 656.
Walthers, A. 1, 44, 46, 52,
56, 58, 65, 69.
Wanner 604.
Wantzel 798.
Ward 390.
Wartenberg, v. 272, 280,
289.
Wawrzyniok 470, 474.
Weck, C. H. 833.
Wegscheider 159.
Wehn 548.
Weinberg, A. v. 264.

- Weisbach 756.
 Weiser 32.
 Weitbrecht, W. 80.
 Wenk, F. 661.
 Werkmeister 30, 322, 325.
 — P. 70,
 Werkstoffhandbuch für
 Nichtisenmetalle 525,
 526, 528.
 Werner 305.
 Weyl 440, 444.
 Wheatstone 353.
 Wheeler 292, 313.
 Whittaker, E. T. 65, 71, 80.
 Wiebe, H. F. 634, 636.
 Wiederholt 483.
 Wien, W. 619, 624, 632,
 635, 731, 733, 749, 787.
 Wilke, W. 636.
 Willers, Fr. A. 60, 61, 65.
 Wilm 252.
 Winkel, R. 612, 616, 621.
 Winkelmann 541.
 Winnacker, K. 156, 168,
 179, 249, 258, 336, 337.
 Winograd 420, 421.
 Wirth, C. & Co., G.m.b.H.
 832.
 Witte, R. 730, 740, 756,
 765, 766, 767, 771, 772,
 780, 798.
 Witten 658.
 Witting, A. 30, 44, 59, 70.
 Wöhler 478.
 Wömpener, A. 618.
 Wösthoff, H. 672.
 Wohl 111.
 Wohlfahrt, J. 631.
 Wolff 264.
 — H. 549.
 Woltmann 750, 751, 752,
 791.
 Wood 661.
 Wotschke, Joh. 451.
 Wrigth & Co. 665.
 Wunsch 590.
 — G. 594, 796, 805, 810,
 811, 818, 821.
 Wüsthoff, H. 675.
 Wulf, P. 672.
 Wunsch, W. 770, 804.
 Zechmeister, L. 178.
 Zeiß 252.
 Zerbe 302.
 Zeuner, G. 780, 798.
 Zingler, J. 687, 688, 689,
 692, 695, 702.
 Zipperer, L. 651.
 Zwicky 101, 107.

Sachverzeichnis.

Die fett gedruckten Zahlen beziehen sich auf die Seiten, die die wichtigsten Beschreibungen und Zahlenwerte enthalten.

- Abflußformel 782.
 Abgeleitete Kurve 45.
 Abklingkonstante 4.
 Abkühlungskurven 200, 250, 251.
 Ableitung, partielle 53.
 — zweite 45.
 Ablesekreuz 43, 44.
 Ableselinie 32.
 Abreißnadel 732.
 Absolute Temperatur 84.
 Absolutfehler 66.
 Abschaltung von Wechselstromkreisen 369.
 Abschreckzahl 485.
 Acetamid, Zustandsdiagramm 195.
 Acheson - Graphit 544.
 Addiermaschine 29.
 Additionsverbindungen bei katalytischen Reaktionen 167.
 Adiabate 6, 10.
 Adiabatische Ausdehnung eines Gases 118.
 — Zustandsänderung eines Gases 113.
 Ados - Apparat 667, 669.
 Ados - Rauchgasprüfer 575.
 Adsorption 148f., 151, 161, 168.
 Adsorptionsgleichgewicht 148.
 Adsorptionsisotherme 5, 8, 9, 149, 152.
 Änderung des Aggregatzustandes 114.
 Änderungsgeschwindigkeit 3.
 Äther-Alkohol-Wasser-Zustandsdiagramm 223.
 Äthyl 298.
 Äthyläther-Wasser-Zustandsdiagramm 212.
 Affinität 137.
 Akkumulatoren 430f.
 — alkalische 436.
 Aktivatoren 171, 174, 176.
 Aktive Atome 290.
 — Stellen des Katalysators 161.
 Aktivierungsenergie 153f., 157f., 161, 162, 289.
 Aktivierungswärme 153, 158, 162.
 — bimolekularer Reaktionen, Tabelle 158.
 — einiger monomolekularen Reaktionen, Tabelle 159.
 Aktiv-Kohlen, Oberflächen von 168.
 Alarmvorrichtungen 588f.
 Alaun, Korrosion, Tabelle 556.
 Alitieren 547.
 Alkohol-Äther-Wasser-Zustandsdiagramm 223.
 Allo-Druckminderer 812.
 Alpaka 527.
 Alterung des Stahles 488.
 Alterungsbeständige Kesselbaustoffe 502.
 Alterungsbeständigkeit 474.
 Aludur 515.
 Aluminium 512f., 550.
 — als Schutzüberzug 547.
 — Festigkeit 512.
 — Kaltverformung 512.
 — Kaltwalzen, Ziehen 512.
 — Korrosion 513.
 — — durch HNO_3 463.
 — — Tabelle 552f.
 — Reinheitsgrad 512.
 Aluminiumbronzen 524.
 Aluminiumlegierungen 513f.
 — Festigkeit, Tabelle 515.
 Aluminiumüberzüge 547.
 Amagatsches Manometer 631.
 Ammonchlorid-Kupfersulfat, Löslichkeit 240.
 Ammonchlorid-Lithiumchlorid, Zustandsdiagramm 210.
 Ammonchlorid-Quecksilberchlorür, Zustandsdiagramm 211.
 Ammonchlorid-Wasser-Zustandsdiagramm 210, 211.
 Ammonchlorid, Phasendiagramm 189.
 Ammonchlorid-Silberchlorid, Zustandsdiagramm 210.
 Ammoniak, Korrosion, Tabelle 556.
 — Phasendiagramm 189.
 Ammoniakoxydation 181.
 Ammoniak soda, Herstellung 256.
 Ammoniak synthese 168, 179, 286.
 — Wasserstoffherstellung 279.
 Ammoniakverbrennung 175.
 Ammoniumchlorid 556.
 Ammoniumnitrat 556.
 Ammoniumphosphat 556.
 Ammoniumsulfat 556.
 — Korrosion, Tabelle 556.
 Amorphe Körper 100.
 Ampère-Stundenzähler 579.
 Amplitude 363.
 Analyse von Benzin 335.
 — chemische 481.
 Analysenschreiber 657.
 Analysenverfahren, physikalisches 667.
 Anamorphose 31.
 Ankerwicklung von Gleichstrommaschinen 382.
 Ankerrückwirkung 384
 Anemometer 748.
 Aneroidbarograph 630.
 Aneroidbarometer 630.
 Anharmonische Oszillatoren 107.
 Anlassen des Stahls 489.
 Anlaßwiderstand 391.

- Annäherungsrechnung 80, 81.
 Anstriche 548.
 Antiklopfmittel 336f.
 Anzapfschalter 382.
 Apparatebau 592.
 — Werkstoffe 451.
 Arca-Prallplatten 814, 815, 816.
 Arcaregler 591.
 Archimedisches Prinzip 699.
 Ardometer 598.
 Argentan 527.
 Armaturen, Baustoffe 563.
 Askania-Eichwaage 652.
 Askania-Regler 814, 815.
 Askania-Strahlrohrregler 591.
 Askania-Stromteiler 794.
 Askania-Stromwaage 609, 610.
 Astrakanit 247, 254.
 Asynchronmaschine, Wirkungsweise 402.
 Asynchronmotoren 392, 400f.
 — als Erzeuger 403.
 — Leerlauf, Kurzschluß 403.
 Atmosphäre, Korrosion, Tabelle 560.
 — physikalische 612.
 — technische 611.
 Atomabstände 103.
 Atomwärme 104f.
 Atomwärmen fester Körper, Tabelle 105.
 Ausdehnungskoeffizienten fester Körper 107.
 Ausdehnungsregler 606.
 Ausflußwert 798.
 Ausgleichsgerade 80.
 Ausgleichskurve 49, 50.
 Ausgleichsrechnung 80.
 Aussalzen 225.
 Ausschüttwaagen 840.
 Außenpolmaschinen 393.
 Austenit 218, 220, 233, 489.
 Austenitische Stähle 497.
 Autokatalyse 299.
 Autoxydation 299.
 Avogadrosche Zahl 85.
 AW 15, 514.
- Bahnmetall 530.
 Bailey-Aufgabevorrichtung 683.
 Bakelit 350, 545.
- Balan-Kontrollwaagen 698.
 Balan-Waage 836, 837, 844.
 Balkenwaage, automatische 835.
 — für Flüssigkeiten 740.
 — selbsttätige 697.
 Bandbremse 11, 12.
 Bandmaß 732.
 Bandverteiler 832, 838.
 Bandwaagen 697.
 Bariumchlorid, Natriumchlorid, Kupferchlorid, Löslichkeit 237.
 Barometer 616f.
 — verkürzte 617.
 Baro-Vakuummeter 632.
 Barowaage 626.
 Baryzentrisches Kalkül 17.
 BASF-Gasdichteschreiber nach P. Gmelin 656, 657.
 Basis des natürlichen Logarithmensystems 3.
 Bauer-Vogel-Verfahren 513.
 Bauxit, gebrannter 539.
 Bayer-Siemens-Messer 785, 786.
 Beasley-Sarco-Heizwertschreiber 665.
 Becherwerkswaagen 697, 698, 836.
 Befeuchtungsanlage 663.
 Behälter, Baustoffe 562.
 Beizgefäße 562f.
 Belastungswechsel 2.
 Benson-Kessel 201.
 Benzin 334f.
 Benzol, Herstellung aus Acetylen 281.
 Bernoullische Gleichung 611.
 Bernoullisches Theorem 755, 759.
 Berthelotsches Prinzip 126, 131, 138.
 Beschleunigung 46.
 Beton 550.
 — Eigenschaften 542.
 — Sandbeschaffenheit 542.
 — Schutzanstrich 543.
 Biegeproben 481.
 Biegeversuch 471.
 Biegungsfehlerkoeffizient 689.
 Bildungswärme, Tabelle 262, 264.
- Bildungswärme aliphatischer Kohlenwasserstoffe 300.
 — einiger wichtiger Stoffe, Tabelle 138.
 Bimetallmeßwerte 582.
 Bimetallthermometer 598.
 Bimolekulare Assoziation 149.
 — Reaktion 156f., 288.
 Bimsstein, Oberfläche von 168.
 Binäres Gemisch 12.
 Bindemittel für Anstrichfarben 548.
 Binnendruck der Moleküle 94.
 Biologische Prozesse 167.
 Bischofit 246, 247.
 Bitumin als Anstrichmittel 548.
 Bivariantes System 188.
 Blatho-Regler 591, 816.
 Blaubruck 489.
 Blei 516.
 — als Schutzüberzug 546.
 — Festigkeit, Hart- 516.
 — Korrosion, Tabelle 552f.
 Bleiacetat, Korrosion, Tabelle 556.
 Bleiakkumulator, Behandlung 435f.
 — chemische Vorgänge 430f.
 — elektromotorische Kraft, Tabelle 431.
 — Kapazität 432.
 — — und Gewicht, Tabelle 435.
 — Klemmenspannung 432.
 — Krankheiten 433.
 — Plattenformen 433f.
 — Selbstentladung 433.
 — Spannungsverlauf 431.
 — Wirkungsgrad 433.
 Bleikammerprozeß 167, 182.
 Bleiplanimeter 62.
 Bleiweiß 548.
 Blei-Zink-Silber-Schmelzdiagramm 223.
 Blenden 780, 797.
 Blindleistung 365.
 Blindstromkomponente 365.
 Bolometer 610.
 Boltzmannsche Konstante 88, 111.

- Boltzmannsches Gesetz 446.
 — Prinzip 150.
 Boudouardsches Gleichgewicht 274f.
 bouncing pin-Methode 336.
 Bordasche Methode 713.
 Borsäure, Korrosion 564.
 — — Tabelle 554.
 Bourdousches Manometer 629.
 Braggsches Gesetz 103.
 Braunkohlenstaub, Verbrennung 328.
 Brennerleistung, Tab. 319.
 Brennpunkt 303.
 Brennstoffe 258f.
 — Reaktionsmechanismus 297.
 Brennstoffzufuhr, Regelung 839.
 Brennzeit, Tab. 310.
 Brinell-Härte 475, 511, 515, 517, 526.
 Brinell-Probe 474.
 Brom, Korrosion, Tab. 560.
 Bronze, Verwendung, Tab. 522, 523.
 Bronzen, Festigkeit, Tab. 523, 524.
 Bruchdehnung 470.
 Brucheinschnürung 470.
 Bruchfestigkeit 470.
 Brückenkreuzspulinstrument 603.
 Brückenschaltung 587.
 Brückenwaage 691.
 BSS-Legierung 513.
 Buchungsmaschine 29.
 Buchholzschutz für Transformatoren 377.
 Bunkerstandsanzeiger 680.
 Bunsenflamme, leuchtende, entleuchtete 312.
 Büscheltafel 39, 42.

 Cadmium als Schutzüberzug 547.
 Cadmium-Nickelsammler 437.
 Calciumbisulfit, Calciumchlorid, Calciumhypochlorit, Korrosion Tab. 556.
 Calorisieren 547.
 Cannizarosche Regel 297.
 Capillarität 615.
 Capillarmesser 788.
 Capillarpatrone 788.
 Capomesser 788.
 Carbonyleisen 357.
 Carborundumsteine 537.
 Carnallit 246, 247.
 Carnotsche Stoßgleichung 768.
 Casale-Verfahren 180.
 Ceresin 350.
 Charpy-Probe 504.
 Chemische Bremse 336.
 — Konstante 139.
 Chezysche Zahl 791.
 Chlor, Korrosion, Tab. 560.
 Chlorkalk, Korrosion, Tab. 558.
 Chlorschwefel, Korrosion, Tab. 560.
 Chlorwasser, Korrosion, Tab. 560.
 Chrom, als Überzug 547.
 Chromnickelstahl, Tab. 496, 498, 509, 510.
 Chromitsteine 537, 539.
 Chromsäure, Korrosion, Tab. 554.
 Chrom-Vanadinstahl 500.
 Citronensäure, Korrosion Tab. 554.
 Claude-Verfahren 180.
 Clausius-Clapeyronsche Gleichung 132, 133.
 Colorimetrische Gasspurenbestimmung 669.
 Comeco 669.
 Copes-Regelventil 593.
 Corona 347.
 Corronil 527.
 Cosinus 365.
 Coslettieren 548.
 Coslett-Verfahren 548.
 Cottrell-Entstaubung 441.
 Coulombsche Kräfte 363.
 Coulombsches Gesetz 342, 346, 439.
 Crosley-Trommel 735.
 Crownglas 541.
 Curie-Punkt, ferromagnetischer 359.
 — paramagnetischer 359.
 Cyankupfer, Korrosion, Tab. 558.

 Dämpfe, überhitzte 720.
 Daltonsches Gesetz 723, 724.
 Dampfdruck 99, 133f., 718.
 — fester Systeme 146.
 Dampfdruck verschiedener Stoffe, Tab. 191.
 — von Lösungen 142f.
 Dampfdruckdiagramm 203.
 Dampfdruckerniedrigung 725.
 Dampfdruckformel, kinetische Ableitung 150.
 Dampfdruckkurven, positive und negative 206.
 Dampfdruckthermometer 598.
 Dampfkessel, mit Oberflächenverbrennung 321.
 Dampfventil 804.
 Danaide 781.
 Dauerbeanspruchung von Werkstoffen 475.
 Dauerbiegefestigkeit 496.
 Dauerbiegemaschine 478.
 Dauerbiegeschlagwerk 480.
 Dauerbruch 453, 459.
 Dauerfestigkeit 477.
 Dauerprüfmaschine 477.
 Dauerschlagversuch 461, 480.
 — an Werkstoffen 461.
 Dauerstandfestigkeit 460, 476, 496.
 Dauerstandsstreckgrenze 477.
 Dauerzugschlagwerk 480.
 Debro-Gasdichtemesser 656, 658.
 Debyesche Formel 134.
 Deformationswaagen 698.
 Dehnung 456.
 Dehydrierung 282, 284.
 Dekalin 184, 285.
 Desorption 162, 170.
 Destillation 206.
 — fraktionierte 207.
 Destillationsäule 206.
 Destillierblasen, Baustoffe 565f.
 Detonation 295.
 Detonationsklopfen 334.
 Deutsche Kerbschlagprobe, Normenprobe 473.
 Dewaage 694.
 Diamagnetismus 356.
 Diaphragmen 539.
 Diatomit 449.
 Dicarbon 298.
 Dichtekontroller 655.
 Dichtemesser 672.
 Dichtemessung 653f.
 — fester Körper 658.

- Dichteregler 658.
 Dickenmesser 673.
 Dielektrikum 347.
 Dielektrische Verluste 348.
 — Verluststrom 349.
 — Verlustwinkel 349.
 Dielektrizitätskonstante 342, 343f., Tab. 350.
 Dielektrizitätskonstantenmessung 672.
 Dieselmotor 302, 338f.
 Dieselöle 339f.
 Differential, vollständiges 53, 64.
 Differentialgleichung des organischen Wachstums 3.
 Differentialkolbenmanometer 636.
 Differentialmanometer 583, 776.
 Differentialquotient 46.
 Differentialrechnung 44.
 Differentio-Integralk 51.
 Differenzdruckmanometer 637.
 Differenzdruckmesser 769.
 Differenzfedermanometer 638.
 Differenzieren, numerisches 64.
 — zeichnerisches 44, 49.
 Differenzierregeln 47, 48.
 Differenzringwaage 640.
 Differenzschwimmermanometer 638.
 Diffusion 161, 162f., 167, 178.
 — in festen Körpern 107.
 Diffusionsgleichung 163.
 Diffusionskoeffizient 163f.
 — Tab. 164.
 Dilatometrische Messung 249.
 Dimeco-Gasuntersucher 655, 656.
 Diminutiv 64.
 Dinassteine 536.
 Dionic-Wasserprüfer 672.
 Disponibler Wasserstoff 263.
 Dissoziation der Verbrennungsprodukte 269f.
 — von Atomen in Ionen und Elektronen 140, 141.
 — von H_2O und CO_2 269.
 — — Berechnung 272f.
- Dissoziationsdruck 145.
 Dissoziationsenergie 150.
 Dissoziationstheorie von Arrhenius 144.
 Dividieren, graphisches 10.
 Division, automatische 29.
 Doppeldreiphasenschaltung 421.
 Doppelintegral 63.
 Doppelleiter 18, 24.
 Doppelmanometer 631.
 Doppelnutläufer 402, 405.
 Doppelschlußgenerator 389.
 Doppelsalze 226.
 Doppelternäres Salzpaar 236.
 Dosierwaage 818.
 — automatische 841, 842, 843, 844.
 Drehachsen der Krystalle 102.
 Dreheiseninstrumente 582.
 Drehkolbengasmesser 738.
 Drehmoment 386.
 Drehspiegelebenen der Krystalle 102.
 Drehspulinstrument 582.
 Drehstrom 363, 370, 379.
 Drehstromnebenschlusmotor 410.
 Drehstromreihenschlusmotor 408, 409.
 Drehstromsynchronmotor 393.
 Drehzahlkennlinien eines Drehstromnebenschlusmotors 410.
 Drehzahlregelung, Wechselstrommaschinen 406.
 Dreieckskoordinaten 12.
 Dreieckspapier 2, 12f., 371, 379.
 Dreierstoß 160.
 Dreifingerregel 360.
 Dreinutläufer 402.
 Dreiphasenstrom 364, 370, 379.
 Dreistoffsystem 12.
 Dritter Hauptsatz der Thermodynamik 123, 125f., 129f., 134, 138, 139, 271.
 Drosselgeräte 756, 771.
 — Eichung 778.
 — Einbau 773.
 Drosselklappe 797.
 Drosselorgane 796.
- Drosselquerschnitt 797.
 Druck, Einzelregelung 810.
 Druckabfallgesetz 748.
 Druckabhängigkeit einiger Reaktionskonstanten, Tab. 159.
 Druckbegrenzventil 813.
 Druckerweichung von Steinen 538.
 Druckfeuerbeständigkeit 485.
 Druckkorrektur der van der Waalsschen Gleichung 93.
 Drucklibelle 621, 622.
 Druckmeßdose 645.
 Druckmeßgeräte 581.
 Druckmessung 611.
 — Meßfehler 649.
 — piezoelektrische 646, 647.
 — Sicherung 649.
 Druckminderer 811.
 Druckreaktionen 286.
 Druckregelung 596, 795.
 — in Schritten 816.
 Druckverhältnis, kritisches 790.
 Druckverlust in Drosselgeräten 768.
 Druckversuch 471.
 Druckwaage 625, 633.
 Druckwandler 795.
 Druckwasserakkumulator 804.
 Düsen 756, 780, 797.
 Dulong-Petitsches Gesetz 104, 106.
 Dulongische Formel 261, 263.
 Duraluminium 252, 515, 550.
 Duranalumium 513.
 Durchflußgewicht 760, 761, 784, 800.
 Durchflußgleichungen 759f.
 Durchflußmesser von Grefe 785, 786.
 Durchflußregelung 818.
 Durchflußvolumen 763.
 Durchflußwert 798.
 Durchflußzahl 759, 764.
 Durchflutungsgesetz 355.
 Durchschlagfestigkeit 13.
 — elastische 346f., Tab. 350.
 Durchschlagssicherung für Transformatoren 378.

- Duriron 511.
 DWM Regler 609.
 Dyn 354.
 Dynamo 386.
- Eckardt-Rauchgasprüfer 575, 669.
 Eckardt-Regler 609.
 Ecktransversale 17.
 Edelmetalle 530f.
 Edison-Akkumulator 437.
 Effusiometer 657.
 Eichenholz 532.
 Eichfrist 706, 745.
 Eichordnung 702f., 705, 706, 710, 742.
 Eichpflicht 706.
 Eichung von Druckmessern 652.
 Eichvorschriften 706.
 Eigenfrequenz 369.
 Eigenvolumen der Moleküle 93.
 Einankerumformer 411f.
 Einheitspol 354.
 Einheitsrohr (elektrisches) 355.
 Einphasengenerator 396.
 Einphasensynchronmotor 407.
 Einsatzhärten 491.
 Einsatzstahl 494, 495, 497.
 Einschalten einer Wechselspannung 368.
 Einstoffsystem 188f.
 Eis, Zustandsdiagramm 198.
 Eisen α , β , γ 486.
 — als chemischer Baustoff 485.
 — s. Stahl, Gußeisen.
 Eisenbeton 543.
 Eisenchlorid, Korrosion, Tab. 558.
 — Wasser, Schmelzdiagramm 218.
 Eisen-Chrom-Legierungen 219.
 Eisengleichrichter 419.
 — Betrieb 423.
 Eisen-Graphit 487.
 Eisen-Kohlenstoff-Diagramm 485, 486f.
 Eisenkohlenstofflegierungen, Schmelzdiagramm 217, 220.
 Eisen-Kohlenstoff-Sauerstoff, Phasengleichgewicht 233.
- Eisen-Nickel-Legierungen 220.
 Eisenoxyd, Reduktion von 275.
 Eisensiliciumguß, Korrosion, Tab. 552f.
 Eisensulfat, Korrosion, Tab. 558.
 Elastisches Spektrum des Festkörpers 106.
 Elastizität 454.
 Elastizitätsgrenze 454.
 Elastizitätsmodul 454.
 — Tab. 550.
 Elektrische Ableitungsverluste 348.
 — Durchflutung 355.
 — Energie 345f.
 — Entstaubung 437f.
 — Feldstärke 342, 344f.
 — Fernmessung 582, 584, Tab. 586.
 — Festigkeit, Tab. 346, 347.
 — Gasentladung 354.
 — Gasreinigung 438f.
 — Gefällskraft 346.
 — Gleichfelder 348.
 — Gleichstrom 352.
 — Heizung 352, 445f.
 — — Anschlußwert 446.
 — — Anwendung 451.
 — — Aufbau 450.
 — — Baustoffe 449.
 — — Berechnung 445f.
 — — Heizflächenbelastung 448.
 — — Heizwendel 450.
 — — Leiterstärken, Tab. 449.
 — — Regelung 447.
 — — Speicherwärme 446.
 — — Wärmeverluste 446.
 — Isoliermaterialien 346.
 — — flüssige, feste 348.
 — Kapazität 344.
 — Leistung des Wechselstromes 364.
 — Leiter erster Klasse 352.
 — — zweiter Klasse 352.
 — Leitfähigkeit 350.
 — Maschinen 370.
 — Quellenkraft 346.
 — Spannung 344.
 — Verschiebung 342.
 — Verschiebungsstromdichte 343.
 — Wechselfelder 349.
 — Widerstand 352.
- Elektrische Widerstand von Drähten 448.
 — — Tab. 353.
 — Widerstandsbaustoffe 447.
 — Widerstandsmessung 353.
 — Wirbelkraft 346.
 — Wirbelströme 358.
 Elektrisches Feld 342.
 — Potential 344.
 Elektrizitätsmengen 342.
 Elektrodynamische Instrumente 582.
 Elektrofilter 437f.
 — Anwendung 443.
 — Reinigungsgrad 441.
 — mit Röhrenelementen 442.
 Elektrolyte 352.
 Elektrolytkupfer 517.
 Elektrolytzähler 580.
 Elektromagnet 363.
 Elektromagnetischer Kreis 359.
 Elektronmetall 528, 550, 563.
 — AZF, V 1, AZM, AZD, Tab. 529.
 — Tab. 552f.
 Elektromotorische Kraft 366.
 — — Thermolemente 602.
 Elektrostatische Instrumente 582.
 Elektrotechnik, Anwendungsgebiete 342f.
 Elevatoren 682.
 Eloxalverfahren 513.
 Email 547, 561.
 Emulgatoren 183.
 Enantiotropie 199.
 Energie, freie und gebundene 121.
 Energieinhalt der Gase 91.
 Energieketten 290.
 Engler-Grade 726.
 Engler-Viscosimeter 726.
 Entladeverzug 347.
 Entmischungen in Dreistoffsystemen 224.
 Entropie 57, 61, 64, 122, 127, 271, 276.
 — Tab. 262.
 Entropiediagramm 31.
 Entropiewerte einiger Stoffe, Tab. 122.
 Entstehung der Salzlager 249.

- Entzündungsgeschwindigkeit, Berechnung **316f.**
 — — Tab. **313.**
 — maximale, Tab. **313f.**
 Entzündungstemperatur 295, 301.
 Enzyme 178.
 Erdölhydrierung 183.
 Erdölsynthese 285.
 — aus Wassergas 286.
 Erdschluß im Transformator 377.
 Erhärtungsdauer 13.
 Ermüdungsbruch **459.**
 Erosion 462.
 Erregerwicklung 382.
 Erster Hauptsatz der Thermodynamik **108f., 120.**
 Esilit 511.
 Espera-Schnellwaage 694.
 Essigsäure, Korrosion 565.
 — — Tab. **554.**
 Essigsäureanhydrid, Korrosion, Tab. **554.**
 Eta-Regler 816, 817.
 Eutektikum 208, 250.
 Eutektische Grade 251.
 Eutektischer Punkt 13.
 Eutektoid 217.
 Everdur 561.
 Expansionsberichtigung 767, 768.
 Explosion **291f.**
 Explosionsdruck 293.
 Explosionsgeschwindigkeit Tab. 293.
 Explosionsgrenzen bei Unterdruck **308f.**
 — Tab. 303f.
 — bei Druck **305f.**
 Explosionsmotor 301.
 Explosionstemperatur 295.
 Explosionswelle **292.**
 Exponentialfunktion 2.
 Exponentialpapier 6, 61.
 Exponentielle Annäherung 3.
 Fallbügelregistrierung 576.
 Fallbügelregler 607.
 Fallversuche 480.
 Farbe, Anstriche 548.
 Fauser-Verfahren 180.
 Federstahl 500.
 Federwaage 698.
 Fehlerkurve nach Gauß 77.
 Fehler, mittlerer 71, 72, 73.
 Fehlerfortpflanzungsgesetz 78, 79.
 Fehlergrenze bei Flüssigkeitsmessung 743, 744.
 — beim Wiegen 709.
 Fehlerintegral 77, 78.
 Fehlerrechnen 65f., 66, 67, 71.
 Fehlerverteilung nach Gauß 75.
 Feldstärke, elektrische 53.
 Fermente 178.
 Fernmessung, elektrische, Tab. **582, 584, 586.**
 — mechanische 583.
 Fernmeßvorrichtungen **580.**
 Fernregelung 845.
 Fernsteuerung 803.
 Ferraris-Frequenzmesser 582.
 Ferraris-Motor 587.
 Ferraris-Prinzip 580.
 Ferrit 486, 489, 509.
 — Gefügebild 490.
 Ferromagnetische Körper, Temperaturabhängigkeit 358.
 Ferromagnetismus 356.
 Ferrosilicium 511.
 — Korrosion, Tab. **552f.**
 Festigkeit fester Körper 107.
 — von geschmiedeten Stählen 496.
 — von Kontakten 176.
 Festigkeits-Sicherheitszahlen 467.
 Festkörper, Zustand der 100.
 Fetthärtung 183, 184.
 Fettsäuren, Korrosion 565.
 — — Tab. **554.**
 Feuchtigkeit, relative 659.
 Feuchtigkeitmessung, Tab. **659, 660.**
 Feuchtigkeitregler 663.
 Feuerfeste Baustoffe, Prüfverfahren 484.
 — Erzeugnisse 535.
 — — Schmelzpunkte **535.**
 — Steine, Druckerweichung, Druckfestigkeit **538.**
 — — Festigkeit, Tab. **536, 537.**
 Feuerleistung 327, 330.
 Feuerungsregelung 821.
 Feuerverzinkung 545.
 Feuerverzinnung 546.
 Filterplatten 539.
 Filtertücher **562.**
 Flächenschieber 44.
 Flächenschreiber 575.
 Flammgeschwindigkeit **291f.**
 — Tab. **319.**
 Flammentemperatur, Tab. **311.**
 Flammpunkt 303.
 Flender-Variator 832.
 Fließgrenze 455, 471.
 Fluchtentafel 32.
 Flügelgleichung 747.
 Flügelradmesser **750, 792.**
 Flüssige Kraftstoffe **335f.**
 Flüssigkeiten, Mengemessung 718.
 Flüssigkeitsdichteschreiber 653.
 Flüssigkeitskurven, positive 204.
 Flüssigkeitsmanometer 613.
 Flüssigkeitsstandsmessung **732.**
 Flüssigkeitsthermometer 598.
 Fluides Gebiet 192.
 Flintglas 541.
 Flußsäure, Korrosion 564.
 — — Tab. **554.**
 Förderbänder, Regelung 832.
 Förderbandwaage 837.
 Fördereinrichtungen, Leistung 681.
 Folgezeigergerät 585.
 Formamid-Nitrobenzol, Zustandsdiagramm 225.
 Formänderungswiderstand 455.
 Formaldehyd, Herstellung 285.
 Formierung von Akkumulatorenplatten 432.
 Fourniersche Reihe 363.
 Freie Atome 158.
 Frequenz 106, 363.
 — der Molekülschwingung 105.
 Frequenzen, charakteristische und maximale, Tab. 106.
 Frequenzumformung 428, 425.
 Freiblickläufer 25.
 Freie Energie 121, 122.
 — — Tab. **262.**

- Freie Energie der Umwandlung 129.
 Freie Energien von Kohlenwasserstoffsynthesen 282.
 Freie Radikale 158.
 — Weglänge, mittlere 90.
 Freiheitsgrad 128f.
 Fremdzündung 301.
 Frischen 485.
 Fruchtsäuren 563.
 — Korrosion, Tab. 554.
 Frühzündung 333.
 Füllkörper 178, 183.
 Füllmaterialien, Baustoffe 563.
 Fünfschenkeltransformator 379.
 Fünfstoffgemisch 245.
 Fundamentalsatz der Differential- und Integralrechnung 56, 57.
 Funktionsdifferenz 46, 47.
 Funktionsleitern 18, 19.
 Funktionsskala 18.
 Funktionstabellen von Jancke-Emde 90.

 Ganzlogarithmisches Papier 7.
 Garschaumgraphit 487.
 Gasanalyse 261.
 Gasbrenner, Leistung 318.
 Gasdichteschreiber 575.
 Gasdichtewaage 657.
 Gasdruckregler 810.
 Gase, Mengenummessung 733.
 Gasentladung 354.
 Gasfeuerung 320.
 Gasgleichgewicht, Berechnung 271f.
 Gasinterferometer 308.
 Gaskonstante, absolute 84f.
 Gasmesser 793, 794.
 Gaspyrometer 605.
 Gasreinigung 148, 443.
 Gasreinigungsanlage, elektrische 442.
 Gassucher 671.
 Gasthermometer, ideales 597, 598.
 Gastrennung 148.
 Gasuhr 734.
 — nasse 735.
 — trockene 736.
 Gasvolumen 34.
 Gattierungswaage 833, 834.

 Gauß (elektrische Einheit) 355.
 Gaußsche Methode 714.
 Gefäßbarometer 617.
 Gefäßmanometer 613.
 Gefügeuntersuchungen von Metallen 482.
 Gefügestand 464.
 Gegelektromotorische Kraft 366.
 Gegeninduktivität 361.
 Gehr- Manometer 644.
 Gekoppelte Reaktionen 160.
 Gemischregler 820.
 Generator, Gas- 275.
 Generatorgasgleichgewicht 274f.
 Gerbsäuren, Korrosion, Tab. 554.
 German Silver 527.
 Geschwindigkeit 46.
 Geschwindigkeitslehre 81.
 Geschwindigkeitskonstante der bimolekularen Reaktion 157.
 — der monomolekularen Reaktion 155.
 Geschwindigkeitsmessung 746, 753.
 — mit Ausflußöffnung 780.
 — mit Schwimmermessern 783.
 Geschwindigkeitsverteilung nach Maxwell 89, 91.
 Gesetz von Avogadro 83, 84.
 — von Boyle-Mariotte 83.
 — von Bragg 103.
 — von Dalton 86.
 — von Dalton und Gay-Lussac 83.
 — von Hooke 454, 629, 698.
 — von Kirchhoff 115, 353, 365.
 — von Maxwell 89.
 — von Ohm 33, 352.
 — von Poissenille 672, 788, 795.
 — von Stefan-Boltzmann 603.
 Getreideprüfer 658.
 Gewaltbruch 452.
 Gewichte 685, 702.

 Gewichte, Fehlergrenzen 710, 711.
 Gewichtsregelung 840.
 Gibbssches Dreieck 535.
 Giftwirkung an Kontakten 177.
 Gitterplatten 433.
 Gitterpunkt 100f.
 Gitterschwingungen 101.
 Gitterspannung 416.
 Gittersteuerung 425.
 Gitterzustände und Katalyse 176.
 Glättung von Kurven 65, 80.
 Glas 541.
 Glasfedermanometer 648.
 Glaubersalz, Herstellung von 254.
 Gleichgewichte homogener Gasreaktionen 136f.
 — in verdünnten Lösungen 142.
 — kinetische, statistische Betrachtung 149f.
 Gleichgewichtskonstanten 139, 150.
 — der Joddissoziation 142.
 — einiger Reaktionen, Tab. 141.
 Gleichgewichtslehre 81, 127f.
 Gleichrichter 414f.
 — gesteuerte 424.
 — Leistungsfaktor 421.
 — mechanischer 442.
 — mittels elektrischen Lichtbogens 414f.
 — Wirtschaftlichkeit 423.
 Gleichrichterröhre 415.
 Gleichrichtertransformator 421.
 Gleichstromerzeuger 382f., 386.
 — Änderung der Drehrichtung 389.
 — Ankerspannung und Drehmoment 386.
 — Belastungskennlinie, Leerlaufkennlinien 387.
 — kritische Stromstärke 388.
 — mit Fremderregung 387.
 — mit Nebenschlußerregung 387.
 — Reihenschaltung 389.
 — Reihenschlußerregung 388.

- Gleichstromferngeber 585.
 Gleichstromgenerator 383.
 Gleichstrommaschinen 382f.
 Gleichstrommotor 382f.
 390f.
 — als Erzeuger 392.
 — Doppelschlußschaltung 392.
 — Drehrichtungsumkehr 392.
 — mit Fremderregung 390.
 — Induktionsfluß 384.
 — Kohlebürsten 385.
 — Stromwendung 385.
 — Wirkungsweise 383.
 Gleichstromwelligkeit 418.
 Gleichung von Clausius und Clapeyron 123, 191, 199.
 Gleitkurventafel 44.
 Gleitspiegelebenen der Krystalle 102.
 Glimmentladung 347.
 Glimmer, als Isolierstoff 349.
 Glockenkurve, s. Fehlerrechnung 75.
 Glockenmanometer 627.
 Glühkathode 423.
 Glühkathodengleichrichter 442.
 Glühkopfmotor 301.
 Gold 531.
 Gradient 52, 53.
 Graphische Potenztafel 9, 10.
 Grauguß 510.
 Grenzdruckregler 813.
 Grenzwertregelung 845.
 Grosby-Lenker 637.
 Grobflächenplatten 434.
 Großzahlforschung 71, 76.
 Gültigkeitsbereich des dritten Hauptsatzes 126.
 Gütevorschriften für Gußeisen 511.
 Gummi als Baustoff 544.
 Guß, säurebeständiger 511.
 Gußbronze 522.
 Gußeisen 486, 509f.
 — Gefügebild 509f.
 — Grauguß, Weißguß, Hartguß 511.
 — hochhitzebeständiges 512.
 — Korrosion, Tab. 552f.
 Guttapercha 549.
- Haber-Bosch-Verfahren** 567, 668.
 Härte von Gußeisen 475.
 Härten 489.
 Härteprüfung 474.
 Härtepulver 491.
 Härtezah 474.
 Häufigkeitskurve s. Fehlerrechnung 75.
 Hagan-Regelung 821.
 Halblogarithmisches Papier 6.
 Halbwertszeit 4, 155, 169.
 Halogenierung, katalytische 173.
 Hamann-Automat 29.
 Handregelung von Flüssigkeiten und Gasen 801.
 Harmonisches Mittel 40.
 — Schwingungen 101, 105.
 Harnstoff, Zustandsdiagramm 197.
 Hartblei 516.
 Hartgummi als Baustoff 544.
 — Korrosion, Tab. 552f.
 Hartguß 511.
 Hartpapier 545.
 Hauptfluß des Transformators 372.
 Hauptsätze 81.
 — der Thermodynamik 108f.
 Hauptschlußwicklung 389.
 Hauteffekt 361.
 Hebeldurchbiegung 689, 692.
 Hebelverhältnis 688, 690.
 Hebelwaage 686.
 — zusammengesetzte 690.
 Heberbarometer 617.
 Heizflächenbelastung, elektrische, Tab. 449.
 Heizöle 331, 339f.
 Heizung, elektrische 445f.
 Heizwert 258.
 — Berechnung 261f.
 — bei konstantem Druck 258.
 — — Volumen 258.
 — oberer 665.
 — Tab. 263, 311.
 — unterer 665.
 Heizwertmessung 664.
 Heizwertregler 667.
 Heizwertschreiber 666.
 Heizwiderstand 447.
 Helmholtzsche Gleichung 120f., 124, 125f., 129, 133, 138, 139.
- Henrysches Gesetz 183, 723.
 Heßsches Gesetz 264, 296.
 Heterogene chemische Gleichgewichte 145f.
 — Katalyse 167.
 — Reaktionen 161.
 Heuslersche Legierung 356.
 Hitzdrahtanemometer 749.
 Hitzdrahtinstrumente 582.
 Hitzebeständiger Stahl, Tab. 507, 508.
 Hitzebeständiges Gußeisen 512.
 Hochfrequenzöfen 429.
 Hochmagnetische Legierung 357.
 Hochofen, Möllerberechnung 17.
 — Reaktionen 275.
 Hochofenzement 535.
 Höchstfehler 65, 66.
 Höchstlast 455.
 Höhenlinie 30.
 Höhenlinien, im Dreistoffsystem 13.
 Holz, chemische Beständigkeit 533.
 — Festigkeit, Tab. 532f.
 — Korrosion, Tab. 552f.
 Homogene Gasreaktionen 136.
 — Katalyse 167.
 — Verbleiung 546.
 Homogener Mischkrystall 146.
 Hookesches Gesetz 454, 629, 698.
 Hüllkurvenumrichter 429.
 Hüttenkupfer 517, 518.
 Hydraulische Hochdruckapparate 522.
 Hydrierung 184, 280, 282.
 — Gleichgewichte 281.
 — von aromatischen Kohlenwasserstoffen 283, 284.
 — von Erdöl 285.
 — von Kohlenstoff 287.
 — organischer Verbindungen 183.
 Hydrierungskontakt 174.
 Hydrierungsreaktionen 172.
 Hydrodichtewaage 654.
 Hydro-Eichwaage 652.
 Hydronalium 550.
 — Tab. 513, 515.
 Hydro-Relais 627.

- Hydroxyl 289.
 Hyperbel 5.
 Hysteresis 356.
 Hysteresisschleife 357.
- I. C. E.-Manometer 629.
 I. C. E.-Niederdruckregler 591.
 I. C. E.-Temperaturregler 606, 608.
 Ideale Gase 83f.
 Idometer 673.
 I. G.-Blende 756.
 I. G.-Dichteschreiber 656.
 I. G.-Düse 756.
 I. G.-Heizwertschreiber 665, 666.
 I. G.-Titrierautomat 575, 670.
 I. G.-Ultra-Absorptionsschreiber 673, 674.
 I. G.-Wärmetönungsapparat 670, 671.
 I. G.-Wasserbestimmungsapparat 672.
 Impfverfahren 747.
 Indicator 636.
 Induktionsgesetz 354, 359.
 Induktionslinien 355.
 Induktionsperiode 299.
 Induktiver Widerstand 365, 366.
 Induktivität 361, 366.
 Inkongruent 197.
 Inkongruentes Gas 231.
 — Salzpaar 216.
 Innenpolmaschinen 392.
 Innere Reibung 165.
 Integral, unbestimmtes 54.
 Integralrechnung 44.
 Integraph 55, 61.
 Integrationskonstante 54.
 Integrator 62.
 Integrieren, Genauigkeit des zeichnerischen 60.
 — graphisches 59.
 — numerisches 59, 64.
 — zeichnerisches 54, 58.
 Integrierformeln 54, 55.
 Integrierrolle 61.
 Interferometer 308.
 Interkrystalline Brüchigkeit 464, 465.
 Interpolation, graphische 31.
 Interpolationspolynom 64, 65.
 Interpolieren 65.
- Invariantes Gleichgewicht 202.
 Invariantes System 188.
 Ionenkrystalle 107.
 Ionenprodukt 144.
 Ionenradien 103.
 Ionisator 354.
 Ionograph 672.
 Irdengut 534.
 Iridium 531.
 Irreversibler Vorgang in der Thermodynamik 116, 117f.
 Isobare des idealen Gases 83.
 Isobutylalkohol-Wasser-Zustandsdiagramm 213.
 Isochore des idealen Gases 84.
 Isolatoren 349.
 Isolierlacke 352.
 Isoliermaterialien, elektrische 346.
 Isolierpreßstoffe 351.
 Isolierstoffe, elektrische, Tab. 350, 351.
 — organische 350.
 Isomorphie 214.
 Isotherme Ausdehnung eines Gases 118.
 — des idealen Gases 83.
 — Zustandsänderung eines Gases 112.
 Isothermen 10.
 — der van der Waals'schen Zustandsgleichung 96.
- Jenaer Glas 541.
 Jod, Korrosion, Tab. 560.
 — Phasendiagramm 189.
 Jodionenkatalyse der Hydroperoxyd-Thio-sulfatreaktion 160.
 Joedimo-System 587.
 Johnson-Heizwertschreiber 665.
 Joulesches Gesetz 352.
 — Wärme 364.
 Junkers-Calorimeter 261.
 Justierfehler 690.
 Juvelith 545.
- Käfiganker 404.
 Kaimit 243, 246.
 Kalilauge, Korrosion, Tab. 556.
 Kalisalze 243.
- Kaliumbichromat, Kaliumbitartrat, Kaliumchlorat, Kaliumchlorid, Korrosion, Tab. 558.
 Kaliumchlorid-Natriumcarbonat, Löslichkeit 240.
 Kaliumchlorid-Magnesiumsulfat, reziprokes Salzpaar 243.
 Kaliumferricyanid, Kaliumcarbonat, Korrosior, Tab. 556.
 Kaliumnitrat, Kaliumpermanganat, Korrosion Tab. 558.
 Kalkmilch, Korrosion, Tab. 556.
 Kaltsprödigkeit 472.
 Kaltverformung 464.
 Kapazität, elektrische 344.
 Kapazitiver Widerstand 365, 366.
 Kapselfederanometer 630.
 Kapselmesser 739.
 Kaskadenschaltung 407.
 Kaskadenumformer 413.
 Kastenplatten 433.
 Katalysator 161, 171f.
 — Definition des 167.
 Katalysatoren, vergiftete 184.
 — Zusammenstellung, technischer 172, 173f.
 Katalyse 166f.
 — homogene 167.
 — negative 179.
 Katalytische Prozesse der Technik 179.
 Kathodenfallableiter 378.
 Kautschuk 350.
 Kautschukkitte 549.
 Kehrwert 12.
 Keilschieber 802.
 Keime in Schmelzen 133.
 Kelvin-Grade 597, 717.
 Kennlinien für Kohleverbrennung 325.
 Kennziffer von Kraftstoffen 334.
 Kerntransformator 379.
 Keralith 549.
 Keramische Erzeugnisse 550.
 — — Werkstoffe 533f.
 Kerasolith 548.
 Kerbschlagprobe 472.
 — Charpy Probe 473.

- Kerbschlagprobe der Vereinigung der Großkesselbesitzer 473, 474.
 Kerbschlagprüfung 472.
 Kerbwirkung 456, 460.
 Kerbzähigkeit 472.
 Kesselbaustoffe, Festigkeitseigenschaften, Tab. 503.
 Kesselbleche 502f.
 Kesselzugregelung 814, 821.
 Kettengetriebe 832.
 Kettenreaktionen 289f.
 Kieselgur 449.
 Kieserit 243, 246.
 Kinetik 152f., 288f.
 — heterogener Reaktionen 161f.
 Kinetische Gastheorie 87, 150.
 Kippmesser 736.
 Kippmoment 403.
 Kippwaage 830.
 Kippwassermesser 740.
 Kirchhoffsches Gesetz 365, 353.
 — Satz 115, 124, 134.
 Kitte 549.
 — Kautschuk 549.
 — säurefeste 539, 549.
 — Wasserglas- 549.
 Klemmenspannung 390.
 Klinker 540.
 Klinkhoff-Zelenka Messer 640.
 Klopfen 334.
 — von Benzinmotoren 295.
 Klopffeinde 336.
 Klopfwert 336.
 Körperhauptleiter 24, 25.
 Koerzitivkraft 357.
 Koexistenz zweier fester Phasen 129.
 Kohlebürsten 385.
 Kohledruckmesser 645.
 Kohlefeuerungen, Regelung 826.
 Kohlehydrierung 285.
 Kohlendioxyd, Bestimmung 669.
 — Phasendiagramm 189.
 Kohlenoxyd, Bestimmung 669.
 — als Reduktionsmittel 275.
 — Bildung von 275.
 Kohlensäure, Korrosion, Tab. 554.
 Kohlenstaub, Verbrennung 327f.
 Kohlenstaubfeuerungen 322f.
 Kohlenstoff als Reduktionsmittel 276.
 — als Werkstoff 543f.
 — Verbrennung des 274, 296.
 Kohlenstoff-Sauerstoff, Zustandsdiagramm 221.
 Kohlenstoffstahl 494.
 Kohlenstoffsteine 537.
 Kohlenwasserstoffe, Bildung und Spaltung 280f.
 Kohlenwasserstoffsynthese aus Wassergas 286.
 Kokerei 280.
 Kokereigas 279.
 Kolben-Druckschalter 829, 830.
 Kolbenindicator 636.
 Kolbenmanometer 577, 633.
 Kolbenmesser 737.
 Kolbenschieber 593.
 Kolbenwippe 741.
 Kollektivtheorie 81.
 Kolloidale Katalysatoren 178.
 Kolonne 206.
 Kolonnenboden 208.
 Kolophonium 350.
 Kommutation 385.
 Kommutator 385.
 Kompensationsplanimeter 62.
 Kompensationsschaltung 600.
 Kompensationswicklung 385.
 Kompensograph 577.
 Kompensograph-Siemens 675.
 Kompressibilität der Gase 719.
 Kompressionsarbeit der Gase 112.
 Kompressionsdruck 332.
 Kompressionsfähigkeit 335.
 Kompressionsfestigkeit 337.
 Kompressionskoeffizient 678.
 Kondensator, elektrischer 346.
 Kondenswasserprüfer 672.
 Kongruentes Salzpaar 216.
 Kontakte 162, 167.
 — für Regler 808.
 Kontaktgifte 177.
 Kontaktoberflächen, Struktur der 176.
 Konvektion 163.
 Konventionelle chemische Konstanten verschiedener Stoffe, Tab. 135.
 Konvergenztemperatur 599.
 Konversionssalpeter 255.
 Konzentrationsgefälle und Diffusion 163.
 Korngröße von Kohlenstaub 322.
 Kornwachstum des Stahls 489.
 Korrelationskoeffizient 81.
 Korrelationsrechnung 71.
 Korrosion 452, 462f.
 Korrosionsbeständiger Stahl 504.
 Korrosionsbeständigkeit 482.
 — von Werkstoffen Tab. 552f., Tab. 562.
 Korrosionsermüdung 464.
 Korrosionsschutz 465.
 Krackreaktionen, katalytische 173.
 Krackung 280f.
 Kraftlinien, elektrische 342.
 Kraftverstärker 585, 590, 591.
 Kratzer 682.
 Kreisblattschreiber 577.
 Kreisfrequenz 363.
 Kreisprozeß 64.
 — von Carnot 118f.
 Kreisprozesse 6, 10.
 Kreisrohrmanometer 625.
 Kreuzfadenpyrometer 604.
 Kreuzspulmeßwerk 585.
 Kriechen des Werkstoffs 456, 476.
 Kriechgrenze 476.
 Kritische Daten 96f.
 — Dichte 97.
 Kritischer Druck 97.
 — Zündungsdruck 309.
 Kritisches Volumen 97.
 Kurven-Kopierregler 609.
 Krystallisierte Körper 100.
 Krystallkeime 133.
 Krystallklassen 102f.
 Krystallographie 100f.
 Krystallstrahler 101f.

- Krystallsystem 102f.
 KS-Seewasser 513, **514**,
 561.
 — Korrosion, Tab. **552f.**
 Kübler-Schaltung 381.
 Kugelplanimeter 62.
 Kugelrückschlagventil 829.
 Kunstharze, Festigkeitseigenschaften **545**.
 — als Isolierstoffe 352.
 Kupfer **516**, **517**.
 — Festigkeitseigenschaften **517**.
 — Kaltverformung 517.
 — Korrosion, Tab **552f.**
 — Korrosionsbeständigkeit 517.
 — Reinheitsgrad 517.
 Kupferchlorid, Bariumchlorid-Natriumchlorid, Löslichkeit 237.
 — Korrosion, Tab. **558**.
 Kupferchlorid-Ammoniumsulfat, Löslichkeit 240.
 Kupfer-Mangan-Legierungen 525.
 Kupfer-Nickellegierungen **526**.
 Kupfernitrat 558.
 Kupfersulfat 558.
 — Korrosion, Tab. **558**.
 Kupfer-Zinklegierungen, **518f.**, Tab. **519**.
 Kurvenintegral 63.
 Kurvensekante 46.
 Kurventafel 30.
 Kurventangente 46, 48.
 Kurzschlußläufermotor 404.
 Kurzschlußstrom des Transformators 374.
 Kurzventurirohr 758.
- L** 15 513.
 Labile Salzpaare 254.
 Labiles Salzpaar 229, 239.
 Laboratoriumsgeräte 541.
 Ladungen, elektrische 342.
 Läufer 25, 382.
 Lagermetall 529, **530**.
 Laminae Strömung 729, 788.
 Langbeinit 243, 246.
 Lastschalter 382.
 Lastwechsel 459.
 Laufgewichtswaagen **693**.
 — Aufstellung 705.
 Laugen, Korrosion, Tab. **552f.**
- Lea-Messer 682.
 Lea-Volumenmesser 832.
 Lebensdauer, mittlere 169.
 Ledeburit 486, 509.
 Leerlaufverluste des Transformators 376.
 Legierte Stähle 496.
 Leiter 9.
 Leitern, krummlinige 40.
 — logarithmische 34.
 Leitertafel 18, 30.
 Leitfähigkeit fester Körper 107.
 Leitfähigkeitsmessung 672.
 Leistungsberechnung einer Maschine 37.
 Leistungsfaktor 365, 582.
 Leonard-Umformer 428.
 Leonit 243, 246.
 Leuchtschaltbild 585.
 Lichtbogenstromrichter 416.
 Lichtpunktgerät 776.
 Lichtsäulenmesser 776.
 Linealplanimeter 61, 62.
 Linienschreiber 575.
 Lockerstellen in Krystallen 176.
 — in Krystallgittern 107.
 Löslichkeit, Bestimmung 252.
 — graphische Darstellung der 209.
 — zweier Flüssigkeiten ineinander 211f.
 Löslichkeitsbestimmung 200.
 Löslichkeitskurven 225.
 Löslichkeitsprodukt **144f.**
 Löslichkeitsprodukte verschiedener Elektrolyte, Tab. **144**.
 Lösungen zweier Salze 225.
 Loewit 246, 247.
 Logarithmenpapier 2, 6f., 20.
 Logarithmentafel 5, 29.
 Logarithmus 4.
 Loschmidtsche Zahl 85.
 Luftbedarf, Tab. **263**.
 Luftgas **317**.
 — Zusammensetzung **275**.
 Luftgeschwindigkeit in Kohlenstaubfeuerungen **323**.
 Luftüberschuß 269.
 Luftüberschußregelung 827.
 Luxsche Gaswaage 655.
- Magnalium 252.
 Magnesitsteine 537, 539.
 Magnesium **528f.**
 Magnesiumchlorid-Kaliumsulfat, reziprokes Salzpaar 230.
 Magnesiumlegierungen **528f.**
 Magnetische Energie 362.
 — Feldstärke 357.
 — Härte 357.
 — Induktion **354**, 355.
 — Kraftlinien 363.
 — Legierung 357.
 — Umlaufspannung 354.
 Magnetischer Fluß 359.
 — Kreis des Transformators 371.
 — Leitwert 359.
 — Widerstand 359.
 Magnetisches Feld **354**.
 Magnetisierungskurven **356**.
 Magnetisierungsstrom 372.
 Magnetisierungstafel Tab. **356**.
 Manganstahl 500.
 Manometer **613f.**
 — elektrische 644.
 Manometerflüssigkeiten 616.
 Manteltransformator 380.
 Mariottesches Gefäß 596.
 Martens-Spiegelapparat 476.
 Martensit 218, 220, 489.
 — Gefüge 490.
 Maschinenguß 511.
 Massenwirkungsgesetz **136f.**, 144, 150.
 Maße **684**.
 Maßstab 48, 49.
 Materialprüfung **451**, **468f.**
 — chemische Untersuchung 481.
 Mathematik **1**.
 Maximale Arbeit der Bildung einiger Stoffe, Tab. 138.
 Maximalfehler 66.
 Maximumsiedepunkt 208.
 Maxwell (elektrische Einheit) 355.
 Maxwellsche Energieverteilung 105, 106, 159.
 MBV-Verfahren 513.
 McLeod-Manometer 648.
 Mechanische Arbeit 108.
 — Festigkeit 452, **454**.

- Mechanische Festigkeit elektrischer Isolierstoffe 351.
- Mechanisches Wärmeäquivalent 109.
- Meco 669.
- Megaperm 4510 357.
— 6510 357.
- Mehrfach-Thermoelemente 601.
- Mehrphasenasynchronmotor, Anlauf 404.
- Mehrphasenstrom 364.
- Méker-Brenner 319, 320.
- Melalith 350.
- Meldeorgane 803.
- Membranregler 811.
- Mendeljewische Methode 713.
- Mengenmessung 675.
— kalorische 745.
— chemische 745.
— durch Geschwindigkeitsmessung 746.
— fester Stoffe 678f.
— Genauigkeit 684.
— mit Drosselgerät, Genauigkeit 770f.
— mit Flügelrädern 747.
— mit Indicator 734.
— mit Überfall 781.
— von Flüssigkeiten 731.
— Fehlergrenzen 743, 744.
— — Gasen und Dämpfen 716f.
— — Flüssigkeiten, mittelbare 745.
— von Gasen 733.
— — und Flüssigkeiten, Genauigkeit 741.
— volumetrische 679.
— Wirtschaftlichkeit 677.
- Mengenregelung 796, 818, 821, 830.
- Mercedes, Euklid 29.
- Messen 573.
- Meßgebläse 821.
- Messing 518f.
— Festigkeitseigenschaften, Tab. 520.
— innere Spannungen 521.
— Verwendung, Benennung, Zusammensetzung, Tab. 519f.
- Messinggußstücke 520.
- Messingschieber 804.
- Meßplatte 732.
- Meßrahmen 832.
- Meßrohr 683, 831.
- Meßschirm 746.
- Meßuhr 769.
- Meßwarte 585.
- Meßwehr 781.
- Metalldrahtmanometer 646.
- Metalle, Prüfung der 451f.
- Metallmanometer 628.
- Metallographie 252, 482.
- Metallgraphische Untersuchungen 252.
- Metallorganische Antiklopfmittel 337.
- Metallüberzüge 545.
- Methan, Bildungswärme 264.
- Methanausbeute bei Hydrierung von Kohlenstoff, Tab. 288.
- Methangleichgewicht 287.
- Methanherstellung 287.
- Methanolsynthese 175, 180, 181, 285, 286.
- Methanspaltung 277.
- Methanverbrennung 279.
- Methin 298.
- Methode der kleinsten Quadrate 71, 80.
- Methyl 158, 298.
- Methylalkoholsynthese 285.
- M.G.O. = Maß- und Gewichtsordnung 706, 707.
- Mikanit 350.
- Mikroindicator 636.
- Mikromanometer 619, 620, 621, 622, 623, 755.
- Mikrowaagen 698.
- Millimeterpapier 2.
- Minimumsiedepunkt 208.
- Minosglas 350.
- Mischbarkeit von Flüssigkeiten miteinander 213.
- Mischkatalysator 171f.
- Mischkristalle 146, 214.
- Mischsäure 14.
- Mischsäuren, Korrosion 564.
— — Tab. 552, 554.
- Mischungslücke 212.
- Mittlere Geschwindigkeit der Moleküle 88, 105.
- Modell von Roozeboom 201, 202, 208, 220.
- Möllerberechnung 17.
- Mörtel 535, 542.
- Molarwärme, Tab. 262.
- Molekülradius 166.
- Molekulare Gefrierpunktniedrigung 143.
- Molekulare Siedepunkterhöhung 144.
- Molekulargewicht, Tab. 262.
- Molekulargewichtsbestimmung aus der Dampfdichte 86.
- Molekularvolumen 85.
- Molwärme der Gase 91.
— der idealen Gase 110.
— der Flüssigkeiten 99.
— mittlere 92.
— von Gasen, Tab. 112.
- Molybdänstahl 497.
- Momentenplanimeter 62.
- Monelgußeisen 511.
- Monelmetall 511, 526f., 550.
— Korrosion, Tab. 552f.
— Warmfestigkeit 527.
- Monochromatische Frequenz 105.
- Monomolekulare Reaktion 154f., 159, 288.
- Mono-Rauchgasprüfer 575.
- Monotropie 131, 199.
- Monovariantes System 188.
- Mont-Cenis-Verfahren 180.
- Mosaikkristalle 101.
- Motalin 337.
- Multiplikationskörper 29.
- Multiplizieren, graphisches 10.
- Mummetall 357.
- Näherungsgleichung von Nernst 138, 141f.
- Näherungsgleichungen von Ulich 271.
- Näherungspolynom 64, 65.
- Näherungsrechnung 73.
- Nahtlose Rohre 503.
- Naphthalin, Hydrierung 284.
- Natriumcarbonat, Korrosion, Tab. 556.
- Natriumchlorid-Bariumchlorid-Kupferchlorid, Löslichkeit 237.
— Korrosion, Tab. 558.
- Natriumchlorid-Kaliumcarbonat, Löslichkeit 240.
- Natriumchlorid-Magnesiumsulfat, Löslichkeit 239, 240.
- Natriumchlorid-Natriumsulfat-Natriumcarbonat, Löslichkeit 237.

- Natriumhypochlorid, Korrosion, Tab. 558.
 Natriumnitrat-Natriumchlorid-Wasserzustandsdiagramm 227.
 Natriumchlorid-Natriumnitrat-Natriumsulfat, Löslichkeit 238.
 Natriumsulfat, Herstellung von 255.
 — Korrosion, Tab. 558.
 Natriumsulfat-Natriumchlorid-Natriumcarbonat, Löslichkeit 237.
 Natriumsulfat-Wasser-Schmelzdiagramm 218.
 Natriumsulfid 558.
 Natriumsulfit 558.
 Natriumsuperoxyd, Korrosion, Tab. 556.
 Natriumthiosulfat, Korrosion, Tab. 558.
 Natronlauge, Korrosion Tab. 556.
 Natürlicher Logarithmus 9.
 NCT-3-Legierung 600.
 Nebenschlußgenerator 388.
 Nebenschlußmotor 391.
 Negative Katalysatoren 179.
 Neigungswaage, automatische 834.
 Neigungswaagen 694.
 Nennerprobe 30.
 Nennkurzschlußspannung 374.
 Nernstsche Waage 698.
 Netzebenenabstände 103.
 Netztafel 18, 30.
 Netz- und Leitertafeln, Verbindungen von 43.
 Neunleistung des Transformators 376.
 Neusilber 527.
 Neutrallisen 511.
 Nichteisenmetalle 512.
 Nichtrostende Stähle 551, Tab. 504, 505.
 Nickel 525 f.
 — Festigkeit 525, Tab. 526.
 — Kaltverformung 525.
 — Korrosion, Tab. 552 f.
 — Verwendung 526.
 Nickelbronzen 523.
 Nickel-Chromlegierungen 509.
 — Festigkeit 527 f.
 Nichteisenakkumulator 436.
 Nickellegierungen 526 f.
 Nickelstahl 496, Tab. 498, 510.
 Nickelüberzüge 546.
 Nicorros 527.
 Niederschlagsselektrode 439.
 Nitriergefäße 564.
 Nitrierhärtung 494.
 Nitrobenzol-Formamid, Zustandsdiagramm 225.
 Nitrocelluloselacke 548.
 Nitrose Gase, Korrosion, Tab. 552.
 Nitrosylschwefelsäure 167.
 Niveaulinie 53.
 Niveauregler 596.
 Nomographie 18.
 Nomographische Tafeln 14, 15.
 Nordpol, magnetischer 354.
 Normalblende 1930 756, 757, 766, 797.
 Normalisierter Stahl 495.
 Normaltemperatur 717.
 Normdüse 756, 757, 765, 797, 800.
 N-Tafel 38.
 Oberflächen einiger Träger-substanzen, Tab. 168.
 Oberflächenenergie 98, 99.
 Oberflächenform 99.
 Oberflächenregler 606.
 Oberflächenschwimmer 746.
 Oberflächenverbrennung 320 f.
 Oberflächenwiderstand 351.
 Octanzahl 336.
 Öle, Heiz- 339.
 Ölfeuerung 331.
 — Regelung 821.
 Ölkitt 549.
 Öltransformator mit Fremdlüftung 376.
 — mit Ölumlaufl 376.
 — mit Selbstkühlung 376.
 Oerstedt (elektrische Einheit) 354.
 Ohm 352, 366, 367, 374.
 Ohmscher Widerstand 374.
 Ohmsches Gesetz 33, 352 f.
 Ohmsches Gesetz für Wechselstrom 366 f.
 Ohmstundenzähler 580.
 Oleum 182.
 — katalytische Herstellung 174.
 Oleumanalyse 37.
 Omeco 669.
 Opl-Türme 183.
 Osmondit 218, 220.
 Osmotischer Druck 142 f.
 Ostwaldsche Stufenregel 297.
 Oxalsäure, Korrosion, Tab. 554.
 Oxydationsreaktionen 172.
 Ozeanische Salze 246 f.
 Ozonide 299.
 Papierfeuchtigkeitsmesser 673.
 Parabel, gewöhnliche 5.
 — kubische 5.
 Parachor 99.
 Paraffinoxydation 300.
 Parallelentafel 35.
 Parallelschaltung 353.
 Paramagnetismus 356.
 Parkerisieren 548.
 Partialdruck 86.
 Pendelbecherwerk 683.
 Pendelschlagwerk 472.
 Perlit 217, 220, 223, 486, 489, 509.
 — Gefügebild 490.
 Permalloy C 357.
 Permeabilität 355, 356, 358.
 Permenorm 4801 357.
 Peroxydbildung 336.
 Peroxyde 299.
 Perpetuum mobile erster Art 117.
 — — zweiter Art 117.
 Phase 128 f., 186.
 Phasengleichgewichte, Dreistoffgemische 222.
 — fest-gasförmig 220 f., 230.
 — fest-flüssig ohne Wasser 228.
 — in Einstoffsystemen 188 f.
 — in der Natur vorkommende 200.
 — in Zweistoffsystemen 201 f.

- Phasengleichgewichte in Zweistoffsystemen mit Mischkristallbildung **214f.**
 — Lösung von drei gleichionigen Salzen in Wasser **237.**
 — $(\text{Na}_2 \cdot \text{K}_2 \cdot \text{Mg})(\text{Cl}_2 \cdot \text{SO}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$ **246, 247.**
 — optische Untersuchung **252.**
 — System $(\text{K}_2 \cdot \text{Mg})(\text{Cl}_2 \cdot \text{SO}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$ **243.**
 — — $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{NH}_3 \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ **244.**
 — — Magnesium, Aluminium **251, 252.**
 — — $2 \text{NaCl} \cdot \text{MgSO}_4$ **254.**
 — — $\text{NaCl} \cdot \text{NH}_4\text{HCO}_3$ **256.**
 — — $(\text{Na} \cdot \text{K})(\text{Cl} \cdot \text{NO}_3) \cdot \text{H}_2\text{O}$ **242.**
 — — $(\text{Na}_2 \cdot \text{Mg})(\text{SO}_4 \cdot (\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O})$ **242.**
 — — $(\text{Na} \cdot \text{NH}_4)(\text{Cl} \cdot \text{HCO}_3) \cdot \text{H}_2\text{O}$ **242.**
 — — $(\text{Na} \cdot \text{NH}_4)(\text{Cl} \cdot \text{NO}_3) \cdot \text{H}_2\text{O}$ **241, 242.**
 — — $\text{NaNO}_3 \cdot \text{KCl}$ **254.**
 — — Natriumsulfat-Glaubersalz **252.**
 — Vierstoffmischungen **234.**
 — von Flüssigkeiten **211f.**
 — zwischen Kohlenstoff, Metalloxyden und Metallen **231.**
 Phasengrenzen **148.**
 Phasenlehre **184f.**
 — Anwendungen **201, 249f.**
 Phasenregel **127f., 133, 142, 186f.**
 — Beweis der **187.**
 Phasenverschiebungswinkel **364.**
 Phasenvolumen **151.**
 p_n -Messung **672, 675.**
 Phenol **565.**
 — Korrosion, Tab. **554.**
 Phenol-Wasser, Zustandsdiagramm **212, 213.**
 Phosphorbronzen, Verwendung **522, 523.**
 Phosphorsäure, Korrosion **564.**
 — — Tab. **552.**
 Photozelle **425.**
 Piezoelektrizität **646.**
 Pikrinsäure **566.**
 Pitot-Rohr **612.**
 Pittings **463.**
 Plancksche Konstante **105.**
 Planimeter **58, 60, 61, 62.**
 Planté-Formierung **434.**
 Plastische Formänderung **455.**
 Plastizität fester Körper **107.**
 Platin **561.**
 — Festigkeit, Tab. **531.**
 Platin-Iridium **531.**
 Plattenfedermanometer **629.**
 Poidometer **843.**
 Poise **726.**
 Poiseuillesches Gesetz **672, 788, 795.**
 Poissonsche Gleichung **760.**
 — Zahl **635.**
 Polarisationsmikroskop **200.**
 Polarisationsphotometer **44.**
 Polarplanimeter **61, 62.**
 Polumschaltung bei Wechselstrommotoren **407.**
 Polverschiebung **60.**
 Polymerisation von Kohlenwasserstoffen **282.**
 Polymorphie **128f., 195f., 199.**
 Polynome **11, 64.**
 Polytropen **5, 9.**
 Poncelet-Öffnung **818.**
 Porolithfilter **726.**
 Porositätsbestimmung **485.**
 Portlandzement **535.**
 Porzellan **534, 541.**
 Potential **57.**
 — elektrisches **53, 344.**
 Potentialdifferenz **344.**
 Potentialmessung **672.**
 Potentialverteilung im Krystallgitter **101.**
 Potentiometer-Recorder **577, 601.**
 Potenz **69.**
 Potenzkurven **5.**
 Potenzpapier **7, 32.**
 Potenzplanimeter **62.**
 Preßluftmesser Exakt **740.**
 Preßmessing **521.**
 Primärwicklung des Transformators **371.**
 Prismenderivator **51.**
 Prodoritbeton **543.**
 Profilux **776.**
 Programm-Geber **593.**
 Programmregelung **608, 825.**
 Projektive Leiter **20.**
 Proportionalgasmesser **93.**
 Proportionalmethode **713.**
 Protos-Großflügelrad-Wassermesser **752.**
 Prozentualfehler **66.**
 Prüfung von Schutzüberzügen auf Eisen **484.**
 Pseudodielektrikum **347.**
 Psychometrie **41.**
 Pumpen, Baustoffe **562f.**
 Punktgitter **102, 127.**
 — starre **100, 104.**
 Punktschreiber **576.**
 Pyrometer **603f.**
 Pyropto **604.**
 Pyro-Schreiber **598.**
 Pyrradio **598.**
 Quadrat, reziprokes **70.**
 Quadratische Leitern **24.**
 Quadratpapier **12.**
 Quadratwurzel, reziproke **70.**
 Quadrupelpunkt **202.**
 Quantentheorie **105f.**
 Quarzglas **539.**
 Quarzgut **539.**
 Quarzschamotte **536.**
 Quecksilberchlorid, Korrosion, Tab. **558.**
 Quecksilberchlorür-Ammonchlorid, Zustandsdiagramm **211.**
 Quecksilberdampfgleichrichter **417f.**
 — Betrieb **422.**
 — mit Glühkathode **423.**
 Quecksilbernitratprobe **521.**
 Quellstärke **64.**
 Quetschgrenze **471.**
 Radialplanimeter **62.**
 Radikale **158.**
 — freie **298.**
 Radioaktiver Zerfall **154, 156.**
 Radiometereffekt **648.**
 Radiziereinrichtung **639f.**
 Ranarex-Apparat **656, 657, 658, 662, 826, 827.**
 Randwertaufgabe **61.**
 Raoultssches Gesetz **725.**

- Rationale Funktion 11.
 Rauchgasdichteschreiber 673, 675.
 Rauchgasprüfer 667f.
 Rauchgasreinigung 444.
 Raumbgitter 100, 102.
 — des Diamanten 102.
 Raumgruppen der Kry-
 stalle 102.
 Raumladeeffekt 354.
 Raumregler 605.
 Reaktionsentropie 276.
 Reaktionsfähigkeit von
 Kohlenwasserstoffen
 300.
 Reaktionsgefäße, Bau-
 stoffe 562f.
 Reaktionsgeschwindigkeit
 152f., 288f., 291.
 — heterogener Reaktionen
 161, 162f.
 Reaktionsisochore 139,
 150, 153.
 Reaktionsisotherme 137f.
 Reaktionsketten 179, 289f.
 Reaktionslenkung 168, 174,
 280.
 Reale Gase 92.
 Rechenmaschine 29.
 Rechenschieber 18, 20, 24,
 25.
 — Graphische Gebrauchs-
 anweisung 25f.
 Rechenstäbe 24.
 Rechnen mit kleinen
 Größen 69.
 — technisches 70.
 Reduktion von Metall-
 oxyden 146.
 Reduktionsgleichgewichte
 275f.
 Reduktionsstahl 496.
 Reduzierventil 811.
 Redwood-Zeit 726.
 Reelle Wurzeln 41.
 Regel von Eötvös 98.
 — von Guldberg 98.
 — von Mendel 76.
 — von Trouton 97.
 Regelaufgaben 808.
 Regeleinrichtungen 590.
 Regelmethode 595.
 Regeln 573.
 Regelorgane, Tab. 592, 593.
 Regelstähle 495.
 Regelung von Druck 810.
 — — — und Menge 795.
 — — — selbsttätige 805.
 — von Mengen 818.
 Regelventil 801.
 Regenbogen 757.
 Registriervorrichtungen
 575.
 Regler, Arbeitsweise 807.
 — -Askania 814, 815.
 — -Gruppen 594.
 — mit Rückführung 807.
 — Samson- 811, 812.
 Reibungsziffer 12.
 Reichardttit 243, 246.
 Reihen, unendliche 71.
 Reihenschlußgenerator
 388.
 Reihenschlußmotor 391.
 Reineke-Kraftbügelregler
 816, 817.
 Reineke-Regler 591, 820.
 Reißfestigkeit 456, 471.
 Relais 592.
 Relativfehler 66, 67, 68.
 Remanenter Magnetismus
 357.
 Resinit 545.
 Resonanzinstrumente 582.
 Retrograde Kondensation
 206.
 Reynoldssche Zahl 727f.,
 748, 752, 755, 765, 766,
 767, 771, 784, 789, 790.
 Reziproke Leiter 22.
 Reziprokes Salzpaar 229,
 235, 239, 241, 254.
 Rezipropapier 12.
 Rheinmetall-Rechen-
 maschine 29.
 Rhodankalium, Zustands-
 diagramm 195.
 Rieco-Rauchgasprüfer 668,
 669.
 Ringrohrgeber 586.
 Ringschieber 801.
 Ringwaage 625.
 Rockwell-Härte 475.
 Röhrenfedermanometer
 630, 639.
 Röntgenstrahlen 103, 354.
 — für Metalluntersu-
 chungen 482.
 Roggatz-Getriebe 832.
 Roheisen 486.
 Rohrbruchsicherung 830.
 Rohrleitungen 504.
 — Baustoffe 562.
 Rollenplanimeter 61.
 Rostantrieb 832.
 Rostapparat von Duffek
 484.
 Rostbruchversuch 480.
 Rostfeuerungen 324.
 Rotamesser 785.
 Rotameßventil 785.
 Rotastat 818, 819.
 Rotguß, Verwendung, Tab.
 522.
 Rotnickelkies 526.
 Rotor 382.
 Rottombak 519.
 Rückschlagventil 829.
 Sättigungsdruck 146.
 — verschiedener Stoffe,
 Tab. 147.
 Sättigungskonzentration
 142.
 Säurebeständiger Guß 511.
 Säurefester Kitt 539, 549.
 Säuren, Korrosion, Tab.
 552f.
 Salpetersäure, Korrosion
 563.
 — — Tab. 552.
 Salpetersäure-Wasser,
 Schmelzdiagramm 217.
 Salvonische Waage 698.
 Salzgeschwindigkeit 747.
 Salzlösungen, Korrosion
 Tab. 552f.
 Salzsäure, Korrosion 562.
 — — Tab. 552.
 Sammler, elektrischer 430.
 Samson-Regler 608, 811.
 Sauerstoff, Bestimmung
 669.
 — Korrosion, Tab. 560.
 Sauerstoffprüfer 671.
 Saybolt-Universalzeit
 726.
 Schalenkreuzanemometer
 748.
 Schallwellen, Geschwindig-
 keit 293.
 Schaltgewichtswaagen 692.
 Schaltwaage 833.
 Schamotte 449, 536, 538.
 Schaufelmessing 519.
 Scheibenmesser 739.
 Scheibenplanimeter 62.
 Scheibenwassermesser 739.
 Scheinleistung des Wech-
 selstromes 365.
 Scheitelfaktor 364.
 Schellack 350.
 Schieber 593.
 Schienenplanimeter 61.
 Schilling-Bunsen-
 Gerät 657.
 Schlagbiegefestigkeit 351,
 472.
 Schlagproben 472.

- Schleifringläufer 401.
 Schleifringläufermotor 406.
 Schlittenplanimeter 61.
 Schlupffrequenz 402.
 Schlupfregelung 406.
 Schmelzdiagramme 192.
 — Blei-Antimon 250.
 Schmelzen 114, 115, 197.
 Schmelzkurve 191.
 Schmelzprozeß 123.
 Schmelzpunkte feuerfester Stoffe 485.
 — verschiedener Stoffe 132.
 — — Werkstoffe 550.
 Schmelzpunktserniedrigung 143f.
 Schmelztemperaturen unter Druck, Tab. 193.
 Schmelztemperaturfläche des Systems Zinn, Blei, Wismut 13.
 Schmelzvorgang 132f.
 Schmelzwärmen verschiedener Stoffe, Tab. 132.
 Schmelzzement 535.
 Schmiedemessing 518.
 Schmidt-Kolbenmesser 738.
 Schneidehaltigkeit von Stahl 504.
 Schneidenplanimeter 62.
 Schnellschlußventil 804.
 Schnellschreiber 577.
 Schönit 243, 246.
 Schoopsches Spritzverfahren 546, 547.
 Schrägröhrmanometer 623.
 Schrägspindelventil 796.
 Schraubenachsen der Kryptalle 102.
 Schreibmanometer 632.
 Schritttregler 808.
 Schubspannung 726.
 Schubtransformator 382.
 Schüttgewicht 680.
 Schutzüberzüge 545.
 Schwefel, Korrosion, Tab. 560.
 — Zustandsdiagramm 195.
 Schwefelprobe 669.
 Schwefelsäure, Herstellung der 182.
 — Korrosion 563.
 — — Tab. 552.
 Schwefelsäurefabrikation 174.
 Schwefelsäureherstellung nach verschiedenen Systemen, Tab. 183.
 Schwefelsäure-Wasser, Schmelzdiagramm 217.
 Schwefelwasserstoffschreiber 670.
 Schweflige Säure, Korrosion 565.
 — — — Tab. 552.
 Schweißbarkeit der Metalle 480.
 Schweißen 315.
 Schwerlinie 51.
 Schwimmer 732, 746.
 Schwimmermesser 783.
 Schwingungsfähiger Stromkreis 366.
 Schwingungswiderstand des Wechselstromkreises 367.
 Scleron 515.
 Scottsche Schaltung 381.
 Securitkitte 549.
 Seewasser, Korrosion, Tab. 560.
 Seewasserbeständigkeit von Aluminium 513.
 Segerkegel 484.
 Sekante 46, 47.
 Sekundärwicklung des Transformators 371.
 Selbstentzündungsklopfen 334.
 Selbstentzündungstemperatur 179, 295, Tab. 302, 303, 309.
 — von Kohlenwasserstoffen, Tab. 336.
 Selbstinduktivität 361.
 Selbstregelung 806.
 Selbstschlußventil 829.
 Selbstzündung 301.
 Shore-Härte 475.
 Shore-Skleroskop 475.
 Siccometer 587.
 Sichromal, Korrosion, Tab. 552f.
 Sicherheitsabsperrorgan 803.
 Sicherheitsventil 827.
 Siedeanalyse von Benzin 334.
 Siedekurven 191, 204f.
 Sieden 206.
 — von ternären Flüssigkeitsgemischen 223.
 Siedepunkte verschiedener Stoffe 134.
 Siedepunktserhöhung 143f.
 Siederöhre 503.
 Siemens-Dampfmesser 776.
 Siemens-Kompenso-graph 601.
 Siemens-Leistungsfaktormesser 582.
 Siemens-Martinofen 502.
 Siemens-Mengenregelung 821, 822, 824, 827.
 Siemens-Ringrohr 594, 823.
 Siemens-Wärmemengenzähler 579.
 Sigma-Stabthermostat 606.
 Signalvorrichtungen 588f.
 Sikkativ 548.
 Silasit 545, 547.
 Silber 530.
 — Phasendiagramm 189.
 Silberchlorid, Ammonchlorid-Zustandsdiagramm 210.
 Silberchlorid-Quecksilberjodid, reziprokes Salzpaar 229.
 Silbernitrat, Korrosion, Tab. 558.
 Silber-Zink-Blei, Schmelzdiagramm 223.
 Silica I und II 537.
 Silicagel, Oberfläche von 168.
 Silicasteine 537, 538, 550.
 Siliciumstahl 500.
 Sillimanit 537, 540.
 Silumin 513, 514.
 — Tab. 552f.
 Silverin 527.
 Sinterung 534.
 Skalar 53, 64.
 Skalarfeld 53.
 Skleroskop 475.
 Soda, Herstellung von 256.
 Solvay-Prozeß 257.
 Sonderbeton 543.
 Sonderbronzen 522, 523, 524.
 Sondermessing 521.
 Sonderrechenchieber 44.
 Sonderrechenstäbe 24.
 Sonderschieber 24.
 Sorbit 491.
 Spaltung von Kohlenwasserstoffen 281.
 Spaltungsvorgänge von Brennstoffen 258f.
 Spaltungswärmen 283.
 — Tab. 264.
 Spannung, effektive 364.
 Spannungslinien in Werkstoffen 457.
 Spannungsregelung 381, 425, 426.

- Spannungsregelung, stufenweise 382.
 Speisewasserregler 818.
 Spektrum des Festkörpers 106.
 Sperrflüssigkeit in Gasuhren 735.
 Spezifische Dampfgewichte 724.
 — Leitfähigkeit 352.
 — Wärme 61, 101, 259.
 — — bei konstantem Druck 110.
 — — — Volumen 110.
 — — fester Körper 104f.
 — — idealer Gase 110.
 — — realer Gase 111.
 — — Tab. 550.
 — — von Gasen 91f., 266f.
 — — von Gasen, Tab. 112.
 — — von Kohlendioxyd 269.
 — — von Stickstoff, Sauerstoff, Kohlenoxyd 267.
 — — Wasserdampf 265.
 Spezifisches Gewicht 679.
 — — Messung 653f.
 — — von Dämpfen, Tab. 721.
 — — von Flüssigkeiten 718.
 — — von Gasen, Tab. 720.
 — — von Manometerflüssigkeiten, Tab. 616.
 — — verschiedener Werkstoffe, Tab. 550.
 Spiegelebenen der Kryptalle 102.
 Spiegellineal 50, 51.
 Spiegeln, Herstellung von 252.
 Sprödigkeit des Werkstoffes 456.
 Sprossenrad 29.
 Sprühelektrode 439.
 Sprühkreisel 178, 183.
 Sprühzone der Elektrofilter 439.
 Sprungwellen 370.
 Sprungwellenprobe 375.
 Stabiles Salzpaar 229, 239, 254.
 Stabregler 605.
 Stabschwimmer 746.
 Ständer 382.
 Staffelwalze 29.
 Stahl 486.
 Stahl als chemischer Baustoff 485.
 — Alterung 488.
 — Anlassen 489.
 — austenitischer 504.
 — Chromnickel-, Tab. 496, 498, 509.
 — Chrom-Vanadin- 500.
 — Einsatzhärten 491.
 — Festigkeit von geschmiedetem 496.
 — — bei hohen Temperaturen, Tab. 508.
 — Flußstahlrohre 503.
 — für Kesselbleche 502.
 — Gefüge des vergüteten 490.
 — geschmiedeter 494.
 — Härten, Vergüten 489f.
 — Härtung 488.
 — Hitzebeständiger 507.
 — IZ- 502.
 — Kaltverformung 488.
 — Klasse A, unlegierter 494.
 — Klasse B, unlegierter 495.
 — Kornwachstum 489.
 — Korrosion, Tab. 552f.
 — korrosionsbeständiger 504.
 — KZ- 502.
 — legierter, Tab. 496, 498, 509.
 — Mangan- 500.
 — Molybdän-, Tab. 497, 499.
 — nichtrostend 504.
 — Nickel-, Tab. 496, 498, 509.
 — Nitrierhärtung 494.
 — Normalisieren 488, 495.
 — Regelstähle 495.
 — Rekristallisation 489.
 — Schneidehaltigkeit 504.
 — Silicium- 500.
 — thermische und mechanische Vorbehandlung 488.
 — troostischer, martensitischer 504.
 — VA-, Tab. 505, 506.
 — Vanadin-, Tab. 497, 499.
 — warmfester 507.
 — Warmverformung 489.
 — Wolfram-, Tab. 497, 499.
 — Zusammenstellung der Eigenschaften 492, 493.
 Stahlbeton 543.
 Stahlbronzes 524.
 Stahlguß 501.
 Stahlsand 543.
 Stammkurve 54.
 Stangenplanimeter 62.
 Stationograph 672.
 Statistik, mathematische 71, 75, 76.
 Stator 382.
 Staubverluste, Tab. 438.
 Staubwaage 836.
 Staugerät 753, 754.
 Stau-Pendelscheibe 830.
 Staurand 780.
 Staurand-Rotamesser 692, 785.
 Staurohr 612.
 Steatit 350, 450, 534, 541.
 Stefan-Boltzmannsches Gesetz 603.
 Steigungsdreieck 45.
 Steigungsmaß 44.
 Steigung 539.
 Steinmann-Wassermesser 738.
 Steinzeug 534, 539f.
 — Festigkeitseigenschaften, Tab. 540.
 — Korrosion, Tab. 552f.
 Stellakitte 549.
 Sterchamol 449.
 Stern dreieckanlauf 405.
 Sternschaltung 371, 379.
 Steuerung, elektrische 802.
 Steuerventil 802.
 Steulerkitte 549.
 Stia-Zähler 580.
 Stickstoff, Korrosion, Tab. 560.
 Störungsreaktion 290.
 Störungsstellen an Kryptallen 176.
 Stoffkette 290.
 Stoßausbeute 169.
 Stoßfestigkeit 460.
 Stoßionisation 354.
 Stoßkurzschlußstrom 374.
 Stoßzahl 90, 150, 152, 158, 289.
 Strahlrohrregler 814.
 Strahlungsmeßfehler 604.
 Strahlungs-pyrometer 598, 603.
 Strahlungsverluste 270.
 Streckgrenze 470.
 Streifenreiber 577.
 Streufluß des Transformators 372.
 Strömungsformen 729.

- Strömungsgeschwindigkeit 748, 790.
 — in Gasbrennern 318.
 Stromrichter 411f., 414.
 Stromspeicher 430f.
 Stromstärke, effektive 364.
 Stromverzweigungen 365.
 Stromwendung 385.
 Strukturanalyse mit Röntgenstrahlen 103f.
 Stufengesetz von Ostwald 297.
 Sublimation 134.
 Sublimationskurven 191.
 Substitutions-Methode 713.
 Südpol, magnetischer 354.
 Sugdensche Regel 98.
 Sulfattheorie des Bleiakkulators 431.
 Sulfurylchlorid, Korrosion, Tab. 558.
 Sylvin 243, 246.
 Symmetrie der Krystalle 102.
 Symmetrieelemente der Krystalle 102f.
 Synchronisierende Kraft 399.
 Synchronmotor 392f.
 Synchronmotoren, Belastungskennlinien 400.
 — Erregung 399.
 — Kurzschlußlinie, Leerlaufkennlinie 397, 398.
 — Parallelschaltung 398.
 Synthesen, katalytische 173.
 Synthin 175, 181, 286.
 Synthol 175, 181, 286.
 System, $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, Schmelzpunkte 535.
 — Eisen-Kohlenstoff, Eisen-Graphit 487.
 Taktgebermaschine 429.
 Tangente 46, 47.
 Tangentenkette einer Integralkurve 59.
 Tantiron 511.
 Tastzähler 576.
 Taumelmesser 735.
 Taupunkt 659.
 Taylorscher Satz 47.
 Teilchengrößenbestimmung mit Hilfe der Diffusion 165.
 Teilstrommesser 794.
 Teilteller 683.
 — Regelung 832.
 Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes 353.
 — homogener Gasreaktionen 138.
 Temperaturbeständigkeit der Werkstoffe 454.
 Temperaturdifferenzmessung 599.
 Temperatureinfluß auf die Diffusion, Tab. 166.
 Temperaturfixpunkte 597.
 Temperaturmessung 597, 599.
 Temperaturregelung 605.
 — elektrische 606.
 — mechanische 608.
 Temperaturverteilung in einer ebenen Platte 53.
 Temperguß 486.
 Temperkoble 487.
 Ternäre Flüssigkeitsgemische 223.
 Ternäres Gemisch 12.
 Tetragene Doppelsalze 239.
 Tetralin 184, 284.
 Thenardit 246, 247.
 Theorem der übereinstimmenden Zustände 95f.
 Theoretische Chemie 87.
 Theorie der Beobachtungen 80.
 Thermische Analyse 200, 250.
 — Spaltung von Kohlenwasserstoffen 281, 297.
 Thermisilid 511.
 Thermit 530.
 Thermodynamik 6, 81, 108, 258.
 Thermodynamische Wahrscheinlichkeit eines Zustandes 117.
 Thermolemente 250, 598, 599.
 Thermokette 601.
 Thermokräfte, Tab. 602.
 Thermometer 597.
 Thermometereinbau 604.
 Thermometerglas 541.
 Thermosäule 601.
 Thomas-Messer 746.
 Thompson-Lenker 637.
 Thury-System 389.
 Tiefenschwimmer 746.
 Titanweiß 548.
 Töpfereierzeugnisse 539.
 Toluolwerte von Kraftstoffen, Tab. 335, 336.
 Tombak 519.
 Topochemische Reaktion 176.
 Torsionsbeanspruchung einer Welle 35.
 Trägersubstanzen 183.
 — in der Katalyse 168.
 — für Kontakte 176.
 Trägheitsmoment 57.
 Transformator 370, 371f.
 — bei Kurzschluß 374.
 — bei Überspannung 375.
 — Belastbarkeit 376.
 — belasteter, Vektordiagramm 373.
 — Einschalten 374.
 — für Spannungsregelung 381.
 — Fünfschenkel 379.
 — Leerlauf 372.
 — mit Dreieck-Sternschaltung 380.
 — mit Kübler-Schaltung 381.
 — mit Röhrenwicklung 380.
 — mit Scottscher Schaltung 381.
 — mit Sparschaltung 380, 381.
 — mit Sternschaltung 380.
 — mit Stern-Zickzackschaltung 380.
 — Schub 382.
 — Scheibenwicklung 380.
 — Überlastbarkeit 377.
 — Wirkungsgrad 376.
 Transformatorschutz 377.
 Transformatorverluste 376f.
 Transformatorwicklungen 380.
 Transformierung von Dreiphasenstrom 379.
 Transkrystalliner RiB 465.
 Translationsbewegung 88.
 Transportband, Regelung 832.
 Trapezregel 56.
 Trapeztafel 32, 33.
 Traß 543.
 Trennfestigkeit 456.
 Treppenkurve 59.
 Triäthylamin-Wasser, Zustandsdiagramm 212.

- Trimolekulare Reaktionen 160.
 Tripelpunkt 188.
 — verschiedener Stoffe, Tab. 190, 191.
 Triplex-Mono-Apparat 667, 668.
 Trockengleichrichter 414.
 Trockentransformator mit Selbstkühlung 376.
 Trocknung von Braunkohle 443.
 Trommelapparat 483.
 Trommelmesser 736, 737.
 Trommelschreiber 577.
 Troostit 218, 220, 491.
 Tropfenform 99.
 Trountonsche Regel 97f.
 Trübungsmesser 667.
 Turbulente Strömung 729, 789.

Übercalorische Zündung 301.
 Überhitzung von Kontakten 177.
 Überkritisches Gebiet 192, 800.
 Übersetzungsverhältnis des Transformators 372.
 Überspannung 375.
 Überspannungsableiter 378.
 Überströmventil 813, 814.
 Überzüge, metallische 545.
 Umformer 411f.
 Umkehrfunktion 5.
 Umrichter 414, 424.
 Umwandlung des Schwefels 133.
 Umwandlungsdrucke polymorpher Stoffe, Tab. 195, 196, 197, 199.
 Umwandlungsgeschwindigkeit 199.
 Umwandlungspunkt 128, 249, 250, 252.
 — polymorpher Stoffe, Tab. 195, 196, 197, 199.
 — zweier fester Phasen 128.
 Umwandlungstemperatur 128f., 133, 200.
 Umwandlungswärme 129, 131.
 Umschlingungswinkel 12.
 Ungleichförmigkeitsgrad 807.

 Union-Inertgasschreiber 672.
 Unterkühlung von Schmelzen 133.
 Unvollkommene Verbrennung 301.
 Urkurve 54.
 Urmaß 716.
 U-Rohr-Manometer 613.
 Ursprungsfestigkeit 460.

 V A-Stähle, Tab. 505, 506.
 V 2 A-Extra Stahl 506.
 V 2 A H-Stahl 506.
 V 2 A N-Stahl 506.
 V 2 A-Stahl 506, 507.
 — Korrosion, Tab. 552f.
 V 2 A S-Stahl 506.
 Vakuummeter 617.
 Vakuumschalter 605.
 Vanadinstahl 497, 500.
 van der Waals'sche Gleichung 93f., 194.
 — Konstanten 94.
 Vanthoffit 246.
 Variationsstatistik 76.
 VDE-Normen 389.
 VDI-Normaldüse 1912 757.
 Vektor 53.
 Vektoranalyse 53.
 Vektordiagramm des Drehstroms 370.
 Vektorrechnung 64.
 Ventildurchflußmesser 801.
 Ventile 593, 796.
 Venturi-Messer 793.
 Venturirohr 756, 758, 805.
 Verbandsformel zur Heizwertberechnung 263.
 Verbleien, Feuerverbleiung, galvanische Verbleiung 546.
 Verbrennung 258f.
 — bei konstantem Druck 311.
 — des Kohlenstoffs 296.
 — (Heizwert), Tab. 263.
 — von Kohle und Öl 321f.
 — von Öl 331.
 Verbrennungsbereich 303f.
 Verbrennungsdichte 318.
 Verbrennungsgeschwindigkeit von Kohlenstaub 322.
 Verbrennungsgrenzen 293, 303f.
 Verbrennungskraftmaschine 332f.

 Verbrennungsmotor, Wirtschaftlichkeitsberechnung eines 79.
 Verbrennungsreaktionen 216f.
 Verbrennungsreife 295.
 Verbrennungstemperatur 265, 301.
 — Berechnung 265, 269f., 270.
 — Tab. 311.
 — theoretische 265.
 Verbrennungsverlauf auf Rosten 326.
 Verbrennungswärme 258f.
 — Berechnung 260f.
 — Bestimmung 261f.
 — Tab. 262.
 Verbund Fridopa 694.
 Verchromen 547.
 Verdampfer, Baustoffe 562f.
 Verdampferrohre 503.
 Verdampfung 133f.
 Verdampfungsprozeß 123.
 Verdampfungsvorgang 114.
 Verdampfungswärme 97, 98, 99, 115.
 — verschiedener Stoffe, Tab. 134.
 Verdichtungsdruck 333.
 Verdrängungskurven 226.
 Verdünnte Lösungen 142.
 Verdunstungsziffer 731.
 Veresterungsgeschwindigkeiten, Tab. 160.
 Vergasermotor 332f.
 Vergiftete Katalysatoren 183.
 Vergütbarkeit 215.
 Vergüten 489.
 Vergütungsstahl 494, 495, 497.
 Verkehrsfehlergrenzen 708, 709.
 Verkokung 280.
 Verlustwinkel 349.
 Vernickeln 546.
 Verschiebungsfluß, elektrischer 343.
 Verschiebungslinien, elektrische 343.
 Verschlackungsbeständigkeit 485.
 Verschleißfestigkeit 461.
 Verseifungsgeschwindigkeiten, Tab. 160.
 Verteilungsdichte in der Fehlerrechnung 75.

- Verteilungsgesetz der Eigenschwingungen eines Krystallgitters 106.
- Verzerrung der Netztafeln 31.
- Verzifferung einer Leiter 34.
- Verzinkung 545.
- Verzinnung 546.
- Verzunderung 512.
- Verzweigte Reaktionsketten 290.
- Vierstoffmischungen 244.
— Phasengleichgewichte 234.
- Violette Säure 167.
- Viskosität 726.
— von Ölen 331, 339.
- Volumenkorrektur der van der Waalschen Gleichung 93.
- Volumenmessung 733.
- Volumreduktor 742.
- Vorschriften für Wasser- und Ankerrohre 503.
- Vorverbrennung 301, 340.
- Waagen 685.**
— Aufstellung 699.
— Bedienung 703.
— Empfindlichkeit 688, 692, 701.
— Fehlergrenzen 709.
— hydrostatische 699.
— selbsttätige 695.
— Aufstellung 704.
- Wägeeinrichtungen, Genauigkeit 712.
- Wägefehler 700, 701, 703, 707.
- Wägungsgleichung 687, 690.
- Wägungsmethoden 713.
- Wärmeäquivalent 109.
- Wärmeausdehnung eines festen Körpers 101.
- Wärmeisolation, Tab. 449.
- Wärmelehre 258f.
- Wärmeleitfähigkeit 166.
— der Gase 91.
— Tab. 550.
— von Gasen, Tab. 316.
- Wärmeleitfähigkeitsapparate 669.
- Wärmeleitung 162, 166.
- Wärmethorem von Nernst 125f., 271.
- Wärmetönung 138, 139, 153.
— der Adsorption, Tab. 169.
— Temperaturabhängigkeit 259f.
- Wärmeübertragung der Gase 90.
- Wahrscheinlichkeitsrechnung 71, 75, 81.
- Walzbronzen 523.
- Walzen 489.
- Walzenkästen 183.
- Walzenplanimeter 61.
- Walzenzuteiler 831.
- Walzmessing 518.
- Wanderkurvenblätter 44.
- Wanderungsgeschwindigkeit unter dem Einfluß der Feldstärke 440.
- Wanderwellen 370.
- Wandrauhigkeit 790.
- Ward-Leonard-Schal- tung 390.
- Warmbearbeitbarkeit der Metalle 480.
- Wasser, Korrosion, Tab. 560.
— Phasendiagramm 189.
— Zustandsdiagramm 197, 198.
- Wasserabspaltung, katalytische 173.
- Wasser-Äthyläther, Zustandsdiagramm 212.
- Wasserdampf, *v*, *t*-Diagramm 722.
— Korrosion, Tab. 560.
- Wassergas 317.
— Synthesen aus 175, 285f.
- Wassergasgleichgewicht 276f.
- Wassergasprozeß 277.
- Wassergasreaktion, Gleichgewichtsberechnung, Tab. 271, 272.
- Wassergassynthese 180.
- Wasser-Isobuthylalkohol, Zustandsdiagramm 213.
- Wassermesser 738.
- Wasserminimeter 619, 620.
- Wasser-Phenol, Zustandsdiagramm 212, 213.
- Wasser-Salpetersäure, Zustandsdiagramm 217.
- Wasser-Schwefelsäure, Schmelzdiagramm 217.
- Wasserstandsanzeige 584.
- Wasserstands-Fernmessung 583.
- Wasserstandsregler 810, 815.
- Wasserstoff als Reduktionsmittel 276.
— Bestimmung 669.
— Herstellung aus Methan 277f.
— Korrosion 562.
- Wasserstoffelektrolytzähler 580.
- Wasserstoffkrankheit 518.
- Wasserstoffsuperoxyd, Korrosion, Tab. 560.
- Wasserstoffzahl von Ölen 338.
- Wasser-Triäthylamin, Zustandsdiagramm 212.
- Wattstundenzähler 579.
- Wechselfestigkeit 459, 477.
- Wechselrichter 414f.
— selbsterregter 429.
- Wechselstrom 363.
- Wechselstromerzeuger 392f.
- Wechselstromfernegeber 585.
- Wechselstrom-Kommutatormaschine 407f.
- Wechselstrommotor, Ankerwicklung 394.
— Verlustwärme 394.
— Wirkungsweise 395.
- Wechselstrom-Ohmmeter 603.
- Weglänge, mittlere freie 90.
- Wein, Korrosion 562.
- Weinsäure, Korrosion, Tab. 554.
- Weißguß 511.
- Weißmetalle, Tab. 530.
- Welle, Torsionsbeanspruchung einer 35.
- Wellenwiderstand des Wechselstromkreises 367.
- Wendel 450.
- Werkstoffbeschaffung, Wirtschaftlichkeit 452.
- Werkstoffhandbuch, Nichteisenmetalle 515.
- Werkstoffkunde 451f.
- Werkstoffprüfung, chemische Untersuchung 481.
— mechanische Prüfung 468f.
— Prüfung auf Korrosionsbeständigkeit 482f.
— technologische Proben 480f.

- Werkstofftechnische Gesichtspunkte bei Konstruktionen 466.
 Werkstoffvorschriften für Landdampfkessel 502.
 Werkstoffe 485.
 — Festigkeit 452.
 — Korrosion 462f.
 — Korrosionsbeständigkeit, Tab. 552f., 562.
 — Korrosionsschutz 465.
 — mechanische Beanspruchung 454f.
 — nichtmetallische 532f.
 — Oberflächenbehandlung 466.
 — Spannungsverteilung 457.
 — Zusammenstellung ihrer Eigenschaften, Tab. 550.
 Wheatstonesche Brücke 353, 645, 646, 820, 823, 825, 826, 827.
 Wicklungsverluste des Transformators 376.
 Widerstandsdrähte 447f.
 Widerstandsheizung 446f.
 Widerstandskommütierung 385.
 Widerstandsmessung, elektrische 353.
 Widerstandsthermometer 598, 602.
 Widerstandszahl 789, 790.
 Wiedergewinnung von Lösungsmitteln 148.
 Wiegeanlage, automatische 834, 835.
 Wiegen 684.
 — Fehlergrenzen, Tab. 707, 709.
 — von Flüssigkeiten 740.
 Wirbelstromfaktor 352.
 Wirbelstromläufer 402, 404.
 Wirbelstärke 63.
 Wirbelstromfaktor 365.
 Wirkdruck 755.
 Wirklastverschiebung 398.
 Wirkstromkomponente 365.
 Wirkungsgrad der Verbrennungskraftmaschine 332.
 Wirtschaftlichkeitsberechnung des Verbrennungsmotors 79.
 Wöhler-Kurven 2, 479.
 Wölbung 46.
 Wolframstahl 497.
 Woltmann-Messer 750, 751, 752, 791.
 Zähigkeit 165, 726.
 — des Werkstoffes 456.
 — kinematische 727.
 Zähigkeitsmessung 672.
 Zähigkeitsmodul 727.
 Zähler, elektrische 579.
 — Elektrolyt- 579, 580.
 — Gleichstrommotor 579.
 — mechanische 578.
 — Motor- 579.
 — Wechselstrommotor 580.
 Zählvorrichtungen 578.
 Zapfenlinie 41, 43.
 Zapfenpunkt 43.
 Zehnerübertragung 29.
 Zeit-Schritt-Geber 593.
 Zellenrad 831.
 Zellspeiser 831.
 Zellenwalze 831.
 Zement 535.
 Zementit 218, 220, 486, 509.
 Zementmörtel, Zerreißkörper 470.
 Zentipoise 726.
 Zerreißdiagramm 470.
 Zerreißfestigkeit 107, 455, 456, 468f.
 Zerreißprobe, statische 461.
 Zerreißversuch 468f.
 Zersetzungsreaktionen 169.
 Zickzackschaltung 379.
 Zink 529.
 — als Schutzüberzug 546.
 — Blei-Silber, Schmelzdiagramm 223.
 Zinkchlorid, Zink-Kohlenstoff-Sauerstoff, Phasengleichgewicht 231f.
 Zinksulfat, Korrosion, Tab. 560.
 Zinn 529.
 Zinn als Schutzüberzug 456.
 — Korrosion, Tab. 552f.
 — Umwandlung des 129.
 Zinnbronzen 522, 523, 524.
 Zinnchlorid, Korrosion, Tab. 560.
 Zinnpest 529.
 Zügige Beanspruchung 452.
 Zündenergie 301.
 Zündkurve bei der Kohlenverbrennung 325.
 Zündpunkt von Ölen, Tab. 339.
 Zündung 291, 292, 301f.
 — Tab. 310.
 Zündungsdruck, kritischer Tab. 309.
 Zündverzögung 306, 324, 340, 341.
 — Tab. 310.
 Zündvorgang im Dieselmotor 341.
 Zündwertprüfer 302.
 Zündzeit 324, 325.
 Zugregler 814, 817.
 Zugwechselmaschine 478.
 Zunderungsbeständigkeit 509, 512.
 Zustandsgleichung der festen Körper 104.
 — der Gase 719.
 — der idealen Gase 110
 — der realen Gase und der Flüssigkeiten 93.
 — der verdünnten Gase 84.
 — von van der Waals 94f., 111.
 Zustandsvariable im Theorem der übereinstimmenden Zustände 97.
 Zweistabwicklung 401.
 Zweistoffsystem 12, 201.
 — mit zwei Flüssigkeiten 211f.
 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik 116.
 Zwickel 59.
 Zwickelabgleich 59.
 Zwischenreaktionskatalyse 167f.

Berl-Lunge

Chemisch-technische Untersuchungsmethoden

Unter Mitwirkung zahlreicher Fachgelehrter herausgegeben von
Prof. Ing.-Chem. Dr. phil. Ernst Berl

Achte, vollständig umgearbeitete und vermehrte Auflage. In 5 Bänden.

Erster Band. Mit 583 Abbildungen und 2 Tafeln. L, 1260 Seiten. 1931.

Gebunden RM 98.— (abzüglich 10% Notnachlaß)

Chemisch-technische Laboratoriumsarbeit, allgemeine Operationen, qualitative Analyse anorganischer und organischer Verbindungen, Maßanalyse, elektroanalytische Bestimmungsmethoden, elektrometrische Maßanalyse, Aräometrie, Zug-, Druck-, Geschwindigkeits- und Mengenmessung, Temperaturmessung, Gasvolumetrie, technische Gasanalyse, metallographische Untersuchungsverfahren, optische Messungen, Röntgenuntersuchungen von Fasern und Metallen, kolloidchemische Untersuchungsmethoden, mikrochemische Analyse.

Zweiter Band.

1. Teil: Mit 215 Abbildungen und 3 Tafeln. LX, 878 Seiten. 1932.

Gebunden RM 69.—

Feste und flüssige Brennstoffe, Kraftstoffe, physikalische und chemische Untersuchungen für die Kesselspeisewasserpflege, Trink- und Brauchwasser, Abwässer, Luft, Fabrikation der schwefligen Säure, Salpetersäure, Schwefelsäure und Flußsäure, Sulfat- und Salzsäurefabrikation, Soda, Chlor, verflüssigte und komprimierte Gase, Kalisalze.

2. Teil: Mit 86 Abbildungen. IV, 917 Seiten. 1932.

Gebunden RM 69.—

Bemusterung von Erzen, Metallen, Zwischenprodukten und Rückständen, das Wägen, elektroanalytische Bestimmungsmethoden, Silber, Aluminium, Arsen, Gold, Beryllium, Wismut, Calcium, Cadmium, Kobalt, Chrom, Kupfer, Eisen, Quecksilber, Magnesium, Mangan, Molybdän, Nickel, Blei, Platin, Iridium, Osmium, Palladium, Rhodium, Ruthenium, Antimon, Silicium, Zinn, Tantal, Titan, Zirkon, Hafnium, Thorium, seltene Erden, Uran, Vanadium, Wolfram, Zink.

Dritter Band. Mit 184 Abbildungen. XLVIII, 1380 Seiten. 1932.

Gebunden RM 98.—

Tonerdepräparate, Tone, Tonwaren, Porzellan, Mörtelbindemittel, Glas, Email und Emailrohmaterialien, Bariumverbindungen, Phosphorsäure und phosphorsaure Salze, künstliche Düngemittel, Boden, Futtermittel, Calciumcarbid und Acetylen, chemische Präparate, Explosivstoffe und Zündwaren.

Vierter Band. Mit 263 Abbildungen. XXXIV, 1123 Seiten. 1933.

Gebunden RM 84.—

Gasfabrikation und Ammoniak, Cyanverbindungen, Steinkohlenteer, Braunkohlenteer, Fette und Wachse, Mineralöle und verwandte Produkte (Erdöl, Benzin, Leuchtpetroleum, Gasöl, Isolieröle, Schmiermittel, Paraffin, Vaseline, Asphalt, Erdwachs, Bleicherden), ätherische Öle, Tinte.

Fünfter Band. Mit 242 Abbildungen. XLVII, 1640 Seiten. 1934.

Gebunden RM 136.—

Rohstoffe, Erzeugnisse und Hilfsprodukte der Zuckerfabrikation, Spiritus, Branntwein, Liköre, Wein, Essig und Essigessenz, Weinsäure, Citronensäure, Milchsäure, Bier, Kautschuk und Kautschukwaren, vulkanisierte Gummiwaren, Zellstoff- und Papierfabrikation, Papier, Gespinnstfasern, Kunstseide, plastische Massen, Filme und Folien, photographische Schichten, Gelatine und Leim, Lacke und ihre Rohstoffe, Appreturmittel, anorganische und organische Farbstoffe, Gerbstoffe und Leder.

(Jeder Band ist einzeln käuflich, doch verpflichtet beim zweiten Band der Bezug eines Teiles auch zur Abnahme des anderen Teiles.)

Berl - Lunge, Taschenbuch für die anorganisch-chemische Großindustrie.

Herausgegeben von Prof. Ing.-Chem. Dr. phil. E. Berl. Siebente, umgearbeitete Auflage. 1930.
Erster Teil: Text. Mit 19 Textabbildungen. XIX, 402 Seiten. Gebunden.
Zweiter Teil: Nomogramme. Mit einem Lineal. 4 Seiten Text und 31 Tafeln. In Mappe. Text und Nomogramme zusammen RM 37.50*

Lehrbuch der Thermochemie und Thermodynamik.

Von Otto Sackur †. Zweite Auflage von Cl. von Simson, Berlin. Mit 58 Abbildungen. XVI, 347 Seiten. 1928. RM 18.—*

Thermodynamik.

Die Lehre von den Kreisprozessen, den physikalischen und chemischen Veränderungen und Gleichgewichten. Eine Hinführung zu den thermodynamischen Problemen unserer Kraft- und Stoffwirtschaft. Von Dr. W. Schottky, Wissenschaftlicher Berater der Siemens & Halske A.-G., früher ordentlicher Professor für Theoretische Physik an der Universität Rostock. In Gemeinschaft mit Priv.-Doz. Dr. H. Ulich, Rostock, und Priv.-Doz. Dr. C. Wagner, Jena. Mit 90 Abbildungen und 1 Tafel. XXV, 619 Seiten. 1929. RM 56.—; gebunden RM 58.80*

Katalyse vom Standpunkt der chemischen Kinetik.

Von Priv.-Doz. Georg-Maria Schwab, München. Mit 39 Figuren. VIII, 249 Seiten. 1931. RM 18.60; gebunden RM 19.80*

Chemische Technologie der Lösungsmittel.

Von Dr. phil. Otto Jordan, Mannheim. Mit 26 Abbildungen im Text. XIV, 322 Seiten. 1932. Gebunden RM 26.50

Theorie und Praxis der Destillation.

Von Prof. S. Young, Dublin, und mehreren Mitarbeitern. Gekürzte deutsche und mit Anmerkungen versehene Ausgabe von Dr. W. Prahl. Mit 128 Textabbildungen. XIII, 363 Seiten. 1932. Gebunden RM 26.—

Landolt-Börnstein, Physikalisch-Chemische Tabellen.

Fünfte, umgearbeitete und vermehrte Auflage. Unter Mitwirkung zahlreicher Fachgelehrter herausgegeben von Prof. Dr. Walther A. Roth, Braunschweig, und Prof. Dr. Karl Scheel, Charlottenburg. Mit einem Bildnis. In zwei Bänden. XIX, 1695 Seiten. 1923. Gebunden RM 106.—*
Erster Ergänzungsband. X, 919 Seiten. 1927. Gebunden RM 114.—*
Zweiter Ergänzungsband. Erster Teil. VIII, 506 Seiten. 1931. Gebunden RM 75.—*
Zweiter Teil. XIV, 1201 Seiten. 1931. Gebunden RM 169.—
Dritter Ergänzungsband. In Vorbereitung.

Physikalisches Handwörterbuch.

Herausgegeben von Dr.-Ing. e. h. Dr. phil. Arnold Berliner und Geh. Oberregierungsrat Professor Dr. phil. Karl Scheel. Zweite Auflage. Mit 1114 Textfiguren. VI, 1428 Seiten. 1932. RM 96.—; gebunden RM 99.60

* Abzüglich 10% Notnachlaß.