

Maschinentechnisches Versuchswesen Band II

A. Gramberg

Maschinenuntersuchungen

und das Verhalten der Maschinen
im Betriebe

Dritte Auflage



Maschinentechnisches Versuchswesen, Band II

Maschinenuntersuchungen

und das Verhalten der Maschinen im Betriebe

Ein Handbuch für Betriebsleiter
ein Leitfaden zum Gebrauch bei Abnahmeversuchen
und für den Unterricht an Maschinenlaboratorien

Von

Professor Dr.-Ing. A. Gramberg

Oberingenieur und Direktor an den Höchster Farbwerken

Dritte, verbesserte Auflage

Mit 327 Figuren im Text
und auf 2 Tafeln



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

1924

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

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1924
Ursprünglich erschienen bei Julius Springer in Berlin 1924
Softcover reprint of the hardcover 3rd edition 1924

Additional material to this book can be downloaded from <http://extras.springer.com>.

ISBN 978-3-662-38847-1
DOI 10.1007/978-3-662-39767-1

ISBN 978-3-662-39767-1 (eBook)

Vorwort zur dritten Auflage.

Die zweite Auflage dieses Buches war ein Jahr nach ihrem Erscheinen fast vergriffen. Nach der kurzen Zeit waren wesentliche Erweiterungen weder nötig noch möglich, so daß die dritte Auflage, deren endgültiges Erscheinen sich dann freilich unter der Ungunst der wirtschaftlichen Verhältnisse verzögerte, ein nur in Einzelheiten verbesserter Abdruck der zweiten ist. Namentlich wurde auf Seite 505 eine verbesserte Auswertung des Auffüllversuches gegeben, wie sie sich schon in der fünften Auflage der Technischen Messungen findet; die anschließenden Änderungen erstrecken sich bis auf Seite 511.

Die zweite Auflage war gegenüber der ersten um Abschnitte über die Abdampfausnutzung sowie über die Untersuchung der Kompressoren und der Kühlanlagen vermehrt worden.

Der Abschnitt über Abdampfausnutzung gibt die Bedingungen für diese wichtigste aber oft mißbrauchte wärmetechnische Maßnahme in einer so allgemeinen Form, wie sie meines Wissens sonst noch nicht dargestellt sind. Auch ist es eine grundsätzliche, den praktischen Verhältnissen Rechnung tragende Neuerung, daß als Ausgang das Verhältnis der beiden zu versorgenden Abnehmer und nicht die Entnahme aus der Maschine dient, deren Abmessungen ja erst gesucht werden. Die gegebenen Versuche über Kompressoren und Kühlanlagen sind älteren Datums.

Im Vorwort der Technischen Messungen ist dargelegt, daß es zweckmäßig erscheint, bei verschiedenen Auflagen der beiden einander ergänzenden Werke, nämlich der Technischen Messungen und der Maschinenuntersuchungen, die Numerierung der Paragraphen nicht zu verändern, um Verweisungen von einem Werk auf das andere für alle nebeneinander benutzten Auflagen verwendbar zu machen. Eingeschobene Paragraphen werden durch einen Buchstabenzusatz gekennzeichnet.

Möge der dritten Auflage die gleiche freundliche Aufnahme zuteil werden wie den beiden früheren und wie den Technischen Messungen, die inzwischen in einer fünften, vielfach erweiterten und umgearbeiteten Auflage erschienen; und mögen beide Bücher ihren Beitrag zum Wiederaufbau der deutschen Industrie liefern.

Frankfurt a. M., im Juli 1924.
Bürger-Straße 68.

Anton Gramberg.

Aus dem Vorwort zur ersten Auflage (1918).

Der Plan zu einem Buche über Maschinenuntersuchungen stammt aus dem Jahre 1902. Mannigfache Umstände hinderten damals die schnelle Fertigstellung, und so erschien zunächst unter dem Titel „Technische Messungen“ derjenige Teil davon als selbständiges Werk, der die Meßinstrumente und die damit auszuführenden Einzelmessungen behandelt. Das Buch über Technische Messungen, das demnach als Einleitung zu dem nun vorliegenden gedacht war, ist inzwischen in drei Auflagen erschienen und hat sich für den Unterricht wie in der Industrie ein gewisses Ansehen erworben.

An diese beiden Kreise wendet sich auch das vorliegende Hauptwerk. Für den Unterricht an Maschinenlaboratorien soll es ein Leitfaden sein, der begründete Hinweise für die Anordnung und Durchführung der Versuche gibt und der vor allem, in Ergänzung der natürlich unersetzlichen persönlichen Unterweisung, den Studierenden anleitet, wie man aus einmal gegebenen kostbaren Versuchsergebnissen alles herauszieht, was in ihnen darinsteckt. Daneben will es der herstellenden Industrie im gleichen Sinne dienen; mehr und mehr werden die fertiggestellten Anlagen durch Abnahmeversuche geprüft, mehr und mehr bestrebt man sich aber auch in der Herstellung, durch genaue Untersuchung neu geschaffener Typen in einem Versuchsfeld und durch planmäßige Prüfung der Erzeugnisse in einem Prüffeld die Eignung der Fabrikate zu erproben und ihre Güte zu steigern, sowie Unterlagen für Gewährleistungen zu erlangen. Und weiterhin bricht sich in den die Maschinen benutzenden Kreisen immer mehr die Erkenntnis Bahn, daß planmäßig und sorgsam durchgeführte Untersuchungen zu Verbesserungen der Betriebsweise — z. B. Dauer- statt unterbrochenem Betrieb oder umgekehrt — führen, die die Versuche reichlich bezahlt machen.

Dank ihrer bequemen und von der Physik her schon bereitgestellten Meßmöglichkeiten ist die Elektrotechnik die Bahnbrecherin auf allen diesen Wegen gewesen; ihr ist die Maschinenindustrie nur zögernd nach Maßgabe der Entwicklung von Meßgeräten und Meßmethoden gefolgt. Zu lernen haben in dieser Hinsicht noch die Staats- und gelegentlich die städtischen Behörden, bei denen nach meinen vielfachen Erfahrungen die einfachsten, für die Beseitigung von Fehlern unbedingt nötigen Versuche deshalb nicht gemacht werden können, weil die Barmittel für kleine Beschaffungen an Instrumenten oder gar für Bezahlung eines Sachverständigen nicht verfügbar sind. So nimmt man dauernde Betriebsausgaben in den Kauf, die im Lauf der Zeit das Vielfache von

Versuchskosten verzehren. Deshalb sei hier darauf hingewiesen, daß in den Voranschlag jeder Maschinenanlage — im weitesten Sinne des § 1, also z. B. auch bei Heizungsanlagen — ein ansehnlicher Betrag „für Versuche bei Inbetriebsetzung“ aufzunehmen ist; je nach Art und Größe der Anlage wird derselbe 15 bis 5 Prozent der Beschaffungskosten ausmachen müssen. Außerdem sei allgemein auf die Anmerkung zu § 23 hingewiesen: Da sich für den Laienabnehmer die Beschaffung der Meßgeräte oft nicht lohnt, und da selbst ein zugezogener Sachverständiger sie nicht immer zur Verfügung hat, so verpflichtete man beim Vertragsschluß den Lieferer zur Herleihung derselben in frisch geeichtem Zustand; Werke von neuzeitlicher Gesinnung werden dazu ohne weiteres in der Lage sein.

Den angedeuteten Zielen will das Buch durch Besprechung der Untersuchungsmethoden, vor allen Dingen aber dadurch gerecht werden, daß es die Ergebnisse fast durchweg eigener Versuchsreihen in großer, aber planmäßiger Mannigfaltigkeit und in sorgsamer Durcharbeitung gibt. Wer die Schwierigkeiten kennt, die das Ausmerzen aller wesentlichen Fehlerquellen schon vor der Versuchsdurchführung, aber auch bei der Auswertung bietet, der wird die in diesen Beispielen steckende Arbeit einzuschätzen wissen; möge ihr der Nutzen entsprechen.

Der Inhalt des Buches schließt sich an das im Unterricht am Danziger Maschinenlaboratorium Vorgetragene sowie an das an, was ich in einer jahrelang abgehaltenen Vorlesung über Maschinenuntersuchungen vorzubringen pflegte. Dabei war das Bestreben immer, durch den Versuch die Meßmethode zu zeigen, als Ergebnis im Ganzen aber nicht nur eine trockene Zahl, etwa einen Dampfverbrauch zu erhalten, sondern den Einfluß eines planmäßig geänderten Bestimmungstückes auf das gesamte Verhalten der Maschine. Dieses Ergebnis ist wertvoller, weil es sich dem Gedächtnis einprägt und allgemein gültig ist.

Die einzelnen Versuchsreihen sind verschieden ausführlich behandelt, diejenigen am ausführlichsten, von denen anzunehmen ist, daß sie im Unterricht gleich anfangs vorgenommen werden; da es aber zweifelhaft ist, ob nun gerade der einfache Verbrauchsversuch am Kessel, an der Dampf- oder Gasmaschine zuerst vorkommt, so sind einige Grundbegriffe an mehreren dieser Stellen erläutert, um dem Anfänger das störende Nachschlagen auf Grund von Verweisungen zu ersparen.

Da nun die Ergebnisse solcher Versuchsreihen nicht nur die besondere Maschine, sondern qualitativ die Maschinengattung und die Betriebsweise kennzeichnen, so werden sie von Wert sein auch für den, der ohne Versuche im besonderen Fall zu machen sich nur über die Wirkung geplanter Änderungen aus Analogie- und Wahrscheinlichkeitschlüssen belehren will — für den Betriebsleiter, in dessen Betrieb Maschinen laufen. Ihm gibt das Buch einen Überblick über die betriebsmäßigen Eigenschaften seiner Pflegebefohlenen, wie er ihn in der Literatur sonst meines Wissens nicht findet. Denn einerseits behandeln die Bücher der ersten technischen Literatur meist nur eine Maschinengattung, etwa die Dampfturbinen; andererseits wenden sie sich in erster Linie an den Konstrukteur und leiten ihn an, für einen bestimmten

Zweck die beste Maschine zu entwerfen; die Frage aber, wie aus einer einmal vorhandenen Maschine das Bestmögliche für den Zweck oder gar bei einer Änderung der Zweckbestimmung zu ziehen sei, ist eine ganz andere, wie an mehreren Stellen des Buches (§ 75, § 104 a. E.), besonders dargelegt wird. Hier anregend zu wirken, ist eine Aufgabe, die über den Rahmen der Maschinenuntersuchungen weit hinausgeht; ihr wird der Zusatz zum Titel gerecht . . .

Die Rechnungen sind sehr sorgsam ausgeführt, insbesondere um Schwierigkeiten durch Unstimmigkeit zwischen den einzelnen Tabellen zu vermeiden. Fehlerfreiheit ist aber leider bei Arbeiten dieses Umfanges nicht erreichbar, und so werde ich für jeden Hinweis auf stehengebliebene Irrtümer — auch sachlicher Art — dankbar sein. Besondere Sorgfalt wurde auch darauf verwendet, daß überall die gegebene Stellenzahl der Versuchsgenauigkeit entspricht, das heißt sie reichlich aber nicht übermäßig deckt. In dieser und in der übersichtlichen und sachlichen Anordnung der Figuren und Tabellen wurde Vorbildlichkeit angestrebt. Für Mitteilung von Versehen, die doch noch stehenblieben, werde ich auch hier dankbar sein. Soweit es sich aber nicht um offenbare Versehen handelt, bitte ich, selbst diejenigen Anordnungen für wohlüberlegt zu halten, die zunächst auffallen. So sind alle Rechnungen mit dem 50-cm-Rechenschieber ausgeführt. An Stellen, wo nicht andere Gründe die Genauigkeit beschränken, werden 4 gültige Ziffern gegeben, wenn die erste Ziffer kleiner als 5 ist, sonst 3 gültige Ziffern, gegebenenfalls mit einer 5 als vierte Ziffer. Dann ist also gezählt: 3570; 3571; 3572 . . . ; 0,3750; 0,3751; 0,3752 . . . ; andererseits 67 500; 67 550; 67 600 . . . ; 6750; 6755; 6760 . . . ; 0,675; 0,6755; 0,676 und so fort. An Stellen minderer Genauigkeit ist entsprechend zielbewußt zu verfahren. Beim Multiplizieren ergibt der Rechenschieber von selbst solche relativ gleiche Genauigkeit. Beim Addieren aber ist nun, um in der einer technischen Rechnung angemessenen Genauigkeit zu bleiben, zu schreiben: $3573 + 63,7 = 3637$ und nicht etwa $3636,7$; oder $261\,200 + 367,4 = 261\,600$ und nicht etwa $261\,567,4$. Beim Subtrahieren ist es oft schwer, konsequent zu sein. Solche scheinbaren Unstimmigkeiten sind also keine Versehen, sondern es handelt sich um ein sachgemäßes Verfahren, das aber nicht immer geübt wird.

Große Aufmerksamkeit habe ich den Dimensionen und der Nomenklatur zugewendet. Noch immer findet man Schreibweisen wie m/kg statt $\text{m} \cdot \text{kg}$ und PS/st statt $\text{PS} \cdot \text{st}$, oder $1 \text{ PS} = 75 \text{ m kg}$ statt: mkg/sek . Als Einheit der Leistung wurde fast durchweg 1 kW eingeführt, selten 1 PS , auch bei mechanischen Leistungen; die Verluste in einer elektrisch angetriebenen Maschine ergeben sich nur dann zwanglos als Differenzen. In Schreibweise und Benennung der Einheiten verfuhr ich nach den Vorschlägen des AEF, nur blieb für die Stunde noch 1 st stehen;¹⁾ die Wärmeeinheit heißt hiernach nun 1 kcal . — In der Nomenklatur habe ich einige Neuerungen eingeführt, die zur Klarheit viel beitragen werden: nach dem Vorbilde der Elektrotechnik unter-

¹⁾ Im Text der zweiten Auflage in 1 h geändert.

scheide ich sorgfältig zwischen Aufnahme und Verbrauch (§ 3), ferner zwischen Leistung und Belastung(sgrad). Der Düsenwert an Stelle der gleichwertigen Düse ist sprachlich viel bequemer, da man nun vom Düsenwert eines Rohrnetzes, eines Drosselorganes sprechen kann. Ferner empfehle ich die Unterscheidung zwischen Maschine, Maschinensatz, Maschinengruppe (§ 1), zwischen Pumpe, Pumpmaschine, Pumpanlage (§ 115) und ähnliche der Beachtung, ebenso die Unterscheidung zwischen Eigenschaften der Maschine selbst und Einflüssen der Belastung (§ 129, 130, 154 und viele andere); so selbstverständlich manche der Bemerkungen klingen, wenn sie im Zusammenhang vorgetragen werden — fast alle verdanken ihre Aufnahme in das Buch Mißverständnissen, auf die ich im Laufe der Jahre gestoßen bin. — Alle Maßstabangaben, z. B. die des Federmaßstabes von Indikatorgrammen, beziehen sich auf die ursprüngliche Größe; die Verkleinerung für den Druck ist dann angegeben, wenn sie wesentlich ist . . .

Inhaltsverzeichnis.

I. Allgemeines über Versuche.

a) Versuchstechnische Bemerkungen.

	Seite
1. Gegenstand der Untersuchung	1
Maschinen im engeren Sinne, maschinelle Apparate, Maschinen im weiteren Sinne; Maschinensätze; Maschinenanlage im allgemeinen, Maschinengruppen.	
2. Zweck und Art der Untersuchung	3
Abnahmeuntersuchungen auf Wirtschaftlichkeit und auf Höchstleistung. Wissenschaftliche Untersuchungen für Unterrichtszwecke oder Forschungszwecke; Eigenschaften neuer Typen für Listen und Angebote. Versuch im Beharrungszustand, Anlaufversuch, Auslaufversuch, Betriebsversuch.	
3. Wirtschaftlichkeit und Höchstleistung	5
Energiebilanz, Restverlust. Aufnahme, Hergabe = Nutzleistung, Belastung = Belastungsgrad, Höchstleistung. Wirkungsgrad, Verbrauch = spezifischer Verbrauch. Verluste vor und nach der Umsetzung, Umsatz. Betriebs- und Beschaffungskosten, Vorteile hohen Wirkungsgrades: Wirtschaftlichkeit, Gleichmäßigkeit der Fabrikation.	
4. Wirtschaftlichkeit und Höchstleistung bei Änderungen der Drehzahl oder der Belastung	9
Verschiedenes Verhalten der Kolben- und der Kreiselrad-Kraftmaschinen bei wechselnder Drehzahl, Festbremsen und Freilauf. Leistungsparabel. Langsamläufer, Schnellläufer. Steigerung der Wirtschaftlichkeit durch Erhöhung der Drehzahl bei Langsamläufern.	
5. Wirkungsgrad bei wechselnder Belastung	11
Verschiedene Abhängigkeit der Verluste von der Belastung, Überlastbarkeit. Vorübergehende und dauernde Höchstleistung.	
6. Gegenseitige Beeinflussung der Glieder von Maschinengruppen	14
Beeinflussung der Regelung durch Änderung der Charakteristik: Dampfdynamo, Pumpe. Rückwirkung von gemeinsamen Hilfseinrichtungen auf die Glieder: Dampfturbinen mit gemeinsamem Kondensator, gemeinsamer Rohrleitung; Feuerungen mit gemeinsamem Schornstein. Berücksichtigung der Einflüsse bei Nachprüfung von Gewährleistungen: Kessel in vorhandene Gruppe eingefügt.	
7. Gewährleistungen in Worten und Zahlen	17
Normen, Spielraum (Toleranz) und Fehlergrenze. Wortzusagen, Vorteile gegen Zahlenzusagen; Beispiel: Zusage der Geräuschlosigkeit.	
8. Erläuternde und bedingende Angaben	21
Zahlenzusage zur Erläuterung der Wortgarantie. Bedingende Angaben: Leistung der Kraftmaschine, Förderhöhe der Pumpe; Saugzuganlagen.	
9. Spielraum für Herstellung der Bedingungen	22
Spielraum oder Umrechnung.	
10. Umrechnung der Versuchsergebnisse auf Sollbedingungen	24
Umrechnung auf vorhandene Maschine beziehen. Beispiele: Größere Leistung einer Dampfmaschine, höhere Drehzahl einer Kreiselpumpe, Peltonrad bei vereinbarten Gefälle, Nachlassen der Drehzahl eines Flugmotors.	
11. Barometerstand und Lufttemperatur	27
Verbrennungskraftmaschinen bei Luftüberschuß und Luftmangel; Dampfkraftanlagen bei offenem und geschlossenem Betrieb. Schwungradwiderstand, Ventilator.	
12. Zustand der Maschine	29
Schmierung, Lässigkeit, Eingelaufensein. Versuchsbeispiele: Wirkungsgrad eines Flaschenzuges im Heben und Fahren. — Vorteil dimensionsloser Ergebnisse.	

	Seite
13. Gleichzeitige Erfüllung der Zusagen	34
Änderung der Rostgröße beim Planrost, beim verstellbaren Rost. Betätigung der Düsenstellung bei Mehrdüsenturbinen, der Niederdruckfüllung bei der Kolbendampfmaschine.	
14. Ausgleich der Zusagen gegeneinander	36
Schlachthofkühlanlage; Beispiel: Pumpwerk mit Ölmaschinenantrieb.	
15. Einzelzusagen und Gesamtzusage bei Maschinensätzen	41
Nachteil schlechten Zusammenpassens der Zusagen. Beispiel: Dampfdynamanlage.	
16. Zusammenfassendes über den Begriff der Wirtschaftlichkeit	42
Die Wirtschaftlichkeit als komplexer Begriff; Beispiel: Landwirtschaftliche Entwässerungsanlage. Fruchtbare und unfruchtbare Versuche.	
b) Rechtliches über Abnahmeversuche.	
17. Vertragsarten und juristische Begriffe	43
Kaufvertrag; Verkäufer, Käufer; Werkvertrag; Unternehmer, Besteller; BGB. und HGB., Handelskauf; Werklieferungsvertrag. Vertretbarkeit, Beweglichkeit. Mängel: Fehler oder Abwesenheit zugesicherter Eigenschaften. Übergabe und Abnahme, Annahme als Erfüllung, Ingebrauchnahme, Gefahrübergang, Anspruch auf Mängelfreiheit.	
18. Umfang der Mängelhaftung, Rechte und Pflichten daraus	48
Fehler und zugesicherte Eigenschaften. Unerhebliche Mängel. Nachbesserung beim Werkvertrag; Wandelung und Minderung; Schadenersatz wegen Nichterfüllung statt Wandelung oder Minderung; Schadenersatz wegen Verschuldens; Schadenersatz wegen Nichterfüllung bei verweigerter Annahme; Ersatzlieferung beim Kaufvertrag. Stichtzeiten für Mängelfreiheit.	
19. Anzeigepflicht	52
Unverzügliche Untersuchung und Anzeige beim Handelskauf; Anzeigepflicht bei Nichtkaufleuten und beim Werkvertrag.	
20. Verjährung der Mängelansprüche	53
Verjährungsfristen, Beginn derselben unabhängig von der Auffindung. Garantieverprechen. Dauernde Einbehaltung des Kaufpreises und Mängelrede. Anerkannte Mängel.	
21. Beweislast	55
Beweissicherung. Allgemeine Regel; Umkehrung durch Annahme als Erfüllung.	
22. Vertragsmäßige Abweichungen von den Gesetzesbestimmungen	57
Verkehrssitte und Vereinbarungen der Fachvereine; Spielraum (Toleranz) bei Gewährleistungen. Lieferungsbedingungen der Maschinenbauanstalten. — Berechnung des Schadenersatzes und der Minderung.	
23. Stellung und Bezahlung zugezogener Sachverständiger. Versuchskosten	60
Beauftragter des Abnehmers. Zweiter Garantiversuch. Schiedsmann, Schiedsgericht. Kosten des Verfahrens. Beschaffung der Instrumente.	
II. Wärmetechnische Versuche.	
a) Dampfkessel und -leitung.	
24. Wirkungsgrad und Verdampfung eines Dampfkessels	63
Zur Verfügung gestellte und entwickelte Wärmemenge; nutzbar gemachte Wärmemenge, Wirkungsgrad des Kessels. — Wärmemenge zur Verdampfung von 1 kg Wasser, Wärmehalt. Verdampfungszahl, brutto und netto, Normaldampf. Nutzwärme aus 1 kg Brennstoff.	
25. Abmessungen und Beanspruchung der Kesselteile	67
Beanspruchung der Heizfläche; Kleinkessel, Überhitzer. Beanspruchung der Rostfläche. Freie Rostfläche.	
26. Wärmehalt von Dampf	68
Benutzung der Dampftabellen, Beispiel für Sattdampf, für überhitzten Dampf. Anteil des Kesselkörpers und des Überhitzers an der Verdampfung.	
27. Zahlenbeispiel eines Verdampfungsversuches	71
Beispiel eines Originalprotokolles, eines Versuchsberichtes.	
28. Gewährleistungen, Umrechnungen	75
Zusagen und Bedingungen. Abweichungen in Temperaturen, Druck, Kohlenbeschaffenheit. — Gewährleistung nach der Verdampfungszahl.	

	Seite
29. Genauigkeit der Versuche, Versuchsdauer	78
Normenvorschrift. — Meßtechnisch: Ungenauigkeit aus der Kohlenmessung, aus der Wassermessung. Betriebstechnisch: Einfluß mangelnden Beharrungszustandes. Berücksichtigung der besonderen Betriebsverhältnisse. — Amerikanische Regeln.	
30. Zur praktischen Versuchsdurchführung	83
Vorbereitungen, Sicherung gegen Versuchsfälschung. Anbau der Meßeinrichtungen. Beschickung, Abschlacken, Speisung planmäßig. — Messung des Speisewassers, Speisung mit Pumpe oder Injektor. — Mittergerissene Feuchtigkeit, Speisewasservorwärmung. — Gesamte Maßnahmen beim Versuch.	
31. Wärmeverhältnisse eines Dampfkessels; Wärmebilanz	90
Feuertechnische Ablesungen bei einer Kesseluntersuchung. In den Kessel eingeführte Energiemengen, den Kessel verlassende Energiemengen.	
32. Berechnung der Rauchgasmenge aus der Brennstoffanalyse	93
Genauere Rechnung aus der Brennstoffanalyse. Unvollkommene Verbrennung. — Einfachere Rechnungsweise.	
32a. Zahlenbeispiel einer Wärmebilanz	96
Heizwert, Speisung. Im Dampf nutzbar, mit den Rauchgasen abgehend. Spezifische Wärme der Gase. Wärmebilanz.	
33. Allgemeine Beobachtungen während des Versuches	99
Beziehungen der Ablesungen zueinander. — Verteilung der Wärmeübertragung über die Heizfläche hin: im Flammrohr, im Überhitzer. Anpassung der Ergebnisse aneinander. — Fehlender Beharrungszustand, Wärmespeicherung des Mauerwerks, Beispiel.	
34. Einfluß der Kesselbelastung	104
Versuchsreihe. Wirkungsgrad, Temperatur im Feuerraum, in den Zügen. Luftüberschuß. Druckverlust der Rauchgase im Überhitzer.	
35. Genauigkeit von Kesselversuchen, Beharrungszustand	109
Gesetzmäßigkeit: Ansteigen der Verdampfungszahl mit der Zeitdauer: Einlaufdauer sehr groß.	
36. Höchstleistung des Kessels; Abhängigkeit von der Zugerzeugung . .	112
Schornsteinzug, Begrenzung der Zugstärke und der Leistung. Begrenzung der Höchstleistung aus anderen Ursachen. Verantwortlichkeit für mangelhaften Zug. Zulässige Vorwärmerleistung.	
37. Künstliche Zugerzeugungsanlage	118
Zugerzeugungsanlage als Gasfördereinrichtung.	
38. Verluste in einer Dampfleitung	120
Beispiel: wechselnde Dampfantnahme. Leitungskondensat; Wärmeverlust, Verlust an Arbeitsfähigkeit.	
b) Verbrennungsvorgänge.	
39. Allgemeines	123
Doppelte Wirkung des Dampfkessels: Verbrennung, Wärmeübertragung.	
40. Verbrennung von Koks im Schachtofen	123
Versuchseinrichtung, schnelles Absaugen der Gase. Berechnung von c und n aus k und o , weiterhin von l sowie des Abbrandes b . Anteil der Höhengichten an der Wärmeerzeugung. Neutrale Zone. Nicht Luftmangel ist Ursache unvollkommener Verbrennung, sondern unrichtige Feuerführung. Ursachen von Luftüberschuß. Gleichgewichtsdrucke zwischen k und c , mit und ohne C .	
41. Verbrennung von Steinkohle auf dem Wanderrost	131
Entgasung von Kohlenwasserstoffen, Verbrennung von Koks. Versuche.	
42. Zugerzeugung im Schornstein	134
Versuchseinrichtung. Ursachen mangelhafter Zugwirkung. Versuchsreihe an einem Schornstein. Temperaturverlust der Gase im Schornstein.	
c) Wärmeübertragung.	
43. Wärmeleistung eines Wasserwärmers	137
Gegenstrom und Gleichstrom. Versuchseinrichtung. Wärmehalt von Dampf und Wasser, Wirkungsgrad des Wasserwärmers. Versuchsbeispiel. Wärmebilanz in drei Formen.	

44. Versuchsreihen	Seite 143
Reihe bei unverändertem Wasserdurchgang; Druckabfall des Dampfes. Reihe bei Höchstleistung. Höchstleistung des eingebauten Apparates, Druck begrenzt. Gleichstrom im Vergleich zu Gegenstrom. Nebeneinflüsse.	
45. Dampfgeschwindigkeit, Wärmeübergangsverhältnisse	149
Dampfgeschwindigkeit an verschiedenen Stellen des Rohres. Wärmeübergang ebenso.	

III. Wärmekraftmaschinen.

a) Allgemeines über Dampfkraftmaschinen.

46. Dampfverbrauch und Wirkungsgrad von Dampfkraftmaschinen . . .	152
(Spezifischer) Dampfverbrauch, Dampfaufnahme; wirtschaftlicher Wirkungsgrad. — Indizierte Leistung, thermischer und mechanischer Wirkungsgrad.	
47. Gütegrad ohne und mit Beachtung der Maschinenabmessungen . . .	154
Theoretischer Wirkungsgrad des der Maschinenwirkung zugrunde liegenden Arbeitsprozesses; thermischer Gütegrad der Maschine; wirtschaftlicher Gütegrad der Maschine oder eines Maschinensatzes. Indizierte Leistung, Verlust durch unvollkommene thermische Umsetzung, thermischer Wirkungsgrad; Reibungsverlust, mechanischer Wirkungsgrad. Ideale Vergleichsprozesse: Carnotprozeß; adiabatische Expansion bis zum Gegendruck, bis zum vorgeschriebenen Endvolumen.	
48. Versuchsausführung	157
Messung der Dampfmenge bei Kondensation und Auspuff. Zustand des Frischdampfes. Andere Messungen: Arbeitsausbeute, Drehzahl.	

b) Dampfturbine.

49. Versuchsausführung und Beispiel eines Verbrauchsversuches	160
Versuchsanordnung; Ablesungen; Gang der Auswertung, Verluste in den Zuleitungen zum Schaltbrett; Fremderregung. Ermittlung von i aus dem i - s -Diagramm. Ablesungen an den integrierenden Instrumenten u. a. m.	
50. Versuchsreihe mit wechselnder Belastung; Kondensation	164
Einstellung der verschiedenen Belastungen; Leerlauf des Satzes. Allgemeine Beobachtungen.	
51. Dampfturbine im Auspuffbetrieb	168
Vergleich zu der Reihe bei Kondensation: Gleiche Dampfaufnahme, kleinere Leistung.	
52. Dampfaufnahme bei Auspuff und Kondensation, abhängig nur vom Drosseldruck	170
Gleiche Enddampfaufnahme bei Höchstleistung; aufgenommenes Dampfvolumen.	
53. Untersuchung einer Dampfturbine mit Gegendruck	171
Temperaturabfall im Drosselorgan (Ergänzung fehlender Ablesungen).	
54. Nachregelung der Düsen mit der Hand	174
Gleichzeitige Gültigkeit aller Garantien. Einstellung auf Vollast bestmöglich; Überlast. Verhalten der Turbine mit verschiedener Einstellung der Düsen.	
55. Aufgenommenes Dampfvolumen	176
Berechnung. Versuchsreihen mit Kondensation, mit Gegendruck.	
56. Belastungsgrad; dimensionsloses Diagramm	177
Belastungsgrad; relative Dampfaufnahme, relativer Dampfverbrauch. Kondensations-, Auspuff-, Gegendruckbetrieb bei verschiedener Belastung.	
57. Beurteilung von Dampfturbinen nach dem Gütegrad	179
Gütegrad; theoretisch günstigste Arbeitsausbeute. Wärmegefälle. Wirkungsgrad der Umsetzung. Energieverwendung im i - s -Diagramm.	
58. Übergang zum Auspuffbetrieb bei einer Kondensationsturbine	186
Kontinuierlicher Übergang, Leistung konstant, Dampfaufnahme konstant.	
59. Dampfturbine bei wechselnder Drehzahl	189
Unveränderter Drosseldruck, Drehmoment und Leistung. Leistungsparabel der Turbine, des gekuppelten Satzes. Versuchsausführung: Turbine festgebremst. Ergänzung der abfallenden Äste der Leistungsparabeln unter Benutzung der Verluste, Abbildung derselben.	

	Seite
60. Zustandsänderung des Dampfes in der mehrstufigen Dampfturbine	195
Reihe wechselnder Drehzahl bei unveränderter Dampfaufnahme; Verlauf des Druckes, der Temperatur; Verlauf im <i>i</i> s-Diagramm. Arbeitsverteilung auf die einzelnen Räder. — Einfluß wechselnden Gegendruckes auf die Zustandsänderung in den Turbinenstufen.	
61. Zustandsänderung des Dampfes innerhalb einer Düse; Ermittlung der Düsenquerschnitte	199
Ableitung aus dem <i>i</i> s-Diagramm; Ableitung rechnerisch. Formeln für Ausfluß von Dampf. Wann beeinflußt Gegendruck die Dampfaufnahme der Turbine nicht; Verteilung des gesamten Druckabfalles auf die Stufen.	
62. Grenzvakuu einer Dampfturbine	206
63. Umrechnungen auf vorgeschriebene Bedingungen	207
Abweichungen der Drehzahl, des Druckes und der Temperatur des Frischdampfes, Höher- und Minderwerte des Gegendruckes.	
64. Beispiel eines Versuchsberichtes	207
Umrechnung auf Sollverhältnisse.	
c) Kolbendampfmaschine.	
α) Verbrauchsversuche.	
65. Beispiel eines Verbrauchsversuches	209
Schematische Darstellung der Versuchsanordnung. Messung der Dampfaufnahme — Mantel- und Arbeitsdampf. Druckmessungen. Aufnehmerkondensat. Beispiel.	
66. Originalprotokoll und Versuchsbericht	212
Ablesungen von Zustandswerten, verschoben gegen die von Summen. Zeitliche Verteilung der Ablesungen. Protokoll, Bericht.	
67. Versuchsreihe mit veränderlicher Belastung (Kondensation)	214
Bespreehung der Ergebnisse. Leerlaufversuch. Aufnahme, Nutzleistung, Verbrauch.	
68. Versuchsreihe bei Auspuffbetrieb	221
Ergebnisse. Aufnahme, Nutzleistung, Verbrauch.	
69. Indizierte Leistung, Verbrauch, mechanischer u. thermischer Wirkungsgrad	222
Indizierte Leistung. Beispiel. Getriebeverluste nach Leistung und Moment. Versuchsreihe bei veränderlicher Belastung, Ergebnisse. Reglerstand, Höchstleistung. Mechanischer Wirkungsgrad, Aufnehmerdruck, Druckausnutzung.	
70. Reglerstand und Füllung	228
Gegenseitige Zuordnung. Messung der Füllung.	
71. Ausnutzbare Leistung und Gütegrad	229
Carnotprozeß. Adiabatischer Vergleichsprozeß. Verwendung des <i>i</i> s-Diagrammes. Wirkungsgrad des Vergleichsprozesses, Gütegrad der Dampfmaschine mit und ohne Beachtung der Zylindermaße. Beispiel: Gütegrad bei verschiedener Belastung, bei Kondensation und Auspuff.	
72. Einfluß des Dampfzustandes	236
Äußere und innere Betriebsbedingungen. Einfluß wechselnder Überhitzung, Beispiel. Einfluß wechselnden Druckes, Beispiele für konstante Leistung, für konstanten Belastungsgrad. Einfluß des Gegendruckes.	
73. Einfluß der Drehzahl	242
Regelung der Drehzahl. Beispiel für konstante Leistung, für konstante Hochdruckfüllung. Wirtschaftlichkeit kleinerer oder höherer Drehzahl bei verlanuter Leistung, bei vorgeschriebenem Drehmoment bzw. vorgeschriebener Arbeit (Pumpwerk, Kühlanlage). Betriebsversuche lohnen sich. Folgerungen für Abnahmeversuche.	
74. Einfluß der Niederdruckfüllung	247
Ausführung der Änderung. Beispiel für konstante Leistung, für verschiedene Leistung. Diagrammformen.	
75. Einfluß der Kompression bei verschiedenem Gegendruck	251
Grundsätzlich beste Diagrammform für Kondensations- und Auspuffbetrieb, Kennzeichen: Vermeidung irreversibler Vorgänge. Vorzüge geringer Kompression. Vorsicht beim Steigern des Gegendruckes. Versuchsausführung. Versuchsergebnisse: Einfluß sinkenden Kondensatordruckes, verschieden hoher Kompression, Leistung oder H D-Füllung konstant. Günstigerer Dampfverbrauch, höhere Belastungsfähigkeit bei kleiner Kompression. Verallgemeinerung. Theoretisches.	
76. Energiebilanz der Dampfkraftanlage; der Dampfmaschine allein	257

	Seite
β) Das Indikator diagramm.	
77. Das Rankinisieren der Diagramme	260
Gesamtdiagramm durch Zusammenlegen.	
78. Völligkeit, Dampfzustand im Zylinder	263
Vergleichsprozeß. Einfluß der Überhitzung. Einzeichnen der Sättigungslinie, arbeitendes Dampfgewicht. Entropiediagramm. Einzylinder- und Verbundmaschine.	
79. Verlauf der Expansionslinie	267
Expansionslinie aus dem schädlichen Raum heraus. Dörfelsche Charakteristik. Logarithmisches Verfahren. Heißdampf und Satttdampf.	
80. Abhängigkeit des Diagrammes von der Steuerung	270
Theoretische Gestalt. Einfluß der Drehzahl; Verlustflächen, Vorein- und Vorausströmung. Verlustflächen durch Zu- und Ableitung.	
81. Abhängigkeit des Diagrammes von den Betriebsbedingungen	272
<i>Ex</i> -Punkt: erforderliche Leistung; <i>Ko</i> -Punkt: Ruhe, Wirtschaftlichkeit, Höchstleistung. <i>VA</i> -, <i>VE</i> -Punkt: Verlustflächen. — Einfluß der Belastung, des Gegendruckes, der Drehzahl.	
82. Abhängigkeit der Diagramme von Verbundmaschinen von der Aufnehmerspannung und seinen Schwankungen	274
Normales Diagramm der Querverbundmaschine, der Längsverbundmaschine.	
83. Dampf- und Steuerungsdiagramm	278
Beziehung zwischen Kolben- und Kurbelweg. Feder im Indikator für den Kraftschluß. Voreilwinkel. Überdeckung, Exzentrizität. Relative Öffnungsdauer. Versuchsmäßiger Beleg. Auskurbelung einer Schiebersteuerung.	
84. Änderungen der Einsteuerung	282
Zusammenwirken von Änderungen des (mittleren) Öffnungs-Zeitpunktes und der Öffnungsdauer. Praktische Verwirklichung der Verstellung. Einfluß anderer Verstellungsmöglichkeiten.	
85. Bewegung der Steuerorgane	284
Auftragung abhängig vom Kolbenweg. Zwangsläufige Organe: Auskurbeln; Schieberellipse. Freie Organe: Aufzeichnen; Ventilerhebungsdiagramme. — Wirkung der Wälzhebel, der Puffer ausklinkender Steuerungen.	
86. Dampfbewegung in den Steuerorganen	287
Formeln für Ermittlung der Dampfgeschwindigkeit. Beispiel eines Rechnungsganges: Freifall-Ventilsteuerung; Dampfgeschwindigkeit und Druckverlust. Zwangsläufige Ventilsteuerung, Drehschiebersteuerung.	
87. Fehler im Dampfdiagramm	296
Fehler beim Indizieren (Techn. Mess. § 90—92), Fehler in der Einsteuerung; Instandhaltungsfehler der Maschine: Undichte Kolben, undichte Steuerorgane; versuchsmäßige Herstellung der Fehler. Überschleifung der Indikatorbohrung durch den Kolben.	
d) Abdampfausnutzung.	
87a. Allgemeine Bedingungen	299
Maximaler Wirkungsgrad. Verlangte Temperatur für Heizprozesse in der Niederdruckstufe. Zwei Netze mit Energie zu versorgen; getrennte Betriebsweise, gekoppelter Betrieb. Reiner Gegendruckbetrieb, reine Abdampfausnutzung, Zwischendampfenahme; allgemeiner Fall.	
87b. Regelung	305
Wirkung der Regelung, kombinierter Drehzahl-Gegendruckregler. Labile Beharrungszustände bei einfacher Drehzahlregelung.	
87c. Wirtschaftlichkeit	309
Theoretisch zu erwartende wirtschaftliche Ergebnisse. Kennzahl der zu versorgenden Betriebe $\epsilon = 1$ (reiner Gegendruckbetrieb); $\epsilon < 1$ (Dampfzusatz); $\epsilon > 1$ (Arbeitszusatz). Zahlenbeispiel. Steigerung des Kesseldruckes.	
e) Verbrennungskraftmaschinen.	
88. Verbrauch und Wirkungsgrad	319
Brennstoffverbrauch; Reduzierung auf normalen Heizwert; wirtschaftlicher Wirkungsgrad. Bezugnahme auf die Kraftmaschine und auf den Maschinensatz als Ganzes. Thermischer und mechanischer Wirkungsgrad.	

	Seite
89. Beispiel eines Verbrauchsversuches an einer Gasdynamo	321
Versuchsordnung und -ausführung. Beharrungszustand. Protokoll, Auswertung. — Verbrennung von Schmieröl im Zylinder.	
90. Gasdynamo bei veränderlicher Belastung	324
Leerlauf des Maschinensatzes; Änderung der Gasaufnahme, des Verbrauches und des wirtschaftlichen Wirkungsgrades. Riemenschlupf.	
91. Laboratoriumsschaltung für Gasdynamountersuchungen	326
Schaltung zum Anlassen, für Betrieb mit Fremd-, mit Selbsterregung, gegen Widerstand und gegen Spannung.	
92. Bremsung einer Gasmaschine	329
93. Indizierte Leistung, thermischer Wirkungsgrad	330
Indizierte Leistung beim Viertakt und beim Zweitakt. Schwachfederdiagramm; Arbeits- und Förderfläche. Beispiel eines Versuches, einer Versuchsreihe bei ver- änderlicher Belastung. Versuche bei negativer Nutzleistung. — Getriebeverlust; Beispiel einer systematischen Fehlerberichtigung, Verlust in der Riemenüber- tragung. Vorsicht beim Ermitteln von Nutzleistungen unter Verwendung von Leerlaufversuchen.	
94. Theoretische und praktische Festlegung des Begriffes der indizierten Leistung	337
Abzugsverfahren. Verhältnisse bei Zweitakt-, bei Viertaktmaschinen, theo- retisch und meßtechnisch. Forderung der Vergleichbarkeit. — Ausdehnung der Ergebnisse auf andere Maschinen mit Hilfseinrichtungen und -zylindern: Dampf- kraftanlage mit Kondensation.	
95. Volumetrische und Regelungsverhältnisse der Gasmaschine	340
Lieferungsgrad, volumetrischer Wirkungsgrad; thermometrischer Füllungsgrad. Messung der Luftaufnahme. Beziehung zwischen Lieferungsgrad und Leistung; Bestimmung der Höchstleistung durch volumetrischen Wirkungsgrad.	
96. Höchstleistung abhängig von Lufttemperatur und Barometerstand .	344
Einfluß von Barometerstand und Temperatur auf die Höchstleistung. Berück- sichtigung der Abweichungen vom Normalzustand.	
97. Wärmeumsatz in der Gasmaschine	345
Wärmebilanz; zugeführte Wärme; indiziert, ins Kühlwasser, in den Abgasen; Beispiel, Fehlbetrag; doppelte Verrechnung der Kolbenreibung. Wärmeverlust des Kühlmantels.	
98. Einfluß der Zündungszeit	349
Vorversuch: Beziehung zwischen Zündung und Kurbelstellung bei verschiedener Einstellung. Mangelhafte Kompression bei falscher Zündung; Wirtschaftlichkeit bei konstanter Leistung, Höchstleistung. Temperatur der Auspuffgase. Günstigste Diagrammform. Wärmebilanz.	
99. Einfluß des Mischungsverhältnisses	354
Grenzen der Änderung. Änderung der Diagrammform. Wirtschaftlichkeit bei konstanter Leistung, Höchstleistung. Vergleich zwischen Füllungs- und Gem- ischregelung.	
100. Abgaszusammensetzung nach dem Mischungsverhältnis	359
Berechnung des theoretischen Luftbedarfes. Formeln für Berechnung der Ab- gaszusammensetzung aus der Mischung.	
101. Abgleichung von Mischung und Zündzeitpunkt gegeneinander . . .	361
Versuchsreihe mit Luftüberschuß und mit Luftmangel. Einstellung nach der Diagrammform, Spitzenabstand. — Gleichwertigkeit von Luft und Brennstoff in thermischer Hinsicht; thermischer Wirkungsgrad bezogen auf Luft; Mischungszahl.	
102. Einfluß der Drehzahl	366
Beeinflussung der Drehzahl durch Regler-Veränderung. Versuchsreihe mit kon- stanter Leistung; Drehmoment. Versuchsreihe mit Höchstleistung. Leistungs- charakteristik.	
103. Einfluß der Kühlwassermenge	369
Änderung des Getriebeverlustes, Einfluß auf die Nutzleistung.	
104. Einfluß des Verdichtungsgrades	373
Verdichtungsverhältnis, Kompressionsverhältnis, Versuchsreihen: bei Höchst- leistung, Zündung unverändert oder nachgeregelt, bei konstanter Leistung.	
105. Gütegrad der Verpuffungsmaschine	376
Theoretischer, thermischer Wirkungsgrad, Gütegrad. Abhängigkeit von der Verdichtung, von der Belastung. Drucksteigerung nahezu der Adiabate ent- sprechend.	

	Seite
106. Ansaug- und Kompressions-Endtemperatur, Gewicht der Ladung	382
Ladungsgewicht = Füllungsgewicht + Gewicht der Rückstände. Ansaugendtemperatur, Kompressionsendtemperatur, beide bei verschiedener Verdichtung. Mischungstemperatur von Füllung und Rückständen.	
107. Temperaturverlauf im Gasmaschinenzylinder	386
Volumen-Temperaturdiagramm.	
108. Entropiediagramm der Gasmaschine	388
Berechnung der Entropie.	
109. Verbrauch von Ölmotoren	394
Messung der Ölaufnahme. Hauptbrennstoff und Zündöl; Umrechnung nach dem Heizwert, nach dem Preis. Indikatordiagramme; Schwachfederdiagramme. Verrechnung des Verbrauches der Einblaseluftpumpe.	
110. Andere Versuchsreihen am Ölmotor	397
Änderungen am Zeitpunkt des Einblasens; Wirkung wechselnden Einblaseüberdruckes, Versuchsreihe bei unveränderter Leistung, bei Höchstleistung. Weitere Auswertungen wie am Gasmotor.	
111. Diagrammform, Einsteuerung der Viertaktmaschinen	400
Voröffnung und Schlußnacheilung der Ventile. Folgen falscher Einsteuerung. Besonderheiten an Diagrammen: Zündung aussetzend, Anlassen mit Dekompression, Selbstentzündung des Gemisches.	
112. Verbrennungskraftmaschinen hoher Drehzahl	403
Normale Leistungscharakteristik; Drehmoment. Bedeutung mangelhafter Ventilquerschnitte und mangelhafter Öffnungsdauer.	

IV. Arbeitsmaschinen.

a) Kolbenpumpe.

113. Leistung, Arbeitsaufnahme, Wirkungsgrade der Pumpe und der Pumpanlage	405
Nutzleistung aus dem Gewicht, aus dem Volumen. Leistungsaufwand zum Antrieb der Pumpe; der Pumpmaschine. Indizierte Leistung; hydraulischer und mechanischer Verlust und Wirkungsgrad.	
114. Messung der Flüssigkeitsmenge, volumetrischer Wirkungsgrad der Kolbenpumpen	407
Volumetrischer Wirkungsgrad, Messung desselben; Berechnung der Flüssigkeitsförderung mit seiner Hilfe. Beispiel.	
115. Beispiel für die Bestimmung der Wirkungsgrade	409
Versuchsordnung mit Hochbehälter. Nutzbare Förderhöhe; manometrischer Förderdruck, Beachtung der Manometerhöhe. — Bestimmung der indizierten Leistung bei gewöhnlichen, bei Stufenkolbenpumpen, Druckraumdigramme. — Beispiel für Berechnung der Wirkungsgrade.	
116. Kolbenpumpe bei veränderter Drehzahl.	413
Wassermenge, manometrische Förderhöhe, Leistungen, Drehmomente und Wirkungsgrade.	
117. Kolbenpumpe gegen wechselnden Druck	415
Versuchsordnung für Laboratoriumszwecke mit Drosselorgan. Beharrungszustand. Leistungen und Wirkungsgrade.	
118. Kolbenpumpe gegen konstanten hydraulischen Widerstand	418
Zusammenhang zwischen Wassermenge und Förderhöhe, Kennlinie des hydraulischen Widerstandes. Änderung der Drehzahl bei Dampfantrieb, bei elektrischem Antrieb. Grenzen der Versuchsreihe.	
119. Leistungsregelung der Dampf-Kolbenpumpe	421
Verhalten der unbeaufsichtigten Maschine bei Änderungen des hydraulischen Widerstandes: Hat die Regelung den Maschinensatz in der Gewalt? Düsenwert des Widerstandes (gleichwertige Düse).	
120. Ventilhub und Druckverlust	425
Konstruktives über Aufnahmen von Ventilerhebungsdiagrammen. (Größter) Ventilhub in Abhängigkeit von der Drehzahl, vom Förderdruck. Druckverlust im Ventil aus den Diagrammen.	
121. Druckverlust, Ventilbelastung und Wassergeschwindigkeit	428
Berechnung der Ventilbelastung; Ventilvorbelastung. Druckverlust daraus berechnet und mit dem beobachteten verglichen. Wassergeschwindigkeit im Ventilsplatt. — Vorbelastung der Ventilfläche verändert.	

	Seite
122. Wassergeschwindigkeit und Ventilbewegung während eines Spieles	432
Ventilerhebungsdiagramm über dem Kurbelweg, über der Zeit. Wassergeschwindigkeit im Ventilspalt, Geschwindigkeitshöhe. Flächenbelastung des Ventiles. Wirkung der Reibung und der Massenkraft. Umzeichnen des Ventilerhebungsdiagrammes.	
123. Wirkung der Windkessel. Resonanzerscheinungen in den Rohrleitungen	435
Windhaube ohne Luft; Windkessel ohne Luft. Resonanzschwingungen zwischen Windhaube und Windkessel: Diagrammformen, Höchstdruck, Arbeitsverlust. Rechnerische Ermittlung der gefährlichen Zustände: Eigenschwingungszahl der Wassersäule bei verschiedener Anordnung der Luftpolster. Resonanz zweiter Ordnung. Zeitdiagramme. Abhilfe gegen Resonanzschwingungen der Druckleitung; Luftleitungen. Gasmaschinenantrieb. Ventilbewegung. Resonanzschwingungen in der Saugleitung; Überförderung. Schwungradlose Pumpen.	
124. Fehler im Pumpengang	445
Luft im Pumpenraum, Volumetrischer Wirkungsgrad, Ventilbewegung; Undichtigkeit der Ventile.	
b) Kreiselpumpe.	
125. Kreiselpumpe gegen überwiegend statischen Förderdruck	447
Versuchsanordnung; Zustand des Förderns, des Nichtförderns (Anlauf). Förderdruck abhängig von der Drehzahl, abhängig von der Fördermenge; Wirkungsgrad. Gang der Rechnung. Erwärmung durch die Verluste.	
126. Kreiselpumpe gegen rein hydraulischen Widerstand	452
Versuchsanordnungen. Düsenwert des Widerstandes. Kennlinie des Widerstandes. Druckmessung.	
127. Kreiselpumpe bei unveränderter Drehzahl.	457
Demonstrationsversuch: Unterschiede zwischen Kreisel- und Kolbenpumpe beim Drosseln; Kreiselpumpe nicht zwangläufig. — Kennlinie der Pumpe, des Elektropumpensatzes. Kennlinie für die Wirkung des Schieberabschlusses.	
128. Allgemeines Verhalten der Kreiselpumpe	459
Abgleichung zwischen den Kennlinien der Kreiselpumpe und der Rohrleitung.	
129. Parallelarbeiten von Kreiselpumpen	460
Änderung der Drehzahl der einen Pumpe; Wasserförderung der geregelter Pumpe; gesamte Förderung fast unverändert; Leistungsaufnahme. — Keine Beeinflussung bei statischer Förderhöhe.	
130. Abspumpversuch mit einer Heber-Kreiselpumpe für kleine Förderhöhe; geodätische und manometrische Förderhöhe	462
Versuch im Dauerzustand, Abspumpversuch. Ermittlung der ausgepumpten Wassermenge. Verlust in der Rohrleitung. — Wirtschaftlichste Förderung einer insgesamt festliegenden Wassermenge bei hydraulischem und geodätischem Widerstand; Verzögerung im Wasserzu- und -ablauf, Absinken des Grundwasserspiegels.	
131. Betriebszustand der Kreiselpumpe	467
Einstellung des Ringspaltes, Lässigkeit.	
132. Andere Flüssigkeiten als kaltes Wasser	468
Einfluß des spezifischen Gewichtes, der Zähigkeit auf den Wirkungsgrad und bei Kreiselpumpen auf die Lässigkeit.	
c) Ventilator.	
133. Leistung, Aufwand, Wirkungsgrad beim Komprimieren und Saugen	468
Nutzleistung beim Komprimieren, beim Saugen, Kompressionslinie, Erwärmung des Gases. Kompressoren und Ventilatoren.	
134. Anrechnung der Geschwindigkeitshöhen	469
Geschwindigkeits- oder dynamischer Druck, statischer Druck, Gesamtdruck. Vorgeschwindigkeit; Endgeschwindigkeit, Diffusorwirkung. — Meßtechnisches.	
135. Ausführung der Messungen, Beispiel	572
Luftmengenmessung, Druckmessung. Laboratoriumsanordnung zur Untersuchung von Ventilatoren. Beispiel einer Wirkungsgradbestimmung an einem Hochdruckventilator.	
136. Ventilator bei wechselnder Drehzahl	576
Ansteigen von Luftmenge und Gegendruck; Temperatursteigerung theoretisch und wirklich. Energiebilanz des Ventilatorbetriebes. — Bestimmung der Luftmenge aus der Temperaturerhöhung.	

	Seite
137. Düsenwert des Widerstandes (gleichwertige Düse)	479
Düsenwert und äquivalente Öffnung. Relativer Düsenwert.	
138. Dimensionslose Kennzahlen	481
Lieferzahl, Druckzahl, Umsatzzahl; Leistungszahl, Gütezahl.	
139. Ventilator gegen wechselnden Düsenwert	485
Verhalten des Ventilators bei unveränderter Drehzahl, der Ventilationsmaschine bei natürlichem Abfall der Drehzahl. Kennlinien. Beispiel.	
140. Allgemeine Darstellung des Verhaltens eines Ventilators durch Kurvenscharen	486
Veränderung von Drehzahl und Öffnung gleichzeitig. Kurvenscharen gleicher Öffnung, gleicher Drehzahl, gleichen Leistungsbedarfs — gleichen Wirkungsgrades.	
141. Allgemeine Darstellung des Verhaltens eines Ventilators durch Kennzahlen	492
Verlauf der Kennzahlen bei Änderung des Düsenwertes, der Lieferzahl.	
142. Einfluß der Gasdichte	495
Einfluß des Luftzustandes, Abgleichung aller Größen gegeneinander. Ventilator saugend und drückend. — Verschiedene Gasarten.	
143. Einfluß des Ventilatorzustandes	496
Einfluß der Lässigkeit. Zahlenbeispiele.	
d) Kompressoren und Luftpumpen.	
144. Leistung, Aufwand	498
Kompressoren, Luftpumpen, Gebläse. Nutzarbeit, Anrechnung der Geschwindigkeitshöhen.	
145. Volumetrischer Wirkungsgrad, Lieferungsgrad	499
Volumetrischer Wirkungsgrad des Kompressors, der Kompressoranlage; Lieferungsgrad bezogen auf 760 mm BSt, bezogen auf Druck im Saugraum; thermometrischer Füllungsgrad.	
146. Das Indikatordiagramm des Kompressors	503
Umkehrung der Wirkung einer Dampfmaschine; Verlustflächen.	
147. Einfluß des Gegendruckes auf das Indikatordiagramm und den Gang von Kompressoren und Luftpumpen	504
Versuchsbeispiel; Auffüllmethode zur Bestimmung der Luftmenge. Leistungsumsätze, hydraulischer Verlust und hydraulischer Wirkungsgrad, mechanischer Wirkungsgrad der Kompressionsmaschine.	
Versuchsreihe; volumetrischer Wirkungsgrad, Lieferungsgrad, thermometrischer Füllungsgrad. Endtemperatur des Ansaugens, Kompressionsendtemperatur.	
Gleichwertige Düse, Düsenwert der Leitung.	
Kompressor als Luftpumpe. Vakuumpumpe mit Schiebersteuerung, mit Überströmkanal. Strömung der Luft durch einen Hahn. Bestimmtes Luftgewicht aus verschieden tiefem Vakuum, Gestalt der Indikatordiagramme, Maximum des Drehmoments bei mittlerem Vakuum, Anlaufmoment; Leistungsbedarf am größten bei bestem Vakuum. Durch Undichtheiten eindringende Luftmenge bei verschiedenem Vakuum, Düsenwert von Undichtheiten. Versuchsreihe mit unveränderter Drehzahl.	
Diagrammform einer mit Überströmung arbeitenden Luftpumpe, kein Abgreifen des volumetrischen Wirkungsgrades.	
Kondensatpumpe ohne Saugventil.	
148. Einzelheiten über das Kompressordiagramm	522
Isotherme, Adiabate, wirkliche Kompressionslinie. Zwangsläufig gesteuerte Saugsteuerung. Verlustflächen. Luftpumpe mit zwangsläufiger Saugsteuerung. Fehler im Kompressordiagramm. Massenschwingungen in der Druckleitung.	
e) Kühlanlagen.	
149. Kompressions- und Absorptionsverfahren	529
Wirkung; energetischer Vergleich.	
150. Energieumsatz	531
Kühlleistung, Temperaturunterschied zwischen Kondensator und Verdampfer; Leistungsaufwand, Kühlwassermenge. Wärmebilanz als Umkehrung zur Dampfkraftmaschine. Thermischer und wirtschaftlicher Gütegrad. Vergleichsprozesse von Carnot und Lorenz.	

	Seite
151. Messung der Kühlleistung	535
Kühlleistung = Kondensatorleistung minus Kompressorleistung. Direkte Messung der Kühlleistung, Beharrungs-, Abkühlungsverfahren, Eiszerzeugung, Bestimmung der Kühlleistung aus der umlaufenden Menge des arbeitenden Kälteträgers. Bedingende Angaben: Temperatur innerhalb oder außerhalb der Verdampferschlangen. Wasserumlauf und Leistungsbedarf dafür, Zusatzwasser. Kühlhallenanlagen. Abkühlungsversuch. Feuchtigkeitsgrad.	
152. Versuchseinrichtungen, Versuchsdauer	539
Versuch im Beharrungszustand, Anwärmungsvorrichtungen. Abkühlungsversuch. Übereinanderlagerung beider Versuchsarten.	
153. Abkühlungsversuch und Einfluß der Verdampfer-temperatur	542
Abkühlungsgeschwindigkeit, Energiebilanz, Kolbenreibung doppelt ungünstig. Zustände im SO ₂ -Kreislauf. Umlaufende Menge SO ₂ , volumetrischer Wirkungsgrad. Vergleichsprozesse, Gütegrade.	
154. Beispiel eines Garantiever Versuches nebst Umrechnung auf Sollbedingungen	555
Kühlleistung aus Luftkühlung, aus Kondensation, aus Abkühlung. Nachprüfung der Garantie.	

V. Regelungsvorgänge.

(Die eingeklammerten Zahlen sind die Paragraphennummern der ersten Auflage.)

155 (144). Allgemeine Zusammenhänge	561
Aktives und passives Regelorgan. Ungleichförmigkeit, innerer Energieumsatz = Arbeitsvermögen. Statische und dynamische Eigenschaften der Regelung.	
156 (146). Kraftmaschinenregelung	562
Beziehungen zwischen Drehmoment, Füllung, Reglerstand und Drehzahl; Leistung und Drehzahl, Regelungskennlinie der Maschine, Kennlinie der Belastung.	
157 (145). Normale statische Eigenschaften des Reglers und der Regelung	563
Losgelöster Regler bei steigender und fallender Drehzahl. Ungleichförmigkeit. Ungleichförmigkeitsgrad des Reglers; Unempfindlichkeit, Unempfindlichkeitsgrad des Reglers. Untersuchung der Regelung (Regler angebaut), Ungleichförmigkeit, Unempfindlichkeit. Regelungskennlinie des Maschinensatzes.	
158 (147). Beeinflussung von Drehzahl und Ungleichförmigkeit	569
Versuchseinrichtung: wagerecht und senkrecht laufendes Gewicht. Versuchsergebnisse. Vergrößerte Trägheit, Veränderung der mittleren Drehzahl astatischer Regelung. Verschränkung im Getriebe des Stellzeugs.	
159 (148). Wechselwirkung zwischen Steuerung und Regler	572
Folgen mangelhafter Ausgleich: Statische Rückwirkung der Steuerung. Dynamischer Rückdruck, Tanzen des Reglers.	
160 (149). Arbeitsvermögen des Reglers und der Regelung	575
Auswiegung des Muffendrucks. Arbeitsvermögen (Arbeitsumsatz) des Reglers und der Regelung. Dieselben im Gange der Maschine bestimmt.	
161 (150). Dynamisches Verhalten der Regelung	577
Tachogramstreifen: Regelung normal; Einfluß der Selbstregelung. Notwendige Drehzahländerung, die durch Reglerträchtigkeit und durch Speicherwirkung des Aufnehmers.	
162 (151). Einfluß der Reglereigenschaften auf den Regelungsvorgang	580
Verschiedenes statisches und dynamisches Verhalten des Reglers bei Belastungssprüngen. Vermehrung der Masse. Ungleichförmigkeit vergrößert, verkleinert. Einfluß verschiedener Dämpfungsverhältnisse: mechanische Reibung (Klemmung), molekulare Dämpfung durch Ölbremse.	
163 (152). Anforderungen an die Regelung. Einfluß des Stellzeuges	586
Aufgaben der Regelung: Ausnutzung des Arbeitsvermögens. Einfluß von Änderungen am Stellzeug: Hebellängen und Stangenlängen.	
164 (153). Regelung einer Gasmaschine bis zur Überlastung	590
Versuchsergebnisse. Unterer Reglerhub tot. Fremderregung und Selbsterregung. Schwingungen im Auspuffrohr.	
165 (154). Einflüsse der Belastung	593
Einfluß der Kennlinie (Selbstregelung), Einfluß einer Speicherwirkung. Selbst- und Fremderregung der Dynamo, Pumpanlage bei geodätischer und hydraulischer Förderhöhe, mit und ohne Luft im Windkessel.	
Namen- und Sachverzeichnis	596

Verweisungen auf das „Taschenbuch der Hütte“ beziehen sich auf die 22. Auflage (1915), mit der die 23. Auflage gleichlautend ist; Verweisungen auf des Verfassers „Technische Messungen“ (abgekürzt: Techn. Mess.) geben die Paragraphen der 3. Auflage (1914), 4. (1920) oder 5. Auflage (1923). Maßangaben zu den Figuren beziehen sich auf die ursprüngliche Größe; die Verkleinerung für den Druck ist nach Bedarf angegeben.

I. Allgemeines über Versuche.

a) Versuchstechnisches.

1. Gegenstand der Untersuchung. Zur Untersuchung gelangen Maschinen (und maschinelle Apparate) oder Maschinensätze, seltener Maschinengruppen.

Als *Maschinen im engeren Sinne* seien diejenigen technischen Vorrichtungen zur Umwandlung von Energie bezeichnet, in denen wenigstens einerseits mechanische Arbeit im Spiele ist. Kraftmaschinen erzeugen mechanische Arbeit aus anderen Energieformen, Arbeits-, Werkzeug-, Hebemaschinen verbrauchen mechanische Arbeit. Dasselbe ist bei dem Elektromotor und andererseits bei der Dynamomaschine der Fall. Die eigentlichen Maschinen sind daher durch die Bewegung gewisser Teile, meist durch umlaufende Bewegung einer oder mehrerer Wellen gekennzeichnet.

In *maschinellen Apparaten* finden ebenfalls Energieumsetzungen statt, so jedoch, daß mechanische Arbeit nicht (oder nicht wesentlich) ins Spiel kommt. Hierher gehören zunächst die zahlreichen Apparate der Wärmetechnik: als wichtigster Vertreter der Dampfkessel, aber auch Feuerungsanlagen und Öfen aller Art, Warmwasserbereiter mit Beheizung durch Gas, Dampf oder Koks, die Dampfkochapparate der chemischen Industrie, Gaserzeuger, Kondensatoren; ferner die elektrischen Transformatoren, die wir jedoch, wie alle rein elektrischen Apparate, im folgenden nicht behandeln. Dagegen sind noch zu nennen die mannigfachen Fördereinrichtungen, die nicht als eigentliche Maschinen anzusprechen sind, Injektoren für Flüssigkeit oder Gas, Pulsometer, Montejus, wenn auch in gewissem Sinne deren Nutzarbeit eine mechanische Arbeit ist, und ferner sind Apparate wie Druckminderventile oder Kondenstöpfe einer eingehenden Untersuchung auf ihre Wirksamkeit bei wechselnden Mengen- und Druckverhältnissen nicht nur zugänglich, sondern lohnen dieselbe auch reichlich, weil diese Bauteile in so großer Zahl verwendet werden.

Die Grenze zwischen den eigentlichen Maschinen und den maschinellen Apparaten ist flüchtig, und was wir von Maschinen sagen, gilt oft ebenso für maschinelle Apparate; daher wollen wir im folgenden unter der Bezeichnung *Maschinen (im weiteren Sinne)* beide zusammenfassen; wo schlechtweg von Maschinen die Rede ist, sind meist die maschinellen Apparate einbegriffen.

Maschinensätze bestehen aus mehreren zueinander gehörenden, nur für- und aufeinander arbeitenden Maschinen (oder Apparaten). Als Maschinensatz bezeichnen wir die Wärme- oder Wasserkraftmaschine, die mit einer Dynamomaschine einheitlich zusammenarbeitet. Die

Übertragung der von der Kraftmaschine erzeugten mechanischen Arbeit auf die Dynamomaschine kann durch Riemen oder sie kann durch direkte Kupplung geschehen; wesentlich ist, daß beide Maschinen nur füreinander bestimmt sind oder doch augenblicklich nur füreinander laufen; die umgesetzte Energie durchläuft beide Teile nacheinander, beide sind also hintereinandergeschaltet. — Im gleichen Sinne bildet ein Dampfkessel mit der nur zu ihm gehörenden Dampfmaschine einen Maschinensatz, der Elektromotor mit der direkt gekuppelten Pumpe oder dem Ventilator; die Beispiele lassen sich häufen.

Wo nur ein Dampfkessel auf nur eine Dampfmaschine, diese auf nur eine Pumpe arbeitet, bildet das ganze auch noch einen Maschinensatz, den man als mehrfachen oder als Maschinensatz von höherer Ordnung bezeichnen könnte. Es kommt eben auf die eindeutige Bestimmtheit der gesamten gegenseitigen Beziehungen an, damit man beispielsweise eine Gesamtgarantie über den Kohlenverbrauch für die in das gehobene Wasser übergeführte Pferdestärke abgeben und eindeutig nachprüfen kann. In diesem Sinne wird man auch die Druckleitung zum Wasserhochbehälter als maschinellen Apparat betrachten und als Bestandteil eines Maschinensatzes ansehen können: An städtischen Wasserwerken wird oft der Verbrauch für das Kubikmeter gehobenen Wassers gewährleistet, da nur die Menge Wasser, nicht der Arbeitsumsatz für den Verwendungszweck interessiert; in der Tat bildet eine Pumpe mit dem Rohr, auf das sie arbeitet, ein einheitlich charakterisiertes Ganzes (§ 118, 125, 130).

Im einfachen oder mehrfachen Maschinensatz belastet jeder folgende Teil alle vorhergehenden; so wird im eben genannten Beispiel die Pumpe von dem Widerstande der Rohrleitung, die Dampfmaschine von der Pumpe, die Dampfleitung von der Dampfmaschine und endlich der Dampfkessel von der Dampfleitung belastet. Andererseits bildet im Maschinensatz jeder vorhergehende Teil die Energiequelle, also den Antrieb für die folgenden. Wo man nur eine einzelne Maschine des Satzes untersuchen will, kann man die Belastung oder den Antrieb für den Versuch besonders herrichten, z. B. die Dampfmaschine nach Ablösung der Pumpe bremsen, oder die Pumpe behufs bequemer Messung des Kraftbedarfes durch einen Elektromotor treiben. Eine Garantie und eine Untersuchung kann sich aber sehr wohl auch auf den Maschinensatz als Ganzes beziehen, dessen Glieder ja eben von einem einheitlichen, ungeteilten Energiestrom nacheinander durchflossen werden, und der daher, bei vorgeschriebenem Endeffekt, einen eindeutig bestimmten Verbrauch, bestimmte Verluste und bestimmten Wirkungsgrad hat.

Einer *Maschinenanlage im allgemeinen* fehlt sonst dieses Kennzeichen, sobald die einzelnen Teile nicht nur füreinander arbeiten, und sobald einzelne der Glieder mehrfach und parallel zueinander arbeitend vorhanden sind. Wo mehrere Dampfkessel ihren Dampf in ein Hauptdampfrohr geben, und mehrere Maschinen oder Kocher nach Bedarf Dampf aus jenem Rohr entnehmen, fehlt jede bestimmte Beziehung zwischen dem einzelnen Kessel und der einzelnen Maschine. Eine solche Maschinenanlage ist kein Maschinensatz, sondern wir können von

Maschinengruppen sprechen. An ihnen im ganzen kann man kaum Versuche vornehmen, da sie eben kein einheitliches Ganzes bilden. Selbst die Nachprüfung, ob eine verlangte Höchstleistung erzielbar sei, ist zwecklos, weil meist bei Maschinengruppen ein Teil der Einrichtungen zur Reserve dient, und daher die verlangte Leistung meist mit der gesamten Anlage sehr reichlich zu erzielen ist. Wirtschaftlichkeitsgarantien sind zwecklos, wenn Fragen mit hineinspielen, wie solche, ob man eine Maschine forciert, oder besser zwei mit mäßiger Beanspruchung verwenden solle, und ob eine große in der Leistung nicht ganz passende oder besser zwei kleine, in der Summe gut passende Maschinen zu nehmen seien.

Maschinenanlagen, die im ganzen untersucht werden sollen, müssen also allgemein den Charakter eines Maschinensatzes haben. Dieser Begriff kann jedoch etwas weiter gezogen werden als es auf den ersten Blick schien. Wo zwei Kessel auf die gleiche Dampfpumpe arbeiten, aber so, daß immer nur einer im Betrieb ist, der andere Kessel in Reserve steht, da kann man ohne weiteres einen der Kessel in Verbindung mit der Pumpe untersuchen. Wo in einer Schlachthofkühlanlage von dem Dampfkessel und der Dampfmaschine außer der Kühlmaschine noch die Wasserpumpen für das Kühlwasser des Kondensators und der Ventilator für die Kühlluft angetrieben wird, da werden zwar Kühlmaschine, Ventilator und Pumpe parallel zueinander von der Maschine betrieben, aber es handelt sich nur um eine Hauptmaschine und die zugehörigen Hilfsmaschinen, und das läßt das Ganze zu einem einheitlichen Satz werden. Immerhin wird man bei Abnahmeversuchen an einer Kühlanlage bereits merken, daß nicht leicht eine Form der Gewährleistung so ist, daß man sie bei den Abnahmeversuchen präzise prüfen könnte. Die Schwierigkeiten sind später zu besprechen.

Die Teile einer Anlage oder Gruppe sind nicht eindeutig voneinander abhängig, deshalb aber auch nicht voneinander unabhängig. In § 6 wird genauer besprochen werden, wie die Teile einander beeinflussen.

2. Zweck und Art der Untersuchung. Der häufigste Zweck von Untersuchungen an Maschinenanlagen ist die Nachprüfung der Frage, ob zugesagte Eigenschaften (§ 18) der gelieferten Teile vorhanden sind. Bei solchen *Abnahmeuntersuchungen* sind die häufigst nachzuprüfenden Zusagen die Wirtschaftlichkeit und die Leistungsfähigkeit. Für erstere ist der Wirkungsgrad das übliche Maß.

Hohe Leistung und *Wirtschaftlichkeit* widersprechen einander oft; nicht immer wird der beste Wirkungsgrad gerade bei der *Höchstleistung* der Maschine erreicht.

Die Abnahmeuntersuchungen beschränken sich meist eng auf das Nötige, schon deshalb, weil die Versuche meist den Betrieb der Anlage nicht zu sehr stören dürfen; selten werden mehr als einige wenige Versuche und zwar nur in dem Zustande der Maschine gemacht, den die Gewährleistung vorsieht.

Weiter pflegen Versuche zu gehen, die mehr *wissenschaftlichen Zwecken* dienen. Sie können studienhalber zu rein wissenschaftlichen oder zu *Unterrichtszwecken* gemacht werden; sie können aber auch direkt

praktischen Zwecken dienen, indem sie dem Erbauer über die *Eigenschaften einer neuen Type* Aufschluß geben, damit er sachlich richtige Angaben über die Leistung in seine Liste aufnehmen und damit er Gewährleistungen abgeben kann, die nicht schärfer sind, als daß die Zusagen sicher erfüllt werden, aber doch scharf genug, daß er hoffen darf, den Wettbewerb aus dem Felde zu schlagen. —

Nach der Art der Durchführung kann man zunächst zwei Formen von Versuchen unterscheiden: den Versuch im Beharrungszustand und den An- oder Auslaufversuch.

Im Laboratorium ist der *Versuch im Beharrungszustand* der wichtigste. Bei ihm hat man es durch eine hinreichend lange Anlaufzeit vor Versuchsbeginn dahin gebracht, daß keine der zu messenden Größen während der eigentlichen Versuchsdauer eine Änderung erleidet. Kennzeichen dafür ist die Konstanz insbesondere der Temperaturen bei Wärmemaschinen. Zur Erreichung voller Beharrung ist theoretisch unendlich lange Zeit erforderlich, da die Annäherung nach einer logarithmischen bzw. Exponentialfunktion erfolgt. Praktisch ist die Einlaufdauer beendet, wenn die Abweichungen vom Beharrungswert kleiner sind als die unvermeidlichen Schwankungen aller Größen infolge zufälliger Einflüsse wie Temperatur- und Luftdruckänderungen, oder als die Meßfehler.

Durch Abwarten der Beharrung sollen die Einflüsse von Speichervorgängen ausgeschaltet werden, die entweder nur die Größe von Nebeneinflüssen haben oder aber auch so wesentlich sein können, daß der Hauptversuch dadurch ganz überdeckt wird. Die Beharrung soll erreicht sein in kinetischer, in thermischer Hinsicht und in Rücksicht der Masse, das heißt Änderungen der Geschwindigkeit, des Wärmeinhalts und der Stoffmenge sollen vermieden werden. Sind kleine Schwankungen im Betriebszustand nicht zu vermeiden, so soll wenigstens der Endzustand der untersuchten Anlage dem Anfangszustand gleichwertig sein; andernfalls hätte man an den Ergebnissen eine Berichtigung wegen mangelhafter Beharrung anzubringen, die positiv oder negativ sein kann.

Beim *Anlaufversuch* sollen im Gegensatz dazu die Speichervorgänge untersucht werden, die bei der Inbetriebsetzung der Anlage auftreten und Energie oder Stoff verbrauchen; da die gleichen Mengen beim Betriebsschluß wieder frei werden, so spielen sich beim *Auslaufversuch* wesentlich die gleichen Vorgänge mit umgekehrtem Vorzeichen ab; immerhin liefert der Auslaufversuch etwas abweichende Resultate, weil gewisse, meist im physikalischen Sinn „nicht umkehrbare“ Verluste das Vorzeichen nicht wechseln, so die Reibung, sowie Wärmeverluste durch Leitung und Strahlung. Die Kombination der Ergebnisse eines Anlauf- und eines Auslaufversuches miteinander gestattet daher die Trennung der Speichervorgänge von diesen Verlusten.

Als besonders deutliche Beispiele für die Verschiedenartigkeit der Versuchsarten seien die einfache Kälteleistungsbestimmung an der Kühlmachine und andererseits der Abkühlungsversuch genannt; für den Einfluß stofflicher Anhäufungen denke man an den Brennstoff auf dem Rost, besonders im Füllschacht des Gasgenerators oder Füllkessels oder -ofens.

Nun setzt aber der Beharrungsversuch ebenso wie der Anlaufversuch voraus, daß Eingriffe in den Betrieb zulässig sind, indem die Speicherung ausgeschaltet werden kann oder indem ein Abstellen der Belastung möglich ist. Beide Versuchsarten verursachen also Betriebsstörungen, die, auch der entstehenden Kosten wegen, meist unerwünscht sind. Insofern ist für Versuche nicht wissenschaftlicher Natur die Form des *Betriebsversuches* besonders wertvoll. Bei ihm beschränkt man sich darauf, im laufenden Betrieb alle Beobachtungen zu machen, die zur vollen Erfassung der Betriebsumstände nötig sind; insbesondere muß man daraus das Maß der Speicherung errechnen können. Trägt man dann einerseits die Betriebswerte, ferner die positiv und negativ gespeicherten Energie- oder Stoffmengen über der Versuchszeit als Abszisse auf, so erhält man zwei Kurven, durch deren punktweise und algebraisch auszuführende Addition man eine Art Beharrungszustand erhält, der durch die Speichervorgänge verdeckt war.

Man kann diese Versuchsweise auch wie folgt auffassen: Denkt man den zu untersuchenden Bereich umgrenzt, so treten Energiemengen in diesen Bereich durch Rohrleitungen, Wellenleitungen, elektrische Leitungen hindurch ein; diese Energie muß als austretend nachgewiesen werden können, soweit sie nicht etwa gespeichert wird. Ist also u_1 die in der Zeiteinheit eintretende Energie, u_2 die in der Zeiteinheit austretende Energie, und ist di die Zunahme des Energieinhalts des betrachteten Bereiches in der Zeit dz , also $\frac{di}{dz}$ dieselbe Zunahme in der Zeiteinheit, so gilt

$$u_1 = \frac{di}{dz} + u_2 \quad \dots \dots \dots (1)$$

Im Beharrungszustand wäre $\frac{di}{dz} = 0$, also

$$u_1 = u_2 \quad \dots \dots \dots (1a)$$

Daraus folgt aber, daß man auch bei mangelhaftem Beharrungszustand u_1 und u_2 als einem Beharrungszustand entsprechend zueinander gehörende Größen finden kann, sofern nur $\frac{di}{dz}$ genügend genau zu bestimmen war; die versuchsmäßige Verwirklichung des Beharrungszustandes erübrigt sich, wenn man die Einflüsse der Speicherung ermittelt und berücksichtigt.

Man kann die Betrachtung auch auf die Stoffmenge statt auf die Energie beziehen, und man kann statt der Energie überhaupt gelegentlich auch nur eine bestimmte Energieform in Betracht ziehen, beispielsweise nur die Wärme oder nur die Elektrizität.

Als Beispiel sei auf die Möglichkeit verwiesen, an Kühlmaschinen den einfachen Leistungsversuch, den Abkühlungsversuch oder den Betriebsversuch zu machen, der eine Kombination von beiden ist (Kap. IVe). Grundsätzlich lassen sich die Methoden auf alle Maschinenarten anwenden.

3. Wirtschaftlichkeit und Höchstleistung. Wenn eine Maschine in Betrieb ist, so geht eine Energiemenge N_1 in sie hinein. Im Beharrungs-

zustand muß — nach dem Gesetz von der Erhaltung der Energie — die gleiche Energiemenge die Maschine verlassen, und man kann daher in der *Energiebilanz* die einzelnen aus der Maschine tretenden Energiemengen der aufgenommenen Energie gegenüberstellen. Als Nutzleistung N_2 bezeichnen wir diejenige die Maschine verlassende Energiemenge, die die gewollte Energieform angenommen hat, während wir die übrigen als Verluste $V', V'' \dots V_n$ bezeichnen; dabei ist der letzte Posten V_n im allgemeinen die aus der Gleichung:

$$N_1 = N_2 + V' + V'' + \dots + V_n \dots \dots \dots (2)$$

folgende Ergänzung der rechten Seite, die die unkontrollierbaren Verluste und die Meßfehler zusammenfaßt, nachdem alle übrigen Glieder der Gleichung gemessen sind. Man bezeichnet V_n als *Restverlust*.

Wir nennen N_1 die (Leistungs-) *Aufnahme* und N_2 die Nutzleistung oder auch die (Leistungs-) *Hergabe*, auch wohl kurzweg die Leistung der Maschine. Unter ihrer *Belastung* aber wollen wir nicht ihre in Leistungseinheiten (kW, PS, kcal/h) gegebene Hergabe verstehen, sondern die Angabe, den wievielten Teil entweder der normalen oder aber der höchstmöglichen Leistung die gerade von der Maschine verlangte Nutzleistung ausmacht; deutlicher bezeichnen wir dies auch als *Belastungsgrad*. Eine als 100 pferdig verkaufte Maschine hat also, wenn sie 50 PS hergibt, die Belastung 0,5 oder $\frac{1}{2}$ oder 50%. Es kann von ihr gewährleistet sein, daß sie 25% überlastet werden kann, daß sie also eine Belastung von 1,25 verträgt und also 125 PS herzugeben in der Lage ist. Dieses wird dann voraussichtlich die *Höchstleistung* der Maschine sein. Die *Höchstleistung* ist stets ein wichtiges Kennzeichen der Maschine. Bei jeder Änderung an einer Maschinenanlage, etwa um die Wirtschaftlichkeit zu steigern, wird zu bedenken sein, ob nicht ihre *Höchstleistung* unter das Erfordernis sinkt; andererseits sind oft Veränderungen an der Maschine vorzunehmen nur zu dem Zweck, ihre *Höchstleistung* möglichst einfach zu steigern und dadurch Neubauten und den damit verbundenen Aufwand an Geld und Betriebsstörungen zu vermeiden. Die Wirtschaftlichkeit tritt dann gelegentlich an Wichtigkeit zurück.

Im allgemeinen aber ist die *Wirtschaftlichkeit* das zweite wichtige Kennzeichen einer Maschine. Wir kennzeichnen sie in zwei Formen. Entweder wir fragen, wie groß die Ausbeute an der verlangten Energieform aus der hineingesteckten ist; der Quotient:

$$\eta = \frac{N_2}{N_1} \dots \dots \dots (3)$$

wird als Wirkungsgrad bezeichnet und gibt die Nutzleistung, bezogen auf die Aufnahme, an, und zwar in Teilen der Einheit, auch wohl mit 100 vervielfacht in Prozenten:

$$\eta \% = 100 \cdot \frac{N_2}{N_1} \dots \dots \dots (3a)$$

Oder wir fragen, welche Energiemenge zur Erzielung der verlang-

ten Nutzleistung aufgenommen und aufgewendet werden muß; der Quotient:

$$\varepsilon = \frac{N_1}{N_2} \dots \dots \dots (3b)$$

heißt der *Verbrauch* der Maschine; er gibt an, welche Aufnahme, bezogen auf die Einheit der Nutzleistung, die Maschine haben wird.

Nach Formel (2) ist $N_1 > N_2$, daher $\eta < 1$ und $\varepsilon > 1$. Selten wird indessen ε in dieser theoretischen Form gegeben. Meist ergibt sich nämlich N_1 als Produkt aus der Menge G des Energieträgers und dem Energiegehalt i der Mengeneinheit — z. B. aus Brennstoffmenge B und Heizwert H bei der Verbrennungskraftmaschine — und dann setzt man in den Zähler der Verbrauchsformel einfach die Menge G des Energieträgers:

$$\varepsilon = \frac{G}{N_2} \dots \dots \dots (3c)$$

So lange der Energiegehalt i unverändert bleibt, ist diese Angabe der nach Formel (3) gleichwertig. Manchmal wird für N_2 ebenfalls die Menge eines Energieträgers gesetzt. So gibt man bei einem Wasserwerk mit Ölmotor den Ölverbrauch für das Kubikmeter gehobenen Wassers, oder bei einem Dampfkessel den Kohlenverbrauch für das Kilogramm erzeugten Dampfes an — im letzten Fall auch wieder umgekehrt als Verdampfungsziffer die Dampferzeugung für das Kilogramm aufgenommener Kohle.

Von den beiden Formen hat die Angabe des Wirkungsgrades den Vorteil, daß größerer Wirtschaftlichkeit eine höhere Zahl entspricht, und daß für den Grenzfall $N_2 = 0$ einfach der Wert $\eta = 0$ auftritt, der in graphischer Darstellung bequemer ist als $\varepsilon = \infty$. Jedoch ist die Verbrauchsangabe in gewissem Sinne leichter faßlich und deshalb praktisch beliebter; in der Form, wo nur die Menge des Energieträgers gegeben wird, hat sie aber nur Sinn, wenn dessen Energiewert unveränderlich ist, wenn also im Beispiel vom Wasserwerk der Heizwert des Öls und die Förderhöhe, im Beispiel vom Dampfkessel der Heizwert des Brennstoffs und der Zustand des Dampfes unverändert und bei Vergleichen mehrerer Maschinen derselbe ist. —

Es ist mehrfach üblich, die Energieaufnahme als den „Verbrauch“ zu bezeichnen; man müßte dann den auf die Leistungseinheit bezogenen Wert davon als den *spezifischen Verbrauch* unterscheiden, wobei das Wort spezifisch, wie beim spezifischen Volumen oder beim spezifischen Druck, die Bezugnahme auf die Einheit andeutet. So spräche man dann bei der Ölkraftmaschine vom Ölverbrauch in kg/h, und verstünde darunter nicht die Angabe in kg/kW · h. Diese Bezeichnungsweise wird nicht empfohlen. Denn das Wort Verbrauch erweckt den Eindruck des Unerwünschten, und daher einen ganz falschen Eindruck. Erwünscht ist, daß eine Maschine von gegebenen Abmessungen die größtmögliche Nutzleistung hergibt und daher eine zwar entsprechend große, aber doch möglichst große Energiemenge aufnimmt; genauer gesagt, es ist erwünscht, daß möglichst viel aufgenommen und daraus

möglichst viel Nutzleistung gezogen werde. Es soll der Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{N_2}{N_1} \cdot \dots \cdot \dots \cdot \dots \cdot \dots \quad (3)$$

zwar tunlichst verbessert werden, aber lieber durch Erhöhung von N_2 als durch Verminderung von N_1 . Bei der Gasmaschine liegen die Verhältnisse z. B. so, daß die Grenze der Leistungsfähigkeit durch die Unmöglichkeit bestimmt ist, weiteres Brenngemisch in den Zylinder aufzunehmen; den Lieferungsgrad und damit die Aufnahme zu vergrößern ist daher ein Hauptbestreben in der Konstruktion. Noch deutlicher sieht man bei der Forcierung des Dampfkessels die Grenze dadurch erreicht, daß mehr als eine bestimmte Kohlenmenge nicht mehr vom Rost fortbrennt, sondern sich aufspeichert, wodurch eben die Kohlenaufnahme des Rostes begrenzt erscheint.

In allen diesen Fällen erweckt die Bezeichnung „Verbrauch“ für die Aufnahme einen falschen Eindruck.

Wir bezeichnen also als Verbrauch den Quotienten aus Aufnahme und Hergabe, und schließen uns damit der in der Elektrotechnik üblichen Bezeichnungsweise an. —

Die Verluste der Formel (2) kann man, unter Nichtbeachtung des Restverlustes V_n , einteilen in V_1 , nicht ausgenutzte Reste der aufgenommenen Energieform, die also eigentlich entgangener Gewinn sind, und die eigentlichen Verluste V_2 . So wird bei der Dampfmaschine ein Teil der Wärme als Wärme im Dampf bleiben, der übrige Teil der Wärme wird in mechanische Arbeit umgesetzt, dieser Teil soll deshalb allgemein der *Umsatz* heißen; bei der Dampfmaschine ist das die indizierte Leistung. Von ihr gehen nachträglich die eigentlichen Verluste ab, die von den ersteren wohl zu unterscheiden sind. Es ist also nach dieser Bezeichnung:

$$N_1 = \underbrace{N_2 + V_1}_{\substack{\text{Umsatz} \\ \text{Aufnahme Nutz-} \\ \text{leistung}}} + \underbrace{V_2 + V_n}_{\text{Restverlust}} \cdot \dots \cdot \dots \cdot \dots \quad (2a)$$

Der Verbrauch oder der Wirkungsgrad ist ein Maßstab für die (direkten) Betriebskosten zur Erzielung einer bestimmten Nutzleistung; die Höchstleistung einer Maschine ist maßgebend für die Beschaffungskosten bei Erstellung einer Anlage bestimmter Nutzleistung, daher auch für den Kapitaldienst (Abschreibung und Verzinsung). Beide herabzudrücken ist das natürliche Bestreben, und daher sind in erster Linie Wirkungsgrad und Höchstleistung Gegenstand der Maschinenuntersuchung.

Der gesamte Wirkungsgrad wurde bestimmt teils durch die Unvollkommenheit der Umsetzung, teils durch die Verluste nach erfolgter Umsetzung. Es empfiehlt sich, beide Teile versuchsmäßig wohl voneinander zu trennen, da es sich um grundsätzlich verschiedene Dinge handelt. Dazu wäre dann die Größe zu ermitteln, die wir oben als den Umsatz bezeichneten, der z. B. bei den eigentlichen Maschinen durch die indizierte Leistung gegeben, bei den Kolbenmaschinen als solche auch meßbar ist.

Ein hoher Wirkungsgrad hat den Vorteil billigen Betriebes, er vergrößert bei gegebener Aufnahme auch die Höchstleistung; daneben ist hoher Wirkungsgrad für die Gleichmäßigkeit der Fabrikation günstig. Denn sei bei einem Wirkungsgrad 0,75 der relative Verlust 0,25 und ändere sich um 4% (von 0,25), also um 0,01, so ändert sich der Wirkungsgrad auf 0,76 bzw. 0,74, d. h. nicht wesentlich (etwas über 1% von 0,75). Wenn aber umgekehrt der Wirkungsgrad 0,25 ist und der Verlustwert 0,75 sich wieder um 4% ändert, das ist um 0,03, so wird nun der Wirkungsgrad von 0,25 auf 0,28 bzw. 0,22 gehen und also Änderungen von der Größenordnung 10% erleiden; in diesem Betrage kann also bei gleicher Aufnahme die Nutzleistung und daher die Höchstleistung, ebenso wie der Wirkungsgrad variieren. Soll also eine Untersuchung Grundlagen für Gewährleistungen an Serienmaschinen geben, so muß man namentlich bei Maschinen geringen Wirkungsgrades mehrere Stücke untersuchen.

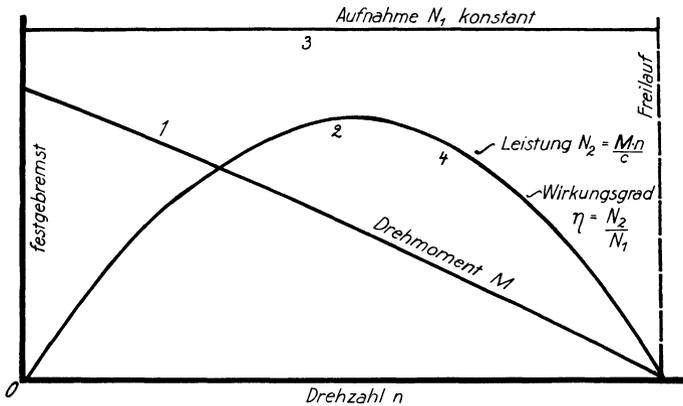


Fig. 1. Verhalten der Kreisrad-Kraftmaschine bei wechselnder Drehzahl.

4. Wirtschaftlichkeit und Höchstleistung bei Änderungen der Drehzahl oder der Belastung. Folgende Betrachtung über das Verhältnis von Wirtschaftlichkeit und Höchstleistung zueinander führt auf einen Unterschied zwischen *Kolben-* und *Kreisrad-Kraftmaschinen*, die mit *verschiedener Umlaufzahl*, und zwar jeweils bei Höchstleistung, das heißt also ungedrosselt — mit bestimmter Füllung — betrieben werden. Bleibt bei einer Kreisradmaschine der Leitsatz voll beaufschlagt, und wird durch Auferlegung verschiedener Drehmomente die Drehzahl verändert, so ergibt sich (§ 59) im allgemeinen als Beziehung zwischen Moment und Drehzahl die geneigte, mehr oder weniger gerade Linie 1 Fig. 1. Für die Leistung $N = M \cdot n$ ergibt sich daraus der Wert Null sowohl für $n = 0$ — festgebremst — als auch für $M = 0$ — Freilauf —, daher also entsteht ein Höchstwert der Höchstleistung bei einer mittleren Drehzahl, Kurve 2. Bei diesem Vorgang pflegt aber die Aufnahme von Dampf oder Wasser, also von Energie, ziemlich unverändert zu bleiben. Unter diesen Umständen muß aus der unverän-

erten Aufnahme möglichst viel gezogen werden: Wirtschaftlichkeit und Höchstleistung werden gleichzeitig am besten, und nur diese Drehzahl, entsprechend dem Scheitel der *Leistungsparabel 2*, kommt für den Betrieb in Frage.

Dagegen bei Kolbenmaschinen ist das treibende Drehmoment — stets gleichbleibende Füllung vorausgesetzt — grundsätzlich von der Drehzahl unabhängig. Linie 1' in Fig. 2. Danach müßte die Maschine überhaupt nur bei einem Moment laufen können, die Drehzahl bleibt unbestimmt. Jede Steigerung des belastenden Momentes führte zum Stillstand, jede Minderung zum Durchgehen der Maschine. So kraß verlaufen die Dinge in Wahrheit nicht: beim Auferlegen verschiedener Momente ändert sich die Drehzahl ganz ähnlich wie bei Kreisradmaschinen, etwa nach Kurve 1, weil nämlich die Verluste namentlich in den Steuerorganen erst langsam, dann immer rascher (etwa qua-

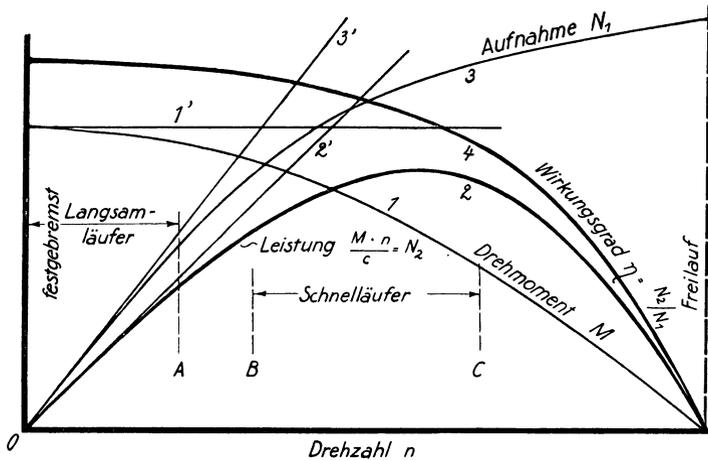
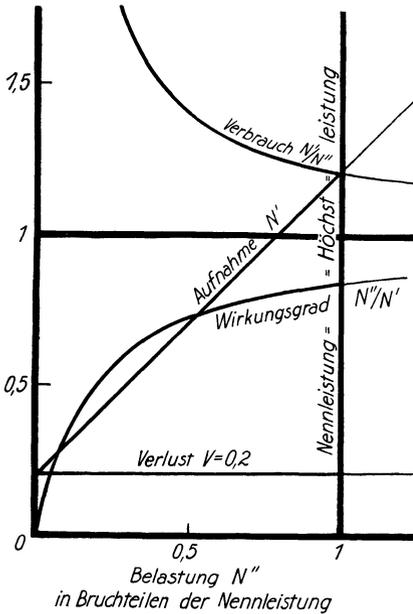


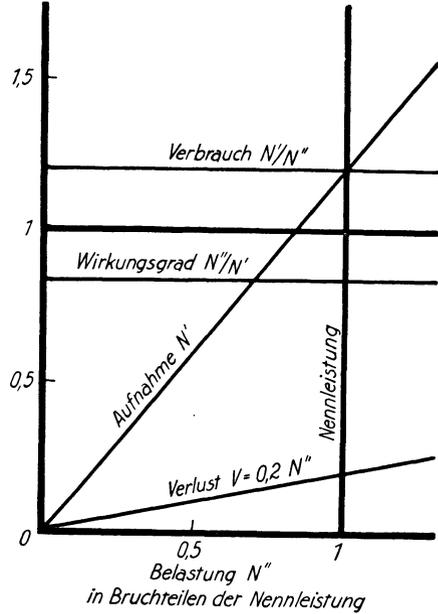
Fig. 2. Verhalten der Kolben-Kraftmaschine bei wechselnder Drehzahl.

dratisch) zunehmen (§ 73, 102). Im Freilauf steigt die Drehzahl auch hier nicht ins Ungemessene, sondern bleibt endlich. Für die Leistung entspricht die Gerade 2' der Geraden 1', die *Leistungsparabel 2* der Kurve 2'; wieder ergibt sich bei mittlerer Drehzahl der Höchstwert der Höchstleistung. — Die Energieaufnahme nun geht grundsätzlich proportional der Drehzahl, Gerade 3': bei doppelter Drehzahl sind doppelt so viel Füllungen zu liefern, die Füllung bleibt unverändert. In Wahrheit sinkt auch die Aufnahme etwas gegen die Gerade 3' ab, aber nicht so schnell wie die Leistung, etwa nach Kurve 3: im Freilauf wird die Aufnahme keinesfalls Null, im Gegenteil am größten sein. So wird der Wirkungsgrad — das Verhältnis der Leistung zur Aufnahme — vom Werte ~ 1 herabgehen bis auf Null bei steigender Drehzahl. Der Höchstwert der Höchstleistung kann also nur auf Kosten der Wirtschaftlichkeit erreicht werden. Je nachdem wir daher den Hauptwert auf die Wirtschaftlichkeit oder auf die Leistung der Anlage legen, können

wir die Maschine gleicher Hauptabmessungen als *Langsamläufer* oder als *Schnellläufer* betreiben; damit soll natürlich nicht gesagt sein, daß man einen Langsamläufer unverändert als Schnellläufer benutzen könne. Es ergibt sich aber aus den grundsätzlichen Betrachtungen, daß bei Langsamläufern eine *Steigerung der Höchstleistung* auf Kosten der Wirtschaftlichkeit durch *Erhöhung der Drehzahl* möglich ist, daß diese aber weder bei Schnellläufern noch bei Kreisradmaschinen so gesteigert werden kann.



Fall I.



Fall II.

Fig. 3 und 4. Wirtschaftlichkeit und Leistung bei konstanten und bei zunehmenden Verlusten.

5. Wirkungsgradkurven bei wechselnder Belastung. Wenn man Wirkungsgrad und Verbrauch bei verschiedener Belastung ermittelt, so ergeben sich in den verschiedensten Fällen Kurven ähnlichen Charakters, der aus folgender Überlegung folgt.

Die Verluste pflegen grundsätzlich entweder unabhängig von der Belastung zu sein, oder ihr proportional zuzunehmen. Im ersten Falle behalten die Verluste auch bei der Belastung Null — im Leerlauf — ihren endlichen Wert, im zweiten Fall verschwinden sie zusammen mit der Belastung. Nach Formel (2) gelten also folgende Beziehungen:

I. konstante Verluste

II. zunehmende Verluste

$$N' = N'' + V = N'' + a \quad N' = N'' + V = N'' + bN'' \quad (4)$$

Hieraus folgt ohne weiteres der Verbrauch

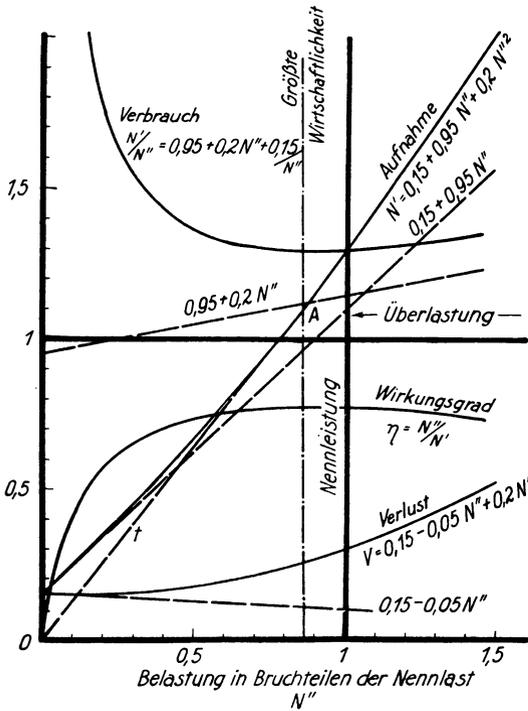
$$\varepsilon = \frac{N'}{N''} = 1 + \frac{a}{N''}$$

$$\varepsilon = \frac{N'}{N''} = 1 + b \dots \dots \dots (5)$$

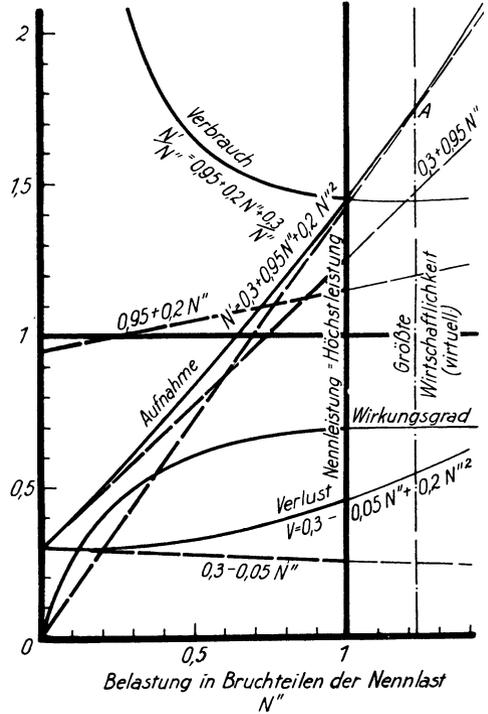
oder der Wirkungsgrad

$$\text{I. } \eta = \frac{N''}{N'} = \frac{1}{1 + \frac{a}{N''}} \qquad \text{II. } \eta = \frac{N''}{N'} = \frac{1}{1 + b} \dots (6)$$

a und b sowie später c sind darin beliebige, etwa versuchsmäßig zu ermittelnde Konstante. Im Fall II sind also Wirkungsgrad und Verbrauch einfach konstant, im Fall I nähern sie sich asymptotisch dem



Fall IIIa (Fig. 5).



Fall IIIb (Fig. 6).

Fig. 5 bis 7. Wirtschaftlichkeit und Leistung

Werte 1 und werden mit zunehmender Belastung dauernd günstiger. In Fig. 3 und 4 sind beide Fälle dargestellt, und zwar für $a = 0,2$ und $b = 0,2$ — deren Werte aber nur auf die Größe des Wirkungsgrades, nicht auf den Charakter der Kurven Einfluß haben.

Selten trifft der lineare Verlauf der Verluste genau zu. Wenn dann ein im allgemeinen nicht sehr großes quadratisches Glied hinzutritt, so erhalten wir

III.
$$N' = N'' + a + c \cdot N''^2$$

$$\varepsilon = 1 + c \cdot N'' + \frac{a}{N''}$$

$$\eta = \frac{1}{\varepsilon}$$

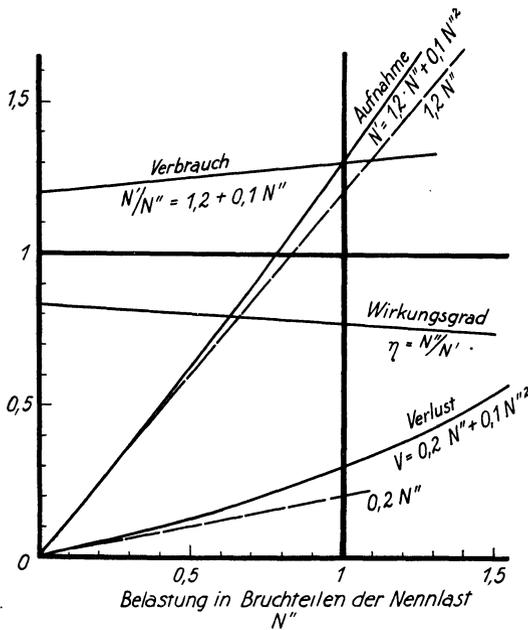
IV.

$$N' = N'' + c \cdot N''^2 \dots (4a)$$

$$\varepsilon = 1 + c \cdot N'' \dots (5a)$$

$$\eta = \frac{1}{\varepsilon} \dots (6a)$$

Für bestimmte Konstanten sind die Werte in Fig. 5 bis 7 dargestellt. Der Fall IV bietet nichts Besonderes gegenüber Fall II. Dagegen ergibt Fall III gegenüber Fall I eine grundsätzliche Änderung: der Verbrauch und daher auch der Wirkungsgrad durchlaufen einen Bestwert bei der Ordinate, wo im Punkte *A* die Aufnahmekurve von dem Strahl *OA* aus dem Nullpunkt berührt wird. Bei Steigerung der Belastung über die Stelle größter Wirtschaftlichkeit hinaus wird dann die Wirtschaftlichkeit wieder verschlechtert. Das führt bei Fig. 5 dazu, daß man die Maschine nicht mehr nach ihrer Höchstleistung benennt, sondern die Nennleistung in der Gegend größter Wirtschaftlichkeit sein



Fall IV (Fig 7).

bei konstanten und bei zunehmenden Verlusten.

Aufsetzen des Reglers, durch Erreichung der Vollfüllung — die Leistungssteigerung begrenzt wird; dann wird man wieder wie im Fall I, Fig. 3, die Maschine nach der Höchstleistung benennen, und die Maschine ist nicht überlastbar. Diesen Fall zeigt Fig. 6.

Nach diesem Zusammenhang werden sich als im allgemeinen überlastbar erweisen die Dampfmaschine, die Ölmaschine, als nicht überlastbar die Gasmaschine. Überlastbar wird die Maschine dann, wenn die größte Wirtschaftlichkeit vor der Höchstleistung erreicht wird.

Die Begrenzung der Höchstleistung ist auch bei den Maschinenarten verschieden, und wo immer es auf Erreichung recht hoher Leistung ankommt, muß man sich klar werden über die Ursachen der Begrenzung. Bei den Verbrennungskraftmaschinen wird die Grenze der Leistung durch den Lieferungsgrad bestimmt: Ist das Zylindervolumen aus-

läßt, etwas jenseits derselben, um für Benennung und zugleich für den Wirkungsgrad günstig klingende Werte zu haben. Jenseits der Nennleistung liegt dann das Gebiet der *Überlastung*; ein solches war bei Fig. 3 nicht vorhanden, da man jene Maschine nach der Höchstleistung benennen wird, die sie ja zugleich als von größter Wichtigkeit erscheinen läßt.

Je nach den Werten der Vorzahlen *abc* kann es aber auch kommen, daß ein Bestwert der Wirtschaftlichkeit zwar zu erwarten wäre, daß aber vor seiner Erreichung schon aus irgendeinem Grunde — durch

genutzt, so ist damit die Aufnahme und also der Umsatz begrenzt. Bei dem Dampfkessel liegt die Grenze in der zu verfeuernden Kohlenmenge, und diese wie bei jeder Feuerung ist durch Rostgröße und Zugstärke, also Schornsteinhöhe und Kanalweiten, begrenzt, sie liegt also nicht im Kessel allein. Dampfmaschinen dagegen pflegen bei Höchstleistung noch nicht Vollfüllung zu haben, bei ihnen wird dann die Höchstleistung allein durch das Aufsetzen des Reglers, also gar nicht durch die eigentliche Maschine, bedingt; nur Rücksicht auf wieder abnehmende Wirtschaftlichkeit hindert praktisch die Erhöhung der Füllung.

Ergibt sich der Wunsch, die Höchstleistung einer Maschine nachträglich zu steigern — bei Vergrößerung der Fabrik, wo sich doch eine neue Antriebsmaschine noch nicht lohnt, oder bei Abnahmeversuchen, wenn man mit dem Wirkungsgrad reichlich, mit der Leistung knapp zurechtkommt und beides gegeneinander ausgleichen will —, da kann man demnach bei der Dampfmaschine in gewissen Grenzen leicht helfen, bei der Feuerung eventuell durch Steigerung des Zuges, bei der Gasmaschine aber nicht.

Der Begriff der Höchstleistung erfordert gelegentlich eine nähere Erläuterung; so unterscheidet man zwischen *vorübergehender* und *dauernder Höchstleistung*, zumal beim Dampfkessel, der kurz vorübergehend sehr viel hergeben kann aus dem Wärmebehälter, den sein Wasserinhalt darstellt, dauernd aber nur entsprechend seiner Rostgröße, während die Nennleistung immer durch die größte Wirtschaftlichkeit bestimmt ist. So kann eine als 100 pferdig bezeichnete Lokomobile dauernd etwa 125 PS hergeben, wobei die Wirtschaftlichkeit (unwesentlich) verringert ist; für kurze Zeit gibt sie 140 PS her. Die Gasmaschine hat ähnliche Nachgiebigkeit nicht.

6. Gegenseitige Beeinflussung der Glieder von Maschinengruppen.

Als Maschinengruppe sollte (§ 1) diejenige Anordnung von Maschinen bezeichnet werden, bei der mehrere Maschinen (oder Apparate) parallel arbeitend ihre Energie an eine gemeinsame Stelle abgeben oder von einer gemeinsamen Stelle empfangen. Einer Untersuchung sind allgemein nur die einzelnen Glieder der Gruppe zugänglich, nicht die Gruppe als Ganzes.

Trotzdem bedarf das parallele Arbeiten von Maschinen der Besprechung in versuchstechnischer Hinsicht wegen der *gegenseitigen Beeinflussung der einzelnen Teile der Gruppe*. Wo nämlich noch andere Teile Energie an dieselbe Stelle abgeben oder von ihr empfangen, da wird die Charakteristik der Belastung eine andere, als sie bei der Einzelmachine wäre, die auf dieselbe Stelle arbeiten würde; das hat Einfluß auf die Regelung der Maschine. Außerdem kann die Beanspruchung durch parallel arbeitende Glieder der Gruppe eine solche Rückwirkung auf die äußeren Betriebsbedingungen ausüben, daß dadurch das zu untersuchende Glied in seiner Höchstleistung, vielleicht auch in seiner Wirtschaftlichkeit ernsthaft geschädigt oder auch gefördert wird. Die Möglichkeiten sollen hier durch Beispiele kurz erläutert werden; im einzelnen werden die Verhältnisse jedesmal bei der betreffenden

Maschinenart in späteren Kapiteln erörtert, auf die deshalb verwiesen wird.

Als Beispiel für die *Beeinflussung der Regelung* kann das Verhalten der Dampfdynamo oder der Dampfmaschine dienen. Das Verhalten einer Dynamomaschine bei Belastungsänderungen ist verschieden, je nachdem sie gegen einen konstanten äußeren Widerstand oder gegen eine konstante Spannung arbeitet; praktisch ist ersteres verwirklicht bei Stromabgabe an ein Glühlampennetz, letzteres beim Aufladen einer Batterie, vorausgesetzt beidemal, daß nur eine Maschine arbeitet. Wo aber mehrere Maschinen parallel gegen ein Glühlampennetz arbeiten, wird durch Belastungsänderung einer Maschine die Belastung ganz oder teilweise auf die anderen übergehen, jene aber werden, wenn sie stark genug sind, die Spannung aufrechterhalten. Die als Glied einer Gruppe arbeitende Dynamo arbeitet also jetzt gegen eine konstante Spannung, obwohl die Belastung an sich durch einen Widerstand erfolgte. Sind indessen die anderen Glieder der Gruppe schwächer, so werden sie die Spannung zwar nicht konstant halten, sie aber auch nicht so weit sich ändern lassen, wie die einzeln arbeitende Maschine es täte; es sind also beliebige Zwischenzustände denkbar.

Wenn eine Pumpe allein in ein wagerecht förderndes Druckrohr arbeitet, dann ändert sich die ihr entgegenstehende Förderhöhe mit dem Quadrat der von ihr selbst geförderten Wassermenge. Wenn aber mehrere Pumpen in dieselbe Leitung drücken, so geht der Gegendruck mit dem Quadrat der Gesamtmenge, und er wird um so weniger von der Fördermenge der einzelnen Pumpen beeinflußt, je kleiner ihr Anteil an der Gesamtförderung ist. Im Grenzfall — eine kleine Pumpe arbeitet parallel mit vielen großen — bleibt der Druck von einer Änderung ihrer Liefermenge praktisch unbeeinflußt, und die einzelne Pumpe arbeitet wie gegen eine geodätische Druckhöhe, obwohl die Druckhöhe hydraulisch ist. Ein Beispiel findet sich in § 129.

Die vorstehend genannten und ähnliche andere gegenseitige Einflüsse wirken auf das Verhalten der Maschine bei Änderungen der Belastung; sie haben besonders starken Einfluß bei schnellen Belastungsänderungen und den dadurch hervorgerufenen Regelvorgängen (Abschnitt V).

Eine andere Art gegenseitiger Beeinflussung ist die *Rückwirkung von Hilfseinrichtungen auf die Glieder der Gruppe*; diese Einflüsse betreffen hauptsächlich die erzielbare Höchstleistung. Wenn eine Dampfturbine den Dampf in einen Kondensator entläßt, so mag die verlangte Höchstleistung gerade erzielt werden können. Wenn aber weitere Turbinen auf denselben Kondensator geschaltet werden, so sinkt das Vakuum mehr oder weniger, und die erste Turbine wird nicht mehr die gleiche Höchstleistung hergeben. Die Turbine wird also durch ihre Nachbarn ungünstig beeinflußt; auch der Wirkungsgrad wird ungünstiger werden.

Der Einfluß der Nachbarn kann aber auch günstig sein. Wo eine Turbine den Dampf aus einem Kessel durch eine längere Rohrleitung empfängt, da ist der Dampf stärker überhitzt, wenn auch die benach-

barten Maschinen arbeiten (§ 38); man wird also jedenfalls auf besseren Wirkungsgrad rechnen können — ob auch auf größere Höchstleistung, bleibt wegen des größeren spezifischen Volumens des ankommenden Dampfes zweifelhaft.

Wo mehrere Feuerungen (Dampfkessel) von einem gemeinsamen Schornstein bedient werden, können sie in der Höchstleistung durch den Betrieb von Nachbarn günstig oder ungünstig beeinflusst werden. Der Nachbar wirkt jedenfalls ungünstig, wenn er seine Abgase kälter in den Schornstein gibt als die untersuchte Feuerung; denn die Temperatur im Schornstein wird niedriger und überdies noch die im Schornstein aufsteigende Gasmenge größer. Gibt dagegen der Nachbar seine Gase wärmer in den Schornstein, so ist sein Einfluß auf die erzielbare Leistung der Feuerung meist günstig, weil der Auftrieb gesteigert wird; wenn der Schornstein jedoch im Querschnitt knapp ist, so kann der gesteigerte Druckverlust im Schornstein den Vorteil unter Umständen mehr als wettmachen.

Bei der Prüfung von Gewährleistungen sind alle diese Verhältnisse oft belanglos, in anderen Fällen aber sind sie äußerst schwierig zu berücksichtigen. So pflegt bei der Gewährleistung für einen Dampfkessel eine Zugstärke von vielleicht 20 mm Wassersäule verlangt oder doch genannt zu sein; sie soll dann (§ 8) eine Bedingung für Erreichung der zugesagten Höchstleistung sein, deren Erfüllung im Zweifel nicht dem Kessellieferer obliegt und bei deren Nichterfüllung durch anderseitiges Verschulden die Höchstleistung nicht verlangt werden kann. Dabei geht es den Kessellieferer nichts an, warum der verlangte Zug nicht erreicht wurde, und die andere Partei, der die Beschaffung des Zuges obliegt, kann jedes Mittel zu seiner Herstellung verwenden; dazu geben die oben gemachten Ausführungen einen Fingerzeig: man betreibe einen benachbarten Kessel mit recht hoher Abgastemperatur, forciere also etwa einen stark mit Flugasche belegten oder einen, dessen Überhitzer man abstellt, und man wird eher auf die verlangte Zugstärke kommen.

In diesem Fall gab der Einfluß benachbarter Kessel nur das versuchs- und betriebstechnische Mittel, um die Vorbedingungen für den Nachweis der Gewährleistung herzustellen. Für die Entscheidung des eigentlichen Streites über die Erreichung der Höchstleistung ist der Nachbarkessel belanglos, weil eben die verlangten 20 mm Zug entweder vorhanden sind oder nicht. Die Vereinbarungen können aber auch anders liegen. Ein vorsichtiger Käufer wird sich zusagen lassen, daß der neu zu beschaffende Kessel, in die Gruppe der vorhandenen eingefügt, die verlangte Dampfmenge zu liefern imstande sei. Er hat ja an sich an dem Vorhandensein der Zugstärke von 20 mm kein Interesse, sondern nur an der Dampfleistung, und wenn er nicht spezialtechnisch sachkundig ist, so kann er nicht übersehen, wie ein hinzukommender Kessel die vorhandene Zugstärke etwa verändert. Er widerspricht also jeder Bindung bezüglich der Zugstärke, bedingt sich vielleicht ausdrücklich aus, der vorhandene Schornstein müsse auch noch für den zu liefernden Kessel „genügen“.

Solche Abmachungen sind recht häufig, können auch nach Lage der Dinge sehr zweckmäßig sein, aber im Streitfall bieten sie manche Schwierigkeit für die Auslegung, die immer auf den Vorverhandlungen und auf den tatsächlichen Verhältnissen in dem untersuchten Betriebe fußen muß. Es kommt namentlich darauf an, inwieweit nach Lage des Falles der sachverständige Lieferer auch zu einer sachlich richtigen, mindestens sorgfältigen Beratung des sachunkundigen Käufers verpflichtet war. Es können folgende Erwägungen am Platze sein.

Wenn der untersuchte Kessel zur Erreichung der Höchstleistung angestrengt wird, während die Nachbarn normal betrieben werden, so hat er vermutlich heißere Abgase als jene, er wird also durch jene im Zug benachteiligt. Kann nun der Lieferer, dem die Erzielung der Höchstleistung sonst nicht glückt, verlangen, die anderen Kessel sollten auch mit höherer Abgastemperatur betrieben werden, also seinem Kessel angepaßt werden?

Diese Frage beantwortet sich nach Lage des besonderen Falles. Kommt der Kessel in eine Gruppe gleichartiger Kessel, so wäre es unbillig, wenn man alle anderen Kessel schwach betreiben und gleichzeitig vom strittigen die Höchstleistung verlangen wollte. Der Lieferer kann gleichmäßige Steigerung der Last auf allen Kesseln verlangen, weil sie für ihn günstig und weil sie im normalen Betrieb stets möglich ist. Die anderen Kessel müssen also mit forciert oder aber außer Betrieb gesetzt werden. Zwischen diesen beiden Möglichkeiten hat der Abnehmer die Wahl, und der neue Kessel muß auf jede von beiden Arten die Leistung hergeben. Anders, wenn ein Kessel für einen Sonderzweck neben einen oder mehrere Kessel gesetzt wird, so daß er also zwar denselben Schornstein benutzt, aber den Dampf andershin liefert. In chemischen Betrieben kommen in dieser Weise Kessel verschiedenen Druckes vor, neben Zentralheizungskessel wird der Kessel für eine Warmwasserversorgung oder Badeeinrichtung gesetzt. Da wird nun der Lieferer des neuen Kessels nicht sagen können, die Warmwasserversorgung brauche nur dann die Höchstleistung zu geben, wenn auch die Heizkessel forciert werden — das wäre also bei strenger Kälte, oder bei milderer Temperatur müßte man unwirtschaftlich einige Kessel außer Betrieb setzen, damit der Rest hohe Abgastemperatur hat. In solchem gemischten Betriebe muß also, in angemessenen Grenzen, der neue Kessel bei jeder Betriebsart der älteren der Vereinbarung genügen, weil eben die normalen Betriebsverhältnisse es verlangen.

7. Gewährleistungen in Worten und Zahlen. Die Gewährleistung für eine Maschine soll allgemein eine Zahl sein, die erreicht werden muß, um die Zusage als erfüllt gelten zu lassen. Wird ein Wirkungsgrad von 70% = 0,70 zugesagt, so besteht die Nachprüfung eben in der Feststellung des wirklich vorhandenen Wirkungsgrades, der nun günstiger oder ungünstiger als der zugesagte sein kann. Ist eine gewisse Leistung der Maschine zugesagt, so hat der Prüfende festzustellen, ob diese Leistung von der Maschine erreicht werden kann oder ob nicht, oder er hat festzustellen, welche Leistung mit der Maschine zu erreichen

ist; diese erreichte Höchstleistung kann dann wieder günstiger oder ungünstiger als die zugesagte sein.

Sehr oft wird bei den Vereinbarungen auf die vom Verein Deutscher Ingenieure teilweise in Verbindung mit anderen Vereinen aufgestellten Regeln (Normen) verwiesen. Für den Gegenstand dieses Buches interessieren die folgenden (zu beziehen vom V. D. I., Berlin NW 7):

1. Normen für Leistungsversuche an Dampfkesseln und Dampfmaschinen, 1899 (abgedruckt Hütte, Band II). Neue Ausgabe in Vorbereitung.
2. Regeln für Leistungsversuche an Gasmaschinen und Gaserzeugern, 1906.
3. Regeln für Leistungsversuche an Ventilatoren und Kompressoren, 1912.

Der Inhalt und genaue Wortlaut der Regeln sei eingehendem Studium empfohlen; wegen ihrer rechtlichen Bedeutung vergleiche man § 22. Manches darf im folgenden übergangen werden, weil es in den Regeln behandelt wird; im allgemeinen gehen die folgenden Darlegungen über den Inhalt der Regeln hinaus. An dieser Stelle soll folgendes hervorgehoben werden.

Die älteren Vorschriften (1 und 2) billigen einen *Spielraum* (*Toleranz*, *Lizenz*) zu. Im allgemeinen soll eine Zusage dann als erreicht gelten, wenn die erreichte Zahl höchstens 5% ungünstiger ist als die zugesagte. Diese Bestimmung ist auch auf Maschinenarten anwendbar, für die keine Normen bestehen, soweit sie handelsüblich ist. Wo also ein Wirkungsgrad von 70% = 0,70 zugesagt, ein solcher von 68% = 0,68 festgestellt ist, da gilt die Zusage als erfüllt; denn die erreichte Zahl dürfte 5% von 70 = 3,5% ungünstiger sein als die zugesagte, es hätten nur 66,5% = 0,665 als Wirkungsgrad nachgewiesen zu werden brauchen.

Die Zulassung von 5% Spielraum erfolgt in der Annahme, technische Untersuchungen, zumal im praktischen Betriebe, seien im allgemeinen mit Fehlern bis zu 5% behaftet; bis zu diesem Betrage kann dann das Fehlergebnis in der Messung und gar nicht in der Maschine liegen. Da man aber manche Untersuchungen mit merklich geringerem Fehler als 5% machen kann, so kommt dann der Spielraum dem Lieferer zugute und wird oft in diesem Sinne mißbraucht. Deshalb ist er in den neueren Vorschriften ganz oder teilweise beseitigt. Nach den Regeln für . . . Gasmaschinen muß wenigstens die Höchstleistung voll nachgewiesen werden; und nach den Regeln für . . . Ventilatoren muß auch die Wirtschaftlichkeit voll erreicht werden.

Andere Untersuchungen sind nicht leicht auf die Fehlergrenze von 5% zu bringen. Die Vereinbarung des Spielraumes kann dann nicht von dem Nachweis entbinden, daß bei Ausführung der Untersuchung der Fehler nicht mehr als der Spielraum betragen hat. Das geschieht durch mehrfache Ausführung der Untersuchung und Prüfung der Ergebnisse auf Übereinstimmung. In den Normen heißt es — für andere Maschinenarten legt der Handelsbrauch fest —, daß eine Untersuchung nur dann zur Verweigerung der Abnahme führen solle, wenn zwei aufeinanderfolgende Untersuchungen übereinstimmend erfolglos verlaufen.

Diese Bestimmung kann zu Zweideutigkeiten und Unzuträglichkeiten führen. Sie ist zunächst selbstverständlich dahin zu ergänzen, daß aber die Zusage als erfüllt zu betrachten ist, wenn bei zwei aufeinanderfolgenden Untersuchungen die zugesagte Zahl erreicht bzw. um höchstens 5% unterschritten worden ist. Aber dann kann es vorkommen, daß aufeinanderfolgende Versuche immer abwechselnd ober- und unterhalb der Grenze bleiben, und die Untersuchung kann lange fortgesetzt werden, ohne zu einem Ergebnis zu führen. Wenn im oben genannten Beispiel der Wirkungsgrad nacheinander zu 67,0; 65,0; 67,0; 65,0% gefunden wurde, so dürfte man nach dem Wortlaut der Normen die Maschine nicht zurückweisen, weil der Beweis der Unzulänglichkeit nicht erbracht ist; trotzdem wird man rein sachlich schließen dürfen, erstens, daß der wahre Wirkungsgrad 66,0% betrage und also nicht genüge, zweitens, daß die Versuchsgenauigkeit eine große, der mittlere Versuchsfehler lange nicht 5% sei, und daß also die Toleranz überhaupt zu Unrecht in Anspruch genommen werde.

In anderen Fällen, namentlich wo Luftmessungen in Frage kommen (Kühlanlagen), wird eine Versuchsgenauigkeit selbst von $\pm 5\%$ nicht sicher zu erreichen sein, und es kann kommen, daß der wahre Wirkungsgrad über dem zugesagten Wert liegt, und doch durch die Meßungenauigkeit die Zusage nicht erfüllt erscheint. In solchen Fällen kann die Vereinbarung über den Spielraum zweckmäßig etwa wie folgt lauten:

„Eine Zusage gilt als erfüllt, wenn die gemessene Zahl um nicht mehr als den mittleren Fehler der Versuchsreihe ungünstiger ist als die zugesagte.“

Der mittlere Fehler einer Messung wäre durch den Ausdruck

$$f_m = \sqrt{\frac{\sum f^2}{m}}$$

gegeben, worin f die Abweichungen der einzelnen Versuchsergebnisse vom wahren Wert und m die Anzahl der Versuche ist. Da jedoch der wahre Wert nicht bekannt ist, sondern nur der wahrscheinliche, so gilt bei n zu ermittelnden Größen aus den m Versuchen

$$f_m = \sqrt{\frac{\sum v^2}{m - n}} \dots \dots \dots (7)$$

worin nun v die Abweichungen der einzelnen Versuchsergebnisse vom wahrscheinlichen Wert sind, der als Mittelwert nach der Formel

$$x = \frac{\sum l}{m} \dots \dots \dots (8)$$

errechnet wird. l ist das Ergebnis des einzelnen Versuches. Oft ist $n = 1$, dann ist also bei der einfachen Mittelwertbildung

$$f_m = \sqrt{\frac{\sum v^2}{m - 1}} \dots \dots \dots (7a)$$

Man kann auch den einzelnen Abweichungen ein verschiedenes

Gewicht beilegen, etwa bei Verdampfungsversuchen am Kessel proportional der Beobachtungszeit z . Dann ist

$$t_m = \sqrt{\frac{v^2 z}{m - n}} \dots \dots \dots (7b)$$

Im letzteren Fall ist das arithmetische Mittel x aus m Beobachtungsgrößen l mit den Gewichten z berechnet aus

$$x = \frac{\sum lz}{\sum l} \dots \dots \dots (8b)$$

Für Maschinen oder Maschinenanlagen können aber auch die *Gewährleistungen in Worten* gegeben sein. So wird allgemein die Verwendung guten Materiales oder neuzeitliche Bauweise zugesagt. Die Nachprüfung solcher Zusage erfolgt auf Grund der allgemeinen und besonderen Erfahrungen des Prüfenden und kann im einzelnen nicht gelehrt werden, kann also in diesem Buche auch nicht besprochen werden. Doch läßt sich manche allgemein gegebene Garantie auf eine Zahlenzusage zurückführen, etwa indem nachträglich festgelegt wird, für den Sonderzweck sei ein Flußeisen dann nicht mehr als gut zu bezeichnen, wenn es nicht eine gewisse Festigkeit und Dehnung aufweise, und ein Ölmotor gewisser Größe entspreche dann nicht neuzeitlichen Anforderungen, wenn er einen Ölverbrauch von mehr als x kg für die Kilowattstunde habe. Aber die beiden Beispiele zeigen schon, daß solche nachträgliche Zurückführung einer Wortzusage auf eine Zahlenzusage meist verneinenden Charakter hat, denn ein Ölmotor ist nicht allein deshalb als modern zu bezeichnen, weil er den heute üblichen Ölverbrauch hat. Es ist gerade der *Vorteil der Wortzusage vor der Zahlenzusage*, daß er nicht die mannigfachen Eigenschaften einer Maschine durch Benennung einer einzigen oder weniger Zahlen zu erschöpfen sucht. Die Wortzusage ist wertvoller, aber rechtlich und sachlich schwerer nachzuprüfen.

Wo Streit vorauszusehen ist, wird man gut tun, die Anforderungen soweit möglich zahlenmäßig durch nachträgliche Vereinbarung festzulegen, und dann erst zu prüfen, ob die nun teilweise an Stelle der Wortzusage vorbehaltlich der freien Beurteilung der allgemeinen Eigenschaften der Maschine getretenen Zahlenzusagen erfüllt sind. Bei der Festlegung ist der Spielraum auch festzulegen.

Oft kann man auch durch Vereinbarung passender Versuchsweisen die Wortgarantie in eine Zahlenzusage umwandeln. Für einen *Ventilator* sei „*Geräuschlosigkeit*“ zugesagt. Das darf nicht so verstanden werden, daß man seinen Gang nicht hören soll, wenn man neben ihm steht; solche Auslegung würde Unnützes und Unmögliches verlangen. Es kommt darauf an, daß man ihn in den Räumen nicht hört, die regelmäßig von Menschen benutzt werden und in denen Geräusch stören könnte. Aber auch dieses vorausgesetzt, ist es, wenn das Geräusch nicht offenkundig stark ist, oft schwer zu entscheiden, ob man im Raume etwas hört oder nicht. Man kann dann so verfahren. Der Ventilator wird beliebig an- und abgestellt, die Zeit aber jeweilig notiert. Unabhängig davon schreibt ein Sachverständiger oder jede der Parteien in dem vor

Geräusche zu schützenden Raum die Zeiten auf, zu denen sie An- und Abstellen des Ventilators zu bemerken glaubt. Das Vorhandensein von Geräusch gilt dann als erwiesen, wenn der Abnehmer z. B. 75% aller Betriebsänderungen richtig hat aufschreiben können.

8. Erläuternde und bedingende Angaben. Oft ist eine Zahlenzusage zur Erläuterung einer Wortzusage gegeben. Ist zugesagt, daß der Öl-motor durchaus neuzeitlich sein solle, ist außerdem noch ein Ölverbrauch angegeben, während doch an sich schon im Begriff der Neuzeitlichkeit liegt, daß auch der Ölverbrauch heutigen Ansprüchen genügt, so legt die Zahl für den Ölverbrauch von vornherein fest, was in dieser besonderen Richtung unter neuzeitlich verstanden werden solle, während in allen anderen Hinsichten der Motor der freien Beurteilung in bezug auf Neuzeitlichkeit unterliegt.

Die einzelnen Zahlenangaben einer Zusage sind nicht durchweg als je eine weitere Zusage aufzufassen; einzelne der Zahlen geben die Bedingungen an, unter denen die anderen gelten sollen, und bilden dann nicht eine Auflage für den Lieferer, sondern im Gegenteil für den Abnehmer; Mißverständnisse in dieser Hinsicht sind nicht selten.

Schon die einfache Zusage: „ein Öl-motor solle bei 100 kW indizierter Leistung einen Ölverbrauch von 400 g/kW·h haben“, enthält zwar außer der Zusage des Ölverbrauches noch die weitere, daß der Motor eine Belastung von 100 kW auch herzugeben bereit sei. Wenn aber die Maschine in die Gesamtanlage eingebaut ist und nun beim Indizieren nur 80 kW Leistung bei 380 g Ölverbrauch ergibt, so kann man nicht die Maschine beanstanden, weil sie die zugesagte Leistung nicht geliefert habe und weil daher eine zugesagte Eigenschaft fehle. Durch die Feststellung ist zur Prüfung der Garantie überhaupt nichts bewiesen. Die tatsächliche Lieferung der 100 kW war eine Voraussetzung des Lieferers der Maschine für die Öl-garantie; Sache des Abnehmers ist es, für diesen Betriebszustand zu sorgen, die 100 kW Belastung von der Maschine abzunehmen und dadurch die Maschine zu ihrer Erzeugung zu veranlassen. Die Zahl 100 kW hat also wesentlich bedingenden Charakter. Nur durfte die Maschine nicht bereits versagen — vielleicht der Regler aufsetzen —, wenn man auf 100 kW übergehen wollte. Rechtlich ist nicht die Erzeugung der 100 kW, sobald sie läuft, eine zugesagte Eigenschaft der Maschine; nur die Fähigkeit zur Erzeugung kann als solche angesehen werden.

Nicht leicht wird im genannten Beispiel Unklarheit herrschen, leichter aber in anderen, die weniger geläufig sind und doch gleich liegen. Eine Pumpe sei geliefert, die 3 m³/min Wasser bei 40 m Druckhöhe liefern soll; die Messung ergebe zwar 3,3 m³/min, aber nur 37 m Druckhöhe; der Abnehmer sagt, die größere Liefermenge helfe ihm nichts, die Druckhöhe aber sei nicht die zugesagte. Demgegenüber wäre wieder zu sagen, daß die Druckhöhe nicht von der Pumpe, sondern von der Rohrleitung abhängt, in die die Pumpe fördert; die Garantie, welches auch ihre genaue Fassung sei, kann nur bedeuten, die Lieferung der zugesagten Fördermenge solle auch noch möglich sein, wenn der Gegendruck bis auf 40 m steige. — Andererseits hat auch der Abnehmer gar kein In-

teresse an dem Gegendruck; je kleiner derselbe ist, desto besser für den Arbeitsverbrauch der Pumpe, also für die Betriebskosten (das gilt, passende Vergleichsbasis gewählt, auch für Kreiselpumpen).

Eigenartig liegen die Verhältnisse auch bei Zugerzeugungseinrichtungen für Dampfkessel, insbesondere bei Anlagen für künstlichen Zug. Hier wird die Zusage den praktischen Verhältnissen angepaßt, indem man sagt, es sollten B kg Brennstoff bestimmter Art auf dem Rost verbrannt werden können; dabei sollen am Fuchs ein l -facher Luftüberschuß und $t_{\frac{2}{3}}$ Temperatur sowie h mm Wassersäule Zug herrschen.

Hier neigt namentlich der Laie dazu, die Erzeugung der h mm WS als das Wesentliche der Zusage anzusehen und sie für nicht erfüllt zu betrachten, wenn diese Zugstärke nicht zu beobachten ist. In Wahrheit ist der Zweck der Zugerzeugungsanlage die Abführung der Verbrennungsgase, deren Menge dem Gewicht nach durch B und l , dem Volumen nach auch noch durch $t_{\frac{2}{3}}$ festgelegt ist. Es wird zugesagt, daß die aus diesen Daten zu berechnende Menge auch noch gegen h mm WS abgeführt werden könne; wie hoch sich die Zugstärke dann wirklich einstellt, hängt von den Widerständen der Feuerzüge ab, also nicht von der Zugerzeugungsanlage, sondern vom Kessel und der Dichtigkeit und Art seiner Einmauerung.

Auch hat der Kesselbesitzer kein Interesse an hoher Zugstärke, im Gegenteil, eine solche bedingt mehr Arbeit zur Abführung der Gase. Sein Interesse bezieht sich nur auf die (vollkommene) Verbrennung der bestimmten Kohlenmenge. Diese wird ihm zugesagt; jedoch wird die Zusage unter der Bedingung gegeben, daß nicht Undichtheiten des Kessels ein unangemessenes Steigen der Luftüberschußzahl l und zu große Gasmenge ergeben — daß nicht durch unvollkommene Wärmeabnahme aus den Gasen (zu kleine Heizfläche, Kesselstein- oder Flugaschenansatz) die Temperatur der Abgase unangemessen hoch steige — und daß endlich nicht die Widerstände von Rost und Zügen zu groß seien, durch die die Gase hindurchgesaugt werden müssen. Sind die Bedingungen innegehalten, so wird die Verbrennung der Kohle durch Abführung der Verbrennungsgase zugesichert.

Daß die Zugerzeugung der Zweck der Anlage ist, tut nichts zur Sache. Auch bei der Kraftmaschine ist die Erzeugung der Leistung der Zweck, zugesagt aber wird der Verbrauch unter der Bedingung, die Leistung könne der Maschine abgenommen werden.

9. Spielraum für Herstellung der Bedingungen. Allgemein kann man die Bedingungen nicht genau erfüllen. Bei der Kraftmaschine sorgt man bei Vorbereitung der Versuche für Abnahme der bedungenen Leistung, beim Versuch wird gleichwohl die wirkliche Leistungsabnahme etwas vom Sollwert abweichen. Der Lieferer darf nun nicht berechtigt sein, zu sagen: er habe seine Zusage für 100 kW Leistung gegeben, die Leistung sei aber beim Versuch 99,5 kW gewesen, also sei der Beweis für den Mehrverbrauch der Maschine mißlungen. Man wird lange probieren müssen, bis man bei einem Versuch noch genauer an die bedungene Leistung herankommt, und ein Beweis für Nichterfüllung der Zusage wäre dann überhaupt nicht zu erbringen.

Um solchen Ausgang zu vermeiden, gibt es zwei Wege, die beide üblich sind; entweder man setzt für die innezuhaltende Bedingung einen Spielraum fest, oder man rechnet auf den Sollzustand um.

Der erste Weg ist die *Festsetzung eines Spielraumes* angemessener Größe, innerhalb dessen, nach beiden Seiten vom Sollwert hin, die bedingte Größe vom Sollwert abweichen darf, ohne daß deshalb die Zusage nicht gleichwohl bindend wäre. In den Normen für Dampfmaschinen und Dampfkessel heißt es in Punkt 7: „Innerhalb derselben Grenzen (der Toleranz von 5%, §7) muß der zugesicherte Verbrauch an Brennstoff oder Dampf auch dann innegehalten werden, wenn bei Schwankungen während des Versuches die Belastung . . . im Mittel während des ganzen Versuches um nicht mehr als $\pm 7,5\%$, im einzelnen in der Regel um nicht mehr als 15%, von der dem zugesicherten . . . Verbrauch zugrunde gelegten Beanspruchung oder Belastung abgewichen ist. Sind größere Schwankungen im einzelnen aufgetreten, so soll der Versuch nur dann als gültig betrachtet werden, wenn das Durchschnittsergebnis dadurch nicht wesentlich beeinflusst wird.“

Diese Bestimmung läßt sich an Hand der Fig. 8 wie folgt interpretieren. Es sei bei der Leistung N_0 ein Wirkungsgrad η_0 zugesagt. Als Sollzustand ist damit Punkt A festgelegt, der ein Punkt auf der Wirkungsgradkurve ist, die nach OA verlaufen mag. Die Gewährleistung gilt mit 5% Spielraum, der Wirkungsgrad darf also um 5% von AN_0 kleiner sein als zugesagt, er braucht nur N_0B zu sein; nach oben darf er natürlich beliebig größer sein als zugesagt. Für die vorausgesetzte Leistung gilt der Spielraum von $\pm 7,5\%$; die Prozente sind von ON_0 zu nehmen. Die Leistung kann also bis $ON_1 = 0,925 \cdot ON_0$ herab oder bis $ON_2 = 1,075 \cdot ON_0$ heraufgehen, und immer muß die Zusage erfüllt bleiben. Daraus ergibt sich, daß die Zusage erfüllt ist, sofern nur die ermittelten Werte von N und η nicht außerhalb des schraffierten Flächenstückes fallen. — Ist nicht der Wirkungsgrad, sondern der Verbrauch zugesagt, so ergibt sich ebenso die schraffierte Fläche der Fig. 9, aus der der ermittelte Punkt nicht herausfallen darf.

Bei der Zulassung des Spielraumes in den Dampfmaschinennormen ist offenbar daran gedacht, es solle eine Umrechnung auf den Sollzustand grundsätzlich unterbleiben — der gemessene Punkt solle

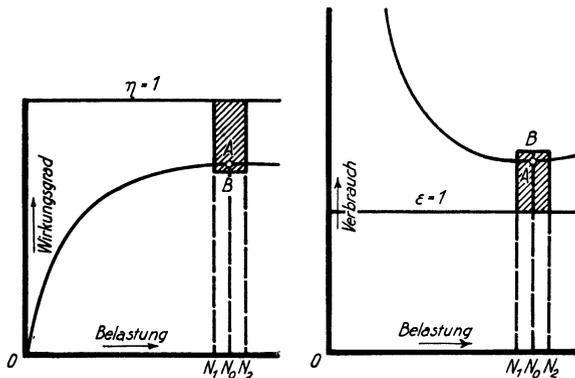


Fig. 8 und 9. Berechnung des Spielraums für Zusage und Bedingungen.

eben in die schraffierte Fläche der Fig. 8 und 9 fallen, die ja nach allen Seiten vom Sollwert Raum läßt.

Diese Art, den Interessen des Lieferers und des Abnehmers — sowie auch des sachverständigen Prüfenden — gerecht zu werden, ist vorzüglich, solange die Kurve des Wirkungsgrades und des Verbrauches etwa wagerecht läuft. Bei Fig. 10 führt sie zu einer Härte, indem ganz links nicht nur dem Lieferer kein Spielraum bliebe, sondern sogar die Abnahme verweigert werden müßte, obwohl die Maschine etwas besser gearbeitet hat, als zu erwarten war. Bei Gewährleistung nur eines Punktes gibt es aber kein Mittel, ohne Willkür diese Härte zu vermeiden, wenn man nur einen Versuch machen will. Man kann deshalb dem richtigen Punkt *A* durch Anstellen mehrerer Versuche und durch Bilden der Mittelwerte genügend nahezukommen suchen. Über die Art des Vorgehens müßte aber in diesem Fall vorher Übereinstimmung erzielt werden.

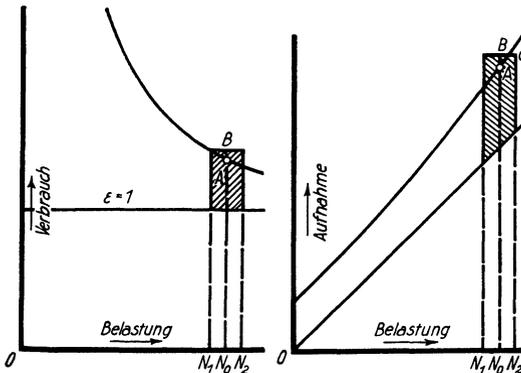


Fig. 10 und 11. Unstimmigkeiten bei Berechnung des Spielraums.

Die Normen wollen diesen Weg nur für den Wirkungsgrad und Verbrauch benutzt haben. In der Tat würden Verhältnisse ähnlich der Fig. 10 auftreten (Fig. 11), wollte man das gleiche Verfahren anwenden, wenn die Aufnahme für bestimmte Leistung zugesagt ist — was ja freilich selten geschieht.

Allgemein ist dieser erste Weg wegen Ausschlusses jeder Willkür

ausgezeichnet, solange die gewährleistete Größe nur schwach von der ausbedungenen beeinflusst wird oder sobald Über- und Unterschreitung des ausbedungenen Sollwertes die gewährleistete im gleichen Sinne beeinflussen. Man kann deshalb beispielsweise ebenso zulassen, daß die Umlaufzahl einer Dampfturbodynamo, oder daß die Klemmenspannung einer Dynamomaschine, oder daß der Betriebsdruck im Dampfkessel um $\pm 7,5\%$ oder um einen anderen angemessenen Betrag vom Sollwert abweiche, jedesmal wenn der Wirkungsgrad bestimmt werden soll, und kann jede Umrechnung dabei unterlassen.

10. Umrechnung der Versuchsergebnisse auf die Sollbedingungen.

Eine Umrechnung hat dann einzutreten, wenn die vom Sollwert abweichende ausbedungene Größe die garantierte in einem bestimmten Sinne beeinflusst. Die Umrechnung ist nur dann zuverlässig zu machen, wenn die Beeinflussung zahlenmäßig aus theoretischen Erwägungen oder aus Erfahrungen heraus sicher angegeben werden kann. Theoretische Erwägungen sind oft in mehrfacher Form von etwa gleicher Güte möglich; dann hat man im Zweifel die dem Lieferer günstigste Form der Umrechnung zu wählen. Da die praktischen Einflüsse einer Ände-

rung infolge von Nebeneinflüssen von den theoretischen leicht abweichen, so sollen die Abweichungen des wirklichen Zustandes vom ausbedungenen Sollzustand möglichst klein sein: eine Umrechnung soll nur in engen Grenzen statthaben.

Vor allem aber ist grundsätzlich zu beachten, daß es nicht darauf ankommt, was bei den abweichenden Versuchsbedingungen eine für diese anderen Bedingungen gebaute Maschine hätte leisten können, sondern darauf, ob und um wieviel die wirklich untersuchte Maschine von einmal festliegenden Abmessungen durch die geänderten Versuchsbedingungen günstig oder ungünstig beeinflußt wird. Bei der Umrechnung ist nicht zu vergleichen, was in beiden Fällen — der Sollbedingung und der wirklichen — theoretisch erzielbar ist, sondern was der Maschine praktisch zugemutet werden kann. Nicht das Verfügbare, sondern das Ausnutzbare ist in Betracht zu ziehen.

Einige *Beispiele* werden zeigen, worauf sich diese Sätze beziehen.

Es sei die Frage gestellt: Hat eine *Vergrößerung der Leistung einer Dampfmaschine* eine Verbesserung oder Verschlechterung des Dampfverbrauches zur Folge? Es wäre falsch, hierauf allgemein überhaupt nur zu antworten. Man hat nämlich zunächst gegenzufragen, ob es sich darum handelt, eine Maschine von z. B. 50 kW oder eine solche von 75 kW Nennleistung zu beschaffen, deren jede dann mit ihrer Nennleistung betrieben werden sollte; in diesem Falle nämlich wäre fast immer die größere Maschine die wirtschaftlicher arbeitende, die Vergrößerung der Leistung hat also eine Verbesserung des Dampfverbrauches zur Folge. Wenn man dagegen eine bestimmte Maschine von 50 kW Nennleistung mit 75 kW belasten will, so wird sie, wenn sie überhaupt die Leistung hergibt, jedenfalls weniger wirtschaftlich arbeiten, weil der Expansionsgrad geringer wird; die Vergrößerung der Leistung hat eine Erhöhung des Verbrauches, eine Verschlechterung zur Folge.

Ob in diesem einfachen und klarliegenden Fall Versehen wahrscheinlich sind, bleibe dahingestellt. In weniger durchsichtigen Fällen kommen Versehen gleicher Art sehr häufig vor. Deutet beispielsweise *höhere Drehzahl einer elektrisch betriebenen Kreiselpumpe* auf eine Erhöhung oder auf eine Ermäßigung der Wassermenge? Auch diese Frage ist je nach den Umständen zu beantworten. Ist die Steigerung der Drehzahl durch Schwächung der Erregung (des Gleichstrommotors) hervorgerufen worden, bleibt also der Düsenwert (§ 127, 137), gegen den die Pumpe arbeitet, unverändert, so wächst mit der künstlich erzeugten höheren Drehzahl die geförderte Wassermenge (und der Gegendruck, also auch die Leistung und daher die Stromaufnahme). Wenn man dagegen den Düsenwert verkleinert, so wird die Wassermenge und dadurch die Leistungsaufnahme verringert; bei geringerer Leistungsentnahme aber stieg die Drehzahl des Gleichstrommotors; diesmal also deutet die Erhöhung der Drehzahl auf kleinere Wasserförderung.

Ein *Peltonrad* mag bei *vereinbartem Gefälle* einen gewissen günstigen Wirkungsgrad liefern. Günstige Verhältnisse erzielt man bekanntlich dann, wenn die Geschwindigkeit des Schaufelkranzes rund die Hälfte

der Strahlgeschwindigkeit ist. Ist nun das Gefälle höher oder niedriger, so könnte man unschwer denselben Wirkungsgrad erzielen, wenn man die Drehzahl des Rades dem Gefälle entsprechend veränderte, damit jeweils die Geschwindigkeit des Schaufelkranzes gleich der halben Strahlgeschwindigkeit bleibt; oder man müßte zu gleichem Zweck den Kranzdurchmesser ändern, wenn die Drehzahl unverändert bleiben soll. In beiden Fällen dürfte man, wie gesagt, annehmen, daß die Leistung dem Gefälle proportional steigt und daß der Wirkungsgrad daher unverändert bleibt. Aber die Änderung des Kranzdurchmessers kommt auf eine Auswechslung der Maschine heraus, und die Veränderung der Drehzahl ist meist betriebstechnisch unzulässig; der Regler soll ja gerade die Konstanz der Drehzahl erzwingen. Daher wird bei einem bestimmten Rade jede Abweichung des Gefälles vom Sollwert, nach unten oder oben, eine Verschlechterung des Wirkungsgrades zur Folge haben, während natürlich die Leistung des Rades mit dem Gefälle steigt.

Daß es einen Unterschied in der Beurteilung macht, ob für eine erst zu beschaffende Anlage die Abmessungen bestens festzulegen sind, oder ob eine vorhandene Anlage von gegebenen Abmessungen unter verschiedenen äußeren Bedingungen läuft, ist oben schon erläutert. Für Dampfmaschinen wird dem durch Berechnung zweier Gütegrade Rechnung getragen. Eine für Auspuffbetrieb gebaute Dampfmaschine kann, mit Kondensation betrieben, nicht dasselbe leisten wie eine für Kondensation gebaute Maschine, die einen größeren Zylinder und vor allem größere Auslaß-Steuerkanäle erhalten haben würde; dem trägt die Berechnung des Gütegrades unter Beachtung der wirklichen Zylinderabmessungen Rechnung (§ 71); aber auch die für Kondensation gebaute Dampfmaschine arbeitet unter Umständen mit Auspuff ungünstiger als eine Auspuffmaschine, mindestens deshalb, weil die unnütz großen Zylinderabmessungen sie mechanisch belasten und Wärmeverluste bedingen, besonders aber dann, wenn diese unnütz großen Zylinderabmessungen zur Schleifenbildung im Diagramm führen.

Für die Dampfturbine liegt die Sache ganz ähnlich: Eine für Gegen-druckbetrieb bestimmte Dampfturbine wird unbillig belastet, wenn man sie mit Kondensation betreibt und ihr dabei das Wärmegefälle bis herab zum Kondensationsdruck als verfügbar anrechnet; sie paßt für diesen Betrieb nicht, weil ihre Düse dafür zu kurz und im Endquerschnitt zu eng ist.

In diesem wie in anderen Fällen kann es wohl angezeigt sein, zwar bei minderwertigen Bedingungen die Umrechnung zugunsten des Lieferers, nicht aber bei höherwertigen Bedingungen die Umrechnung zu seinen Ungunsten vorzunehmen; es bleibt zu prüfen, wie weit nach Lage der Dinge eine Ausnutzung der höherwertigen Bedingungen von der Maschine auch erwartet werden darf, und nach Befund unterbleibt eine Umrechnung auf höherwertige Bedingungen vollständig.

In Laienkreisen sind Vorurteile, die auf Verwechslung der konstant gehaltenen Größen bei Veränderung der Betriebsbedingungen beruhen und die vielfach zur Ablehnung brauchbarer Geräte (Verweigerung der

Abnahme) führen, schwer auszurotten. Ein Beispiel dafür ist folgendes aus der Flugtechnik. Der Flugmotor wird unmittelbar durch den Propeller belastet: die gesamte, im Motor erzeugte Energie wird im Propeller verbraucht. Der Propeller ist also ohne weiteres ein Bremszaum für den Motor, und zwar einer, dessen Moment M_d mit der Drehzahl n schnell zunimmt; es steigt ziemlich genau quadratisch mit der Drehzahl.

Die Leistung in Pferdestärken $N = \frac{M_d \cdot n}{716}$ wächst also mit der

dritten Potenz der Drehzahl. Daher ist es eine Erfahrungstatsache, daß mäßiges Nachlassen der Drehzahl ein relativ starkes Nachlassen der Motorleistung und daher der Flugleistungen andeutet; der Tourennachlaß um 10%, auf 0,9 der normalen, bedeutet einen Leistungsnachlaß auf das $0,9^3 = 0,73$ fache der normalen. Solch Tourennachlaß tritt ein, wenn nach längerem Gang die Kolben oder die Ventile undicht zu werden beginnen, oder infolge anderer Motorfehler. Mit Recht ist der Flieger solchem Nachlassen gegenüber sehr empfindlich. — Nun kommt es aber auch vor, daß ein Propeller schadhafte wurde und ausgewechselt werden muß, und daß dann die Maschine mit dem neuen Propeller langsamer läuft. Auf der eben genannten Erfahrung fußend, verhält sich der Flieger solchem Propeller gegenüber dann ablehnend und wechselt ihn kurzerhand wieder aus. Das ist unberechtigt. Denn diesmal blieb die Maschine unverändert. Für eine bestimmte Maschine hat die Beziehung des Momentes und der Leistung in Abhängigkeit von der Drehzahl den aus Fig. 2, S. 10, bekannten Verlauf, die Leistung hat einen Höchstwert, und Flugmotoren pflegen nicht allzufern diesem Höchstwert zu arbeiten. Daher bedeutet eine um 10% kleinere Drehzahl diesmal nur einen geringen Nachlaß an Leistung, der an sich unbedenklich ist; überdies wird die Minderleistung noch ausgeglichen, indem der Propeller bei niedriger Drehzahl günstiger arbeitet. Durch die beim Propellerwechsel eingetretene Verminderung der Drehzahl wird also die Flugleistung kaum vermindert, vielleicht sogar verbessert. Aber in Unkenntnis des Unterschiedes gegen die Verhältnisse beim Nachlassen des Motors werden, wie gesagt, die Propeller immer abgelehnt. Und doch ist die Sachlage einfach die, daß eine Verringerung der Drehzahl entweder von einer Schwächung der Maschine oder von einer Verstärkung des Propellers (größere Breite oder Länge) herühren kann — nur ersteres aber ist so überaus schädlich.

11. Barometerstand und Lufttemperatur. Äußere Betriebsbedingungen, die Einfluß auf das Versuchsergebnis haben, sind der am Versuchsort zur Versuchszeit herrschende Luftdruck und die Lufttemperatur, gelegentlich auch die Luftfeuchtigkeit. Nur bei Wasserkraft- und -fördermaschinen sowie bei elektrischen Maschinen pflegen diese Daten des Luftzustandes keinen merklichen Einfluß zu haben.

Nicht immer sind über die genannten Größen bestimmte Bedingungen in der Gewährleistung angegeben. Dann wird anzunehmen sein, daß die Höchstleistung bei jedem am Ort vorkommenden Luftzustand erreicht werden muß, und daß der Wirkungsgrad beim mittleren Luftzustand erreicht werden muß. Denn an der Höchstleistung kann

jederzeit ein vitales Interesse herrschen, während man hinsichtlich des Wirkungsgrades gute und schlechte Zeiten gegeneinander abgleichen kann.

Die Einwirkung des Luftzustandes auf die einzelnen Maschinenarten ist sehr verschieden, teils bedeutend, teils verschwindend. Einige Beispiele seien gegeben.

Bei Gas-Kraftmaschinen wird bei abnehmendem Luftdruck das Füllgewicht verringert, daher sinkt die Höchstleistung dem Barometerstand direkt proportional. Steigende Lufttemperatur hat ähnlichen Einfluß. Wo flüssige Brennstoffe in der Maschine verbrannt werden, da wird meist dieser Einfluß weniger scharf sein; denn wenn auch bei geringerer Luftdichte weniger Luft eingenommen wird, so wird dieselbe wegen des normal vorhandenen Luftüberschusses doch meist noch zur Verbrennung reichen; wie weit sich durch geänderte Vergaserwirkung und daher wechselndes Mischungsverhältnis die Brisanz ändert, ist schwer zu entscheiden. Eine Maschine, die normal mit Luftmangel arbeitet (Flugmotoren), wird natürlich direkt durch die Luftdichte beeinflußt.

Bei Dampfkräftenanlagen ist ein Unterschied zu machen zwischen offenem und geschlossenem Betrieb. Ersterer liegt rein bei Auspuffmaschinen vor, letzterer dann, wenn das Kondensat rückgespeist wird.

Zeigt bei offenem Betrieb z. B. das Manometer des Kessels stets 9 at, ist dabei der Luftdruck einmal 1,05, ein zweites Mal 0,95 at — Wertunterschiede, die an demselben Ort nicht ganz erreicht werden —, so spielt sich der Kreisprozeß einmal zwischen den absoluten Drucken 10,05 und 1,05 at, den zugehörigen Siedetemperaturen 179,1 und 100,5 °C ab, das andere Mal zwischen 9,95 und 0,95 at entsprechend 178,7 und 97,6 °C; bei gleicher Druckstufe von 9 at ist also die Temperaturstufe einmal 78,6°, das andere Mal 81,1°; ein Carnot-Prozeß hat einmal $78,6 : 452 = 0,174$, das andere Mal $81,1 : 452 = 0,179$ zum Wirkungsgrad. Ein niedriger Barometerstand ist also, bei vorgeschriebenem Überdruck, der Wärmeausnutzung günstig. Auch nach dem *i*s-Diagramm (§ 49, 57) sind im ersten Fall 93,0, im zweiten Fall 95,0 kcal von beidemal etwa 666,2 kcal ausnutzbar. Das Beispiel nimmt Satttdampf als Ausgang an, aber bei Annahme einer bestimmten Überhitzungstemperatur in beiden Fällen bleibt das Verhältnis ähnlich (z. B. bei 250° Anfangstemperatur ausnutzbar lt. Entropiediagramm 100,9 bzw. 104,1 kcal von beidemal 705,2 kcal). An diesem Zusammenhang läßt sich experimentell nichts ändern.

Bei geschlossenem Betrieb dagegen ist man an einen bestimmten unteren Druck nicht gebunden. Man kann die Maschine bei beiden Luftdrucken doch identisch gleich betreiben, indem man einmal das Vakuum 0,85, das zweitemal 0,75 sein läßt und den Kesselüberdruck einmal auf 8,95, das zweitemal auf 9,05 at einregelt. Dann hat man beidemal zwischen den Druckgrenzen 10,0 bis 0,2 at abs gearbeitet, und die Gesamtanlage, deren Inneres ja vom Luftdruck nicht beeinflußt wird, von den Einwirkungen des Luftdruckes befreit. In dieser Weise kann man also bei Abnahmeversuchen anormale Luftdrucke und bei Serienversuchen wissenschaftlicher Art wechselnden Luftdruck

experimentell eliminieren und dadurch Umrechnungen umgehen. — Wendet man diesen Kunstgriff nicht an, so bleibt ein Einfluß des wechselnden Luftdruckes bestehen, er ist aber gleichwohl geringer als früher; denn der Kondensator pflegt einigermaßen konstanten absoluten Druck zu halten, z. B. 0,2 at abs; geht daher der Kesseldruck von 10,05 auf 9,95, so haben wir im zweiten Fall ein kleineres Druckgefälle und daher eine kleinere Ausnutzbarkeit des Dampfes (bei Sattedampf: Wärmegefälle 146,5 bzw. 145,0 kcal); der Einfluß ist also diesmal auch umgekehrt wie früher, die Ausnutzbarkeit bei hohem Barometerstand höher — ein Beispiel für die große Vorsicht, die man bei allen solchen Überlegungen betreffend Einfluß der äußeren Bedingungen, von Fall zu Fall verschieden, walten lassen muß. — Bei Kühlmaschinen liegen die Verhältnisse ebenso.

Neben diesen Einflüssen thermischer Natur übt die Luftdichte noch mechanischen Einfluß auf den Schwungradwiderstand; dieser oft unterschätzte Einfluß ändert sich, wie jeder Ventilationswiderstand, einfach proportional dem Luftdruck. Wird auch die Größe des Schwungradwiderstandes oft unterschätzt, so wird man doch seine Änderungen meist vernachlässigen können.

Bei Ventilatoren wird durch die Dichte der geförderten Luft in mehrfachem Sinne Einfluß geübt (§ 142): bei abnehmender Luftdichte mindert sich die Leistungsaufnahme, das geförderte Luftgewicht und der Förderdruck (in kg/m²), es mehrt sich dagegen das geförderte Luftvolumen und die Förderhöhe (in m LS); der Barometerstand hat keinen Einfluß auf das Druckverhältnis, wohl aber die Temperatur.

Bei Gebläsen werden die Verhältnisse verschieden, je nachdem sie gegen konstanten Druck oder gegen konstante Öffnung arbeiten.

12. Zustand der Maschine. Wirkungsgrad eines Flaschenzuges. Bei Versuchen gewöhnlicher Art soll sich die Maschine in *normalem Zustand* befinden; dazu gehört: hinreichende, nicht übermäßige Schmierung, nicht zu große Lässigkeit, Eingelaufensein. Die Bedeutung der Einflüsse sei durch Beispiele belegt.

An einer Dampfmaschine wurde die *Schmierung* aller Teile einmal normal, ein zweites Mal übermäßig (etwa sechsmal normal) bedient. Die Versuchsergebnisse waren:

Tabelle 1. Einfluß der Schmierung.

		Schmierölverbrauch		normal		sechsfach	
		Gegendruck at		0,12	0,20	0,13	0,21
1	Indizierte Leistung N_i kW	125,8	125,7	125,3	125,2		
2	Nutzleistung N_e kW	112,9	111,4	114,3	112,9		
3	Mechanischer Wirkungsgrad $\frac{N_e}{N_i}$ —	0,898	0,886	0,912	0,902		
4	Leistungsverlust kW	12,9	14,3	11,0	12,3		
5	„ %	10,2	11,4	8,8	9,8		

Der Einfluß des Gegendrucks beschäftigt uns hier nicht. Zwei Werte desselben sind nur angeführt, um aus der Übereinstimmung zu zeigen,

daß durch Steigerung des Ölverbrauches eine immerhin merkliche Verbesserung des mechanischen Wirkungsgrades sich erzielen läßt; der Verlust an Leistung sinkt um über 10% seines Betrages. — Bei Verbrennungskraftmaschinen würde bei ausgiebiger Zylinderschmierung ein weiterer Vorteil durch Verbrennung von Öl im Zylinder entstehen.

Für eine Gewährleistung des Verbrauches und namentlich des mechanischen Wirkungsgrades ist also eine Angabe des Schmierölverbrauches erforderlich.

Bezüglich der *Lässigkeit* durch die Kolben und Stopfbüchsen der Kolbenmaschinen, längs der Kreiselräder der Kreiselradmaschinen, sei darauf aufmerksam gemacht, daß sowohl durch strammgehende Kolbenringe, durch Schaben des Kreiselrades der Wirkungsgrad verschlechtert wird als auch durch schlappe durchlässige Kolbenringe, durch überweiten Spalt. Der erste Fehler wirkt auf die Aufnahme vergrößernd, der zweite auf die Lieferung vermindern (bei Arbeitsmaschinen; bei Kraftmaschinen ist es umgekehrt).

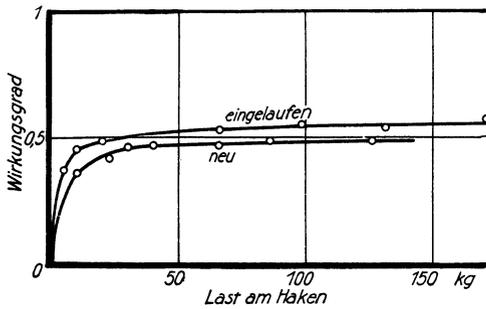


Fig. 12. Wirkungsgrad eines Flaschenzuges, neu und eingelaufen.

Der Einfluß des *Einlaufens* ist von ähnlicher Größenordnung wie der des Schmierens. In Fig. 12 ist zur Darstellung gebracht, in welchem Maße ein Flaschenzug in neuem Zustande schlechtere Ergebnisse zeitigt, als in eingelaufenem.

Da sich in den späteren Kapiteln nicht Gelegenheit bietet zu besprechen, wie man den *Wirkungsgrad eines Flaschenzuges* feststellt, so sei dieser einfache Versuch gleich hier kurz besprochen. Der Flaschenzug hat eine Kette, an der die zu hebende Last Q kg hängt (Lastkette), und eine andere, an der die treibende Kraft angreift (Handkette).

Wird Q in irgendeiner Zeit um s_2 Meter gehoben, so ist die nutzbar geleistete Arbeit $N_2 = Q \cdot s_2$ mkg; bezeichne P kg die Kraft, die an der Handkette aufgewendet werden muß, um die Kette durchzuziehen, s_1 aber den Weg der Handkette, das heißt die Gesamtlänge von Kette, die durch die Hand laufen mußte, während die Last sich um s_2 hob, dann ist $N_1 = P \cdot s_1$ mkg die von der Hand in die Handkette in gleicher Zeit eingeführte Arbeit. Der Wirkungsgrad des Hebezeuges ist

$$\eta = \frac{Q \cdot s_2}{P \cdot s_1} \dots \dots \dots (8)$$

Nun ist $\frac{s_2}{s_1} = \epsilon$ die *Übersetzung* des Hebezeuges; sie ist ein Kennzeichen des Hebezeuges, indem sie (wenn die Ketten nicht gleiten) mit der Belastung sich nicht verändert; sie wird auch durch Abnutzung

der Lager und etwa vorhandener Zahn- oder Schneckentriebe nicht beeinflusst, höchstens durch Abnutzung der Kettennüsse und durch Änderung der wirksamen Kettengliedlänge (Abnutzung oder Längung), die doch erst nach langer Zeit zu erwarten ist. Also wird die Übersetzung zweckmäßig von vornherein festgestellt. Sie wird, so wie sie definiert ist, immer ein echter Bruch sein.

Man bestimmt die Übersetzung des Hebezeuges ohne Last an der Lastkette, oder wenn das Gerät zu totem Gang neigt, mit einer beliebigen mäßigen Last, indem man den Lasthaken auf einen beliebigen Gegenstand gerade aufsitzen läßt und sich die Stellung der Handkette durch Markung eines Gliedes merkt; man hebt den Haken dann so weit, bis man gerade einen Meterstab unter ihn schieben kann. Man beobachtet dabei, um toten Gang zu vermeiden, noch die Vorsicht, den Haken erst etwas höher zu bewegen und ihn dann von oben her auf den Meterstock aufsitzen zu lassen, vorausgesetzt, daß man ihn auch das erstemal von obenher aufsitzen ließ. Man hat die Anzahl der vollen Umläufe der in sich geschlossenen Handkette gezählt und mißt nun noch die Strecke aus, um die das gemarkte Glied von seiner Anfangsstellung abweicht, mißt auch vom selben Glied an bis wieder zu ihm die ganze Länge der in sich geschlossenen Handkette, und hat durch einfache Rechnung die Übersetzung.

Nachdem man die Übersetzung kennt, muß man zu der z. B. durch die Gewährleistung vorgeschriebenen Last Q die zugehörige Kraft P an der Handkette bestimmen. Man hängt Q an den Lasthaken und hat nun zweckmäßig einen Gewichtssatz mit kleinen leichten Haken an jedem Gewicht zur Hand. Man hängt gerade soviel Gewichte an die beim Steigen der Last niedergehende Seite der Handkette, bis die Gewichte, einmal angestoßen, die Last gerade langsam durchziehen, ohne Beschleunigung, aber auch ohne sofort stehenzubleiben. Da ein Hebezeug nicht Präzisionsarbeit ist, so wird man bald bemerken, daß je nach den Zufälligkeiten des Getriebes an einer Stelle schon Beschleunigung stattfindet, während an anderen Stellen das Getriebe doch noch zum Stillstand kommt; man wird dann etwas von Gewichten zu- und absetzen, bis man den billigen Mittelwert mit angemessener Genauigkeit gefunden hat. Man kann die Beobachtung natürlich immer nur über die halbe Handkettenlänge erstrecken. Nun ist ohne weiteres

$$\eta = \varepsilon \cdot \frac{Q}{P} \quad \dots \dots \dots (8a)$$

Zum Heben der Last Q ist also die Kraft P wirklich nötig; wenn das Hebezeug verlustfrei arbeitete, so sollte theoretisch nur eine Kraft $P_{th} = \varepsilon \cdot Q$ an der Handkette aufgewendet zu werden brauchen. Von den aufgewendeten P kg ist also der Anteil $P - P_{th} = R$ nur aufzuwenden gewesen, um die Verluste im Hebezeug zu decken: der Reibungsverlust im Getriebe bezogen auf die Handkette, anzugeben in kg.

Das Hebezeug dürfte selbstsperrend sein; die Last sinkt dann nicht von selbst herab, wenn wir die Handkette loslassen. Wir messen noch die Kraft, die am anderen Trumm der Handkette aufzuwenden ist, um

die Last zum gleichmäßigen *Abwärtsgang* zu bringen, genau in eben beschriebener Weise. Man ermittelt dabei eine Kraft P' , die zweckmäßig als negativ einzuführen ist, weil sie am anderen Trumm, also in entgegengesetzter Richtung angreift. — Am verlustlosen Flaschenzug — der dann allerdings nicht selbst sperrte — hätte man nicht nur nicht P' am anderen Trumm aufzuwenden brauchen, sondern hätte sogar noch am ersten Trumm gegenhalten müssen, und zwar im Beharrungszustand wieder mit der Kraft $P_{th} = \varepsilon \cdot Q$; so lästig und für den Arm ermüdend das wäre, so bedeutet das Gegenhalten doch im theoretischen Sinne einen Gewinn; es würde die beim Sinken der Last freiwerdende Arbeit in den Arm eingeführt werden, der nur leider für rationelle Arbeitsaufnahme nicht geeignet ist. Also wird diesmal durch die Reibung im Getriebe außer der theoretisch verfügbaren Kraft P_{th} auch noch die wirklich aufgewendete Kraft P' vernichtet, im ganzen ist der Rei-

Tabelle 2. Untersuchung eines Handhebezeuges für 300 kg.

Tag der Untersuchung: 12. November 1909.

Raumtemperatur 16° C.

Übersetzung von der Handkette zur Last: $\varepsilon = 1 : 12,4 = 0,0805$.Übersetzung von der Handkette zur Katzenfahrt: $\varepsilon' = 1 : 2,25 = 0,445$.Gewicht der Katze mit Ketten und Haken: $K = 49$ kg.

	Q = Last am Lasthaken kg	0	10	20	50	100	200	300
A. Hubbewegung:								
1	Im Heben: P = Kraft an der Handkette, gemessen kg	0,7	2,15	3,15	7,5	14,0	30	45
2	$\eta = \frac{\varepsilon \cdot Q}{P}$ = Wirkungsgrad —	0	0,37	0,51	0,55	0,57	0,55	0,55
3	$R = P - \varepsilon \cdot Q$ = Reibungsverlust, bezogen auf die Handkette . . kg	0,7	1,35	1,54	3,5	6,0	14	21
4	Im Senken: $-P'$ = Kraft an der Handkette, gemessen kg	0,5	1,2	1,6	2,8	3,0	5,5	8,0
5	$R' = -P' + \varepsilon Q$ = Reibungsverlust, bezogen auf die Handkette . . kg	0,5	2,0	3,2	6,8	11,0	22	32
6	$R'' = R' - R$ = Reibung in der Rückdruckbremse, bezogen auf die Handkette kg	-0,2	0,7	1,7	3,3	5,0	8	11
B. Fahrbewegung.								
7	$Q + K$ = Verschobene Last kg	49	59	69	99	149	249	349
	P_0 = Kraft an der Handkette, gemessen							
8	nach rechts kg	1,5	1,7	1,8	2,6	4,0	6,5	8,0
9	nach links kg	2,0	2,4	2,5	2,8	4,0	6,5	8,0
10	Mittelwert kg	1,75	2,05	2,15	2,7	4,0	6,5	8,0
11	$\varrho = \frac{P_0}{\varepsilon' \cdot (Q + K)}$ = Reibungsziffer im Fahren . . . —	0,080	0,078	0,070	0,061	0,060	0,059	0,052

bungsverlust (der aber, soweit er Selbstsperrung bewirkt, erwünscht und absichtlich herbeigeführt, also nur im wissenschaftlichen Sinne ein Verlust ist) $R' = -P' + P_{th}$; hierin soll P_{th} dem absoluten Wert nach eingeführt sein. — Die Berechnung eines Wirkungsgrades im Abwärtsgang hat wenig Sinn; man erhält bei selbstsperrenden Hebezeugen eine negative Zahl, größer oder kleiner als eins, was korrekt, aber nicht greifbar ist.

Eine vollständige Versuchsreihe am Hebezeug nimmt man auf, indem man der Reihe nach verschiedene Lasten an den Haken bringt und jedesmal die Beobachtungen im Heben und im Senken macht.

Bei der Variation der Versuche vergesse man namentlich nicht die Grenzfälle. Als solcher kommt hier die Last $Q = 0$ in Frage. Man stelle also die Kräfte P und P' auch fest, wenn keine Last am Haken ist. Man erhält für beide Fälle endliche Kräfte, die zur Überwindung der

Reibungswiderstände dienen. Der Wirkungsgrad im Heben wird natürlich Null.

Die Versuchsreihe Tab. 2 ist nun ohne weitere Erläuterungen verständlich. Das Ergebnis ist in Fig. 13 dargestellt. Danach hat die Wirkungskurve die nach § 5 charakteristische Gestalt. Der Wirkungsgrad hat für einen weiten Bereich den Wert $\eta \approx 0,55$.

Die Theorie lehrt, daß selbstsperrende Hebezeuge $\eta \geq 0,5$ haben. Unser Hebezeug ist also künstlich (durch Rückdruckbremse) selbstsperrend gemacht. Daraus erklärt es sich auch, daß der Reibungsverlust im Senken viel — um die Reibung R'' des Rückdruckes — größer ist als im Heben.

Die letzten Zeilen von Tabelle 2 sowie Fig. 13a beziehen sich auf die *Fahrbewegung der Katze*, die auch durch Handkette und Zahntrieb erfolgte. Die Übersetzung ϵ' von der Handketten- zur Katzenschwin-

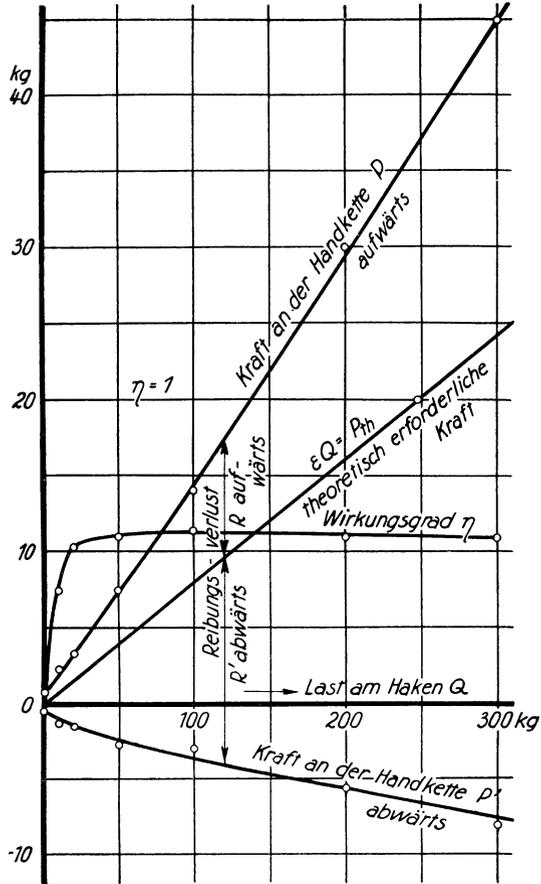


Fig. 13. Kräfte und Wirkungsgrad am Flaschenzug.

digkeit wird ähnlich ermittelt wie für ε besprochen. Die Kraft P_0 an der Handkette wird als Mittelwert aus Rechts- und Linksbewegung gefunden, um mangelhafte Auswägung der Fahrbahn zu eliminieren. Es ergibt sich dann eine theoretische Kraft P_0/ε' , die an der Katze wagerecht angreifen muß, um die Last $Q + K$ zu verfahren. Denn für das Verschieben wird das Eigengewicht K der Katze mit in Betracht zu ziehen sein. Ist zum Verschieben der Last $Q + K$ auf wagerechter Unterlage eine wagerechte Kraft P_0/ε' nötig, so pflegt man den Quotienten $\frac{P_0}{\varepsilon' \cdot (Q + K)} = \rho$ als die Reibungszahl zu bezeichnen.

Die hier zu berechnende Reibungszahl ist allerdings ein stark komplexer Begriff, weil neben den Widerständen der eigentlichen Fahrbewegung (Lager- und Rollenreibung) noch die Verluste in dem die Übersetzung ε' ergebenden Getriebe in ihm enthalten sind. Zur Vereinzelung der Verluste könnte man die Kraft zum Verschieben direkt an der Katze angreifen lassen. Immerhin geben auch solche komplexen und im wissenschaftlichen Sinne unreinen Zahlenangaben oft wertvolle Fingerzeige für den Bau ähnlich gebauter Modelle anderer Größe.

Die Bildung der Reibungszahl als eines Quotienten hatte nämlich den Zweck, auf eine unbenannte, *dimensionslose Zahl* zu kommen, die als solche *von der Größe der Maschine und von der Belastung grundsätzlich unabhängig* ist und daher die Wirkung gewisser sekundärer Einflüsse erkennen läßt. Zu ähnlichem Zweck bildet man die Wirkungsgrade. Vgl. später § 56, 138.

13. Gleichzeitige Erfüllung der Zusagen. In den meisten Fällen wird nicht nur eine Angabe in der Gewährleistung gemacht. Dann ist von Fall zu Fall zu entscheiden, in welchem Verhältnis die einzelnen Angaben zueinander stehen. Sie können einander erläutern oder können einander bedingen, so wie in § 8 besprochen. Ist beides nicht der Fall, so handelt es sich also um eine Reihe einzeln gegebener Zusagen, und es bleibt zu entscheiden, ob und wie weit dieselben gleichzeitig erfüllt werden müssen. Hier ist allgemein auf gleichzeitige Erfüllung aller Zusagen zu halten.

So möge für einen Dampfkessel bei $22 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ Heizflächenbelastung ein Wirkungsgrad von 70% und außerdem eine Höchstleistung von $30 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ zugesagt sein. Nachdem bei den Vorversuchen der Lieferer gemerkt hat, daß er den Wirkungsgrad nicht gut erreicht, verkleinert er in bekannter Weise die Rostfläche des Planrostes durch Bedecken mit Ziegeln so weit, daß er noch $22 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ gut erreicht; der Wirkungsgrad wird im allgemeinen dadurch günstiger werden, und die Zusage wird erfüllt. Um dann die andere Zusage von $30 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ Höchstbelastung zu erfüllen, müßte er den Kessel außer Betrieb setzen und die Vermauerung beseitigen. — Solch Verfahren wäre bei einem gewöhnlichen Planrost unzulässig; der Abnehmer kann verlangen, daß die Zusagen gleichzeitig erfüllt werden und nicht nur zur Zeit entweder die eine oder die andere.

Wesentlich für diese Beurteilung ist, daß der Übergang von einem Garantiezustand zu einem anderen nicht ohne Anhalten möglich ist;

man müßte das Feuer entfernen, um die Steine einzubauen, vermutlich auch, um sie wieder auszubauen. Wenn dagegen eine Rostbauart geliefert ist, deren wirksame Fläche im Betriebe verändert werden kann, dann darf und muß die Benutzung dieser Einrichtung dem Lieferer gestattet werden.

Diese Auffassung wird nicht auf Widerspruch stoßen; schwieriger ist die Auslegung, wenn die Kesselanlage außer mit veränderlichem Rost noch mit einer selbsttätigen Zugregelung versehen wäre, wie solche auch bei Hochdruckdampfkesseln vorkommt. Sie hat den Zweck, den Kesselbetrieb von der speziellen Aufsicht des Heizers zu befreien, so daß er für eine gewisse Zeit sich selbst überlassen werden kann und daß der Heizer daher eine größere Zahl von Kesseln beaufsichtigen kann, weil die Aufsicht nur eine generelle zu sein braucht. Diese Absicht wird voll nur dann erreicht, wenn der Kessel mit voller Rostfläche betrieben wird; sonst kann es kommen, daß die

Dampfentnahme steigt, während der Rost gerade verkleinert ist, so daß der selbsttätige Zugregler trotz voller Öffnung des Rauchschiebers die nötige Kohlenmenge auf dem verkleinerten Rost nicht verbrennen kann. Bei selbsttätiger Regelung würde also die gleichzeitige Erfüllung

der Zusagen nicht gegeben sein, wenn man die Rostverkleinerung beim Nachweis des Wirkungsgrades zuläßt, und man hätte nur die Wahl zwischen der Einstellung auf guten Wirkungsgrad oder der auf hohe Leistung.

Ob hieraus der Schluß berechtigt ist, die beiden Garantien seien abzuleisten, ohne daß der Rost inzwischen verstellt werden darf, bleibe offen. Es ist nämlich andererseits darauf hinzuweisen, daß die Vereinigung des veränderlichen Rostes mit dem selbsttätigen Zugregler nach dem Gesagten überhaupt nur Sinn hat in Anlagen, in denen die Höchstleistung nur zu gewissen Zeiten zu erwarten ist.

Dieser Gesichtspunkt sollte stets in Betracht gezogen werden, nämlich, ob denn nach der Art des Betriebes jede der Garantien zu jeder Zeit verlangt werden muß.

Ein weiteres Beispiel für die Gleichzeitigkeit der Zusagen ist in § 54 besprochen: Dort wird die Frage erörtert, ob von mehreren, mit der Hand zu betätigenden Düsen einer Dampfturbine eine verschlossen werden darf, wenn dadurch bei mäßigen Belastungen ein besserer Dampfverbrauch erzielt wird. Im allgemeinen wird diese Handver-

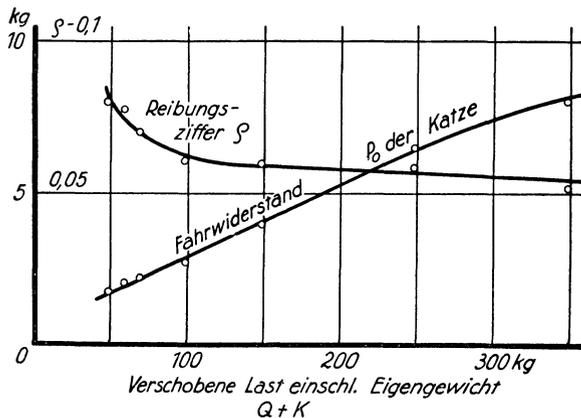


Fig. 13a. Widerstand beim Verfahren einer Laufkatze.

stellung nicht zuzulassen sein, weil in jenem wirtschaftlich günstigeren Zustand die Turbine versagt, wenn die Belastung unerwartet steigt. Erleichternd — im Vergleich zum Abdecken des Rostes mit Steinen — ist es, daß man die Turbine wenigstens nicht erst anzuhalten braucht, um von der guten Wirtschaftlichkeit zur Höchstleistung überzugehen.

Entgegengesetzt zu beurteilen ist die Benutzung der Handverstellung bei der Niederdruckfüllung einer Verbundmaschine (§ 74). Auch hier paßt man sich durch Bedienen derselben dem jeweiligen Leistungsbedarf an, indem man immer die für die augenblickliche Leistung wirtschaftlich günstigste Niederdruckfüllung einstellt. Aber hier wird durch die Füllungsveränderung die erzielbare Höchstleistung nicht oder doch nicht wesentlich beeinflußt, und daher kann man sich der Verstellung unbedenklich bedienen.

Eine besondere Beurteilung erfordert der Fall, wo nur ein Dampfverbrauch bei einer bestimmten Leistung garantiert, von einer Höchstleistung aber keine Rede ist. Bei der Dampfturbine mit Handstellung der Düsen kann man ganz unbedenklich die Einstellung der Düsen so zulassen, wie der Lieferer es für gut hält; daß die Turbine nach weiterer Öffnung der Düse eine höhere Leistung geben kann, ist eine gute Eigenschaft über die Zusage hinaus. Beim Kessel dagegen kommt man hinsichtlich der Zulässigkeit der Rostverkleinerung zu einem anderen Ergebnis, weil meist im Angebot die vorhandene Rostfläche angegeben ist. Die Zusage will dann also den zugesagten Verbrauch mit dieser Rostfläche schaffen; das Recht und die Möglichkeit, durch Verkleinerung der Rostfläche eine weitere Verbesserung des Verbrauches — unter den zugesagten herunter — zu erreichen, wenn dauernd nur eine kleine Leistung verlangt wird, darf dem Abnehmer nicht dadurch verkümmert werden, daß man diese Maßregel schon anwendet, um auf den zugesagten Dampfverbrauch zu kommen. So wenigstens wird man über die Vermauerung des gewöhnlichen Planrostes urteilen.

14. Ausgleich von Zusagen gegeneinander. Bei einheitlicher Lieferung eines Maschinensatzes für einen bestimmten Zweck werden oft die Gewährleistungen einzeln für jede Teilmaschine angegeben. Solche Garantie pflegt nämlich für jede Maschine einzeln von verschiedenen Stellen abgegeben zu sein, entweder von Unterlieferanten an den Gesamtlieferer oder aber von den einzelnen Abteilungen einer größeren Fabrik an die Angebotsabteilung. Meist ist sie nicht zu einer Gesamtgarantie verarbeitet.

Man pflegt dann grundsätzlich dem Lieferer zuzubilligen, daß die Ergebnisse für die einzelnen Teile gegeneinander ausgeglichen werden, dergestalt, daß nicht Teile des Satzes wegen Minderergebnissen zurückgewiesen werden können, solange der Satz im ganzen das leistet, was zugesagt wurde. Es mögen für Teile *A* und *B* eines Satzes Wirkungsgrade von 0,70 und 0,50 angegeben sein, was also einem Gesamtwirkungsgrad $0,70 \times 0,50 = 0,35$ entspricht. Bei der Abnahme wird für den Teil *A* nur der Wirkungsgrad 0,65 gemessen — der Spielraum, der 5% von $0,70 = 0,035$ ausmacht und ein Meßresultat $\cong 0,665$ bedingt, ist also unterschritten. Aber der Teil *B* hat statt 0,50 einen Wirkungs-

grad 0,55 aufgewiesen, das ist 10% besser als zugesagt; der Gesamtwirkungsgrad von $0,65 \times 0,55 = 0,357$ ist also sogar etwas günstiger, als zugesagt worden war.

Bei so beschaffenen Verhältnissen spricht man nun üblicherweise nicht dem Abnehmer das Recht zu, den Teil *A* der Lieferung zurückzuweisen, weil für ihn die Zusage nicht erfüllt sei. Noch weniger kann er die Gesamtlieferung zurückweisen, weil ein Teil den Bedingungen nicht entspricht. Das Minderergebnis des einen wird gegen das Mehrergebnis des anderen Teiles um so mehr auszugleichen sein, als ja das Gesamtergebnis in diesem Fall besser ist als zugesagt; aber auch den Spielraum von 5% läßt man dem Gesamtergebnis ohne Bedenken zugutekommen.

Das ist allerdings einwandfrei nur bei reinen Satzlieferungen möglich, wo jeder Teil nur für den folgenden arbeitet. Zweifel entstehen beispielsweise bei einer Schlachthof-Kühlanlage, wo der Dampfkessel außer dem Kühlmaschinenbetrieb noch Dampf zur Warmwassererzeugung abgibt. Hat hier der Kessel besseren, die Maschine schlechteren Wirkungsgrad als zugesagt, so jedoch, daß das Produkt gegen das Produkt der Zusagen innerhalb des Spielraumes bleibt, so kann man unbedenklich die Zusage als erfüllt ansehen; denn dem Abnehmer wird dann die Gesamtzusage in bezug auf die Kälteerzeugung gehalten, in bezug auf die Wärmeversorgung aber fährt er günstiger als zugesagt, und insgesamt bleibt zweifellos ein Plus. Wenn aber das gemessene Produkt ein wenig hinter dem zulässigen bleibt, dabei die Maschine wesentlich besser als verlangt arbeitet, so läßt sich zwar vermuten, daß das Manko der Maschinenanlage reichlich ausgeglichen ist durch Ersparnisse im Wärmebetrieb; aber es fehlt an objektiven Kennzeichen. Es kommt auf das Verhältnis der Dampfantnahmen für Maschinen- und für Wärmebetrieb an. Hier wird man einen Ausgleich der Zusagen gegeneinander in billigen Grenzen eintreten zu lassen geneigt, über die Grenzen selbst aber leicht im Zweifel sein.

Ebenso pflegt man in gewissen Grenzen einen Ausgleich der verschiedenen Zusagen für eine Maschine eintreten zu lassen. Bei Ölmaschinen wird oft der Verbrauch an Treiböl und an Zündöl, vielleicht auch der an Schmieröl in der Garantie benannt; man sieht die Zusage als erfüllt an, wenn die Gesamtkosten der Pferdekraftstunden innerhalb der Toleranz bleiben gegenüber der Zusage, man berücksichtigt also im Ausgleich den Preis der einzelnen Ölsorten. Wenn eine Maschine bei voller und bei Dreiviertellast reichlich günstiger arbeitet als zugesagt, bei halber Last aber den Spielraum überschreitet, dann gilt die Zusage insgesamt als erfüllt. Freilich kann das unbillig für den Abnehmer sein, wenn nämlich die Maschine fast dauernd mit halber Last arbeitet und selten oder nie auf die höheren Belastungen kommt; dann hätte eben der Abnehmer vorher auf die besondere Wichtigkeit aufmerksam machen müssen, die die halbe Last für ihn hat; wußte er das selbst noch nicht, so ist das sein Nachteil. — Auch hier sind die Grenzen der Billigkeit nicht immer gut zu finden.

Selbst beim richtigen Maschinensatz macht der Ausgleich Schwierigkeiten, wenn die Einzelzusagen schlecht zueinander passen. Und über-

dies muß man sorgsam zusehen, ob der Ausgleich überhaupt billig ist. Das erläutere das Beispiel vom *städtischen Wasserpumpwerk mit Ölmaschinenantrieb*. Es sind dafür gegeben folgende

Zusagen:

Pumpe: 35 l/s auf 50 m Förderhöhe zu heben, gesamter Wirkungsgrad 76%. — Man kann hieraus berechnen:

$$\text{die Nutzleistung } \frac{35 \cdot 50}{75} = 23,3 \text{ PS.}$$

die Leistungsaufnahme $23,3 : 0,76 = 30,7 \text{ PS.}$

Transmission: Kraftbedarf 4 PS.

Ölmaschine: 200 g/PS · h Öl von 10 000 kcal/kg bei 35 PS Nutzleistung.

Dem stehen gegenüber — ob sie schwierig so genau zu erzielen sind, tut nichts zur Sache — folgende

Versuchsergebnisse:

Pumpe fördert 34,7 l/s, die Druckhöhe stellt sich auf 47,2 m ein, Nutzleistung 21,8 PS, das ist — 6,4% gegen die Zusage. — Antriebsleistung 28,3 PS, das ist — 7,8% gegen die Zusage. Wirkungsgrad $21,8 : 28,3 = 0,77.$

Transmissionsverluste 3,2 PS. Also Nutzleistung der Ölmaschine $28,3 + 3,2 = 31,5 \text{ PS.}$

Ölmaschine: Ölaufnahme (bei 31,5 PS) 7,10 kg/h, Verbrauch 0,225 kg/PS_e · h, das ist + 12,5% gegen die Zusage.

Zur Erörterung steht die Frage, ob die Anlage, die sonst einwandfrei ist, abgenommen werden muß oder ob nicht.

Es kommt nun vor, daß ein sachkundiger Abnehmer sich beschwert fühlt, weil der Ölmotor nur 31,5 PS statt 35 PS „leistete“; das ist natürlich unsachlich; man muß sagen: die Anlage braucht nur 31,5 statt 35 PS, und das ist für den Abnehmer vorteilhaft.

Man rechnet sich folgenden Vergleich aus: Die Zusage lautet auf 30,7 PS Arbeitsaufnahme der Pumpe; dazugezählt 4 PS Transmissionsverluste, lautet die Zusage auf 34,7 PS Nutzleistung des Ölmotors. Also:

Zulässige Ölaufnahme $34,7 \times 0,200 = 6,94 \text{ kg/h}$

Gemessene Ölaufnahme $31,5 \times 0,225 = 7,10 \text{ kg/h}$

Mehraufnahme + 0,16 kg/h = 2,3% der zulässigen Aufnahme.

Die Gesamtaufnahme scheint sich also innerhalb des Spielraumes zu halten, und man möchte geneigt sein, die Abnahme auszusprechen: man gleicht dann den erheblich zu hohen Ölverbrauch der Ölmaschine gegen die besseren Zahlen der Pumpe und Transmission aus.

Dagegen läßt sich aber folgendes einwenden:

Zunächst werden 34,7 l/s statt 35,0 l/s gefördert; um also den Tagesbedarf zu fördern, muß die Pumpe länger laufen. Das ist kein billiger Vergleich, man muß entsprechend proportional umrechnen. Überdies würde bei der höheren Förderung der Gegendruck steigen. Im Still-

stand hat man die statische Förderhöhe (§ 115) zu 42,0 m gemessen; die hydraulische von $47,2 - 42,0 = 5,2$ m erhöht sich auf $5,2 \cdot \frac{35,0^3}{34,7^3} = 5,3$ m, die gesamte auf 47,3 m; bei richtiger Förderung wäre die Nutzleistung $\frac{35,0 \cdot 47,3}{75} = 22,1$ PS gewesen, die Antriebleistung $22,1 : 0,77 = 28,7$ PS.

Die Transmissionsverluste würden sich proportional der Drehzahl, also (Kolbenpumpe vorausgesetzt) proportional der Wassermenge, also unmerklich wenig geändert haben, die Nutzleistung der Ölmaschine wäre $28,7 + 3,2 = 31,9$ PS geworden. Der Ölverbrauch verändert sich kaum mit der Last, die Aufnahme würde also bei richtiger Fördermenge: Gemessene Ölaufnahme umgerechnet

$$\begin{aligned} \text{auf } 35 \text{ l/s Fördermenge } & 31,9 \times 0,225 = 7,18 \text{ kg/h} \\ \text{Mehraufnahme } & + 0,24 \text{ kg/h} = + 3,5\% \text{ der zulässigen.} \end{aligned}$$

Auch so bleibt man reichlich innerhalb des Spielraums. — Aber weiter erhebt sich der Zweifel: darf man denn die Vorteile der geringeren Förderhöhe gegen den höheren Ölverbrauch der Ölmaschine ausgleichen?

Das Pumpwerk verlangt zwar tatsächlich nur 3,5% mehr Öl, als man etwa einer Wirtschaftlichkeitsrechnung auf Grund der Garantie wird zugrunde gelegt haben. Aber an diesem Ergebnis ist zum Teil schuld die Tatsache, daß sich die der Wasserförderung von 35 l zugeordnete Druckhöhe zu nur 47,3 m ergeben hat, während man auf 50 m gerechnet hatte. Für 50 m Förderhöhe aber ist auf folgende Zahlen zu rechnen:

Nutzleistung der Pumpe $\frac{35,0 \cdot 50}{75} = 23,3$ PS, Wirkungsgrad gemessen 0,77; Kraftbedarf der Pumpe $23,3 : 0,77 = 30,3$ PS. Transmissionsverluste gemessen 3,2 PS, Leistung der Ölmaschine $30,3 + 3,2 = 33,5$ PS. Also wird

Gemessene Ölaufnahme umgerechnet
auf 35 l/s Fördermenge und 50 m
Förderhöhe $33,5 \times 0,225 = 7,54$ kg/h
Mehraufnahme $+ 0,60$ kg/h = + 8,7% der zulässigen Aufnahme.

Nach dieser Art der Umrechnung ist wegen des Mehrverbrauches der Ölmaschine der Spielraum weit überschritten, so daß man vom Käufer die Abnahme rechtlich nicht verlangen kann. Es kommt also bei dieser Lage der Dinge tatsächlich auf die Entscheidung an, welche Art der Rechnung richtig ist: ob man die Minderförderhöhe von 2,7 m, die sich gegen die Annahme eingestellt hat, gegen den Ölmehrverbrauch ausgleichen soll oder nicht.

Die allgemeine Regel ist, daß ein Ausgleich nur zwischen Teilen der Lieferung stattfinden kann, und nur insoweit, als nicht der Ausgleich die Interessen des Abnehmers schädigt. Die Förderhöhe, die sich bei bestimmter geförderter Wassermenge einstellt, ist eine Funktion

der Rohrleitung, in die die Pumpe fördert. Es kommt also zunächst darauf an, ob die Rohrleitung mit zur Lieferung gehörte.

Setzen wir zunächst den Fall, die Rohrleitung und der Hochbehälter, in den sie das Wasser fördert, sei vorhanden gewesen oder von dritter Seite planmäßig angeliefert worden. Dann war die angegebene Druckhöhe von 50 m die äußere Bedingung, für die die Pumpanlage (der Maschinensatz) bestellt war, und bei der ein Ölverbrauch von 200 g/PS · h für den Motor zugesagt war. Der Abnehmer kann erwarten, daß, wenn die äußere Bedingung etwas leichter ausfällt, die Aufnahme entsprechend zurückgeht, der Verbrauch erhalten bleibt. Nach Analogie der Normen für Dampfmaschinen kann er verlangen, die Zusage, die den Verbrauch nennt, müsse innerhalb des Spielraumes von 5% erfüllt sein, wenn die äußere Bedingung innerhalb $\pm 7,5\%$ vom Sollwert gehalten worden ist.

Dies nachzuprüfen erleichtert Tabelle 3, in der die Rechnungsergebnisse zusammengetragen sind. Die wirkliche Messung des Ölverbrauches ist danach erfolgt in einem Zustand, wo der Maschinensatz eine um 6,4% kleinere Leistung hatte. Der Zustand wich also nicht mehr als 7,5% vom Sollwert ab; der Ölverbrauch von 0,20 kg/PS · h war also innezuhalten; er ist um 12,5% überschritten. Gleichen wir die zu hohe Verbrauchszahl gegen die günstigeren Zahlen für den Wirkungsgrad der Pumpe und für den Transmissionsverlust aus, so gilt Spalte III; die Ölaufnahme bleibt um 8,7% ungünstiger, als der Zusage entspricht, die Abnahme der Pumpe braucht nicht ausgesprochen zu werden.

Tabelle 3. Versuchsergebnisse an einem Wasserpumpwerk mit Ölbetrieb.

	Sollwert	Istwert					
		I. Gemessen	Gegen Soll	II. Bezogen auf 35 l	Gegen Soll	III. Bezogen auf 35 l, 0 m	Gegen Soll
1 Wassermenge l/s	35	34,7	—	35	—	35	—
2 Förderhöhe m	50	47,2	—	47,3	—	50	—
3 Nutzleistung der Pumpe . . PS	23,3	21,8	−6,4%	22,1	−5,2%	23,3	—
4 Wirkungsgrad %	76	77	—	77	—	77	—
5 Leistungsaufnahme der Pumpe PS	30,7	28,3	−7,8%	28,7	−6,5%	30,3	−1,3%
6 Transmissionsverlust „	4	3,2	—	3,2	—	3,2	—
7 Nutzleistung der Ölmaschine „	34,7	31,5	−9,2%	31,9	−8,1%	33,5	−3,5%
8 Ölverbrauch derselben kg/PS·h	0,20	0,225	+12,5%	0,225	+12,5%	0,225	+12,5%
9 Ölaufnahme derselben . . . kg/h	6,94	7,10	+ 2,3%	7,18	+ 3,5%	7,54	+ 8,7%

Wenn im anderen Fall Rohrleitung und Hochbehälter mit der Pumpanlage eine einheitliche Lieferung bildet, so steht grundsätzlich nichts im Wege, auch die Vorteile in der Förderhöhe der Gesamtlieferung zugute kommen zu lassen. Spalte II ist dann maßgebend, nach der die aufzuwendende Ölmenge die nach der Zusage zu erwartende um 3,5% überschreitet, der Spielraum also den Lieferer schützt. Immerhin kann es verschiedene Ursachen haben, wenn die Förderhöhe um 2,7 m kleiner ausgefallen ist, als angesetzt war. Hatte man den Wasser-

behälter 2,7 m tiefer gesetzt, als erst geplant, so hat das Verbrauchsnetz dadurch geringeren Druck und geringere Leistungsfähigkeit erhalten. Der Unternehmer hat vielleicht ohnehin schon an Kosten für den Wasserturm gespart; es wäre zu weitgehende Milde, sollte er nun noch den Vorteil genießen, seine eigene Minderleistung — auch wenn sie mit Genehmigung erfolgt wäre — gegen den Mehrverbrauch aufzurechnen. Hatte dagegen der Hochbehälter seine Lage behalten und rührt der Minderbetrag an Förderhöhe von kleinerem hydraulischen Widerstand der Rohrleitungen — Saug- und Druckleitung — her, so ist die Leitung eben reichlicher bemessen, als der Verpflichtung entsprach; mag das nun in einer Aufrundung auf Handelsmaß oder in reichlicher Berechnung seine Ursache haben, jedenfalls wird man diesen Vorteil dem Lieferer gutzubringen haben. Die Lieferung schneidet dann nur um 3,5% ungünstiger ab als zugesagt. Endlich könnte die kleinere Förderhöhe davon kommen, daß der Wasserstand im Brunnen weniger weit absinkt, als angenommen war; das mag an reichlicher Bemessung der Filterflächen oder an geringerer Absenkung des Grundwassers liegen. Es soll darauf verzichtet werden, auch hier alle denkbaren Fälle zu diskutieren. Nur sei noch erwähnt, daß man ein Gutbringen des Vorteiles reichlicher Filterfläche nicht deshalb verweigern darf, weil die Filterfläche bald versanden wird; denn allgemein verlangt man die zugesagten Zahlen nur bei neuer oder eben eingelaufener Anlage.

15. Einzelzusagen und Gesamtzusage bei Maschinensätzen. Merklliche Schwierigkeiten werden auch oft durch *schlechtes Zusammenpassen der Zusagen* veranlaßt, die, wie erwähnt, meist aus verschiedenen Büros einzeln angegeben werden. So ist die Gewähr für die Ölmaschine soeben für 35 kW Leistung angegeben; in der Gesamtanlage, so wie sie einheitlich hergestellt ist, fiel dem Motor aber nur eine Leistung von 31,5 bzw. 31,9 kW zu, das ist 9,2 bzw. 8,1% weniger als vorausgesetzt. Die Abweichung von der Voraussetzung soll nach den Normen höchstens $\pm 7,5\%$ betragen. Gilt nun die Gewährleistung gar nicht? Soll man das Wasser etwas drosseln, um künstlich die vorausgesetzte Belastung herzustellen, die doch den praktischen Verhältnissen nicht entspricht?

Oder wenn Dampfkessel, Leitung, Dampfturbine und Dynamo von einer Firma projiziert und geliefert worden sind, so mögen die Zusagen lauten:

Dampfkessel: 45,1 m² Heizfläche; 70 % Wirkungsgrad bei 22 kg/m² · h Beanspruchung, 12 at Überdruck und 300° C Temperatur; Zug 15 mm.

Dampfmaschine: 12,7 kg/kW_i · h Dampfverbrauch bei 75 kW indizierter Leistung = 66 kW Nutzleistung, 11,5 at Betriebsdruck und 270° C Dampftemperatur; Drehzahl 120/min.

Dynamomaschine: Wirkungsgrad 88% bei Vollast (60 kW), 87% bei $\frac{3}{4}$ Last, 84% bei $\frac{1}{2}$ Last; Spannung 220 Volt Gleichstrom.

Hier sollte nun der Dampfkessel bei $22 \times 45,1 = 992$ kg/h Dampfherzeugung untersucht werden, jedenfalls bei höchstens 7,5% weniger, nicht unter 918 kg Dampferzeugung. Für die Maschine ist $12,7 \times 75$

= 950 kg Dampfaufnahme zugesagt; ermittelt sich der Verbrauch der Maschine günstiger, so kommt man auf Zahlen unterhalb der für den Dampfkessel einzuhaltenden. Wollte man die Maschinenbelastung etwas höher als 75 kW wählen, so kommt man mit der Dynamomaschine in Schwierigkeiten: deren Garantie gilt bei 60 kW elektrischer Leistung = $60 : 0,88 = 68$ kW Leistungsbedarf. Man hat eben jeden Teil reichlicher als diejenigen gewählt, die er antreibt. Ein Zustand, der allen drei Teilen innerhalb der $\pm 7,5\%$ gerecht wird, ist vielleicht gar nicht mehr zu finden, jedenfalls aber behält man weniger Spielraum, als man bei der Ausführung des Versuches braucht. Auch weist die Zusage eine Lücke auf, weil der Verlust in der Dampfleitung nicht angegeben ist.

Solche unreinen Angaben machen bei der Versuchsausführung und bei dem Bestreben, ungünstige Ergebnisse eines Teils gegen günstigere der anderen billig auszugleichen, viel Not; für den Ausgleich fehlt die sichere Grundlage. Man sollte das vermeiden und Gewährleistungen für Gesamtlieferungen nicht an Bedingungen knüpfen, die nachher nicht eintreffen. In bezug auf die Ausgleichung der Ergebnisse ließe sich wohl die Ansicht vertreten, ein Ausgleich habe nicht stattzufinden, wo derartige Unsicherheiten vorliegen; denn wer auf die Vorteile der Ausgleichung Anspruch machen will, kann sich auch der Mühe unterziehen, die Ergebnisse der Ausgleichung vorher zu ermitteln und in Gestalt einer Gesamtgarantie anzugeben. Für die elektrische Anlage hätte diese zu lauten: Bei 60 kW elektrischer Leistung werden nicht mehr als 150 kg/h Kohlen von 7000 kcal/kg Heizwert gebraucht werden; die Zwischenwerte werden dabei zur Orientierung zweckmäßig anzugeben sein. Oder aber es möge für den Kessel der Wirkungsgrad 70% nicht an die Beanspruchung $22 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ gebunden werden, sondern er werde zugesagt: bei der Dynamobelastung von 60 kW.

16. Zusammenfassendes über den Begriff der Wirtschaftlichkeit.

Wir ziehen aus den letzten Paragraphen und aus allen im folgenden besprochenen Versuchsergebnissen die folgenden Lehren.

Die Wirtschaftlichkeit einer Maschine ist kein eindeutiger Begriff. Einerseits widerspricht große Sparsamkeit im Verbrauch oft der Forderung, hohe Leistung aus kleinen Aggregaten zu ziehen, und führt daher auf hohe Beschaffungskosten, die nur bei starker Ausnutzung lohnen, sonst aber unwirtschaftlich sind. Andererseits bedeutet günstiger Verbrauch einer Maschine noch nicht günstigen Verbrauch des Maschinensatzes, von dem sie einen Teil bildet. Endlich hängt der Verbrauch in hohem Maße von der Höhe der Belastung ab, und die Gesamtaufnahme wird überdies noch von An- und Auslauf beeinflusst. So hat jede bei einer Belastung und im Beharrungszustand ermittelte Gewährleistungs- und Rekordzahl beschränkten oder gar keinen Wert.

Bei Versuchen und in Gewährleistungen aller Art sollte man dies als maßgebend stets im Auge behalten.

Um durch noch ein Beispiel das Gemeinte zu erläutern: Bei einer landwirtschaftlichen Entwässerungsanlage (Polder mit Pumpwerk)

wechselt die Förderhöhe sehr, je nach Innen- und Außenwasserstand. Es ist wenig fruchtbar festzustellen, daß bei diesem oder jenem Wasserstand der Verbrauch den zugesagten übersteigt, und demnach das Werk zur Verfügung zu stellen; es ist fruchtbarer, für jeden vorkommenden Wasserstand die günstigsten Betriebsverhältnisse durch sorgsam vorbereitete, durchgeführte und ausgewertete Versuchsreihen zu finden, in einer Betriebsvorschrift die innezuhaltenden Drehzahlen der Pumpen festzulegen und so den Maschinisten zur bestmöglichen Ausnutzung der einmal vorhandenen Anlage zu befähigen.

b) Rechtliches über Abnahmeversuche¹⁾.

17. Vertragsarten und juristische Begriffe. Der allgemeine Inhalt des Vertrages und seine allgemeine Wirkung, in dem Sinne, der eine Teil müsse liefern, der andere zahlen, die Folgen verspäteter Lieferung und anderes mehr, steht hier nicht zur Diskussion. Für unsere Zwecke sollen nur kurz die Grundsätze besprochen werden, die Platz greifen, wenn eine Lieferung den Anforderungen oder den Abmachungen nicht zu entsprechen scheint, und wenn man deshalb die Maschine einer Untersuchung unterzieht, um etwaige Mängel oder aber die vertragsmäßige Lieferung festzustellen. Das kann in einem Prozeß oder in einem schiedsgerichtlichen Verfahren, als Vorbereitung für solche oder aber auch freundschaftlich einfach durch Zusammenarbeiten der Parteien ohne oder mit Zuziehung von Sachverständigen geschehen. Eine Reihe für die Vertragsauslegung wesentlicher juristischer Begriffe sollen hier vorweg besprochen werden.

Der Vertrag, der ohne oder nach Entstehung von Zweifeln zur Untersuchung einer Maschine führt, kann ein Werk- oder ein Kaufvertrag sein; er kann rein nach dem Bürgerlichen oder aber teilweise nach dem Handelsgesetzbuch (BGB oder HGB) beurteilt werden müssen. Von letzterem (dem HGB) kommt für uns § 377 und 378 in Frage, die sich auf die Pflicht sofortiger Untersuchung und Mängelrüge beziehen; sie sind jedoch nur anwendbar, wenn beide Parteien Kaufleute sind oder doch eingetragene Firmen haben.

Ein *Kaufvertrag* hat den entgeltlichen Eigentumsübergang eines schon vorhandenen Gegenstandes vom Verkäufer auf den Käufer zum Ziele. Wenn unter Kaufleuten oder Firmen das HGB gilt, so spricht man von einem *Handelskauf*. Gerade für die hier interessierende Frage, ob Mängel sofort aufzusuchen und zu rügen seien, wird Beiderseitigkeit des Handelskaufes verlangt, um die Vorschriften des HGB anwendbar werden zu lassen.

¹⁾ Der Abschnitt kann auf beschränktem Raum den Stoff nicht erschöpfend behandeln. Er soll einen Begriff von der Vielgestaltigkeit der bezüglichen juristischen Verhältnisse geben und dadurch für schwieriger liegende Fälle zur Zuziehung eines Rechtskundigen veranlassen. Ausführliche Darstellung mit zahlreichen Literaturverweisen in: Staudinger, Kommentar zum Bürgerlichen Gesetzbuch, 7.—8. Aufl. 1912, Bd. 2, insbesondere S. 560—730, 1149—1221; Staub, Kommentar zum Handelsgesetzbuch, 9. Aufl. 1913, Bd. II, insbesondere S. 477, 525—535, 798—845, 867, 893—906, 942—946, 966—968, 980—983.

Beim *Werkvertrag* hingegen verpflichtet sich ein Unternehmer gegenüber dem Besteller zur Herbeiführung eines bestimmten Erfolges, an dem der Besteller ein Interesse hat; als Erfolg kommt für uns namentlich die Herstellung einer neuen Maschine oder Anlage oder die Instandsetzung einer schadhaften in Frage.

Da sich der Kaufvertrag allgemein auf etwas schon Vorhandenes, der Werkvertrag auf etwas erst zu Schaffendes bezieht, so liegt zweifellos ein Kaufvertrag vor, wenn jemand in das Lager einer Firma geht, sich dort eine Kreiselpumpe mit elektrischem Antrieb fertigt aussucht und sie alsbald abfahren läßt, um sie selbst aufzustellen. Ebenso zweifellos liegt ein Werkvertrag vor, wenn sich eine städtische Verwaltung Rohrmaterial kauft und nun einen Unternehmer mit der Herstellung des Wasserleitungs- oder Kanalisationsnetzes betraut. Es ist das nicht etwa ein Dienstvertrag, weil die Vergütung nur nach erreichtem Erfolg — wenn das Rohrnetz sich z. B. als dicht erwies — fällig wird, alles Risiko der Verlegung — Schwierigkeiten der Wasserhaltung — zu Lasten des Unternehmers laufen.

Nicht immer ist es leicht zu entscheiden, ob die Bestimmungen des Kauf- oder die des Werkvertrages anzuwenden sind. Ein wichtiger Grenzfall zwischen beiden ist der *Werklieferungsvertrag* (§ 651 BGB); er liegt vor, wenn zwar ein Werk erst herzustellen ist, wenn aber die Baustoffe dazu vom Unternehmer beschafft werden, so daß also in bezug auf den Stoff ein Kauf vorliegt. Stoff braucht dabei nicht Rohstoff zu sein. Ein Werklieferungsvertrag liegt vor, wenn eine Dampfpumpe größerer Abmessungen zur besonderen Herstellung in Auftrag gegeben wird, wenn der Elektromotor der Kreiselpumpe aus irgendwelchen Gründen ganz besonders gewickelt werden muß, oder wenn die Stadt die Herstellung des Rohrnetzes einschließlich Lieferung des Rohrmaterials vergibt. Doch bleibt die Beschaffung einer Maschine gängiger Type auch dann ein Kaufvertrag, wenn die Montage mit übernommen wurde — dieselbe ist nur eine Nebenleistung. Ebenso ist es, wenn an einem gekauften Auto noch Änderungen etwa in der Ausstattung der Karosserie zu machen sind. Und andererseits ändert es nichts an der Reinheit des Werkvertrages, wenn der Unternehmer bei Verlegung des ihm gestellten Rohrmaterials das Dichtmaterial — also Zutaten — zugegeben hat, § 651 BGB, Abs. 2.

Beim Werklieferungsvertrag nähern sich die Verhältnisse bald mehr dem Kauf-, bald mehr dem Werkvertrage, je nachdem ob die Materialbeschaffung oder ob die Arbeit und der eigenartige Erfolg das Wesentliche ist. —

Die rechtlichen Verhältnisse, soweit sie uns interessieren, richten sich nach dem Gesichtspunkt der Vertretbarkeit und unter Kaufleuten auch nach dem der Beweglichkeit der zu liefernden Sache.

Vertretbare Sachen oder Gattungssachen sind solche, die nicht einzig in ihrer Art sind, bei denen der Käufer kein Interesse an der Lieferung eben dieses Stückes, der Verkäufer die Möglichkeit der Ersatzlieferung hat. Vertretbar ist daher ein Auto, ein Elektroventilator, eine Dampfmaschine und dergleichen, sofern nicht besondere Eigenschaften oder

Abmessungen sie als nicht vertretbar (Einzelsachen) erscheinen lassen; vertretbar sind alle listenmäßig angebotenen Sachen, die satzweise hergestellt werden. Eine Turbodynamo von 100 kW ist allgemein vertretbar, eine von 20 000 kW kann wohl als unvertretbar gelten, selbst wenn mehrere auf einmal bestellt werden; im Grenzfall kann eine Größe, obwohl erstmals ausgeführt, doch vertretbar sein, wenn in Zukunft häufigere Lieferung anzunehmen ist. — Für vertretbare Sachen schreibt § 651 BGB vor, sie seien durchgehends nach den Regeln vom Kauf zu beurteilen, also nach § 433 ff. BGB; außerdem gelten § 373 ff. HGB, insoweit sich hier abweichende oder ergänzende Vorschriften finden, die gelten sollen, sofern ein oder beide Teile Kaufleute sind. In der Tat muß es gleichgültig sein, ob eine übliche Maschine im Einzelfall doch erst besonders hergestellt wird, weil sie gerade nicht am Lager war. Für Lagermaschinen aber gelten natürlich die Kaufvorschriften.

Nicht vertretbar sind diejenigen Sachen, die den besonderen Zwecken des Bestellers entsprechend in besonderer Größe, Anordnung, Qualität hergestellt werden. Genannt wurde schon die Turbodynamo von 20 000 kW; unvertretbar ist ferner eine Heizungs- oder eine Kühlanlage, da sie den räumlichen Bedingungen angepaßt wird — die Teile dazu wären, einzeln geliefert, vertretbar, auch soweit sie nicht bloß Material sind. Unvertretbar sind Probeausführungen. Es handelt sich hier also im ganzen um weniger zahlreiche, aber oft um größere Objekte.

Über nicht vertretbare Sachen trifft § 651 BGB Bestimmung dahin, daß zwar allgemein die Kaufvorschriften gelten sollen, daß aber für wichtige Fragen die Vorschriften über den Werkvertrag eintreten, namentlich in den Fragen des Gefahrüberganges, der verspäteten Fertigstellung und der uns besonders interessierenden Haftung für Mängel. Aber diese so gemischten Bestimmungen werden nochmals beeinflußt durch § 381 HGB; danach sollen, wenn beim Werklieferungsvertrag die vertretbare Sache *beweglich* ist (und wenn, wie für Anwendung des HGB natürlich erforderlich, ein Handelskauf vorliegt), die schärferen Bestimmungen gelten, die beim Handelskauf Rechtsens sind. Werkvertragsvorschriften gelten also unter Kaufleuten nur bei Werklieferungsverträgen über nicht vertretbare unbewegliche Sachen — außerdem natürlich bei den selteneren reinen Werkverträgen.

Als *unbeweglich* sind in der Maschinentechnik diejenigen Sachen anzusehen, die erst durch Verbindung mit dem Erdboden und dem Gebäude als solche entstehen. Eine Maschine wird nicht in diesem Sinne unbeweglich, wenn man sie auf ihr Fundament setzt und vielleicht gar untergießt (wohl aber im Sinne der Hypothekenhaftung). Unbeweglich ist aber ein eingemauerter Dampfkessel, zumal wenn Kesselkörper und Feuerung erst durch die Einmauerung Zusammenhang bekommen; ein Gliederkessel dagegen ist zweifellos beweglich. Erwähnt sei noch, daß der Einbau einer Zentralheizung in ein vorhandenes Haus nicht Lieferung einer Sache, sondern Abänderung einer unbeweglichen Sache ist, nämlich des Hauses, das vorher unbeheizbar, nun beheizbar ist.

Bei allen diesen Unterscheidungen kommt es nur auf die tatsächlichen Verhältnisse, nicht aber darauf an, ob im Verträge von Kauf oder Werk die Rede ist. Doch ist es möglich, zu vereinbaren, daß für einen Vertrag gewisse oder alle bei einer anderen Vertragsart übliche oder überhaupt beliebige Bestimmungen gelten sollen; solche Vereinbarung schlägt innerhalb der durch Gesetz oder gute Sitten gezogenen Grenzen durch, nur die einfache Umbenennung genügt nicht. —

In geschäftlicher Hinsicht unterscheidet man zwischen Übergabe, Abnahme, Annahme (als Erfüllung), Ingebrauchnahme; beim Kaufvertrag spielt auch der Gefahrübergang, beim Werkvertrag die Vollendung des Werkes eine Rolle.

Hier ist besonders zu beachten, daß beim Kaufvertrag die *Abnahme* nicht das ist, was man vielfach darunter versteht, nämlich eine mit einer gewissen Förmlichkeit vorgenommene Prüfung der gekauften oder gefertigten Sache, etwa ein Abnahmeversuch. In rechtlicher Hinsicht ist die Abnahme der wenigst wichtige der eben aufgezählten Vorgänge. Sie ist einfach das Gegenstück zur *Übergabe*: der Verkäufer übergibt, der Käufer nimmt ab — das bedeutet den rein tatsächlichen Vorgang, der zum Zweck hat, den ersteren von dem Gegenstand zu entlasten, etwa wenn er seine Werkstatt frei haben will. Eine Prüfung braucht beim Kaufvertrag gar nicht mit der Abnahme verbunden zu sein; so bringt der Verkäufer (selbst oder durch den Spediteur) oft die Maschine verpackt zur Übergabe, und bei der „Abnahme“ kann sich der Käufer nur von der äußeren Unversehrtheit der Verpackung und von der Vollzähligkeit der Kollistücke überzeugen. § 448 BGB bestimmt, der Verkäufer habe die Kosten der Übergabe, insbesondere des Messens und Wägens, der Käufer die der Abnahme zu tragen; danach hat bei Vermietung einer Dampfkraft — immer mangels besonderer Abmachung — der Verkäufer den Dampfmesser zu stellen; bei Gaswerken pflegt indessen das Statut anders zu bestimmen. Für die Frage, wer bei Versuchen an Maschinen die Kosten zu tragen hat, schlägt die Bestimmung nicht ein, weil es sich eigentlich nicht um Abnahme-, sondern um Garantieveruche zu handeln pflegt. — In der Abnahme liegt daher beim Kaufvertrag nicht stets die Annahme als Erfüllung: stellt sich beim Auspacken heraus, daß ein Ventilator falscher Type geschickt ist, so kann er zurückgegeben werden; behielte Käufer ihn dennoch und nähme ihn in Gebrauch, so läge erst darin eine *Annahme als Erfüllung*. Eine solche liegt in der *Ingebrauchnahme*, außer wenn zu ihr ein Zwang vorliegt, aber auch in jeder anderen Handlung oder Unterlassung, durch die der Käufer die Ansicht zu erkennen gibt, er wolle die Lieferung als Erfüllung der gegnerischen Verpflichtung gelten lassen. — Eine Ingebrauchnahme mit dem ausdrücklichen Vorbehalt, sie geschehe nur zur Abwendung z. B. von Betriebsstörungen, doch könne sie nicht als Erfüllung anerkannt werden — oder in ähnlicher Weise — schließt die Wirkung aus, die die Annahme als Erfüllung und die Ingebrauchnahme sonst haben, nämlich daß mit der Erfüllung der Verpflichtung des Verkäufers die Verpflichtung des Käufers zur Gegenleistung — zur Zahlung — entsteht.

Größere Bedeutung als beim Kaufvertrag hat die *Abnahme beim Werkvertrag*: nach § 640 BGB ist der Besteller verpflichtet, das vertragsmäßig hergestellte Werk abzunehmen. Nach Bau einer Wasserversorgung, einer Zentralheizung pflegten Besteller und Unternehmer zusammen durch das Bauwerk zu gehen und sich von der Fertigstellung des Werkes zu überzeugen; dazu gehört jedenfalls die Betriebsfähigkeit, Anstricharbeiten mögen noch nachher erfolgen. Aber eben hinsichtlich der Vollständigkeit pflegt diese Abnahme — anders als beim Kauf — eine Billigung zu enthalten: das Werk sei vollendet und werde im großen Ganzen als Erfüllung der Verpflichtung des Unternehmers angenommen; Mängel, die sich später finden, können vom Besteller trotzdem geltend gemacht werden, dann hat eben der Unternehmer seine Verpflichtung mangelhaft erfüllt, aber doch erfüllt. Daher bedeutet die Abnahme beim Werkvertrag im allgemeinen zugleich Annahme als Erfüllung, und das eben ist beim Kaufvertrag nicht immer der Fall.

Die Annahme als Erfüllung, im allgemeinen also die Ingebrauchnahme ist keine Anerkennung des Gelieferten als mängelfrei oder als vollständig. Es kann mangelhaft und unvollkommen erfüllt sein, immerhin aber doch erfüllt sein. Wieweit der Abnehmer aber verpflichtet ist, Mängel alsbald nach Auffindung zu rügen, das soll unten (§ 19) besprochen werden.

Die Gefahr zufälligen Unterganges und zufälliger Verschlechterung der gekauften oder hergestellten Sache, etwa durch Feuer, geht mit der Übergabe (Abnahme) vom Lieferer auf den Abnehmer über (§ 446, 644 BGB); bei Versendungen nach einem anderen Ort als dem Erfüllungsort tritt jedoch der *Gefährübergang* mit der Übergabe an den Spediteur oder die Bahn ein. Diese Bestimmungen sind die gleichen beim Kauf- wie beim Werkvertrag, doch ist die Wirkung recht verschiedenartig. Eine Maschine wird als solche versandt, und daher geht die Versendung sowie die Lagerung bis zur Inbetriebsetzung auf Gefahr des Käufers. Eine Zentralheizung, eine größere Kühlanlage, eine Wasserversorgungsanlage wird an Ort und Stelle hergestellt, versendet wird nur Material, darunter vielleicht auch Maschinen; daher geht die Gefahr während des Versandes und der Aufstellung zu Lasten des Unternehmers — für die vom Besteller gelieferten Materialien hat dieser allerdings dauernd selbst zu sorgen. Dieser Unterschied im Gefährübergang hängt vielfach — nicht grundsätzlich — mit dem Unterschied der Vertragsart — Kauf- oder Werkvertrag — zusammen. Wie es hiernach mit dem Gefährübergang steht, wenn Maschinen vertretbarer Art einschließlich Aufstellung verkauft sind, wo doch auch manche Zutaten erst an Ort und Stelle zugefügt werden, ist nicht immer leicht zu entscheiden; allgemein wird die Montierung nur als Nebenarbeit angesehen. —

Bei jeder Vertragsart kann der Abnehmer (Käufer oder Besteller) Freiheit von Mängeln erwarten; wegen dennoch vorhandener Mängel stehen ihm Rechte zu — teilweise auch wegen unerheblicher Mängel, doch müssen es immerhin Mängel und nicht nur Schwächen, Schönheits-

fehler sein. Die Rechte und die Reihenfolge ihrer Anwendung hängen von der Vertragsart ab. Dieses zu erläutern ist der Zweck der folgenden Paragraphen, die natürlich die umfangreiche und schwierige Materie nicht erschöpfend behandeln.

18. Umfang der Mängelhaftung, Rechte und Pflichten daraus. Die *Mängel* der Lieferung können *Fehler* sein, das heißt Abweichungen vom Sollzustand, die den Wert oder die Tauglichkeit zu dem gewöhnlichen oder dem nach dem Vertrag vorausgesetzten Gebrauch aufheben oder mindern. Ein Mangel kann aber auch in der *Abwesenheit einer zugesicherten Eigenschaft* bestehen; insbesondere sind Leistungsfähigkeit und Verbrauchszahlen Eigenschaften einer Maschine, die oft zugesichert werden. Der Unterschied zwischen den beiden Arten von Mängeln ist klar: wenn eine Dampfmaschine schlecht eingesteuert ist und deshalb schlechte Diagramme liefert oder unruhig läuft, oder wenn ihr Schieber undicht ist, so sind das Fehler auch dann, wenn der zugesagte Dampfverbrauch nicht überschritten wird. Wenn die Dampfmaschine den zugesagten Dampfverbrauch überschreitet, so kann sie gleichwohl eine fehlerfreie, ja vorzügliche Maschine sein, die Überschreitung der Zusage kann ja in manchen Besonderheiten liegen, beispielsweise darin, daß im Konkurrenzkampf die Zusage allzustark gespannt wurde. Gerade die Untersuchung auf Innehaltung zugesagter Zahlenangaben ist der wesentliche Gegenstand dieses ganzen Buches, während eine Reihe von Fehlern — Fehler im Material, in der Konstruktion und Aufstellung — fast nur nach eigenen praktischen Erfahrungen beurteilt werden können, so daß eine allgemeine Besprechung unmöglich ist, jedenfalls aus dem Rahmen dieses Buches fällt.

Die gelieferte Sache darf nicht mit Fehlern behaftet sein, die ihre Tauglichkeit zu dem gewöhnlichen oder den nach dem Verträge vorausgesetzten Gebrauch aufheben oder mindern (§ 459, 633 BGB). Eine *unerhebliche* Minderung ist beim Kauf nicht in Betracht zu ziehen. Beim Werkvertrag (und beim Werklieferungsvertrag über nicht vertretbare Sachen) müssen auch unerhebliche Fehler vom Lieferer beseitigt werden, sofern ihre Beseitigung nicht unverhältnismäßigen Aufwand erfordert. Für Fehler, die der Käufer beim Kauf kennt, haftet der Verkäufer nicht, auch fällt bei ersteigerten Sachen die Mängelhaftung fort.

Unter der Abwesenheit zugesagter Eigenschaften sind für uns namentlich die gegebenen Zahlenzusagen begriffen. Für zugesagte Eigenschaften haftet beim Kauf nach klarer Gesetzesvorschrift (§ 459 BGB) der Verkäufer auch bei unerheblicher Abweichung; beim Werkvertrag ist ohnehin jeder auch unerhebliche Mangel zu beseitigen, nur kann wegen seiner nicht Wandelung verlangt werden (§ 634 BGB), so also auch nicht wegen unerheblicher Überschreitung der Zusagen.

Die *Rechte und Pflichten* beider Teile wegen eines Mangels sind in Tabelle 4 übersichtlich zusammengestellt:

Tabelle 4. Mängelhaftung

	Werkvertrag, Werklieferungvertrag über nicht vertretbare unbewegliche Sachen	Werklieferungsvertrag über nicht vertretbare bewegliche Sachen	Kaufvertrag, Werklieferungsvertrag über vertretbare Sachen
Reihenfolge der Mängelansprüche	1. Nachbesserung (außer wenn Aufwand unverhältnismäßig) (beiderseitiges Recht), 2. (erst nach vergeblicher Fristsetzung zur Nachbesserung) Wandelung (wegen geringfügiger Mängel nicht), oder: Minderung, (statt dessen wegen zugesagter Eigenschaften): Schadenersatz wegen Nichterfüllung		Wandelung (wegen geringfügiger Fehler nicht), Minderung, (statt dessen wegen zugesagter Eigenschaften) Schadenersatz wegen Nichterfüllung, (statt aller dieser, jedoch nur bei vertretbaren Sachen) Lieferung mängelfreier Sache (einseitiges Recht des Käufers)
Pflicht zur Untersuchung und Mängelrüge	Nach Treu und Glauben	Unter Kaufleuten und Firmen: sofort, sonst: nach Treu und Glauben	

Beim Werkvertrag (§ 633, 634 BGB) und beim Werklieferungsvertrag über nicht vertretbare Sachen (§ 651 BGB, Aufhebung von § 462 bis 463) hat der Unternehmer zunächst die Pflicht, durch *Nachbesserung* den Mangel zu beseitigen. Tut er das trotz Aufforderung nicht, so kann der Besteller auf Unternehmers Kosten den Mangel selbst beseitigen. Der Nachbesserungszwang ist aber zugleich ein wertvolles Recht des Unternehmers: der Besteller kann andere rechtliche Ansprüche aus dem Mangel erst herleiten, nachdem er (§ 634 BGB) dem Unternehmer eine angemessene Frist für die Beseitigung des Mangels gesetzt hat, mit dem Zusatz, nach Ablauf der Frist lehne er Beseitigung des Mangels ab. Nach Ablauf der zur Beseitigung gestellten Ausschlussfrist ist das Recht auf Nachbesserung beiderseits erloschen, der Abnehmer darf also auch nicht mehr auf Unternehmers Kosten den Mangel selbst beseitigen. Er hat nur noch Rechte wegen des Mangels. Ebenso entfallen Recht und Pflicht auf Nachbesserung, wenn die Beseitigung des Mangels unverhältnismäßigen Aufwand erfordert. — Beim Kaufvertrag und beim Werklieferungsvertrag über vertretbare Gegenstände besteht gesetzlich kein Nachbesserungsanspruch. Findet sich ein Mangel, so kann der Verkäufer ohne weiteres die Rechte ausüben, die beim Werkvertrag erst nach fruchtlosem Ablauf der ordnungsmäßig unter Androhung gestellten Frist zulässig sind.

Diese Rechte wegen des Mangels sind das der Rückgängigmachung des Vertrages (*Wandelung*) oder der Herabsetzung der Vergütung (*Minderung*). Zwischen beiden Rechten hat der Abnehmer als der geschädigte Teil die Wahl, nur kann er beim Werkvertrag wegen unerheblicher Verminderung des Wertes oder der Tauglichkeit nicht wandeln; er kann die Wahl ändern, bis durch Einverständniserklärung des Lieferers die Wandelung oder die Minderung vollzogen ist (§ 465 BGB), nachher nicht mehr.

Der Abnehmer kann *statt der Wandelung oder Minderung* auch *Schadenersatz wegen Nichterfüllung* verlangen — beim Werkvertrag in jedem Fall, der jene erstgenannten Rechte gibt (§ 635 BGB), beim Kaufvertrag (und beim Werklieferungsvertrag über vertretbare Sachen) jedoch nur wegen Fehlens zugesagter Eigenschaften (§ 463 BGB). Wegen positiver Fehler, sofern sie nicht arglistig verschwiegen sind, ist der Käufer auf Wandelung oder Minderung beschränkt, wenigstens soweit es auf die besonderen Vorschriften über Kauf- und Werkvertrag ankommt. Auch ist zu beachten, daß dem Abnehmer dieser Schadenersatz statt der Wandelung oder Minderung, also nicht neben jenen zusteht: Wandelte er, so kann er nicht noch diesen Schadenersatz geltend machen, obwohl er oft Schaden gehabt haben wird. Er kann auch nicht Schadenersatz nach § 286 BGB wegen Verzuges in der Lieferung verlangen, denn nach erfolgter Wandelung besteht kein Vertrag mehr, also auch kein Verzug.

Durch diese Begrenzung in der Garantiepflicht kann der Abnehmer benachteiligt werden. Hatte sich jemand erneuerungshalber eine Kette zu einem Kran von 3000 kg Tragfähigkeit kommen lassen, und reißt ein Glied der Kette infolge eines Materialfehlers in der ersten Zeit der Benutzung und die herabstürzende Last macht Sachschaden, so haftet der Lieferer nur nach den eben genannten Grundsätzen: er kann den Kauf wandeln, also die Kette zurückgeben, denn der Fehler sei dem Befunde nach zweifellos schon zur Zeit des Gefahrüberganges (§ 459, 446 BGB) vorhanden gewesen; der Abnehmer kann auch den Kaufpreis mindern in dem Verhältnis, wie der Wert der fehlerhaften Kette zu dem der fehlerlosen steht (§ 472 BGB); er kann endlich Lieferung einer fehlerlosen Kette verlangen, da dieselbe vertretbar ist (§ 480 BGB). Aber mit allem diesen findet er keinen Ersatz für den Schaden, den die gestürzte Last erlitten und angerichtet hat. Der Schadenersatzanspruch statt der Wandelung oder Minderung, der unabhängig vom Verschulden des Lieferers ist, kommt nicht in Frage, weil der Mangel ein Fehler, nicht aber Fehlen einer zugesagten Eigenschaft ist.

Schadenersatzansprüche wegen eines Fehlers lassen sich daher nur geltend machen, wenn irgendwelche anderen Vorschriften einschlagen; dazu ist aber durchweg ein *Verschulden des Lieferers* nötig, die der Abnehmer nachzuweisen hat. Wenn der Lieferer leichtsinnig in der Beschaffung der Kette war, so könnte man § 347 HGB heranziehen, der die Sorgfalt eines ordentlichen Kaufmanns verlangt; man kann auch auf § 276 BGB Bezug nehmen, wonach der Schuldner Fahrlässigkeit, das ist Außerachtlassung der im Verkehr erforderlichen Sorgfalt zu vertreten hat, in Verbindung mit § 278 BGB, wonach Verschulden der Angestellten dem eigenen Verschulden gleichsteht; endlich käme unter Umständen § 823 BGB in Frage, der denjenigen zum Schadenersatz verpflichtet, der fahrlässig das Eigentum anderer widerrechtlich verletzt. Aber stets ist vom Besitzer des Kranes der Nachweis zu führen, der Lieferer habe eine Fahrlässigkeit begangen, vielleicht weil die Kette nicht geprüft wurde, oder weil sie aus einer bekannt unzuverlässigen Quelle bezogen wurde. Solch Nachweis wird schwer zu führen

sein, außer in Fällen, wo man sagen kann: ein Fehler, wie er untergelaufen ist, kann in geordnetem Betrieb überhaupt nicht vorkommen, daß er vorkam, beweist an sich schon die Fahrlässigkeit; dieser Schluß wäre aber bei der Krankette zu weitgehend. Gelingt indessen der schwierige Nachweis, so hat der Abnehmer den Vorteil, daß für das fahrlässige (oder gar absichtliche) Verschulden nicht die kurzen Verjährungsfristen der Garantieleistung (§ 20), sondern die regelmäßige 30jährige Verjährung (§ 195 BGB) gilt.

Außerdem konnte sich der Abnehmer Schadenersatzansprüche in jedem Fall dadurch sichern, daß er die gelieferte Sache gar nicht erst annahm, weil sie mangelhaft sei und keine Erfüllung darstelle; wenn er dann den Lieferer zur Erfüllung auffordert, dieser nicht rechtzeitig Ersatz stellen und erfüllen konnte, so kam er in Verzug (§ 284 BGB) und hatte nach § 286 *Schadenersatz wegen Nichterfüllung* zu leisten. Ein Verschulden des Lieferers ist nicht Voraussetzung, ist das Vorhandensein des Fehlers streitig, so trifft den Lieferer die Beweislast dafür, daß er nach der Forderung des § 294 BGB die Leistung so angeboten hat, wie sie zu bewirken ist, also die Beweislast für Mängelfreiheit der angebotenen Sache; auch ist in § 293, 294 nicht die Rede davon, daß wegen unerheblicher Fehler — wegen derer späterhin die Mängelansprüche teilweise ausgeschlossen sind — die Verweigerung unzulässig sei: auch mit unerheblichen Mängeln behaftete Maschinen braucht man also nicht anzunehmen, nur kann man ihretwegen nicht immer späterhin Ansprüche stellen. In allen diesen Hinsichten ist die Stellung des Abnehmers am günstigsten, wenn er mangelhafte Maschinen gar nicht erst annimmt — nur muß der Mangel gleich bei der Annahme oder doch bei der ersten Untersuchung erkennbar sein, was bei der Krankette nicht der Fall gewesen wäre; auch ist Haftung des Lieferers für „indirekten Schaden“ oft vertraglich ausgeschlossen.

Wo also ein Mangel nicht auf Fahrlässigkeit zurückzuführen und auch nicht äußerlich erkennbar ist, hat es bei den besonderen Gewährleistungsvorschriften sein Bewenden, die eben Schadenersatz nur in gewissen Fällen an Stelle des Minderungs- und Wandelungsanspruches vorsehen.

Beim Werkvertrag hat der Unternehmer, wie schon erwähnt, in erster Linie die Pflicht, daher aber auch das Recht, durch Nachbesserung den Mangel zu beseitigen; bevor ihm nicht dazu Gelegenheit gegeben worden ist, kann weder die Minderung noch gar Wandelung vom Besteller verlangt werden. Diese Wohltat, zur Nachbesserung zugelassen werden zu müssen, besteht beim Kaufvertrag nicht. Wie weit sich beide Teile darüber einigen, daß zunächst eine Nachbesserung (oder eine Ersatzlieferung) versucht werden soll, bleibt ihnen natürlich überlassen, auch kann es stark unkulant und dem Rufe des Käufers abträglich sein, wenn er in einfachen Fällen die Nachbesserung nicht gestatten will; die Weigerung kann unter Umständen auch zur Schikane ausarten, oder sie kann gegen Treu und Glauben verstoßen; dann müßte die Nachbesserung wegen § 226 bzw. § 157, 320 BGB doch geduldet werden; aber die Anwendung dieser allgemeinen Bestimmungen

hat im Prozeß den Nachteil, daß ihre Auslegung von der subjektiven Meinung des Richters abhängt.

Wenn man dem Verkäufer die Wohltat des Nachbesserungsrechtes versagt, so ist diese gegenüber dem Werkvertragsverhältnis härtere Bestimmung in folgendem begründet. Zunächst ist vielfach eine nachgebesserte Sache nicht gleichwertig einer von vornherein mangelfreien, und auf letztere hat der Käufer Anspruch. Sodann kann man für fertig vorhandene oder regelmäßig fabrizierte Sachen — auch Maschinen — eher von vornherein ganz einstehen, sowohl hinsichtlich der Fehlerfreiheit als auch der Garantiezahlen. Es ist nicht unbillig, daß der Käufer einer 50 kW Dynamo gängiger Type das Recht hat, sie einfach zurückzugeben, wenn sie einen Fehler hat oder im Wirkungsgrad zurückbleibt. Es wäre hart, wenn das gleiche Recht für eine 20 000 kW Dampfturbine bestände, die der Unternehmer erstmalig für den Zweck entwirft und die er nicht leicht wieder anderweitig verwenden kann. Gerade bei Maschinen ist aber eine Unbilligkeit der gesetzlichen Bestimmungen nicht abzuleugnen: eine 500 kW Turbodynamo wird man heutzutage als vertretbar ansehen müssen, es gelten daher (§ 651 BGB) die Vorschriften über den Kauf, ein Recht auf Nachbesserung besteht nicht; und doch wird man oft nicht ohne jede Nachbesserung zurecht kommen. Hier greifen nun meist besondere Vertragsbestimmungen helfend ein.

§ 480 BGB bestimmt noch für den Kaufvertrag, bei nur der Gattung nach bestimmten Sachen könne der Käufer statt der Wandelung oder der Minderung Lieferung einer mangelfreien Sache verlangen; das kommt der Nachbesserung in gewissem Sinne nahe, ist aber ein einseitiges Recht des Käufers, der die Ersatzlieferung verlangen kann, sie aber nicht gestatten muß, wie beim Werkvertrag gefordert wird.

Die *Stichzeiten, zu denen die Mängelfreiheit bestehen soll*, sind: beim Kaufvertrag die Zeit des Gefahrüberganges — wegen etwaiger Schadensersatzansprüche jedoch die Zeit des Kaufes; beim Werkvertrag die Zeit der Übergabe — Abnahme oder Fertigstellung. Sie sind nur wesentlich, wo schnelle Veränderung in Frage kommt, für uns also nur in Sonderfällen.

19. Anzeigepflicht. Der § 377 HGB setzt für Käufe, die für beide Teile ein Handelsgeschäft sind — wo also beide Teile Kaufleute sind —, die Pflicht, die Ware *unverzüglich* nach der Ablieferung, soweit dies nach ordnungsmäßigem Geschäftsgange tunlich ist, zu *untersuchen* und, wenn sich ein Mangel zeigt, dem Verkäufer *unverzüglich Anzeige* zu machen. Unterbleibt die unverzügliche Anzeige, so gilt die Ware als genehmigt. Zeigen sich später Mängel, die bei der ersten Untersuchung nicht erkennbar waren, so muß wieder unverzüglich Anzeige gemacht werden, wenn der Käufer die ihm zustehenden Ansprüche wegen des Mangels geltend machen will. Die Ansprüche selbst sind die eben besprochenen des BGB. — § 381 HGB dehnt diese Verpflichtung sofortiger Mängelanzeige auch auf den Werklieferungsvertrag über nicht vertretbare Sachen aus, soweit sie beweglich sind.

Die Anzeigepflicht — geschweige denn eine unverzügliche — ist im BGB weder bei den Vorschriften vom Kauf noch bei denen vom Werk-

vertrag zu finden. Soweit also nur das BGB gilt — beim reinen Werkvertrag, beim Werklieferungsvertrag über nicht vertretbare unbewegliche Sachen und bei Geschäften aller Art, wenn wenigstens ein Teil nicht Kaufmann (oder Firma), sondern z. B. eine Behörde ist —, besteht eine Anzeigepflicht nur in dem Maße, wie Treu und Glauben mit Rücksicht auf die Verkehrssitte es erfordern (§ 157 BGB).

Die Anzeigepflicht beim Handelskauf wird vielfach recht streng ausgelegt. So wurde eine Reise des allein sachverständigen Chefs zu einer Zeit, wo das Eintreffen einer Sendung zu erwarten war, nicht als Entschuldigung für den Aufschub bis zur Rückkehr zugelassen. Es galt nicht als Entschuldigung, wenn die nötigen Prüfungs- und Antriebseinrichtungen nicht zur Stelle sind — der sorgsame Geschäftsmann soll Vorbereitungen treffen. Auch muß die Prüfung sachgemäß erfolgen: zieht man mangels eigener Sachkenntnis einen Sachverständigen zu, der tatsächlich zur Prüfung nicht geeignet ist, so kann sich hierdurch die Prüfung und damit die Mängelanzeige verspäten. Aber gerade bei Maschinen wird man nicht allzu rigoros sein dürfen. Eines teils ist es gerade bei Maschinen dem Verkäufer meist gleichgültig, ob er die zurückgehende Maschine etwas früher oder später bekommt, und eine Verschleierung, etwa durch Fortschreiten des Fehlers, ist wenig zu befürchten. Andererseits muß man gerade bei Maschinen oft erst zusehen, wie sie sich im Betriebe machen. Was endlich den hier meist interessierenden Fall der Zusage von Garantiezahlen anlangt, so kann man diese erst nach längerer Zeit — übungsmäßig nach etwa 3 Monaten — feststellen, nachdem die Maschine sich eingelaufen hat; das hindert allerdings nicht, diejenigen Fehler anzuzeigen, die eine anfängliche Untersuchung vorher hatte erkennen lassen. Die Untersuchung ist eben jederzeit soweit auszudehnen, wie es im Augenblick sachgemäß ist, jeder gefundene Mangel ist aber sofort anzuzeigen.

Die *Anzeigepflicht bei Nichtkaufleuten und beim Werkvertrag* ist von Fall zu Fall milder auszulegen. Sie entfällt ganz, wenn der Lieferer gar kein Interesse an ihr hat. Keinesfalls aber darf die Untersuchung oder gar die Anzeige eines Mangels, nachdem man ihn bemerkt hatte, deshalb hinausgeschoben werden oder unterbleiben, um den Lieferer zu schädigen, vielleicht ihm eine Beweismöglichkeit zu nehmen. Es ist auch unzulässig, bei einer großen, in Teilen zu machenden Lieferung die ersten Teillieferungen nicht zu untersuchen und namentlich den Mangel nicht zu melden, weil nun der Lieferer weiterarbeitet und mehr und mehr Stoff und Arbeit in mangelhafter Weise verwendet. Aber diese Verpflichtung zu mehr oder weniger schneller Untersuchung und Anzeige entspringt nicht besonderen Vorschriften, sondern nur den allgemeinen Regeln über Treu und Glauben.

20. Verjährung der Mängelansprüche. Die *Verjährungsfrist* für die Gewährleistungsansprüche ist im allgemeinen sechs Monate, sowohl beim Kauf (§ 477 BGB) wie beim Werkvertrag (§ 638 BGB). Bei Arbeiten an einem Grundstück ist sie ein Jahr, bei Bauwerken fünf Jahre. Ein Jahr würde also die Gewährleistung bei einer Zentralheizung dauern, dagegen nur sechs Monate bei einem für eine solche gelieferten Kessel.

Fünf Jahre dauert die Gewährleistung des Gesamtunternehmers für eine Wasserversorgung, aber nur sechs Monate die Gewährleistung des Unterunternehmers, der lediglich die Maschinenanlage dazu lieferte.

Der *Beginn der Frist* ist beim Kaufvertrag die Übergabe, beim Werkvertrag die Abnahme. Sie ist *unabhängig von der Auffindung und von der Anzeige des Mangels*. Innerhalb der Verjährungsfrist müssen die Mängel geltend gemacht werden, entweder durch Einleitung der Klage oder durch gerichtliche Beweisaufnahme; nach beendetem Verfahren läuft die alte Frist weiter, beginnt nicht neu zu laufen. Beim Werkvertrag (und beim Werklieferungsvertrag über nicht vertretbare Sachen) wird die Verjährung auch so lange gehemmt, wie beide Teile im Einverständnis miteinander in der Prüfung und Beseitigung des Mangels begriffen sind (§ 639 BGB).

Wenn sich also an einer Maschine bei den Garantiversuchen, drei Monate nach der Übergabe, ein Materialfehler herausstellt, der vorher nicht gesehen wurde, so muß der Käufer innerhalb weiterer drei Monate gerichtliche Schritte tun, wenn der Verkäufer bis dahin nicht den Mangel beseitigt hat oder doch den Mangel zu beseitigen versprochen hat — was eine freiwillige Anerkennung und einen neuen Vertrag über Beseitigung des Mangels bedeutet. Ein nach fast sechs Monaten aufgefundener Fehler muß sehr schnell vor das Gericht gebracht werden; ein nach Ablauf der sechs Monate aufgefundener Fehler kann nicht mehr geltend gemacht werden. Handelt es sich um eine Maschine normaler Größe und Art und um ein Geschäft zwischen zwei Firmen, so ist überdies nach § 377 und 381 Abs. 2 HGB sofortige Anzeige Voraussetzung für die spätere gerichtliche Geltendmachung, wie schon besprochen.

In den Bedingungen der Maschinenfabriken pflegt in Form eines *besonderen Garantiversprechens* die Gewährleistungsfrist (bei nur Tagesbetrieb) auf zwölf Monate bemessen zu sein (§ 22); diese verlängerte Frist gilt dann nur für das Auffinden des Fehlers; Anzeige und Klageerhebung dürfen nicht bis zum Schluß des Jahres verschoben werden, sondern müssen innerhalb der normalen Fristen vom Auffinden an erfolgen — die Anzeige also sofort bzw. nach Treu und Glauben, die Klageerhebung innerhalb sechs Monaten. Wegen eines nach drei Monaten aufgefundenen Mangels muß also die Klage spätestens im neunten Monat erhoben werden.

Ein Recht bleibt dem Abnehmer nach Ablauf der Verjährungsfrist (BGB § 478): er kann nach wie vor den *Kaufpreis einbehalten*, in dem Maße, wie er zur Wandelung oder Minderung berechtigt ist; das heißt also namentlich: während wegen Wandelung oder Minderung innerhalb der Verjährung die Klage eingereicht werden muß, so kann man statt dessen den bequemeren Weg beschreiten, den angemessenen Abzug zu machen und nur der Klage des Verkäufers auf Zahlung die Einrede entgegenzusetzen: des Mangels wegen werde die Zahlung verweigert; diese Einrede ist dauernd zulässig; allerdings muß dazu die Anzeige des Mangels — soweit sie nicht ohnehin sofort zu erfolgen hatte — innerhalb der Verjährungsfrist erfolgt sein; und außerdem muß der Kaufpreis eben noch nicht ganz bezahlt sein.

Die genannten kurzen Verjährungsfristen gelten für vorhandene, aber nicht anerkannte Mängel. Hat dagegen der Lieferer den *Mangel anerkannt* und seine Beseitigung zugesichert, so ist damit ein neuer — vielleicht nur mündlicher — Vertrag über die Mängelbeseitigung und damit ein neuer Anspruch des Abnehmers zustande gekommen, und für ihn gilt nun die sogenannte regelmäßige dreißigjährige Verjährungsfrist (§ 195 BGB). — Das Schweigen des Verkäufers zur Mängelanzeige ist keine Anerkennung.

21. Beweislast. Die Frage, wer in diesem oder jenem strittigen Punkt den Beweis seiner Behauptung zu führen hat, ist nicht so sehr der Kosten des Beweises wegen von Interesse; denn die Kosten z. B. von Versuchen, die wirklich Beweises halber unternommen sind, sollte endgültig immer der zu tragen haben, zu dessen Ungunsten die gestellte Frage entschieden wird. Aber der Teil, den die Beweislast trifft, ist immer gefährdet durch die Möglichkeit, die Beweisaufnahme könne unentschieden bleiben, und der Streit könne mangels ausreichender Beweismöglichkeit zu seinen Ungunsten auslaufen. Besonders lästig ist die Beweislast, wenn die gelieferte Maschine oder Anlage schleunigst geändert oder entfernt werden muß, und nun der beweispflichtige Teil eine *Beweissicherung* vornehmen muß; damit kann er einen Sachverständigen beauftragen oder auch beim Gericht das *Beweissicherungsverfahren* förmlich einleiten lassen, worauf dieses den Sachverständigen ernannt. Der beweispflichtige Teil läuft hierbei die Gefahr, es könne die Beweisaufnahme im späteren Prozeß unvollständig befunden werden, und dann fehlen ihm die Beweismittel für sein vielleicht gutes Recht. Selten wird er sich dann wegen Fahrlässigkeit an den Sachverständigen halten können. Das Amt des Sachverständigen aber ist bei der Beweissicherung besonders verantwortungsvoll. Die Beweislast kann auch zum Verhängnis werden, wenn die gelieferte Maschine durch Feuer oder andere höhere Gewalt vernichtet wird, bevor die Beweisfeststellungen getroffen sind; und endlich ist an die Möglichkeit zu erinnern, daß — was bei Garantieversuchen häufig ist — die verlangten Messungen nicht oder nur mit unverhältnismäßigem Aufwand auszuführen sind. Es sei in der Hinsicht auf die Unstimmigkeiten in den Garantiebenennungen verwiesen, § 15.

Das Recht, die Beweissicherung zu beantragen oder privatim zu bewirken, hat jede der Parteien gemäß § 488 ZPO, sobald einmal ein Mangel angezeigt ist, und zwar auch ohne daß besondere Gründe für die Besorgnis vorliegen, das Beweismittel könne verloren gehen oder seine Benutzung erschwert werden. Hat ein Teil schon Feststellungen gemacht oder machen lassen, so kann der andere Teil gleichwohl noch das gleiche tun. Die Ergebnisse sind aber für den Richter des ordentlichen Prozesses nicht bindend, und jeder Teil kann die Ergebnisse anfechten, selbst soweit sie auf eigene Anregung entstanden sind.

Die *allgemeine Regel* für die Beweislast lautet, daß derjenige, der aus einer Behauptung Rechte herleiten will, seine Behauptung selbst zu beweisen habe. Wenn daher der Abnehmer sich weigert, anzuerkennen, daß der Lieferer seine vertraglichen Verpflichtungen erfüllt

hat, weil nämlich die zugesagten Eigenschaften nicht vorhanden seien, so trifft zunächst den Lieferer, der sein Geld haben will, die Beweispflicht dafür, daß er vertragsgemäß geliefert und daher Anspruch auf Bezahlung hat. Gerade bei Maschinenlieferungen kehrt sich aber vielfach die Beweislast um auf Grund von § 363 BGB: „Hat der Gläubiger — wer etwas, hier die ordnungsmäßige Herstellung der Maschine, zu fordern hat — eine ihm als Erfüllung angebotene Leistung als Erfüllung angenommen, so trifft ihn die Beweislast, wenn er die Leistung deshalb nicht als Erfüllung gelten lassen will, weil sie eine andere als die geschuldete Leistung oder weil sie unvollständig gewesen sei.“ Die *Beweislast kehrt sich also um mit der Annahme als Erfüllung*, das heißt in dem Augenblick, wo aus einer Erklärung oder aus dem Verhalten des Abnehmers hervorgeht, er glaube durch die Lieferung, so wie geschehen, im großen ganzen befriedigt zu sein. Annahme als Erfüllung liegt, wie schon besprochen, stets in der Ingebrauchnahme — und gerade die wird bei Maschinen meist schon erfolgt sein, bevor Garantieversuche gemacht werden. Wenn dagegen eine Zentralheizungsanlage im Sommer, eine Kühlanlage im Winter fertig wird, so daß sie nicht gleich in Gebrauch genommen wird, so liegt Annahme als Erfüllung gleichwohl vor in dem Moment, wo der Bauherr nach der üblichen ersten Probeheizung den Monteur abreisen läßt — selbst wenn er den Vorbehalt macht, er könne (natürlich) über die Gleichmäßigkeit der Erwärmung und über die Leistungsfähigkeit bei großer Kälte kein Bild haben. Ein solcher Vorbehalt kann, da er nur Selbstverständliches oder doch in den Bestimmungen über Gewährleistung gesetzlich Festgelegtes sagt, nichts daran ändern, daß die Anlage als Erfüllung angenommen werden muß; nur wenn der Abnehmer wirklich Fehler bemerkte, dürfte er die Erfüllung bestreiten und die ganze Abnahme verweigern.

Durch die Annahme als Erfüllung ändert sich nur die Beweislast: während bisher im Zweifelsfall der Lieferer dem Abnehmer nachzuweisen hat, daß er ordnungsmäßig geliefert habe und daher den Entgelt verlangen könne, muß nach vollzogener Annahme als Erfüllung der Abnehmer das Vorhandensein von Mängeln oder die Lieferung einer falschen Type beweisen, wenn er den Entgelt ganz oder teilweise zurückhaben oder auch nur einen Abzug daran machen will.

Die Änderung, die daher die Annahme als Erfüllung zuungunsten des Abnehmers ergibt, liegt nicht auf dem Gebiet der Ersatzpflicht selbst. Denn die Beweisaufnahme selbst, also der Garantieversuch, wird ja vor und nach der Annahme als Erfüllung dasselbe Ergebnis zeitigen, und nach dem Ergebnis richten sich die Ansprüche wegen vorhandener Fehler oder wegen Fehlens zugesagter Eigenschaften im einen wie im anderen Fall. Die Änderung bezieht sich auch nicht auf die Kosten der Beweisführung; für die Kostenlast ist es gleichgültig, wer die Beweisaufnahme eingeleitet hat; wird ihr Ergebnis in einem Prozeß verwendet und als notwendig angesehen, so wird nach Umständen auch der unterlegene Teil dem anderen die Kosten der Beweisführung — jedenfalls der gerichtlichen — zu erstatten haben; immer-

hin wird manches eingeforderte Privatgutachten nicht erstattungsfähig sein. Die Hauptänderung bezieht sich aber auf das Risiko, daß eine Beweisführung ergebnislos verlaufen oder unmöglich werden kann.

22. Vertragsmäßige Abweichungen von den Gesetzesbestimmungen.

Die vorstehenden sind gesetzliche Regel-, aber nicht Zwangsbestimmungen. Sie gelten mangels anderer Abmachungen; solche sind jedoch zulässig, im wesentlichen unbeschränkt.

In gewissen Punkten sind anderweitige Abmachungen geradezu üblich; ist eine allgemeine Übung sicher feststellbar, so wird sie zur *Verkehrssitte*, und da Verträge so auszulegen sind, wie Treu und Glauben mit Rücksicht auf die Verkehrssitte es erfordern, so kann eine Übung auch für Verträge maßgebend werden, die sie nicht ausdrücklich als Abmachung aufnehmen. Von Fachvereinen sind vielfach Regeln aufgestellt, die zum Verkehrsbrauch insoweit führen, als sie zu allgemeiner Anerkennung gelangen. Durch die *Vereinbarungen der Fachvereine* (§ 7) kann also das Recht an sich nicht beeinflußt werden, und die Bezugnahme auf ihr Vorhandensein schlägt nicht durch. Wenn dagegen der Handelsbrauch durch regelmäßige freiwillige Anwendung der beteiligten Kreise entwickelt ist, muß auch ohne besondere Abmachung der einzelne die Regeln gegen sich gelten lassen.

Eine übliche und in gewissen Grenzen zwingende Regel ist die Zulassung von 5% *Spielraum bei Gewährleistungen*: eine Zusage gilt noch als erfüllt, wenn die erreichte Zahl höchstens 5% ungünstiger ist als die zugesagte. Dieser Spielraum ist in den Normen (Regeln) des Vereins Deutscher Ingenieure (mit anderen Vereinen) über Dampfmaschinen und Dampfkessel und über Gasmaschinen und Gaserzeuger angenommen, in letzteren jedoch nur in bezug auf die Wirtschaftlichkeit (Wirkungsgrad, Verbrauch) und die etwa neben der Dauerleistung zugesagte Höchstleistung, nicht in bezug auf die Dauerleistung, die unter allen Umständen erreicht werden muß. In bezug auf die Wirtschaftlichkeit ist der Spielraum handelsüblich geworden auch für andere Maschinenarten und kann daher für alle Maschinenarten als ohne besondere Abmachung verbindlich angesprochen werden, außer für Ventilatoren und Kompressoren, für die die betreffenden Regeln (Punkt 7) ihn ausdrücklich ausschließen; diese schärfere ist also die neuere Auffassung; wer etwas zusagt, soll es auch halten, und soll auf die unvermeidlichen Meßungenauigkeiten gefaßt sein.

Eine andere Abänderung bezieht sich auf die gesetzlich vorgesehene Haftung für Mängel. In den *Lieferungsbedingungen der Maschinenbau-Anstalten* pflegt Gewähr übernommen zu werden für Güte der Konstruktion und Ausführung auf die Dauer von 12 Monaten — bei Tag- und Nachtbetrieb auf die Dauer von 6 Monaten — in der Weise, daß alle Teile unentgeltlich auszubessern oder durch neue zu ersetzen sind, die innerhalb dieser Frist nachweisbar infolge schlechten Materials, fehlerhafter Konstruktion, mangelhafter Ausführung unbrauchbar oder schadhafte werden. Gegenüber dem gesetzlichen Zustand ist die Gewährleistungsfrist also — außer bei durchgehendem Betrieb — verdoppelt;

der sonstige Umfang ist ganz wesentlich eingeschränkt, indem an die Stelle des Rückgaberechtes, das bei mangelhafter Lieferung im Kaufvertrag sonst unbedingt herrscht, das Recht auf Nachbesserung tritt, das dem Verkäufer des Kaufvertrages sonst ganz versagt ist; auch soll sich eine Auswechslung nur auf die schadhaften Teile, nicht auf die ganze Maschine oder Anlage beziehen. Man wird zugeben müssen, daß solches Verfahren für Maschinen billig ist, da z. B. nach Auswechslern einer schadhaften Schubstange die Maschine wirklich in den Zustand einer von vornherein mangelfreien gebracht worden ist. — Den obigen Bedingungen wird meist noch hinzugefügt, daß alle anderen Ansprüche, nämlich solche auf Wandlung oder Minderung und insbesondere der auf Schadenersatz, ausgeschlossen sind.

Wie weit sich diese Bedingungen nicht nur auf Fehler, sondern auch auf zugesagte Verbrauchszahlen beziehen, ist aus ihrem Wortlaut nicht ganz sicher zu entnehmen. Gesetzlich ist ja für zugesagte Eigenschaften die Haftung schärfer, insofern als auch unerhebliche Fehlbeträge (beim Kaufvertrag) der Mängelhaftung unterliegen. Aus den Bedingungen der Maschinenbau-Anstalten könnte man folgern, auch für zugesagte Garantiezahlen beschränke sich der Anspruch des Bestellers (Käufers) auf die Beseitigung des Mangels; Minderung, Wandelung und Schadenersatz sei auch wegen Nichtinnehaltung der Garantiezahlen ausgeschlossen. Im praktischen Leben wird so verfahren, daß der Lieferer in jedem Fall, wo die Garantiezahlen nicht erreicht wurden, nachbessern darf — beim Kaufvertrag ist dieses Recht ein Ausfluß der besonderen Lieferungsbedingungen. Wenn nach wiederholtem Nichtinhalten der Garantiezahlen die Erreichung der zugesagten Zahlen ausgeschlossen erscheint, so wäre es unbillig, dem Abnehmer nichts weiter zuzubilligen als das fortdauernde Recht auf fruchtlose Nachbesserungsversuche. Will man — was, wie erwähnt, unklar ist — Schadenersatz, Wandelung oder Minderung auf Grund der Bedingungen auch wegen zugesagter Eigenschaften ausschließen, so wäre gleichwohl die allgemeine Vorschrift des § 325 BGB mindestens bezüglich des Rücktrittsrechtes anwendbar: „Wird die aus einem gegenseitigen Vertrage dem einen Teile obliegende Leistung infolge eines Umstandes, den er zu vertreten hat, unmöglich, so kann der andere Teil Schadenersatz wegen Nichterfüllung verlangen oder von dem Vertrage zurücktreten . . .“ Dieser Rücktritt wäre trotz ähnlicher Wirkung doch keine Wandelung, unter welchem Ausdruck man nur das schnell verjährende Rücktrittsrecht als Ausfluß der Mängelhaftung versteht. Das Rücktrittsrecht wegen Unmöglichkeit der Erfüllung verjährt in der regelmäßigen Frist von 30 Jahren.

Im praktischen Leben wird, wenn man dem Abnehmer dieses Rücktrittsrecht zuspricht, auch jeder mildere Anspruch auf Minderung oder angemessenen Schadenersatz auf Zustimmung des Lieferers rechnen können. Es ist vielfach üblich, daß eine angemessene Minderung am Kaufpreis gemacht wird, wenn der Spielraum von 5% wenig überschritten ist; daß hingegen vom Rücktrittsrecht erst Gebrauch gemacht wird, wenn der Spielraum so weit überschritten ist, daß die

erreichten Zahlen mehr als 10% ungünstiger sind als die zugesagten. Eine rechtliche Grundlage hat diese Übung kaum.

Einfache Rechnungen zeigen übrigens, daß es nicht leicht ist, eine *Bemessung des Schadenersatzes* bei stark benutzten Maschinen so zu finden, daß der Abnehmer für den Mehrverbrauch entschädigt wird und doch nicht der Lieferer ganz leer ausgeht. Wenn ein 75-kW-Elektromotor statt der zugesagten 85% nur 84% Wirkungsgrad hat, so verbraucht er also $75:0,84 = 89,2$ kW statt $75:0,85 = 88,2$ kW, das ist 1 kW zu viel; das wird für jede Betriebsstunde reichlich 10 Pf. Mehrstromkosten bedeuten. Bei 300 Tagen zu 10 Stunden = 3000 jährlichen Betriebsstunden ist der Mehraufwand für Strom 300 M. im Jahr; will man diesen Mehraufwand zum Zweck der Schadenabfindung kapitalisieren, und will man selbst die Lebensdauer des Motors zu nur 10 Jahren veranschlagen, so wäre ein Kapital zu vergüten, das durch 300 M. Rente für 10 Jahre verzinst und abgeschrieben wird. Nach den Grundsätzen der Rentenrechnung hätte man (Hütte, 22. Aufl., I, 55) zur Erzielung der Rente R für die kommenden n Jahre beim Zinssatz $k\%$ ein Kapital zu vergüten

$$K = R \frac{p^n - 1}{p^n(p - 1)}; \text{ hierin } p = 1 + \frac{k}{100} \quad \dots \dots (1)$$

also in unserem Fall, mit nur 5% rechnend

$$K = 300 \cdot \frac{1,05^{10} - 1}{1,05^{10} \cdot 0,05} = 300 \cdot \frac{1,63 - 1}{1,63 \cdot 0,05} = 300 \cdot 7,75 = 2320 \text{ M.}$$

Dieser Schadenersatz ist etwa so groß wie der Kaufpreis des Elektromotors (Vorkriegspreise). Auf solche Verhältnisse kommt man meist. Läßt man sie gelten, so gibt man zu, daß der Elektromotor geringeren Wirkungsgrades sogar negativen Wert hat. Ein Blick in die Listen der Elektrizitätsfirmen zeigt die Fehlerhaftigkeit dieses Ergebnisses.

Eher kommt man bei *Berechnung der Minderung* zu annehmbarem Ergebnis: aus den Listen der Firmen kann man etwa entnehmen, daß ein Elektromotor mit 84% Wirkungsgrad mit 2600 M. aufgeführt ist, ein Elektromotor mit 85% Wirkungsgrad mit 2800 M. Beider Wert verhält sich daher zueinander wie 0,93 : 1, und der unter Zugrundelegung von 85% Wirkungsgrad vereinbarte Kaufpreis wäre in diesem Verhältnis zu mindern (§ 472 BGB).

Der Schadenersatzanspruch geht also auf den Unterschied, der Minderungsanspruch auf das Verhältnis.

Bei dieser Berechnung war übrigens von der Tatsache Gebrauch gemacht, daß für elektrische Maschinen ein Spielraum von 5% nicht zugestanden wird. Bei anderen Maschinenarten wäre noch folgende Frage offen: Wenn die gemessene Verbrauchszahl 6% ungünstiger ist als die zugesagte, ist dann der volle Fehlbetrag vergütungsfähig oder nur der Überschuß über die zulässigen 5%, in diesem Falle also 6—5 = 1%. Wir halten die vollen 6% für vergütungsfähig: Überschreitungen bis zu 5% sollen unbeachtet bleiben, höhere sind ihrem vollen Betrage nach anzurechnen.

Sonderverhältnissen wird stets, sofern sie beiden Teilen beim Vertragsschluß bekannt waren, durch Sonderauslegung Rechnung zu tragen sein. Wir denken an die beiden Möglichkeiten, die durch folgende Beispiele gekennzeichnet werden: In einer mit Abdampfausnutzung arbeitenden Anlage ist die Höhe des Dampfverbrauches so lange ohne Belang, wie der Dampf doch noch voll ausgenutzt wird und nicht über das Dach bläst; das Bestehen selbst nur auf Nachbesserungen behufs Verminderung des Dampfverbrauches kann hier bereits als Schikane betrachtet werden. Andererseits kann bei einer Dampfkraftanlage mit Abdampfausnutzung ein erhöhtes Interesse an Innehaltung der Zusage bestehen, wenn gerade der mehr verbrauchte Dampf ausbläst und dadurch zu Klagen der Nachbarschaft wegen Belästigung führt.

23. Stellung und Bezahlung zugezogener Sachverständiger; Versuchskosten. Die Tätigkeit des Sachverständigen bei Untersuchung von Maschinen oder Anlagen ist rechtlich nach Umständen verschieden zu beurteilen.

Recht üblich ist es z. B., daß der nichtsachverständige Abnehmer einen Sachverständigen zuzieht, wenn zu passender Zeit — nach dreimonatigem Betrieb — die Garantieversuche gemacht werden sollen. Der Lieferer pflegt dann anwesend zu sein oder einen Vertreter zu schicken, um seine Interessen bei den Versuchen wahrzunehmen. Meist übernimmt der Lieferer die Führung der Maschine während der Versuche, die er übrigens vorher noch gründlich nachgesehen hat. Der Lieferer führt also dem Abnehmer — oder seinem sachverständigen Beauftragten — die Maschine vor, um zu zeigen, daß sie den zu stellenden Anforderungen entspricht; formell ist allerdings nicht er, sondern der Abnehmer beweispflichtig (§ 21), und der Sachverständige benutzt die Gelegenheit, sich durch Messungen und durch Beobachtung des Verhaltens der Maschine von der Ordentlichkeit der Lieferung zu überzeugen. Bei diesem Sachverhalt ist der Sachverständige also nicht Unparteiischer, sondern *Beauftragter des Abnehmers*, um dessen mangelnde Sachkunde zu ersetzen; wo der Abnehmer selbst sachkundig ist oder sachkundige Angestellte hat, braucht er nicht Fremde zuzuziehen, was denn in großen Werken auch meist nicht geschieht¹⁾.

Es ist selbstverständlich, daß die Kosten solcher sachverständigen Hilfe und Beratung vom Abnehmer zu tragen sind, zum mindesten für den ersten, wenn auch erfolglosen Garantieversuch.

Über die *weiteren Garantieversuche*, die die Beseitigung der erstmals festgestellten Mängel erweisen sollen, können Zweifel obwalten: einerseits soll auch diesmal wieder der Sachverständige nur die mangelnde Sachkunde des Abnehmers ersetzen, aber andererseits hat nur die Tatsache, daß die Zusagen zunächst nicht erfüllt waren, den Abnehmer in die Lage gebracht, den Sachverständigen ein zweites Mal zu Rate zu

¹⁾ Die Beschaffung der Instrumente macht dem Abnehmer oft Schwierigkeiten. Man vereinbare in solchen Fällen schon beim Vertragsschluß, daß der Lieferer die zu Abnahmeversuchen nötigen Instrumente in geichem Zustande herzustellen habe.

ziehen. Im allgemeinen wird der letztere Gesichtspunkt als durchschlagend angesehen, und die Kosten des besonders zugezogenen Sachverständigen bei einem zweiten Garantievorschlag werden vom Lieferer getragen; doch geht man nicht so weit, dem selbst sachverständigen Abnehmer auch für Zeitverlust und Reiseaufwand Entschädigung zu zahlen — was das Entsprechende wäre.

Der so berufene Sachverständige ist also grundsätzlich Parteivertreter; das schließt nicht aus, daß er zu sachlichem Vorgehen verpflichtet ist und daß seinem Zeugnis in einem späteren gerichtlichen Verfahren erhöhtes Vertrauen beigelegt werden kann, da er ja an dem Ausgang der Sache immerhin uninteressiert ist — so wie man von einem Rechtsanwalt, obwohl er Parteivertreter ist, annimmt, er weiche gemäß seiner Verpflichtung nicht von der Wahrheit ab. —

Die Stellung des Sachverständigen ist eine ganz andere, wenn erst einmal Zweifel über die Ordnungsmäßigkeit der Lieferung vorliegen, und wenn nun eine Partei einen Sachverständigen von Ruf zuzieht, um die Sachlage zu klären, bevor sie kostspielige gerichtliche Schritte unternimmt oder bevor etwa notwendige Veränderungen an der Anlage vorgenommen werden. In diesem Falle hat es nur Zweck, einen Sachverständigen zuzuziehen, dessen Unparteilichkeit keinen Bedenken unterliegt, und derselbe muß im eigenen Interesse seines Auftraggebers unparteilich und sachlich gewissenhaft verfahren. Deshalb ist es zweckmäßig, daß sich beide Parteien über die Person eines solchen Sachverständigen vorher einigen, oder daß auf Antrag ein solcher vom zuständigen Gericht in förmlichem Beweissicherungsverfahren ernannt wird.

Dem durch Übereinkunft der Parteien ernannten Sachverständigen kann entweder nur die Feststellung der versuchsmäßig zu findenden Verbrauchszahlen übertragen werden, oder er kann auch gleich mit Festsetzung der hieraus sich ergebenden Schadens- und Entschädigungssummen betraut werden.

Solche Gutachter (oder Gutachterkommissionen) werden oft als Schiedsrichter bezeichnet; aber nicht immer — nur selten — handelt es sich um ein Schiedsgericht nach § 1025 ZPO, nämlich nur dann, wenn die gesamte Entscheidung über den Vertrag, seine Gültigkeit, Erfüllung und Auslegung in ihre Hand gelegt wurde. Wohl hiervon zu unterscheiden ist der obengenannte Fall, wo dem Gutachter nur die Feststellung der tatsächlichen Verhältnisse obliegt — wo also über das Bestehen des Vertrages und seine Auslegung kein Zweifel besteht, wo aber der Gutachter zu entscheiden hat, ob Mängel bestehen und ein wie hoher Abzug ihretwegen zuzubilligen ist; in diesem Fall ist die Bestimmung der Leistung — des vom Lieferer zu zahlenden Entgeltes — einem Dritten oder mehreren Dritten überlassen, die man als *Schiedsmänner oder Schiedsgutachter*, nicht aber als Schiedsrichter bezeichnen sollte; ihre Wirksamkeit regelt sich nach § 317—319 BGB. Sie ist nach billigem, das heißt sachverständigem Ermessen auszuüben; gegen ihre Festsetzung kann, sofern nichts anderes vereinbart ist, das ordentliche Gericht angerufen werden, wenn der Spruch offenbar unbillig ist; zu seiner Beseitigung genügt es aber nicht, daß er objektiv falsch ist,

denn jeder Richter kann irren; es muß vielmehr ein handgreiflicher, grober Irrtum vorliegen, der sich dem Blick des sachkundigen unbefangenen Beobachters sofort aufdrängt.

Die Erklärung (die Entscheidung) des Schiedsmannes ist einfach einer der beiden Parteien abzugeben, die übereingekommen sind, ihm den Fall zu unterbreiten. Für die Erklärung ist nicht einmal die schriftliche Form vorgeschrieben; trotzdem wird sie regelmäßig gewählt werden.

Formvoller muß der Schiedsspruch eines eigentlichen *Schiedsgerichtes* behandelt werden, der auch über die rechtlichen Verhältnisse des Falles entscheiden soll, und dem ein Schiedsvertrag nach § 1025 ff. ZPO zugrunde liegt. Der Spruch muß unterschrieben zugestellt und außerdem auf der Gerichtsschreiberei des zuständigen Gerichts niedergelegt werden (§ 1039 ZPO). Er hat unter den Parteien die Wirkung eines rechtskräftigen gerichtlichen Urteils (§ 1040 ZPO). Der Techniker sollte in allen schwierigeren Fällen einen Spruch nicht abgeben, ohne ihn wegen der seinem Fachgebiet fremden Bestandteile einem Rechtskundigen vorgelegt zu haben.

Oft wird nicht ein einzelner Schiedsmann oder Schiedsrichter berufen, sondern eine Kommission von meist drei Mitgliedern. Jede Partei benennt dann ein Mitglied; vor Eintritt in die Untersuchung ist der Obmann auszuwählen, der im Fall der Nichteinigung die Entscheidung innerhalb der Grenzen der auseinandergehenden Meinungen fällt — der Obmann braucht dann bei Versuchen nicht zugegen zu sein, sondern nur das tatsächliche Ergebnis wird ihm vorgelegt, über das seltener Meinungsverschiedenheiten bestehen werden. Man kann aber auch den Obmann alsbald zuziehen, er ist der Verhandlungsleiter, und Entschließungen werden mangels anderer Abmachung mit Stimmenmehrheit (Kiel OLGR 16, 367 — jedoch wird Einstimmigkeit gefordert BGB § 317) gefaßt, soweit nicht eine Summe zu bestimmen ist, die nach § 317 BGB als Durchschnitt zu ziehen ist. —

Die *Kosten des schiedsmännischen oder schiedsrichterlichen Verfahrens* sind vom unterliegenden Teil — gegebenenfalls angemessen verteilt — zu tragen; im Spruch ist hierüber Bestimmung zu treffen, ebenso wie Gerichte es tun. Die Kosten von Versuchen, die im Laufe solchen Verfahrens nötig sind, sind ebenso zu behandeln.

Denn die in den Lieferungsbedingungen der Maschinenbau-Anstalten vorkommende Bestimmung, Kosten für etwaige Versuche werden vom Besteller getragen, bezieht sich offenbar nur auf die Kosten normaler Abnahmeversuche, kann aber nicht auf die im Streitfall erwachsenden Kosten übertragen werden.

Für die Bemessung der Liquidation des Sachverständigen im gerichtlichen Verfahren besteht die „Gebührenordnung für Zeugen und Sachverständige“, Reichsgesetz vom 10. Juni 1914; außergerichtlich kann die „Gebührenordnung der Architekten und Ingenieure“ § 4 einen Anhalt gewähren. Beide Bestimmungen sind in der Hütte, 22. Aufl., I, S. 1021 bzw. 1003 zu finden, doch treten jetzt Teuerungszuschläge zu den Sätzen hinzu.

II. Wärmetechnische Versuche.

a) Dampfkessel und -leitung.

24. Wirkungsgrad und Verdampfung eines Dampfkessels. Um den *Wirkungsgrad* eines Dampfkessels zu finden, wird die im zugeführten Brennstoff steckende Energie mit der durch Dampferzeugung nutzbar werdenden Wärmemenge verglichen. Man hat also jedenfalls die Brennstoff- und die Speisewasser- oder Dampfmenge zu messen. Gelegentlich gibt man dann statt des Wirkungsgrades einfach das Mengenverhältnis des Brennstoffes zum Dampf an und bezeichnet als *Verdampfungszahl* die mit 1 kg Brennstoff erzielte Dampfmenge.

Es gibt Fälle, wo der Kohlenverbrauch nicht interessiert und nur die *Verdampfung (Dampfleistung)* festgestellt wird, das ist die stündlich in Dampf verwandelte Wassermenge, anzugeben in kg/h. Dann entfällt die mit Messung der Brennstoffmenge verbundene Schwierigkeit und der Zeitaufwand. So wird oft in Gewährleistungen ein Wirkungsgrad bei einer gewissen, mäßigen Verdampfung gegeben und außerdem noch zugesagt, daß eine bestimmte höhere Dampferzeugung noch erreichbar sei, gleichgültig dann meist, bei welchem Wirkungsgrad es geschieht. Für kurzdauernde Bedarfssteigerungen nämlich kommt es darauf an, daß der Kessel nicht versagt, der Kohlenaufwand aber ist bei kurzer Dauer des Höchstverbrauches von wenig Einfluß. In solchem Fall hat man (außer dem vollständigeren Versuch noch) einen *reinen Verdampfungsversuch* zu machen, bei dem die Feuerungsvorgänge außer Betracht bleiben, wenn man nicht gerade in ihnen die vermutete Ursache einer Minderleistung aufsuchen will. Ein reiner Verdampfungsversuch wird auch gemacht, wenn der Dampfverbrauch einer an den Kessel angeschlossenen Maschinenanlage zu bestimmen ist.

Für die Versuche an Dampfkesseln hat der Verein Deutscher Ingenieure „Normen“ herausgegeben, die aus dem Jahre 1899 stammen; sie sind wegen der inzwischen erfolgten Einführung überhitzten Dampfes stark veraltet, auch vermißt man in ihnen besondere Angaben über die Betriebsführung, von der das Ergebnis stark abhängt (§ 35). — Ausgezeichnet, modern und ausführlich sind die Regeln der American Society of Mechanical Engineers aus dem Jahre 1912 [A. S. M. E. Code 1912¹⁾], deren Vorschriften aber von dem teilweise abweichen, was bei uns Norm ist. —

Wenn B kg/h Brennstoff auf den Rost gebracht werden und dadurch zur Unterhaltung des Kesselbetriebes dienen, und wenn der (untere) Heizwert des Brennstoffes ξ_u kcal/kg bekannt ist, so ist für den Kesselbetrieb zur Verfügung gestellt die Energiemenge

$$N_1 = B \cdot \xi_u \text{ kcal/h} \quad (1)$$

Diese Energiemenge ist zur Verfügung gestellt und wirtschaftlich als aufgewendet zu betrachten. Ob sie wirklich durch die Ver-

¹⁾ Moyer, Power Plant Testing, 2. Aufl., S. 269.

brennung in Freiheit gesetzt ist, hängt von der Güte der Feuerung ab. Da diese einen wesentlichen Bestandteil des Kessels selbst bildet und also (im allgemeinen) mit untersucht werden soll, so sind auch z. B. diejenigen Kohlenmengen als aufgewendet anzusehen, die als Grus durch den Rost gefallen sind, der Rostdurchfall.

Für Untersuchungen über den Wärmedurchgang durch die Heizfläche hätte man aber nur die *entwickelte Wärmemenge* in Ansatz zu bringen, die um den Heizwert des Unverbrannten (Rostdurchfall, Kohlenoxyd, Rauch und Ruß) kleiner ist.

Der aufgewendeten ist die *nutzbar gemachte Wärmemenge* gegenüberzustellen. Es ist die auf den Dampf übertragene. Sie berechnet sich aus der stündlich in Dampf verwandelten Wassermenge D kg/h und derjenigen Wärmemenge Q_1 kcal/kg, die man einem Kilogramm Speisewasser von der beobachteten Temperatur zuführen muß, um es in Dampf von der beobachteten Temperatur und dem beobachteten Druck zu verwandeln. Es ist alsdann

$$N_2 = D \cdot Q_1 \text{ kcal/h} \quad \dots \dots \dots (2)$$

Nach Bestimmung dieser beiden Größen ergibt sich ohne weiteres der *Wirkungsgrad des Kessels*

$$\eta = \frac{N_2}{N_1} = \frac{D \cdot Q_1}{B \cdot \xi_u} \quad \dots \dots \dots (3)$$

Die in 1 kg Wasser zur *Verdampfung eingeführte Wärmemenge* Q_1 bestimmt sich wie folgt. Das Wasser erleidet folgende Zustandsänderungen: Wenn es mit t_w ° Celsius in den Kessel gespeist wird, so erwärmt es sich durch Mischung mit dem Kesselwasser auf dessen Temperatur, nämlich auf die Siedetemperatur t_s des Wassers unter dem gerade herrschenden Druck, der (in den unteren Schichten nicht genau) mit dem am Manometer abgelesenen Dampfdruck p at übereinstimmt. Zur Bestimmung der Siedetemperatur und zu den weiteren Rechnungen bedienen wir uns der Wasserdampftabellen von Mollier, die z. B. im ersten Band der Hütte zu finden sind. In Tafel II derselben finden wir die Siedetemperatur als abhängig vom absoluten Druck p_1 , der bekanntlich durch Hinzufügen des Barometerstandes zum Überdruck p gefunden wird; Interpolieren auf volle Grade genügt. — Weiterhin verdampft das Wasser durch Wärmezufuhr vom Feuer aus, ohne seine Temperatur zu verändern, und es entsteht daher 1 kg gesättigter Dampf vom Druck p_1 und von der nach den Dampftabellen als Sättigungstemperatur des Dampfes (Siedetemperatur des Wassers) zugeordneten Temperatur t_s . Der Dampf verläßt den Kesselkörper „im Zustande p_1, t_s “ und geht in den Überhitzer — dessen Vorhandensein vorausgesetzt. Dort führt das Feuer ihm weiter Wärme zu, trocknet ihn zunächst, wenn er Feuchtigkeit enthielt, bei unveränderter Temperatur und erhöht weiterhin die Dampftemperatur von t_s auf t_d , während der Druck wegen des Zusammenhanges mit dem Kessel sich nicht ändern kann (er nimmt, den Strömungswiderständen im Überhitzer entsprechend, etwas, meist unmerklich, ab). Der Dampf wird überhitzt und verläßt den ganzen Kessel im Zustande p_1, t_d .

In jedem der genannten Zustände (und der durchlaufenen Zwischenzustände) hat der Dampf bzw. das Wasser einen bestimmten *Wärmeinhalt*, das ist der Mehrgehalt an Wärme in 1 kg gegenüber Wasser von 0°. Zum Überführen von einem Zustande in einen anderen ist so viel Wärme zuzuführen, wie dem Unterschied der Wärmeinhalte entspricht; den einem jeden Zustand zugehörigen Wärmeinhalt aber kann man den Dampftabellen bzw. den zugehörigen Formeln entnehmen. Sei also i_w der Wärmeinhalt von Wasser von der Speisetemperatur t_w , und sei i_d der Wärmeinhalt von Dampf vom Zustande p_1, t_d , so hat man $i_d - i_w$ kcal/kg zuführen müssen, um die Zustandsänderung herbeizuführen. Es ist also einfach $Q_1 = i_d - i_w$, und wir können auch schreiben

$$\eta = \frac{D \cdot (i_d - i_w)}{B \cdot \zeta_u} \dots \dots \dots (3a)$$

Wo die Überhitzung fehlt, gilt sinngemäß das gleiche.

Da Q_1 und ζ_u sich nicht in allzu weiten Grenzen zu verändern pflegen, insbesondere nicht bei einem bestimmten Kessel während verschiedener Betriebsperioden, wenn Kohlensorte, Druck, und Temperaturverhältnisse unverändert bleiben, so gibt für die Kontrolle des laufenden Betriebes oder auch für den Vergleich mit anderen unter ähnlichen Bedingungen arbeitenden Kesseln die *Verdampfungszahl*

$$\varepsilon = \frac{D}{B} \dots \dots \dots (4)$$

einen ungefähren, einfach zu gewinnenden Anhalt.

Um die Ungleichmäßigkeiten von Q_1 bei verschiedenen Kesseln und bei verschiedenen Versuchen zu berücksichtigen, führt man wohl die Netto-Verdampfung ein, die sich auf normale Werte von Druck und Temperatur bezieht. Als Normalie, auf die man sich bezieht, ist üblich die Erzeugung trocken gesättigten Dampfes von 100° Temperatur (760 mm QuS absolutem Druck) aus Speisewasser von 0° Temperatur. Für diese Erzeugung ist, für je 1 kg Wasser, die Wärmemenge von 639,7 \approx 640 kcal nötig. Wenn nun jedem Kilogramm an Stelle der wirklich zugeführten Q_1 kcal die normale Wärmemenge von 640 kcal zugeführt worden wäre, so nimmt man an, wäre an Stelle der beobachteten stündlichen Verdampfung D der Wert

$$D_{640} = D \cdot \frac{Q_1}{640} \text{ kg/h} \dots \dots \dots (5)$$

getreten; dies ist die *stündliche Nettoverdampfung*. Mit ihrer Hilfe ergibt sich die *Netto-Verdampfungszahl*

$$\varepsilon_{640} = \frac{D_{640}}{B} = \frac{D \cdot Q_1}{640 \cdot B} \dots \dots \dots (4a)$$

Nach amerikanischem Brauch dient als Bezugswert die Verwandlung von Wasser von 100° C (212° F) in Dampf der gleichen Temperatur. Für diese „Verdampfung von und bei 100° C“ sind 539 kcal/kg aufzuwenden.

An Stelle der Verdampfungszahlen sollte man möglichst immer den Wirkungsgrad geben, der die Eigenschaften des Brennstoffes und

des Dampfes berücksichtigt. Kennt man den Heizwert des Brennstoffes nicht — der aber für wichtigere Untersuchungen stets zu bestimmen ist —, so ist die Verdampfungszahl ein schnell zu gewinnender Anhalt. Sie ist ein Maßstab für die Kosten der Dampferzeugung, insofern vollwertig, als man auch die Kohle meist nicht nach ihrem Heizwert, sondern einfach kilogrammweise zu bezahlen pflegt. Die einfache (Brutto-) Verdampfungszahl ist ein Maßstab für die Kosten von 1 kg Dampf, die Netto-Verdampfungszahl ein Maßstab für die Kosten von 1000 kcal. Immerhin ist gegen die Umrechnung auf die Nettowerte so vieles einzuwenden, daß wir an ihrer Stelle die *Nutzwärme aus 1 kg Brennstoff*

$$Q_0 = \frac{D \cdot Q_1}{B} \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \dots \dots \dots (6)$$

vorziehen, die in der Heizungstechnik als Maß für die Kosten der Wärmemenge üblich ist; sie unterscheidet sich von der Netto-Verdampfungszahl nur durch die Konstante 640.

Gegen die Angabe der Nettoverdampfung ist nämlich einzuwenden, daß sie eine praktisch gar nicht existierende Zahl ermittelt und angibt. Wenn (z. B. in Zuckerfabriken) die Speisewassertemperatur 100° beträgt, die Dampftemperatur 300°, die Temperatur des Kesselinhaltes (bei 12 at Überdruck) 191°, so will man durch die einfache Proportionalität der Formeln (5) und (4a) auf 0° Speisewasser-, 100° Dampf- und Kesseltemperatur umrechnen. Das ist irreführend. Solche Umrechnungen dürfen nur in ganz engen Grenzen gemacht werden. In dem angenommenen Normalbetrieb des Kessels, sind die Temperaturunterschiede zwischen Kessel und Feuergasen so andere, daß die wirkliche Verdampfung größer werden würde, als die Formeln (5) und (4a) angeben, wenn man Wasser von 0° in Dampf von 100° verwandelte. Um solche irreführende Umrechnung zu vermeiden, wolle man die Nettowerte vermeiden und an ihrer Stelle die Ausdrücke (3) und (6) verwenden. — Besonders unklar wird übrigens die Umrechnung auf Nettoverdampfung, wenn der Kessel mit Überhitzung arbeitet. Die Verdampfung selbst wird nur im Kesselkörper geleistet; in die Umrechnung aber geht die Überhitzerleistung ein, weil die Überhitzungstemperatur den Wärmehalt beeinflußt.

Die einfache Verdampfungszahl (4) begegnet diesen Einwendungen nicht, weil sie rein betriebsmäßig die verbrauchten Mengen vergleicht. Aber sie ist kein reiner Maßstab für die Güte des Kessels, weil je nach der Temperatur von Speisewasser und Dampf und je nach dem Heizwert der Kohle an demselben Kessel sehr verschiedene Verdampfungszahlen erzielt werden.

Diese Bemerkung bezieht sich allerdings auf den hier in Rede stehenden Fall, der Kessel sei zu untersuchen. Dagegen hat der Begriff des *Normaldampfes* von 640 kcal Wärmehalt, aus dem die Netto-Verdampfungszahl entstand, erhebliche Vorteile für die gefühlsmäßige Beurteilung verschiedener Verhältnisse bei der Verwertung des Dampfes; in dem Kapitel über Abdampfausnutzung wird daher von diesem Begriff Gebrauch gemacht werden.

Zum Schluß sei darauf hingewiesen, daß im Gegensatz zu diesen Ausführungen die Normen von 1899 vorschreiben: „Die Verdampfung durch 1 kg ursprünglichen Brennstoff und die Verdampfung auf 1 qm Heizfläche sind auf Wasser von 0° und gesättigten Dampf von 100° (637 WE¹⁾) berechnet anzugeben.“

25. Abmessungen und Beanspruchung der Kesselteile. Die vorstehend definierten Angaben sollen die Wirtschaftlichkeit der Dampferzeugung eines Kessels erkennen lassen. Die folgenden wollen ein Maß dafür angeben, ob der Kessel im ganzen und in seinen Teilen stark oder schwach beansprucht war. Da mit der Beanspruchung, beim Kessel wie bei allen Maschinen, die Wirtschaftlichkeit sich ändert, so ist die Beanspruchung stets anzugeben. Außerdem ist die Angabe der Beanspruchung wichtig, um beurteilen zu können, wie weit die Kesselleistung noch steigerungsfähig ist.

Ist H m² die Heizfläche des Kessels, D kg/h die verdampfte Wassermenge, so bezeichnet man als *Beanspruchung der Heizfläche* die Größe

$$h = \frac{D}{H} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \dots \dots \dots (7)$$

Als *Heizfläche des Kessels* H m² bezeichnet man die von Feuer gasen berührte Kesselwandung, auf der Feuerseite gemessen, die im Großkesselbau auf der anderen Seite von Wasser berührt sein muß; man kann sie der Genehmigungsurkunde oder dem Revisionsbuch entnehmen und muß die Angabe nach Bedarf nachprüfen.

Die Heizfläche des Kessels wird auf der Feuerseite gemessen, weil der Übergang der Wärme von Gasen an Metall viel schwerer vonstatten geht als der von Metall an Wasser, zumal an siedendes mit lebhafter Konvektion. Die Rauchgasseite ist also hauptsächlich maßgebend für den Wärmeübergang.

Bei den *Kleinkesseln* (Gliederkessel der Heizungsindustrie) kommen feuerberührte Wandungen oberhalb des Wasserspiegels vor: die Feuerzüge gehen entsprechend hoch hinauf. Wegen der Wallungen der Oberfläche werden diese Wandungsteile auch vom Wasser bespült, sie bilden deshalb einen, sogar sehr wirksamen Teil der Heizfläche. Man pflegt sie in neuerer Zeit für die Berechnung der Belastung in die Heizfläche einzurechnen. Ihre Größe wechselt mit dem Wasserstand, sie sollte während des Versuches festgestellt und besonders angegeben werden.

Die (ebenfalls auf der Feuerseite zu messende) *Heizfläche des Überhitzers* ist auch besonders anzugeben. Für die Verdampfung bleibt sie natürlich außer Ansatz.

Die zur Anwärmung des Speisewassers auf Siedetemperatur und zur Verdampfung nötige Wärmemenge muß die Heizfläche durchlaufen; die durch 1 m² der Heizfläche gehende Wärmemenge ist demnach durch den Quotienten aus Dampfmenge und Heizfläche näherungsweise bestimmt — nicht genau, weil noch die Anwärmung des gespeisten Wassers auf Siedetemperatur in Betracht kommt. Man kann die Be-

¹⁾ Nach jetziger Kenntnis in 640 kcal zu verwandeln.

anspruchung auch im Wärmemaß angeben: die von 1 m² Heizfläche übertragene Wärmemenge wäre bei Erzeugung gesättigten Dampfes

$$\frac{D \cdot (i_d - i_w)}{H} \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \dots \dots \dots (7a)$$

Bei Erzeugung überhitzten Dampfes hätte man sowohl die Wärmeübertragung als auch die Heizfläche für Kesselkörper und für Überhitzer zu vereinzeln und den Quotienten für jede einzeln anzugeben.

Die Rostfläche R m² läßt sich durch Ausmessen ermitteln oder auch den Kesselpapieren entnehmen. Die Beanspruchung der Rostfläche ist

$$r = \frac{B \text{ kg}}{R \text{ m}^2 \cdot \text{h}} \dots \dots \dots (8)$$

wenn im ganzen B kg/h Brennstoff verbrannt sind. Im allgemeinen wird mit einer hohen Heizflächen- auch eine hohe Rostbeanspruchung einhergehen.

Bei der Ausmessung der Rostfläche wird man nicht immer ohne einige Willkür auskommen — wie weit an den Kanten der Rost als solcher zu rechnen sei. Sicherer läßt sich — bei wagerechten Rosten — angeben, was die freie Rostfläche sei; man ermittelt sie durch Ausmessen des der Luft in der Rostfläche zur Verfügung stehenden Durchtrittsquerschnittes

26. Wärmehalt von Dampf. In § 24 wurde mit der Wärmemenge Q_1 kcal/kg gerechnet, die 1 kg gespeistes Wasser bei der Umwandlung in überhitzten Dampf aufnimmt. Es war dies der Wärmehalt des Dampfes gegenüber dem Wasser $Q_1 = i_d - i_w$. In einem Beispiel für die Benutzung der Dampftabellen möge dieser Wert ermittelt werden. Die Speisewassertemperatur sei $t_w = 37,7^\circ \text{C}$ gemessen. Der Dampf verlasse den Überhitzer mit 11,49 at Überdruck und 313° Temperatur.

Der absolute Druck ist durch Zuzählen des Barometerstandes (751 mm QuS = $751 : 735 = 1,02$ at) zu finden, er ist rund $p_1 = 12,5$ at. Für die Berechnung des Wärmehaltes i_d von 1 kg Dampf dient die Formel (Hütte, 22/23. Aufl., I, S. 422)

$$i_d = 594,7 + 0,477 t_d - \mathfrak{S} p_1 \dots \dots \dots (9)$$

Die Funktion \mathfrak{S} ist formelmäßig gegeben, wird aber einfacher der Fig. 14 entnommen: zu $t_d = 313^\circ$ gehört $\mathfrak{S} = 0,57$. Nun rechnen wir

$$\begin{array}{r} 594,7 \\ 0,477 \cdot 313 = 149,2 \\ \hline \Sigma = 743,9 \\ 0,57 \cdot 12,5 = 7,2 \\ \hline i_d = 736,7 \text{ kcal.} \end{array}$$

Es sind also 736,7 kcal aufzuwenden, um 1 kg Wasser, das bei 0° Temperatur sich bereits auf 12,5 at Druck befindet, in überhitzten Dampf vom Zustande 12,5 at, 313° zu verwandeln. Das verwendete Wasser hatte $37,7^\circ$ Temperatur, also auch 37,7 kcal/kg Wärmehalt. Von letzterer Zahl kann man sich auch in der Dampftabelle, Tafel IV

(Hütte S. 419) überzeugen, die in Spalte 2 den Wärmehalt der Flüssigkeit, d. h. des flüssigen Wassers als abhängig von der Temperatur angibt und erkennen läßt, daß erst über 40° hinaus Unterschiede im numerischen Wert des Wärmehaltes und der Temperatur bestehen; bei 100° oder gar höherer Temperatur werden die Abweichungen immerhin merklich (bei 100°: $i_w = 100,5$ kcal, bei 150°: $i_w = 151,6$ kcal). Für unseren Fall aber ist die Wärmeaufnahme von je 1 kg verdampftem Wasser

$$i_d - i_w = 736,7 - 37,7 = 699,0 \text{ kcal/kg.}$$

Ein zweites Beispiel soll die gleiche Rechnung für den Fall gesättigten Dampfes zeigen. Wieder sei $t_w = 37,7^\circ \text{C}$, der Kesseldruck wieder 11,49 at Überdruck gemessen. Einer Messung der Dampftemperatur bedarf es bei gesättigtem Dampf nicht. Wir entnehmen ohne weiteres der Dampftabelle, Tafel II, Hütte S. 417, daß gesättigter Dampf von $11,49 + 1,02 = 12,5$ at absolutem Druck eine Temperatur $t_s = 188,8^\circ \text{C}$ hat.

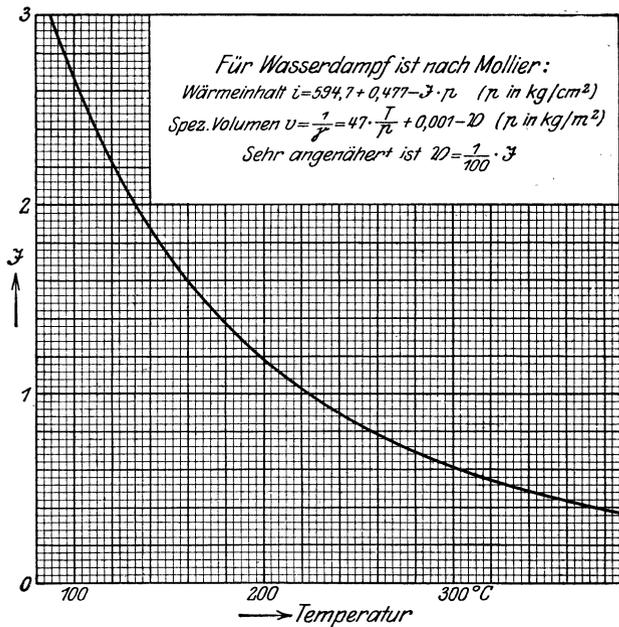


Fig. 14. Wärmehalt und Volumen von Heißdampf.

Nach der gleichen Tafel, Spalte 4, interpolieren wir ohne weiteres den

Wärmehalt des gesättigten Dampfes . . .	$i_d = 668,5$ kcal
Das Speisewasser enthielt	$i_w = 37,7$ „
Also ist	<u>$i_d - i_w = 630,8$ kcal</u>

die aufzuwendende Wärmemenge, um 1 kg Wasser von $37,7^\circ \text{C}$ in trocken gesättigten Dampf von 12,5 at abs zu verwandeln.

Die Voraussetzung trockener Sättigung trifft meist nicht zu; der Kessel wird Feuchtigkeit mitreißen lassen; die Feuchtigkeit des Dampfes aber ist mit in dem als Speisewasser gemessenen Dampf enthalten. Selten ist es möglich, die Dampffuchtigkeit zuverlässig zu messen (Techn. Mess. § 108). Sei sie zu 2% gemessen oder geschätzt, so wäre also nur 0,98 von 1 kg gemessenen Dampfes (gespeisten Wassers) mit dem

Wärmeinhalt des trockenen Dampfes anzusetzen, der Rest 0,02 mit dem Wärmeinhalt des Wassers im Siedezustand bei gleichem Druck von 12,5 at abs. Dampf tafel II gibt diesen Wärmeinhalt der Flüssigkeit zu 191,8 kcal an. Nun berechnet sich

Anteil des Dampfgehaltes	0,98	· 668,5	=	655,1 kcal
Anteil der Feuchtigkeit	0,02	· 191,8	=	3,8 „
				Wärmeinhalt des feuchten Dampfes $i_d = 658,9$ kcal
				Das Speisewasser enthielt $i_w = 37,7$ „
				$i_d - i_w = 621,2$ kcal.

Die letztgenannten Rechnungen für Erzeugung gesättigten Dampfes gelten also für Kessel ohne Überhitzer. Sie lassen aber auch bei Kesseln mit Überhitzer den *Anteil des Kesselkörpers und des Überhitzers* an der Wärmeausnutzung vereinzeln: der Kesselkörper erzeugt (naß oder trocken) gesättigten Dampf, der Überhitzer trocknet und überhitzt ihn. Wir erhalten folgendes Schema für den Fall, daß der Kesselkörper trocken gesättigten Dampf liefert:

Wärmeinhalt:	Wärmeaufwand:
des gespeisten Wassers . 37,7 kcal/kg	154,1 kcal/kg zum Erwärmen d. Wassers
des siedenden Wassers . 191,8 „	476,7 „ zum Bilden des Dampfes
des gesättigten Dampfes 668,5 „	630,8 kcal/kg im Kesselkörper nutzbar
	68,2 „ zum Überhitzen, im Überhitzer nutzbar
des überhitzten Dampfes 736,7 „	699,0 kcal/kg insgesamt nutzbar.
	68,2
Die Überhitzerleistung ist also	$\frac{68,2}{699,0} \cdot 100 = 9,76\%$ der gesamten.

Da zum Überhitzen des Dampfes um $313 - 188,8 = 124^\circ$ eine Wärmemenge von 68,2 kcal/kg verbraucht wurde, so errechnet sich die mittlere spezifische Wärme des überhitzten Dampfes zu $c_p = 0,55$ kcal/kg · °C. Dieselbe ist stark vom Druck und von der Temperatur abhängig.

Ist der Dampf nicht ganz trocken, sondern z. B. 2% naß — was man aber wie gesagt meßtechnisch schwer feststellen kann —, so wird die Leistung des Kesselkörpers kaum, die des Überhitzers erheblich anders ausfallen, nämlich:

Wärmeinhalt:	Wärmeaufwand:
Des gespeisten Wassers . 37,7 kcal/kg	154,1 kcal/kg zum Erwärmen d. Wassers
Des siedenden Wassers . 191,8 „	467,1 „ zum Bilden des Dampfes
Des nassen Dampfes . . 658,9 „	= $0,98 \cdot 476,7$
	621,2 kcal/kg im Kesselkörper nutzbar
	9,6 kcal/kg zum Trocknen
	= $476,7 - 467,1$
	68,2 kcal/kg zum Überhitzen
	77,8 kcal/kg zum Überhitzen des Dampfes im Überhitzer nutzbar
Des überhitzten Dampfes 736,7 „	699,0 kcal/kg insgesamt nutzbar.

Die Überhitzerleistung ist $\frac{77,8}{699,0} \cdot 100 = 11,1\%$ der gesamten, das heißt sie berechnet sich 13,7% höher als unter der Annahme trockenen

Dampfes. Die wirkliche Leistung eines Überhitzers ist also nur sehr ungenau festzustellen.

27. Zahlenbeispiel eines Verdampfungsversuches. Es wurde in genau 4 h eine Kohlenmenge von 1069 kg verfeuert, es wurden also $1069 : 4 = 267$ kg/h Kohle aufgewendet. Der Heizwert der Kohle wurde an einer Probe zu 7040 kcal/kg ermittelt. Also ist die in Form von Kohle zugeführte Wärmemenge

$$N_1 = 267 \text{ kg/h} \cdot 7040 \text{ kcal/kg} = 1\,880\,000 \text{ kcal/h}.$$

Es wurde andererseits in 4 h 2 m 20 s = 4,04 h eine Wassermenge von 7393 kg verdampft; das ist eine Verdampfung von $7393 : 4,04 = 1831$ kg/h. Das Speisewasser hatte im Mittel der Ablesungen $37,7^\circ \text{C}$ Temperatur, der Kesseldruck war 12,49 at ÜD und die Überhitzungstemperatur 313°C . Für diese Verhältnisse war schon (§ 26) die gesamte Wärmeeaufwendung zu 699,0 kcal für 1 kg verdampftes Wasser berechnet worden. Daher ist die durch Verdampfung nutzbar werdende Wärmemenge

$$N_2 = 1831 \text{ kg/h} \cdot 699,0 \text{ kcal/kg} = 1\,280\,000 \text{ kcal/h}.$$

Nun wird der Wirkungsgrad des Dampfkessels einschließlich des Überhitzers

$$\frac{1\,280\,000}{1\,880\,000} = 0,681 \equiv 68,1\%.$$

Die Verdampfungsanzahl ergibt sich zu

$$\frac{1831}{267} = 6,86.$$

Der Kessel hat eine 6,86fache Verdampfung.

Die Verdampfung von 1831 kg/h war erhalten worden, als dem Kilogramm Wasser 699,0 kcal. zugeführt worden waren. Bezogen auf 640 kcal normaler Wärmezuführung wäre geworden:

$$\text{die Netto-Verdampfung } 1831 \cdot \frac{699}{640} = 2000 \frac{\text{kg}}{\text{h}},$$

$$\text{die Netto-Verdampfungsanzahl } \frac{2000}{267} = 7,49.$$

Die Inkonsequenz darin, daß die Wärmeleitung von 699,0 kcal/kg in Kessel und Überhitzer geleistet wurde, während die Verdampfung der 1831 kg nur im Kessel stattfindet, ist dieselbe wie die schon oben erwähnte. Für den Kessel allein wäre die Wärmezufuhr mit 630,8 kcal/kg anzusetzen (S. 26). Für ihn allein wäre (in nicht üblicher Angabe):

$$\text{die Netto-Verdampfung } 1831 \cdot \frac{630,8}{640} = 1805 \frac{\text{kg}}{\text{h}},$$

$$\text{die Netto-Verdampfungsanzahl } \frac{1805}{267} = 6,76.$$

Der Kessel hat eine Heizfläche von 64,6 m². Die Belastung ist

$$\frac{1831 \text{ kg/h Dampf}}{64,6 \text{ m}^2 \text{ Heizfläche}} = 28,4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}.$$

Wenn man jedoch, der Vorschrift der Normen (Punkt 14) entsprechend, die Belastung auf die Netto-Verdampfung bezieht, so wird die Heizflächenbelastung:

$$\frac{2000 \text{ kg/h Dampf}}{64,6 \text{ m}^2 \text{ Heizfläche}} = 31,0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$$

oder, die Umrechnung auf Netto-Verdampfung nur auf die Leistung des Kesselkörpers beziehend:

$$\frac{1805 \text{ kg/h Dampf}}{64,6 \text{ m}^2 \text{ Heizfläche}} = 27,9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}.$$

Die Belastung der Heizfläche ist für einen Zweiflammrohr-Kessel hoch, normal ist etwa 20 bis 24 kg/m².

Auch die auf 1 m² Rostfläche verbrannte Kohlenmenge ist zur Beurteilung dienlich, sie ist die Rostbelastung. Bei einer Rostfläche von 0,95 m² in jedem Flammrohr, im ganzen 1,90 m² wird die Rostbelastung

$$\frac{267 \text{ kg/h Kohle}}{1,90 \text{ m}^2 \text{ Rost}} = 140,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}.$$

Sie ist natürlich auch hoch, normal sind 120 bis 125 kg/m²·h.

Von den 699,0 insgesamt auf 1 kg Wasser verwendeter Kalorien werden nach dem in § 26 gegebenen Schema 68,2 auf die Überhitzung, die restlichen 630,8 kcal auf die Verdampfung geleistet. Letztere leistet der Kesselkörper, erstere der Überhitzer. Die *Leistung des Kesselkörpers* ist also $N' \leq 630,8 \cdot 1831 = 1\,154\,000$ kcal/h; das sind $1\,154\,000 : 64,6 = 18\,000$ kcal/m²·h oder 90,2% der Gesamtleistung. Die *Leistung der Überhitzerheizfläche* wird $N'' \geq 68,2 \cdot 1831 = 125\,000$ kcal/h; das sind $125\,000 : 20,0 = 6250$ kcal/m²·h, oder 9,8% der Gesamtleistung. Durch die Zeichen > und < soll dem Umstande Rechnung getragen werden, daß ein Teil der Leistung statt im Kesselkörper im Überhitzer geleistet worden ist, da der Kesselkörper sicher nassen Dampf geliefert hat.

Das *Originalprotokoll* des Versuches, dem diese Ergebnisse entstammen, hatte ausgesehen wie Tabelle 5; die Auswertung ist gleich unterhalb der Ablesungswerte vorgenommen. Es empfiehlt sich, solche nachträglichen Eintragungen von den während des Versuches vorgenommenen Aufschreibungen zu unterscheiden, z. B. mit Tinte zu machen, wenn man beim Versuch mit Blei schrieb. Tinte und noch mehr Tintenstift geben beim Versuch zum Verlöschen Anlaß und empfehlen sich nicht. In unseren Tabellen sind die *nachträglichen Eintragungen* durch *Kursivschrift* gekennzeichnet.

Da die Einzelheiten der Ablesungen späterhin wenig interessieren, so erstattet man den formellen *Versuchsbericht* etwa nach Angabe von Tabelle 6.

Man trägt, zweckmäßig schon während des Versuches, die Ergebnisse der Kohlen- und der Wassermessung so auf, wie Fig. 15 es andeutet. Man verwendet dazu am besten Stundenpapier, das im wagerechten Sinne für Stunden passend (6- oder 12teilig) geteilt ist, im senkrechten Sinne eine Millimeterteilung hat. Aufgetragen werden zu jeder Abschlußzeit die insgesamt bis dahin gemessenen Mengen (die Integralwerte). Für die Wassermessung kann man sogleich die Linie 1808 kg/h eintragen, die der in Tabelle 6 vorausgesetzten Gewährleistung

Tabelle 5. Verdampfungsversuch (Versuch J) am Zweiflammrohrkessel Nr. X, Erzeugnis: Paucksch. Herstellungsjahr 1904.

Heizfläche des Kessels 64,6 m², des Überhitzers 20,0 m², Rostfläche $2 \times 0,95 = 1,90$ m². Tag des Versuchs: 8. März 1912. Barometerstand 750 mm Qued. Temperatur im Kesselhaus: vor dem Kessel 20°, hinter dem Kessel 30°.

Der Kessel ist seit 2^h 0^m im Betrieb, vorher unbelastet unter Druck. Wasserstand im Kessel am Versuchsbeginn, bei den Zwischenabslüssen und am Ende: 120 mm über der Mutter des rechten Wasserstandglases, 123 mm über der Mutter des linken Wasserstandglases.

Zeit	Kohlenwage		Zeit des Durchdampfens	Diff. min	Summe kg	Wasserrwägung		Summe stündl. kg/h	Stand der Speisepumpe Uml.	Speisetemperatur °C	Zeit des Dampfes at	Temp. °C	Rauchstärke am geöffneten mm WS.	Zugstärke am Fuchs mm WS.
	Stand kg	Diff. kg				Stände kg	Summe kg								Beginn des Speisens min	Dauer des Speisens min
2 · 45	850		2 · 45 · 0			1008 - 70 = 938		4187	36		3 · 0	301	20	12,1
3 · 15	699	151	3 · 54 · 0 3 · 4 · 50 3 · 14 · 30					4437 4708 4967	36 36 39		3 · 0 3 · 25	301 298	20 22	12,1 14,0
3 · 45	547	152	3 · 35 · 0 3 · 46 · 55 3 · 58 · 25 4 · 5 · 25	59,5	1822	1013 - 32 = 981	1838	5233 5509 5730 6035	39 39 44 44		3 · 50	301	20	11,3
4 · 15	410	137	4 · 14 · 0 4 · 24 · 40 4 · 34 · 30 4 · 46 · 50 4 · 55 · 10 5 · 4 · 40		1005 - 104 = 841			6242 6475 6734 6998 7276 7453	44 44 39 36 36 36		4 · 15	300	20	11,5
4 · 45	274 ₁₎ 831	136 142	4 · 34 · 30 4 · 46 · 50 4 · 55 · 10 5 · 4 · 40	60,5	1841	1011 - 41 = 970	1828	7990	39		4 · 40	317	23	15,6
5 · 15	689		5 · 14 · 30 5 · 24 · 40 5 · 36 · 0 5 · 46 · 20 5 · 54 · 40 6 · 5 · 20		1012 - 141 = 871			8248 8516 8779 8996 9284 9526	33 33 33 36 36 36		5 · 5	295	19	11,6
5 · 55	493	199	6 · 16 · 0 6 · 26 · 50 6 · 34 · 30 6 · 44 · 10 6 · 54 · 50 7 · 7 · 30 7 · 16 · 50	61,5	1870	1014 - 55 = 959	1825	9808 10018 10118 10118 10118 10118 1054	40 40 40 40 35 35 35		5 · 80	310	32	17,0
6 · 15	420		6 · 16 · 0 6 · 26 · 50 6 · 34 · 30 6 · 44 · 10 6 · 54 · 50 7 · 7 · 30 7 · 16 · 50		1011 - 100 = 911			9826 10018 10118 10118 10118 10118 1054	36 36 36 36 36 36 36		5 · 55	325	38	22,3
6 · 45	339	81	6 · 16 · 0 6 · 26 · 50 6 · 34 · 30 6 · 44 · 10 6 · 54 · 50 7 · 7 · 30 7 · 16 · 50		1013 - 104 = 909			10018 10118 10118 10118 10118 10118 1054	40 40 40 40 40 40 40		6 · 20	318	28	17,5
7 · 15	280 ₁₎ 519 428	59 152 93	6 · 16 · 0 6 · 26 · 50 6 · 34 · 30 6 · 44 · 10 6 · 54 · 50 7 · 7 · 30 7 · 16 · 50	60,8	1860	1013 - 104 = 909	1835	10018 10118 10118 10118 10118 10118 1054	40 40 40 40 40 40 40		6 · 45	320	28	17,1
7 · 15	428		7 · 16 · 50		1012 - 61 = 951			1054	35		7 · 10	320	34	20,6

3 · 15 bis 7 · 15 = 4,0 h $\Sigma = 1069$
 1069 · 4,0 = 267 kg/h
 267 · 1,90 = 140,5 kg/m² · h
 267 × 7040 kcal. Heizwert = 1880000 kcal
 Wirkungsg. $\eta = \frac{1880000}{1880000} 0,681$

3 · 14 · 30 bis 7 · 16 · 50 = 4,04 h $\Sigma = 7393$
 7393 · 4,04 = 1831 kg/h
 1831 · 64,6 = 28,4 kg/m² · h
 1831 × 699,0 kcal/kg = 1280000 kcal
 Wirkungsg. $\eta = \frac{1280000}{1880000} 0,681$

Spaltensumme 906
 Anzahl der Ablesungen 24
 Mittelwert 37,7

Wärmetheorie $\eta_d = 594,7 + 0,477 \cdot 313 - 0,57 \cdot 12,5 = 736,7$ kcal/kg
 $\eta_w = 37,7$
 $\Delta = 699,0$ kcal/kg

1) Neuer Wagen

Tabelle 6.

Bericht über einen Verdampfungsversuch
ausgeführt an dem Zweiflammrohrkessel Erzeugnis Paucksch Nr. X
am 8. März 1912 nachmittags. (Versuch J.)

Heizfläche des Kessels . . 64,6 m²
" " Überhitzers 20,0 m²
Rostfläche . . 2 × 0,95 = 1,90 m²

Gesamtrauminhalt des Kesselkörpers 20,9 m³,
davon durchschnittlich beim Versuch wassergefüllt 14,2 m³
Dampfraum 6,7 m³.

Wasseroberfläche beim Versuch durchschnittlich 17,5 m².

Barometerstand am Versuchstag 750 mm QuS.

Temperatur im Kesselhaus:

vor den Kesseln 20° (Temperatur der angesaugten Verbrennungsluft),
hinter den Kesseln 30° (Temperatur der Thermo-Galvanometer).

Der Kessel war seit 2^h 0 im Betrieb, vorher unbelastet unter Druck. Letzte
Reinigung beendet am 20. Februar 1912.

Ergebnisse: Von 3^h 15 bis 7^h 15, in 4,0 h wurden 1069 kg Kohle ver-
feuert. Kohlenverbrauch 267 kg/h.

Von 3^h 14^m 30^s bis 7^h 16^m 50^s in 4,04 h, wurden 7393 kg Wasser verdampft.
Dampferzeugung 1831 kg/h.

Verdampfungszahl 6,86 fach.

Beanspruchung der Heizfläche 28,4 kg/m² · h, der Rostfläche 140,5 kg/m² · h.

Die auf der Kesselseite des Rauchschiebers gemessene Zugstärke betrug im
Mittel 15,5 mm WS.

Der erzeugte Dampf hatte im Mittel 11,49 at Überdruck = 12,5 at abs und
hatte 313° Überhitzungstemperatur. Wärmeinhalt 736,7 kcal/kg. Das verwendete
Speisewasser hatte im Mittel 37,7° C. Wärmeaufwand zur Erzeugung von 1 kg
Dampf 699,0 kcal.

Der untere Heizwert der verwendeten Steinkohle (oberschlesische, Grube
König) war 7040 kcal/kg.

Der Wirkungsgrad des Kessels berechnet sich zu

$$\eta = \frac{1831 \cdot 699,0}{267 \cdot 7040} = 0,681 \text{ oder } 68,1\%.$$

Die nachzuprüfende Gewährleistung sagte einen Wirkungsgrad von 70% bei
28 kg Belastung der Heizfläche zu, bei Verwendung eines Speisewassers von 40° C
und bei einem Dampfdruck von 12 at Überdruck und einer Überhitzungstem-
peratur von 300° C. Die Bedingungen sind befriedigend erfüllt. Die gemessene
Zahl des Wirkungsgrades ist $\frac{(70 - 68,1) \cdot 100}{70} = 2,7\%$ ungünstiger als die zuge-
sagte, das ist nicht mehr als 5%.

Da vereinbarungsgemäß die Untersuchung nach Maßgabe der Normen des
Verains Deutscher Ingenieure zu erfolgen hatte, so ist die gegebene Gewähr-
leistung als erfüllt zu bezeichnen.

Ort, Tag, Unterschrift.

(28 kg/m² · h Dampferzeugung auf 64,6 m² Heizfläche) entspricht.
Man erkennt dann schon während des Versuches, daß die wirkliche
Dampfahnahme zwar etwas höher, aber außerordentlich gleichmäßig
ist; merkliche Meßfehler liegen offenbar nicht vor. Für die Kohle lege
man eine den ersten Versuchspunkten entsprechende ansteigende Gerade
durch den Anfangspunkt der Messungen; man erkennt aus den Ab-

weichungen der weiteren Punkte bequem, wie gleichmäßig sich die Kohlenmessung gestaltet. Unregelmäßigkeiten in den Abschlußzeiten (5 h 55 statt 5 h 45) stören nicht.

Kurz nach 6 Uhr findet sich in der Kohlenkurve eine Biegung, der keine ebensolche in der Verdampfung entspricht. Während man aus der Gleichmäßigkeit der ersten Versuchspunkte auf eine sehr große Genauigkeit der Kohlenmessung hätte schließen dürfen, läßt diese Biegung doch auf eine erhebliche Unregelmäßigkeit in derselben schließen.

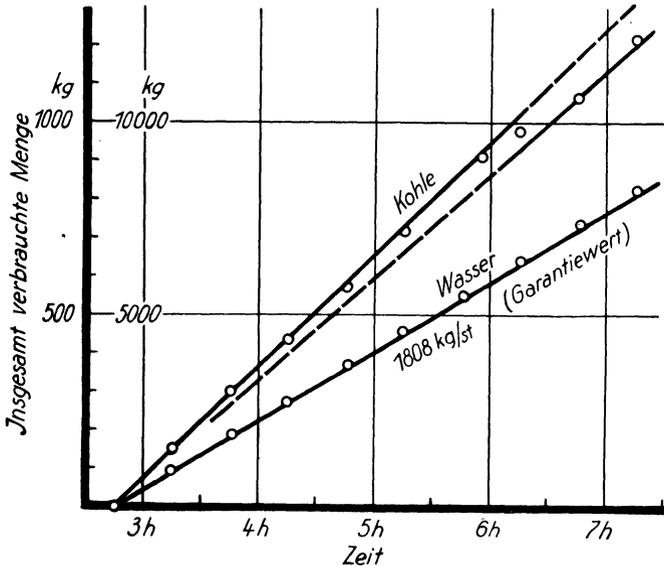


Fig. 15. Ansteigen der Brennstoff- und Wasseraufnahme während eines Verdampfungsversuches.

28. Gewährleistungen, Umrechnungen. Die Gewährleistung bei einer Kessellieferung pflegt etwa wie folgt zu lauten:

„Es wird gewährleistet, daß der Kessel bei Erzeugung von stündlich 28 kg Dampf von 12 at Überdruck und 300° Temperatur auf 1 m² Heizfläche aus Speisewasser von 40° C einen Wirkungsgrad von 70% hat, bei Verwendung einer Steinkohle von mindestens 7000 kcal Heizwert und nicht mehr als 4% Schlackenanteil. Der Kessel wird außerdem eine Verdampfung von stündlich 32 kg auf 1 m² Heizfläche zulassen, bei Verwendung der gleichen Kohle und unter Voraussetzung eines Zuges von 20 mm WS, am Rauchschieber gemessen.“

Über die Auslegung solcher Zusage ist folgendes zu sagen: Der zugesagte Wirkungsgrad gilt als erreicht, wenn die erreichte Zahl höchstens 5% ungünstiger ist als die zugesagte; 5% von 70 ist 3,5, der Wirkungsgrad muß also mindestens 70 — 3,5 = 66,5% gemessen worden sein.

Die Zusage ist aber an eine Reihe von *Bedingungen* geknüpft, die teils den Lieferer, teils den Abnehmer belasten. Mangels anderer Abmachungen ist der Abnehmer dem Lieferer beweispflichtig, wenn er

behauptet, die Gewährleistung sei nicht erreicht; nur nach besonderer Abrede würde umgekehrt der Lieferer dem Abnehmer den Kessel vorzuführen haben, um zu zeigen, daß die Zusage erfüllt ist (§ 21).

Daher hat — auch wenn, seinem Interesse entsprechend, der Lieferer einen Lehrheizer für den Betrieb stellt und manche Vorbereitungen treffen läßt — der Abnehmer dafür zu sorgen, daß eine Belastung von 28 kg hergestellt werden kann; es ist nicht immer leicht, eine große Dampfmenge stundenlang nutzbar zu machen, insbesondere auch, sie konstant abzunehmen. Die Normen lassen im Mittel des ganzen Versuches Schwankungen bis $\pm 7\frac{1}{2}\%$ des Durchschnittswertes und „im einzelnen in der Regel“ solche von nicht mehr als 15% zu; in diesen Grenzen muß sich der Lieferer Schwankungen also gefallen lassen und doch den Wirkungsgrad einhalten; daß die Schwankungen in diesen Grenzen gehalten werden können, dafür hat der Abnehmer Sorge zu tragen. Allerdings heißt es vermittelnd in den Normen: „Sind größere Schwankungen aufgetreten, so soll der Versuch nur dann als gültig betrachtet werden, wenn das Durchschnittsergebnis dadurch nicht wesentlich beeinflußt wird.“

Der erzeugte Dampf soll 12 at *Druck* und 300° C *Temperatur* haben. So wird die Garantie meist dann formuliert, wenn der Kessel 12 at „Betriebsdruck“ hat, also auf diesen Wert das Sicherheitsventil eingestellt ist. Praktisch kann man dann den Druck immer nur etwa 0,5 at niedriger halten; sonst blasen merkliche Dampfmen gen hie und da ab; das gibt Fehler, weil der abblasende Dampf nicht überhitzt wird. Der Druck sollte eigentlich hinter dem Überhitzer gemessen werden — wo er die Kesselanlage verläßt; das geschieht jedoch meist nicht. — Zur Regelung der Dampftemperatur sind manchmal Stellvorrichtungen vorgesehen; dann kann man Überschreitungen vermeiden. Fehlen Stellvorrichtungen, so stellt sich die Dampftemperatur je nach der Belastung automatisch auf bestimmte Werte ein. Der Abnehmer darf erwarten, daß die zugesagte Temperatur mindestens erreicht wird. Zwar geben abweichende Messungen keinen Anlaß zu einer Berichtigung des gemessenen Wirkungsgrades, denn die Temperatur hat automatisch Einfluß auf die errechnete Zahl. Aber für den Maschinenbetrieb ist hohe Überhitzung wirtschaftlich günstiger. Insofern bedeutet die Angabe der Temperatur eine weitere Zusage, die der Lieferer dem Abnehmer gegeben hat. — Diese Bemerkung gilt auch vom Druck. Mit Dampf niederen Druckes wird ein Maschinenbetrieb ungünstiger arbeiten, auch nicht die volle Leistung ergeben. Obgleich nun ein Dampfkessel bei niederem Druck, also niederer Temperatur seines Inhaltes einen (wenig) günstigeren Wirkungsgrad hat, muß doch der Lieferer auf der Erreichung des zugesagten Druckes bestehen dürfen. Als ein für 12 at bestimmter Kessel vom Überwachungsverein eines Blechfehlers wegen nach kurzem Betriebe auf 8 at beschränkt wurde, machte der Kesselbesitzer den Lieferer mit Recht für mehr verbrauchte Kohlen verantwortlich; das gleiche geschah, als eine für Sattedampf von 5 at Druck gebaute Schiebermaschine mit Heißdampf von 10 at Druck nicht in Betrieb zu halten war, während doch der Lieferer dem Käufer (einem

Laien) erklärt hatte, der Kessel „passe in seinen Betrieb ohne weiteres hinein“ (Reichsgerichtsentscheidung). Der Mehrverbrauch ist unter Benutzung des Entropiediagrammes zu finden. — Das Gesagte bezog sich auf Kessel für Maschinenbetrieb. Bei Kesseln für wärmetechnische Zwecke wird der Wirtschaftlichkeit wegen meist kein Wert auf Druck und Temperatur zu legen sein; aber viele Apparate lassen nur bei genügendem Druck die Höchstleistung erreichen, so der Wasserwärmer, dessen Eigenschaften in § 44 untersucht werden.

Eine falsche Speisewassertemperatur übt automatisch ihren Einfluß auf den errechneten Wirkungsgrad aus, und es werden kaum besondere Mißhelligkeiten für die Abnahme aus zu niedriger Speisewassertemperatur entstehen.

Das gleiche gilt theoretisch für die Kohle, von der besondere Eigenschaften (*Heizwert, Schlackengehalt*) ausbedungen werden. Wird für den Abnahmeversuch eine Kohle minderen Heizwertes verwendet, so wächst natürlich der Verbrauch, ebenso bei großem Schlackengehalt (der ja im Heizwert schon mit berücksichtigt ist); der Wirkungsgrad könnte wohl erhalten bleiben. Praktisch aber macht arme und schlackende Kohle beim Verfeuern manche Schwierigkeit, teils weil mehr aufgegeben werden muß, teils weil öfter die Störung des Abschlackens eintritt. So gelingt es auch einem geschickten Heizer nicht, mit armer Kohle gleiche Höchstleistung zu erzielen wie mit guter. Die Forderung einer gewissen Kohle ist also eine Auflage, die der Lieferer dem Käufer des Kessels macht; dieser muß eine Kohle genügender Qualität beschaffen. — In bezug auf den Wirkungsgrad ist der Heizwert von geringem Einfluß, und eine arme aber schlackenfreie Kohle läßt oft besonders gute Wirkungsgrade erzielen.

Endlich ist noch eine Höchstleistung zugesagt. Die Verschärfung der neueren (Gasmaschinen-) Normen, wonach Höchstleistungen voll zu erreichen sind, gelten für Dampfkessel zur Zeit noch nicht; auch diese Zusage wird also mit 5% Spielraum zu verstehen sein, und sie gilt als erfüllt, wenn wenigstens 30,4 kg erreicht werden. Die Bedingung, daß eine Kohle gewisser Mindestqualität gestellt werden müsse, ist für die Frage der Höchstleistung viel wichtiger als für den Nachweis des Wirkungsgrades; die erzielbare Höchstleistung wird stark vom Heizwert und von den sonstigen Eigenschaften der Kohle beeinflusst. — Daß die Zugstärke genüge, ist für Erreichung der Höchstleistung natürlich wesentlich. Für Beschaffung genügenden Zuges wird in der Regel der Käufer selbst zu sorgen haben. Man vergleiche hierzu die Darlegungen in § 8. —

In selteneren Fällen heutzutage wird die *Gewährleistung auf die Verdampfungszahl* statt auf den Wirkungsgrad gestellt. Diese Form hat nur Sinn, wenn Qualität der Kohle, des Speisewassers und des Dampfes gegeben sind. Der Druck und die Temperatur des Dampfes und Speisewassers, der Heizwert der Kohle haben unmittelbaren Einfluß auf die Verdampfungszahl. Wenn die vorgeschriebenen Werte dafür nicht innegehalten sind, so ist die Verdampfungszahl proportional dem Heizwert der Kohle und umgekehrt proportional dem Zuwachs des Dampfes an Wärmeinhalt auf die Sollwerte umzurechnen. Bei

mäßigen Abweichungen ist diese Umrechnung auch theoretisch unbedenklich. So wäre die auf den Sollzustand des Dampfes reduzierte Verdampfung bei dem Beispiel der Tab. 6, S. 74 wie folgt zu errechnen: Dampf von 13 at abs und 300° hat den Wärmehalt 729,7 kcal/kg, Speisewasser von 40° hat 40,0 kcal/kg. Die Umrechnung hat also auf einen Wärmezuwachs von 729,7 — 40,0 = 689,7 kcal zu erfolgen. Der wirkliche Wärmezuwachs war 699,0 kcal, dabei die Verdampfung 1831 kg/h. Also ist

$$\text{die reduzierte Verdampfung} 1831 \cdot \frac{699,0}{689,7} = 1856 \text{ kg/h,}$$

$$\text{die reduzierte Verdampfungszahl} \frac{1856}{267} = 6,96.$$

Diese geringfügige Umrechnung wird unvermeidlich, wenn die Verdampfungszahl garantiert ist. Ihr stehen wegen der Geringfügigkeit nicht die Bedenken entgegen, die wir früher gegen die Berechnung einer Nettoverdampfung mit der großen Umrechnung auf 0 und 100° geltend machten (§ 24).

29. Genauigkeit der Versuche; Versuchsdauer. Die Normen von 1899 schreiben vor: „Handelt es sich um die Ermittlung des Brennstoffverbrauches, so ist ein Versuch von mindestens 10stündiger Dauer, handelt es sich um die Menge des erzeugten oder verbrauchten Dampfes, so ist ein Versuch von mindestens 8stündiger Dauer zu machen. Eine kürzere Dauer — beim Brennstoffverbrauch von mindestens 8, beim Dampfverbrauch von mindestens 6 h — ist zulässig, wenn die zu untersuchende Anlage durchaus gleichmäßig beansprucht wird.“

Dieser Vorschrift wird häufig aus vertraglichen Gründen einfach genügt werden müssen. Wo nur sachliche Gründe in Frage kommen, kann man oft mit Vorteil von ihr abweichen. In solcher Allgemeinheit ausgesprochen ist sie nicht immer sachgemäß. Es wird hier zunächst nur von Dampfkesseln gesprochen, während die Vorschrift wie die ganzen Normen von 1899 sich auch auf Dampfmaschinen beziehen. Die folgenden Gesichtspunkte für die Bemessung der Versuchszeit lassen sich sinngemäß auf andere Maschinenart übertragen.

Allgemein hat man für die Abkürzung der Versuchsdauer die günstigsten Verhältnisse, wenn der betreffende Apparat vollständig gleichförmig belastet bleibt und sich im Beharrungszustand befindet. Ersteres ist eine äußere, letzteres eine innere Bedingung. Ersteres verlangt eine gleichmäßige Dampfabnahme durch die Verbrauchsstelle, sie wird sich oft recht gut erfüllen lassen. Letztere setzt so lange vorgängige Betriebsdauer, auch schon bei der vorgeschriebenen Dampfabnahme, voraus, daß zeitliche Nachwirkungen nicht mehr nennenswert vorhanden sind, daß also beim Dampfkessel namentlich keine Wärmemengen mehr von den Baumassen gespeichert oder hergegeben werden; das wird um so länger dauern, je mehr Mauerwerk der Kessel hat. Als Beharrungszustand wird man es auch bezeichnen können, wenn beim Kessel das Speisen und das Beschicken periodisch erfolgt und dadurch Schwankungen im Zustand des Kessels eintreten, wenn aber — nach genügend

langer Betriebsdauer — die Schwankungen durchaus periodisch und eine wie die andere verlaufen. Doch ist darauf zu achten, daß Anfang und Ende des Versuches in den gleichen Teil ihrer Periode fallen.

Sind beide Bedingungen ganz erfüllt, so ist die Versuchsdauer nach rein *meßtechnischen Gesichtspunkten* festzulegen. Man hat den Versuch so lange auszudehnen, bis man alles Erforderliche genügend genau, nach Bedarf mehrfach, hat messen können. Dabei wird man ihn jedenfalls über mehrere Beschickungs- und Speiseperioden ausdehnen müssen. Bei Untersuchung von Zentralheizungskesseln mit Füllfeuerung wird man also jedenfalls nicht mit der 10stündigen Messung auskommen; allerdings sind die Normen nicht für solche gedacht.

Alle Temperatur- und Zugmessungen sind schnell zu erledigen und sie bedingen daher die Versuchsdauer nicht. Anders steht es mit der Wasser- und namentlich der Kohlenmessung.

Bei der *Kohlenmessung* stellt man fest, was auf den Rost getan wird; maßgebend ist aber die verbrannte Kohlenmenge. Aufgegebene und verbrannte Kohlenmenge stimmen nur dann miteinander überein, wenn am Anfang und am Ende des Versuches sowie bei Zwischenablesungen gleichviel Kohle auf dem Rost liegt und wenn die Kohle in allen jenen Fällen gleichartig durchgebrannt war; denn zwischen frisch aufgeschütteter Kohle und durchgebranntem Koks ist ein starker Unterschied. Man muß es also beim Planrost so einrichten, daß am Anfang und bei den Abschlüssen dem Augenschein nach gleich hoch beschickt ist, und daß diese Beobachtungszeiten immer etwa gleich weit hinter der letzten Beschickung liegen.

Beim Abgleichen des Rostes ist man auf den Augenschein angewiesen, und das ist recht unsicher. Die Größe des möglichen Fehlers kann man angeben, wenn man überlegt, wie genau sich etwa die Schichthöhe auf einen bestimmten Wert einstellen läßt. Beim Planrost und bei Würfelkohle wird man mindestens darauf gefaßt sein müssen, sich in der Abschätzung der Rostbeschickung um 1 cm zu irren. Dann kann es kommen, daß der Rost am Versuchsschluß durchschnittlich 1 cm höher — oder weniger — mit Kohle bedeckt ist als am Anfang. In Kohlenmenge umgerechnet, macht das auf 1 m² Rostfläche 0,01 m³ Kohle aus, das ist bei einem Schichtgewicht der Kohle von 800 kg/m³ eine Unsicherheit von ± 8 kg Kohle. Soll also der Beobachtungsfehler bei der Kohlenmessung nicht mehr als 1% betragen, so muß man den Versuch so lange ausdehnen, bis 800 kg Kohle auf 1 m² Rostfläche verbrannt sind. Bei unserem Versuch (Tab. 7, S. 91) sind 140,5 kg/m² · h verbrannt worden, man hätte den Versuch also über $800 : 140,5 = 5,7$ h ausdehnen sollen. Die anzuwendende Versuchszeit wächst also allgemein mit fallender Rostbelastung, mit steigenden Ansprüchen an die Genauigkeit und mit der Schwierigkeit, die Schichthöhe auf dem Rost richtig zu schätzen, z. B. also mit der Stückgröße.

Nun wird allerdings aus der Gleichmäßigkeit von Versuchsergebnissen in § 35 gefolgert werden können, daß die Messung auch bei kürzeren, selbst zweistündigen Abschlußzeiten schon wesentlich besser ausfällt, als hiernach zu erwarten ist; das heißt also, die Schätzung der

Schichthöhe sei viel genauer gelungen als auf ± 1 cm Fehler; in diesem Sinne kann man auch die sehr regelmäßige Anordnung der Versuchspunkte in Fig. 15 deuten. Aber schon die unbegründete Schwankung in dieser Figur nach 6 Uhr deutet an, daß man sich auf diese Genauigkeit nicht verlassen kann, daß sie in gewissem Grade Zufall und vielleicht Sache der persönlichen augenblicklichen Disposition ist. Auch ist 1 cm Höhenunterschied auf dem Rost sicher nicht viel. Man kann also wohl aussprechen, daß die Versuchsdauer nur dann kürzer sein dürfte, als zur Verbrennung von 800 kg auf 1 m² Rostfläche nötig, wenn besondere Gründe es zulässig erscheinen lassen.

Die *amerikanischen Regeln* von 1912 verlangen, daß mindestens 1220 kg auf 1 m² verbrannt worden sind.

Ganz ähnliche Betrachtungen über die erforderliche Versuchsdauer lassen sich im Anschluß an die *Wassermessung* anstellen.

Gemessen wird das in den Kessel gespeiste Wasser, man will das verdampfte kennen. Beide Mengen sind identisch, wenn am Versuchsbeginn und -schluß im Kessel gleiches Wassergewicht ist. Man muß also vor allem für gleiche Wasserstände am Anfang, bei Zwischenabschlüssen und am Ende sorgen.

Wegen der Schwankungen, die der Wasserstand in den Schaugläsern fortdauernd erleidet, ist der Stand schwerlich genauer als auf ± 3 mm zu ermitteln. Es ist also möglich, daß der Endstand vom Anfangsstand um 3 mm abweicht. Der hiernach mögliche Fehler ist für den Versuch Tabelle 5, § 27 wie folgt abzuschätzen: Die Wasseroberfläche in jener Höhe war 8,3 m lang, 2,1 m breit, betrug also 17,5 m²; die unsicheren 0,003 m Höhe haben also 0,052 m³ Inhalt; das sind bei 188° etwa 45 kg Wassergewicht. Wenn man also wieder auf 1% Unsicherheit aus dieser Quelle kommen will, dann müssen 4500 kg Wasser im ganzen gespeist und verdampft sein. Bei unserem Versuch Tabelle 5 wurden 1831 kg/h gespeist. Also wäre der Versuch auf mindestens $4500 : 1831 = 2,5$ h auszudehnen. Diese Unsicherheit ist also kleiner als die aus der Kohlenmessung, sie wird noch kleiner bei Wasserrohrkesseln mit ihrer kleinen Wasseroberfläche, wenn auch bei ihnen das Wasser so wallt, daß man sicher nicht auf 3 mm messen kann. Und deshalb heißt es in den „Normen“, die Versuchsdauer könne kürzer werden, wenn keine Kohlenmessung, sondern nur die Verdampfung festgestellt werden solle.

Bei der Wassermessung liegen freilich weitere Fehlerquellen vor. Ist nämlich gleiches Volumen im Kessel, so ist damit noch nicht gleiches Gewicht und gleicher Wärmeinhalt gesichert. Der Wasserinhalt ist mit Dampfblasen durchsetzt (Emulsion), da die Verdampfung an der Heizfläche stattfindet, solange der Dampfdruck steht ($\frac{dp_1}{dt} = 0$, $t = \text{Zeit}$); die Durchsetzung mit Dampf ändert sich aber mit der Dampfzeugung D . Andererseits ist die Anordnung der Dampfblasen eine andere in Zeiten fallenden ($\frac{dp_1}{dt} < 0$) und in Zeiten steigenden Dampfdruckes ($\frac{dp_1}{dt} > 0$). Bei fallendem Dampfdruck nämlich wird die Dampf-

erzeugung nur teilweise vom Feuer her gedeckt, zum anderen Teil erfolgt sie aus dem Wärmehalt des Wassers heraus und dann überwiegend nahe dem Wasserspiegel, wo der Druck am kleinsten ist. Bei steigendem Dampfdruck gelangen nicht alle Dampfblasen bis an die Oberfläche, weil sie zur Erwärmung der oberen Wasserschichten verwendet werden; denn die Wärmezufuhr durch die Heizfläche ist größer, als dem Dampfbedarf entspricht. Das durchschnittliche spezifische Gewicht der Emulsion ist also je nach der Kesselbelastung und je nach der Tendenz des Dampfdruckes (Verhältnis der Kessel- zur Heizflächenbelastung) verschieden. Außerdem macht die Höhe des Dampfdruckes (p_1 selbst) etwas aus, da von ihm das spezifische Gewicht des Wassers (sehr wenig) abhängt und da es den Wärmehalt des Wassers bestimmt. Letzterer Einfluß ist wohl merklich. Der Flammrohrkessel, auf den sich Tabelle 5 bezieht, enthielt etwa $14,2 \text{ m}^3$ Wasser, das sind (nicht als Emulsion gerechnet) bei 188° Temperatur $12\,400 \text{ kg}$; da nun $0,5$ at Druckänderung eine Änderung der Siedetemperatur um $1,8^\circ \text{ C}$ bedingt, so entspricht solchem Druckunterschied ein Unterschied des Wärmehaltes von $12\,400 \cdot 1,8 = 22\,000 \text{ kcal}$. Der Wärmeumzusatz des Kessels mit Überhitzer war $N_2 = 1\,280\,000 \text{ kcal/h}$. Also ergibt sich bei einstündiger Versuchsdauer ein Fehler von $1,7\%$, wenn der Druck am Ende des Versuches $0,5$ at höher oder niedriger ist als anfangs.

Eine ähnliche Fehlerrechnung läßt sich für den vorbesprochenen Einfluß von D und $\frac{dp_1}{dt}$ nicht ohne Zeitverlust und manche Annahmen aufmachen. Man darf aber annehmen, daß diese Einflüsse besonders beim Wasserrohrkessel mit seinen starken Wallungen merkliche Beträge annehmen können, bei dem die Einflüsse mangelhaft gleichen Wasserstandes und mangelhaft gleichen Dampfdruckes zurücktreten.

Im ganzen wird man also für die Hauptkesseltypen: Flammrohr- und Wasserrohrkessel, etwa gleiche Unsicherheit der Wassermessung annehmen können. Stets kommt man aus Gründen der Wassermessung auf erheblich kleinere Zeiten, als wegen der Kohlenmessung erforderlich — meist auf $\frac{1}{2}$ bis $\frac{1}{3}$ derselben. Die Bestimmung der Normen, wonach bei reinen Verdampfungsversuchen (ohne Kohlenmessung) eine kürzere Versuchszeit zulässig sei, besteht also sicher zu Recht; die Dauer kann meist noch mehr abgekürzt werden als im Verhältnis $10 : 8$ der Normen.

Dies sind die meßtechnischen Gründe, die für Bemessung der Versuchsdauer allein maßgebend sind, wenn die Kesselanlage im Beharrungszustande und bei gleichmäßiger Belastung ist. Ihnen treten *betriebstechnische Gesichtspunkte* zur Seite, sobald diese Voraussetzungen nicht zutreffen. Der *Beharrungszustand* wird nämlich bei Kesseln erst nach recht langer Zeit erreicht. Der Versuch der Tabelle 5 war — nach Ausschaltung der ersten halben Stunde — etwa 1 h nach Inbetriebnahme des Kessels begonnen worden, umfaßte also die 2. bis 5. Betriebsstunde. In dieser Zeit ergaben sich folgende Stundenwerte:

	Wassermenge	Kohlenmenge	Verdampfungszahl
2. Betriebsstunde	1838 kg/h	289 kg/h	6,36
3. „	1826 „	278 „	6,57
4. „	1825 „	269 „	6,78
5. „	1835 „	233 „	7,86

Ist auch der allzu günstige letzte Wert auffallend (Fig. 27, § 35), so sieht man doch deutlich ein Ansteigen der Verdampfungszahl noch in der fünften Betriebsstunde; der Beharrungszustand ist auch da noch nicht erreicht. Daß das nicht nur Zufall ist, wird eine Zusammenstellung in § 35, Fig. 26 u. 27 lehren. Bei niederen Belastungen dauert es noch länger. Der Wirkungsgrad stieg überdies noch etwas stärker, weil auch die Dampftemperatur noch zunahm (Tabelle 5). Dabei war der Kessel nicht vorher kalt gewesen, sondern er war am Vormittag des gleichen Tages benutzt und über Mittag in üblicher Weise unter Druck gehalten worden. Die Abweichungen der ersten Betriebsstunden vom Durchschnitt betragen 10% und mehr.

Wie lange es dauert, bis die Beharrung erreicht ist, ist allgemein nicht anzugeben. Wesentlichen Einfluß hat zweifellos die Kesselart: die eingemauerten Kessel werden erheblich länger brauchen als etwa Schiffskessel. Bei hoher Belastung des Kessels wird die Beharrung schneller erreicht als bei kleiner (siehe wieder Fig. 27, § 35). Im allgemeinen aber wird man sich durch Zwischenabschlüsse, die halbstündlich oder stündlich vorzunehmen sind, davon überzeugen müssen, ob noch ein Gang in den beobachteten Größen zu erkennen ist, der sich nicht etwa nur aus der zunehmenden Verschlackung des Rostes (Fig. 18, § 33) erklärt.

Aus den eben gegebenen Zahlen geht hervor, daß man recht lange warten muß, bevor man auf den Beharrungszustand rechnen kann: bei den Verhältnissen der Tabelle 5 jedenfalls 5 bis 6 Stunden — und hieran hätte sich erst der 10stündige Verdampfungsversuch anzuschließen. 15 bis 16stündige Betriebsdauer ist aber nicht immer gut zu ermöglichen, teils der Kosten wegen, teils auch, weil oft nur schwer so lange die Belastung gut zu halten ist.

Gegebenenfalls möchten wir dann eher empfehlen, die Versuchsdauer als die Einlaufdauer zu verkürzen. Durch eine Abkürzung der Versuchsdauer auf die Hälfte wird der Fehler erst doppelt so groß, zu kurze Einlaufdauer bringt für die ersten Stunden viel größere Fehler, und zwar einseitige. Man beginne zeitig mit den Ablesungen, führe sie so lange fort wie irgend tunlich, und streiche dann den Anfang so weit fort, wie sich Einlaufwirkungen zeigen, auch wenn die Versuchsdauer zu kurz wird.

Zusammenfassend kann man also folgende Angaben als meist zutreffend hinstellen: In meßtechnischer Hinsicht sind die vollen, von den Normen geforderten Zeiten bei gutem Arbeiten und unter günstigen Verhältnissen nicht nötig. Dagegen empfiehlt sich eine tunlichst lange Beobachtung, um möglichst den Einfluß der Unregelmäßigkeiten auszumerzen, die mit dem Kesselbetrieb einmal verbunden sind. Genannt wurde schon das Speisen und Beschicken, dazu kommt noch das Schlacken. In diesem Sinne sind die von den Normen geforderten Zeiten oft noch zu knapp.

Die *amerikanischen Regeln* von 1912 verlangen daher nicht ganz mit Unrecht für Betriebsversuche eine möglichst 24stündige Dauer.

Man sollte aber bei Bemessung der Versuchsdauer auch die *besonderen Betriebsverhältnisse* beachten. In Werken mit 8stündiger Betriebszeit kommt es bei Flammrohrkesseln nach den vorhergehenden Darlegungen überhaupt nicht oder nur für einen kleinen Teil der Betriebszeit zu einer Art Beharrungszustand. Für den Brennstoffverbrauch im praktischen Betriebe ist also der Verbrauch des Beharrungszustandes wenig maßgebend, und mit seinen Ergebnissen rechnend, kommt man auf merklich zu günstige Verbrauchszahlen für eine Betriebskalkulation. Als betriebsmäßig durchgeführt kann man gerade einen sehr lange fortgesetzten Versuch dann nicht bezeichnen.

Trotzdem wird man bei Abnahmeversuchen mangels besonderer Abmachungen die Zahl des Beharrungszustandes zu ermitteln streben, die für Werke mit Dauerbetrieb auch betriebstechnisch maßgebend ist. Dazu hat man sehr lange Einlaufzeiten anzusetzen; Bestimmungen hierüber in den Normen wären empfehlenswert.

30. Zur praktischen Versuchsdurchführung. Die *Vorbereitungen* zum Versuch bestehen in einer gründlichen Reinigung, in einer Sicherung gegen Versuchsfälschung, die beim Kessel besonders schwer zu vermeiden ist, und natürlich im Anbau der Meßeinrichtungen. Zur Erzielung guter Ergebnisse ist gerade beim Kesselversuch die sorgsame Anordnung des Versuches mindestens so wichtig wie die Sorgfalt im Beobachten der Instrumente. Man beginne daher mit dem Versuch erst, nachdem man alle Teile der Kesselanlage und der Versuchseinrichtung sorgsam geprüft, die Reihenfolge der Ablesungen überlegt und das Hilfspersonal, am besten in Gestalt eines Vorversuchs, angelernt hat.

Die *Reinigung* besteht in der Entfernung von Kesselstein oder -schlamm aus dem Kessellinnern und von Flugasche aus den Zügen. Beides erfolgt in der betriebsmäßig üblichen Weise.

Nach der Reinigung soll der Kessel etwa zwischen 4 und 14 Tagen in Betrieb sein, damit er einerseits gut angewärmt, andererseits noch nicht wieder verschmutzt ist. Er soll außerdem bei Versuchsbeginn mindestens 5 h mit der richtigen Belastung betrieben worden sein.

Die *Sicherung gegen* (unbeabsichtigte oder gar beabsichtigte) *Versuchsfälschung* besteht namentlich in einem blinden Verflanschen aller derjenigen Speiseleitungen, durch die Wasser ein- oder austreten könnte. Wo das Blindverflanschen schwierig ist, hat man die Dichtheit der Absperrorgane und Leitungen zu prüfen; um der Dichtheit dauernd sicher zu sein, bohrt man die Leitung hinter der Absperrung an der unteren Seite an und überzeugt sich öfter davon, daß kein Wasser tropft. Später wird die Bohrung durch einen Gewindepfropfen verschlossen. Man wird nach Bedarf selbst in bezug auf kleine Hilfsleitungen vorsichtig sein, z. B. die kupfernen Ablaufleitungen der Wasserstandsgläser abschrauben. — Gegen Dampfverluste braucht man sich bei reinen Dampfkesseluntersuchungen und Sattdampferzeugung nicht zu sichern; für die Beurteilung des Dampfkessels bleibt es gleich, ob das

einmal Verdampfte abbläst oder nutzbar verbraucht wird. Wo aber zugleich die Dampfaufnahme einer Kraftmaschine zu messen ist, da muß man sich gegen Dampfverluste ebenso sichern wie gegen Wasserverluste. Wo überhitzter Dampf erzeugt wird, da ergibt sich ein mäßiger Fehler auch schon für den Kesselbetrieb insoweit, als der abblasende Dampf — z. B. aus dem Sicherheitsventil — zwar verdampft, aber nicht überhitzt worden ist.

Über den *Anbau der Meßeinrichtungen* ist wenig zu sagen. Bei den Thermometern ist der herausragende Faden festzustellen, im Fuchs hat wegen der Saugspannung der Thermometereinbau luftdicht (Vorsicht, wo die Fuchsdecke doppelt mit loser Zwischenlage ausgeführt ist, Techn. Mess. § 101) und vor dem stets undichten Rauchschieber zu erfolgen. Es empfiehlt sich, beim Kessel wie überall, alle Betriebseinrichtungen meßbar zu machen und ihren Stand zu notieren, also: den Rauchschieber mit Skala zu versehen, ev. auch die Dämpfer, der Speisepumpe einen Hubzähler zu geben und z. B. auch am Getriebe des Kettenrostes einen Umlaufzähler anzubringen, um dessen Vorschub zu kennen; die Schichthöhe des Kettenrostes wird auch gemessen.

Die folgenden Ausführungen beziehen sich meist auf Handbeschickung; bei automatischer gestaltet sich manches einfacher.

Es empfiehlt sich sehr, die *Beschickung* planmäßig zu machen, indem man z. B. alle 15 min $\frac{1}{4}$ des stündlich zu erwartenden Kohlenverbrauches aufgibt, das erstmal 10 min vor dem offiziellen Versuchsbeginn. Wurde dann der richtige Rostzustand etwas zu früh oder zu spät erreicht, so vergrößert oder verkleinert man die nächste Beschickung nach Befund. Weil der richtige Rostzustand nicht leicht zu einem bestimmten Zeitpunkt zu erreichen ist, so braucht man nicht die Abschlüsse gerade zur vollen Stunde zu machen, sondern kann die Zeit beobachten, wo im allmählichen Niederbrennen des Feuers der Rost am besten dem Anfangszustand zu gleichen scheint. — Da der Dampfdruck und andere Größen leicht kleinen planmäßigen Schwankungen nach Maßgabe der Beschickungs- und Speiseperioden unterliegen, so empfiehlt es sich, alle Ablesungen nicht gerade $\frac{1}{4}$ oder $\frac{1}{2}$ stündlich zu machen. Bei der langen Versuchsdauer genügt Ablesung alle 20 oder 25 min, das erstmal 5 oder 10 min nach Versuchsbeginn. Die Ablesungen sind dann von selbst immer verschieden gegen die Beschickung versetzt.

Je nach der Versuchsdauer gestaltet sich die Frage des *Rostabschlackens* verschieden, sofern es nicht (beim Wanderrost) kontinuierlich erfolgt. Je nach der Kohlenart und der Rostbelastung wird ein Planrost etwa alle 4 bis 8 Stunden abgeschlackt werden müssen; das gibt eine bedeutende Betriebsstörung, zumal bei Einfeuer-Kesseln. Einen 4stündigen Versuch kann man meist ohne Abschlacken durchhalten, einen 8stündigen selten. Ob das Abschlacken zum Versuch gehört oder nicht, hängt von dem Zweck desselben ab. Bei Abnahmeversuchen habe ich dem Kessellieferer das Abschlacken freigestellt, aber (außer bei schlechter Kohle und sehr großer Versuchsdauer) nicht gerade empfohlen, da die damit verbundenen Störungen und Brennstoffverluste

die nachher bessere Verbrennung wettzumachen scheinen. Für wertvolle Versuche sollte man auch das Abschlacken planmäßig gestalten, also z. B.: Versuchsdauer 8 h, Abschlacken 2 h vor Versuchsbeginn sowie nach der 2. und 6. Versuchsstunde.

Die durch den Rost fallende Asche, der *Rostdurchfall*, enthält meist etwas Brennbares (verkokte Kohle), meist aber in so geringer Menge, daß Wiederaufgeben auf den Rost nicht lohnt. Bei Abnahmeversuchen habe ich das Wiederaufgeben dem Kessellieferer gestattet, aber nicht empfohlen, da es mindestens dann schädlich ist, wenn der Durchfall nicht sehr gut verteilt wurde. Es brennen da Löcher in die Brennstoffschicht, wo mehr Durchfall vorhanden war, und das Gesamtergebnis verschlechtert sich eher.

Beim Beginn des Versuches wird der Aschraum gereinigt. Am Schluß des Versuches wird der Rostdurchfall hervorgeholt, gewogen und, auf die Stunde bezogen, absolut und in Prozenten, im Versuchsbericht vermerkt, aber nicht von der verbrauchten Brennstoffmenge abgezogen.

Die *Messung des Speisewassers* gestaltet sich am bequemsten, wenn eine betriebsmäßige Meßeinrichtung dafür vorhanden ist, z. B. ein zuverlässiger Wassermesser oder eine laboratoriumsmäßige Wiegeeinrichtung. Sonst gestaltet sich das Zuwiegen oft schwierig, zumal bei größeren Wassermengen. Grundsätzlich ist immer ein Vorratsbehälter anzuordnen, aus dem die Speisevorrichtung das Wasser entnimmt und in den die zugewogenen Mengen entlassen werden, der also einen Ausgleich bildet für die Zeit, wo der Meßbehälter gefüllt und gewogen oder abgelingen wird.

Das beste ist kontinuierliche *Speisung*, so daß der Wasserstand immer etwa erhalten bleibt, dazu wird der Gang der Speisepumpe nach Bedarf nachgeregelt. Wo die Speisung periodisch erfolgen muß, da sollte sie aber systematisch geschehen und wieder mit einer Periode, die nicht gleich der Ablesungsperiode ist. War z. B. die Beschickungsperiode oben zu 15 min, die Ablesungsperiode zu 25 min vorgeschlagen, so ist die Speiseperiode zu 20 min zu wählen; vermutlich aber werden dann die Schwankungen des Wasserstandes zu groß werden, und dann ist die Speiseperiode besser zu 10 min zu wählen — nur nicht 25 oder $12\frac{1}{2}$ min. Es wird dann alle 10 min die vermutlich erforderliche Menge gespeist, zuerst 5 (oder 8) min vor Beginn der Wassermessung, das zweitemal 5 (bzw. 2) min danach. Um die Wassermessung beginnen zu lassen, wird lediglich der Wasserstand im Kessel und im Vorratsbehälter markiert, ersteres zweckmäßig an beiden Wasserstandsgläsern, für den Fall, daß eines verunglücken sollte, durch Anzeichnen und durch Ausmessen des Abstandes über dem unteren Mutterkopf. Soll eine Zwischen- oder die Endablesung gemacht werden, so wird beim letzten Speisen darauf geachtet, daß der Wasserstand im Kessel über, der im Vorratsbehälter unter der Marke steht. Nach beendeter Speisung wird festgestellt, wann der Wasserstand im Kessel durch die Marke dampft, was wieder etwa 5 (bzw. 8) min nach dem Beginn des letzten Speisens erfolgen sollte, und andererseits wird festgestellt, wieviel Wasser man dem Vorratsbehälter hinzufügen muß, um ihn zur Marke aufzufüllen.

Meist wird das Durchdampfen des Wassers durch die Marke nicht gerade zur vollen Stunde erfolgen; daß die Beobachtungszeiten dadurch unrunde Zahlen werden, schadet nichts; falsch ist es, durch Speisen im letzten Moment den richtigen Wasserstand im Kessel zu bestimmter Zeit erzwingen zu wollen.

Wenn man die Wasserstandsgläser abbläst, so stellt sich der Stand in ihnen erheblich niedriger ein als vorher. Man darf also eine Zeitlang vor den Abschlüssen nicht abblasen. Es wird angegeben¹⁾, man dürfe es eine Stunde lang vorher nicht tun. Es ist schwer glaublich, daß sich die thermischen oder Oberflächeneinflüsse so lange erhalten sollten.

Grundsätzliche Verschiedenheiten ergeben sich je nach der *Art der Speisung*. In Frage kommt die Speisung durch eine Pumpe, die von fremder Energiequelle her angetrieben wird (Riempumpe, elektrische, Dampfpumpe mit Dampfentnahme aus anderem Kessel), die Speisung durch eine Pumpe, die den Dampf dem eigenen Kessel entnimmt, und die Speisung durch Injektor, der den Dampf dann jedenfalls dem eigenen Kessel entnimmt.

Theoretisch ist die Speisung eine Energiezufuhr, die noch über die Brennstoffzuführung hinaus erfolgt, und zwar in Form mechanischer Energie. Das Nähere hierüber findet sich in § 32a u. 76. Die Energiemenge ist aber geringfügig: 1 kg Wasser werde in einen Kessel von 11 at Überdruck gedrückt, so hat die Spisepumpe, je nach der Temperatur, mit der das Wasser in den Kessel gelangt, etwa $0,00102 \text{ m}^3$ gegen $110\,000 \text{ kg/m}^3$ zu drücken; der Arbeitsaufwand ist $0,00102 \times 110\,000 = 112 \text{ mkg} = 112 : 427 = 0,26 \text{ kcal}$. Da aber 1 kg Wasser im Kessel um 700 kcal herum an Wärme aufnimmt und bei 70% Kesselwirkungsgrad also 1000 kcal in Form von Kohle nötig sind, so macht die mechanisch zugeführte Energie nur 0,26% der sonstigen aus. Selbst wenn man berücksichtigt, daß Energie in Form von mechanischer Arbeit etwa zehnmal so wertvoll ist als in Form von Wärme, so bleibt der zusätzliche Betrag doch geringfügig.

Immerhin besteht der Unterschied: beim *Injektorbetrieb* wird die mechanische Energie zum Speisen dem Kessel entnommen und ihm samt der Wärme wieder zugeführt, beim *Pumpenbetrieb* wird dem Kessel nur mechanische Energie zugeführt. Man kann im letzten Fall die Energie selbst dann nicht als dem Kessel entnommen bezeichnen, wenn die Dampfpumpe ihren Dampfbedarf dem Kessel entnimmt, denn der so verwendete Dampf war als Speisewasser gemessen worden und hat verdampft werden müssen, die weitere Verwendung des Dampfes aber ist gleichgültig. Deshalb ist auch eine Messung der für die Pumpe entnommenen Dampfmenge nur nötig, wenn man den zu einer angeschlossenen anderen Dampf(kraft)anlage gehenden Dampf bestimmen will oder wenn die Pumpe gesättigten Dampf entnimmt, während die sonstige Dampfmenge überhitzt wird.

Die Normen von 1899 schreiben vor, die Speisung des untersuchten Kessels solle nicht mittels Injektor erfolgen, und der Dampfverbrauch einer Speisepumpe solle nicht von der Dampferzeugung abgezogen

¹⁾ Moyer, Power Plant Testing, New York 1913, S. 273.

werden. Letztere Bestimmung ist zwar in Widerspruch mit dem Zweck einer Dampferzeugungsanlage, bei der es schließlich doch nur darauf ankommt, was nach außen verfügbar ist; aber immerhin wird sie, um Gleichmäßigkeit zu sichern, praktischen Interessen gerecht, weil nicht immer die Speiseeinrichtung vom Kessellieferer erstellt wird und weil manche Speisepumpe arg Dampf frißt (Duplexpumpen). Die Ausschließung der Injektorspeisung aber beruht wohl nur auf der Annahme, daß die Berücksichtigung des Schlubberwassers unmöglich sei. In Wahrheit ergibt die Injektorspeisung, weil sie die Energie zur Speisung und nur diese dem Kessel entnimmt und ihm alles übrige als Wärme unverkürzt wieder zuführt (abgesehen von den unerheblichen Wärmeverlusten der Leitung), die theoretisch korrektere Form der Speisung. Da sie gegenüber der jetzt vorgeschriebenen nur sehr kleine Differenzen liefert (oben zu 0,026% berechnet), die sich überdies theoretisch einwandfrei berücksichtigen lassen, so kann man auch beide Formen nebeneinander verwenden; selbst wenn der Injektor den Dampf, auch bei Überhitzern, in gesättigtem Zustand entnimmt, so hat das nichts auf sich für die Berechnung des Wirkungsgrades. Nur hat man dafür zu sorgen, daß das Schlubberwasser keine merklichen Beträge annimmt. Man suche kontinuierlich zu speisen, indem man das Speiseventil zur Erhöhung des Gegendruckes drosselt; sonst aber messe man die Menge und Temperatur des Schlubberwassers und rechne oder speise es zurück. Jedenfalls kann, sofern nicht das Bestehen der Normenvorschrift formell hinderlich ist, die Verwendung auch des Injektors gegebenenfalls nicht beanstandet werden. Als Speisewassertemperatur hat natürlich die Ansaugtemperatur des Injektors zu gelten.

Man kann einwenden, durch die Injektorspeisung werde die Wirksamkeit des Kessels geändert, weil der vom Injektor gebrauchte Dampf kondensiert und abermals verdampft werde: „die Verdampfung“ des Kessels sei also größer, als sie durch die Speisung gemessen werde. Der Einwand ist aber nicht stichhaltig. In bezug auf die Wärmemenge ist überhaupt kein Unterschied, weil die Dampfwärme unverkürzt dem Kessel verbleibt. Die Erwärmung des Wassers bis auf die Siedetemperatur geschieht im Kessel sonst durch Vermischung mit dem Wasser des Kesselinhaltes, teils aber auch durch Dampfblasen. Im Injektor erfolgt sie durch Vermischung mit Dampf. Richtig ist, daß der Dampfverbrauch des Injektors mehrfach umgesetzt, dadurch also die Durchtrittsgeschwindigkeit der Dampfblasen durch die Wasseroberfläche vergrößert wird. Da aber die Dampferzeugung, zumal bei starkem Wasserumlauf im Kessel, ohnehin in einem Hin und Her von Verdampfen und Kondensieren besteht, so wird man den Unterschied nicht groß einschätzen; es wird nur ein Teil des Wasserumlaufes außerhalb des Kessels stattfinden. Eine gewisse Unklarheit liegt nur dann vor, wenn der Injektor mit überhitztem Dampf gespeist wird. Sie ist nicht groß, liegt aber überhaupt im Begriff der Verdampfung und Verdampfungszahl bei Erzeugung überhitzten Dampfes.

Nach allem möchten wir die Ansicht vertreten, daß der Unterschied zwischen Injektor- und anderer Speisung weit zurücktritt hinter dem Einfluß verschiedenen Wasserumlaufs im Kessel und vielen anderen

Einflüssen, die sekundär auf die Wärmeübertragung einwirken. Praktisch ist daher die Art der Speisung wohl ohne Einfluß. Versuche über die Frage liegen unseres Wissens nicht vor, haben auch keine Aussicht auf greifbaren Erfolg.

In den *amerikanischen Regeln* 1912 ist die Injektorspeisung ausdrücklich zugelassen.

Ähnlich kann man über die Übung urteilen, bei Sattedampfkesseln ängstlich darauf zu sehen, daß nicht in den Leitungen abgeschiedene Feuchtigkeit in den Kessel zurücklaufe. *Mitgerissene Feuchtigkeit* als Teil des erzeugten Dampfes zu betrachten, so daß die Verdampfungszahl größer erscheint, liegt sachlich gar kein Zwang vor. Meist sind Abscheidvorrichtungen im Innern des Kessels vorhanden; die dort abgeschiedene Feuchtigkeit geht ohne weiteres in den Kessel zurück.

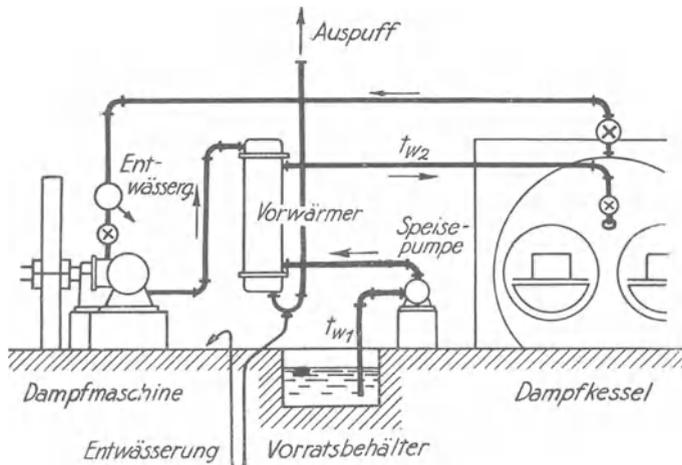


Fig. 16. Dampfkraftanlage mit Vorwärmung des Speisewassers.

Warum soll man nicht das zurücklaufen lassen, was sich unmittelbar über dem Kessel in einem Abscheider anfindet, den der Kessellieferer mit angebaut hat, um die Qualität des Dampfes zu verbessern? In der (scheinbaren!) Verdampfungszahl schneidet der Lieferer dann allerdings schlechter ab. Es ist zu empfehlen, die Dampfqualität und -quantität da zu messen, wo der Dampf die einheitlich gelieferte und zu untersuchende Apparatur verläßt. Bei den Kesseln von Niederdruckdampfheizungen z. B. pflegt eine Wasserabscheidung äußerlich, aber in enger Verbindung mit dem Kessel angebracht zu sein: man sollte hinter ihr messen.

Wo eine *Speisewasservorwärmung* vorhanden ist, kann man zweifeln, ob als Speisewassertemperatur diejenige vor oder diejenige hinter dem Vorwärmer anzusehen sei. Der Wirkungsgrad des Kessels erscheint günstiger, wenn man den Vorwärmer als Teil der Kesselanlage betrachtet und also die von ihm hergegebene Wärme dem Kessel zugut rechnet, die Temperatur des frischen Wassers als Speisewassertemperatur an

sehend. Wenn die in Fig. 16 angedeutete Anlage von einem Lieferer gleichzeitig übernommen ist, so wird man wohl die Temperatur t_{w_1} in Ansatz zu bringen haben, bei einer reinen Kessellieferung aber zweifellos t_{w_2} . Zur Sicherheit messe man beide (t_{w_2} evtl. durch Anbinden eines Thermometers an das Rohr). Es kann aber hier wie oft nicht eindringlich genug darauf hingewiesen werden, wie wichtig die genaue Fassung der Gewährleistung im Kaufvertrage ist, damit Zweifel dieser Art nicht bleiben. Wo ein Rauchgasvorwärmer vorhanden ist, bestehen ähnliche Zweifel. In allen solchen Zweifelsfällen wird man gut tun, vor Versuchsbeginn eine authentische Auslegung der Vereinbarungen herbeizuführen oder aber alle überhaupt in Frage kommenden Messungen zu machen, diesmal also die Temperaturmessung vor und hinter dem Vorwärmer, um für jede Interpretation die Zahlengrundlagen zu haben.

Über die anderen Messungen ist wenig zu sagen. Die *Manometerablesung* ist in absoluten Druck umzurechnen, dazu muß der Barometerstand beobachtet werden (735 mm QS = 1 at) (vgl. auch Techn. Mess. § 24). Man sollte den Druck auch hinter dem Überhitzer feststellen; unseres Wissens unterbleibt das meist, aber der Dampfzustand beim Verlassen des ganzen Kessels ist maßgebend. An der Ablesung der *Überhitzungstemperatur* ist die Fadenkorrektion anzubringen (Techn. Mess. § 98), wenn nicht das Instrument mit austauchendem Faden geeicht war oder wenn man nicht elektrisch mißt. Diese beiden Messungen werden periodisch in gleichen Zeitabständen gemacht. Für ausgedehntere Versuche (Wärmebilanz, § 31 u. 32a) schließen sich noch einige weitere Messungen insbesondere der Rauchgaszusammensetzung an.

Die Messung der *Speisewassertemperatur* erfolgt bei jeder Speisung. Den Mittelwert sollte man dann nicht einfach aus den Ablesungen bilden, sondern dabei die jeweilig gespeiste Menge beachten; doch ist das umständlich und oft unerheblich. Kann man an ungünstigem Ort das Thermometer nicht ablesen, trotz elektrischer Taschenlampe, die heute vieles erleichtert, so darf man es nicht einfach herausnehmen; man umwickelt es mit einem Bausch Putzwolle, um die Temperatur zu halten, oder man entnimmt eine Wasserprobe in einem Topf und mißt die Temperatur der Probe. Putzwolle oder Topf muß aber lange genug im Wasser gewesen sein, um selbst die Temperatur angenommen zu haben. —

Die *gesamten Maßnahmen beim Versuch* sind also folgende: 2 Stunden vor Versuchsbeginn wird (der Planrost) abgeschlackt und der Kessel auf Belastung gebracht. 10 Minuten vor Versuchsbeginn wird planmäßig gefeuert, 5 Minuten vor Versuchsbeginn planmäßig gespeist. Der Versuchsbeginn wird zweckmäßig für Wasser und Kohle um 1 oder 2 Minuten gegeneinander versetzt, damit man in Ruhe den Rostzustand betrachten und die Wasserstände kennzeichnen kann. Auch hat man noch den Dampfdruck und evt. die Maschinenbelastung bei Beginn festzustellen, letzteres, weil davon die Kesselbelastung abhängt. Nun wird, vom Versuchsbeginn an gerechnet, nach 10, 30, 50 . . . Minuten abgelesen, nach 5, 15, 25 . . . Minuten gespeist, nach 5, 20, 35 . . . Minuten gefeuert, überdies aber wird nachgesehen, ob

nach 10, 20, 30 Minuten gerade das Durchdampfen des Wasserstandes durch die Marke erfolgt, und ob nach 15, 30, 45 . . . Minuten das Feuer etwa so wie anfangs ist; sonst werden die nächstes Mal zu gebenden Mengen Wasser und Kohle entsprechend etwas geändert. Am Ende der ersten, vielleicht auch erst der zweiten Stunde wird ein Zwischenabschluß gemacht; besonders sorgsam wird die vorhergehende Kohlen- und Wassermenge dosiert, der Rauchschieber bedient und die Maschinenbelastung nachgeregelt, so daß man tunlichst zur vollen Stunde auf den richtigen Zustand kommt; dieser wird für Wasserinhalt und Rostbeschickung getrennt festgestellt, da selten beide Zustände gleichzeitig und gerade am Schluß der Stunde erreicht sein werden. Die Zeit des Kohlen- und des Wasserabschlusses wird je für sich notiert, auch das Zutreffen des Dampfdruckes und der Belastung konstatiert. Im übrigen beeinflußt der Zwischenabschluß den Fortgang des Versuches gar nicht. Nach 2 und nach 6 Stunden wird abgeschlackt, 2 Feuer in einigem Abstand hintereinander, auch unter Fortsetzung aller Ablesungen. Nach 8 Stunden erfolgt der endgültige Abschluß, genau wie die Zwischenabschlüsse. Sollte der endgültige Abschluß mißlingen, so setzt man den Versuch kurze Zeit, d. h. für eine Periode, fort und macht dann einen anderen Abschluß: Versuchsdauer $8\frac{1}{4}$ h statt 8 h. Mißlungene Zwischenabschlüsse fallen aus.

31. Wärmeverhältnisse eines Dampfkessels; Wärmebilanz. Bei den in § 27 und Tabelle 5 gegebenen Zahlen eines Verdampfungsversuches hatte man sich auf das beschränkt, was zur Feststellung der Wirtschaftlichkeit und zur Nachprüfung der gegebenen Garantien unmittelbar nötig ist. Fast immer geht man bei Versuchen etwas weiter, indem man wenigstens einige Rauchgasanalysen entnimmt, um die Güte der Feuerführung beurteilen zu können.

Weitergehend nimmt man aber auch oft die Ablesungen in dem Umfange vor, daß man einen Überblick über den gesamten Energieverbleib erhält. Als Ergebnis eines solchen vollständigen Versuches erhält man die Wärmebilanz des Kesselbetriebes, bei der die herein- und herausgehenden Wärmemengen einander gegenübergestellt werden; beide Seiten sollten dann — nach dem Energiegesetz — gleiche Summe liefern, sofern alle Aufwendungen einerseits, alle nutzbar werdenden oder verlorengehenden Wärmemengen andererseits aufgeführt werden.

In Tabelle 7 sind die *feuertechnischen Ablesungen einer Kesseluntersuchung* in üblichem Umfang mit 4stündiger Versuchsdauer wiedergegeben. Für Wasser und Kohle sind nur die Stundenwerte nach Tabelle 5 wiederholt. Zur Beurteilung der Dampferzeugung dienen Speisewassertemperatur, Druck und Temperatur des Dampfes. Zur Beurteilung der Feuerung sind die Temperaturen der Rauchgase, ihre Zusammensetzung sowie noch die Zugstärke je an zwei Stellen der Züge gemessen, einmal nahe der Feuerung, nämlich am hinteren Ende der Flammrohre, das zweitemal am Fuchs, unmittelbar vor dem Rauchschieber.

Die Mittelwerte der Einzelablesungen sind in der letzten Spalte berechnet. Aus ihnen läßt sich folgendes ableiten.

Tabelle 7. Feuertechnische Ablösungen bei einer Kesseluntersuchung

Versuchstag: 8. März 1912. (Versuch J.)

Temperatur im Kesselhaus: vorn 20°, hinten 30° C. Barometerstand 750 mm Q.S. Rostgröße $2 \times 0,95 = 1,90$ m². Höhe des Schornsteins 50,0 m über Rostoberkante. Brennstoff: Oberschlesische Steinkohle Grube König, von 7040 kcal/kg Heizwert.

	3-15	289	4-15	278	5-15	269	6-15	233	7-15	4 h
1	Abschlußzeiten									
2	Verfeuerte Kohlenmenge									
3	Zeit des Durchdampfens									
4	Gespeiste Wassermenge									
5	dgl. auf die Stunde bezogen									
6	Speisewassertemperatur									
7	Zeit der Ablesung									
8	Dampfdruck									
9	Dampftemperatur									
10	Temperatur der Rauchgase									
11	am Ende des Flammrohres rechts									
12	" " " " links									
13	Schieberstellung, geöffnet									
14	Zugstärke									
15	am Ende der Flammrohre									
15	am Fuchs, Kesselseite des Schiebers									
16	Zusammensetzung der Rauchgase. Ent-									
17	nahmezeit									
17	am Ende der Flammrohre									
18	Gehalt an CO ₂									
18	" " " " O ₂									
19	" " " " CO									
19	" " " " N ₂									
20	am Fuchs									
21	Gehalt an CO ₂									
22	" " " " O ₂									
23	" " " " CO									
24	" " " " N ₂									

4,04 h
7393 kg
1831 kg/h
37,7° C

7-16-50
1860
1835
37,5

6-16-0
1870
1825
34,5

5-14-30
1841
1826
37,5

4-14-0
1822
1838
41,5

3-14-30
1822
1838
41,5

3-5
11,5
300

3-25
3,50
304

4-5
4,15
303

4-10
11,6
320

5-5
5,5
297

5-30
10,8
313

6-20
11,5
329

6-45
11,8
321

7-10
11,6
323

7-10
11,6
323

685° C
685° C
347° C
26,4 cm

11,49 at
313° C

685° C
685° C
347° C
26,4 cm

9,6 mm WS
15,5 " "

6-45—7-5
6-0—6-30
5-0—5-30
3-55—4-20
2-50—3-10

15,4
4,0
0
81,1

14,3
4,1
0,4
81,2

10,5
9,2
0,1
80,2

10,5
10,4
0
80,3

7,8
11,7
0,2
80,3

9,7
10,6
0,1
79,6

6-45—7-5
15,4
4,0
0
81,1

14,3
4,1
0,4
81,2

10,5
9,2
0,1
80,2

10,5
10,4
0
80,3

7,8
11,7
0,2
80,3

9,7
10,6
0,1
79,6

Luftüberschußzahl $\lambda = 1,22$

Luftüberschußzahl $\lambda = 1,90$

150 20/
3,96/
0,10/
80,92/
9,54/
10,18/
0,20/
80,08/
Luftüberschußzahl $\lambda = 1,22$

Die *in den Kessel eingeführten Energiemengen* sind: die chemische Energie der verfeuerten Kohle und der Arbeitsaufwand zum Hineindrücken des Speisewassers in den Kessel.

Erstere folgte schon in § 24 aus der Kohlenmenge K kg/h und deren unterem Heizwert ξ_u kcal/kg;

in der Kohle stecken $K \cdot \xi_u$ kcal/h.

Zum Speisen von V m³ Flüssigkeit gegen einen Gegendruck von p at (Überdruck, nämlich beim Speisen zu überwindender Druckunterschied) oder von $10\,000$ p kg/m² sind aufzuwenden $V \cdot 10\,000$ $p \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$
 $= 10\,000$ $V \cdot p$ mkg/h,

die Speisearbeit ist gleichwertig $\frac{10\,000 \cdot V \cdot p}{427}$ kcal/h.

Diesen beiden stehen als *den Kessel verlassende Wärmemengen* gegenüber einerseits die nutzbar in den Dampf übergeführte Wärme, andererseits die Verluste, nämlich diejenige Wärme, die die warm abgehenden Rauchgase in den Schornstein entführen, und der Verlust durch unvollkommene Verbrennung, insbesondere durch Bildung von CO, jedoch auch durch Rauchbildung und durch Heizwert des Rostdurchfalls.

Die in den Dampf übergeführte Wärme wurde schon in § 24 gefunden als Produkt aus dem verdampften Wassergewicht D kg/h und dem Wärmemehrinhalt von 1 kg Dampf gegen 1 kg Speisewasser, deren beide Wärmeinhalte i_d und i_w kcal genannt wurden;

in den Dampf sind übergeführt $D \cdot (i_d - i_w)$ kcal/h.

Die von den Rauchgasen in den Schornstein entführte Wärmemenge läßt sich angeben, wenn man die Menge der Rauchgase R m³ $\left(\frac{0}{760}\right)/\text{h}$, ihre spezifische Wärme c_p kcal/° C · m³ $\left(\frac{0}{760}\right)$ (natürlich diejenige für konstanten Druck, da nur atmosphärischer Druck in Frage kommt und die Unterdrucke in den Zügen im Vergleich zu ihm verschwindend klein sind) und ihre Temperatur t_f im Fuchs kennt. Ihr Wärmeinhalt beim Abgang in den Schornstein ist dann $R \cdot c_p \cdot t_f$ kcal/h. Die von den Rauchgasen entführte Wärme ist der Mehrbetrag dieser Wärmemenge gegenüber dem Wärmeinhalt der zum Verbrennen zugeführten Luft. Deren Menge sei L m³ $\left(\frac{0}{760}\right)/\text{h}$ und ihre spezifische Wärme bei niedrigen Temperaturen $0,311$ kcal/° C · m³ $\left(\frac{0}{760}\right)$, die Temperatur im Kesselhause vor den Kesseln, wo die Luft entnommen wird, sei t' . Die zugeführte Luft enthält dann $0,311 \cdot L \cdot t'$ kcal/h. Damit wird der Wärmeverlust durch spezifische Wärme der Abgase

$$R \cdot c_p \cdot t_f - 0,311 \cdot L \cdot t' \text{ kcal/h.}$$

Von den übrigen Verlusten kann noch bequem nachgewiesen werden derjenige, der aus unvollkommener Verbrennung des Kohlenstoffes zu CO statt zu CO₂ entspringt. Der Heizwert von 1 m³ $\left(\frac{0}{760}\right)$ CO ist 3040 kcal.

Gehen stündlich $C_0 \text{ m}^3 \left(\frac{0}{760}\right)$ Kohlenoxyd durch die Esse, so ist der Wärmeverlust durch Bildung von Kohlenoxyd $3040 C_0 \text{ kcal/h}$.

Werden die aufgeführten Posten einander gegenübergestellt, so pflegt ein Fehlbetrag auf seiten der vom Kessel fortgehenden Wärmemengen bestehen zu bleiben. Da ein immer in einem Sinne vorhandener Fehlbetrag nicht in Meßfehlern begründet sein kann, so entspricht er den Wärmeverlusten durch Strahlung und Leitung.

32. Berechnung der Rauchgasmenge aus der Brennstoffanalyse. Im Beispiel § 32a wird als bekannt angenommen werden der Luftbedarf und die Rauchgasmenge der Kohle. In manchen Fällen wird man diese Werte einfach als übliche Mittelwerte annehmen. In wichtigeren wird man aber neben der Heizwertbestimmung auch eine Analyse der Kohle vornehmen lassen und danach die Zusammensetzung der Rauchgase nach der wirklichen Kohle berechnen. Für die bei den Versuchen des § 27 (und 34) verwendete Kohle wurde die Analyse ausgeführt, sie und die anschließende *genaue Rechnung* ergibt das folgende.

Als in der Steinkohle enthalten wurden vom Chemiker ermittelt

Kohlenstoff C (Mittel aus 2 Bestimmungen).	78,00%
Wasserstoff H ² (ebenso)	5,44%
Asche A (ebenso)	2,68%
Stickstoff N ² (einfach bestimmt)	0,91%
Nachgewiesen	<u>87,03%</u>

Man kann für schlesische Steinkohle annehmen (Hütte I, 477)

Schwefel S	∞ 1,00%
Dann bleibt für Sauerstoff O ₂ , einschl. dem im hygroskopischen Wasser enthaltenen	<u>11,97%</u>
	100,00%

Von dem O₂ wird verbraucht für Verbrennung von 1% S zu SO₂: 1,00% (Atomgewichte O = 16, S = 32). Die restlichen 10,97% entsprechen $10,97 : 8 = 1,37\%$ H₂. Von dem H₂ sind also als gebunden (z. T. als hygroskopisches Wasser, z. T. in anderen Verbindungen) zu bezeichnen 1,37%, die restlichen $5,44 - 1,37 = 4,07\%$ sind freier Wasserstoff.

Bei der Verbrennung entstehen folgende Produkte, bezogen auf 1 kg Brennstoff

0,7800 kg C	verbrennt mit	$0,7800 \cdot \frac{3 \cdot 2}{1 \cdot 2} = 2,080$	kg O ₂ zu	2,860 kg CO ₂
0,0407 kg freier H ₂	„	$0,0407 \cdot \frac{1 \cdot 6}{2} = 0,3256$	kg O ₂ zu	0,3663 kg H ₂ O
		Sauerstoffbedarf	<u>2,406</u>	kg O ₂
0,0137 kg gebund. H ₂	ergeben mit	0,1097 kg O ₂ -Gehalt der Kohle	0,1234 kg H ₂ O	
			zusammen	0,4897 kg H ₂ O
0,0100 kg S	„	$0,0100$ kg O ₂ -Gehalt der Kohle	0,0200 kg SO ₂	
		<u>0,1197</u> kg O ₂ -Gehalt der Kohle		

Der geringste Luftbedarf von 1 kg Kohle ist nun $L_1 = 2,406 \cdot \frac{100}{2,31}$

= 10,41 kg oder $10,41 : 1,293 = 8,05 \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right)$. Ergibt die Analyse einen Luftüberschuß l , so ist die zur Verbrennung von B kg/h Brennstoff zugeführte Luftmenge

$$L = B \cdot L_1 \cdot l = 8,05 \cdot B \cdot l \frac{\text{m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right)}{\text{h}} \dots \dots \dots (10)$$

Die Zusammensetzung der aus 1 kg Kohle mindestens (d. h. für $l = 1$) entstehenden Rauchgase ist:

$$\text{CO}_2: 2,86 \text{ kg} = 2,86 : 1,98 = 1,44 \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right) = 18,3\%$$

$$\text{SO}_2: 0,02 \text{ ,,} = 0,02 : 2,93 = 0,01 \text{ ,,} = 0,1\%$$

Zu 2,406 kg O₂ wegen

Zusammensetzung der

Luft, $\frac{2,406 \cdot 0,769}{0,231}$ kg N₂: 8,01 kg

aus der Kohle $\frac{\text{N}_2: 0,009 \text{ ,,}}{\text{Zusammen } \underline{\text{N}_2: 8,02 \text{ kg}}}$

$$= 8,02 : 1,25 = 6,41 \text{ m}^3 = 81,6\%$$

Insges. an trock. Rauchgasen: 10,90 kg

$$\frac{7,86 \text{ m}^3}{=} = 100 \%$$

Hinzu kommt H₂O: 0,49 ,, = 0,49 : 0,804 = 0,61 ,, = 7,8%

$$\frac{0,61 \text{ ,,}}{=} = 7,8\%$$

Insgesamt an Rauchgas: 11,39 kg

$$\frac{8,47 \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right)}{=} = 107,8\%$$

Es ist bekannt (Techn. Mess. § 118), daß die Rauchgasanalyse im Orsat-Apparat nur die trockenen gedachten Rauchgase erfaßt; deshalb sind die (Volumen-)Prozente von diesen angegeben worden.

Zu der Mindestmenge von Rauchgas tritt in jedem Fall die überschüssige Luftmenge hinzu. Aber eine wie große indifferent durchgehende überschüssige Luftmenge hinzutreten möge, stets bleibt der Unterschied zwischen der Luft- und Rauchgasmenge der gleiche, nämlich für unsere Kohle $8,05 - 7,86 = 0,19 \text{ m}^3$ Minderbetrag, wenn mit der trockenen, oder $8,47 - 8,05 = 0,42 \text{ m}^3$ Mehrbetrag, wenn mit der gesamten Rauchgasmenge gerechnet wird. Es ist also für 1 kg Kohle

das Volumen der trockenen gedachten Rauchgase

$$R_t = 8,05 \cdot l - 0,19 \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right) \dots \dots \dots (11a)$$

das Volumen der wirklichen Rauchgase

$$R_f = 8,05 \cdot l + 0,42 \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right) \dots \dots \dots (11b)$$

In diesen Darlegungen war immer an vollkommene Verbrennung gedacht; Bildung von CO sollte ausgeschlossen sein. Ist aber doch CO vorhanden (*unvollkommene Verbrennung*), so ändert sich folgendes: Nach bekannter Regel (Techn. Mess. § 118) bildet sich dann dasselbe Volumen CO₂ + CO, wie sich bei vollkommener Verbrennung CO₂ gebildet hätte, in unserem Fall $1,44 \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right)$. Jedoch bleibt noch so viel Sauerstoff frei und tritt zu dem Rauchgasvolumen hinzu, wie dem Unterschied an Sauerstoff in CO₂ und CO entspricht. Wenn wir wieder mit C₀ das stündliche Volumen an CO bezeichnen, so ist bekanntlich das übrigbleibende Sauerstoffvolumen (nach der Regel von Avogadro)

$= \frac{C_o}{2}$. Ist nun $c = \frac{100 \cdot C_o}{R_t}$ der prozentische Gehalt an Kohlenoxyd, so ist also $C_o = \frac{c \cdot R_t}{100}$, und der unverbrauchte, zum Rauchgasvolumen hinzutretende Sauerstoff hat das Volumen $c \cdot R_t$. Um diese Sauerstoffmenge vermehrt sich das Rauchgasvolumen. Also gilt die Beziehung (für trockene Rauchgase)

$$R_t = 8,05 \cdot l - 0,19 + \frac{c \cdot R_t}{200}$$

$$R_t = \frac{200}{200 - c} \cdot (8,05 \cdot l - 0,19) \dots \dots \dots (12a)$$

entsprechend für die gesamten (feuchten) Rauchgase

$$R_f = \frac{200}{200 - c} \cdot (8,05 \cdot l - 0,19) + 0,61 \dots (12b)$$

Von der so berechneten trockenen Rauchgasmenge sind die Prozen- te zu nehmen, die die Analyse der Rauchgase angibt, um die ge- samte Menge der einzelnen Bestandteile zu finden. —

Die Rechnung bleibt trotz ihrer Umständlichkeit etwas unsicher, weil man bei der Rauchgasanalyse CO₂ und SO₂ nicht wohl voneinander trennen kann (beide werden von KOH absorbiert) und weil die Verrech- nung des Stickstoffgehaltes der Kohle zweifelhaft ist; denn sicher wird nicht aller, vielleicht gar kein Stickstoffgehalt als solcher frei, ein wesentlicher Teil wird jedenfalls in Gestalt von Ammoniak- und Zyan- verbindungen abgehen. Auch ist die Feuchtigkeit der aus dem Kessel- haus angesaugten Luft unbeachtet gelassen, da sie im wesentlichen indifferent durch den Prozeß hindurchgeht. In Anbetracht dieser Un- sicherheiten kann man ruhig die Rechnung vereinfachen, indem man von dem Vorhandensein von S und N in der Kohle ganz absieht. Dann ergibt sich eine *einfachere Rechnungsweise*, bei der man nur folgende einfacheren Analysenergebnisse zugrunde legt, die sich leicht im An- schluß an die einfache Heizwertbestimmung in der Kröcker-Bombe finden läßt (Techn. Mess. § 111):

Kohlenstoffgehalt des Brennstoffes 78,00%
 Feuchtigkeit aus 1 kg Brennstoff 0,489 kg = 48,9%
 Davon schon im Brennstoff als H₂O enthalten 11,44% = 0,1144 kg.

1 kg Kohlenstoff ergibt nun bei der Verbrennung

zu CO₂ ein Volumen von $\frac{32 + 12}{12} \cdot \frac{1}{1,98} = 1,86 \text{ m}^3 \left(\frac{0}{760}\right)$

„ CO „ „ „ $\frac{16 + 12}{12} \cdot \frac{1}{1,25} = 1,86 \text{ m}^3 \left(\frac{0}{760}\right)$

in beiden Fällen also dasselbe Volumen. Also wird auch dasselbe Vo- lumen entstehen, wenn sich bei teilweise unvollkommener Verbrennung ein Gemisch beider Verbrennungspunkte bildet. Aus 1 kg der ver- wendeten Kohle entstehen $0,7800 \cdot 1,86 = 1,45 \text{ m}^3 \left(\frac{0}{760}\right)$ [CO₂ + CO].

Ist k der prozentische Gehalt der Gase an CO_2 und c jener an CO , so ist

$$\frac{(c+k) \cdot R_t}{100} = 0,78 \cdot 1,86 \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right) = 1,45 \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right)$$

$$R_t = \frac{78,00 \cdot 1,86}{c+k} = \frac{145}{c+k} \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right) \dots \dots \dots (13a)$$

Da sich c und k auf das trocken gedachte Rauchgas beziehen, so gilt Formel (13a) für dieses. Das feuchte aber wäre um $0,489 : 0,806 = 0,61 \text{ m}^3$ größer, also

$$R_f = \frac{145}{c+k} + 0,61 \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right) \dots \dots \dots (13b)$$

Da sich zwei Raumteile H_2 mit einem Raumteil O_2 zu zwei Raumteilen dampfförmigen H_2O verbinden (Regel von Avogadro), so ist also bei der Verbrennung ein Volumen gleich $\frac{1}{2}$ des neu gebildeten Wasserdampfes verschwunden. In unserem Fall ist neu gebildet $0,489 - 0,114 = 0,375 \text{ kg}$ Wasser $= 0,375 : 0,806 = 0,46 \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right)$. Die zur Verbrennung zugeführte Luftmenge war

$$L = R_t + 0,23 \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right) / \text{kg Kohle} \dots \dots (14)$$

weicht also (bei Steinkohle, nicht so bei wasserstoffreichen Stoffen) kaum vom trockenen Rauchgasvolumen ab und kann im Notfall mit ihm verwechselt werden.

Übrigens findet man immer die für die Verbrennung notwendige Luftmenge, wenn l die Luftüberschuszahl ist

$$L_1 = \frac{L}{l} \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right) / \text{kg Kohle} \dots \dots (15)$$

Die genaue und die einfachere Rechnungsweise ergeben mäßige Unterschiede. So wird in Tabelle 7 am Fuchs das trockene Rauchgasvolumen aus 1 kg Kohle

$$\text{nach Formel (12a): } R_t = \frac{200}{200 - 0,2} \cdot (8,05 \cdot 1,90 - 0,19) = 15,13 \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right),$$

$$\text{nach Formel (13a): } R_t = \frac{145}{9,74} = 14,90 \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right).$$

Der Unterschied von 1% hält sich innerhalb der Genauigkeitsgrenze aller dieser Rechnungen. Wir bedienen uns der einfacheren Formel (13a) und leiteten die andere ab, um die Zusammenhänge zu geben.

32a. Zahlenbeispiel einer Wärmebilanz. Für den Versuch J vom 8. März 1912, der schon in § 27 als Beispiel diente und für den in Tabelle 31 weitere Zahlen gegeben wurden, möge nun die gesamte, in § 31 schematisch gegebene Rechnung zahlenmäßig durchgeführt werden. Die bei dem Versuch verwendete Kohle war analysiert worden, die Ergebnisse wurden in § 32 bereits verwendet.

Mit dem Heizwert $\xi_u = 7040 \text{ kcal/kg}$ wird die in den Kessel in Form von verfeuerter Kohle eingeführte Energie $7040 \cdot 267 = 1\,880\,000 \text{ kcal/h}$.

Die Energie der Kesselspeisung verschwindet dagegen. Sie sei der Ordnung halber genau berechnet. Wasser von $37,7^\circ$ hat das spezifische Gewicht 993 kg/m^3 . 1831 kg/h gespeistes Wasser sind also $1831 : 993 = 1,843 \text{ m}^3/\text{h}$. Gespeist wird gegen den Druck $11,49 \text{ at} = 114\,900 \text{ kg/m}^2$. Die Leistung der Speisung ist $1,843 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 114\,900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 212\,000 \frac{\text{mkg}}{\text{h}} = 212\,000 : 427 = 496 \text{ kcal/h}$. Dieser theoretische Aufwand zur Wasserspeisung ist von der besonderen Form und vom Wirkungsgrad der Speisevorrichtung unabhängig und daher dem Kessel als aufgewendet zur Last zu schreiben — theoretisch unbedingt, wenn man auch praktisch von dem kleinen Posten leicht absehen kann.

Die genannten, in den Kessel hineingegebenen Posten treten in folgender Größe wieder zutage.

Mit der Dampftemperatur $t_d = 313^\circ$ und dem absoluten Dampfdruck $p_1 = 12,5 \text{ at}$ wurde (§ 26) der Wärmeinhalt von 1 kg Dampf $i_d = 594,7 + 149,2 - 7,2 = 736,7 \text{ kcal/kg}$. Der Speisewassertemperatur $37,7^\circ \text{ C}$ entspricht ein Wärmeinhalt $i_w = 37,7 \text{ kcal/kg}$. Also sind $736,7 - 37,7 = 699,0 \text{ kcal/kg}$ dem Dampf an Wärmeinhalt zugeführt. Die in 1831 kg/h abgehendem Dampf steckende Wärme war (§ 27) $1831 \cdot 699,0 = 1\,280\,000 \text{ kcal/h}$.

Die mit den Rauchgasen abgehende Wärme errechnet sich wie folgt. Nach den Ergebnissen der Analyse enthalten die Rauchgase am Fuchs $9,54\% \text{ CO}_2$ und $0,20\% \text{ CO}$, zusammen $9,74\%$. Nach den Darlegungen des vorigen Paragraphen ist die trocken gedachte Rauchgasmenge

$\frac{145}{9,74} = 14,9 \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right)$ für 1 kg Kohle. Die aus 267 kg Kohle entwickelte

Rauchgasmenge ist $267 \cdot 14,9 = 3980 \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right)$. Am Flammrohr er-

rechnet sich in gleicher Weise die Gasmenge zu $267 \cdot \frac{145}{15,12} = 267 \cdot 9,59 = 2560 \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right)$. Es sind also zwischen den beiden Rauchgasentnahmestellen $3980 - 2560 = 1420 \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right)$ infolge des in den Zügen herrschenden Unterdruckes durch die Undichtheiten des Mauerwerkes eingesaugt worden. — Die spezifische Wärme errechnen wir aus der Rauchgasanalyse unter Benutzung der Mischungsregel. Die verwendeten Werte der spezifischen Wärmen sind (nach Hütte, 22. Aufl., I, S. 400) in Fig. 17 dargestellt. Bei $t_f = 347^\circ$ Fuchstemperatur wird

$$c_p = \frac{9,54 \cdot 0,443 + 90,46 \cdot 0,312}{100} = 0,324 \text{ kcal/}^\circ \text{ C} \cdot \text{m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right)$$
. Im Zähler

erfaßt das erste Produkt den CO_2 -Gehalt der Rauchgase, das zweite faßt die zweiatomigen Gase O_2 , CO , N_2 zusammen, deren spezifische Wärme, auf das Volumen bezogen, die gleiche ist. — Nun wird der Wärmeinhalt der trockenen Rauchgase im Fuchs $3980 \cdot 0,324 \cdot 347 = 447\,000 \text{ kcal}$.

267 kg verwendete Kohle entwickeln (§ 32) $267 \cdot 0,489 = 131 \text{ kg} = 131 : 0,804 = 163 \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right)$ Feuchtigkeit. Die spezifische Wärme ist (Fig. 17) $c_p = 0,366 \text{ kcal/}^\circ \text{ C} \cdot \text{m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right)$ bis $t_f = 347^\circ$. Die Feuchtigkeit

hat wegen ihrer spezifischen Wärme einen Wärmehalt $163 \cdot 0,366 \cdot 347 = 20\,700$ kcal. Es empfiehlt sich, trockenes Gas und Feuchtigkeit je für sich zu rechnen, statt etwa mit der Mischungsregel die spezifische Wärme der feuchten Gase zu suchen. Denn die Feuchtigkeitsmenge ist stets, z. B. am Flammrohr und Fuchs, die gleiche, die Gasmenge aber wechselt mit dem Luftüberschuß.

Die bei der Verbrennung durch Wasserbildung verschwundene Sauerstoffmenge ist $0,3256 \text{ kg} = 0,3256 : 1,43 = 0,23 \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix}\right)$; in § 32 wurde hierfür auf anderem Wege $0,19 \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix}\right)$ errechnet; um so viel ist die aufgenommene Luftmenge größer als die trockene Rauchgasmenge. Die aufgenommene Luftmenge also ist am Fuchs $14,90 + 0,23 = 15,1 \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix}\right)$ für 1 kg Kohle, im ganzen $15,1 \cdot 267 = 4040 \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix}\right)$. Die Be-

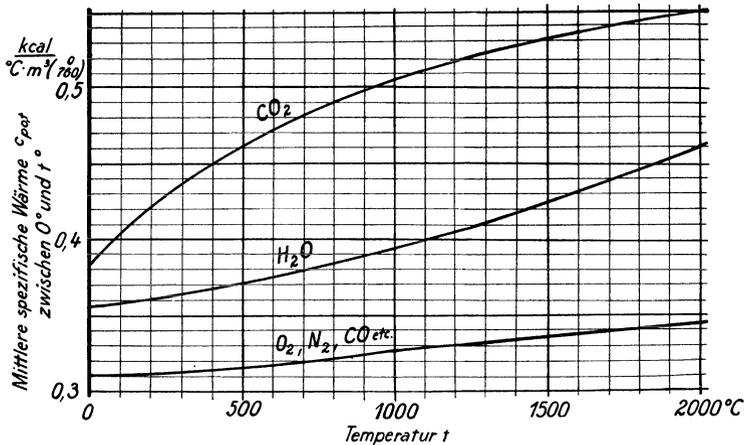


Fig. 17. Mittlere spezifische Wärme der Bestandteile von Verbrennungsgasen, nach Holborn und Henning, Pier, Bjerrum.

standteile der Luft haben in der Gegend von 0° bis 20° die spezifische Wärme $0,31 \text{ kcal}/^\circ \text{C} \cdot \text{m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix}\right)$. Die Luft wird mit 20° zugeführt, sie bringt einen Wärmehalt $4040 \cdot 0,31 \cdot 20 = 25\,000$ kcal mit. Diese Wärmemenge umfaßt ebenso die primär und sekundär in die Feuerung eingesaugte Luftmenge (am Ende des Flammrohres vorhanden 2560 m^3), wie auch die 1420 m^3 falsche Luft. In der Tat sind beide auf Fuchstemperatur erwärmt worden.

Die in den Schornstein gehenden Gase enthalten also $447\,000 + 20\,700 - 25\,000 = 443\,000$ kcal mehr Wärme als die zugeführte Luft und entführen diese Wärmemenge in den Schornstein.

Die Rauchgase am Fuchs enthalten $0,2\%$ CO, das sind $0,002 \cdot 3980 = 8,0 \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix}\right)$ Kohlenoxyd. Bei einem Heizwerte des Kohlenoxydes von $3040 \text{ kcal}/\text{m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix}\right)$ ist hierdurch ein Wärmeverlust belegt von $3040 \cdot 8,0 = 24\,000$ kcal.

Wir stellen in einer *Wärmebilanz* die Ergebnisse der Rechnung zu-

sammen, indem wir das nicht Nachgewiesene als durch Leitung und Strahlung verloren ansehen. Alle Zahlenwerte beziehen wir zugleich prozentisch auf die in Gestalt von Kohlen aufgewendete Wärme.

Wärmebilanz für 1 Stunde.

Versuch vom 8. März 1912.

Hinein:

Im Brennstoff stecken 1880 000 kcal \approx 100%
 Leistung für Speisung 500 „ \approx 0%

Heraus:

Im Dampf nutzbar 1280 000 kcal = 68,1%
 In den Rauchgasen
 bleiben:
 durch spezif. Wärme 443 000 „ = 23,6%
 Heizwert von CO . 24 000 „ = 1,3%
 Rest: Strahlung, Lei-
 tung, Meßfehler . . 135 500 „ = 7,0%

 1880 500 kcal = 100,0%

33. Allgemeine Beobachtungen während des Versuches. Die in Tabelle 7, § 31 gegebenen Ablesungswerte sind in Fig. 18 abhängig von der Beobachtungszeit aufgetragen. Obgleich die Ablesungen mit ihrem langen Zeitabstand voneinander eigentlich nur Stichproben sind, erkennt man doch, besser als an den Zahlen, gewisse Tendenzen in den einzelnen Werten und Beziehungen der Ablesungen zueinander.

Der Dampfdruck unterliegt kleinen Schwankungen; nach ihnen wird der Schieber geregelt. Einem niedrigen Dampfdruck entspricht daher meist ein weit offener Schieber und umgekehrt. Man darf allerdings sagen, daß die Bedienung bei dem Versuch

nicht sehr gut war; man hätte den Dampfschwankungen zeitiger und dann mit kleineren Verstellungen des Schiebers entgegenarbeiten sollen. Genauer hängt nicht der Dampfdruck p , sondern seine zeitliche Änderung $d p/d t$ von der Schieberstellung ab, auch vergeht einige Zeit, bis nach Einregeln des Schiebers das Feuer der Regelung folgt und die Regelung für den Kesselinhalt wirksam wird. Deshalb können Unstimmigkeiten zwischen Schieberstellung und Dampfdruck vorübergehend vorkommen.

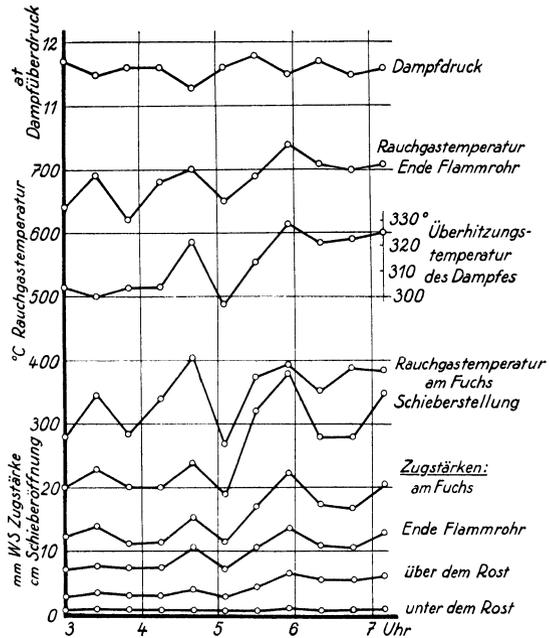


Fig. 18. Verlauf der Temperaturen und Zugstärken in ihrer Abhängigkeit voneinander während eines Verdampfungsversuches. (Versuch J.)

Durch die Schieberstellung werden nun alle übrigen Größen beeinflusst. Natürlich zunächst die Zugstärken, die die Schieberstellung gerade verändern soll, und die, in Richtung des Rauchgasstromes gerechnet, für den Aschefall (unter dem Rost), für den Feuerraum (über dem Rost), für das Flammrohrende und für den Fuchs (am Rauchschieber kesselseitig gemessen) gegeben sind. Die Rauchgase bewegen sich in Richtung abnehmenden absoluten Druckes, also zunehmender Zugstärke; die Abstände der Kurven voneinander sind die Zugunterschiede im Rost (Spalte und Kohlschicht), in den Flammrohren und in den gemauerten Zügen des Kesselkörpers einschließlich Überhitzer. Diese drei Zugunterschiede ändern sich miteinander und haben beiläufig gleiche Beträge. Sie sind nicht mit dem Widerstand der Gase in den betreffenden Gaswegen identisch; denn in den senkrecht verlaufenden Kanalteilen sind Auftriebe wirksam, die gegenüber den als Zugunterschied bezeichneten Zahlen nicht vernachlässigt werden dürfen, deren Betrag also positiv oder negativ zu dem gemessenen Unterschied hinzukommt. Vergleiche hierüber § 34.

Aber auch die Temperaturen haben ersichtlich einen Gang mit der Bewegung des Schiebers. Die Gastemperatur am Flammrohr und am Fuchs ist um so größer, je weiter der Schieber geöffnet ist, weil dann die größere Gasmenge weniger ausgekühlt wird. Mit der größeren Rauchgastemperatur vor dem Überhitzer steigt dann auch die Überhitzungstemperatur des Dampfes. Die Verhältnisse liegen ähnlich wie bei wechselnder Kesselbelastung, nur ist bemerkenswert, daß sich die Änderungen so scharf und schnell vollziehen, daß sie bei den Einzelablesungen deutlich zum Ausdruck kommen, obwohl doch die Wärmespeicherung des Mauerwerkes ausgleichend wirkt. —

Um sich ein Bild von der *Verteilung der Wärmeübertragung über die Heizfläche hin* zu machen, kann man den Wärmehalt der Rauchgase an beliebig vielen Stellen des Gasweges messen. Der Unterschied des Wärmehaltes zwischen zwei Stellen (vermindert um etwaige Wärmeverluste nach außen hin) ist gleich der Wärmeaufnahme der Heizfläche zwischen den zwei Stellen. In Tabelle 7 (Zeile 10—11, 17—20) waren noch die Beobachtungen für das Flammrohrende enthalten. Aus ihnen berechnet sich, ganz nach Anleitung der vorher für den Fuchs angestellten Rechnungen bei einer Temperatur von 685° C:

die trockene Rauchgasmenge $267 \cdot 145 : (15,0 + 0,1) = 2560 \text{ m}^3/\text{h}$,

ihre spezifische Wärme 0,343,

ihr Wärmehalt 601 000 kcal/h.

Die Menge der Feuchtigkeit ist wie am Fuchs 163 m³/h,

ihr Wärmehalt 41 500 kcal/h.

Also ist die gesamte Rauchgasmenge 2720 m³/h,

ihr Wärmehalt 643 000 kcal/h.

Dagegen ist die aufgewendete Luftmenge 2610 m³/h, ihr Wärmehalt bei 20° Temperatur 16 200 kcal/h.

Die Feuergase an der Meßstelle Ende Flammrohr haben daher 643 000 — 16 200 = 627 000 kcal Mehrinhalt gegenüber der zu ihrer Bildung verwendeten Luft.

Dieser Mehrinhalt ist mit der auf dem Rost entwickelten Wärme zu vergleichen, um die *Wärmeübertragung im Flammrohr* zu erhalten. Wir haben dazu den Heizwert der verfeuerten Kohle um den des gebildeten Kohlenoxydes (und eigentlich des Rauches) zu vermindern. Denn während für die Wärmebilanz, die über die wirtschaftliche Ausnutzung ein Bild geben soll, der Heizwert der Kohle als Ausgangspunkt galt und gleich 100% gesetzt wurde, sind für die Wärmeübertragung nur die in Freiheit gesetzten Wärmemengen in Ansatz zu bringen, von denen die Verbrennungstemperatur abhängt. — Aus dem Prozentgehalt am Flammrohrende errechnet sich

der CO-Gehalt der Rauchgase im Flammrohr $2,56 \text{ m}^3 \left(\frac{0}{760}\right)/\text{h}$.
 Heizwert derselben $3040 \cdot 2,56 = 7800 \text{ kcal/h}$.

In der Feuerung sind $1\,880\,000 - 7800 = 1\,872\,000 \text{ kcal/h}$ erzeugt; im Flammrohr werden daher $1\,872\,000 - 627\,000 = 1\,245\,000 \text{ kcal/h}$ den Rauchgasen entzogen.

Auch für den Anteil der Überhitzerheizfläche läßt sich ein Anhalt gewinnen. In § 26 ist bereits mit den für unseren Versuch passenden Zahlen errechnet, daß zum Überhitzen von 1 kg Dampf von $188,8^\circ$ im gesättigten Zustand auf 313° , beidemal bei 12,5 at. abs. Druck, ein Wärmearaufwand von 68,2 kcal/h nötig ist. Zur Überhitzung der gespeisten 1831 kg/h sind also 125 000 kcal/h nötig, das sind 9,8% der vom Dampf insgesamt aufgenommenen 1 280 000 kcal/h. Dieselben werden geleistet auf einer Überhitzerheizfläche von 20,0 m², die von der gesamten Heizfläche (einschl. Überhitzer) von 84,7 m² einen Bruchteil von 23,8% ausmacht. Die Heizfläche des Überhitzers bleibt also in der Wärmeübertragung hinter dem Durchschnitt weit zurück. Das entspricht der allgemeinen Erfahrung, nach der — wegen der ungünstigeren Konvektionsverhältnisse — die Wärmeaufnahme bei Gasen (überhitzten Dämpfen) erheblich schlechter vonstatten geht als bei Flüssigkeit. Wenn die Wärmeaufnahme meist in roher Annäherung durch die Formel

$$W = k \cdot F \cdot \Delta t, \text{ also } k = \frac{W}{F \cdot \Delta t}$$

dargestellt wird, so ist in unserem Fall die Wärmemenge $W = 125\,000 \text{ kcal/h}$ durch eine Fläche von $F = 20,0 \text{ m}^2$ bei einem Temperaturunterschied $\Delta t^\circ \text{ C}$ erfolgt, der wie folgt berechnet wird: Der Dampf wird von $188,8^\circ$ auf 313° erhitzt, hat im Mittel 251° ; die Rauchgase gehen mit 685° in den Überhitzer und verlassen ihn (nach den in Tabelle 7 nicht gegebenen Messungen) mit 405° , ihre mittlere Temperatur ist also 545° ; so ist $\Delta t = 545 - 251 = 294^\circ$ einzuführen, und es wird die

$$\text{Wärmedurchgangszahl } k = \frac{125\,000}{20,0 \cdot 294} = 21,2 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ \text{C} \cdot \text{h}}.$$

Für Überhitzer wird $k = 20$ bis 30 und mehr angegeben¹⁾.

Wenn für das Flammrohr 1 245 000 kcal/h Wärmeübertragung, für den Überhitzer 125 000 kcal/h gefunden wurden, so lassen sich beide Zahlen deshalb nicht vergleichen, weil die erste sich auf die Wärme-

¹⁾ Hütte, 21. Aufl., II, S. 25, 22. Aufl., S. 21.

abgabe der Gase, die zweite auf die Wärmefaufnahme des Dampfes bezieht; beide gehören also verschiedenen Beobachtungsreihen an, die um den Betrag der Wärmeverluste klaffen. Wir lassen uns nun auf keine Diskussion darüber ein, ob für das Flammrohr etwa Wärmeverluste gar nicht in Frage kommen, sondern verwenden kurzerhand folgendes *Verfahren*, das oft verwendbar ist, um solche *in verschiedener Weise beobachtete Größen einander anzupassen*.

Wir tragen in Fig. 19 wagrecht die einzelnen untersuchten Heizflächen aneinander, senkrecht die bis zu ihrem Ende umgesetzten Wärmemengen. Für die gesamte Heizfläche von $84,7 \text{ m}^2$ tragen wir im Punkte A an: die gesamte, vom Dampf aufgenommene Wärmemenge, $1\,280\,000 \text{ kcal/h}$, Strecke AD , und die gesamte, vom Feuergas abgegebene Wärme, Strecke AF ; durch Verbrennung waren entwickelt $1\,872\,000$

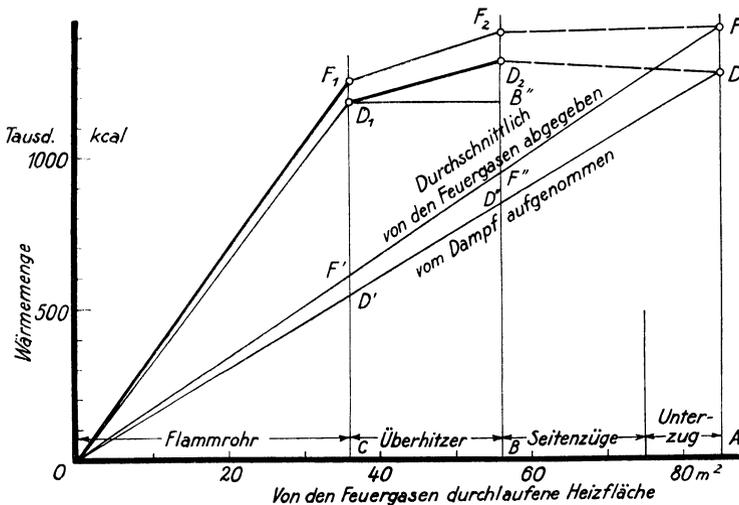


Fig. 19. Anteil der Heizflächenteile eines Dampfkessels an der Wärmeübertragung.

kcal/h , die Fuchsgase hatten noch $444\,000 \text{ kcal/h}$ Wärmemehrinhalt, also ist $AF = 1\,428\,000 \text{ kcal}$ anzutragen. Die Neigungen der beiden Geraden OD und OF sind ein Maß für die (örtlich) durchschnittliche Wärmeleistung der gesamten Heizfläche. Wir tragen ferner an Endpunkt C der Flammrohrheizfläche die Wärmeabgabe der Feuergase an und erhalten den Punkt F_1 . Die Neigung von OF_1 ist ein Maß für die durchschnittliche Wärmeleistung des Flammrohres. Die Wärmeleistung des Überhitzers ist nun nicht von F_1 an abzutragen, sondern wir gehen erst um das Stück $F_1D_1 = F'D'$ abwärts, das ist um den Anteil des Flammrohres an den Wärmeverlusten; wir kommen dadurch auf den für Dampf bestimmten Linienzug und machen nun $B''D_2 = 125\,000 \text{ kcal}$ gleich der Wärmefaufnahme des Dampfes im Überhitzer und können wieder aufwärts $D_2F_2 = D''F''$ antragen, um die auf Feuergase bezügliche Zahl zu erhalten.

Wir haben so im Zuge OF_1F_2F die Wärmeabgabe der Feuergase,

im Zuge OD_1D_2D die Wärmeaufnahme des Dampfes, beide nach Heizfläche verteilt. Voraussetzung war offensichtlich Gleichmäßigkeit der Verluste in allen Teilen — eine sicher nicht genaue Annahme, die aber doch besser sein wird, als die Verluste ganz zu ignorieren.

Zweck von Fig. 19 ist, ein oft verwendbares Verfahren zu erläutern, und außerdem durch diese Kontrolle die Unsicherheit derartiger Wärmemessungen zu zeigen, die jedenfalls dann besteht, wenn die Messungen nur mit den üblichen technischen Hilfsmitteln und im üblichen Umfang erfolgen. Die Strecken F_2F und D_2D verlaufen nämlich so gut wie wagrecht. Mag nun auch die Wirksamkeit der letzten Züge, wegen der verringerten Temperatur der Rauchgase, gering sein, so wie Fig. 19 es zeigt, kann sie sicher nicht sein. Da die Messung der Überhitzung zuverlässig ist, so wird der Wärmehalt der Feuergase am Flammrohrende kleiner sein, als die Messung ergab. Ob die Temperatur zu hoch gemessen worden ist, indem das Thermometer zufällig in einem heißeren Teil des sicher inhomogenen Gasstromes lag, bleibe dahingestellt.

Wir kehren zu Fig. 18 zurück. Unzweideutig ist trotz sehr gleichmäßiger Belastung (siehe deswegen Fig. 15, § 27) doch keineswegs ein *Beharrungszustand* vorhanden. Der Kessel war vor Versuchsbeginn etwa eine Stunde im Betrieb bei der gleichen Belastung, der Versuchschluß liegt also 5 Stunden nach der Einstellung der Belastung. Trotzdem erkennt man deutlich ein Ansteigen aller Größen bis zum Schluß — nur der Dampfdruck wird vom Heizer konstant gehalten. Das Anwachsen des Zugstärkenunterschiedes unter und über dem Rost erklärt sich zwanglos aus der zunehmenden Verschlackung des Rostes. Aber die am Fuchs erforderliche Zugstärke wächst mehr an, als dem entspricht, und ebenso mußte die Schieberstellung mehr geändert werden, als man hätte erwarten sollen. Das Anwachsen der Temperatur, der Rauchgase an allen Stellen wie des Dampfes, wird man daraus erklären, daß das Mauerwerk anfangs noch merkliche Wärmemengen aufnimmt. Um zu sehen, ob diese Erklärung Stich hält, berechnen wir die *Wärmespeicherung des Mauerwerks*. Zur Berechnung zerlegen wir die gesamte Mauerwerksmasse so in Teile, daß wir die Temperatur derselben schätzen können. Für das Schamottefutter des Mauerwerks am Flammrohrende und am darübergebauten Überhitzer wird man 550°C Temperatur annehmen dürfen, da die Rauchgase mit 685° ein- und mit 405° austreten. In dem Mantelmauerwerk dazu nimmt die Temperatur bis auf niedrige Werte ab, wir schätzen sie auf durchschnittlich 250° . Das Mauerwerk der Seitenzüge mag Temperaturen von 200° durchschnittlich annehmen, da die innen gehenden Rauchgase von 405 bis 347° Temperatur haben. In dieser Weise zerlegend, entnehmen wir der Kesselzeichnung die Mauerwerksmassen der drei Teile zu $5,0\text{ m}^3$, $15,3\text{ m}^3$, $12,7\text{ m}^3$; es erübrigt sich für solche Überschlagsrechnung, Zwickel und Enden genau zu beachten, da ohnehin große Unsicherheit darüber besteht, bis wohin man die Mauerwerks- und Fundamentkörper in Ansatz zu bringen hat; es kommt aber auch nur auf die Größenordnung an. Die spezifischen Gewichte setzen wir für Schamotte 2000 kg/m^3 , für Ziegelmauerwerk 1450 kg/m^3 an, die spezifische Wärme mit $0,22\text{ kcal/kg}\cdot^\circ\text{C}$. Dann ergibt sich:

Schamottefutter	5,0 m ³ · 2000 kg/m ³ · 0,22 · 500 °	= 1 100 000 kcal
Überhitzermantel	15,3 „ · 1450 „ · 0,22 · 250 °	= 1 220 000 „
Seitenmauerwerk	12,7 „ · 1450 „ · 0,22 · 250 °	= 810 000 „

Der ganze Wärmeinhalt des Mauerwerks im warmen Zustand ist also 3 130 000 kcal

und stellt einen sehr erheblichen Wert dar im Verhältnis zum stündlichen Wärmeumsatz (1 280 000 kcal). Allerdings kommt im normalen Betrieb (im Gegensatz zum ersten Anheizen) nur der Zuwachs des Wärmeinhaltes in Betracht, da in Betriebspausen das Mauerwerk nicht auskühlt, sondern vielleicht gar das Feuer schwach unterhalten wird. Unter gewissen Annahmen ergibt sich, daß rund die Hälfte, also 1 500 000 kcal, im Mauerwerk des Kessels in den ersten Stunden nach einer mäßigen Betriebspause aufgespeichert werden.

In § 35 wird weiter gezeigt werden, daß die thermischen Nachwirkungen beim Kessel ernsteste Beachtung verdienen.

34. Einfluß der Kesselbelastung. Aus mehreren, in der beschriebenen Art bei verschiedener Dampfabnahme angestellten Versuchen ergibt sich eine *Versuchsreihe*, die den Einfluß der Kesselbelastung auf die verschiedenen, der Beobachtung zugänglichen Größen und auf die Wärmebilanz erkennen läßt. Eine solche Versuchsreihe ist zeitraubend, weil jeder der Versuche bis zu 8 oder mehr Stunden dauern sollte. Sie bietet auch sonst manche Schwierigkeiten, weil es sehr schwierig ist, die thermischen Nachwirkungen der erheblichen Mauerwerksmasse und den Einfluß der Rostverschlackung genügend auszuschalten (§ 33).

In der nun zu besprechenden Versuchsreihe wurde eine Versuchsdauer von etwa 4 Stunden nach einstündiger Eingewöhnung des Kessels angestrebt. Nur bei gleichen Verhältnissen erhält man vergleichbare Resultate und lediglich gleichmäßige Änderung der beobachteten Größen. Die Versuchsreihe ist absichtlich nicht in gutem Beharrungszustand gemacht worden, um den Einfluß der Einlaufzeit hervortreten zu lassen.

Die 5 Versuche wurden mit einer Heizflächenbelastung von 8,5, 14,8, 22,1, 28,4 und 34,8 kg/m² · h ausgeführt. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 8 und 9 sowie Fig. 20 bis 23. Der Versuch *J* ist derselbe, der schon in den vorigen Paragraphen eingehend besprochen wurde. Ein sechster Versuch *C* ist ein Parallelversuch zu *B*, bei (etwa) gleicher Belastung, über den später zu sprechen ist.

Mit zunehmender Leistung des Kessels nehmen naturgemäß alle Mengenwerte zu (Fig. 20). Dagegen hält sich der *Wirkungsgrad* über recht verschiedene Belastungen hin unverändert (Fig. 22). Bei den kleinsten Leistungen sinkt er naturgemäß stark, um sich der Null zu nähern. Der Rauchgasverlust (wegen spezifischer Wärme und wegen Kohlenoxyd) gewinnt bei großen Belastungen auch relativ an Einfluß wegen der steigenden Fuchstemperatur. Bei kleiner Belastung scheint er den konstanten Wert von rund 9% anzunehmen. Der nicht nachweisbare Restverlust, im wesentlichen durch Strahlung, wird prozentual um so kleiner, je größer die Kesselleistung ist. Beim Abstellen der Dampfentnahme $D = 0$, müssen Restverlust und Rauchgasverlust zusammen 100% betragen; der Restverlust muß also bis rund 91% wachsen.

Bei Belastungen über der normalen fällt der Wirkungsgrad ein wenig ab — im allgemeinen etwas stärker, als Fig. 22 es zeigt. Die Verdampfungszahl (Fig. 21) fällt stärker ab; denn mit steigender Belastung steigt die Dampftemperatur und daher der Wärmehalt. Daß der Dampfdruck, der vom Heizer konstant (auf 12 at ÜD = 13 at abs) gehalten werden sollte, mit steigender Belastung etwas zurückgeht, ist nur persönlich begründet.

Mit steigender Belastung nehmen neben der Fuchstempertur auch die Temperaturen in allen Meßstellen zu — auffallend wenig diejenige im Feuerraum, die bei den verschiedenen Versuchen mittels eines Wanner-Pyrometers beobachtet wurde. Es steigt damit die mittlere Temperatur in den Zügen, von der die Wärmeübertragung — durch Leitung und Strahlung — in dem betreffenden Teil der Züge abhängt.

Bei allen Belastungen, mit Ausnahme der kleinsten, war es möglich, den Luftüberschuß bei der Verbrennung selbst, also auch am Flammrohrende, mäßig zu halten. Versuch J schneidet am schlechtesten ab wegen schlechterer Feuerführung. Bei der kleinsten Belastung ließ sich der

Luftüberschuß nicht weiter herunterdrücken als auf 1,30. Immerhin sieht man, daß es Vorurteil ist, wenn gesagt wird, es seien große Luftüberschüsse zur guten Verbrennung nötig. Geschickte Lehrheizer halten stundenlang Kohlensäuregehalte von 15—16%, Luftüberschüßzahlen von 1,1, in der Feuerung bzw. am Flammrohr gemessen, und vermeiden dabei überdies sicher auch die mäßigen CO-Gehalte, die bei diesen Versuchen noch gemessen worden sind. Der Luftüberschuß am Fuchs allerdings ist dann um so höher, je undichter das Mauerwerk und je größer der Unterdruck in den Zügen ist. Da letzterer mit der Belastung zunimmt, so wird die Luftüberschüßzahl am Fuchs mit der Belastung größer — obwohl sich die falsch eingesaugte Luft

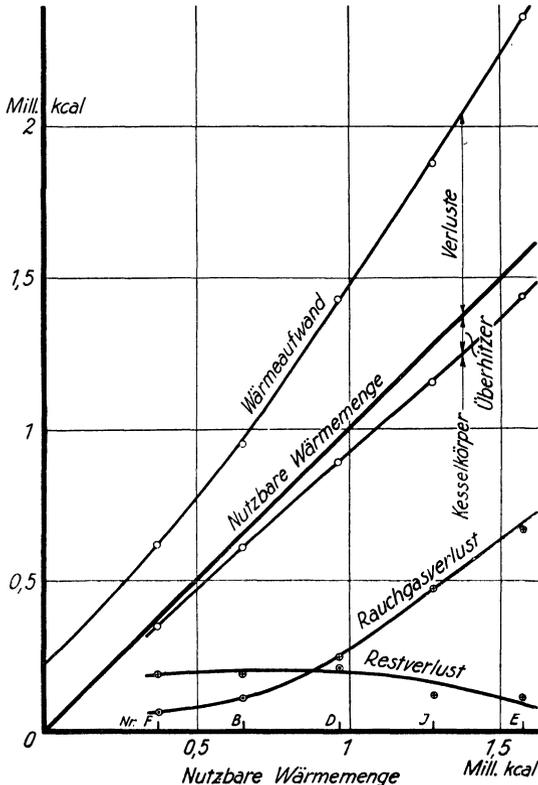


Fig. 20. Wärmeverbleib beim Dampfkessel bei verschiedener Leistung. Bezugszeit 1 h.

auf eine größere Rauchgasmenge verteilt. Reiner sieht man dies Gesetz, wenn man die Zunahme Δl der Luftüberschußziffer in den letzten Zügen betrachtet; die Unregelmäßigkeiten der Verbrennung fallen dann heraus. Die Notwendigkeit, am Fuchs einen großen Luftüberschuß zu halten, rührt also von der Undichtheit des Mauerwerkes und von dem Unterdruck in den Zügen her.

In bezug auf Δl fällt der Versuch mit schwächster Belastung aus der Reihe; bei ihm war die weitere Abschwächung des Feuers, unter Versuch *B* herunter, nicht mehr durch Schließen des Rauchschiebers bewirkt worden; das führte zum Rauchen des Feuers. In der Tat, die Zahlen der Tabelle 9 über die Zugstärke im Aschfall und Feuerraum würden für Versuch *F* sichtlich schon negative Werte ergeben, und der Überdruck drückt die Feuergase aus dem Feuerraum heraus. Deshalb wurde die weitere Dämpfung des Feuers durch die Dämpfer am Aschfall bewirkt, die Schieberstellung blieb auf 5 cm Öffnung. Da nun aber im Seitenzug mehr Unterdruck war, als der son-

Tabelle 8. Betriebsergebnisse eines Kesselabmessungen am

Versuch Nr.	
1	Versuchsdauer
2	Kohlenaufnahme
3	Dampferzeugung
4	Beanspruchung der Kesselheizfläche
5	Verdampfungszahl
6	Wirkungsgrad des Kessels (Dampfzustand s. Tab. 11)
7	Luftüberschußzahl <i>l</i> am Flammrohr
8	„ „ Fuchs
9	Gesamtes (feuchtes) Rauchgasvolumen am Flammrohr
10	„ „ „ „ Fuchs
11	Heizwert der verfeuerten Kohle
12	In der Feuerung erzeugte Wärme
13	Wärmehemrinhalt der Rauchgase Ende Flammrohr
14	„ „ „ Fuchs

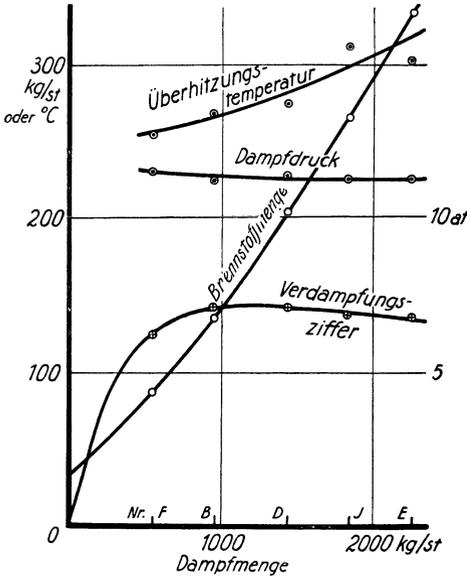


Fig. 21. Verdampfung beim Dampfkessel bei verschiedener Leitung.

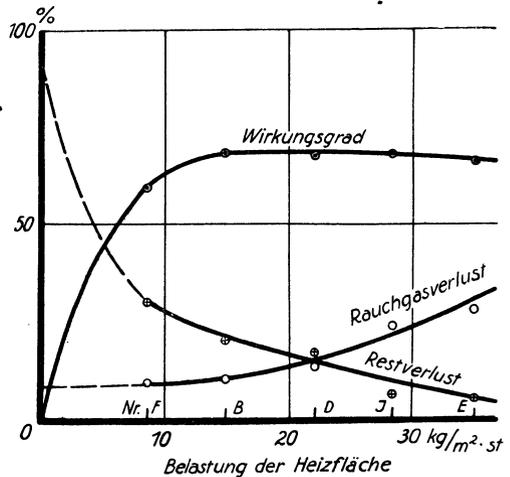


Fig. 22. Wärmebilanz

Flammrohrkessels bei wechselnder Belastung.
Kopf von Tabelle 5 bis 7.

	F		B		D		J		E		C	
h	5		4		4 ^{1/2}		4		4		4	
kg/h	88		135		203		267		335		142	
„	547		959		1425		1831		2254		997	
kg/m ² · h	8,5		14,8		22,1		28,4		34,8		15,4	
—	6,22		7,10		7,02		6,86		6,73		7,02	
—	0,593		0,685		0,676		0,681		0,667		0,685	
—	1,30	$\Delta = 0,52$	1,09	$\Delta = 0,39$	1,10	$\Delta = 0,56$	1,22	$\Delta = 0,68$	1,10	$\Delta = 0,78$	1,43	$\Delta = 1,21$
—	1,82		1,48		1,66		1,90		1,88		2,64	
m ³ (⁰ 760)/h	970	380	1250	410	1940	900	2720	1430	3120	3250	1630	1390
„	1350		1660		2840		4150		5370		3020	
1000 kcal/h	620	3	950	25	1430	17	1880	8	2360	12		
„	617	516	925	728	1413	1037	1872	1245	2348	1570		
„	101	42	197	101	376	179	627	174	778	111		
„	59		96		197		453		667			

Tabelle 9. Verhalten der Feuerung eines Flammrohrkessels bei wechselnder Belastung. Planrost.

Versuch Nr.		F	B	D	J	E	C
1	Kohlenaufnahme kg/h	88	135	203	267	335	142
2	Beanspruchung der Rostfläche kg/m ² · h	46	71	107	140	177	75
3	Schieberstellung cm	5	5	12	26	58	11
4	Temperatur: Feuerraum . ° C	—	1065	1140	1175	1175	—
5	Ende Flammrohr (vor dem Überhitzer) ° C	335	480	580	685	730	525
6	Hinter dem Überhitzer . . . ° C	310	300	370	405	359?	340
7	Fuchs ° C	150	190	225	347	390	220
8	Zugstärke: Aschfall . mm WS	0,6	0,02	0,3	0,6	0,7	10,8
9	Feuerraum „	0,8	0,4	2,7	4,4	6,8	10,5
10	Ende Flammrohr (vor dem Überhitzer) . . „	1,7	1,35	4,1	9,6	16,9	13,3
11	Hinter dem Überhitzer . . „	—	1,25	3,7	10,2	18,0	13,4
12	Ende Seitenzug „	—	1,3	4,7	10,8	19,1	13,4
13	Fuchs (vor dem Rauchschieber) „	2,5	2,4	5,5	15,5	22,6	15,6
14	Rauchgaszusammensetzung:						
	Ende Flammrohr: CO ₂ . . %	13,8	16,0	15,9	15,0	16,4	13,2
15	„ „ O ₂ . . %	5,0	2,1	2,1	4,0	2,0	6,4
16	„ „ CO . . %	0,1	0,7	0,3	0,1	0,2	0,1
17	„ „ N ₂ . . %	81,1	81,2	81,7	80,9	81,4	80,3
18	Luftüberschußzahl l —	1,30	1,09	1,10	1,22	1,10	1,43
19	Fuchs: CO ₂ %	9,8	12,2	10,6	9,5	9,4	7,0
20	„ O ₂ %	9,6	7,0	8,6	10,2	10,0	13,1
21	„ CO %	0	0,2	0,2	0,2	0	0
22	„ N ₂ %	80,6	80,6	80,6	80,1	80,6	79,9
23	Luftüberschußzahl l —	1,82	1,48	1,66	1,90	1,88	2,64
24	Unterschied der Luftüberschußzahlen Δl —	0,52	0,39	0,56	0,68	0,78	1,21

stigen Versuchsreihe entspricht, so wird diesmal $\Delta l = 0,52$, d. h. besonders hoch.

Die *Benutzung der Dämpfer* ist deshalb nicht ratsam. Bei Versuch C ist die Belastung dieselbe wie bei B, aber der Rauchschieber war offen und die Dämpfer geschlossen. Der unnützlich starke Unterdruck in allen Teilen der Feuerung bewirkt, daß der Luftüberschuß im Feuerraum nicht niedrig gehalten werden kann, und daß er um $\Delta l = 1,21$ in den Seitenzügen zunimmt, gegen nur 0,39 bei Versuch B. Es ist eigenartig, daß bei Versuch C trotzdem höhere Rauchgastemperaturen gemessen wurden. — Auf den Wirkungsgrad ist diese scheinbar so ungünstige Änderung ohne meßbaren Einfluß gewesen (Tabelle 8).

Auffallend ist ferner an den Zugmessungen, daß bei mäßiger und normaler Belastung die Zugstärke hinter dem Überhitzer kleiner ist als vor ihm. Die Feuergase gehen hier also vom Orte niedrigen nach dem von höherem absoluten Druck. Der *Druckverlust der Rauchgase im Überhitzer* scheint negativ zu sein. Das erklärt sich aus dem Auftrieb im Überhitzer. Der Weg der Rauchgase ist der bei Zweiflammrohrkesseln häufige, den Fig. 24 perspektivisch-schematisch darstellt. Bei F_1F_2 , S_1S_2 wird die Zugstärke gemessen, dazwischen liegt hoch bei A_1E_1 , A_2E_2 der Überhitzer. Ist nun γ_1 und γ_2 kg/m³ das spezifische Gewicht der Gassäulen in dem steigenden und fallenden Kanal, h m die Höhe des Anstieges, so ist nach bekannten Gesetzen der wirksame Auftrieb $h \cdot (\gamma_2 - \gamma_1)$; er errechnet sich für den immer als Beispiel dienenden Versuch J wie folgt. Das spezifische Gewicht der Gase am Flammrohrende im Normalzustand ist zu berechnen aus der Mischungsregel, mit den Gewichten der Einzelgase:

$$(100 \cdot 6,4) \cdot \gamma_0 = 15,0 \cdot 1,98 + 4,0 \cdot 1,43 + 0,1 \cdot 1,25 + 80,9 \cdot 1,25 + 6,4 \cdot 0,804$$

$$\gamma_0 = 1,33 \text{ kg/m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right).$$

Hierbei ist $6,4 = \frac{163}{2560} \cdot 100$ der Prozentgehalt der Gase an Wasserdampf ($\gamma_0 = 0,804$) bezogen auf trockenes Gas = 100%. Das wirkliche spezifische Gewicht ist, unter Vernachlässigung der Luftansaugung durch das Überhitzermauerwerk

$$\text{in } F_1E_1, t = 685^\circ : \gamma_1 = 1,33 \cdot \frac{273}{273 + 685} = 0,38 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{in } A_1S_1, t = 405^\circ : \gamma_2 = 1,33 \cdot \frac{273}{273 + 405} = 0,54 \quad ,,$$

$$\Delta \gamma = 0,16 \text{ kg/m}^3.$$

Der Auftrieb für 2 m Standhöhe ist also $0,32 \approx 0,3$ mm WS. Daher ist der Druckverlust durch Reibung zwischen F_1 und S_1 nicht $10,2 - 9,6 = 0,6$ mm WS, wie die direkte Messung ergeben hätte, sondern da der Auftrieb auch noch aufgezehrt ist, ist die Reibung mit $0,6 + 0,3 = 0,9$ mm WS anzusetzen. — Wenn nun bei kleinen Leistungen, also kleinen Rauchgasmengen, die Reibung kleiner wird als der Auftrieb, so kann der Druckabfall negativ, ein Druckanstieg werden.

In Fig. 20, 21, 23 sind als Abszissen Stundenwerte aufgetragen, in Fig. 22 jedoch ist auf Quadratmeter und Stunde Bezug genommen, um der Darstellung Allgemeingültigkeit, ähnlich wie bei dimensionslosen Diagrammen, zu verleihen.

35. Genauigkeit von Kesselversuchen, Beharrungszustand. In Fig. 25 sind von den schon im vorigen Paragraphen besprochenen Versuchen die Werte der Verdampfungszahlen aufgetragen, die sich aus den stündlichen Abschlüssen ergeben. Jeder Stundenwert ist als Punkt in die Mitte des Zeitabschnittes gesetzt, für den er den Durchschnitt bildet, und die Punkte sind verbunden worden.

Bei aller Unregelmäßigkeit der Linienzüge zeigt sich doch in allen Fällen ein *Ansteigen mit der Zeitdauer*. Nur Versuch B (mäßige Belastung) beginnt mit einem Abfall. Es liegt hier offenbar eine grobe Unregelmäßigkeit in der Anfangsablesung vor, wie wir noch zeigen werden.

Wir schließen daraus, daß der Beharrungszustand nach einstündiger Einlaufdauer noch nicht erreicht war. Das Mauerwerk nimmt noch sehr merkliche Wärmemengen auf.

Einer der Versuche ist auf 8 h ausgedehnt; die Linie erreicht in der fünften Stunde einen Höchstwert, der auch, weniger ausgesprochen, bestehen bleibt, wenn man den Stundenwert gegen die beiden benachbarten, besonders kleinen abgleicht. Wir erkennen in der Abnahme der Verdampfungszahl (des Wirkungsgrades) von der fünften Stunde an eine Wirkung der zunehmenden Verschlackung des Rostes; derselbe war während dieses Versuches gar nicht abgeschlackt worden.

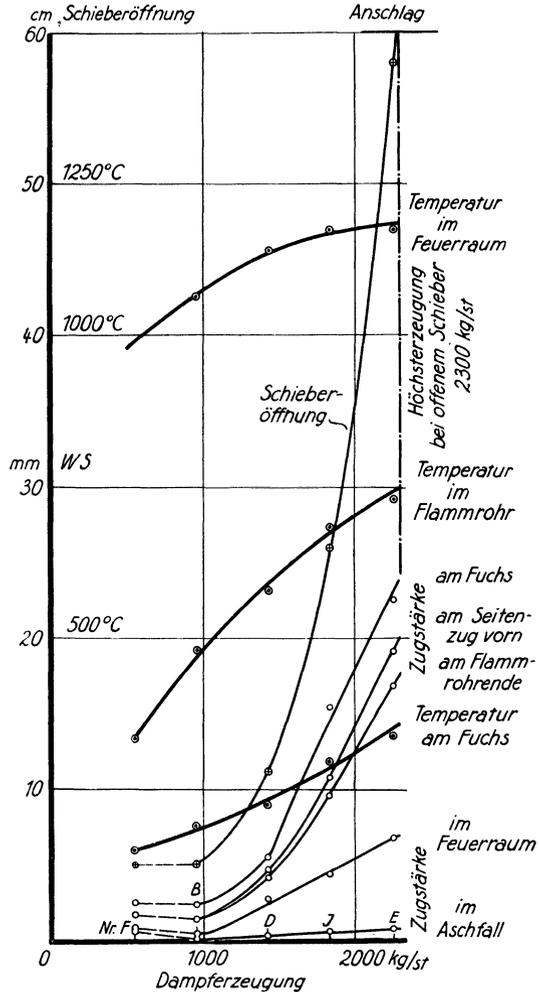


Fig. 23. Feuerung des Dampfkessels bei verschiedener Leistung.

Außerdem zeigt sich, daß der Verlauf der gebrochenen Linie unregelmäßig ist, bei hoher Belastung etwas weniger als bei kleiner.

Wir schließen daraus, daß sich aus einstündigen Ablesungen Schlüsse auf die Verdampfungszahl nicht ziehen lassen, besonders nicht bei schwacher Belastung.

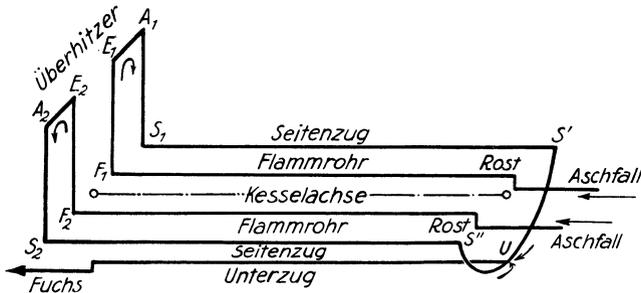


Fig. 24. Schematische Darstellung der Feuerzüge, Auftrieb im Überhitzer.

Fig. 26 gibt dieselbe Darstellung für Zweistundenwerte. Der eben erwähnte Bestwert um die sechste Betriebsstunde tritt bei dem glatteren Verlauf der Linie deutlich hervor. Außerdem fällt für die Verbindungslinien der beiden ersten Punkte auf, daß ihre Neigung um so kleiner wird, je größer die Belastung ist. Den Versuch bei mäßiger Belastung

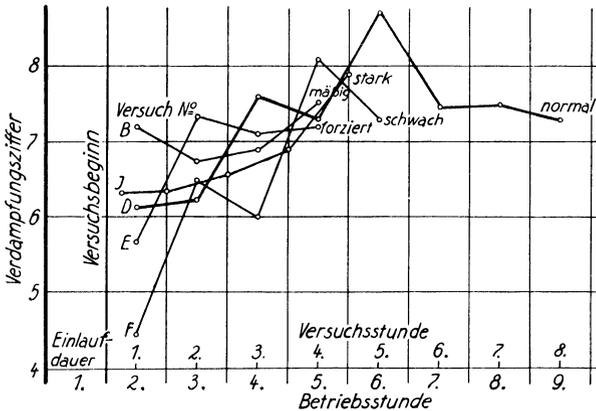


Fig. 25. Änderung der Verdampfungszahl in den ersten Betriebsstunden, Einstundenwerte.

müssen wir dabei unbeachtet lassen, wegen der schon erwähnten durchgehenden Unregelmäßigkeit.

Diese *Gesetzmäßigkeit* veranlaßt uns, die Verdampfungszahlen jedes der beiden Stundenpaare abhängig von der Leistung des Kessels aufzutragen. Es entsteht Fig. 27, mit einem überraschenden Ergebnis.

Es zeigt sich, daß die Verdampfungszahlen jeder der Stundenpaare für sich ausgezeichnet in eine Kurve fallen; nur der zweite Versuch fällt im ersten Stundenpaar grob heraus. Da dieser überdies der zuerst durchgeführte von allen Versuchen war, so führen wir die Unregelmäßigkeit an dessen Anfang auf eine falsche Anfangsablesung zurück und lassen ihn unbeachtet. Die Zahlen für die übrigen sind folgende:

Tabelle 10. Einlaufen eines Dampfkessels.

Versuch Nr.		<i>F</i>	<i>B</i>	<i>D</i>	<i>J</i>	<i>E</i>
1	Belastung der Heizfläche $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$.	8,5	14,8	22,1	28,4	34,8
Verdampfungszahl:						
2	1. und 2. Versuchsstunde	5,29	(6,99)	6,18	6,46	6,38
3	3. und 4. Versuchsstunde	6,91	7,21	7,45	7,40	7,16
4	Unterschied	1,62	—	1,27	0,94	0,78
5	Verhältnis	0,766	—	0,830	0,873	0,891

Diese Zahlen sind zu regelmäßig, als daß es sich um Zufälle handeln könnte. Sie beweisen, daß es selbst beim forcierten Betrieb nötig ist, den Kessel 3 h vor Versuchsbeginn mit der richtigen Belastung einlaufen zu lassen; bei schwächerer Belastung dürfte 4 h *Einlaufdauer* nicht zu viel sein.

Aus dem Linienzug für Versuch *D* in Fig. 26 darf man folgern, daß ein Versuch dann ein Optimum des Wirkungsgrades ergibt, wenn er sich über die 4. bis 9. Stunde des gleichmäßigen Betriebes erstreckt. Zur Erzielung guter Ergebnisse ist es wesentlich, nicht früher anzufangen;

aber auch eine längere Erstreckung führt zu einer Verringerung des Wirkungsgrades, wenn der Rost nicht abgeschlackt wird. Wir empfehlen daher (§ 30) Abschlacken des Rostes bei achtstündiger Versuchsdauer etwa 2 h vor, 2 und 6 h nach Versuchsbeginn.

Erläuternd sei noch bemerkt, daß bei den besprochenen Versuchen 1 h vor Versuchsbeginn die richtige Kesselbelastung hergestellt worden war. Der Kessel war aber im laufenden Betrieb, und es war in jedem Falle vorher der Druck gehalten worden, nur ohne Dampfentnahme.

Wesentlich ist der verschiedene Charakter der beiden in Fig. 27 gegebenen Kurven. Für die ersten 2 h steigt die Verdampfungszahl mit der Belastung fast dauernd an, für die weiteren Stunden erreicht sie einen Höchstwert und wird bei allzu hohen Belastungen wieder wesentlich kleiner. Wenn also die Wirkungsgradkurve, Fig. 22, auffallend wenig bei hoher Belastung abfiel, so lag das daran, daß die Versuche eigentlich Anlaufversuche und nicht im Beharrungszustand ausgeführt sind.

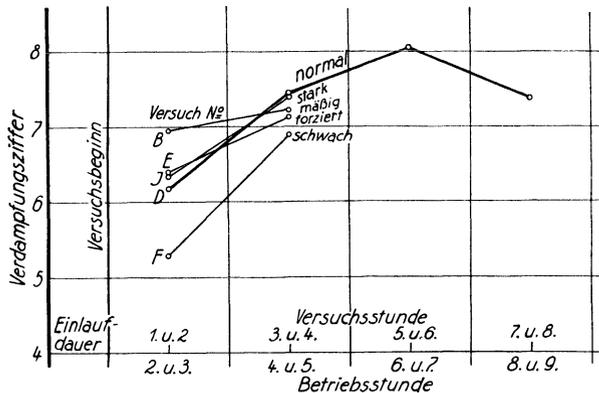


Fig. 26. Änderung der Verdampfungszahl in den ersten Betriebsstunden, Zweistundenwerte.

Die Ergebnisse auch von kürzeren Beobachtungszeiten stimmen überall so gut zusammen, daß wir daraus entnehmen, die meßtechnischen Schwierigkeiten seien nicht die wesentlichen beim Verdampfungsversuch; die Fehler aus mangelhafter Abgleichung des Rostes und des Wasserinhaltes lassen sich von geübten Versuchsleitern mit guten Meßeinrichtungen wesentlich kleiner halten, als die Diskussion § 29 es erwarten läßt. Die Schwierigkeiten liegen vielmehr auf betriebstechnischem Gebiet; die Führung des Betriebs und das Ausschneiden einer bestimmten Versuchszeit aus der Gesamtdauer beeinflußt die Ergebnisse sehr stark. Diese Einflüsse aber verwischen sich bei längerer Versuchszeit. Unter diesem Gesichtspunkt ist die Forderung einer achtstündigen Versuchszeit in den Normen eher als mäßig denn als hoch zu bezeichnen, wenn die Ergebnisse betriebstechnischen Wert haben sollen. Die Einlaufzeit muß wesentlich höher gewählt werden, als sie

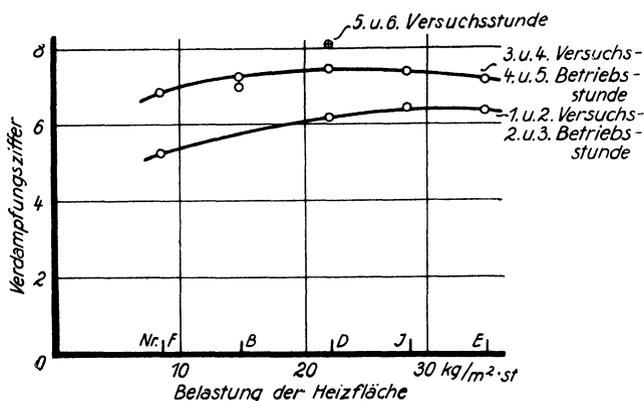


Fig. 27. Einfluß des Einlaufens auf die Ergebnisse eines Verdampfungsversuches.

nach meinen Erfahrungen meist gewählt wird. Für vergleichende Untersuchungen, wie die im vorstehenden durchgeführten, genügen jedoch kurze Versuchszeiten.

36. Höchstleistung des Kessels; Abhängigkeit von der Zugerzeugung.

In vielen Fällen ist es wichtig, daß eine Kesselanlage eine gewisse Dampfmenge sicher hergibt, um dem Bedarf gerecht zu werden; der dabei erreichte Wirkungsgrad spielt dann eine untergeordnete Rolle, wenn die Leistung nicht oft von dem Kessel verlangt wird. In solchen Fällen pflegt die Leistungsfähigkeit des Kessels gewährleistet zu werden und ist dann versuchsmäßig festzustellen. Erweist der Versuch, daß die Zusage nicht erreicht ist, so pflegt der Fehler auf ungenügenden Zug geschoben zu werden, und es ist dann zu prüfen, ob die Kesselanlage oder ob die Zugerzeugungsanlage am Versagen schuld sind.

Es ist ein Unterschied zu machen, je nachdem es sich um natürliche Zugerzeugung durch einen Schornstein oder um künstlichen Zug durch mechanische Mittel handelt. Zunächst soll an *Schornsteinzug* gedacht

werden. Über dessen Entstehung gibt § 42 einige Beobachtungen und Rechnungen, auf die hier auch verwiesen sei.

Die Höchstleistung des Kessels ist betriebstechnisch dadurch gekennzeichnet, daß der Rauchschieber (oder die Rauchklappe) ganz offen ist; dadurch kommt die volle, vom Schornstein ausgeübte Zugstärke auf den Kessel zur Geltung. Bei jeder anderen Rauchschieberstellung wird der Schornsteinzug durch die Drosselung in dem vom Rauchschieber verengten Querschnitt vermindert, und wir haben dann zu unterscheiden zwischen den zu beiden Seiten desselben gemessenen Zugstärken, deren eine die vom Schornstein erzeugte, deren andere die vom Kessel benötigte Zugstärke ist. Erstere hängt — wenn ein bestimmter Schornstein in Betracht gezogen wird — von der Rauchgastemperatur ab und daher auch von der Kesselbelastung; die andere

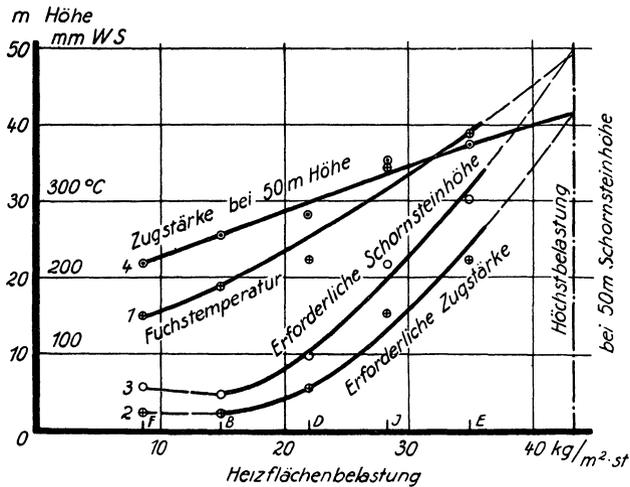


Fig. 28. Erforderliche Schornsteinhöhe zur Erzielung bestimmter Leistungen. Zugverhältnisse bei 50 m Schornsteinhöhe.

hängt — wenn ein bestimmter Kessel mit bestimmten Abmessungen der Rauchkanäle in Betracht gezogen wird — von der verlangten Kesselbelastung ab.

Für die in § 34 und 35 schon besprochene Versuchsreihe sind die Zugverhältnisse untersucht und in Fig. 28 zur Darstellung gebracht worden. Es ist zunächst die Rauchgastemperatur am Fuchs und die am Fuchs erforderliche Zugstärke als abhängig von der Belastung aufgetragen. Daraus läßt sich dann die mindestens erforderliche Höhe des Schornsteines berechnen, wie an dem Versuch J (vgl. § 31) gezeigt sei. Bei diesem Versuch war die Fuchstemp. mit $t_f = 347^\circ\text{C}$, die Zugstärke am Fuchs $h = 15,5$ mm WS gemessen worden. Nun läßt sich aus der Zusammensetzung der Rauchgase (Tabelle 9) am Fuchs deren spezifisches Gewicht im Normalzustand zu $1,33 \text{ kg/m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right)$ berechnen. (Wegen der Berechnung vergleiche man § 34, wo sie für das

Flammrohrende gegeben ist.) Die Gase am Fuchs haben dann das spezifische Gewicht $1,33 \cdot \frac{273}{273 + 347} = 0,586 \text{ kg/m}^3$, vorausgesetzt, daß der Barometerstand 760 mm ist. (Der Unterdruck im Fuchs kann gegen den Barometerstand vernachlässigt werden.) Demgegenüber hat die Außenluft ein spezifisches Gewicht, das wir für 0°C und daher mit $1,293 \text{ kg/m}^3$ in Ansatz bringen wollen. Der Unterschied $1,293 - 0,586 = 0,707 \text{ kg/m}^3$ ist zugleich der durch 1 m Standhöhe erzeugte Druckunterschied in kg/m^2 oder mm WS: je 1 m Schornsteinhöhe erzeugt $0,707 \text{ mm WS Zug}$. Sind insgesamt 15,5 mm WS nötig, so muß der Schornstein $15,5 : 0,707 = 21,9 \text{ m}$ hoch sein.

So errechnet sich für jede Leistung eine bestimmte erforderliche Schornsteinhöhe, wie Fig. 28 es zeigt; die erforderliche Schornsteinhöhe nimmt (stets) mit der verlangten Leistung zu. Umgekehrt ergibt sich zu jeder etwa vorhandenen Schornsteinhöhe eine bestimmte höchstens erreichbare Leistung.

Der untersuchte Kessel wurde durch einen 50 m hohen Schornstein bedient; es sind also nach Fig. 28 Belastungen der Heizfläche von $43 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ an ihm erzielbar. Die Fuchstemperatur wird dabei 490°C werden, die Zugstärke 41 mm WS.

Tatsächlich erreichte aber nach Fig. 23 der Rauchschieber seinen Anschlag (entsprechend 60 cm Schieberöffnung) schon bei einer Heizflächenbelastung von $2280 : 64,6 = 35,3 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$. Diese Minderleistung erklärt sich wie folgt: Zunächst sind die Temperaturverluste der Gase im Schornstein und die Druckverluste durch Reibung derselben im Schornstein und im Hauptfuchskanal (zwischen Schornsteinfuß und Rauchschieber) zu beachten. Beide wirken dahin, daß im Rauchschieber — bei gegebener Schornsteinhöhe und Fuchstemperatur — ein etwas geringerer Zug gemessen wird, als der obigen Rechnung entspricht; beide Einflüsse sind aber nach § 42 nicht bedeutend, jedenfalls nicht bei dieser Anlage und wohl meist nicht, solange der Schornstein nicht überlastet ist. Der Widerstand der Rauchkanäle im Kessel kommt hier natürlich nicht in Frage, da zu seiner Überwindung ja gerade die „erforderliche“ Zugstärke verlangt und verwendet wird.

Die wesentliche Ursache dafür, daß der Kessel nicht die nach der Schornsteinhöhe zu erwartende Leistung erreicht, ist darin zu erblicken, daß nicht er allein seine Rauchgase in den Schornstein entläßt. Es waren noch Kessel vorhanden, die anderen Zwecken dienten und daher — bei Ausführung des Höchstleistungsversuches — nicht gleichzeitig forciert betrieben wurden. Sie lieferten kältere Abgase, im Schornstein entstand eine Mischtemperatur, auf die die Abgastemperatur des untersuchten Kessels nicht den ausschlaggebenden Einfluß hatte.

In dem 50 m hohen Schornstein hätte bei Versuch *J* eine Zugstärke von $50 \times 0,707 = 35,4 \text{ mm WS}$ entstehen müssen, die durch den Rauchschieber auf 14,5 mm abzudrosseln (eigentlich: anzustauen) war. In Fig. 28 ist die Zugstärke bei 50 m Schornsteinhöhe eingetragen; es sind also bei kleineren Belastungen erhebliche Werte der Zugstärke abzudrosseln.

Nun lieferte aber der Schornstein nicht die durch die letztgenannte Kurve gegebene, mit der Belastung steigende Zugstärke, sondern unter dem Einfluß der anderen konstant und mäßig belasteten Kessel war die Temperatur im Schornstein etwa konstant und die von ihm gelieferte Zugstärke dauernd etwa 22 mm WS. Die Kesselleistung war also hierdurch beschränkt, wie die Versuche es zeigen. —

Unsere Darlegungen lassen die erzielbare Höchstleistung nicht als eine Eigenschaft des Kessels allein erscheinen. Die Höchstleistung hängt ab von der im Schornstein erzielten Zugstärke; diese bedingt eine bestimmte Schornsteinhöhe, wenn der Kessel allein auf den Schornstein arbeitet. Ist das nicht der Fall, so hat die Abgastemperatur und daher die Belastung der parallel arbeitenden Kessel wesentlichen Einfluß auf die Zugerzeugung und begrenzt damit zugleich die Leistung des untersuchten Kessels. — Es liegt ein Fall gegenseitiger Beeinflussung mehrerer parallel arbeitender Maschinen vor, wie ähnliche in § 6 besprochen werden.

Mehrere parallel auf einen Schornstein arbeitende Kessel kann man nur gemeinsam auf die insgesamt höchste Leistung bringen. Außerdem ist in jedem Fall eine Steigerung der Belastung auf den allerhöchsten Wert nur allmählich möglich, nach Maßgabe der Erwärmung des Schornsteinkörpers. Vermeidung von Nebenluft (Abdichtung des Mauerwerks) ist wesentlich. Es ist besser, einige der benachbarten Kessel forciert als alle mäßig in Betrieb zu haben; bei den außer Betrieb befindlichen Kesseln ist der Rauchschieber dicht abzuschließen.

Die Fig. 28 erweckt den Anschein, als sei die *Höchstleistung des Kessels* bei genügendem Schornsteinzug ganz beliebig zu steigern. Das ist insofern nicht der Fall, als, beim Flammrohrkessel wenigstens, die Beschickung des Rostes auf Schwierigkeiten stößt und die Kesselnähte und -bleche bei allzu großer Forcierung leiden.

Praktisch liegt bei solchen Untersuchungen die Rechtslage meist so, daß eine gewisse Höchstleistung als erreichbar garantiert ist bei „genügendem“ Zug oder bei „mindestens 20 mm“ Zug, am Rauchschieber des Kessels gemessen. Die unbestimmte Bedingung „genügenden“ Zuges wird man nach üblichen Verhältnissen auf 15 bis 20 mm Zugstärke auszulegen haben. Ist aber eine bestimmte Zahl ausbedungen, so entsteht die Frage nach der *Verantwortlichkeit für mangelhaften Zug*, wenn die zugesagte Leistung nicht erreicht wird, obwohl der Schieber ganz offen war, und wenn gleichzeitig die bedungene Zugstärke laut Messung nicht vorhanden war. Die Frage wird nach den Umständen entschieden werden müssen.

Bei Einzelkesseln wird man die Verantwortung dem Lieferer zuschreiben müssen, wenn er wußte oder wissen mußte, daß der Kessel mit einem vorhandenen Schornstein ihm bekannter Abmessungen zusammenarbeiten sollte, oder wenn er wußte (wissen mußte), welche Abmessungen dem zu erbauenden Schornstein gegeben werden sollten, diese vielleicht selbst vorgeschlagen hatte. Bei Lieferung an Laien wird man namentlich häufig in die Lage kommen, zu sagen, daß der Lieferer die Zugverhältnisse hätte prüfen und daher die Schornstein-

abmessungen kennen müssen. Gleichzeitige Lieferung mehrerer Kessel zum alleinigen Anschluß an einen Schornstein wird meist ähnlich zu beurteilen sein.

Wo ein oder mehrere Kessel an einen Schornstein anzuschließen waren, in den schon vorhandene Kessel ihre Gase womöglich in solcher Menge einmünden lassen, daß überwiegend sie die Zugstärke bestimmen, da wird der Lieferer jedenfalls verlangen können, daß die benachbarten Kessel gleichzeitig forciert betrieben werden, damit der von ihm verlangte Zug auch erreicht wird. Das Vorhandensein eines Schornsteins von genügender Höhe tut es nicht.

Die Annahme, die am Schornsteinfuß verfügbare Zugstärke hänge nur vom spezifischen Gewicht der Gase ab, trifft nicht mehr zu, wenn der Schornsteinquerschnitt, bei zunehmender Rauchgasmenge, stark belastet ist, so daß die Eigenwiderstände des Schornsteins merklich werden. Der Schornstein ist dann, wenn er nicht genügt, nach § 42 zu untersuchen, wegen der Frage, ob der Schornstein oder der Kessel am Nichterreichen der Höchstleistung die Schuld trage, gelten sinngemäß die gleichen Gesichtspunkte wie für künstlichen Zug (§ 8, 37).

Wir setzen wieder voraus, daß ein Kessel einzeln gegen einen Schornstein arbeitet.

In Fig. 28 gibt der Unterschied zwischen den Kurven 2 und 4 denjenigen Teil der Zugstärke an, der durch Schließen des Rauchschiebers (der Rauchklappe) abgedrosselt werden muß, weil bei gegebener Schornsteinhöhe die Fuchstemperatur höher ist, als der Kessel verlangt. Zu jeder Belastung der Heizfläche gehört ein gewisser Wert dieses Mehrbetrages. Verlangen wir an einem Kessel nur die Steigerung der Heizflächenbelastung bis zu einem bestimmten Wert kleiner als der höchstmögliche, so kann der Überschuß an Zugstärke, statt ihn durch Drosseln des Schiebers zu vernichten, auch nutzbar gemacht werden, insbesondere durch Einbau eines Rauchgasvorwärmers (Economiser), gelegentlich eines Wasserwärmers für Brauchwasser. Der Einbau eines solchen Apparates hat zweierlei Wirkung: der Widerstand seiner Züge beansprucht direkt einen Teil der überschüssigen Zugstärke; ferner geht die Temperatur der zum Schornstein gehenden Gase und damit die erzeugte Zugstärke zurück, das darf aber nicht weiter geschehen, als daß der verbleibende Zug noch für Kessel und Vorwärmer ausreicht. Die Berechnung der zulässigen Vorwärmerleistung sei an einem Beispiel gezeigt.

Die Kurven 1, 2, 4 der Fig 28 sind in Fig. 29 wiederholt. Der Schornstein von 50 m Höhe gestattet an sich Steigerung der Leistung bis auf $43 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$. Werden nur 30 kg/h Dampf auf 1 m^2 Heizfläche erzeugt, so braucht der Kessel 16 mm WS Zug, Punkt *A*; der Vorwärmer soll dabei einen Zugverlust von 8 mm WS verursachen; beide zusammen verlangen also bei 30 kg Heizflächenbelastung 24 mm Zug, Punkt *B*, und allgemein verlangen sie Zugstärken, die durch die parabolische Kurve *2'* gegeben sein werden, je nach der Belastung. Wir projizieren *B* nach *B'* herüber und finden in *C'* die für den Betrieb des mit Vorwärmer ausgestatteten Kessels nötige Rauchgastemperatur;

denn die auf Kurve 1 und 4 übereinander liegenden Punkte geben immer zusammengehörige Werte von Zugstärke und Gastemperatur am Schornstein von 50 m Höhe — gleichgültig mit welchem Kessel arbeitend. Die Höhenlage von C' gibt an, daß die Rauchgase den Vorwärmer mit (mindestens) 170°C verlassen müssen, wenn der Kessel nach Anbau des Vorwärmers noch $30\text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ hergeben soll. Wir projizieren C' deshalb als Punkt C auf die Ordinate der 30 kg Kesselleistung. Strecke CD ist nun der Temperaturabfall, den die Rauchgase im Vorwärmer höchstens erleiden dürfen. Er gehört einer punktweise für verschiedene Heizflächenbelastungen zu ermittelnden Kurve 5 an. Bei 30 kg Belastung können $340 - 170 = 170^\circ$ ausgenutzt werden, also rund die Hälfte der Rauchgasverluste, die der ohne Vorwärmer arbeitende Kessel hat. Durch Vervielfachen mit der Rauchgasmenge und ihrer spezifischen Wärme findet sich die Wärmemenge, die den Gasen entzogen werden darf, und die nach Maßgabe des Wirkungsgrades des

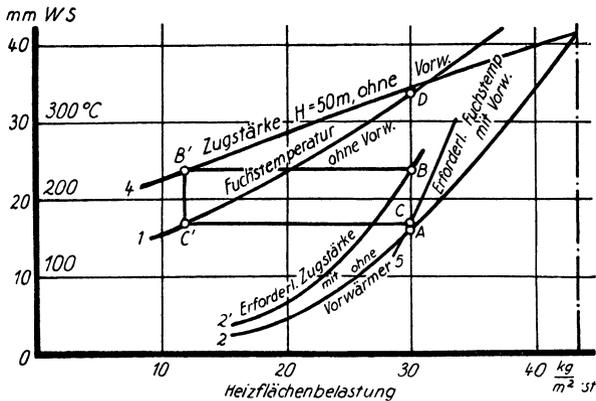


Fig. 29. Zulässige Vorwärmerheizfläche bei Aufrechterhaltung bestimmter Kesselleistung.

Vorwärmers durch Wassererwärmung nutzbar wird. Wegen des starken Unterdruckes im Vorwärmer darf man auch die falsch von ihm angesaugte Luft nicht unbeachtet lassen. — Die Ausführung der Vorwärmerberechnung im einzelnen fällt aus dem Rahmen dieses Buches. —

In den vorstehenden Darlegungen ist die am Rauchschieber verfügbare Zugstärke einfach gleich dem im Schornstein erzeugten, aus der Höhe desselben und der Temperatur der Rauchgase errechneten Auftrieb gesetzt worden. Das bedeutet eine Vernachlässigung der Reibungswiderstände im Schornstein und im Hauptfuchskanal. Meist ist diese Vernachlässigung zulässig (§ 42), bei stark belasteten Schornsteinen jedoch nicht. Theoretisch sinkt die am Schornsteinfuß erzeugte Zugstärke, bei konstanter Temperatur, mit der Menge der zu bewältigenden Rauchgase. Die Verhältnisse werden dann wie bei künstlichem Zug (§ 37). Insbesondere kann dann mangelnde Zugstärke im Einsaugen falscher Luft an irgendwelchen Teilen des Kessels und daraus folgende Förderung von unnötig viel Gas seine Ursache haben, der Mangel ist dann dem Kessel und nicht dem Schornstein zur Last zu legen.

37. Künstliche Zugerzeugungsanlage. An künstlichen Zugerzeugungsanlagen (Saugzuanlagen) ist öfter als an Schornsteinen durch Versuch die Innehaltung gegebener Zusagen festzustellen. Schornsteine pflegen sehr reichlich bemessen zu werden, weil im Fall des Mißerfolges schwer Abhilfe zu schaffen ist. Saugzuanlagen werden meist knapper bemessen, weil zu große Ventilatoren dauernd einen unnützen Energiebedarf haben.

Eine sachgemäß für eine Saugzuanlage abgegebene Gewährleistung lautet wie folgt: Es wird gewährleistet, daß die Saugzuanlage die Abgase von B kg/h Brennstoff von einem unteren Heizwert von ξ Kalorien abführen und dabei die der Gasabführung entgegenstehenden Widerstände bis zu einer Depression von p mm WS überwinden kann; die Rauchgase dürfen dabei am Fuchs nicht über l fachen Luftüberschuß und nicht über t_f ° Temperatur haben. Der Kraftbedarf der Anlage wird N PS nicht übersteigen.

Nicht immer ist der Wortlaut so exakt gefaßt, man findet wohl Gewährleistungen der Form, die Anlage werde die Abgase von B kg/h Brennstoff abführen und p mm WS Zug erzeugen, ordnungsmäßigen Zustand des Kessels und Feuers vorausgesetzt. So unbestimmte Angaben werden doch ähnlich auszulegen sein wie die genauere Formel, und Versuche sind entsprechend vorzunehmen.

Eine Zugerzeugungsanlage ist nämlich einfach als *Gasfördereinrichtung* zu betrachten. Eine solche ist in ihrer Größe bestimmt durch Angabe des zu fördernden Volumens und des Druckes, gegen den die Förderung möglich ist; von beidem hängt die zum Antrieb aufzuwendende Leistung ab. Diese Angaben also sind stets Gegenstand der Garantie. Den besonderen Verhältnissen entsprechend ist die Angabe des zu fördernden Volumens in besondere Form gekleidet. Aus der Menge des Brennstoffes und seinem Heizwert liegt erfahrungswise die zur Verbrennung nötige Luftmenge (annähernd) fest; die Angabe der Luftüberschußzahl begrenzt dann die wirklich zu fördernde Luftmenge dem Gewicht nach, die Angabe der Temperatur (eigentlich auch noch des Barometerstandes) dem Volumen nach. Alle diese Zahlen sollen in ihrer Gesamtheit eine Mengenbestimmung sein, die nur in eine, dem Laienverständnis angepaßte, dem Zweck entsprechende Form gebracht ist. Die Benennung eines gewissen, nicht zu überschreitenden Kohlensäuregehaltes bedeutet also nicht eine Zusage an den Kesselbesitzer, die Zugerzeugungsanlage werde zur Erzielung einer so günstigen Verbrennung verhelfen, sondern eine Forderung des Lieferers der Saugzuanlage an den Kesselbesitzer: die Zugerzeugung könne nur dann B kg/h Brennstoff verbrennen, wenn die Rauchgasmenge nicht unangemessen groß ist. Der Luftüberschuß und die Temperatur am Fuchs sind Daten, die vom Kessel (Dichtheit des Mauerwerkes, Heizfläche) und seiner Betriebsweise abhängen, nicht von der Art der Zugerzeugung. Ähnlich steht es auch mit der Zugstärke. Man darf sich durch die Benennung der Anlage als Zugerzeugungsanlage nicht verleiten lassen, zu meinen, die Erzeugung der p mm WS Zugstärke sei Sache und Zweck der Anlage, und aus dem Fehlen der vollen Zugstärke zu folgern, die An-

lage sei unzureichend. Die richtige Auffassung wird durch den an erster Stelle gegebenen Wortlaut der Gewährleistung angedeutet. Wie groß bei richtiger Rauchgasmenge die Zugstärke am Fuchs ausfällt, hängt vom Widerstand der Feuerzüge ab; wenn der Widerstand geringer ist, als der Berechnung der Saugzuanlage zugrunde lag, so hat man durch Drosseln der Züge oder besser durch Regeln der Umlaufzahl dafür zu sorgen, daß nicht nach den Gesetzen der Kreiselgebläse (oder Strahlgebläse) die Förderung und damit der Kraftverbrauch zu groß wird. Hat man alles gut eingeregelt, so ist ein mäßiger Wert der Zugstärke wegen des kleineren Kraftverbrauches nur ein Vorzug — allerdings der Kessel-, nicht der Saugzuanlage. Die Angabe der Zugstärke in der Garantie begrenzt im Interesse des Lieferers dessen Garantie: die zugesagte Luftmenge brauche nicht mehr, mindestens nicht mehr mit dem genannten Kraftaufwand geliefert zu werden, wenn dazu infolge unerwartet großer Kesselwiderstände die Zugstärke über p mm wachsen müßte. Stellt der Versuch fest, daß die zugesagte Brennstoffmenge nicht ganz verbrannt werden kann, und wird dabei gleichzeitig eine zu große Zugstärke gemessen, so ist der Kessel und sein Lieferer an der Minderleistung schuldig. Um aus den Versuchsdaten, mangels Gelegenheit zu einem zweiten Versuch, zu ermitteln, ob bei richtigem Widerstand der Kesselzüge die Saugzuanlage genügt hätte, kann man sich der Gesetze der Kreiselgebläse (§ 138) bedienen.

Bei der Beurteilung der Frage, ob am Versagen einer Gesamtanlage eine künstliche Zuanlage die Schuld trage, darf man sich nie zu sehr von Reminiszenzen an das Verhalten von Anlagen mit Schornsteinzug beeinflussen lassen. Ein Punkt in dieser Hinsicht ist der folgende: bei Anlagen mit Schornsteinzug bedingen Zug und Verbrennung in der Entstehung einander; bei Anlagen mit Saugzug wird der Zug zunächst zwangsweise hergestellt, die Verbrennung wird erst dann eingeleitet.

Der Unterschied ist gleichartig mit dem zwischen der Dynamomaschine mit Selbsterregung und der magnetelektrischen Maschine mit Fremderregung. Bei ersterer müssen gewisse Bedingungen erfüllt sein, damit die Erregung selbsttätig eintritt, während in jedem Fall eine Maschine, ist sie erst einmal in Gang, Strom weiter liefern kann auch bei Erregung durch eigenen Strom. Ähnlich kann es bei der schornsteinbetriebenen Feuerungsanlage vorkommen, daß der Schornstein, einmal angewärmt, dauernd weiterhin Zug gibt, daß aber erstmalig die Zugerzeugung nicht in Gang kommt deshalb, weil die von den Feuer gasen durchstrichene Heizfläche in kaltem Zustande zu groß ist und daher die Auskühlung der Heizgase zu weit geht; hinderlich ist es in diesem Fall stets, wenn die Feuergase nicht gleich hinter dem Rost aufzusteigen haben, und wenn irgendwo im Verlauf der Züge ein längerer absteigender Weg zu durchmessen ist, den die Feuergase nicht überwinden können. Aber auch zu großer Durchmesser des Schornsteins kann die Ursache dafür sein, daß Selbsterregung ausbleibt. Es ist bekannt, daß man bei Stubenöfen dann durch schnelles Verbrennen, z. B. von Papier, Abhilfe schafft, oder daß man mittels eines am Schornsteinfuß abgebrannten Lockfeuers den Zug erstmalig in Gang bringt.

Tabelle 11. Verluste in
Länge rd. 30 m, Durchmesser 150, 125, 110 mm. Ganze Oberfläche
Die Leitung ist isoliert,

Versuch Nr.		F
1	Dampfabgabe des Kessels D_1 ¹⁾	kg/h 556
2	Dampfzustand: Druck p_1	at 13,05
3	„ Temperatur t_1	°C 255
4	„ Wärmeinhalt i_1	kcal/kg 705,6
5	Wärmeaufnahme der Leitung $D_1 \cdot i_1$	1000 kcal/h 392,1
6	Leitungskondensat D'	kg/h 45,8
7	Dampfabgabe der Leitung $D_2 = D_1 - D'$	kg/h 510
8	Dampfzustand: Druck p_2	at 12,95
9	„ Temperatur t_2	°C 190?
10	„ Wärmeinhalt i_2	kcal/kg < 668,8
11	Wärmehergabe der Leitung $D_2 \cdot i_2$	1000 kcal/h > 341,1
12	Verlust in der Leitung: Druck $p_1 - p_2$	at 0,10
13	„ „ „ „ Temperatur $t_1 - t_2$	°C (65)
14	„ „ „ „ Wärmemenge $D_1 \cdot i_1 - D_2 \cdot i_2$	1000 kcal/h > 51
15	„ „ „ „ „	% > 13,0
16	Flüssigkeitswärme q' zu $\frac{1}{2} \cdot (p_1 + p_2)$	kcal/kg 193
17	Aus dem Kondensat rückgewinnbar $D' \cdot q'$	1000 kcal/h 8,8
18	Verlust an Wärme bei Rückgewinnung der Kondensatwärme „	> 42
Der Rückgewinn beträgt:		
19	bezogen auf die nutzbar übertragene Wärme	% (2,6)
20	bezogen auf den Verlust	% 20,8
21	Mittlere Temperatur der Leitung $\frac{1}{2} \cdot (t_1 + t_2) = t_m$	°C (222)
22	Überschuß über die Umgebung $t_m - 25$	°C (197)
23	Wärmeverlust für 1 m ² und 1 °C	kcal/m ² · °C · h
Bis herab zu 0,2 at Gegendruck:		
24	Wärmegefälle am Anfang i'	1000 kcal/h
25	Wärmegefälle am Ende der Leitung i''	„
26	Theoretische Arbeitsausbeute am Anfang $D_1 \cdot i'$	„
27	Theoretische Arbeitsausbeute am Ende der Leitung $D_2 \cdot i''$	„
28	Arbeitsverlust infolge der Leitungsverluste	„
29	Derselbe	%
Bis herab zu 1 at Gegendruck:		
30	Wärmegefälle am Anfang i'	1000 kcal/h
31	Wärmegefälle am Ende der Leitung i''	„
32	Theoretische Arbeitsausbeute am Anfang $D_1 \cdot i'$	„
33	Theoretische Arbeitsausbeute am Ende der Leitung $D_2 \cdot i''$	„
34	Arbeitsverlust infolge der Leitungsverluste	„
35	Derselbe	%

1) Die Zahlen weichen von denen der Tab. 8 etwas ab, weil sie sich auf eine

Die fehlende Selbsterregung hat also nicht immer im Schornstein, meist wird sie in der Feuerung ihre Ursache haben.

38. Verluste in einer Dampfleitung. In Tabelle 11 sind Beobachtungen zusammengestellt, die einerseits am Dampfkessel, andererseits an der zugehörigen Dampfmaschine gemacht waren, so daß dadurch also die Werte vom Anfang und vom Ende der zwischenliegenden

einer Dampfleitung.

unumhüllt mit einigen toten Enden rd. 12,7 m².
auch an den Flanschen.

<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>J</i>	<i>E</i>
936	988	1430	1831	2195
12,87	12,72	12,71	12,51	12,42
269	284	279	313	310
713,3	721,4	718,8	736,7	735,3
667,5	712,5	1027	1348	1613
23,2	17,8	16,0	12,7	10,0
913	970	1414	1818	2185
12,67	12,65	12,52	12,25	12,07
187	186	195	229	229
< 668,6	668,6	672,2	692	692,1
> 610,5	648,5	950	1257	1511
0,20	0,07	0,19	0,26	0,35
(82)	98	84	84	81
> 57	64	77	91	102
> 8,6	9,0	7,5	6,7	6,3
192	192	192	191	190
4,45	3,4	3,1	2,4	1,9
> 53	61	74	89	100
(0,73)	0,52	0,33	0,19	0,13
8,4	5,6	4,2	2,7	1,9
(228)	235	237	271	270
(203)	210	212	246	245
	24,0	28,6	29,1	32,8
	171,7	170,6	177,8	176,8
	152,7	155,2	160,0	160,0
	169,6	243,9	325,5	388,1
	148,1	219,4	290,9	349,6
	21,5	24,5	34,6	38,5
	12,7	10,2	10,6	9,9
	116,4	115,9	121,2	120,6
	101,8	103,7	107,0	106,9
	115,0	165,7	221,9	264,7
	98,7	146,6	194,5	233,6
	16,3	19,1	27,4	31,1
	14,2	11,5	12,3	11,8

andere Versuchsdauer beziehen.

nicht überhitzt, bei *F* und *B* wird er zweifellos feucht sein, die dadurch beeinflussten Werte sind entweder in Klammern gesetzt oder mit den Zeichen > und < gekennzeichnet.

Beobachtet wurde die aus der Leitung ausgeschiedene Wassermenge. Am Ende der Leitung befand sich ein Wasserabscheider, das abgeschiedene Wasser wurde in üblicher Weise durch einen Wasserableiter hin-

Dampfleitung miteinander verglichen werden. Die genauen Abmessungen der Leitung werden nicht gegeben, weil sie sich aus Stücken verschiedenen Durchmessers zusammensetzt, so daß eine Nachrechnung der Druckverluste umständlich wäre; nur die gesamte äußere Oberfläche der unverkleidet gedachten Leitung sei mit rund 12,7 m² angegeben; die Leitung war dann mit Ausnahme der Flanschen in üblicher Weise isoliert.

Die durch die Leitung gehende Dampfmenge war verändert worden. Dabei hätte man nun sachgemäß die Überhitzungstemperatur unverändert lassen sollen. Änderung der Anfangs- — oder auch der verlangten End- — Überhitzungstemperatur bei unveränderter Menge hätte dann eine weitere Reihe gegeben. Die vorliegende Reihe, einer Gelegenheit entstammend, ist so sauber nicht durchgeführt, und die Überhitzung hat daher jederzeit den Wert, den der Kessel ihr spontan erteilt, vergleiche Fig. 21, § 34. Der Einfluß der Menge und der Überhitzung überlagern sich also. Bei den drei Versuchen *F*, *B* und *C* ist der Dampf am Ende der Leitung noch

durch herausgenommen. Damit von dem heißen Kondensat nicht viel verdampft, muß entweder eine Kühlschlange angewendet werden, oder einfacher, man läßt das Kondensat durch ein Rohr mit eintauchender Mündung in einen halb mit kaltem Wasser gefüllten Behälter ablaufen, der auf einer Wage steht, um die Gewichtszunahme zu beobachten.

Das *Leitungskondensat* nimmt mit der abnehmenden Dampfenahme allmählich zu; das scheint nicht nur eine Folge der abnehmenden Überhitzung zu sein, denn von Versuch *J* bis *E* hat sich die Überhitzung kaum verändert. Bemerkenswert ist, daß Kondensat noch dann abgeschieden wird, wenn die Leitung durchweg überhitzten Dampf führt. Wenn jedoch bei Versuch *F* und *B* Teile der Leitung ohne Überhitzung bleiben, dann wird die abgeschiedene Menge gleich erheblich größer.

Aus den Angaben des Druckes und der Temperatur am Anfang und am Ende der Leitung ergibt sich der Druckverlust und der Temperaturverlust in der Leitung; ersterer nimmt mit der Dampfmenge zu — unregelmäßig, weil die Messung mittels einfacher Manometer für den Zweck nicht genügt. Aus den gleichen Angaben folgt der Wärmeinhalt des Dampfes an beiden Stellen, und durch Vervielfachen mit der Dampfmenge läßt sich finden, wieviel Wärme der Dampf einerseits in die Leitung hineinführt, wieviel er andererseits aus ihr herausgibt. Der Unterschied ist der Wärmeverlust in der Leitung: er nimmt mit steigender Dampfmenge kräftig zu, prozentisch nimmt er jedoch ab. Der prozentische Verlust beträgt schon bei der vorliegenden kurzen Leitung mehrere Prozente.

Der *Wärmeverlust* ist belegt durch den Temperaturverlust und andererseits durch das, was dem Kondensat an latenter und an Flüssigkeitswärme entspricht. Letztere ist jedoch nicht unbedingt verloren, sie kann rückgewonnen werden, indem man das Kondensat verlustlos, also mit der Kondensationstemperatur wieder in den Kessel speist. Die durch Rückspeisung gewinnbare Wärmemenge ist das Produkt aus der Kondensatmenge D' und (sehr annähernd) der Flüssigkeitswärme q' , die dem mittleren Druck $\frac{1}{2}(p_1 + p_2)$ entspricht. Der Verlust, der durch Rückspeisung vermieden werden könnte, ist nicht eigentlich der Leitung zur Last zu legen. Er macht bei der vorliegenden kurzen Leitung nur einen kleinen Prozentsatz der übertragenen Wärmemenge aus, dagegen einen erheblichen Prozentsatz der Verluste. Wenn also bei einer längeren Leitung die Verluste überhaupt und damit die Kondensationsmengen bedeutend werden — bei Fernheizleitungen —, so wächst auch das, was durch Rückspeisung zu bessern ist — oder durch Verminderung der Kondensatmengen bei Anwendung von Überhitzung.

Daß übrigens der Wärmeverlust nicht nur proportional der Temperatur gesteigert wird, zeigt die Berechnung des Wärmeverlustes für 1° Temperaturunterschied, Zeile 23. Diese Zahl steigt, teils infolge der größeren Dampfgeschwindigkeit — Steigerung der Konvektion im Inneren der Leitung —, teils infolge zunehmenden Strahlungsanteiles.

Der Wärmeverlust bei vorliegender Leitung machte 6,3 bis über 13,0%

der durchgehenden Wärmemenge aus. Größer ist der Verlust, den die Arbeitsfähigkeit des Dampfes erleidet. Er berechnet sich im Beispiel des Versuches *D* wie folgt: Dem Anfangszustand des Dampfes 12,71 at, 279 °C entspricht, dem *i s*-Diagramm (§ 57, 71) zu entnehmen, ein Wärmefälle, herab bis zu 0,2 at Kondensatordruck gerechnet, von 170,6 kcal/kg, entsprechend $170,6 \cdot 1430 = 243\,900$ kcal/h in der Dampfmenge, die in die Leitung tritt. Dem Zustand des Dampfes am Ende der Leitung entspricht, bis zum gleichen Druck herab, nur noch 155,2 kcal/kg oder 219 300 kcal/h in der aus der Leitung tretenden Menge. Der Verlust an Arbeitsfähigkeit ist also $243\,900 - 219\,300 = 24\,600$ kcal/h oder 10,1% der ursprünglichen Arbeitsfähigkeit von 243 900 kcal/h.

Der *Verlust an Arbeitsfähigkeit* (10,1%) ist also größer als der Wärmeverlust (7,5% bei Versuch *D*); noch größer (11,4%) wird der Verlust an Arbeitsfähigkeit, wenn wir als untere Grenze der Ausnutzbarkeit 1 at einführen statt 0,2 at (Auspuff- statt Kondensationsbetrieb). Bei Bemessung der Dampfleitung von Maschinenanlagen sollte auf tunliche Verringerung der Verluste an Arbeitsfähigkeit gesehen werden; diese erhöhen sich, wie der Anblick des *i s*-Diagrammes ohne weiteres zeigt, sowohl bei zu enger Leitung durch Drosselung als auch bei zu weiter Leitung durch Temperaturverlust.

Die prozentischen Verluste sind hierbei von der in die Leitung hineingehenden Menge gerechnet, so wie man die Verluste am Dampfkessel, an der Gasmaschine zu beziehen pflegt.

b) Verbrennung.

39. Allgemeines. Am Dampfkessel sind zwei Vorgänge deutlich unterscheidbar: die Erzeugung der Wärme in der Feuerung und die Übertragung der Wärme auf das Wasser durch die Heizfläche hindurch. Beide Vorgänge kommen unabhängig vom Dampfkessel auch anderweit vor und können dann für sich untersucht werden. Insbesondere sind beide im bisherigen nur in ihrem Endergebnis untersucht worden; besonders aber der Verbrennungsvorgang fester Brennstoffe ist ein so komplexer, aus zeitlich oder räumlich verschiedenen Bestandteilen zusammengesetzter Vorgang, daß eine Untersuchung im einzelnen sehr lehrreich ist.

Am einfachsten und klarsten lassen sich die grundsätzlich wichtigsten Vorgänge an der Verbrennung von Koks erläutern, wie sie im Schachtofen erfolgt (§ 40). Zur Vereinzelung der Vorgänge bei der Verbrennung von Steinkohle eignet sich der Kettenrost (§ 41).

40. Verbrennung von Koks im Schachtofen. Im Schachtofen geht Luft von unten in die Brennstoffschicht hinein. Bei der Verbrennung von Koks, zumal nachdem er längere Zeit durchgebrannt ist, so daß Schwefel und Wasserstoff ausgetrieben sind, kommt sie in Berührung mit reinem Kohlenstoff C. Sie reichert sich beim Durchstreichen der Kohlenstoffschicht mit Kohlenstoff an und bildet dadurch Kohlensäure CO₂ oder Kohlenoxyd CO. Wir wollen verfolgen, wie diese Anreicherung innerhalb der Brennstoffschicht allmählich vor sich geht; sie ent-

spricht etwa dem Vorgang, wenn sich eine Schicht eines festen Körpers in einer hindurchströmenden Flüssigkeit auflöst und diese sich beim Hindurchströmen allmählich anreichert.

Die Versuchseinrichtung zeigt Fig. 30. Durch einen gewöhnlichen eisernen Ofen ist zentral ein kaltwarmes Rohr (Techn. Mess. § 122) hindurchgesteckt.

Das Rohr ist verschiebbar und kann in verschiedener Höhe durch ein Stützblech abgestützt werden. Das Rohr wird in leicht ersichtlicher Weise von unten her mit Wasser gespeist, das erwärmte Wasser läuft nach oben ab. Bei c_1 und d_1 ist das kaltwarme Rohr angebohrt und an die Bohrung nach innen ein Kupferrohr von 1 mm lichter Weite angeschlossen, das bald in ein weiteres übergeht. Aus den beiden Öffnungen wird Gas nach unten und nach oben abgesaugt, und zwar je nach der Einstellung des Rohres aus verschiedener Höhenlage der Brennstoffschicht. Ist der Ofen auf die Brücke einer Dezimalwage gesetzt, so kann man auch die Abnahme des Brennstoffgewichtes und daher den Abbrand messen. Dazu muß dann der Wasserinhalt im Wasserkreislauf unverändert erhalten werden mittels eines Überlaufes, durch den stets Wasser abtropfen soll, so wie vom Jun-

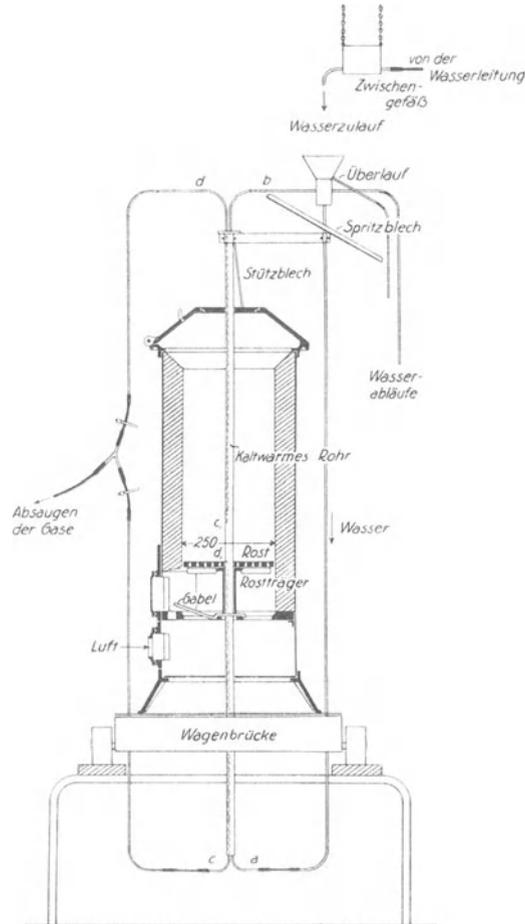


Fig. 30. Versuchseinrichtung zur Untersuchung der Verbrennung von Koks.

kers - Kalorimeter bekannt (Techn. Mess. § 113). — Bei eisernen Öfen pflegt der Rost tiefer zu liegen als in Fig. 30, Luft tritt dann auch durch einen Hängerost zum Brennstoff, und eine bestimmte Höhenlage des Brennstoffes über dem Rost läßt sich nicht angeben. Diese Unsicherheit zu vermeiden, ist der Rost in Fig. 30 höher gelegt worden; er wird durch einen kreuzförmigen Rostträger gehalten, der mit dem Rost am kaltwarmen Rohr herabgleiten kann, wenn man die ihn stützende Gabel fortzieht.

Zum *schnellen Absaugen der Gase* aus verschiedenen Höhenlagen, zu praktisch gleicher Zeit aus mindestens vier Höhenlagen, dient die Flaschenanordnung Fig. 31. Die Flaschen II und III bilden einen Aspirator zum Freisaugen der Leitung, Flasche I steht tief genug, damit sich in sie hinein das Wasser aus den Flaschen 1 bis 4 entleert, sobald man die Quetschhähne öffnet.

Mittels des Orsatapparates wird nun in schneller Folge für verschiedene Höhenlagen der Gehalt der Gase an Kohlensäure und an Sauerstoff bestimmt. Prozentisch sei er mit k und o bezeichnet. Unter der Annahme, daß reiner Kohlenstoff verbrennt, läßt sich dann auch der *Anteil der übrigen Bestandteile*, Kohlenoxyd und Stickstoff, in den Gasen an der gleichen Stelle *durch Rechnung finden*, wir bezeichnen ihn prozentisch mit c und n . Die Luftüberschuszahl sei l .

Erstens gilt nämlich

$$k + o + c + n = 100. \quad (1)$$

Weiter ist bekannt, daß beim Übergang von Sauerstoff durch Kohlenstoffaufnahme in Kohlensäure keine Volumenvermehrung stattfindet, daß aber beim Übergang von Sauerstoff durch Kohlenstoffaufnahme in Kohlenoxyd eine Vergrößerung des Volumens auf das Doppelte des verbrauchten Sauerstoffs erfolgt. Da nun ursprünglich Sauerstoff und Stickstoff in der Luft im Verhältnis 21:79 gemischt sind, so muß auch sein

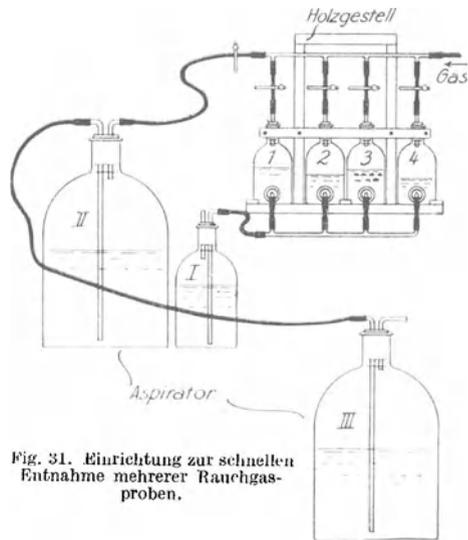


Fig. 31. Einrichtung zur schnellen Entnahme mehrerer Rauchgasproben.

$$\frac{k + o + \frac{1}{2} c}{n} = \frac{21}{79} \dots \dots \dots (2)$$

Da k und o gemessen sind, so sind also nur n und c in den Gleichungen 1 und 2 unbekannt und lassen sich ausrechnen. Es wird

$$c = 42 \cdot \frac{100}{121} \cdot \left(1 - \frac{k + o}{21}\right) \dots \dots \dots (3)$$

$$n = 79 \cdot \frac{100 + (k + o)}{121} \dots \dots \dots (4)$$

Diese Formeln ergeben richtig als Grenzwert, daß für $k + o = 21$ wird: $c = 0$, $n = 79$ (vollkommene Verbrennung). Andererseits für $k + o = 0$ wird: $c = 42 \cdot \frac{100}{121} = 34,7$; $n = 79 \cdot \frac{100}{121} = 65,3$ (ganz unvoll-

kommene Verbrennung). Weil nämlich im letzteren Fall 21 Raumteile Sauerstoff der Luft 42 Raumteile Kohlenoxyd ergeben haben, und weil daher aus 100 Raumteilen Luft 121 Raumteile Verbrennungsgas werden, so erklärt sich daraus der Bau der Formeln, deren Ergebnisse Fig. 32 darstellt. — Für die Rechnung schreibt man bequemer

$$c = 34,7 - 1,65 \cdot (k + o) \dots (3a)$$

$$n = 0,653 \cdot (100 + k + o) \dots (4a)$$

Setzen wir diese Werte von c und n in die übliche Luftüberschußformel (Techn. Mess. § 116)

$$l = \frac{n}{n - \frac{79}{21} \cdot \left(o - \frac{1}{2} c \right)} \dots (5)$$

ein, so ergibt sich durch längere, aber einfache Umformungen

$$l = \frac{100 + (k + o)}{200 \cdot \frac{21 - o}{21} - \frac{79}{21} \cdot k} \dots (6)$$

oder für die Rechnung bequemer

$$l = \frac{100 + (k + o)}{200 - 5,78 \cdot o - 3,76 \cdot (k + o)} \dots (6a)$$

Gleichung (5) gilt bekanntlich allgemein, Gleichung (6) und (6a) gelten jedoch nur für reinen Kohlenstoff.

Man kann auch die gesamte Menge der Luft bzw. der Verbrennungsgase und daraus weiterhin finden, wie die insgesamt abbrennende Kohlenmenge aus den einzelnen Höhenlagen entnommen wird. Die insgesamt abbrennende Kohlenmenge B ist nämlich mittels der Wage bestimmt, auf der der ganze Ofen (Fig. 30) steht, und durch Analyse der Abgase im Fuchs ist der endgültige Luftüberschuß l_0 ermittelt; so hat man die in den Brennstoff eingetretene Luftmenge L_1 aus der Gleichung

$$L_1 = 8,85 \cdot B \cdot l_0 \dots (7)$$

Es ist nämlich

$$L_{\min} = \frac{32}{12} \cdot \frac{100}{21} \cdot B \cdot \frac{1}{1,43} = 8,85 \cdot B$$

die zur Verbrennung von B kg Kohlenstoff theoretisch erforderliche Luftmenge in $\text{m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right)$, hierin 1,43 kg das Gewicht von $1 \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right) \text{ O}_2$.

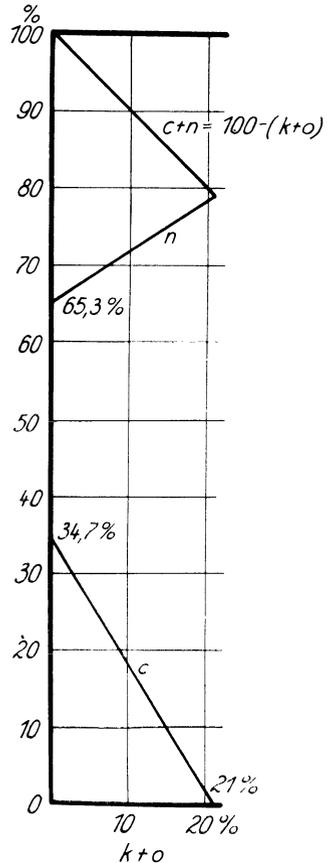


Fig. 23.
Gaszusammensetzung bei Verbrennung von Kohlenstoff.

Diese Luftmenge ist, da der Ofenschacht luftdicht ist, für alle Höhenlagen über dem Rost dieselbe wie oberhalb der ganzen Brennstoffschicht. Hat man also die Luftüberschußzahl l im Inneren der Schicht, und zwar h m über dem Rost, gemessen, so gilt nun umgekehrt

$$b = \frac{L_1}{8,85 \cdot l} \dots \dots \dots (7a)$$

als diejenige Brennstoffmenge, die vom Rost bis herauf zu jener Höhenlage h abgebrannt ist, wo eine Luftüberschußzahl l ermittelt wurde: der *Abbrand* vom Rost bis zur Höhe h . Der Abbrand in der Höhenlage h dagegen wäre durch den Ausdruck $\frac{db}{dh}$ gegeben. — Es ist $b = \int_0^h \frac{db}{dh} \cdot dh$ und $B = \int_0^H \frac{db}{dh} \cdot dh$, wenn H die ganze Schichthöhe ist.

Man kann den Abbrand auf den Ofenquerschnitt oder aber auf 1 m^2 Ofenquerschnitt beziehen.

Die Rechnung gilt nicht nur für die Höhenlagen vollkommener Verbrennung zu CO_2 , sondern wegen der Allgemeingültigkeit von Formel (5) ohne weiteres für die Höhenlagen, wo die Luftüberschußzahl unter $l = 1$ herabging; denn auch die Formeln (6) und (6a) beachten verkappt den CO-Gehalt.

Man kann weiter *den Beitrag der einzelnen Höhengschichten zur Wärmeerzeugung* finden. Bei vollkommener Verbrennung von b kg Kohlenstoff entsteht zunächst die Wärmemenge

$$Q_1 = 8140 \cdot b \dots \dots \dots (8)$$

Da indessen der Heizwert des Kohlenstoffs beim Übergang zu *CO* nur 2440 kcal/kg (statt 8140) ist, so werden bei nachgängiger Reduktion der CO_2 zu *CO* wieder gebunden $8140 - 2440 = 5700$ kcal bezogen auf 1 kg verbrannten Kohlenstoffs, und da bis zur Höhenlage h die Kohlenstoffmenge $b \cdot \frac{c}{c+k}$ zur Bildung von *CO* verwendet worden ist, so wird durch Reduktion die Wärmemenge

$$Q_2 = 5700 \cdot b \cdot \frac{c}{c+k} \dots \dots \dots (8a)$$

wieder gebunden sein.

Bis zur Höhe h ist dann jederzeit die Wärmemenge

$$Q = Q_1 - Q_2 \dots \dots \dots (8b)$$

in Freiheit gesetzt.

Beispiele zweier ausgeführter Versuche¹⁾ gibt Tabelle 12 und Fig. 33 bis 36. Die Zugstärke und daher der Abbrand ist beidemal merklich verschieden: 1,59 gegen 3,8 kg/h.

Der Luftüberschuß bleibt über $l = 1$ bis zu etwa 100 mm Höhe über dem Rost, bis dahin sind die Gase oxydierend; weiterhin ist $l < 1$,

¹⁾ Ausführlicher besprochen in Feuerungstechnik 1917, Nr. 1, 2 und 3.

die Gase sind reduzierend, Abbrand und Wärmeentwicklung nehmen nur noch langsam zu. In 100 mm Höhe findet sich also, scheinbar unabhängig von der Rostbelastung, eine *neutrale Zone*.

Jeden Rost mit gegebener Schichthöhe kann man betrachten als den unteren Teil des Füllschachtes bis zu eben derselben Höhe h über dem Rost — vorausgesetzt natürlich, daß auch Koks verbrennt und daß die auf den Quadratmeter Querschnitt durchgesaugte Luftmenge dieselbe, die Zugstärke also entsprechend schwächer ist.

Durch die Versuche wird widerlegt oder doch als ungenau gekennzeichnet die *übliche Ausdrucksweise, unvollkommene Verbrennung sei die Folge von Luftmangel*, und namentlich: zu großer *Luftüberschuß* sei eine *Folge der Zuführung von zu viel Luft*. Durch die Menge richtig zugeführter Luft wird nicht die Zusammensetzung der endgültigen

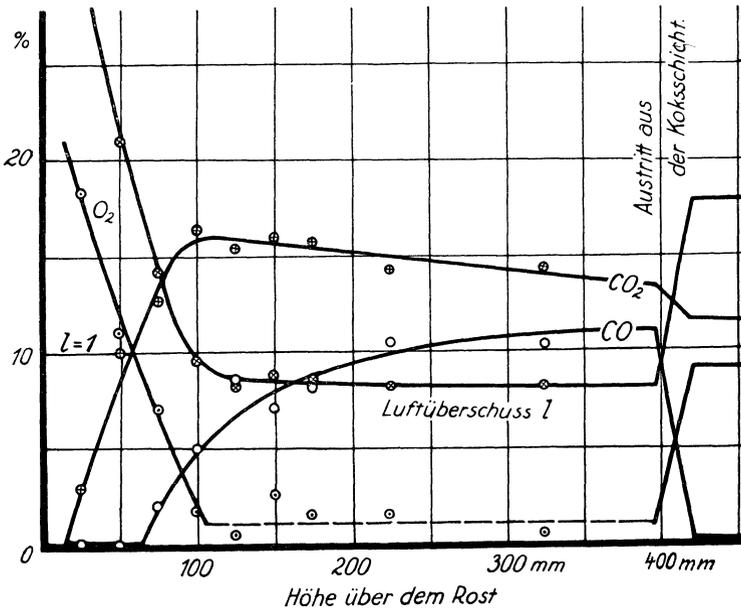


Fig. 33. Verbrennung von Koks bei mäßiger Rostbelastung.

Rauchgase, sondern nur die Menge abgebrannter Kohle festgelegt. Die Zusammensetzung der Rauchgase aber hängt ab von der Höhe der Kohlerschicht und von der Zuführung von Nebenluft. Hohe Kohlerschicht ergibt CO-Bildung und verlangt daher die Zuführung einer genügenden Menge von Sekundärluft oberhalb der Schicht. Luftüberschuß aber rührt entweder von zu geringer Schichthöhe her oder aber davon, daß durch Löcher in der Schicht oder Undichtheiten des Verbrennungsraumes falsche Luft, vielleicht auch richtige Sekundärluft in zu großer Menge, angesaugt wird. — In Tabelle 12 sind die Primär- und die Sekundärluft in leicht ersichtlicher Weise getrennt ermittelt. In Fig. 37

ist schematisch gezeigt, wie der gleiche Abbrand entweder (Fall I) bei niedriger Schichthöhe mit Primärluft allein oder (Fall II) bei großer Schichthöhe unter Zuführung von Sekundärluft erfolgen kann, wobei dann natürlich die Primärluft um ebensoviel zu vermindern ist.

In chemischer Hinsicht mag bemerkt werden: In Fig. 38 sind die nach thermodynamischen Gesetzen festliegenden *Gleichgewichtsdrucke* von Kohlensäure und Kohlenoxyd gegeneinander dargestellt. Der gesamte volumetrische Anteil beider Bestandteile $k + c$ ist nach den Versuchen Tabelle 12 schon bald über dem Rost größer als 10%, er steigt bis etwa 23%; bei rund 1 at absolutem Druck im Ofenschacht ist also der gesamte Teildruck der beiden Bestandteile p_{k+c} zwischen 0,1 und

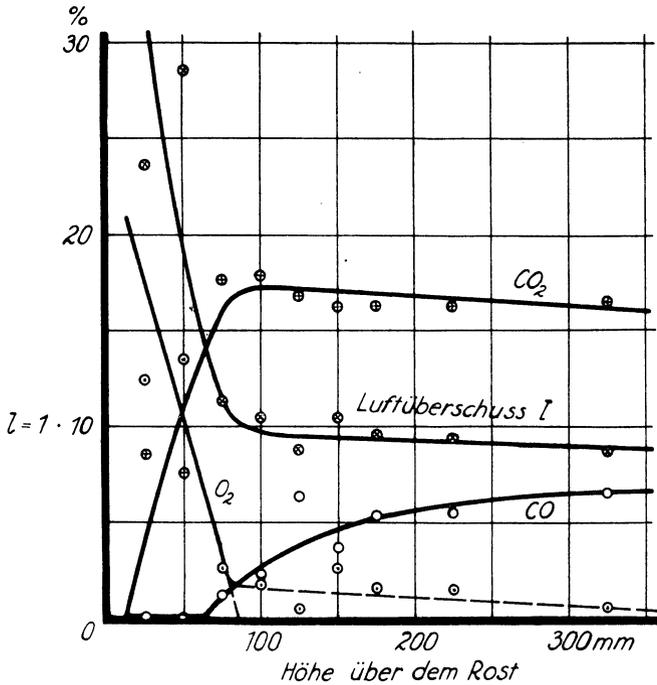


Fig. 34. Verbrennung von Koks bei hoher Rostbelastung.

0,23 at, und die Werte des Gleichgewichtes liegen daher wenig rechts von den in Fig. 38 ersichtlichen Kurven $p_{k+c} = 0,1$ at. Die Temperaturen sind nach dem Ansehen der Kohlenglut für die beiden Versuche zu 650° und 900°C geschätzt; die Dissoziationszahl $\alpha = \frac{c}{c+k}$ in Tabelle 12 geht bis 0,42 bei Versuch 1 und bis 0,28 bei Versuch 2. Danach sind wir bei Versuch 1 dem Gleichgewicht „bei Anwesenheit von C“ zum Schluß nicht mehr fern, bei Versuch 2 dagegen sehr weit davon ab. In jedem Fall liegt der wahre Zustand zwischen den Kurven „bei Anwesenheit“ und „bei Abwesenheit“ von C.

Tabelle 12. Verbrennung von Kohlen-
Schachtdurchmesser 250 mm, also

Versuch Nr.		1					
1	Abbrand B kg/h	1,59					
2	Primärluftmenge $L_1 = 8,85 B \cdot l_{\min}$. . . m ³ $\left(\frac{0}{760}\right)/h$	8,85 · 1,59 · 0,81					
3	Sekundärluftmenge $L_2 = 8,85 B \cdot (l_o - l_{\min})$ „	8,85 · 1,59 · (1,79 - 0,81)					
4	Gesamtluftmenge $L = L_1 + L_2$ „						
5	Temperatur im Ofenschacht, geschätzt nach dem Auge °C	650					
6	Unterdruck im Aschfall p_u mm WS	0,66					
7	Unterdruck im Ofenkopf p_o „	1,02					
8	Druckverlust in der Brennstoffschicht $p_o - p_u$ „	0,36 mm WS					
9	Höhenlage über dem Rost h m	0,025	0,050	0,075	0,1	0,125	0,15
10	Gasgehalt k an CO ₂ } gemessen %	2,9	10,0	12,8	16,3	15,4	16,0
11	Gasgehalt o an O ₂ } %	18,2	11,0	7,0	1,7	0,4	0,8
12	$k + o$ als Kontrolle %	21,1	21,0	19,8	18,0	15,8	16,8
13	Gasgehalt $c = 34,7 - 1,65 \cdot (k + o)$ an CO } be- %	0	0	2,0	5,0	8,6	7,0
14	Gasgehalt $n = 0,653 \cdot (100 + k + o)$ an N ₂ } rechnet %	79,0	79,0	78,2	77,0	75,6	76,2
15	Luftüberschußzahl $l = \frac{100 + k + o}{200 - 5,78 o - 3,76 \cdot (k + o)}$ —	7,75	2,10	1,41	0,96	0,84	0,88
16	Abbrand $b = \frac{L_1}{8,85 \cdot l}$ bis zur Höhe h kg/h	0,17	0,61	0,92	1,34	1,54	1,45
17	Dissoziationsgrad $\alpha = \frac{c}{c + k}$ —	0	0	0,14	0,24	0,36	0,30
18	Primäre Wärme $Q_1 = 8140 b$ aus Bildung von CO ₂ kcal/h	1350	4980	7450	10 910	12 530	11 810
19	Wärmeverbrauch $Q_2 = 5700 b \cdot \frac{c}{c + k}$ für Dissoziation „	0	0	710	1 800	3 140	2 520
20	Gesamte bis zur Höhe h erzeugte Wärme $Q = Q_1 - Q_2$ „	1350	4980	6740	9 110	9 390	9 290

Jedes Sauerstoffteilchen sättigt sich bei erster Berührung mit der Koksoberfläche mit C zu CO₂:



bei fortdauernder oder erneuter Berührung wird es, da die linke Kurve gilt, fast vollkommen zu CO reduziert, indem CO₂ noch weiteren C aufnimmt:



Wo immer aber ein so gebildetes CO-Teilchen mit einem noch unbenutzten O₂-Teilchen fern der C-Oberfläche zusammentrifft, da verbrennen beide miteinander, da hier die rechte Kurve gilt und Gleichgewicht erst bei fast vollkommener Dissoziation erreicht ist:



Im Wechselspiel dieser Vorgänge ist die Mischung der drei Agentien von unten nach oben gesetzmäßig verändert; die unregelmäßige Lage

stoff (Koks) im Schachtofen.

Rostfläche 0,0491 m².

1				2									
= 11,4 m ³ /h				$\begin{array}{r} 3,8 \\ 8,85 \cdot 3,8 \cdot 0,88 \\ 8,85 \cdot 3,8 \cdot (1,50 - 0,88) = 20,8 \end{array}$									
= 13,8 „				= 29,6 m ³ /h									
<u>25,2 m³/h</u>				<u>50,4 m³/h</u>									
zuzüglich Auftrieb				$\begin{array}{r} 900 \\ 1,3 \\ 4,9 \\ \hline 3,6 \text{ mm WS zuzüglich Auftrieb} \end{array}$									
0,175	0,225	0,325	oben	0,025	0,050	0,075	0,1	0,125	0,15	0,175	0,225	0,325	oben
15,8	14,2	14,3	11,7	8,5	7,6	17,7	17,9	16,8	16,1	16,2	16,2	16,6	14,0
0,3	0,5	0,5	9,3	12,3	13,5	2,7	1,8	0,4	2,7	1,6	1,5	0,5	7,0
16,1	14,7	14,8	21,0	20,8	21,1	20,4	19,7	17,2	18,8	17,8	17,7	17,1	21,0
8,1	10,5	10,3	0	0	0	1,1	2,2	6,3	3,7	5,3	5,5	6,5	0,1
75,8	74,7	74,8	79,0	79,0	79,0	78,6	78,2	76,6	77,6	76,9	76,8	76,5	79,0
0,84	0,81	0,81	1,79	2,37	2,84	1,12	1,04	0,88	1,04	0,95	0,94	0,88	1,50
1,53	1,60	1,58	(1,58)	1,41	1,18	2,98	3,23	3,82	3,21	3,52	3,55	3,78	(3,78)
0,34	0,42	0,42	0	0	0	0,058	0,109	0,272	0,187	0,246	0,254	0,282	0
12 450	13 020	12 860	12 860	11 500	9 600	24 300	26 200	31 100	26 200	28 600	28 800	30 800	30 800
2 950	3 880	3 780	0	0	0	1 100	2 000	6 000	3 500	4 900	5 000	6 300	0
9 500	9 140	9 080	12 860	11 500	9 600	23 200	24 200	25 100	22 700	23 700	23 800	24 500	30 800

der Versuchspunkte in Fig. 33 bis 36 aber rührt davon her, daß die Entnahmestelle jeweils zufällig verschieden weit von der Koksfläche ab war: je näher der Koksfläche, desto größer der CO-Gehalt.

41. Verbrennung von Steinkohle auf dem Wanderrost. Wo Steinkohle als Brennstoff dient, findet zuerst *Entgasung von Kohlenwasserstoffen* statt, die dann verbrennen; daran erst schließt sich zeitlich die *Verbrennung des entstandenen Koks*. Diese zeitlichen Veränderungen sind bei dem Wanderrost zugleich örtliche, man findet daher alle Stufen des Gesamtvorganges jederzeit auf dem Rost als beharrenden Zustand. Deshalb eignet sich der Wanderrost zur Vereinzelung der Vorgänge im Versuch.

Bei den in Tabelle 13 und Fig. 39 wiedergegebenen Versuchen¹⁾ wurde an fünf über die Rostlänge hin verteilten Meßstellen die Temperatur sowie die Zusammensetzung der Rauchgase gemessen. Eine

¹⁾ Ausgeführt von Dipl.-Ing. W. Beitze im Maschinenlaboratorium der Danziger Hochschule.

Unstimmigkeit zwischen Meßstelle II und III hat wohl in dem aus örtlichen Gründen unvermeidlichen Sprung in der Höhenlage der Meßstelle ihre Ursache. Trotz mancher Unvollkommenheiten erkennt man:

Tabelle 13. Verbrennung von Steinkohle auf einem Wanderrost.

Rostgeschwindigkeit 0,56 mm/s. Schütthöhe 140 mm am Anfang.

Versuch Nr.		1	2	3
1	Zugstärke am Fuchs mm WS	15,5	11,5	8,63
2	Temperatur am Fuchs °C	220	237	232
3	Temperatur: Meßstelle I (Tür) °C	1338	1322	1297
4	„ II °C	1262	1259	1250
5	„ III °C	1324	1314	1260
6	„ IV °C	1043	1041	1168
7	„ V (Abstreicher) °C	973	976	992
8	Luftüberschußzahl: Meßstelle I . . . —	1,10	0,93	0,86
9	„ II —	0,70	0,68	0,62
10	„ III —	0,86	1,37	1,32
11	„ IV —	9,2	16,0	6,90
12	„ V —	∞	∞	∞
13	CO ² und CO-Gehalt; Meßstelle I . . . %	7,0 · 5,6	10,8 · 4,7	11,4 · 6,0
14	„ II %	5,0 · 14,2	6,8 · 13,0	9,0 · 13,1
15	„ III %	11,0 · 7,6	8,7 · 1,7	10,0 · 1,7
16	„ IV %	1,2 · 0	0,2 · 0	2,2 · 0
17	„ V %	0 · 0	0 · 0	0 · 0

Versuch 1: Zone IV schwach voll glühender Kohle, Zone V ohne Glut.

Versuch 2: Zone V schwach voll glühender Kohle.

Die Meßstellen	I	II	III	IV	V
befanden sich auf 1/4 der Rostbreite und über dem Rost	140	140	230	215	215 mm
hinter der Feuertür	350	1000	1440	1910	2430 „

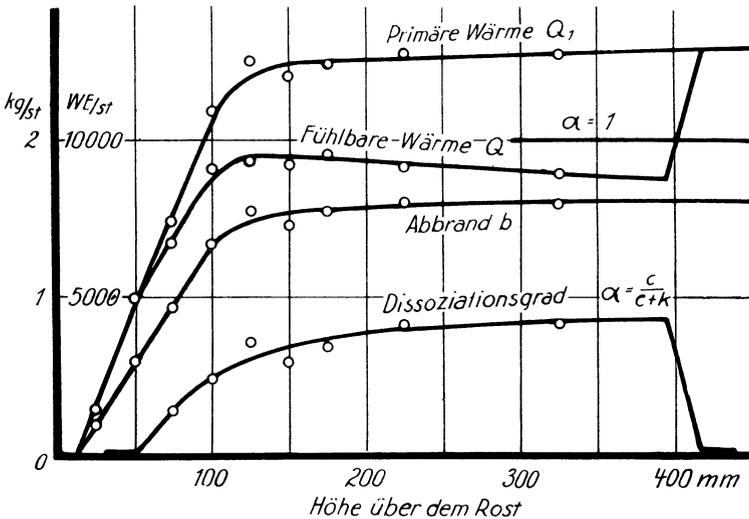


Fig. 35. Verbrennung von Koks bei mäßiger Rostbelastung.

Vorne am Rost, wo die Schicht hoch ist und überdies die Gasentwicklung der Kohle den Luftdurchtritt hindert, herrscht Luftmangel, hinten großer Luftüberschuß; erst die Mischung beider Gasströme kann also zu guter Verbrennung führen. Bei Meßstelle I überwiegt noch die Kohlensäureerzeugung, in Zone II dagegen erreicht das Kohlenoxyd seinen Höchstwert. Die Temperatur ist nahe der Feuertür um so höher, je größer die Zugstärke, im hinteren Teil ist es umgekehrt; denn da die Rostgeschwindigkeit und Schichthöhe bei den drei Versuchen unverändert blieben, so mußte stets die gleiche, nämlich die mechanisch zugeführte Brennstoffmenge verbrennen; der Verbrennungsvorgang muß

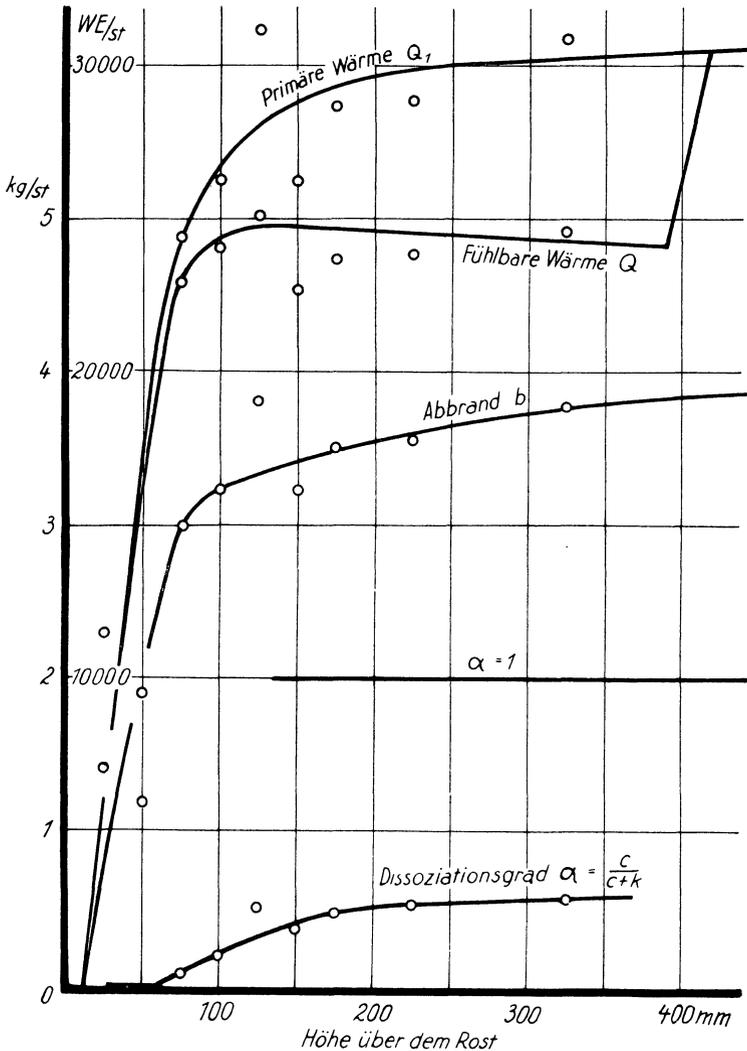


Fig. 36. Verbrennung von Koks bei hoher Rostbelastung.

demnach um so eher — örtlich gesprochen — beendet sein, je stärker der Zug. Daher war auch in Zone V bei Versuch I gar keine Glut mehr, bei Versuch 2 war noch schwach glühende Kohle vorhanden, und bei Versuch 3 dürfte die Kohle noch mehr an oder über den Abstreicher gekommen sein.

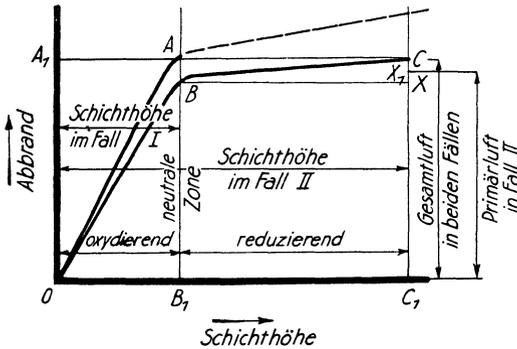


Fig. 37. Verbrennung ohne oder mit Sekundärluft.

42. Zugerzeugung im Schornstein. Daß die Erzeugung des Zuges auf dem Unterschied der spezifischen Gewichte der inneren und der äußeren Gassäule beruht, wurde schon im § 36 erwähnt und benutzt. Man kann diese Frage experimentell nachprüfen mit folgender Versuchseinrichtung.

In den Schornsteinfuß ist ein Thermoelement eingebaut. Das Thermoelement kann einfach hergestellt werden aus einem Kupferrohr, das bis an die Schornsteinachse hereinragt; an dessen Kopf ist ein Konstantendraht befestigt, der durch Glasperlen isoliert im Rohr zurückläuft. Das Kupferrohr wird nach Bedarf mit einem Eisenrohr ge-

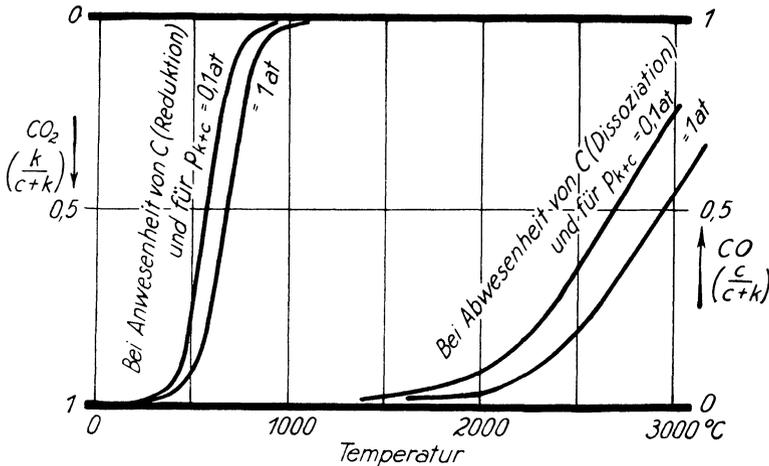


Fig. 38. Gleichgewicht zwischen CO_2 und CO (Reduktion und Dissoziation). (Nach Schüle, Technische Thermodynamik, II, S. 185 u. 201.)

stützt. Man verbindet das Kupferrohr durch einen Kupferdraht zum Ablesinstrument, der Konstantendraht wird als solcher bis ebendahin geführt. Als Ablesinstrument dient ein Millivoltmeter genügender Empfindlichkeit (etwa 20 mV), neben ihm hängt ein Thermometer so, daß man nun Temperaturüberschüsse über die des Beobachtungsraumes am In-

strument abliest. Man kann auch ein Quecksilberinstrument genügender Länge in den Schornstein einführen. Für die Druckentnahme verwendet man am

bequemsten gleich dasselbe Kupferrohr, das man im Schornstein mit einer Bohrung, außen mit einem Schlauchstutzen versehen. Den Stutzen verbindet man mit einer Seite eines Manometers genügender

Empfindlichkeit — Wasseranometer mit geneigtem Rohr —, die andere Seite des Manometers führt man rein waagrecht gehend ins Freie. Denn gegen den Schornsteinzug darf man die, wenn auch geringen Auftriebe im Beobachtungsraum gegen Außenluft infolge von Temperaturunterschieden nicht vernachlässigen. Endlich benutzt man denselben Schlauchstutzen am Kupferrohr für die Entnahme von

Gasproben zur Untersuchung im Orsat-Apparat, indem man passend einen Abzweig in die Leitung bringt.

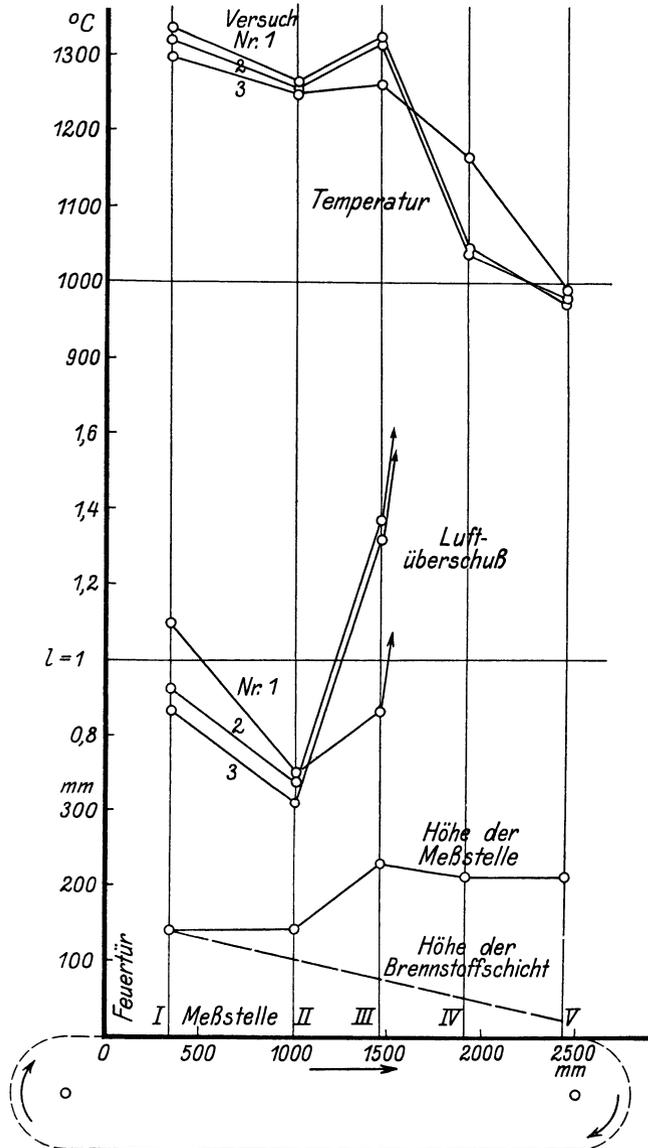


Fig. 39. Verbrennung von Steinkohle auf einem Wanderrost.

Tabelle 14. Zugerzeugung in einem Schornstein.
 Gesamte Schornsteinhöhe 50 m.
 Untere Meßstelle 43,7 m, obere 9,2 m unter Schornsteinmündung.
 Lichte Weite des Schornsteins unten 3,46 m², oben 2,27 m².
 Versuchstag 14. Nov. 1911, BSt. 758 mm QS

Zeit		6 h 0	8 h 0	10 h 0	12 h 0	2 h 0	4 h 0	6 h 0	8 h 0
1	Verbrannte Kohlenmenge B kg/h	866	502	698	564	340	638	442	—
	Temperatur:								
2	untere Meßstelle t_u . . °C	127	226	289	314	209	315	312	301
3	obere Meßstelle t_o . . „	113	196	257	291	188	285	282	218
4	Unterschied $t_u - t_o$. . „	14	30	32	23	21	30	30	83
5	Mittel $\frac{1}{2} \cdot (t_u + t_o)$ °abs	393	484	546	575	471	573	570	532
Geschätzt 10% CO ₂ , $l = 2$, also spez. Gew. der Rauchgase $\gamma_o = 1,36 \text{ kg/m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right)$									
	Spezifisches Gewicht								
6	innen γ_i kg/m ³	0,94	0,77	0,68	0,65	0,79	0,65	0,65	0,70
7	außen γ_a „	1,27	1,27	1,26	1,25	1,23	1,26	1,26	1,26
8	Unterschied $\Delta\gamma$. . „	0,33	0,50	0,58	0,60	0,44	0,61	0,61	0,56
9	Theoretische Zugstärke 43,7 · $\Delta\gamma$ mm WS	14	22	25	26	19	27	27	25
10	Beobachtete Zugstärke „	13,5	17	19,5	20	16	21,5	21	20,5

Ist γ_i kg/m³ das spezifische Gewicht der Gase im Innern des Schornsteines und γ_a kg/m³ dasselbe außen, so erzeugt der Schornstein eine Zugstärke, zu messen H Meter tief unter der Mündung

$$H \cdot (\gamma_a - \gamma_i) \text{ kg/m}^2 \text{ oder mm WS} \dots \dots \dots (10)$$

Die wirklich beobachtete Zugstärke wird um so viel geringer als diese theoretisch unbedingt zu erwartende, wie Zugstärke durch die Reibung R der Gase im Schornstein — von der Meßstelle zur Mündung — verlohrenght. Wir beobachten also

$$h = H \cdot (\gamma_a - \gamma_i) - R \dots \dots \dots (10a)$$

Mangelhafte Zugwirkung kann daher ihre Ursache haben darin, daß H oder $(\gamma_a - \gamma_i)$ zu klein sind, oder aber darin, daß R zu groß ist: der Schornstein kann zu niedrig sein, die Temperatur der Rauchgase im Schornstein kann zu gering sein, oder der Schornstein kann zu eng für die Rauchgasmenge, deren Geschwindigkeit also gewissermaßen zu groß sein. Nur die erste und letzte Ursache liegen im Schornstein, die zweite liegt im Kessel.

Schreibt man

$$R = H \cdot (\gamma_a - \gamma_i) - h \dots \dots \dots (10b)$$

so ist also der Reibungsverlust durch lauter direkt beobachtete Größen bestimmt.

Eine Versuchsreihe an einem Schornstein gibt Tabelle 14. Die beobachtete Zugstärke bleibt hinter der aus den Temperaturen errechneten erheblich zurück. Die Reibungswiderstände können dafür aber nicht verantwortlich gemacht werden, denn bei rund 600 kg/h ver-

brannter Kohle ist die Rauchgasmenge zu $9600 \text{ m}^3 \left(\frac{0}{760}\right)/\text{h}$ oder bei $t = 300^\circ \text{ C}$ zu $20\,200 \text{ m}^3/\text{h}$ zu schätzen; dem entspricht eine Gasgeschwindigkeit $w = 2,5 \text{ m/s}$ im Mündungsquerschnitt, und ein Druckverlust (Gramberg, Heizung und Lüftung von Gebäuden, Tafel III, Fig. 31) von $0,005 \text{ mLS}$, entsprechend $0,005 \cdot 0,7 = 0,0035 \text{ mm WS}$ für 1 m Kanallänge. Der gesamte Druckverlust ist bei der mäßigen Geschwindigkeit nicht größer als $43,7 \cdot 0,005 \cdot 0,7 = 0,153 \text{ mm WS}$ zu erwarten, kommt also bei der schwachen Schornsteinbelastung nicht in Betracht. — Die Differenz mag also in der Genauigkeit der Temperaturmessung begründet sein.

Der *Temperaturverlust der Gase im Schornstein* zeigt sich im vorliegenden Fall zu etwa 30° ; er wird kleiner in Zeiten fallender Gastemperatur, doch ändert er sich nicht so stark wie die Speicherwirkung des Mauerwerks erwarten ließe.

c) Wärmeübertragung.

43. Wärmeleistung eines Wasserwärmers. In Bade- und Waschanstalten, Heizungen und anderen Betrieben finden sich Apparate zur Bereitung von warmem Wasser mit Hilfe von Dampf der eben verfügbaren Spannung. Dieselben arbeiten entweder als Mischapparate, indem Dampf und Wasser, durch Hähne gesteuert, einem gemeinsamen Mischraum zuströmen und dann vereint weiterfließen, nachdem der Dampf sich kondensiert und das Kondensat die Mischtemperatur mit dem Wasser erreicht hat. Oder sie arbeiten als Oberflächenapparate, wenn Dampf und Wasser durch eine wärmeübertragende Heizfläche aus Kupfer oder Messing getrennt bleiben. Die folgenden Darlegungen beziehen sich auf Oberflächenapparate.

Ein solcher Wasserwärmer besteht aus einem Rohr oder Rohrbündel, in das der Dampf eintritt und das gleichzeitig von dem zu erwärmenden Wasser umspült wird. Normal wird das Wasser so geleitet, daß es an dem Ende in den Apparat eintritt, wo das abfließende Dampfkondensat ihn verläßt, und daß es den Apparat an dem Ende verläßt, wo der Dampf eintritt. Dampf und Wasser haben also zu beiden Seiten der Heizfläche entgegengesetzte Strömungsrichtung, der Apparat arbeitet im *Gegenstrom*. Die Apparate werden deshalb auch direkt als Gegenstromapparate bezeichnet. Kehrt man die Richtung des Wasserstromes um, so arbeitet der Apparat im *Gleichstrom*.

Fig. 40 zeigt eine *Versuchseinrichtung*, die geeignet ist, die Leistungsfähigkeit und den Wirkungsgrad eines für Hochdruckdampf bestimmten Wasserwärmers zu bestimmen. Der Apparat ist ein senkrecht stehendes Rohr, in welches das Wasser durch Ventil 2 unten ein- und durch Ventil 3 oben austreten kann; die Menge läßt sich durch die Ventile regeln, die Temperatur beim Zu- und Abfließen an den Thermometern t_u und t_o ablesen. Die Anbringung der Thermometer an einem T-Stück gestattet es, sie beliebig tief eintauchen zu lassen. Die Wassermenge $W \text{ kg/h}$ wird gemessen durch Auffangen auf einer Wage, auf die der Schwenkarm geleitet wird. Schließt man die Ventile 2 und 3, und öffnet 1 und 4,

so durchläuft das Brauchwasser den Wärmer von oben nach unten, also im Gleichstrom statt im Gegenstrom. t_o und t_u vertauschen ihre Rolle. Die von dem Apparat nutzbar auf das Wasser übertragene Wärmemenge ist in jedem Fall:

$$N_2 = W \cdot (t_2 - t_1) \text{ kcal/h. (11a)}$$

wobei für t_1 und t_2 je nach der Stromrichtung t_o oder t_u zu setzen ist. Hierbei ist die spezifische Wärme des Wassers $c = 1$ gesetzt, vgl. Techn. Mess. § 104.

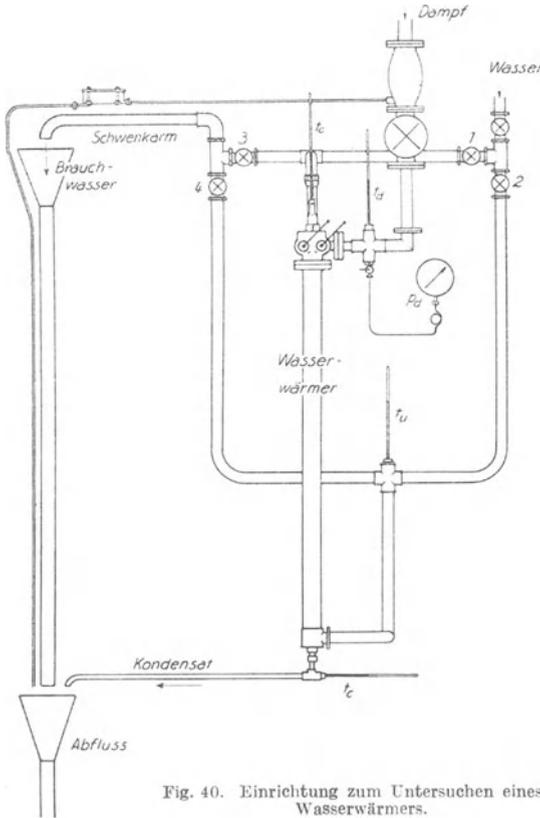


Fig. 40. Einrichtung zum Untersuchen eines Wasserwärmers.

Der Dampf wird nämlich von oben zugeführt. Er wird in einem Wasserabscheider von Wasser befreit und das abgeschiedene Wasser durch einen Wasserableiter entfernt. Der so getrocknete Dampf kann durch Drosseln in einem Ventil auf jeden Druck gebracht werden; sein Überdruck p_d at und seine Temperatur t_d wird dann gemessen. Der Dampf tritt nun von oben in ein schraubenförmig gewundenes Kupferrohr ein, das unten aus dem wasserführenden Mantelrohr herausragt und dort das als Kondensat abfließende Wasser auffangen läßt, nachdem seine Temperatur t_c gemessen ist. Man kann also durch Wägen des Kondensates die in den Appa-

rat gegangene Dampfmenge D kg/h bestimmen. Zwischen den Versuchen läßt man das Kondensat fortlaufen, und schwenkt dazu das Ablaufrohr über den unteren Trichter, der das Wasser zur Kanalisation führt.

Der herzukommende Dampf hat den Überdruck p_d at. Durch Hinzufügen des Barometerstandes ergibt sich daraus der absolute Druck p_1 at. Durch ihn und die Temperatur t_d , die als etwas überhitzt vorausgesetzt wird, ist der *Wärmeinhalt* i_1 des Dampfes bestimmt; das ist die Wärmemenge, die 1 kg Wasser von 0°C Temperatur und dem Druck p_1 zuzu-

führen ist, um es in Dampf vom Zustande p_1, t_a zu verwandeln, oder umgekehrt diejenige Wärmemenge, die 1 kg Dampf vom Zustande p_1, t_a entzogen werden kann und muß, um es zur Kondensation und das Kondensat (eigentlich bei konstantem Druck) auf die Endtemperatur 0°C zu bringen, die als Bezugstemperatur für Wärmehalte konventionell ist. Für die Dampfbildung aufzuwenden war indessen so viel weniger Wärme, wie der Wärmehalt des Speisewassers betrug, das schwerlich mit 0° in den Kessel gespeist wurde. Da es aber nicht gerecht ist, dem Wasserwärmer die in einem Betriebe zufällig hohe Speisewassertemperatur zugute zu rechnen, ihn mit der in einem anderen Betriebe oder zu anderer Zeit niedrigen zu belasten, so rechnet man in solchen Fällen mit einer normalen Speisewassertemperatur von 20°C , der wegen der spezifischen Wärme des Wassers = 1 ein Wärmehalt des Speisewassers von 20 kcal/kg entspricht. Es steht also im zugeführten Dampfgewicht die Wärmemenge

$$N_1 = D \cdot (i_1 - 20) \text{ kcal/h} \dots \dots \dots (12)$$

zur Verfügung.

Damit wird der Wirkungsgrad des Wasserwärmers

$$\eta = \frac{N_2}{N_1} = \frac{W \cdot (t_2 - t_1)}{D \cdot (i_1 - 20)} \dots \dots \dots (13)$$

Je nach Umständen kann man den Wirkungsgrad indessen auch anders verstehen. Wenn das Dampfcondensat den Wasserwärmer mit einer Temperatur t_c verläßt, so ist es theoretisch möglich, das Kondensat ohne Wärmeverlust mit der Temperatur t_c in den Kessel zurückzuführen. Geschieht dies nicht, so ist nicht der Wasserwärmer, sondern die Disposition der Anlage schuld, z. B. große Entfernung des Wasserwärmers vom Kessel, durch die die Rückleitung zu teuer würde, tiefe Lage des Wasserwärmers, die eine Überhebepumpe zum Kesselhaus nötig macht, so daß man in beiden Fällen vorzieht, das Kondensat fortlaufen zu lassen — oder aber es kann die Rückleitung zwar erfolgen, aber wegen Fehlens der Isolierung verliert das Kondensat wesentlich von der Temperatur t_c . Da für diese Umstände der Wasserwärmer selbst nicht haftet, so kann man in diesen Fällen ebenso wie bei warmer Rückspeisung sagen: um das abfließende Wasser wieder in Dampf gleicher Qualität zu verwandeln, ist die Wärmemenge

$$N'_1 = D \cdot (i_1 - t_c) \text{ kcal/h} \dots \dots \dots (12a)$$

erforderlich, der Wirkungsgrad des Wasserwärmers wird

$$\eta' = \frac{N_2}{N'_1} = \frac{W \cdot (t_2 - t_1)}{D \cdot (i_1 - t_c)} \dots \dots \dots (13a)$$

Noch eine dritte Betrachtungsweise ist richtig. Der Dampf wird, wenn er etwas überhitzt in die Heizfläche eintritt, zunächst auf die Sättigungstemperatur abgekühlt, die dem herrschenden Druck entspricht; in einem ersten Teil der Heizfläche wird also die Überhitzung beseitigt. Weiterhin findet die Kondensation bei der jeweiligen Sättigungstemperatur des Dampfes statt; hierzu wird ein weiterer Teil der Heizfläche benutzt; da aber durch 1 m² Heizfläche eine gewisse

Wärmemenge auf das Wasser übertragen, also eine gewisse Dampfmenge kondensiert wird, so wird, genügende Größe der Heizfläche vorausgesetzt, an einer gewissen Stelle der eingetretene Dampf aufgebraucht sein; nur ein gewisser weiterer Bruchteil der vorhandenen Heizfläche wird also als Kondensationsheizfläche benutzt, im ferneren Teil der Heizfläche steht Luft, während an der Wand jener ferneren Heizfläche Wasser rinnt und dabei abgekühlt — unterkühlt — wird. Durch diese Abkühlung wird auch die Flüssigkeitswärme des Kondensates noch teilweise auf das zu erwärmende Wasser übertragen. Die Unterkühlung kann keinesfalls weiter herabgehen als bis auf die Zulauftemperatur t_1 des anzuwärmenden Wassers. Daher ist

$$N'' = D \cdot (i_1 - t_1) \text{ kcal/h} \dots \dots \dots (12b)$$

diejenige Wärmemenge, die dem Dampf äußerstenfalls entzogen werden kann, wenn man die Unterkühlung durch Anwendung einer sehr großen Heizfläche im Gegenstrom sehr weit treibt. Hiermit berechnet sich ein Wirkungsgrad

$$\eta'' = \frac{N_2}{N''} = \frac{W \cdot (t_2 - t_1)}{D \cdot (i_1 - t_1)} \dots \dots \dots (13b)$$

Ob η' und η'' größer oder kleiner werden als η , läßt sich allgemein nicht sagen; es kommt darauf an, ob t_c und t_1 größer oder kleiner als 20° sind. t_1 ist z. B. $> 20^\circ$ bei den Wärmern einer Wasserheizung, meist $< 20^\circ$ bei der Erwärmung von Brauchwasser. t_c ist stets $> t_1$, nähert sich ihm aber bei genügend großer Heizfläche und kann daher auch $< 20^\circ$ sein. — In jedem Fall aber ist $\eta' > \eta''$.

Es ist lehrreich, daß selbst in einem so einfachen Falle der Begriff des Wirkungsgrades des untersuchten Apparates an sich nicht eindeutig bestimmt ist. Man kann daraus folgern, in Gewährleistungen solle die Angabe eines Wirkungsgrades nie erfolgen ohne genaue Angabe, wie derselbe gemeint sei. In ähnlicher Weise wird bei Maschinen ein thermischer oder hydraulischer, ein mechanischer, ein wirtschaftlicher Wirkungsgrad unterschieden und je nach Umständen ist der eine oder der andere maßgebend. Im vorliegenden Fall vergleicht man die vom Wasser aufgenommene Wärme durch η und η' mit der zur Erzeugung des Dampfes je nach Lage des Falles erforderlichen Wärme, durch η'' aber mit derjenigen Wärme, die nach Lage der Dinge dem Dampf höchstens entzogen werden kann.

Die Messung der einzelnen Größen ist einfach. Bei den Wassermessungen ist bei höheren Temperaturen durch Zudecken der Meßbehälter der Verdunstung vorzubeugen. Bei der Auswertung ist für die Temperaturmessungen die Fadenkorrektion oft nicht unwesentlich. Die Bestimmung des Wärmeinhaltes i des Dampfes erfolgt für gesättigten Dampf mittels der Wasserdampftabellen von Mollier, die sich z. B. Hütte, 22. Aufl., I, S. 416 finden; die Zeunerschen Tabellen in den Auflagen vor 1900 sind nicht mehr brauchbar. Für überhitzten Dampf ist, ebenfalls nach Mollier,

$$i = 594,7 + 0,477 t - \mathfrak{S} \cdot p \dots \dots \dots (14)$$

Fall 1. Der Kessel wird mit Speisewasser beliebiger Temperatur, z. B. 20° C gespeist, das Kondensat läuft fort oder kühlt sich bis zum Widerspeisen auf Raumtemperatur (20°) ab (offener Betrieb). Wärmebilanz:

Aufwand für Dampf- bildung 104 200 kcal = 100,0% <hr style="width: 100%;"/> 104 200 kcal = 100,0%	An das Brauchwasser 89 100 kcal = 85,5% Im Kondensat bleiben 12 200 „ = 11,7% Strahlung 2 900 „ = 2,8% <hr style="width: 100%;"/> 104 200 kcal = 100,0%
---	--

Fall 2. In den Kessel wird das Kondensat, wie es aus dem Wärmer kommt, verlustlos zurückgespeist (geschlossener Betrieb). Wärmebilanz:

Aufwand für Dampf- bildung 92 000 kcal = 100,0% <hr style="width: 100%;"/> 92 000 kcal = 100,0%	An das Brauchwasser 89 100 kcal = 96,9% Strahlung 2 900 „ = 3,1% <hr style="width: 100%;"/> 92 000 kcal = 100,0%
---	--

Fall 3. Will man vom besonderen Betriebsfall absehen und auf das theoretisch Erreichbare Bezug nehmen, so wird die Wärmebilanz:

Wirklicher Aufwand für Dampf- bildung 104 200 kcal = 98,9% Korrektur für mög- liche Unterkühlung des Kondensates unter Speisewasser- temperatur 162,5 · (20 - 13,5) 1 100 „ = 1,1% <hr style="width: 100%;"/> Nach der Brauch- wasser - Zulauf- temperatur verfügbar 105 300 kcal = 100,0%	An das Brauchwasser 89 100 kcal = 84,6% Dem Kondensat nicht entzogen 13 300 „ = 12,6% Strahlung 2 900 „ = 2,8% <hr style="width: 100%;"/> 105 300 kcal = 100,0%
---	---

Jede dieser Aufstellungen ist sachlich zutreffend; je nach dem Zweck der Untersuchung und der Betriebsart wird die eine oder andere zu wählen sein. Die absoluten Zahlen sind mehrfach oder immer die gleichen, prozentisch ergeben sich wegen der verschiedenen Bezugnahme Unterschiede.

Die Möglichkeit zu verschiedener, dem Fall jeweils anzupassender Aufstellungen sollte an dem einfachen Beispiel gezeigt werden.—

Der Druck von 5 at wird im Wärmer einfach aufgebraucht; denn am Ablauf und schon in dem Teil der Schlange, wo das Wasser unterkühlt wird, herrscht Atmosphärendruck. In der Tat herrschen in den ersten Teilen der Schlange beträchtliche Geschwindigkeiten, die auf Null abnehmen bis zu jener Stelle, wo aller Dampf kondensiert ist und wo die Unterkühlung einsetzt. Die Eintrittsgeschwindigkeit w_1 des Dampfes läßt sich berechnen als Quotient aus dem eintretenden Dampf-
 volumen D_v und dem lichten Rohrquerschnitt F : es ist $w_1 = D_v : F$.

Das Volumen des Dampfes ergibt sich aus seinem Gewicht und den Zustandsangaben $t_d = 160^\circ$, $p_1 = 6,05$ at. Aus letzteren errechnet sich das spezifische Volumen v des Dampfes (Volumen von 1 kg in m^3) nach der Formel

$$v = 47 \frac{T}{p} + 0,001 - \text{3 m}^3/\text{kg} \dots \dots \dots (15)$$

Darin ist p jedoch in kg/m^2 einzuführen, im vorliegenden Fall $p_1 = 60\,500 \text{ kg/m}^2$; \mathfrak{B} ist eine Temperaturfunktion, die formelmäßig oder in den Dampftabellen gegeben wird, die jedoch auch aus Fig. 14 bei § 26 entnommen werden kann. Es wird für uns $v = 47 \cdot \frac{160 + 273}{60\,500} + 0,001 = 0,016$
 $= 0,321 \text{ m}^3/\text{kg}$, hiermit $D_v = 162,5 \text{ kg/h} \cdot 0,321 \text{ m}^3/\text{kg} = 52,2 \text{ m}^3/\text{h}$. Die Schlange hat, nach besonderem Aufmaß, 14,1 mm lichten Durchmesser, entsprechend $0,000\,1561 \text{ m}^2$ Querschnitt. Der eintretende Dampf hat $w_1 = \frac{52,2}{3600 \cdot 0,000\,1561} = 93 \text{ m/s}$ Geschwindigkeit.

44. Versuchsreihen. Eine charakteristische *Versuchsreihe* kann man anstellen, indem man bei *unverändertem Wasserdurchgang* den Dampfdruck durch Drosseln verändert. Je höher man ihn steigert, desto mehr Dampf tritt in den Apparat, desto weiter gegen das Ende der Heizfläche hin verschiebt sich daher die Grenze zwischen Dampf und Luft; dadurch wird die dampfberührte Heizfläche größer und der Wärmeumsatz — die Temperatur des ablaufenden Nutzwassers — steigt. Da aber zugleich die zur Unterkühlung des Kondensates verfügbare Fläche abnimmt, so wird mit steigendem Dampfdruck die Ablauftemperatur t_c desselben größer. Bei fortgesetzter Steigerung des Dampfdruckes kommt t_c gegen 100° ; der Dampf erfüllt die ganze Heizfläche, und bei weiterer Steigerung des Dampfdruckes bläst Dampf aus dem Kondensrohr aus. Da der Dampfverlust sehr unwirtschaftlich wäre, da auch eine Steigerung der dampfberührten Heizfläche weiterhin nicht mehr statthat und also der Wärmeumsatz nicht mehr (wesentlich) steigt, so ist der Apparat an seiner *Höchstleistung* angekommen, die durch die Ablesung $t_c = 100^\circ$ (genauer: durch t_c gleich der Siedetemperatur beim herrschenden Barometerstand, z. B. $t_c = 97,5^\circ$ beim Barometerstand 700 mm QS) gekennzeichnet ist.

Die Ergebnisse einer solchen Reihe sind in Tabelle 15 gegeben; die Auswertung des Versuches 72 gab schon § 43.

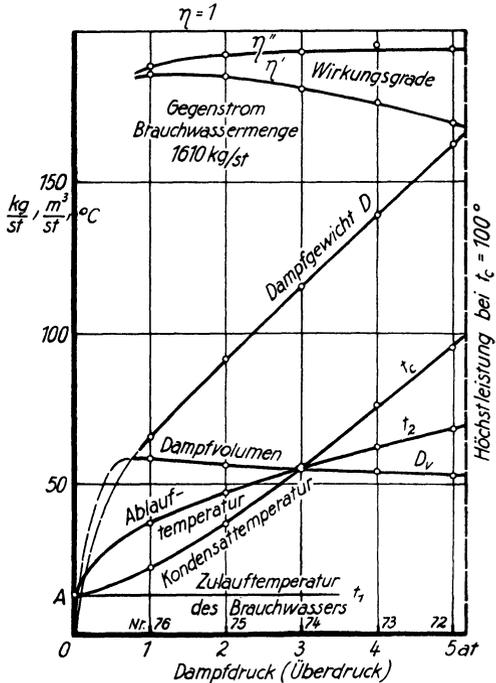


Fig. 41. Wasserwärmer bei wechselndem Dampfdruck
 Wasserdurchgang 1610 kg/h, Gegenstrombetrieb.

Tabelle 15. Verhalten eines Hochdruckdampf-Kupferschlange 16,5/14,1 mm Dm. 4,22 m lang, Heizfläche Gegenstrombetrieb. Wassermenge konstant. Barometerstand

Versuch Nr.		76
1	Wassermenge W	kg/h 1610
2	Zulauftemperatur t_1	°C 13,5
3	Ablauftemperatur t_2	°C 37,5
4	Dampfdruck p Überdruck	at 1
5	Dampfdruck p_1 absolut	at 2,05
6	Dampftemperatur t_d	°C 123
7	Überhitzung $t_d - t_s$	°C 3
8	Ablauftemperatur des Kondensates t_r	°C 22,4
9	Dampfmenge D	kg/h 65,4
10	Erwärmung des Wassers $t_2 - t_1$	°C 24,0
11	Wärmeaufnahme des Wassers $Q_2 = W \cdot (t_2 - t_1)$	kcal/h 38 600
12	Wärmeinhalt des Dampfes $i_1 = 594,7 + 0,477 t_d - \mathfrak{S} \cdot p_1$	kcal/kg 648,9
13	Verfügbare Wärme $Q'_1 = D \cdot (i_1 - t_1)$	kcal/h 41 500
14	Wärme z. Erzeugen des Dampfes aus 20° Wasser $Q_1 = D \cdot (i_1 - 20)$	„ 41 100
15	Wärmeabgabe des Dampfes $Q''_1 = D \cdot (i_1 - t_r)$	„ 41 000
16	Wirkungsgrad bezogen auf verfügbare Wärme $\eta' = Q_2/Q'_1$	— 0,930
17	Wirkungsgrad bei Abkühlung des Kondensates $\eta = Q_2/Q_1$	— 0,940
18	Wirkungsgrad bei warmer Rückspeisung $\eta'' = Q_2/Q''_1$	— 0,942
19	Im Kondensat verbleibend $V = D \cdot (t_e - 20) = Q_1 - Q''_1$	kcal/h 160
20	prozentisch $v = 100 V/Q''_1$	% 0,4
21	Strahlungsverlust $V_1 = Q''_1 - Q_2$	kcal/h 2400
22	Spezifisches Volumen des eintretenden Dampfes $v_1 = \frac{47 \cdot (t_d + 273)}{10000 \cdot p_1} + 0,001 - \mathfrak{B}$	m ³ /kg 0,887
23	Aufgenommenes Dampfvolumen $D_v = v_1 \cdot D$	m ³ /h 58,0
24	Eintrittsgeschwindigkeit des Dampfes $W_{d1} = \frac{D_v}{0,000 1561 \cdot 3600}$	m/s 103

Mit Steigerung des Dampfdruckes steigt das aufgenommene Dampfgewicht und damit der Wärmeumsatz: die Ablauftemperatur des Brauchwassers wird höher. Beim Dampfdruck Null (= atmosphärischem) muß das aufgenommene Dampfgewicht Null werden, Wasser und Kondensat die Temperatur des zulaufenden Wassers annehmen, Punkt A. Wenn die Kondensattemperatur auf 100° steigt, ist die Höchstleistung des Apparates erreicht: derselbe kann diese Wassermenge bis auf 69° bringen.

Bemerkenswert ist der starke Überdruck, der erforderlich ist, um den Dampf an das Ende zu treiben und dadurch die Höchstleistung zu erzielen.

Wenn das Kondensat warm zurückgespeist wird, so wird der Wirkungsgrad η'' um so günstiger, je höher die Leistung des Apparates ist. Anders, wenn die Kondensatwärme verlorengeht; der Wirkungsgrad η' fällt bei hoher Leistung unter 85% herab, die Kondensatverluste sind also wie häufig wohl beachtlich.

Trotzdem wird man den Wärmer tunlichst auszunutzen bestrebt

Wasserwärmers.
0,219/0,188 m².
744 mm QS = 1,05 at.

75	74	73	72
1611	1604	1611	1614
13,5	13,5	13,5	13,5
47,0	55,2	62,6	68,7
2	3	4	5
3,05	4,05	5,05	6,05
135	145	154	160
2	2	3	2
36,7	55,0	76,2	95,0
91,2	115,3	138,7	162,5
33,5	41,7	49,1	55,2
54 000	66 900	79 000	89 100
653,2	656,5	659,6	661,4
58 400	74 100	89 600	105 300
57 800	73 400	88 700	104 200
56 100	69 300	98 000	92 000
0,925	0,903	0,881	0,846
0,936	0,912	0,891	0,855
0,962	0,966	0,976	0,969
1700	4100	7800	12 200
2,9	5,6	8,8	11,7
2100	2400	1900	2900
0,609	0,468	0,382	0,321
55,5	54,0	52,9	52,2
99	96	94	93

sein, und Versuche werden meist die Feststellung seiner Höchstleistung zum Ziel haben. Eine *Versuchsreihe bei Höchstleistung* ist durch die Kondensattemperatur $t_c \approx 100^\circ$, etwa zwischen 95 und 97° gekennzeichnet.

Wenn der Wärmer in einem Zustande der Höchstleistung war und wir vergrößern die Brauchwassermenge, so geht die Kondensattemperatur zurück trotz gleichbleibendem Dampfdruck; infolge der stärkeren Kühlung der Schlange wird der Dampfdruck also schneller aufgezehrt, der Widerstand des Rohres wächst gewissermaßen mit der Kühlwirkung. Erst eine Steigerung des Dampfdruckes läßt t_c wieder auf 96° kommen, wodurch ein neuer Zustand der Höchstleistung — bei anderem Dampfdruck — erreicht ist.

Die Ergebnisse einer solchen Reihe zeigt Fig. 42. Die Wassertemperatur geht bis über 75° und wird bei mäßigen Beanspruchungen erreicht. Eine weitere Steigerung der Wassertemperatur ist bei diesem Wärmer (bei atmo-

sphärischem Gegendruck) überhaupt nicht möglich. Der Dampfdruck konnte durch immer kräftigere Kühlung bis 9 at abs = 8 at ÜD gesteigert werden, ohne daß der Dampf durchschlug; eine Grenze ist hier nicht einzusehen. Die Mengenkurven gehen links nicht auf Null zu. In der Tat läßt sich zeigen, daß die Kurven gar nicht bis heran an den Betriebsdruck $p = 0$ einen realen Sinn haben: bei den kleinsten Dampfdrücken und Dampfmen gen ist auch bei beliebiger Verminderung der Wassermenge die Ablauftemperatur des Kondensates nicht bis 96° zu steigern. Die Kurven widerstreben daher mit Recht der Fortführung nach links. Wegen der eigenartigen Gestalt der Wirkungsgradkurven bei kleinen Leistungen vgl. des Verfassers Aufsatz Z. d. V. D. I. 1914, S. 174.

Jeder Zustand der Fig. 42 ist ein solcher, den wir als den der Höchstleistung des Wasserwärmers bezeichneten. Dem Hersteller des Apparates gibt also Fig. 42 eine Übersicht darüber, für welche angeforderten Verhältnisse (Dampfdruck, Wassermenge, Temperaturerhöhung) er

gerade diesen Typ offerieren kann, und auch, welchen Wirkungsgrad er gewährleisten kann, wenn das Kondensat nicht warm zurückgespeist wird.

Ganz anders stellt sich die Frage für den Benutzer, nachdem der Wärmer in eine Anlage eingebaut ist, die natürlich einen begrenzten Dampfdruck hat — den der Kesselanlage. Für den Fall eines verfügbaren Dampfdruckes von 5 at ÜD = 6,05 at abs gibt Fig. 43 die dann betriebsmäßig vorliegenden Verhältnisse versuchsmäßig wieder. Die

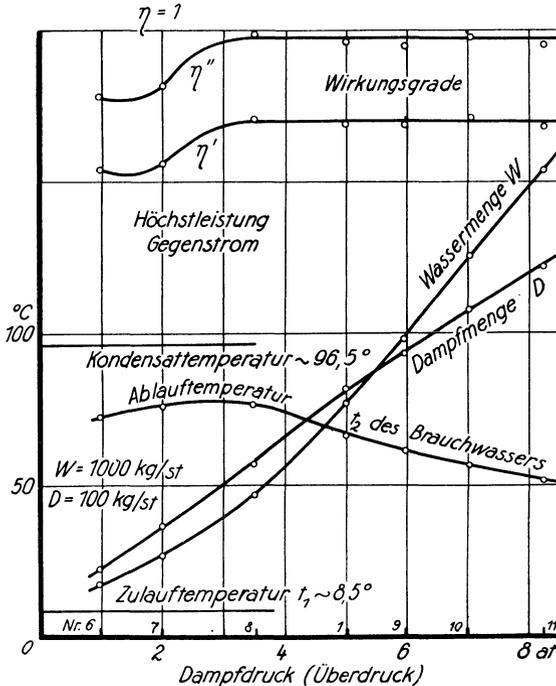


Fig. 42. Wasserwärmer im Zustande der Höchstleistung (Kondensattemperatur $\lesssim 100^\circ$). Gegenstrombetrieb.

Versuchszahlen sind in Fig. 43 über dem Wasserdurchgang aufgetragen.

Die Höchstleistung des eingebauten Apparates ist nun die bei 5 at Druck und $t_c \sim 96^\circ$. Dieser ist ein bestimmter Wasserdurchgang W_1 zugeordnet. Wird derselbe vermehrt, so kann der Dampfdruck nicht erhöht werden, an Stelle der schwach gezeichneten Kurven, entsprechend Fig. 42, treten in Fig. 43 diejenigen, die konstantem Dampfdruck entsprechen. Dabei steigt die übertragene Wärme $W \cdot (t_2 - t_1)$ noch weiter schwach an, im Bereich der Figur noch um reichlich 10%; insofern ist also

in dem von uns als Höchstleistung bezeichneten Zustand der Wärmeumsatz noch steigerungsfähig, sogar unter Verbesserung des Wirkungsgrades, jedoch stark auf Kosten der erzeugten Temperatur. Wenn andererseits der Wasserdurchgang unter W_1 vermindert wird, so muß man den Dampfdruck durch Drosseln herabsetzen, damit der Dampf nicht durchschlägt. Dann steigt die erzeugte Temperaturerhöhung noch mäßig an, aber der Wärmeumsatz sinkt schnell.

Der Wasserdurchgang W_1 (in Fig. 43 = 1530 kg/h) bedeutet also, auf einen bestimmten verfügbaren Dampfdruck bezogen, nicht die Erzielung des größten Wärmeumsatzes und nicht die Erzielung der höchstmöglichen Temperatur, sondern die bestmögliche Vereinigung beider. Man kann deshalb wohl von einer Höchstleistung sprechen;

diese bedeutet einen in sich bestimmten, vor allen anderen ausgezeichneten Zustand des Apparates, der zu seiner Kennzeichnung geeignet ist.

Der Betrieb eines Wärmers mit *Gleichstrom im Vergleich zu Gegenstrom* liefert Ergebnisse, die durch Fig. 44 dargestellt sind. Sie sind durchaus analog, insbesondere ist ebenso scharf eine Höchstleistung erkennbar, bei der die Kondensattemperatur gegen 100° kommt und andererseits der verfügbare Dampfdruck voll ausgenutzt wird. Der Wärmeumsatz bei der Höchstleistung ist etwas höher als bei Gegenstrombetrieb, die Wassertemperatur erheblich niedriger; daher wird die Höchstleistung erst bei größerer Wassermenge W_1 erreicht. Die erzielbaren Wärmeumsätze sind überhaupt etwas höher, die Temperaturen etwas niedriger als bei Gegenstrom. Wo die höheren Temperaturen also nicht nötig, vielleicht der Verbrühgefahr wegen lästig sind, kann Gleichstrombetrieb ratsam sein. Derselbe hat überdies allgemein den Vorteil größerer Regelfähigkeit, weil die beiden wärmeaustauschenden Flüssigkeiten der gemeinsamen Mischungstemperatur zustreben.

Mit Erreichung der Höchstleistung setzt eine Verbesserung des Wirkungsgrades η' ein, weil die Kondensattemperatur abnimmt. Da die Höchstleistung bei Gegenstrom eher als bei Gleichstrom erreicht wird, so ist bei mittleren Wasserdurchgängen der Wirkungsgrad η' merklich günstiger bei Gegenstrom gegenüber Gleichstrom, aber nur wenn man die gleiche Wassertemperatur verlangt und den Vergleich auf gleichen Wasserdurchgang bezieht. Auf gleichen Wärmeumsatz bezogen hat der Gegenstrombetrieb keinen besseren Wirkungsgrad; ebensowenig ist der bessere Wirkungsgrad η' von Nutzen, wo das Kondensat warm zurückgespeist wird, ein bei Heizungsanlagen häufiger Fall; dann ist η'' maßgebend.

Diese Darlegungen sollen zeigen, wie vorsichtig man mit der Verallgemeinerung von Versuchs- und noch mehr von den Ergebnissen weniger exakter Erfahrung sein muß, die unter besonderen Verhältnissen und unter bestimmten Änderungen der Versuchsdaten erhalten wurden. So ist die vielfach zu hörende Behauptung von der Überlegenheit des Gegenstromes nur bedingt richtig.

Der Vergleich beider Betriebsarten wird noch durch Tabelle 16 gegeben, die außerdem den Einfluß der Wasserzulauftemperatur und der Dampfüberhitzung zeigen soll.

Tabelle 16 zeigt dreimal, daß der Gleichstrombetrieb rund 10% größere Umsätze liefert als der Gegenstrombetrieb, dagegen nicht ebenso hohe Wassertemperaturen erreichen läßt. Außerdem sind noch folgende Einflüsse gezeigt, die für das Ergebnis von Versuchen von Bedeutung sein können.

Höhere *Zulauftemperatur* (Versuch 72, 79 gegen 1, 16) ergibt höhere Endtemperatur, aber kleinere Temperaturerhöhung des Brauchwassers. Die Dampfaufnahme und daher der Umsatz fällt dabei bei Gegenstrom, steigt bei Gleichstrom.

Höhere *Dampftemperatur* (Versuch 71, 78 gegen 72, 79) hat eine Steigerung der Temperatur (bei Versuch 71, obwohl die Höchstleistung nicht ganz erreicht war) und des Umsatzes zur Folge. Die häufig ge-

hörte Bemerkung, überhitzter Dampf „gebe seine Wärme schwerer ab“, trifft also, obgleich theoretisch nicht zu bestreiten, doch insofern nicht die Sache, als der günstige Einfluß der höheren Temperatur jedenfalls hier der überwiegende ist.

Tabelle 16. Vergleich von Gegenstrom- und Gleichstrombetrieb bei einem Dampfwasserwärmer.

Versuch Nr.	1 Gegenstrom	16 Gleichstrom	72 Gegenstrom	79 Gleichstrom	71 Gegenstrom	78 Gleichstrom
1 Betriebsdruck p at	5	5	5	5	5	5
2 Dampftemperatur t_d °C	163	166	160	163	186	189
3 Dampfaufnahme D kg/h	163	175,5	162,5	182,0	164,3	180,2
4 Kondensattemperatur t_c . . °C	94,7	96,5	95,0	94,7	87,6 (!)	95,6
5 Brauchwassermenge W . . . kg/h	1528	2260	1614	2429	(1688)	2423
6 Zulauftemperatur t_1 °C	7,5	9,0	13,5	13,6	13,4	13,0
7 Ablauftemperatur t_2 °C	66,7	52,7	68,7	55,1	68,9	55,8
8 Temperaturerhöhung $t_2 - t_1$ °C	59,2	43,7	55,2	41,5	55,5	42,8
9 Wärmeumsatz $W \cdot (t_2 - t_1)$ kcal/h	90 400	98 800	89 100	100 800	93 200	103 700
10 Kondensatverlust $\frac{D(t_c - 20)}{W \cdot (t_2 - t_1)}$ —	0,135	0,135	0,136	0,135	0,119(!)	0,132

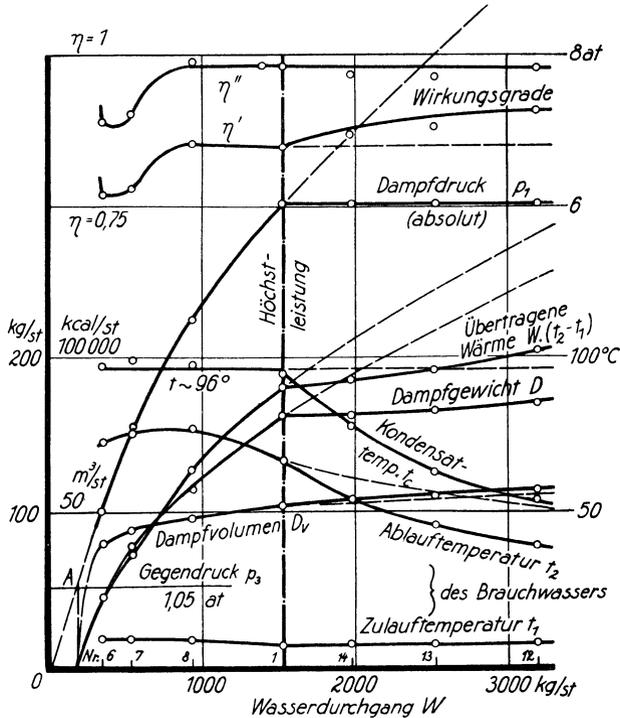


Fig. 43. Wasserwärmer bei wechselndem Wasserdurchgang, eingebaut in eine Anlage von 5 at Betriebsdruck. — Gegenstrombetrieb.

45. Dampfgeschwindigkeiten; Wärmeübergangsverhältnisse. Die Dampfgeschwindigkeit w_d m/s an einer beliebigen Stelle eines Rohres ergibt sich als Quotient aus dem jene Stelle passierenden Dampfvolmen D_v m³/h und dem Rohrquerschnitt f m²: es ist $w_d = \frac{D_v}{3600 f}$; das Dampfvolmen errechnet sich aus dem Dampfgeicht D kg/h unter Benutzung des spezifischen Gewichtes γ in kg/m³ oder des spezifischen Volumens $v = \frac{1}{\gamma}$ m³/kg als $D_v = v \cdot D$. Für gesättigten Dampf ist v abhängig nur vom Druck nach der Dampf tafel, für überhitzten Dampf abhängig von Druck und Temperatur nach Formel (9), § 26. — Ein Beispiel für die Berechnung der Dampfgeschwindigkeit in einem Eintrittsquerschnitt gab § 43 am Ende.

Die Ergebnisse solcher Berechnung sind weiter in den Fig. 41, 43 und 44 eingetragen. Es ergibt sich, daß das aufgenommene Dampfvolmen sich unter allen Umständen in den Grenzen von 40 bis 60 m³/h hält, meist über 50 m³/h. Dem entsprechen, bei 14,1 mm lichtem Rohrdurchmesser, Dampfgeschwindigkeiten zwischen 70 und 105, meist über 89,2 m/s (Fig. 45). Die großen Druckabfälle ergeben also doch nicht unmäßige Geschwindigkeiten. Bei Gegenstrom nimmt mit steigendem Druck das aufgenommene Volmen etwas ab, wenn die Wassermenge unverändert bleibt, es nimmt etwas zu, wenn der Apparat

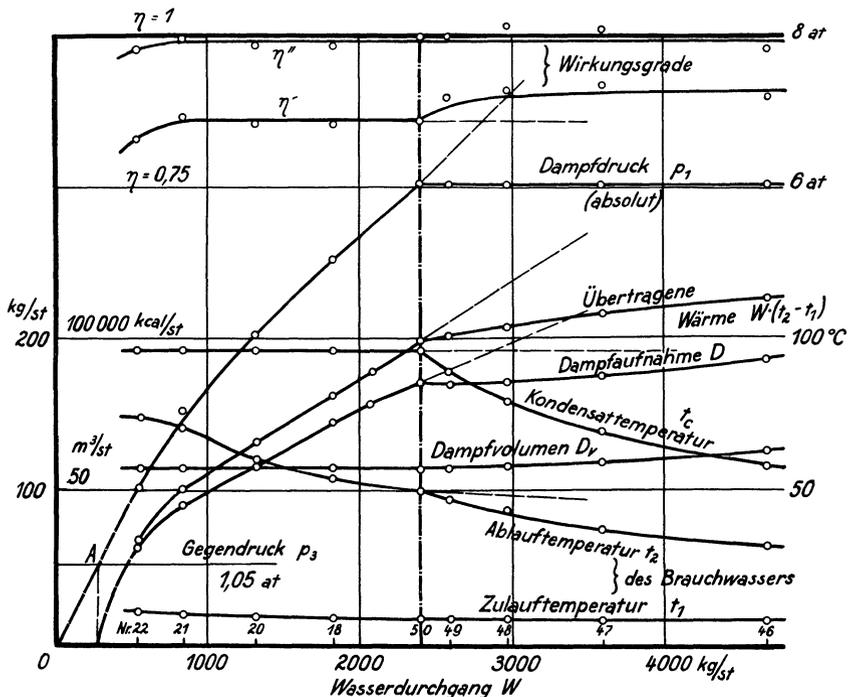


Fig. 44. Wasserwärmer bei wechselndem Wasserdurchgang, eingebaut in eine Anlage von 5 at Betriebsdruck. — Gleichstrombetrieb.

auf Höchstleistung arbeitet. In beiden Fällen ist $60 \text{ m}^3/\text{h}$ entsprechend 105 m/s ein Grenzwert, dem die Dampfaufnahme zustrebt. Bei Gleichstrom ist die Eintrittsgeschwindigkeit trotz zunehmenden Dampfdruckes bei Höchstleistung fast unveränderlich, sie steigt wenig bei unverändertem Dampfdruck mit zunehmender Wassermenge. Immerhin ist im ganzen die höchst erzielbare Dampfgeschwindigkeit offenbar diejenige Größe, die die Leistung des Apparates bestimmt und begrenzt.

Wie stark die einzelnen Elemente der Heizfläche eines Wärm- (oder Kühl-) Apparates an der Wirkung beteiligt sind, findet sich allgemein dadurch, daß man die Zunahme des Wärmeinhaltes des einen oder die Abnahme des anderen Mittels für die einzelnen Teile der Heizfläche ermittelt. Ein Beispiel hierfür ist die Vereinzelung der Heizflächenleistung beim Dampfkessel (§ 33).

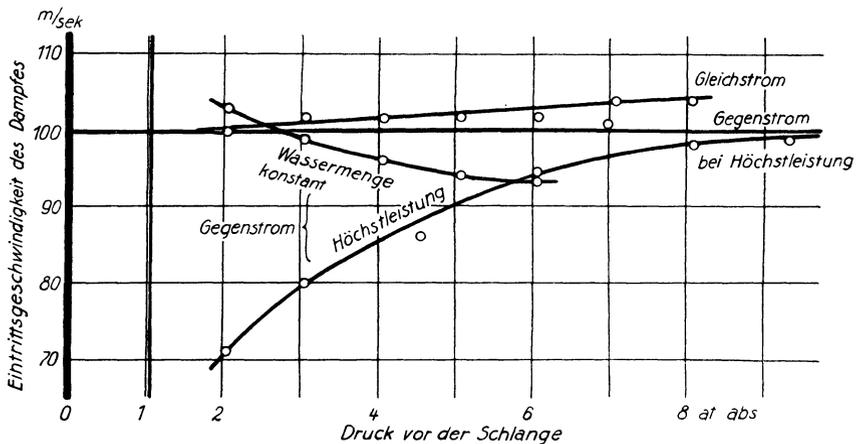


Fig. 45. Dampfgeschwindigkeit beim Eintritt in die Schlange des Wasserwärmers, bei Gleich- und Gegenstrom.

Kann man sowohl die Zunahme des Wärmeinhaltes einerseits als auch die Abnahme desselben andererseits beobachten, so weichen beide Reihen voneinander um die Wärmeverluste ab. Wie man sie aufeinander beziehen kann, ist an Fig. 19, § 33 gezeigt worden. In jedem Fall ist zu beachten, daß neben den Temperaturänderungen auch Änderungen in der Substanz des Wärmeträgers eintreten können. Beim eben zitierten Dampfkesselversuch traten solche durch Veränderung der Rauchgase durch falsche Luft auf. Beim Wasserwärmer wäre entsprechend neben der Temperaturänderung auch die Änderung der Dampfmenge durch Kondensation zu messen. Das begegnet Schwierigkeiten. Um so besser läßt sich die Temperaturzunahme des erwärmten Wassers verfolgen, durch Einbau von Thermometern oder (weniger genau) durch Berühren des Mantels mit einem Draht anderen Metalles, so daß der Berührungspunkt eine Thermoquelle bildet; der Thermowert ist durch Eichung festzustellen; die Berührungsstelle ist durch Isolierung gegen den Einfluß der Hand einerseits, gegen Ableitung anderer-

seits zu sichern. Das Ergebnis der Messung ist aufzutragen als abhängig von der vom Brauchwasser durchlaufenen Heizfläche, die im allgemeinen der Rohrlänge proportional sein wird, Fig. 46. Wenn man ferner durch ein eingeführtes Druckentnahmerohr den Verlauf des Dampfdruckes mißt, so kann man daraus zugleich die Dampftemperatur an jeder Stelle des Rohres als zugehörige Sättigungstemperatur finden.

So wurde bei Versuch 72, Tabelle 15, an einer Stelle mit $0,112 \text{ m}^2$ Heizfläche vom Dampfeintritt aus die Temperatur zu $37,7^\circ$ gemessen (Punkt Z); das Wasser hat bis zu jener Stelle $1614 \cdot (37,7 - 13,5) = 39\,100 \text{ kcal/h}$ aufgenommen. Der Dampf hat an der Stelle einen Druck¹⁾ von $1 \text{ at ÜD} = 2,05 \text{ at abs}$, entsprechend $120,3^\circ$ Sättigungstemperatur. Die Temperaturdifferenz an jener Stelle ist also $120,3 - 37,7$

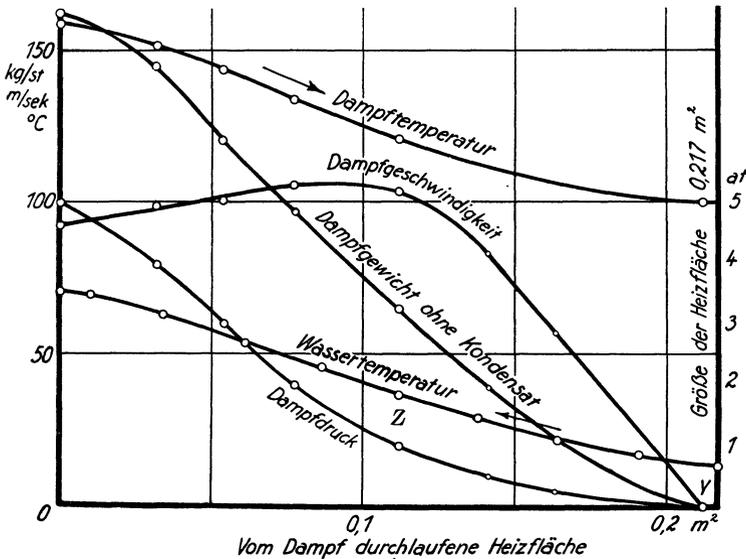


Fig. 46. Wärmeleistung der Heizfläche, Temperaturen und Geschwindigkeiten in einem Wasserwärmer.

$= 82,6^\circ \text{ C}$. Fig. 46 zeigt, daß die Temperaturdifferenz etwa konstant bleibt; dem entspricht gut der fast gleichmäßige Anstieg der Brauchwassertemperatur. Durch Differenzieren der Kurve der Brauchwassertemperatur läßt sich die an der untersuchten Stelle übergehende Wärmemenge auf die Flächeneinheit der Heizfläche bezogen finden; sie wäre über der Temperaturdifferenz aufzutragen, die den Wärmeübergang veranlaßt.

Es läßt sich weiter finden, wieviel Dampf an der untersuchten Stelle, $0,112 \text{ m}^2$ hinter dem Dampfeintritt, noch als solcher vorhanden ist; der Rest ist kondensiert. Der am Eintritt zugeführte Dampf hatte (Tabelle 15, Versuch 72) den Wärmehalt $661,4 \text{ kcal/kg}$. Von der unter-

¹⁾ Dieser Druck wurde nicht direkt gemessen, sondern mangels der Einrichtung hierzu nach besonderem Verfahren ermittelt. Vgl. Gramberg, Versuche an einem Wasserwärmer, Z. d. V. D. I. 1914. S. 174.

suchten Stelle bis zum Ablauen des Kondensates bei 95° , also mit $95,5$ kcal/kg Wärmeinhalt (Dampftafel IV, Spalte 2), werden noch $39\,100$ kcal der gesamten Dampfmenge von $162,5$ kg entzogen, das sind $39\,100 : 162,5 = 240,4$ kcal/kg. Es sind also $240,4 + 95,5 = 335,9$ kcal/kg Wärmeinhalt im Dampf, dessen Druck an jener Stelle zu 1 at ÜD $= 2,05$ at abs bekannt ist. Für diesen Druck ist der Wärmeinhalt der Flüssigkeit (Dampftafel II) $121,1$, der des gesättigten Dampfes $647,5$ kcal/kg. Wie weit nun die Annahme zutrifft, das an der Rohrwand rinnende Wasser habe gleiche Temperatur wie der Dampf, nämlich die Siedetemperatur $120,3^\circ$, ist unsicher. Unterstellen wir sie als zutreffend, so errechnet sich der spezifische Dampfgehalt x bzw. der Feuchtigkeitsgehalt $1 - x$ aus der Gleichung

$$647,5 \cdot x + 121,1 \cdot (1 - x) = 335,9; \quad x = 0,408.$$

Die gesamte, jene Stelle stündlich passierende Dampfmenge ist $0,408 \cdot 162,5 = 66,3$ kg. Bei $2,05$ at abs Druck hat gesättigter Dampf das spezifische Volumen $v = 0,884$ m³/kg (Dampftafel I, Spalte 3); das jene Stelle passierende Dampfvolmen ist $66,3 \cdot 0,884 = 58,6$ m³/h. Bei $0,000\,1561$ m² freiem Rohrquerschnitt (§ 43 a. E.) wird die Geschwindigkeit des Dampfes $\frac{58,6}{3600 \cdot 0,000\,1561} = 104,3$ m/s, wenn

man das Volumen des Wassers vernachlässigt (was wegen der geringeren Geschwindigkeit des herabrinneenden Wassers nicht sicher zulässig ist). Die Geschwindigkeit des Dampfes ist also in jener Gegend, nahe der Rohrmitte, etwa ebenso groß wie am Anfang.

Die gleiche Rechnung für weitere Punkte der Rohrlänge ergibt die in Fig. 46 dargestellten Verhältnisse. Für die zweite Hälfte der Heizfläche, von Z ab, sind Ablesungen nicht vorhanden. Als Anhalt für das Verzeichnen der Kurven dient, daß Dampfgehalt und daher die Geschwindigkeit am Ende der Heizfläche Null werden müssen. Die Kurve des Dampfdruckes, der von der Geschwindigkeit quadratisch abhängt, muß im gleichen Punkte Y tangential an die Achse anlaufen. Der Punkt Y liegt etwas vor dem Heizflächenende, weil das Kondensat nicht mit voll 100° ablieft; seine Lage bestimmt sich daraus, daß für das Stück von Y bis zum Ende Wärmeaufnahme des Brauchwassers und Wärmeabgabe des Kondensates einander gleich sein müssen.

Von den Wärmeverlusten ist bei dieser Rechnung abgesehen; sie sind nach Tab. 15, Z. 21 gering.

III. Wärmekraftmaschinen.

a) Allgemeines über Dampfkraftmaschinen.

46. Dampfverbrauch und Wirkungsgrad von Dampfkraftmaschinen.

An einer Kolbendampfmaschine oder an einer Dampfturbine wird die Wirtschaftlichkeit untersucht, indem man die Menge D kg/h und den Zustand — Druck p at und Temperatur t° C oder Feuchtigkeit $100 x\%$ —

des von der Maschine aufgenommenen Dampfes bestimmt, andererseits die von der Maschine nutzbar abgegebene Leistung N_b . Letztere bezeichnet man als Bremsleistung, weil sie durch Abbremsen unmittelbar gemessen werden kann; man nennt sie auch die Effektivleistung der Maschine, oder ihre Nutzleistung.

Aus den gemessenen Größen berechnet sich ohne weiteres der auf die Leistungseinheit bezogene Dampfverbrauch

$$\varepsilon = \frac{D}{N_b} \dots \dots \dots (1)$$

Wir nennen ihn den *spezifischen Dampfverbrauch* der Maschine oder auch kurzweg den *Dampfverbrauch*. Im Gegensatz dazu vermeiden wir für D das Wort Dampfverbrauch und nennen es die *Dampfaufnahme* der Maschine (§ 3).

Der (spezifische) Dampfverbrauch ist insofern nur ein unvollkommener Maßstab für die Wirtschaftlichkeit der Maschine, als er die Qualität des gebrauchten Dampfes nicht berücksichtigt, die stark verschieden ist, je nach dem Druck und der Überhitzung des Dampfes. Wenn eine mit hohem Druck und hoher Überhitzung arbeitende Maschine einen geringeren Dampfverbrauch hat als eine andere, die mit Sattampf geringerer Spannung arbeitet, so bleibt darum noch zweifelhaft, ob sie wirtschaftlicher arbeitet, da die Erzeugung von 1 kg überhitzten Dampfes mehr Brennstoff erfordert.

Ein besserer Maßstab für die Wirtschaftlichkeit ist der Quotient aus der Nutzleistung und der in dem aufgenommenen Dampf als Wärme steckenden Energiemenge N_2 ; dieser Quotient ist deshalb der *wirtschaftliche Wirkungsgrad* der Dampfmaschine. N_2 ist zu finden als Produkt aus dem Dampfgewicht und der in 1 kg Dampf steckenden Wärme. Hierunter kann man die Wärmemenge verstehen, die zum Erzeugen des Dampfes vom Wärmehalt i_d aus dem in den Kessel gespeisten Wasser von der Temperatur t_w aufzuwenden ist und die bekanntlich (§ 26) $(i_d - i_w)$ kcal/kg beträgt; um bezüglich der Maschinenuntersuchung von den besonderen Verhältnissen des Kesselbetriebes zu abstrahieren, rechnet man wohl mit einer normalen Speisewassertemperatur $t_w = 20^\circ$; dann ist auch $i_w = 20$ kcal/kg zu setzen, also

$$\eta'_w = \frac{N_b}{D \cdot (i_d - 20)} \dots \dots \dots (2)$$

N_b ist hierbei auch in Kalorien auszudrücken. Man kann aber auch unter der im Dampf steckenden Wärme diejenige verstehen, die der Dampf beim einfachen Kondensieren ohne Arbeitsleistung abgeben könnte; als Kondensationstemperatur t_3 hätte man diejenige anzusehen, die als Sättigungstemperatur dem Gegendruck p_3 nach der Spannungs-kurve zugeordnet ist. In dieser Form ist

$$\eta_w = \frac{N_b}{D \cdot (i_d - t_3)} \dots \dots \dots (3)$$

Wir wollen beim reinen Maschinenbetrieb — wo nicht der Kessel mit untersucht wird — letzteren Wert einführen.

$i_d - t_3$ ist diejenige Wärmemenge, die 1 kg Dampf des Zustandes i_d abgibt, wenn es sich verflüssigt und dabei 1 kg Wasser liefert, das mit der Kondensationstemperatur t_3 abläuft. Die gleiche Wärme ist aufzuwenden, um 1 kg Speisewasser der Temperatur t_3 in Dampf des Zustandes p_1, t_1, i_d zu verwandeln (§ 26). Der wirtschaftliche Wirkungsgrad vergleicht also die Ausbeute an Nutzarbeit der Dampfmaschine mit dem, was man an Wärme aufwenden mußte, wenn man das gebildete (nicht unterkühlte) Kondensat ohne Wärmeverlust zum Kessel zurückführen kann.

47. Gütegrade, ohne und mit Beachtung der Maschinenabmessungen.

Bei Wärmekraftmaschinen kommt man zu dem Begriff eines Gütegrades neben dem des Wirkungsgrades aus der Erwägung heraus, daß Wärme nicht vollständig in Arbeit umgesetzt werden kann (zweiter Hauptsatz der Wärmelehre). Wenn daher der thermische Wirkungsgrad die in Arbeit umgesetzte Energie mit der gesamten im Dampf steckenden Wärmeenergie vergleicht, so ist das für die Maschine unbillig, weil die mangelhafte Umsetzung nur zum Teil ihr, zum anderen Teil aber einer unabänderlichen Eigenschaft der Wärme zur Last fällt: man sollte, will man die Maschine beurteilen, die umgesetzte mit der umsetzbaren Wärmemenge vergleichen. Diesen Vergleich erstrebt der Gütegrad.

Bezeichnen wir mit N_1 die im Dampf steckende Wärmemenge, mit N'_1 denjenigen Teil davon, der beim theoretisch günstigsten Arbeitsprozeß umgesetzt werden könnte, so können wir

$$\eta_{opt} = \frac{N'_1}{N_1} \cdot \dots \cdot \dots \cdot \dots \cdot \dots \quad (4)$$

als den *theoretischen Wirkungsgrad des der Maschinenwirkung zugrunde liegenden Arbeitsprozesses* bezeichnen; er ist rein abhängig von den der Maschine auferlegten äußeren Bedingungen (Kessel- und Kondensatordruck, Dampftemperatur). Dagegen ist nun

$$\eta_{gth} = \frac{N_i}{N'_1} \cdot \dots \cdot \dots \cdot \dots \cdot \dots \quad (5)$$

der (*thermische*) *Gütegrad der Maschine*, ein Maß dafür, wie gut sich die Maschine in ihrer thermischen Wirkungsweise dem Idealfall annähert, ein Maß für die theoretische Güte der Maschine. Man kann aber auch den Gütegrad, statt auf die indizierte Leistung, auf die Nutzleistung N_b beziehen und hat im *wirtschaftlichen Gütegrad der Maschine*

$$\eta_{gw} = \frac{N_b}{N'_1} \cdot \dots \cdot \dots \cdot \dots \cdot \dots \quad (6)$$

ein Maß für die gesamte Ausnützung der zur Umsetzung verfügbaren Wärme. —

Der wirtschaftliche Wirkungsgrad der Dampfkraftmaschine ist das Verhältnis der nutzbar an der Welle abgegebenen Leistung N_b zu der im verbrauchten Dampf als Wärme steckenden Leistung N_1 . Der Unterschied beider $N_1 - N_b$ ist der gesamte Verlust bei der Um-

setzung; derselbe ist zum Teil darin begründet, daß die Umsetzung der Wärme in Arbeit gar nicht vollständig stattfindet, zum Teil darin, daß die zunächst umgesetzte Energie nachher, insbesondere durch Reibung, wieder verlorengeht. In diese beiden Teile wird der Gesamtverlust zerlegt durch Bestimmung der indizierten Leistung, die bei Kolbenmaschinen mittels des Indikators meßbar ist (Techn. Mess. Kap. X). Sie stellt den Umsatz (§ 3) des Kraftmaschinenprozesses dar.

Die *indizierte Leistung* N_i ist allgemein diejenige Leistung, die von dem die Arbeit aufnehmenden Maschinenteil (bei der Kolbenmaschine: vom Kolben, bei der Turbomaschine: von der Schaufelung) aufgenommen, also vom Dampf auf diese Teile übertragen wird; zu dem Zweck wird vom Indikator die auf den Kolben wirkende Kraft multipliziert mit dem vom Kolben zurückgelegten Wege.

Der Unterschied

$$V_1 = N_1 - N_i \dots \dots \dots (7)$$

ist also der *Verlust durch unvollkommene thermische Umsetzung* in der Maschine; der entsprechende Wirkungsgrad

$$\eta_t = \frac{N_i}{N_1} \dots \dots \dots (7a)$$

heißt der *thermische Wirkungsgrad* der Maschine, er ist ein Maß dafür, wie gut der thermische Prozeß ist, den man dem Bau der Maschine zugrunde gelegt hat, und wie gut derselbe verwirklicht ist.

Der Unterschied

$$V_2 = N_i - N_e \dots \dots \dots (8)$$

ist der Verlust, der nach Übertragung der Arbeit auf den Kolben im Getriebe der Maschine entsteht, durch Reibung des Kolbens im Zylinder, der Kolbenstange in der Stopfbüchse, des Kreuzkopfes in seiner Führung, der verschiedenen Zapfen in ihren Lagern, des Schwungrades in der Luft. Es sind das durchweg Verluste mechanischer Natur. Der genannte Unterschied ist also kurzgesprochen der *Reibungsverlust* in der Maschine, der entsprechende *mechanische Wirkungsgrad*

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_i} \dots \dots \dots (8a)$$

ist ein Maß dafür, wie die Maschine in mechanischer Hinsicht beschaffen ist, wieweit man durch Konstruktionsmaßnahmen (Anordnung und Bemessung des Getriebes, Verkleiden des Schwungrades) oder durch Betriebsmaßnahmen (gute Schmierung, § 12) die Reibungsverluste herabgezogen hat.

Unmittelbare praktische Bedeutung hat die Kenntnis der indizierten Leistung nicht, ebensowenig die Unterteilung der Verluste und der Wirkungsgrade, die durch sie gegeben wird. Wenn besonders gerne in Garantien für Kolbenmaschinen der mechanische Wirkungsgrad aufgezählt wird, so ist es wohl deshalb, weil er eine hohe Zahl — bis herauf zu 92% — liefert; die Bezugnahme auf die indizierte Leistung erfolgt auch wohl deshalb, weil sie stets schnell, sicher und ohne Be-

triebsstörung zu bestimmen ist, während die Nutzleistung größerer Maschinen durch Abbremsen zu ermitteln eine gefährliche und oft der Betriebsunterbrechung wegen unmögliche Aufgabe ist; nur bei Kuppung mit einer Dynamomaschine ist die Nutzleistung der Dampfmaschine bequem zu bestimmen.

Entsprechend früher angewandter Ausdrucksweise kann man noch als (*effektiven*) *Gütegrad eines Maschinensatzes*, bestehend aus Kraft- und Dynamomaschine, die Größe

$$\eta_{g\,el} = \frac{N_{el}}{N'_1} \dots \dots \dots (9)$$

bezeichnen; entsprechend bei Pump- oder anderen Maschinensätzen.

N'_1 soll hierin in jedem Fall derjenige Bruchteil der verfügbaren Wärme sein, der theoretisch in Arbeit umgesetzt werden kann. Dieser Wert ist nicht eindeutig gegeben, sondern hängt in gewissem Maße von der Art ab, wie man dem Wärmeträger die Arbeit entzieht — sie hängt davon ab, welchen Kreisprozeß man als idealen, theoretisch vollkommenen Arbeitsprozeß dem Vergleich zugrunde legt. Je nach der Art des gedachten Vergleichsprozesses kann man verschiedene Werte N'_1 , $N''_1 \dots$ in die Formeln 4 bis 6 und 9 einführen.

Als *idealer Vergleichsprozeß* dient wohl der Carnot-Prozeß. Zwischen den Temperaturgrenzen (absolut genommen) T_1 und T_3 ist der bestmögliche Wirkungsgrad eines Kreisprozesses $\eta_{opt} = \frac{T_1 - T_3}{T_1}$, also wäre

$$N'_1 = N_1 \cdot \frac{T_1 - T_3}{T_1} \dots \dots \dots (10)$$

Als Temperaturgrenzen kann man die Temperaturen der Dampfüberhitzung und des Kühlwassers einführen oder an Stelle letzterer (auch für Auspuff- und Gegendruckbetrieb brauchbar) die dem Gegendruck entsprechende Sättigungstemperatur.

Meist sieht man von Verwendung des Carnot-Prozesses als eines zu theoretisch-schematischen, praktischen Verhältnissen nicht Rechnung tragenden Vergleiches ab und verwendet Vergleichsprozesse, die sich an Hand der Fig. 47 ergeben. Wenn wir die in der Maschine wirklich arbeitende Dampfmenge vom Anfangszustande der Admission, Punkt A , bis zur Erreichung des Gegendruckes bei B adiabatisch expandieren lassen, so ist durch die Arbeitsfläche A_2ABB_2 eine theoretisch günstigste Arbeitsausbeute N'_1 festgelegt. Zu ihrer Ausnutzung muß die arbeitende Dampfmenge beim Gegendruck des Kondensators das Volumen BB_2 annehmen. — Wenn uns aber bei Kolbenmaschinen das Ausnutzen der Spitze bei B auf zu große Zylindervolumina führt, und wir uns deshalb auf ein Zylindervolumen C_2C beschränken, so ist durch die Fläche $A_2ACC_3B_2$ eine auf das vorhandene Zylindervolumen bezogene günstigste Arbeitsausbeute $N''_1 < N'_1$ festgelegt. Siehe das Beispiel in § 71. Wegen der entsprechenden Verhältnisse an Dampfturbinen vgl. § 61 und § 63.

Je nach dem gewählten Vergleichsprozeß einerseits, je nach der Bezugnahme auf die indizierte oder auf die nutzbare Leistung der

Kraftmaschine oder eines Maschinensatzes andererseits ergeben sich eine Reihe verschiedener Gütegrade, von denen man je nach den vorliegenden tatsächlichen Verhältnissen bei Kolbenmaschinen Gebrauch machen kann. Bei Dampfturbinen kommt die Einführung der indizierten Leistung, obwohl sie begrifflich vorhanden ist, doch deshalb nicht in Betracht, weil sie nicht gemessen werden kann. Bei ihnen kommt auch die Bezugnahme auf ein bestimmtes Zylindervolumen nicht in Frage. Bei Dampfturbinen lassen sich also von den bisher angegebenen nur die Gütegrade $\frac{N_e}{N_1'}$, bei Turbosätzen nur $\frac{N_{el}}{N_1'}$ bilden;

und wo man Vergleiche zwischen Kolben- und Kreiselmotoren ziehen will, wird man diese Gütegrade heranzuziehen haben, während für Kolbenmaschinen unter sich die Bezugnahme auf N_1''' , also auf das bestimmte Zylindervolumen, dem Vergleich der Maschinen besser gerecht wird. —

Recht allgemein versteht man unter Gütegraden solche Vergleichszahlen, die irgendwelchen besonderen Verhältnissen Rechnung tragen wollen, während der Wirkungsgrad immer ganz schematisch das Verhältnis der Energiemengen nimmt, ohne Rücksicht darauf, ob nach Lage des Sonderfalles eine volle Ausnutzung der Energie überhaupt denkbar ist — ob also die Erreichung des Wirkungsgrades Eins überhaupt möglich ist.

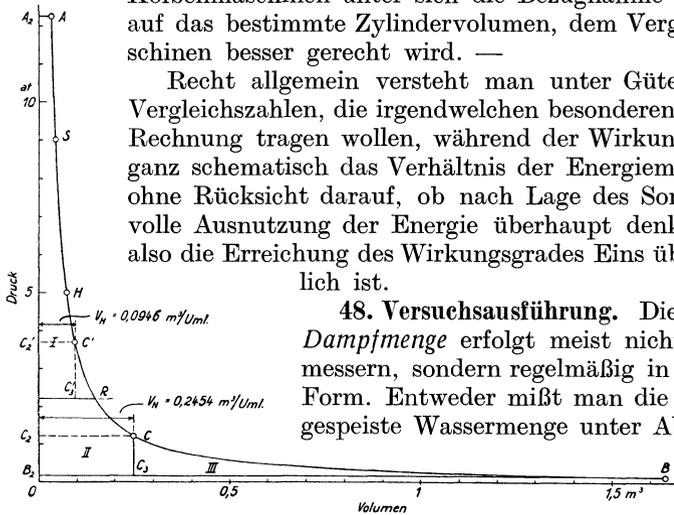


Fig. 47. Ideale Vergleichsprozesse für Dampfkraftmaschinen.

48. Versuchsausführung. Die Messung der Dampfmenge erfolgt meist nicht mit Dampfmeßern, sondern regelmäßig in kondensierter Form. Entweder mißt man die in den Kessel gespeiste Wassermenge unter Abrechnung der

in der Rohrleitung entnommenen oder niedergeschlagenen

Menge. Oder man mißt die aus dem Abdampfutzen der Maschine ausgetretene Dampfmenge, die durch Wärmeentziehung kondensiert werden muß, unter Zurechnung der innerhalb der Maschine für Mantelbeheizung oder zu anderen Zwecken abgezweigten Mengen. Denn als Aufnahme der (Kolben- oder Turbo-) Dampfmaschine ist immer das aus dem Dampfrohr in die Maschine tretende Gewicht anzusehen.— Wo die ganze Dampfkraftanlage — Kessel und Maschine — untersucht werden soll, da wird man die in die Maschine tretende Menge unter anderem auch ermitteln.

Bei der ersten der beiden genannten Meßmethoden entnimmt die Speisepumpe eine Wassermenge D_s aus einer Meßeinrichtung (§ 30) und drückt sie in den Kessel; der Wasserstand in diesem bleibt konstant. Alles gespeiste Wasser, abzüglich etwaiger Leckverluste, z. B. D_l durch das Schlammventil, also $D_s - D_l$ wird verdampft. Von dem Dampf wird z. B. die Dampfspeisepumpe betrieben, ihre Aufnahme

D_p wird in einer Rohrschlinge kondensiert, die man durch Wasser kühlt, und dann gemessen. Alle anderen Zweigleitungen sind abgeflanscht, das Sicherheitsventil muß dicht sein. Das in der Leitung gebildete Kondensat D_k wird in einem Wasserabscheider dicht vor der Maschine vom Dampf getrennt, wird genügend unter 100° gekühlt und zur Messung gebracht. Die Maschine hat dann die Dampfaufnahme

$$D = D_s - D_l - D_p - D_k \dots \dots \dots (11)$$

Bei der zweiten Anordnung, Fig. 48, wird vor der Maschine nur entwässert, damit der in die Maschine kommende Dampf tunlichst wasserfrei ist. Das hier abgetrennte Kondensat braucht nicht gemessen zu werden. Hinter der Maschine pflegt der austretende Dampf schon merklich naß zu sein; der nasse Dampf wird in einem Oberflächenkondensator durch Kühlwirkung vollends niedergeschlagen und

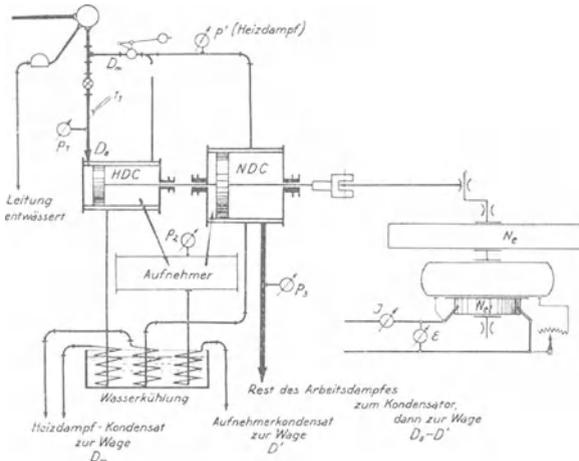


Fig. 48. Versuchsanordnung zur Bestimmung des Dampfverbrauches einer Dampfmaschine.

als Endkondensat D_o zur Wägung gebracht. Kondensatmengen, die als Stopfbüchsendampf, Aufnehmerkondensat oder dergleichen der Maschine anderweit entnommen werden, müssen besonders gewogen werden; bezeichnen wir sie mit D' , $D'' \dots$, so wird die Dampfaufnahme der Zylinder, die wir als Arbeitsdampf-Aufnahme mit D_a bezeichnen

$$D_a = D_o + D' + D + \dots \dots \dots (12a)$$

Ist dann noch die in die Dampfmäntel der Zylinder (und des Aufnehmers) gehende Menge an Manteldampf D_m , so wird die gesamte Dampfaufnahme

$$D = D_a + D_m \dots \dots \dots (12)$$

Bei *Kondensationsbetrieb* steht der Kondensator unter Vakuum; eine Pumpe nimmt das Kondensat aus dem Kondensator und drückt es ins Freie auf eine Wäge. Beim *Auspuffbetrieb* muß man eine ähnliche Anordnung treffen, etwa unter Benutzung eines Kochers einer

chemischen Fabrik, eines Röhrenvorwärmers oder dergleichen; daraus läuft das Kondensat dann frei aus. Auch für Gegendruckbetrieb kann man ähnlich vorgehen. Man kann etwa so bauen: Durch einen Kran aus Gasrohr, der in einem senkrechten Gewinde wagerecht schwenkbar ist, läuft das Kondensat je nach der Kranstellung in die Kanalisation (den Sammelbehälter) oder in ein Gefäß auf einer Wage, ausreichend für eine volle Versuchsdauer. Statt des Schwenkkranes kann man zwei Auslässe mit Ventilen anordnen. Nachdem der Beharrungszustand vermutlich erreicht ist, läßt man von einer bestimmten Zeit an auf die Wage laufen, die vorher tariert war und die nicht entlastet wird. Schon einige Zeit vor einer beabsichtigten Zwischenablesung verschiebt man die Laufgewichte dauernd so, daß jederzeit Gleichgewicht herrscht, so daß namentlich auch zur beabsichtigten Zeit gerade Gleichgewicht vorhanden war; man erreicht darin bald große Übung. Die Stellung der Laufgewichte zur Zeit der beabsichtigten Zwischenablesung notiert man. Die Differenzen werden alsbald auf ihre Gleichmäßigkeit geprüft; genügt diese, so schwenkt man am Versuchsschluß zu genau bestimmter Zeit den Kran von der Wage fort. Selbst bei recht großen Leistungen kommt man oft in dieser Weise zum Ziel, etwa indem man einen geliehenen Eisenbahn-Kesselwagen auf eine Waggonwage stellt. — Man kann auch, namentlich bei Gewichtswagen, bequemer nach dem Einschwenken des Kranes ein bestimmtes Gewicht auf der Wage hinzufügen und die Zeit notieren, wo die Wage durch die Gleichgewichtslage geht; es werden immer gleiche Gewichte hinzugefügt; die Zeitdifferenzen müssen wieder genügend übereinstimmen. Die zweite Art der Messung schmiegt sich weniger gut an die sonstigen Ablesungen an, die man meist in gleichmäßigen Zeitabständen machen will.

Im ganzen werden diese Anbauten zur nachträglichen Messung der Kondensatmengen etwas umständlicher, als meist die Einrichtung zur Messung des Kesselspeisewassers ausfällt; aber die Messung geht dafür viel schneller. Wo mehrere Versuche nötig sind, ist der Gewinn an kostbarer Sachverständigenzeit (auf Kosten von Monteurzeiten) oft beträchtlich.

Gegen die Hauptmenge D_o bzw. D_a pflegen die übrigen Dampfmengen zurückzutreten und den Charakter von Korrekturen zu haben. Während deshalb für die Hauptmenge in besprochener Weise genügend Zwischenablesungen gemacht werden müssen, um aus Übereinstimmung der Differenzen einen Maßstab für die Genauigkeit der Messungen und die Güte des Beharrungszustandes zu gewinnen, so kann man sich bei den Nebenmessungen im Notfall mit entsprechend weniger Ergebnissen begnügen. Die Versuchsdauer muß sich bei der Kesselspeisung nach dieser richten, beträgt also normal 8, minimal 6 h, wenn man sich an die Normen hält. Doch kann man oft schon schneller befriedigende Konstanz der Zwischenablesungen feststellen. Bei Messung des abfließenden Kondensates sind je nach den Versuchseinrichtungen oft recht kurze Versuchszeiten ($\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{2}$ h) möglich.

Der Zustand des Frischdampfes wird durch Messung seines Druckes p_1 und seiner Temperatur t_1 dicht an der Maschine bestimmt; am Abdampfrohr braucht nur der Druck p_3 gemessen zu werden, dem die Tempera-

Tabelle 17. Ablesungsergebnisse beim Dampfverbrauchs-
Tag des Versuches: 1. Februar 1912;

Zeit	Umlaufzähler			Tachometer	Elektrische Leistung		Erregg. (fremd)
	Stand	Diff.	/5 min	<i>n</i>	<i>E</i>	<i>J</i>	<i>i</i>
				/min	Volt	Amp.	Amp.
3 · 19	31 340			2990	231	490	5,8
		14 970	—				
3 · 24	46 310			3020	232	470	5,9
		15 090	—				
3 · 29	61 400			3010	238	470	6,2
		17 950	14 960				
3 · 35	79 350			2950	234	530	6,2
		11 940	14 930				
3 · 39	91 290			2980	234	480	6,2
		14 990	—				
3 · 44	06 280			2980	233	460	6,1
<i>25 min</i>	$n = 74\,940 : 25 = 2998/\text{min}$			$2990/\text{min}$ $= n$	234 $234\text{ V} \times 483\text{ A}$ $= 113,0\text{ kW}$	478 <i>Korr. + 5</i> $6,0 \times 234$ $= 1,4\text{ kW}$	$6,0$ <i>Erregerleistg.</i> $6,0 \times 234$ $= 1,4\text{ kW}$
				<i>mit Zuleitungsverlust 113,1 kW</i> $N_{el} = 113,1 - 1,4 = 111,7\text{ kW}$			

tur in allen normalen Fällen nach der Spannungskurve von Wasserdampf entspricht. Nur beim Arbeiten mit hoch überhitztem Dampf und bei geringer Arbeitsentnahme aus dem Dampf (Gegendruckbetrieb, § 53) ist am Abdampfstutzen Überhitzung zu gewärtigen.

Zur Messung der Arbeitsausbeute soll im folgenden meist an die elektrische Messung mit Gleichstrom gedacht werden. Eine Bremsung (Techn. Mess. § 76 ff.) ist natürlich möglich wie bei der Gasmaschine (§ 92). Eine Messung mit Drehstrom gibt § 53. Bei Gleichstrom ist die Spannung *E* in Volt, die Stromstärke *J* in Ampere zu messen, das Produkt gibt die Leistung in Watt.

Man sollte stets, wenn die Drehzahl direkt ins Ergebnis eingeht, für fortlaufende Zählung der Umläufe durch ein Zählwerk sorgen; beim Bremsen und beim Indizieren ist es also empfehlenswert, nötigenfalls ein Zählwerk fest extra anzubauen. Bei elektrischer Messung der Dampfturbinenleistung genügt eher ein Tachometer. Die Messung der Drehzahl erfolgt, auch wenn sie bei elektrischer Leistungsmessung nicht nötig ist, indem man den Stand eines Zählwerkes zu jeder Ablesungszeit (alle 5, 10, 15 Minuten) einfach notiert, nicht etwa zweimal im Abstand von 1 Minute. Die Differenzen werden alsbald gebildet und von der dritten Ablesung an auf ihre Gleichmäßigkeit geprüft.

Wegen alles weiteren muß auf die Beispiele verwiesen werden, § 49 und 65.

b) Dampfturbine.

49. Beispiel eines Verbrauchsversuches an einer Dampfturbine. Ein Versuch (Nr. 101) an einer Turbodynamo — einem Maschinensatz aus

versuch Nr. 101 an einer Gleichstrom-Turbodynamo.
 BSt 747 mm QS = 1,02 at.

Manometer			Dampf- temperatur t_1	Kondensatwage		
Frischdpf p_1	Drosseldpf p_2	Abdampf p_3		Stand	Diff.	/5 min
at	at	cm Vakuum	° C	kg	kg	kg
10,0	8,0	64	213	186,4	133,6	—
10,0	7,9	64	215	320,0	132,6	—
10,2	8,05	64	213	452,5	163,7	136,4 } 265,5 = 127,3 } 2 · 132,8
10,1	8,6	62	215	616,2	101,8	
10,3	8,0	64	216	718,0	134,5	—
10,4	7,9	64	219	852,5		
10,2 abs 11,2 at	8,07 Korr. — 0,11 UD 7,96 at = 8,98 at abs	63,7 cm Vak 110 mm abs 0,15 at abs	215,5 Fad. Korr. + 2,5° 218°	$D = 666,1 \text{ kg} \times 60/25 = 1600 \text{ kg/h}$ $D/N_{ei} = \frac{1600}{111,7} = 14,3 \text{ kg/kW} \cdot \text{h}$		

Dampfturbine und Dynamomaschine, beide direkt miteinander gekuppelt — lieferte das Protokoll Tabelle 17, in dem die Ablesungsergebnisse gleich systematisch zusammengestellt und bis zu einem gewissen Grade verarbeitet sind.

Die elektrischen Instrumente zeigten 234 Volt Spannung und 478 Ampere Stromstärke im Mittel an; an letzterer Ablesung ist, nach der Eichung des Instrumentes, eine Korrektur von + 5 Ampere anzubringen, die wahre Stromstärke ist also 483 A. Die Leistung am Schaltbrett gemessen wird $234 \text{ V} \times 483 \text{ A} = 113\,000 \text{ Watt} = 113,0 \text{ kW}$. Die Verluste in den Zuleitungen von der Maschine zum Schaltbrett können oft nicht unbeachtet bleiben; die beiden Zuleitungen haben zusammen 0,00063 Ohm Widerstand und geben also einen Energieverlust von $0,00063 \times 483^2 = 147 \text{ Watt} \approx 0,1 \text{ kW}$, sie sind also im vorliegenden Fall unwesentlich, weil Länge und Querschnitt der Leitung günstig sind; die Klemmenleistung der Dynamomaschine wird 113,1 kW. — Um hieraus die Leistung der Turbine zu finden, hat man N_{ei} entweder durch den Wirkungsgrad der Dynamo zu dividieren, oder man hat die Verluste der Dynamomaschine zu N_{ei} hinzuzuzählen — je nachdem, welche Angaben vorliegen. Vergleiche hierüber § 90. Hier soll mit den Verlusten gerechnet werden, sie setzen sich aus drei Teilen zusammen, nämlich dem Aufwand für Erregung, dem Kupferverlust im Anker und den allgemeinen Verlusten im Anker durch Hysterese und Wirbelströme, Lagerreibung und Ventilation, kurz gesagt die Eisen- und Reibungsverluste. In unserem Fall ist die Erregung nicht in Rechnung zu setzen, weil sie als Fremderregung von einer anderen Stromquelle aus erfolgte (im Interesse der Regelung, § 163).

Ihr Betrag wäre übrigens, einschließlich der Verluste im Feldregler, $E \cdot i$ Watt.

Der Kupferverlust im Anker findet sich aus dem Ankerstrom J_A und seinem Widerstand W_A zu $J_A^2 \cdot W_A$; in unserem Fall ist $J_A = J$, wegen der Fremderregung (sonst um den Erregerstrom i größer), $W_A = 0,011 \Omega$ ist bekannt, also ist $J_A^2 \cdot W_A = 483^2 \cdot 0,011 = 2560 \text{ W} = 2,6 \text{ kW}$. Die Eisen- und Reibungsverluste, die abhängig sind von Erregung und Drehzahl, sind bei $n \approx 3000$ und $i = 6,0$ zu $22,0 \text{ kW}$ bestimmt worden. Diese Bestimmung hat tunlichst am gleichen Tage zu erfolgen, da die Ventilationsverluste auch merklich von der Luftdichte, also von der Temperatur und dem Barometerstand abhängen; auch ist es deshalb (ebenso für die Kupferverluste) wesentlich, alle Messungen im betriebswarmen Zustand der Maschine zu machen.

Die Nutzleistung der Dampfturbine — die Arbeitsaufnahme der Dynamomaschine — ist $N_t = 113,1 + 2,6 + 22,0 = 137,7 \text{ kW}$. Man kann sie auch in Pferdestärken angeben: $N_t = 137,7 \cdot 1,36 = 187,2 \text{ PS}$; wir wollen es jedoch bei elektrisch gekoppelten Sätzen beim Kilowatt als Leistungseinheit, auch für die mechanischen Leistungsangaben, der Einheitlichkeit wegen bewenden lassen. — Soll die Nutzleistung des Maschinensatzes, d. i. also die Nutzleistung der Dynamomaschine gegeben werden, so wäre diese streng genommen nicht mit der oben schon berechneten Klemmenleistung der Dynamo identisch; denn die fremde Erregung bildet eine von außen kommende Energiezufuhr, die in Abzug zu bringen ist; als zugeführte Erregerenergie ist $E \cdot i = 234 \text{ V} \times 6,0 \text{ A} = 1400 \text{ W} = 1,4 \text{ kW}$ (nicht etwa nur $i^2 \cdot W_F$, wobei W_F der Feldwiderstand) der Maschine anzurechnen als teils im Feldregler, teils in der Feldwicklung verloren. Die elektrisch verfügbare Nutzleistung ist mit $N_{el} = 113,1 - 1,4 = 111,7 \text{ kW}$ anzusetzen.

Der Messung der erzielten Leistung tritt die Messung des verbrauchten Dampfes und seiner Qualität gegenüber. In 25 min wurden 666,1 kg auf der Wage verwogen, also sind genau 1600 kg/h verbraucht worden. Der auf die geleistete Kilowattstunde bezogene Dampfverbrauch ist

$$\text{für die Dampfturbine allein: } \frac{1600 \text{ kg/h}}{137,7 \text{ kW}} = 11,6 \frac{\text{kg}}{\text{kW} \cdot \text{h}},$$

$$\text{für die Turbodynamo: } \frac{1600 \text{ kg/h}}{111,7 \text{ kW}} = 14,3 \frac{\text{kg}}{\text{kW} \cdot \text{h}}.$$

Die Qualität des Frischdampfes ist durch seinen Druck — 10,2 at $\text{ÜD} = 11,2 \text{ at abs}$ — und seine Temperatur gegeben; für letztere ist $215,5^\circ$ am Thermometer abgelesen, die Fadenkorrektion (Techn. Mess. § 98) ist mit $2,5^\circ$ in Rechnung zu stellen (herausragend ab 125° , Fadentemperatur 40° , also $\text{FK} = (215,5 - 40) \cdot (215,5 - 125) : 6300 = 2,5^\circ$, die Dampftemperatur ist $t_1 = 215,5 + 2,5 = 218^\circ$. Der Abdampf hat ein Vakuum von 637 mm QuS; bei 747 mm QuS Barometerstand ist der absolute Druck des Abdampfes $747 - 637 = 110 \text{ mm QuS} = 110 : 735 = 0,15 \text{ at abs}$.

Um die gesamte Ausnutzung der Dampfergie im wirtschaftlichen Wirkungsgrad zu erfassen, müssen wir die im Dampf steckende bzw.

die zu seiner Erzeugung aufgewendete Wärmemenge kennen. Auf 1 kg Dampf bezogen, ergibt sie sich entweder formelmäßig oder graphisch. Formelmäßig ist der Wärmeinhalt des Wasserdampfes bei 11,2 at und 218° (Techn. Mess. § 107, oder dies Buch § 26) $i_1 = 594,7 + 0,477 \cdot 218 - 1,05 \cdot 11,2 = 594,7 + 104,0 - 11,8 = 686,9$ kcal/kg ($\mathfrak{J} = 1,05$ zu entnehmen Fig. 14 bei § 26). Statt dessen kann man den Wärmeinhalt auch unmittelbar der Entropietafel von Mollier (i - s -Diagramm) entnehmen; diese¹⁾ ergibt für $p_1 = 11,2$, $t_1 = 218$ den Wert $i_1 = 686,2$ kcal/kg; mit diesem Wert rechnen wir weiter.

Der Wert i_1 bezieht sich auf 0° Anfangstemperatur des erwärmten Wassers. Wenn aber nur die Dampfkraftmaschine als solche betrachtet wird, so steht es frei, das Kondensat in den Kessel zurückzuschaffen, wobei es die zu 0,15 at abs Druck als Sättigungstemperatur zugeordnete Temperatur und den zugeordneten Wärmeinhalt haben könnte. Man findet in der Dampftabelle (Hütte, 22. Auflage, I, S. 416) bei $p_3 = 0,15$ die Temperatur $t_{s3} = 53,7^\circ \text{C}$ und die Flüssigkeitswärme $q_3 = 53,8$ kcal/kg (dort mit i' bezeichnet). Man hat also, unter den der Maschine durch äußere Umstände auferlegten Bedingungen von

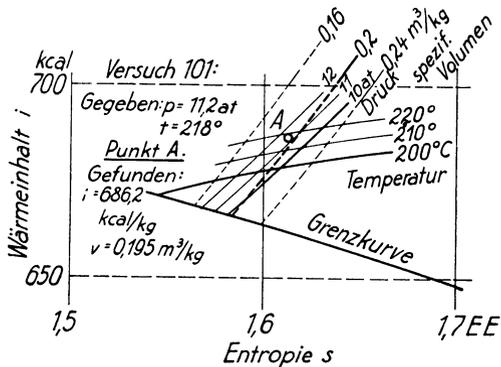


Fig. 49. Benutzung des Mollier'schen i - s -Diagrammes $\frac{1}{2}$ nat. Gr.

Druck und Temperatur, einen Wärmeverbrauch $i_1 - q_3 = 686,2 - 53,8 = 632,4$ kcal zu leisten, um 1 kg Dampf zu erzeugen.

Man braucht nun $D/N_t = 11,6$ kg Dampf, um 1 kW · h an der Turbinenwelle, oder $D/N_{el} = 14,3$ kg, um 1 kW · h nutzbar an der Dynamomaschine zu erzielen; mit diesen Dampfmengen macht man also das Äquivalent von 1 kW · h = 859 kcal nutzbar; mit 1 kg Dampf macht man $859 : 11,6 = 74,1$ bzw. $859 : 14,3 = 60,1$ kcal nutzbar, bei Aufwendung von 632,4 kcal. Der gesamte (wirtschaftliche) Wirkungsgrad wird daher

für die Turbine allein $\eta_w = 74,1 : 632,4 = 0,117$ oder 11,7%,

für die Turbodynamo $\eta_w = 60,1 : 632,4 = 0,095$ oder 9,5%. —

Die Ermittlung von i_1 aus dem i - s -Diagramm war als bekannt angenommen worden. Sie möge durch Fig. 49 noch erläutert werden. Zum Wärmeinhalt i als Ordinate und der Entropie s als Abszisse (letztere wird hier nicht benutzt) sind Kurvenscharen gleichen Druckes und (im Überhitzungsgebiet) gleicher Temperatur aufgetragen. Wir haben

¹⁾ Beilage zu Stodola, Die Dampfturbinen, 4. Aufl. Berlin, Julius Springer, 1910; auch besonders zu beziehen.

also durch Interpolieren zwischen den sich kreuzenden Kurvenscharen den Punkt A ($p = 11,2$, $t = 218$) einzuzeichnen und die zugehörige Ordinate $i = 686,2$ mit dem Millimetermaß abzulesen.

Zu dem Ablesungsprotokoll Tabelle 17 ist noch zu bemerken: Die *Ablesungen* erfolgten alle 5 min. *Bei den integrierenden Instrumenten* (Umlaufzähler und Wage) sind Spalten zum Differenzbildern vorgesehen. Die Gleichmäßigkeit der Differenzen bürgt für genaues Ablesen und für den Beharrungszustand. — Um 3 h 34 min hatte man die genaue Zeit zum Ablesen verpaßt. Es wurde einfach 1 min später abgelesen; eine besondere Spalte für Eintragung der auf normale Ablesungsdauer (5 min) bezogenen Differenzen ermöglicht es auch hier, den Überblick zu behalten. An der Kondensatwage freilich scheint auch um 3 h 35 min die Ablesung ungenau gemacht zu sein. Der zu hohe Wert 136,4 und der zu niedrige 127,3 gleichen sich zu $2 \cdot 132,8$ so befriedigend aus, daß man annehmen darf, nur der Zwischenabschluß sei ungenau gemacht, der Beharrungszustand aber auch an dieser Stelle fehlerfrei. Nur wurde die Versuchsdauer, die eigentlich zu 20 min geplant war, um 5 min verlängert, um die Gleichmäßigkeit nochmals zu prüfen und den Versuch nicht verloren geben zu müssen.

50. Versuchsreihe bei verschiedener Belastung mit Kondensation. Der gleiche Versuch, wie im vorigen Paragraphen eingehend besprochen, läßt sich bei verschiedener Belastung der Maschine vornehmen. Den verschiedenen Belastungen paßt sich die Dampfturbine unter dem Einfluß ihres Reglers automatisch an, indem der Regler den Dampfdruck vor dem ersten Düsensatz soweit herabdrosselt, daß der Dampf gerade die erforderliche Leistung hergibt. Der Drosseldruck p_2 hinter dem Regelschieber wird wie in Tabelle 17 gemessen, er betrug dort 8,1 at ÜD = 9,1 at abs.

Die *Einstellung der verschiedenen Belastungen* geschieht bei der Turbodynamo durch Veränderung des äußeren Widerstandes W_a , gegen den die Dynamo arbeitet; je größer W_a , desto kleiner, bei festliegender Klemmenspannung E , die Stromstärke J , denn es ist $J = \frac{E}{W_a}$;

die Leistung ist dann $E \cdot J = \frac{E^2}{W_a}$, also bei unveränderter Klemmenspannung umgekehrt proportional dem äußeren Widerstand: für $W_a = \infty$, offener Stromkreis, würde $E \cdot J = 0$; für einen gewissen zulässigen Mindestwert von W_a wird $E \cdot J$ so groß, wie die Kraftmaschine eben noch durchzieht. — Die umgekehrte Proportionalität ist nicht übersichtlich; man kann faßlicher von einer Veränderung der äußeren Leitfähigkeit $G = 1/W_a = \frac{J}{E}$ S sprechen; die äußere Leitfähigkeit, deren Einheit nach den Festsetzungen des AEF das Siemens S, der reziproke Wert des Ohm, ist, ist die Stromaufnahme des Netzes für 1 Volt Spannung, ihr ist die Leistung direkt proportional: $E \cdot J = E^2 \cdot \frac{1}{W_a} = E^2 G$.

Über Belastungswiderstände siehe Techn. Mess. § 80.

Tabelle 18. Dampfverbrauch und wirtschaftlicher Wirkungsgrad einer Dampfturbine bei wechselnder Belastung Kondensationsbetrieb.

Versuch Nr.	3	13	4	101	10
1 Drehzahl n /min	2997	3000	2982	2990	2988
2 Elektrische Leistung: Spannung E . . . V	230	228	228	234	224
3 „ „ Stromstärke J Amp	0	155	411	483	594
4 „ „ Leistung $E \cdot J$. kW	0	35,4	93,6	113,0	133,2
5 Verlust in Zuleitung 0,00063 J^2 . . . „	0	0	0,1	0,1	0,2
6 Klemmenleistung der Dynamo $N'_{el} = E \cdot J + 0,00063 \cdot J^2$ „	0	35,4	93,7	113,1	133,4
7 Erregerstrom i (Fremderregung) . . Amp	6	6	6	6	6
8 Erregungsleistung $E \cdot i$ kW	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3
9 Nutzleistung der Dynamo $N_{el} = E \cdot J + 0,00063 \cdot J^2 - E \cdot i$. . . „	-1,4	34,0	92,3	111,7	132,1
10 Verlust V in der Dynamo durch Hysteris usw. „	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0
11 Ankerverlust $J^2 \cdot W_A = 0,011 J^2 = V_A$ „	0	0,3	2,0	2,6	4,2
12 Nutzleistung der Turbine $N_t = N'_{el} + V + V_A$ „	22,0	57,7	117,7	137,7	159,6
13 Dampfaufnahme D kg/h	415	758	1410	1600	1956
14 Dampfverbrauch des Maschinensatzes D/N_{el} kg/kW·h	-296	22,2	15,3	14,3	14,8
15 Dampfverbrauch der Dampfturbine D/N_t „	18,8	13,1	12,0	11,6	12,3
16 Druck des Frischdampfes p_1 at abs	12,4	12,3	12,2	11,2	12,2
17 „ des Drosseldampfes p_2 „	2,14	4,04	7,86	8,98	11,04
18 „ des Abdampfes p_3 „	0,097	0,080	0,14	0,15	0,21
19 Temperatur des Frischdampfes t_1 . . . °C	192	191	202	218	221
20 „ des Drosseldampfes t_2 . . . °C	—	—	—	197	—
21 Wärmehalt des Frischdampfes i_1 kcal/kg	671,5	671,2	677,3	686,2	687,8
22 Flüssigkeitswärme q_3 zu p_3 „	45,1	41,4	52,0	53,8	60,9
23 Wirtschaftlicher Wirkungsgrad des Maschinensatzes $\frac{859 \cdot N_{el}}{D \cdot (i_1 - q_3)}$ —	-0,005	0,0615	0,091	0,095	0,093
24 Wirtschaftlicher Wirkungsgrad der Turbine $\frac{859 \cdot N_t}{D \cdot (i_1 - q_3)}$ —	0,0729	0,104	0,114	0,117	0,111

In Tabelle 18 wird die Leitfähigkeit G von Null bis $G = 594/224 = 2,65$ S gesteigert. Die Turbine folgt dem, indem sie den Drossel- druck von 2,14 at, die für Leerlauf immer noch nötig sind, bis 11,04, das ist bis nahe an den Frischdampfdruck heran steigert. Es ist wegen der verfügbaren Drosselquerschnitte unmöglich, näher an den Frisch- dampfdruck heranzukommen, der die äußerste Grenze für die Lei- stungssteigerung bildet. Noch weitere Vergrößerung von G führt zur Minderung der Drehzahl, nicht aber zur Leistungssteigerung (§ 152). — Mit der Leistungssteigerung steigt naturgemäß die Dampf- aufnahme der Turbine, im ganzen von 415 bis 1956 kg/h. Der (spe- zifische) Dampfverbrauch hat einen abfallend hyperbolischen Verlauf, wie nach den Darlegungen § 5 zu erwarten; dort ist auch näher be-

sprochen, daß der Verlauf bei der Turbine allein (Fig. 50) günstiger ist als für den Maschinensatz (Fig. 50), weil er bei der Turbine über einen großen Bereich der Belastung hin — bis herab zu weniger als halber Vollast — etwa konstant ist, beim Turbosatz aber mit fallender Belastung bald ansteigt. Die Konstanz der beidemale verschiedenen Eigenverluste ist hieran schuld.

Bei jeder solchen Versuchsreihe ist der Leerlauf ein charakteristischer Fall, das tunlichst auch durch Messungen belegt werden sollte. Für den Turbosatz ist das auch geschehen. Für die Turbine allein fehlt der Leerlaufversuch, der sich durch Abkuppeln der Dynamo und Betreiben

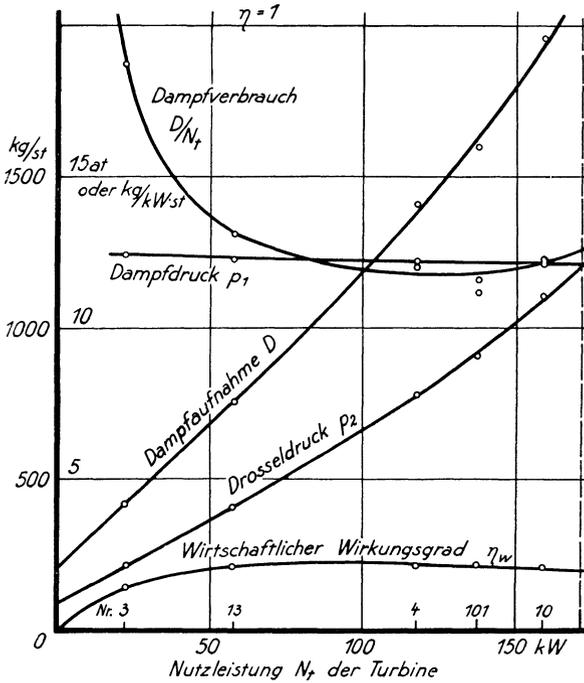


Fig. 50. Wirtschaftlichkeit einer Dampfturbine im Kondensationsbetrieb.

falls auch bei voller Klemmenspannung der Maschine, also mit Erregung stattzufinden, da auch bei der übrigen Reihe diese Größen konstant gehalten worden waren; dann aber ergibt sich durch Abziehen der aufgewendeten Erregerleistung von der Dynamoleistung — von Null — ein negativer Wert; derselbe besteht sachlich zu Recht, nicht nur formell.

Wenn in dieser Weise bei einem für gut befundenen Rechnungsgang solche Absonderlichkeiten vorkommen, so mag man den Rechnungsgang auf seine sachliche Folgerichtigkeit nachprüfen; es läßt sich darüber streiten, ob man die Erregerleistung von der Klemmenleistung absetzen muß, wenn die Maschine nun einmal mit Fremderregung

der Turbine allein leicht hätte verwirklichen lassen.

Beim *Leerlauf des Satzes* ergibt sich in der Auswertung die sonderbare Erscheinung, daß die Nutzleistung und daher der Wirkungsgrad schwach negativ werden. Es kommt das davon, daß die die Turbine mit

Fremderregung lief, die eingeführte Erregungsenergie aber nach dem in § 49 gegebenen

Rechnungsgang von der gemessenen Leistung abzusetzen ist, um die Nutzleistung zu finden. Der

Leerlauf hat jeden-

arbeitet. Wenn man dann aber bei dem Rechnungsgang verbleibt, dann soll man auch die Konsequenzen für den Sonderfall des Leerlaufs nicht verdecken; die Zahlen gehören negativ in die Tabelle, wie sie mathematisch errechnet werden, und die Punkte ebenso in das Schaubild; die Punkte werden sich so gut wie andere in die Kurven einfügen, so der negative Wert für η_w Fig. 51; die Kurve muß außerdem durch den Nullpunkt gehen. Falsch wäre es aber offenbar, die bei Leerlauf gemessene Dampfaufnahme 415 kg/h zu $N_{el} = 0$ zuzuordnen; bei $N_{el} = 0$ ist vielmehr nach Fig. 51 $D = 430$ kg/h.

— Der Wert $D/N_{el} = -296$ gehört dem anderen Ast der Hyperbel an und ist zwar richtig, aber praktisch bedeutungslos.

Die Drehzahl der Maschine wird für die Auswertung nicht benutzt. Sie hat auch auf das Ergebnis nur geringen Einfluß (§ 59). Sie wurde durch Bedienung der Drehzahlverstellung etwa konstant gehalten und zeigt daher keinen regelmäßigen Gang, was sonst der Fall sein müßte, wenn die Regelung sich selbst überlassen geblieben wäre (§ 152). Wo die Drehzahl ins Meßergebnis eingeht (indizierte Leistung von Kolbenmaschinen), sind solche künstlichen Eingriffe zu vermeiden.

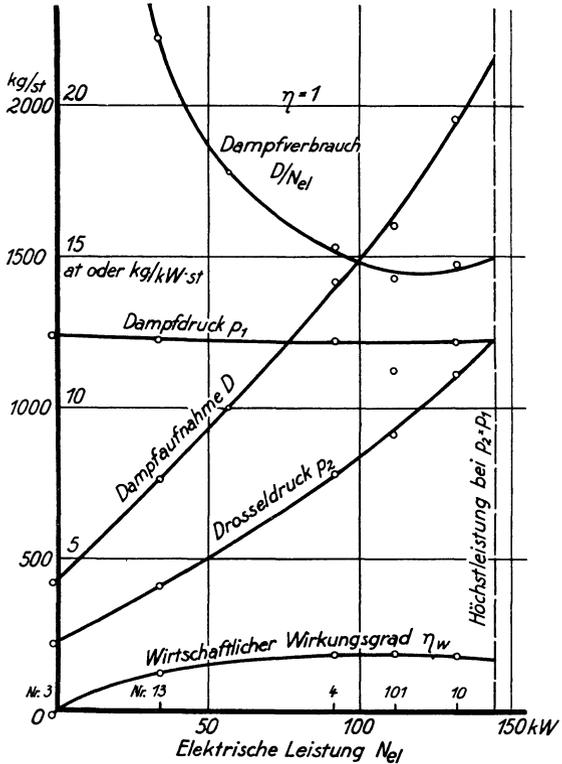


Fig. 51. Wirtschaftlichkeit einer Turbodynamo im Kondensationsbetrieb.

Mit steigender Belastung läßt wegen der Druckverluste in der Rohrleitung der Frischdampfdruck wenig nach; die Temperatur des Frischdampfes steigt wegen des kleineren Temperaturabfalls in der Dampfleitung bei höherer Dampfgeschwindigkeit (§ 38). Der Gegendruck der Kondensation gegen den Abdampf steigt etwas wegen zunehmender Erwärmung des Kondensatorwassers. Allen diesen natürlichen Erscheinungen kann man nach Bedarf künstlich entgegenwirken, ähnlich wie es bei der Drehzahl geschah, z. B. durch Vermehren des Kühlwassers der Kondensation.

51. Dampfturbine im Auspuffbetrieb. Der Dampf ging beim Kondensationsbetrieb in den Kondensator, nachdem er die Turbine verlassen hatte. Im Kondensator wurde durch die Kühlwirkung des Wassers und durch die Wirkung der Luftpumpe ein Unterdruck unter der Atmosphäre aufrecht erhalten, so groß, daß man der absoluten Luftleere nicht allzu fern war.

Läßt man Luft in den Kondensator treten, indem man ihm eine Öffnung gibt oder auch nur die Luftpumpe anhält, so zerstört man die Luftleere; der Dampf wird aber nach wie vor kondensiert, wenn

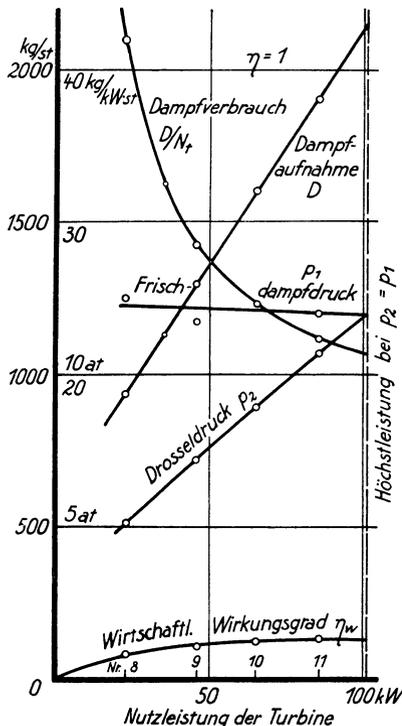


Fig. 52. Wirtschaftlichkeit einer Dampfturbine im Auspuffbetrieb.

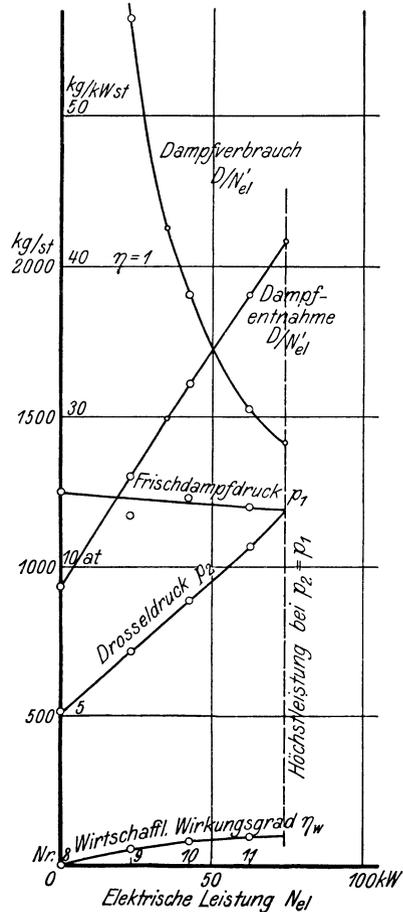


Fig. 53. Wirtschaftlichkeit einer Turbodynamo im Auspuffbetrieb.

man ihn nach wie vor in den Kondensator treten läßt und dort durch Kühlwasserumlauf für Wärmeabfuhr sorgt. Man hat dann Auspuffbetrieb, obwohl der Dampf noch immer nach Verlassen der Maschine kondensiert wird. Der Auspuffbetrieb ist durch den höheren Gegen- druck — durch das Fehlen des Vakuums — gekennzeichnet; es ist für die Maschine aber gleichgültig, was mit dem Dampf geschieht, nachdem er sie verlassen hat, ob er also eigentlich a u s p u f f t oder niedergeschlagen wird.

Tabelle 19. Dampfturbine bei veränderlicher Nutzleistung, Auspuffbetrieb.

Versuch Nr.		12	6	7	8	9	10	11
1	Drehzahl n /min	410	942	1765	3000	3000	3000	3000
2	Elektrische Leistung N'_{el} kW	0	0	0	0	23,0	42,1	62,2
3	Nutzleistung der Turbine N_t „	0,6	1,2	7,2	22,4	45,5	64,9	85,4
4	Dampfaufnahme D kg/h	238	354	546	(940)	(1300)	(1602)	(1902)
5	Dampfverbrauch des Maschinensatzes D/N'_{el} kg/kW · h	—	—	—	∞	56,6	38,1	30,6
6	Dampfverbrauch der Dampfturbine D_t „	—	—	—	42,0	28,6	24,7	22,2
7	Druck des Frischdampfes p_1 . . at abs	12,1	12,0	11,6	12,5	11,7	12,3	12,0
8	Druck des Drosseldampfes p_2 . . „	1,51	2,03	3,03	5,08	7,18	8,93	10,7
9	Druck des Abdampfes p_3 „	1,04	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,0
0	Temperatur des Frischdampfes t_1 . °C	190	184	185	187	202	202	206
1	Wärmeinhalt des Frischdampfes i_1 kcal/kg	—	—	—	668,5	677,8	677,2	679,1
2	Flüssigkeitswärme q_3 zu p_3 „	—	—	—	100,5	100,5	100,5	100,5
3	Wirtschaftlicher Wirkungsgrad des Maschinensatzes $\frac{859 \cdot N'_{el}}{D \cdot (i_1 - q_3)}$	—	—	—	0	0,026	0,039	0,049
4	Wirtschaftlicher Wirkungsgrad der Turbine $\frac{859 \cdot N_t}{D \cdot (i_1 - q_3)}$	—	—	—	0,036	0,052	0,060	0,067

Wenn man beim Auspuffbetrieb den Dampf niederschlägt, so geschieht es zu Meßzwecken oder z. B. um warmes Wasser von genügend hoher Temperatur zu gewinnen. Wo beides nicht nötig ist, läßt man den Dampf einfach über das Dach blasen, und gerade die damit erreichte Betriebsvereinfachung ist der Zweck des Auspuffbetriebes, auch Kühlwassermangel kann dazu veranlassen.

Tabelle 19 und Fig. 52 und 53 geben die Ergebnisse einer Versuchsreihe, die in ganz gleicher Weise wie die in § 50 besprochene an derselben Dampfturbine, jedoch im Auspuffbetrieb vorgenommen wurden. Es ist also $p_3 = 1,03$ at abs. Die ersten drei Versuche geben das Anlaufen der unbelasteten Turbodynamo.

Über die Ergebnisse des Versuches ist nichts Besonderes zu bemerken.

Im Vergleich zu der Reihe bei Kondensation, Tabelle 18, zeigt sich folgendes: Die Höchstleistung der Turbine, gekennzeichnet dadurch, daß der Dampf ungedrosselt verwendet wird, $p_2 = p_1$, ist kleiner als bei Kondensationsbetrieb, nämlich 102 kW gegen 172 kW; der Rückgang an erzielbarer Leistung ist 41%: die Leistungen verhalten sich wie 59 zu 100. Noch krasser ist der Leistungsrückgang bezogen auf den Maschinensatz: die elektrisch erzielbare Leistung ist um 46% zurückgegangen.

Dabei nimmt die Turbine aber im Zustande der Höchstleistung, wenn also die erste Düsenreihe mit dem vollen Dampfdruck beaufschlagt wird, beidemal die gleiche Dampfmenge, 2150 kg/h, auf.

Daraus folgt ohne weiteres, daß der Dampfverbrauch und der Wirkungsgrad beim Auspuffbetrieb im gleichen Verhältnis ungünstiger

werden: aus derselben Dampfaufnahme zieht der Auspuffbetrieb weniger Nutzen.

52. Dampfaufnahme bei Auspuff und Kondensation, abhängig nur vom Drosseldruck. Die gleiche Enddampfaufnahme bei Höchstleistung in Fig. 50 und 52 ist einfach die Folge davon, daß beidemal auf gleichen Drosseldruck gegangen war. Dieser ist überhaupt für das aufgenommene Dampfgewicht maßgebend. In Fig. 54 ist die Dampfaufnahme als abhängig vom Drosseldruck p_2 aufgetragen, und zwar die Werte für Kondensation und Auspuff durcheinander. Beide Punktarten fallen bei höheren Drucken p_2 in eine fast gerade Linie, die (für das Gewicht) etwa von Null ausgeht.

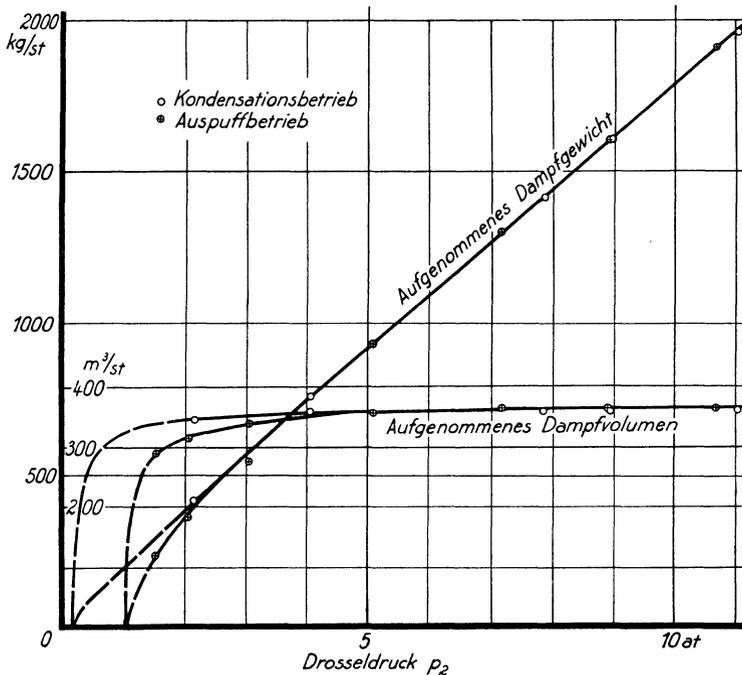


Fig. 54. Dampfaufnahme der Dampfturbine abhängig vom Drosseldruck.

Bei niederen Drosseldrücken müssen sich natürlich die Kurven für Auspuff und für Kondensation trennen; denn erstere muß bei $p_2 = 1,03$, letztere bei $p_2 \approx 0,1$ at die Abzissenachse erreichen.

Um das *aufgenommene Dampfvolumen* zu finden, multipliziert man jedes der aufgenommenen Dampfgewichte mit dem spezifischen Volumen des Dampfes im gedrosselten Zustande, $D_v \text{ m}^3/\text{h} = D \text{ kg/h} \cdot v \text{ m}^3/\text{kg}$. Da die Temperaturen des gedrosselten Dampfes fast überall fehlen, führen wir als Näherungswert das spezifische Gewicht der Sättigung ein und erhalten dann das Volumen etwas zu klein. Für Versuch Nr. 101 ist der Drosseldruck 8,98 at, das zugehörige spezifische Volumen des satten Dampfes 0,220 m³/kg, also das aufgenommene Dampfvolumen $1600 \cdot 0,220 = 352 \text{ m}^3/\text{h}$. (Für überhitzten Dampf siehe Fig. 14 bei § 26.)

Eine entsprechende Berechnung weiterer Punkte zeigt, daß unabhängig vom Druck immer das gleiche Dampfvolu men aufgenommen wird. Nur wenn sich bei kleinem Drosseldruck das Druckverhältnis $p_2 : p_3$ der Eins nähert, geht das Volumen wie das Gewicht auf Null herab, Fig. 54.

Auf die Ähnlichkeit mit Fig. 41 sei aufmerksam gemacht. Die Begründung dafür, daß bei dieser Turbine das Dampfvolu men innerhalb gewisser Grenzen unabhängig ist vom Druck und vom Gegendruck, wird in § 61 gegeben.

Nicht jede Turbine zeigt die Unabhängigkeit der Volumenaufnahme von Druck und Gegendruck; wo sie vorhanden ist, ist die Messung der Dampfmenge in bequemster Weise auf eine Messung des Drosseldruckes zurückgeführt, das heißt die Zeitmessung auf eine Momentanmessung. Auch wo nicht Konstanz vorhanden ist, werden doch zwischen Drosseldruck und Dampfmenge gesetzmäßige Beziehungen bestehen, solange man Zahl und Öffnung der Düsen nicht ändert; diese Beziehungen (§ 61) können dann zur graphischen Ausgleichung der gemessenen Dampfmen gen dienen.

53. Untersuchung einer Dampfturbine mit Gegendruck. Der Turbine der vorigen Paragraphen stand bei Kondensationsbetrieb das Druckgefälle von rd. 12 bis herab zu 0,15 at absolutem Druck zur Verfügung; dies Druckverhältnis ist rd. 80fach. So wenig wie man nun gezwungen ist, einen so hohen Druck des Frischdampfes zu verwenden — wodurch das Druckgefälle und das Druckverhältnis verkleinert würde, unter entsprechender Verringerung der Arbeitsausbeute —, so wenig muß man den Dampf bis herab zu 0,15 at absolutem Druck, also erheblich unter atmosphärischem Druck herunter ausnutzen; man kann sich mit schlechterem Vakuum begnügen (§ 58) oder kann den Dampf einfach ins Freie gehen lassen, dann ist der Gegendruck 1 at bzw. der gerade herrschende Barometerstand, das verfügbare Druckverhältnis ist rd. 12fach. Der Gegendruck kann aber auch ohne weiteres noch höher werden, indem die Leitung zur Atmosphäre einen Widerstand hat, den der Dampf überwinden muß. Die Ausblaseleitung hat stets einen Widerstand. Derselbe wird größer, wenn in die Leitung ein Kochapparat zur Ausnutzung des Abdampfes gesetzt wird, der einen gewissen (oft erheblichen, § 44) Gegendruck bietet, oder der den Druck deshalb nicht herabgehen läßt, weil in ihm eine schwerer siedende Flüssigkeit kocht. Wird die Wand des Kochapparates auf der anderen Seite von einer Flüssigkeit von 110,7° C bespült, so kann der Dampf nicht kondensieren, solange der Druck nicht unter den zugehörigen Siededruck, nach den Dampftabellen 1,5 at abs, herabging.

In letzterem Betriebszustande befindet sich die Dampfturbine, deren Betriebsergebnisse nun besprochen werden sollen. Für die Maschine ist nur die Höhe des Gegendruckes wesentlich, gleichgültig ist, was mit dem Dampf nach dem Verlassen des letzten Schaufelkranzes wird, ob also im praktischen Betrieb einer chemischen Fabrik die Temperatur der kochenden Flüssigkeit, oder ob, für Versuchszwecke oft bequemer, der Widerstand eines Drosselorganes den Überdruck

Tabelle 20. Untersuchung einer Dampfturbine im
Nennleistung:

Versuch Nr.		IV	III
1	Belastungsgrad	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$
2	Düsenzahl	3	3
← unverändert ge-			
3	Versuchsdauer min · s	47 · 0	45 · 0
4	Drehzahl n /min	3030	3020
5	Dampfaufnahme D kg/h	2870	3690
6	Elektrische Leistung N_{e1} (Drehstrom) kW	84,3	137,3
7	Dampfverbrauch des Satzes D/N_{e1} kg/kW · h	34,05	26,88
8	Wirkungsgrad der Dynamo η_{Dyn}	0,750	0,820
9	Nutzleistung der Turbine $N_e = N_{e1}/\eta_{Dyn}$ kW	112,5	167,5
10	Dampfverbrauch der Turbine D/N_e kg/kW · h	25,51	22,02
11	Druck des Frischdampfes p_1 at abs	11,95	12,5
12	Druck des Drosseldampfes p_2 „	6,85	8,85
13	Druck des Abdampfes p_3 „	1,525	1,52
14	Temperatur des Frischdampfes t_1 °C	275	270
15	Temperatur des Drosseldampfes t_2 „	242,5	(247)
16	Temperatur des Abdampfes t_3 „	166	160
17	Wärmeinhalt i_1 des Frischdampfes kcal/kg	716,8	713,8
18	Flüssigkeitswärme q_3 zu p_3 „	111,9	111,8
Wirtschaftlicher Wirkungsgrad			
19	des Maschinensatzes $\eta_w = \frac{859 \cdot N_{e1}}{D \cdot (i_1 - q_3)}$ —	0,0416	0,0503
20	der Turbine $\eta_w = \frac{859 \cdot N_e}{D \cdot (i_1 - q_3)}$ —	0,0556	0,0648
21	Spezifisches Volumen des Drosseldampfes v_2 m ³ /kg	0,35	0,27
22	Aufgenommenes Dampfvolmen $D_v = D \cdot v_2$ m ³ /h	1000	1000
23	Desgl. durchschnittlich pro Düse m ³ /h	330	330
24	Leistung der offenen Düse bei vollem Druck kW	—	—

über die Atmosphäre veranlaßt. Letzteres ist versuchstechnisch bequemer, weil der Gegendruck sich durch Bedienen des Handrades leicht regeln läßt. Betriebstechnisch sind beide Anordnungen ganz gleichwertig außer gelegentlich für Untersuchung von Regelvorgängen.

Die Tabelle 20 gibt zwei Versuchsreihen im Gegendruckbetrieb. Der einzelne Versuch wird durchgeführt wie der in § 49 beschriebene. Das ausgenutzte Druckgefälle ist rd. $12,0 - 1,5 = 10,5$ at und schiene danach nicht erheblich geringer zu sein als das der vorher beschriebenen Versuche; es kommt aber viel mehr auf das Druckverhältnis zwischen Aus- und Eintritt an, das ist $12,0 : 1,5 = 8$ fach, statt vorher 80 fach; eine viel kleinere Arbeitsausbeute ist hiernach zu erwarten. — Bemerkenswert ist die hohe Anfangsüberhitzung; sie führt dazu, daß auch der Abdampf noch überhitzt ist; die Temperatur des Abdampfes wurde deshalb gemessen.

Die Ergebnisse der ersten Reihe, Versuch I bis IV, sind in Fig. 55 graphisch dargestellt. Ein Leerlaufversuch fehlt. Die übrigen Versuchs-

Gegendruckbetrieb.
300 PS = 220,5 kW.

I	II	V	VI
voll 3	Überlast 3	$\frac{1}{2}$ 2	$> \frac{3}{4}$ 2
drosselt →	← offen →		
64 · 40 2990	36 · 45 3030	54 · 50 3030	70 · 55 3020
4175 193,7 21,55	4860 244,8 19,85	2462 84,4 29,2	3385 163,2 20,7
0,865 224,0 18,64	0,880 278,1 17,47	0,75 112,6 21,88	0,845 193,2 17,52
12,8 10,5 1,52 276 (255) 153	12,8 10,4 1,505 280 (258) 150	12,6 7,72 1,527 277 245 151	12,5 10,7 1,528 284 261 143,5
716,4 111,8	718,2 111,5	716,4 111,2	721,1 111,3
0,0650	0,0712	0,0477	0,0680
0,0761	0,0810	0,0637	0,0804
0,23 960 320 —	0,235 1140 380 92,8	0,31 760 380 —	0,23 780 390 96,6

punkte fallen nicht so gut und sind auch nicht so zahlreich, um den Verlauf der Kurvensicher festzulegen. Dieselben sind deshalb teilweise durch Gerade angenähert.

Daß der Frischdampfdruck mit der Leistung steigt, ist ungewöhnlich und ein Zufall, eventuell eine Eigenheit des Kesselwärters. Der Drosseldruck vor den Düsen steigt natürlich mit der Leistung, oder besser gesagt, er sinkt mit abnehmender Leistung, der sich die Turbine durch Abdrosseln des Admissionsdruckes bis auf den eben erforderlichen Wert des Drosseldruckes anpaßt. Zur Erklärung der Drosseldruckkurve sei bemerkt: Die Turbine war für 300 PS = 225 kW Leistung bestellt, und Garantien waren für $\frac{1}{2}$ -, $\frac{3}{4}$ -Vollast sowie für Überlast ($\frac{5}{4}$ -Vollast) gegeben. Da nun die drei vorhandenen Düsen mit Zungen für Handregelung der Düsenweite versehen waren, so wurden zur Erzielung möglicher Wirtschaftlichkeit die Düsen so klein gestellt, daß bei Nennlast die Leistung gerade noch hergegeben wurde, Versuch I; dann

war allerdings der Drosseldruck noch 2,3 at unter dem Frisch-Dampfdruck, ein merklicher Betrag von Drosselung blieb auch bei ganz gesenkter Reglerhülse bestehen, offenbar wegen knapper Bemessung des Durchflußorganes (Gegensatz dazu § 163). Wurde die Nennleistung unterschritten, dann drosselte der Regler den Druck weiter ab, und p_2 wurde kleiner gemessen. Überlast aber konnte nur durch Vergrößerung der Düsenweite von Hand gegeben werden — wie das dem Begriff der Überlast entspricht; dabei stieg der Drosseldruck nicht mehr, denn das Regler-Drosselorgan blieb in seiner tiefsten Stellung; der Druckverlust in ihm mußte im Gegenteil mit noch steigendem Dampfdurchgang etwas (nach der Messung auf 2,4 at) zunehmen.

Die Messung der Temperatur des gedrosselten Dampfes war nur bei Versuch IV bis VI ordnungsmäßig erfolgt; bei I bis III hatte die Meßeinrichtung versagt. Da indessen die Temperatur des Frischdampfes überall richtig gemessen worden war, so kann man sich die kostspielige Wiederholung der Versuche ersparen und den *Temperaturabfall im*

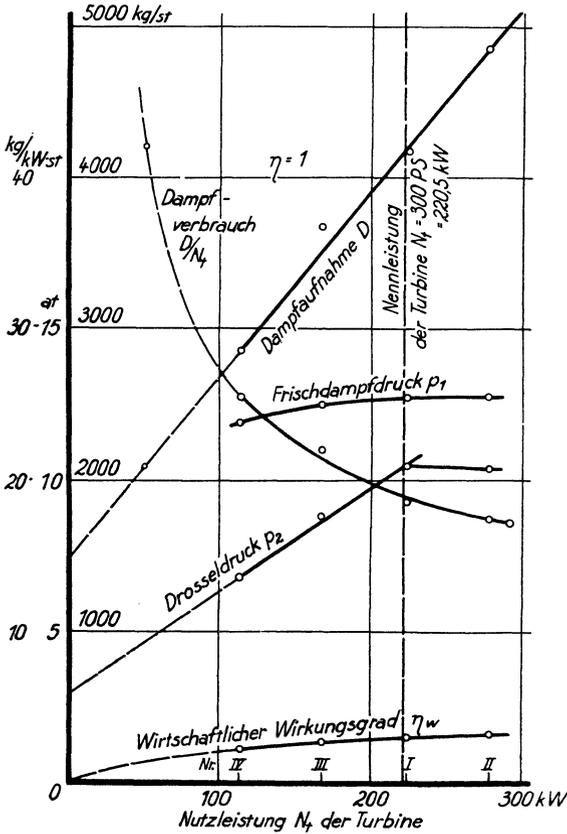


Fig. 55. Wirtschaftlichkeit einer Gegendruckturbine.

Drosselorgan nach Maßgabe von Fig. 56 ermitteln; die Drucke sind nämlich vor und nach dem Drosselvorgang für alle Versuche bekannt. — Die in dieser Weise ermittelten Zahlen sind zum Unterschied von beobachteten in Tabelle 20 eingeklammert.

54. Nachreglung der Düsen mit der Hand. In dieser Weise wurde bei den Versuchen I bis IV vorgegangen; man kann aber auch anders vorgehen, und das geschah bei den Versuchen V und VI. Die $\frac{3}{4}$ -Belastung und erst recht die $\frac{1}{2}$ -Belastung läßt sich nämlich schon mit nur zwei Düsen erreichen, wenn die dritte ganz geschlossen ist. Noch kleinere Belastungen hätten sich mit nur

einer offenen Düse erreichen lassen. Tabelle 20 und Fig. 57 zeigen nun, daß die Turbine bei kleinen Belastungen günstiger arbeitet, wenn man sich durch Regeln der Düsenzahl der Belastung anpaßt, als wenn man die Anpassung an die Belastung der Drosselwirkung des Reglers überläßt.

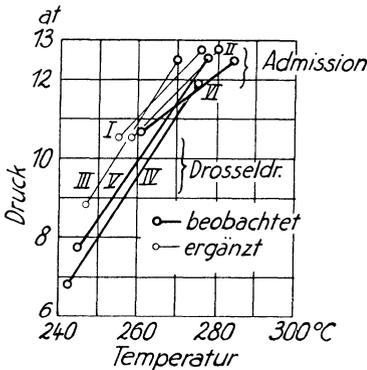


Fig. 56. Ergänzung der Temperaturbeobachtungen.

Aus dieser Erkenntnis heraus hat man ja Regelungen für Dampfturbinen gebaut, bei denen der Regler nicht nur durch Drosselung wirkt, sondern immer eine Düse nach der anderen schließt, wenn dies zulässig, und wieder öffnet, wenn dies nötig ist, so daß nur die dazwischenliegenden Belastungen durch entsprechend mäßiges Drosseln eingestellt werden. Es erhellt aus Fig. 56, daß eine solche Beeinflussung der wirksamen Düsenzahl sehr vorteilhaft ist.

Wenn nun aber eine Dampfturbine nicht eine Beeinflussung der Düsenzahl durch den Regler hat, sondern nur von Hand, so erhebt sich die Frage, ob es bei einer der Abnahme dienenden Versuchsreihe gestattet sein soll, die Verschlüsse für die Düsen nach Bedarf zur Erreichung jeweils bester Wirtschaftlichkeit von Hand zu betätigen. Es seien etwa folgende Dampfverbrauchszahlen gewährleistet:

- bei voller Last 19 kg/kW·h,
- bei halber Last 23 kg/kW·h.

Dann ist die Garantie bei voller Last bequem erfüllt, bei halber Last ist sie ebenso bequem erfüllt, wenn man es für zulässig hält, eine Düse vor Vornahme des Versuches mit halber Last abzusperren; die Turbine erfüllt die zugesagten Bedingungen nicht, wenn man den Grundsatz von der gleichzeitigen Gültigkeit aller Garantien (§ 13) anerkennt und die Veränderung in der Einstellung der Turbine zwischen den einzelnen Versuchen nicht zuläßt.

Wir halten letztere Auffassung für richtig und würden die eben genannten Garantiezahlen für nicht erreicht erklären, wenn bei Nachprüfung derselben die Ergebnisse der Tabelle 29 erreicht würden. Denn um die Gewährleistung bei halber Last zu erfüllen, muß die Maschine in

einen Zustand versetzt werden, bei der sie die volle Last aufzunehmen überhaupt nicht mehr fähig ist. Das günstigere Ergebnis bei halber Last beim Arbeiten mit nur zwei Düsen hat für den Abnehmer kaum Interesse, denn im praktischen Betriebe muß man jederzeit auf unerwartetes Eintreten der Normallast gefaßt sein, und es ist nicht zulässig, mindestens störend, daß beim Steigen der Last jedesmal erst die Drehzahl stark sinkt und nun erst der Wärter zuspringt und die nächste

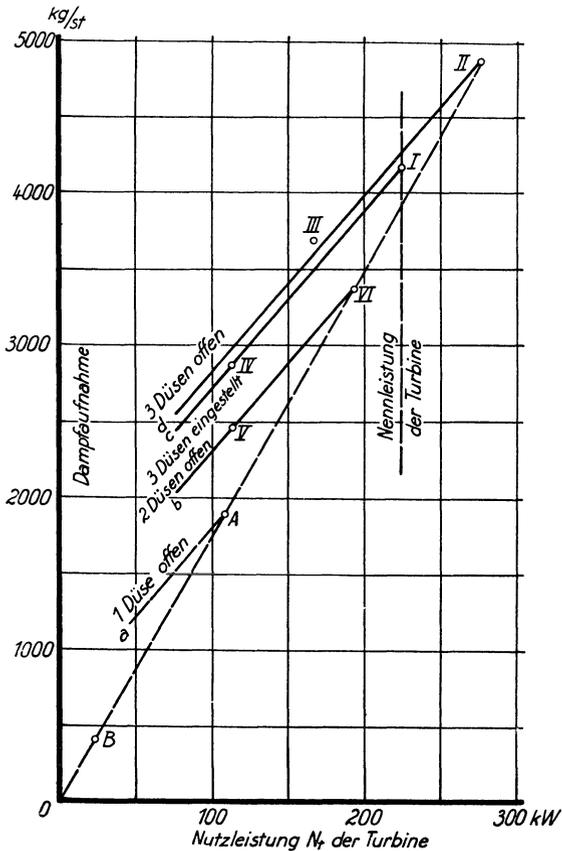


Fig. 57. Wirtschaftlichkeit einer Gegendruckturbine bei Benutzung von 1, 2 oder 3 der vorhandenen Düsen.

Düse öffnet; überdies wird der Wärter schwerlich beim Sinken der Belastung die Düsen wieder schließen. Wenn also die Betätigung der Düsen nicht automatisch geschieht, so unterbleibt sie später doch und hat deshalb auch beim Versuch zu unterbleiben.

Dagegen ist es zulässig, die Turbinendüsen *für Vollast bestmöglich einzustellen*, so wie in Tabelle 20, Versuch I, geschehen; *Überlast* kann dann allerdings nur durch weiteres Öffnen der Düsen von Hand erreicht werden. Das ist für Überlast zulässig; in deren Begriff dürfte es liegen, daß sie nur ausnahmsweise und nach vorheriger Ansage erreicht zu werden braucht; verlangt ein Abnehmer auch jene höchste Last zu jeder Zeit, so soll er nicht eine 220 kW-Turbine (300 PS) mit Überlastung bis 278 kW (= 375 PS) bestellen, sondern eine 375 PS-Turbine ohne Überlastung.

Im Gegensatz dazu ist bei Verbund-Dampfmaschinen die jeweils günstigste Einstellung der Niederdruckfüllung zulässig, auch wenn sie von Hand geschieht; denn diese Verstellung beeinflußt nur die Wirtschaftlichkeit, und bei jeder Einstellung kann die (annähernd) gleiche höchste Leistung erreicht werden — wenn auch mit verschieden günstigem Dampfverbrauch. Vergleiche § 74. —

Das Verhalten der Turbine mit verschiedener Einstellung der Düsen ist in Fig. 57 andeutungsweise gegeben, wengleich die Versuchspunkte zu wenig zahlreich sind für genaues Einzeichnen der Kurven. Bei ganz geöffneten drei Düsen ergab sich Punkt II, bei ganz geöffneten zwei Düsen Punkt VI. Beide liegen auf der durch den Nullpunkt gehenden Geraden. Tragen wir den Abstand VI—II abwärts an, so entsteht der Punkt A als für eine ganz geöffnete Düse gültig. Nochmaliges Antragen führt auf Punkt B statt auf $N_t = 0$. Man sollte erwarten, mit Berücksichtigung des Leerlaufverbrauches der Turbine, daß die Gerade II—VI die Ordinatenachse oberhalb Null schneidet. — Die ganz geöffneten Düsen geben besonders günstige Werte des Dampfverbrauches. Lassen wir zwei Düsen ganz offen, so bewegt sich bei Drosseln des Druckes die Dampfaufnahme auf Linie *b*. Drei Düsen offen geben etwa die Linie *d*. Die Versuche I und IV geben etwas günstigere Werte, weil die Düsen durch Einregeln der Düsennadeln verkleinert sind entsprechend der Nennleistung der Turbine, Linie *c*. Daß Versuch III eine Unstimmigkeit zu enthalten scheint, zeigte schon Fig. 55

Erwähnt sei noch die niedrigere Abdampftemperatur bei Versuch II und VI gegen IV und III — der Dampf wird besser ausgenutzt, vgl. § 98 — und die gleichmäßige Dampfaufnahme der Düsen, Tabelle 20, Zeile 23, einmal im offenen Zustande, Versuch II, V, VI, andererseits gleichmäßig, aber etwas kleiner bei Versuch IV, III, I, vgl. § 61.

55. Aufgenommenes Dampfvolumen. In den letzten Zeilen von Tabelle 20 ist noch das jeweils aufgenommene gedrosselte Dampfvolumen berechnet, und zwar bei den Versuchen I bis VI sowohl im ganzen als auch für eine Düse.

Die Berechnung geschieht wie folgt. Bei Versuch Nr. III ist der Dampfzustand vor den Düsen durch den Drosseldruck $p_2 = 8,85$ at abs und die Temperatur $t_2 = 247^\circ \text{C}$ gegeben. Das Volumen von 1 kg Dampf

in diesem Zustand (spezifisches Volumen v_2) läßt sich berechnen nach der Formel $v = 47 \frac{T}{p} + 0,001 - \mathfrak{Z}$, worin $T = 247 + 273 = 520^\circ$ die absolute Temperatur und $p = 88\,500 \text{ kg/m}^2$ der Druck ist; \mathfrak{Z} aber, ein Korrektionsglied nur abhängig von t , ist der Dampftafel V oder der Fig. 14 bei § 26 zu entnehmen als $\mathfrak{Z} = 0,0088$; so wird $v = 47 \cdot \frac{520}{88\,500} + 0,001 - 0,009 = 0,276 + 0,001 - 0,009 = 0,268 \text{ m}^3/\text{kg}$. Man kann auch den Punkt $p = 8,85$, $t = 247$ im Mollierschen i - s -Diagramm aufsuchen und findet unmittelbar $v = 0,270 \text{ m}^3/\text{kg}$ als zugehörig; wir verwenden letzteren Wert. Mit ihm haben die in die Düsen gegangenen 3690 kg/h ein Volumen von $3690 \text{ kg/h} \cdot 0,270 \text{ m}^3/\text{kg} = 995 \text{ m}^3/\text{h}$.

Es zeigt sich, daß auch diese (vgl. § 52) Turbine annähernd immer das gleiche Dampfvolumen — unabhängig vom Drosseldruck — aufnimmt. Wir nehmen dies als Tatsache hier zur Kenntnis und kommen in § 61 näher darauf zurück.

Bei der Versuchsreihe mit Kondensation und Auspuff, Fig. 54, steigt mit steigender Leistung das aufgenommene Volumen etwas, immerhin deutlich an. Es mag die Temperatur des Drosseldampfes ungenau festgestellt worden sein.

Bei der Versuchsreihe mit Gegendruck ist die Art der Versuchsausführung zu beachten, die in § 53 besprochen wurde. Bei Versuch IV, III, I waren die drei Düsen durch die Handregelung gleichviel verengt und standen bei den Versuchen immer gleich; die Dampfaufnahme war daher sehr gut übereinstimmend, rd 330 kg für die Düse. Bei den Versuchen II, V, VI waren die Düsen ganz offen, aber nur beim ersten alle drei, nachher nur ihrer zwei. Die volumetrische Dampfaufnahme kann natürlich nur konstant sein, wenn man sie auf die Düse bezieht; sie ist, gut übereinstimmend, $380 \text{ m}^3/\text{h}$ für jede offene Düse.

56. Belastungsgrad; dimensionsloses Diagramm. Der Dampfverbrauch für eine bestimmte Leistung ist bei der erst untersuchten Turbine (§ 49 bis 52) größer im Auspuffbetrieb als beim Kondensationsbetrieb; bei der zuletzt untersuchten Turbine im Gegendruck werden die Zahlen noch größer. Ein Vergleich wird aber dadurch unmöglich oder doch undeutlich, daß die beiden Turbinen für verschiedene Leistung bestimmt sind, und daß auch für die erste Turbine verschiedene Nennleistungen sich ergäben, je nachdem man sie als Auspuff- oder als Kondensations-turbine ansehen will. Man hat also gewissermaßen drei Turbinen zum Vergleich, nämlich

- eine Kondensationsturbine für 172 kW Höchstleistung,
- eine Auspuffturbine für 102 kW Höchstleistung,
- eine Gegendruckturbine für 288 kW Höchstleistung.

Man macht die Turbinen (bzw. die Betriebsarten) vergleichbar, indem man jede Belastung als Bruchteil der höchsten angibt; diese Angabe bezeichnen wir als *Belastungsgrad* $N : N_{\max}$.

Als Ordinate hierzu darf man nicht die Dampfaufnahme eintragen, die natürlich für die größere Maschine größer wird. Man muß eine

von der Maschinengröße unabhängige Zahl wählen. Als solche bietet sich ohne weiteres der Wirkungsgrad oder auch der Dampfverbrauch, der jenem reziprok proportional ist. Der Dampfverbrauch ist natürlich für die drei Betriebe, in der Reihenfolge, wie sie aufgezählt wurden, immer ungünstiger.

Man kann den Vergleich aber außer von der Maschinengröße auch noch von der Betriebsart unabhängig machen, indem man die darzustellende Größe als Bruchteil oder Vielfaches jener bei Höchstlast angibt. Dann gibt man die Dampfaufnahme als *relative Dampfaufnahme* $D : D_{max}$ an oder den Dampfverbrauch als *relativen Dampfverbrauch*

$$\frac{D}{N_t} : \left(\frac{D}{N_t}\right)_{max} \quad \text{oder} \quad \frac{D}{N_t} : \left(\frac{D}{N_t}\right)_{opt}$$

Man erhält Kurven, wie Fig. 58 gegeben, die nun *dimensionlos* sind und daher jeder Bezugnahme auf die Maschinengröße entkleidet sind. Aus ihnen liest man folgendes heraus:

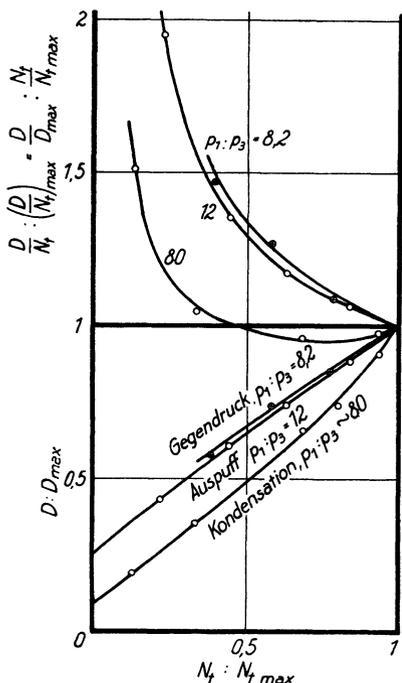


Fig. 58. Einfluß der Belastung auf die Wirtschaftlichkeit der Dampfturbine je nach der unteren Druckgrenze.

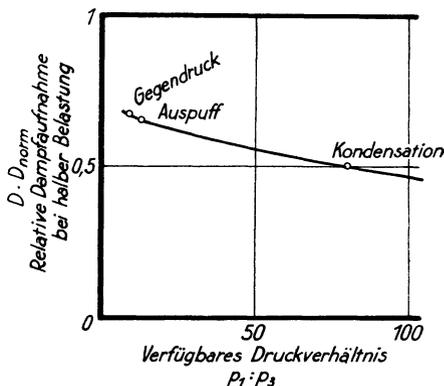


Fig. 59. Einfluß des verfügbaren Druckverhältnisses auf die Dampfaufnahme bei halber Last.

Nicht nur in den absoluten Werten ist der Auspuffbetrieb ungünstiger und der Gegendruckbetrieb abermals ungünstiger, sondern besonders noch hinsichtlich des Maßes, nach dem die Dampfaufnahme abnimmt, der Dampfverbrauch zunimmt bei bestimmter Abnahme der Nutzleistung. Das läßt nur das dimensionslose Diagramm erkennen. Man kann auch in Fig. 59 sehen, daß diese Abnahme, gemessen an dem Verhältnis der Dampfaufnahme bei halber zu der bei ganzer Last, wie es der Fig. 58 zu entnehmen ist, einfach eine Funktion des ausgenutzten Druckverhältnisses ist.

Es sei wiederholt erwähnt (vgl. § 5), daß möglichst proportionales Abfallen der Energieaufnahme mit der Leistungsabnahme eine wert-

volle Eigenschaft jeder mit wechselnder Leistung zu betreibenden Maschine ist, die leicht an Wert über die guten Verbrauchszahlen hinausgeht. Sie ist im allgemeinen gebunden an den tunlichst gesteigerten Energieumsatz in der Maschine — weil gewisse Verluste stets konstant bleiben; und deshalb ist der Kondensationsbetrieb den weniger intensiven Betriebsarten in dieser Hinsicht überlegen.

57. Beurteilung von Dampfturbinen nach dem Gütegrad. Die Kondensationsturbinen gab in Tabelle 18 wirtschaftliche Wirkungsgrade bis herauf zu 11,7%, die Gegendruckturbine in Tabelle 20 kam nur auf Wirkungsgrade bis 8,1%. Man könnte meinen, die letztere Turbine sei hiernach als minderwertig zu beurteilen, um so mehr, als sie heißeren Dampf erhielt.

Dieses Urteil wäre vorschnell. Denn wenn man der zweiten Dampfturbine nicht die Ausnutzung des Druckgefälles bis heran an das Vakuum gestattet, sie also nicht das Bestmögliche aus dem dargebotenen Dampf ziehen läßt, weil man die höhere Temperatur des Dampfes noch für Zwecke der Abdampfausnutzung haben will, so muß man eben eine größere Dampf- oder Wärmemenge daransetzen. Der wirtschaftliche Wirkungsgrad beurteilt nicht die Güte der Maschine, sondern wird maßgebend beeinflußt durch die äußeren Betriebsumstände, die der Maschine auferlegt werden. Man kann eine Dampfkraftmaschine so wenig nach dem Dampfverbrauch beurteilen wie eine Wasserkraftmaschine nach dem Wasserverbrauch; es kommt maßgebend auf das vorhandene Gefälle an — oder auf das verfügbare, wenn Rücksichten auf die Bewässerung unten liegender Geländeteile das vorhandene Gefälle auszunutzen nicht ratsam erscheinen lassen.

Bei der Wärmekraftmaschine liegen die Verhältnisse noch insofern eigenartig, als ja bekanntlich, ganz abgesehen von den Grenzen, die wir der Ausnutzung im Einzelfall ziehen können, überhaupt nicht alle eingeführte Wärme in Arbeit verwandelt werden kann. Die auffallend niedrigen Wirkungsgrade in beiden Versuchsreihen fallen gar nicht der Maschine zur Last, sondern den Eigenschaften der Wärme, die durch den zweiten Hauptsatz gekennzeichnet sind.

Es ist also gerecht, wo man die Vollkommenheit der Wärmemaschine beurteilen will, in den Nenner der Brüche Formel (2) bis (3), § 46 nicht die Wärmemenge zu setzen, sondern den Vergleich auf die theoretisch bestmögliche Ausnutzung der Wärme zu beziehen. Das tut man bei Berechnung des Gütegrades, § 47.

Der *Gütegrad* einer Wärmekraftmaschine vergleicht die aus einer bestimmten aufgewendeten Wärmemenge wirklich erreichte Arbeitsausbeute mit derjenigen Arbeitsausbeute, die theoretisch erreichbar ist — natürlich Zähler und Nenner in gleichem Maße, im allgemeinen im Wärmemaß gemessen.

Die *theoretisch günstigste Arbeitsausbeute* wird nach Lehren der Thermodynamik bei adiabatischer Expansion des Dampfes erreicht. Bei ihr ist die Entropie konstant, und das ist der günstigste Fall, weil die Entropie nicht abnehmen kann, jede Zunahme einen nicht umkehrbaren Bestandteil des Arbeitsprozesses bedeutet, also eine Verschlechterung gegenüber dem rein umkehrbaren Vorgang. — Für den

Dampf ist der Anfangszustand des Expansionsvorganges nach Druck und Temperatur gegeben. Vom Endzustand liegt der Druck fest — je nach dem Fall der Kondensation, des Auspuffes oder der Abdampfausnutzung bei Vakuum, bei Atmosphärendruck oder bei Überdruck. Die Temperatur des Abdampfes liegt dabei, je nach dem Maße der Arbeitsentziehung, jeweils fest.

Zwischen den so gegebenen Grenzen des Dampfzustandes gibt es nur eine eindeutige Möglichkeit adiabatischer Expansion, gekennzeichnet durch die Konstanz der Entropie bei der Expansion; die Entropie des Abdampfes bei dem theoretisch günstigsten Vorgang muß also so groß sein wie die des Frischdampfes.

Die rechnerische Ermittlung der größtmöglichen Arbeitsausbeute im $p \cdot v$ -Diagramm eignet sich mehr für Kolbenmaschinen und wird deshalb in § 71 besprochen. Hier bedienen wir uns des für alle Dampfturbinen-Untersuchungen besonders bequemen Mollierschen $i s$ -Diagrammes¹⁾.

In Fig. 60 sind in einem $i s$ -Diagramm Ermittlungen eingezeichnet, die sich auf die Versuche 101 (§ 49 und Tabelle 18) und III (Tabelle 20) beziehen. Zunächst geben die Punkte A bzw. A_1 die Anfangszustände des Frischdampfes. Die Adiabate ist im $i s$ -Diagramm eine senkrechte Gerade. Ziehen wir sie, so schneiden wir in C die Linie des Gegendruckes 0,15 at und in C_1 die Linie des Gegendruckes 1,52 at (d. i. 1,02 at BSt + 0,5 at ÜD). Die Ordinaten der Punkte C und C_1 geben den Wärmeinhalt an, der im Dampf verblieben wäre, wenn der Dampf, vom Anfangszustand beginnend, auf den Gegendruck adiabatisch expandierte; der Wärmeinhalt im Endzustand wäre um den durch Strecke AC bzw. A_1C_1 dargestellten Betrag kleiner als im Anfangszustand; wir bezeichnen ihn als das *adiabatische Wärmegefälle* Δi_{ad} . Der Minderinhalt an Wärme ist aber zugleich, wenn bei adiabatischer Zustandsänderung sonstige Wärmezu- und -abfuhr ausgeschlossen sein soll, die in Arbeit umgesetzte Wärme. Der Arbeitsgewinn bei der günstigsten adiabatisch verlaufenden Expansion ist für die beiden Versuche direkt durch die Strecken AC und A_1C_1 gegeben. Er ist, bezogen auf 1 kg Dampf:

für Versuch 101, Kondensation: $686,2 - 521,9 = 164,4 \text{ kcal} = AC$

„ „ III, Gegendruck: $713,8 - 615,6 = 98,2 \text{ „} = A_1C_1$.

Der große Unterschied der Zahlen gibt an, unter wie sehr viel ungünstigeren Verhältnissen die Gegendruckturbine arbeitet. Der Berechnung des wirtschaftlichen Wirkungsgrades lagen die Wärmeverbrauchszahlen $i_1 - q_3$ zugrunde, nämlich

für Versuch 101, Kondensation: $686,2 - 53,8 = 632,4 \text{ kcal}$

„ „ III, Gegendruck: $713,8 - 111,8 = 602,0$

Der theoretisch günstigst erreichbare Wirkungsgrad der beiden unter so verschiedenen Verhältnissen ausgeführten Kreisprozesse ist

$$\text{für Versuch 101, Kondensation: } \eta_{\text{opt}} = \frac{164,3}{632,4} = 0,260$$

$$\text{„ „ III, Gegendruck: } \eta_{\text{opt}} = \frac{98,2}{602,0} = 0,163.$$

¹⁾ Vgl. die Anmerkung auf S. 163.

Hierin, und nicht in der besonderen Bauart der Turbinen, sind die scheinbar mäßigen Wirkungsgrade begründet, hieraus ist auch das vergleichsweise noch schlechtere Ergebnis der Gegendruckturbine zu erklären.

Die Turbinen selbst lassen sich nur auf Grund des Gütegrades beurteilen und namentlich vergleichen. Der Gütegrad berechnet sich für die

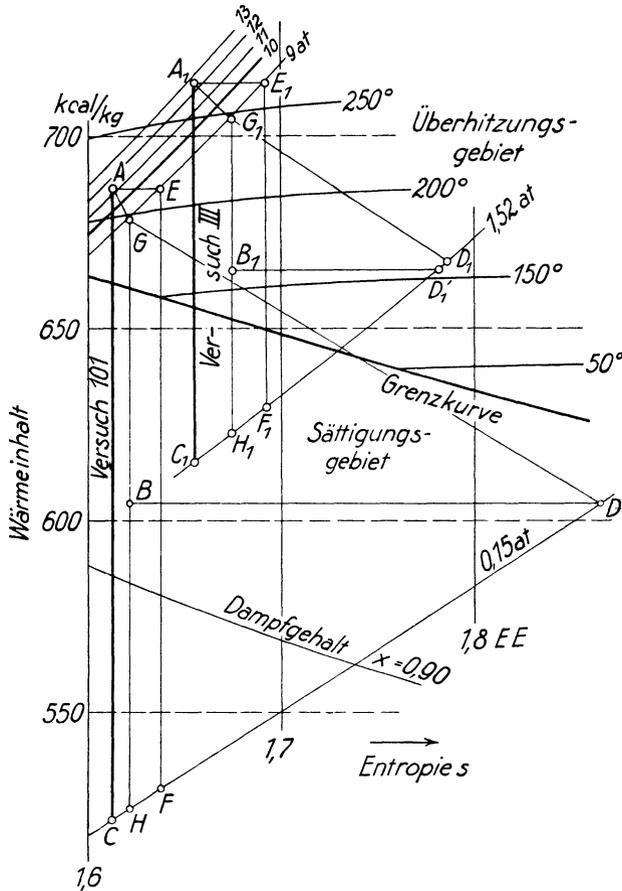


Fig. 60. i - s -Diagramm für Kondensations- und für Gegendruckturbetrieb.

beiden Versuche als Quotient aus dem Wärmewert der gelieferten Arbeit und dem eben gegebenen Wärmegefälle, entweder beides auf den stündlichen Umsatz oder beides auf 1 kg Dampf bezogen. Der Wärmewert der geleisteten Arbeit ist, auf 1 kg Dampf bezogen, $\frac{859}{D/N_t} \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$, also wird er

für Versuch 101, Kondensation: $859 : 11,6 = 74,0 \text{ kcal/kg}$
 „ „ „ III, Gegendruck: $859 : 22,0 = 39,0 \text{ „ „}$

Tabelle 21. Vergleich zweier Dampfturbinen durch den Wir-

Versuch Nr.		Kondensationsturbine				
		3	13	4	101	10
1	Drehzahl n /min	2997	3000	2982	2990	2988
2	Dampfaufnahme D kg/h	415	758	1410	1600	1956
3	Nutzleistung der Turbine N_t . . kW	22,0	57,7	117,7	137,7	159,6
4	Dampfverbrauch der Turbine D/N_t kg/kW·h	18,8	13,1	12,0	11,6	12,3
5	Wärmewert der Nutzleistung aus 1 kg Dampf 859 : D/N_t . . . kcal/kg	45,7	65,6	71,6	74,0	69,8
6	Frischdampf: Druck p_1 at	12,4	12,3	12,2	11,2	12,2
7	Temperatur t_1 °C	192	191	202	218	221
8	Wärmeinhalt i_1 kcal/kg	671,5	671,2	677,3	686,2	687,8
9	Abdampf: Druck p_3 at	0,097	0,080	0,140	0,15	0,21
10	Temperatur t_3 °C		gesättigt bzw. naß			
11	Wärmeinhalt i_3 kcal/kg	(615,7)	(613,9)	(619,0)	(619,6)	(622,9)
12	Wärmeverbrauch bei Abdampf- ausnutzung $i_1 - i_3$ „	(55,8)	(57,3)	(58,3)	(66,6)	(64,9)
13	Wirksgr. d. Umsetzg. $\frac{859 \cdot N_t}{D \cdot (i_1 - i_3)}$ —	nicht bestimmbar				
14	Adiabatische Wärmegefälle Δi_{ad} „	176,8	181,8	167,1	164,3	157,4
15	Wirtschaftl. Gütegr. d. Turbine $\frac{859 \cdot N_t}{D \cdot \Delta i_{ad}}$ —	0,259	0,361	0,428	0,450	0,444
16	Flüssigkeitswärme q_3 zu p_3 . kcal/kg	45,1	41,4	52,0	53,8	60,9
17	Wärmeverbrauch ohne Ab- dampfausnutzung $i_1 - q_3$ „	626,4	629,8	625,3	632,4	626,9
18	Wirtschaftlicher Wirkungsgrad der Turbine $\frac{859 \cdot N_t}{D \cdot (i_1 - q_3)}$ —	0,0729	0,104	0,114	0,117	0,111
19	Drosseldampf: Druck p_2 at	2,14	4,04	7,86	8,98	11,04
20	Temperatur t_2 °C	123	143	175	197	208
21	Spezif. Volumen v_2 m ³ /kg	≅0,85	≅0,47	0,255	0,236	0,192
22	Aufgenomm. Dampfvolumen D_v m ³ /h	352	356	360	378	375
23	Dgl. durchschn. pro Düse „	—	—	—	—	—

Der Gütegrad selbst endlich wird

für Versuch 101, Kondensation: $\eta_{gw} = 74,0 : 164,3 = 0,450 = 45,0\%$

„ „ „ III, Gegendruck: $\eta_{gw} = 39,0 : 98,2 = 0,394 = 39,4\%$.

Wir nennen diesen Gütegrad den wirtschaftlichen, weil er auf die Nutzleistung Bezug nimmt, wie der wirtschaftliche Wirkungsgrad es tut. Bei der Kolbendampfmaschine kann außerdem noch der indizierte oder thermische Gütegrad gemessen werden, der die indizierte, das heißt die vom Dampf auf den Kolben übertragene Arbeit mit der möglichen Arbeitsausbeute vergleicht. Begrifflich ist dieser thermische Gütegrad auch bei der Dampfturbine vorhanden: er setzt in den Zähler die vom Dampf auf die Schaufelung übertragene Leistung; meßbar ist diese indizierte Leistung der Dampfturbine indessen nicht, und die von Stodola als indizierte Leistung bezeichnete Größe ist nicht diese, ist vielmehr mit unserem Wärmegefälle identisch.

kungsgrad und durch den Gütegrad.

Gegendruckturbine					
IV	III	I	II	V	VI
3030	3020	2990	3030	3030	3020
2870	3690	4175	4860	2462	3385
112,5	167,5	224,0	278,1	112,6	193,2
25,5	22,0	18,6	17,5	21,9	17,5
33,7	39,0	46,2	49,1	39,2	49,1
11,95	12,5	12,8	12,8	12,6	12,5
275	270	276	280	277	284
716,8	713,8	716,4	718,2	716,4	721,1
1,525	1,52	1,52	1,505	1,527	1,528
166	160	153	150	151	143,5
670,0	667,2	664,8	662,8	663,2	660,0
46,8	46,6	51,6	55,4	53,2	61,1
0,720	0,837	0,895	0,886	0,737	0,804
97,2	98,2	100,0	100,7	99,8	100,2
0,347	0,394	0,462	0,480	0,383	0,490
111,9	111,8	111,8	111,5	111,2	111,3
604,4	602,0	604,6	606,7	605,2	609,8
0,0556	0,0648	0,0761	0,0810	0,0637	0,0804
6,85	8,85	10,5	10,4	7,72	10,7
242,5	(247)	(255)	(258)	245	261
0,35	0,27	0,23	0,235	0,31	0,23
1000	1000	960	1140	760	780
330	330	320	380	380	390

dampf hat 1,52 at, 160° und 667,2 kcal; der Unterschied im Wärmeinhalt ist 713,8 — 667,2 = 46,6 kcal. Der Wärmewert der Nutzarbeit ist 39,0 kcal. Der Wirkungsgrad der Umsetzung ist $39,0 : 46,6 = 0,837 = 83,7\%$. Dieser Wirkungsgrad gibt also an, wieviel mehr Wärme verbraucht worden ist, als nötig gewesen wäre. Die restlichen 16,3% sind die Wärmeverluste der Maschine; denn was etwa an Arbeit durch Reibung verloren ist, verbleibt auch im Dampf, soweit es nicht durch Wärmeleitung und -strahlung abgeht. — Bei Versuch 101 konnte dieser Wirkungsgrad nicht ermittelt werden, weil der Dampf am Ausblaseutzen zweifellos naß ist, der Grad der Nässe aber schwer zu bestimmen ist. Den Abdampf als trocken gesättigt anzunehmen, geht nicht an.

Der wirtschaftliche Wirkungsgrad und Gütegrad hat wenig Wert in solchen Fällen der Abdampfausnutzung, wo der Dampfverbrauch keine Rolle spielt, weil die verlangte Wärmemenge groß ist im Vergleich zur verlangten Arbeitsmenge und wo demnach dauernd Frisch-

In Tabelle 21 ist für sämtliche Versuche der beiden Reihen bei Kondensation und bei Gegendruck der Gütegrad ermittelt und mit dem wirtschaftlichen Wirkungsgrad in Vergleich gestellt. Es zeigt sich, daß bei hohen Lasten die Gegendruckturbine das ihr dargebotene Wärmegefälle sogar besser ausnutzt als die Kondensationsturbine; die Maschine selbst ist im letzteren Fall also durchaus nicht die schlechtere, wie es ein Vergleich der wirtschaftlichen Wirkungsgrade glauben macht.

In Tabelle 21 ist noch ein *Wirkungsgrad der Umsetzung* berechnet; das geschah, wie wieder an Versuch III gezeigt werden soll. Der Frischdampf hat bei 12,5 at Druck und 270° Temperatur einen Wärmeinhalt von 713,8 kcal in 1 kg Dampf; der Ab-

Tabelle 22. Dampfturbine bei ver-

Versuch Nr.		Konstante
		Konden- sation 101
1	Drehzahl n /min	2990
2	Nutzleistung der Turbine N_t kW	137,7
3	Minderleistung gegen Nr. 101 %	—
4	Nutzleistung des Satzes N_{ei} kW	113,1
5	Minderleistung gegen Nr. 101 %	—
6	Dampfaufnahme D kg/h	1600
7	Dampfverbrauch D/N_t der Turbine kg/kW·h	11,6
8	Schlechter gegen Nr. 101 bzw. a %	—
9	Dampfverbrauch D/N_{ei} des Satzes kg/kW·h	14,2
10	Schlechter %	—
11	Druck des Frischdampfes p_1 at	11,2
12	„ des Drosseldampfes p_2 at	8,98
13	„ des Abdampfes p_3 at	0,15
14	Temperatur des Frischdampfes t_1 °C	218
15	Verfügbares Druckverhältnis $p_1 : p_3$ —	70
16	Ausgenutztes Druckverhältnis $p_2 : p_3$ —	56
17	Wärmeinhalt des Frischdampfes i_1 kcal/kg	686,2
18	Flüssigkeitswärme q_3 zu p_3 „	53,8
19	Wirtschaftlicher Wirkungsgrad $\eta_w = \frac{859 \cdot N_t}{D \cdot (i_1 - q_3)}$ —	0,117
20	Adiabatisches Wärmegefälle Δi_{ad} kcal/kg	164,3
21	Wirtschaftlicher Gütegrad $\eta_{gw} = \frac{859 \cdot N_t}{D \cdot \Delta i_{ad}}$ —	0,450

dampf noch um die Maschine herum dem Abdampf beigefügt werden muß. Der Hauptwert ist in solchen Fällen auf geringe Wärmeverluste zu legen, durch gute Ummantelung der Maschine und ähnliche Maßnahmen, und daher ist dann der Wirkungsgrad der Umsetzung wichtig. Man vergleiche Abschnitt III d.

Fig. 60 gibt noch graphisch einige weitere Ermittlungen an den Versuchen 101 und III. Letztere Punkte sind durch den Index 1 gekennzeichnet; bei ihm wird der Dampf zunächst von seinem Anfangszustand, Punkt A_1 , gedrosselt bis auf $p_2 = 8,85$ at; dabei sollte Punkt E_1 erreicht werden, wenn Wärmeverluste ausgeschlossen wären; mit dem Drosselvorgang ist eine — behufs Regelung benötigte — Verringerung des Wärmegefälles von $A_1C_1 = 98,2$ auf $E_1F_1 = 84,0$ verbunden. — Infolge der Wärmeverluste bis zur Düse wird nicht E_1 , sondern G_1 erreicht, die Temperatur wird kleiner. Eine weitere Verminderung der Arbeitsausbeute ist mit dem Wärmeverlust verbunden von $E_1F_1 = 84,0$ auf $G_1H_1 = 81,6$ kcal, also nur unerheblich. — Den Zustand des Abdampfes gibt Punkt D_1 ; es fällt auf, daß dieser Punkt oberhalb D'_1 liegt, welcher Punkt erhalten wurde, indem von G_1 aus der Wärmewert der Nutzarbeit abgetragen wurde, Strecke $G_1B_1 = 39,0$ kcal, und dann $B_1D'_1$ wagerecht gezogen wurde. Diese Lage der Punkte D_1 und D'_1

schiedenem Gegendruck.

Dampfaufnahme		Konstante Leistungsentnahme		
	Auspuff	Konden-		Auspuff
108	105	sation	(b)	(c)
		(a)		
3010	2990	3000	3000	3000
113,1	62,2	85,3	85,3	85,3
16	54	—	—	—
91,3	40,4	62,2	62,2	62,2
19	72	—	—	—
(1616)	1616	1060	1300	1900
14,3	25,8	12,4	15,2	22,2
23	122	—	23	79
17,7	40,0	17,0	20,8	30,5
25	182	—	22	79,5
12,5	12,3	12,0	12,2	12,0
9,06	9,06	5,8	7,18	10,68
0,29	1,03	0,10	0,28	1,03
2,17	212	186	187	206
43	11,9	120	43,5	11,7
31,2	8,8	58	25,6	10,4
684,2	683,0	668,0	668,2	679,3
65,6	100,5	45,7	67,3	100,5
0,097	0,057	0,111	0,094	0,067
148,9	103,9	173,8	143,9	102,2
0,405	0,321	0,398	0,392	0,377

zueinander mag in Meßfeh-
lern ihre Ursache haben,
der Temperaturunterschied
zwischen den Punkten ist
nur 5°; es kann aber auch
Wärmeleitung im Spiele
sein. — Für Versuch 101
gelten dieselben Ermittlun-
gen, die Punkte sind ebenso
ohne Index benannt. *B* und
D liegen zufällig in glei-
cher Höhe. Sollte gelegent-
lich die Linie *GH* links von
AC liegen, so wäre das er-
klärlich.

Daß überhaupt durch
den Wärmeverlust von *E*
bis *G* die Entropie sich ver-
mindert, darf nicht als Wi-
derspruch zum zweiten
Hauptsatz angesehen wer-
den, wonach Wärmeleitung
als irreversibler Vorgang die
Entropie vermehrt. Es
ist Wärme aus dem Dampf

Fig. 61 und 62. Dampfturbine bei wechselndem Gegendruck, $n = 3000/\text{min}$.
Fig. 61. Bei konstanter Leistungsentnahme.
Fig. 62. Bei konstanter Dampfaufnahme.

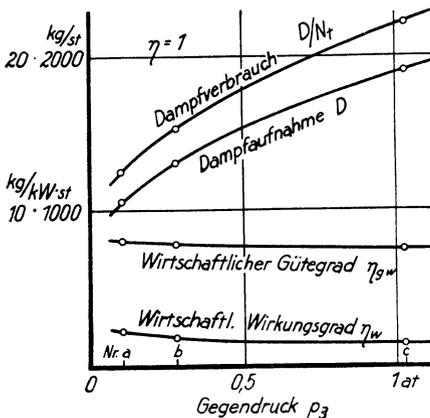


Fig. 61. $N_{et} = 62,2 \text{ kW}$.

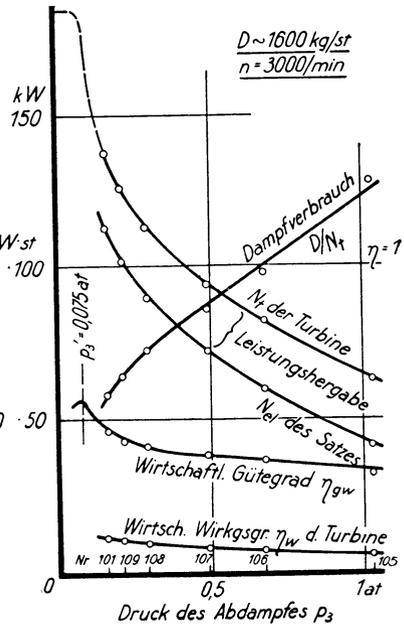


Fig. 62. $D = 1600 \text{ kg/h}$.

entnommen, und dadurch hat sich sein Entropiegehalt vermindert. Aber die Entropie der Umgebung hat um mehr als ebensoviel zugenommen, und die Entropie im ganzen hat sich daher in der Tat vermehrt.

Der genauere Verlauf der Zustandsänderung von G bis D wird in § 60 besprochen. Unter Bezugnahme auf die dort im selben Sinne gedeuteten Ergebnisse sei hier noch aufmerksam gemacht auf die niedrigeren Endtemperaturen des Dampfes bei den Versuchen V und VI gegenüber den Versuchen gleicher Leistung Nr. IV und III. Bei Versuch IV und V ist die Belastung und die Anfangstemperatur etwa gleich, die Endtemperatur aber ist 166° im einen, 151° im zweiten Fall — einfach als Folge davon, daß der Dampf im zweiten Fall, beim Arbeiten mit nur zwei Düsen, besser ausgenutzt wird, der Gütegrad höher ist. Umgekehrt ist der Gang der Abdampf-temperatur bei unverändertem Druck ein sicheres Kennzeichen dafür, ob eine Veränderung an der Turbine vorteilhaft ist oder nicht — solange man nicht an die Sättigung gelangt; wäre das der Fall, so würde der Feuchtigkeitsgrad des Abdampfes an die Stelle der Temperatur treten müssen, der aber ist nicht ebenso bequem zu messen.

58. Übergang zum Auspuffbetrieb bei einer Kondensationsturbine. In Tabelle 22, in Fig. 61 und 62 sind Versuche gegeben, die den *kontinuierlichen Übergang* vom Kondensations- zum Auspuffbetrieb demonstrieren. Der Verlauf der Kurven ist quantitativ, teilweise auch dem Sinne nach verschieden, je nach der Größe, die man konstant hält. — Der Übergang vom Auspuff- zum Kondensationsbetrieb erfolge langsam (§ 75).

Man kann die entnommene *Leistung konstant* halten; dann zeigt sich bei den Versuchen a bis c , daß man den Frischdampf um so mehr abdrosseln muß, je mehr man den Druck des Abdampfes sinken läßt; beginnt man die Reihe mit Kondensationsbetrieb, so muß man eine Belastung wählen, die auch beim Auspuffbetrieb noch durchgehalten werden kann. Mit dem Drosseldruck sinkt die Dampfaufnahme und steigt der Dampfverbrauch; beim Übergang vom Kondensations- zum Auspuffbetrieb sinkt der Drosseldruck, man entfernt sich also immer mehr von der jeweils erzielbaren Höchstleistung, der Belastungsgrad $N : N_{\max}$ sinkt also.

Man kann auch den Drosseldruck und damit die *Dampfaufnahme konstant* halten; man bewegt sich dann auf einer Kurve konstanten Belastungsgrades — eventuell auf der Kurve der Höchstleistung. Bei den Versuchen 101, 108, 105 und einigen weiteren, in Fig. 62 eingetragenen zeigen sich qualitativ ähnliche, aber numerisch verschiedene Ergebnisse.

Für die Berechnung zu machender Ersparnisse wird meist auf gleiche Leistung Bezug zu nehmen sein, die eben durch den äußeren Bedarf bedingt wird. Es zeigt sich, daß der Dampfverbrauch 79% ungünstiger wird bei Auspuffbetrieb als bei Kondensation; diese Zahl ist die gleiche für die Turbine wie für den Satz.

Die Kurven für konstante Dampfaufnahme zeigen, wieviel mehr Leistung sich aus einer gegebenen Turbine durch Kondensation heraus-

holen läßt, unter gleichzeitiger Verbesserung des Dampfverbrauches; das bringt aber nur Nutzen, wenn man Verwendung für das Mehr hat. Der Vergleich in den Zahlen fällt stark verschieden aus, je nachdem man den Satz oder die Turbine betrachtet. Bei der Turbine beträgt für Auspuff die Minderleistung 54%, bei dem Satze aber 72%; der Dampfverbrauch ist bei der Turbine 122, beim Satze aber 182% ungünstiger geworden.

Von Interesse ist noch die Berechnung des wirtschaftlichen Gütegrades. Derselbe bleibt bei unveränderter Leistung ziemlich unverändert; bezogen auf bestimmte Dampfaufnahme sinkt er stark mit wachsendem Gegendruck. Über die Wendepunkte in den Kurven der Dampfaufnahme und des Gütegrades bei kleinem Gegendruck wird in § 62 gesprochen.

Will man der Turbine eine gewisse Leistung unterhalb ihrer Höchstleistung entnehmen, so muß man die insgesamt verfügbare Druckstufe $p_1 - 0,15$ verkleinern; das kann entweder durch Verringern des Frischdampfdruckes $p_1 \approx 12$ at auf den Drosseldruck $p_2 < 12$ at, oder durch Erhöhen des Gegendruckes von $p_3 = 0,15$ auf $p_3 > 0,15$, z. B. bis $p_1 = 1,03$ at geschehen. Diese beiden Vorgänge sind sachlich ähnlich, werden aber im allgemeinen nicht gleich beurteilt; denn wenn man den oberen Teil der gesamten Druckstufe unbenutzt läßt (Drosselung), so setzt man gleichwohl die dem Frischdampfdruck entsprechende Energie als eingeführt und in der Maschine verrichtet; wenn man aber den unteren Teil der Druckstufe unbenutzt läßt, so rechnet man die verfügbare Energie als in p_3 beendet, und legt die Drucke unterhalb p_3 nicht mehr der Maschine zur Last. Man bezeichnet also

als verfügbare Druckstufe $p_1 - p_3$, als verfügbares Druckverhältnis $p_1 : p_3$
 als ausgenutzte Druckstufe $p_2 - p_3$, als ausgenutztes Druckverhältnis $p_2 : p_3$.

als verfügbare Druckstufe $p_1 - p_3$, als verfügbares Druckverhältnis $p_1 : p_3$
 als ausgenutzte Druckstufe $p_2 - p_3$, als ausgenutztes Druckverhältnis $p_2 : p_3$.

Gegen diese verschiedene Rechnungsweise läßt sich einwenden, daß ja doch dem Dampf in jedem Falle nur der „Umsatz“ (§ 3) und etwa noch die mäßigen (Tabelle 21, Zeile 13) Wärmeverluste durch die Oberflächen entnommen werden; der Wärmehalt hat also um gleich viel abge-

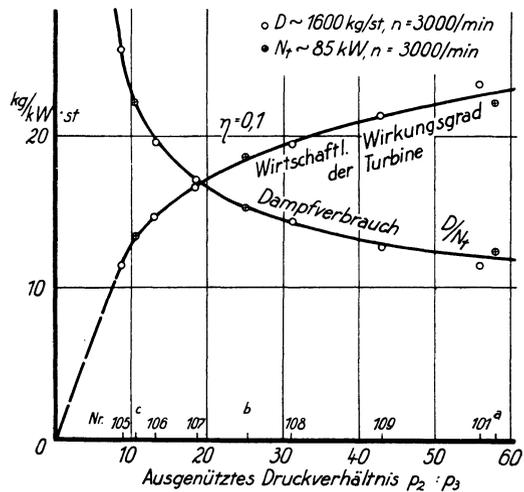


Fig. 63. Druckverhältnis, maßgebend für die Wirtschaftlichkeit der Turbine.

Tabelle 23. Verhalten der Dampfturbine bei verschiedener Drehzahl.

Versuch Nr.		101	102	103	104
1	Drehzahl n /min	2990	2070	1085	0
2	Nutzleistung der Turbine N_t . kW	137,7	108,8	70,4	0
3	Belastendes Drehmoment $M_t = 973 \cdot N_t/n$ mkg	44,8	51,1	63,1	79,4
4	Dampfaufnahme D kg/h	1600	1610	1592	(1600)
5	Druck des Frischdampfes p_1 . . at	11,2	11,0	10,9	11,2
6	Temperatur des Frischdampfes t_1 °C	218	215	219	219
7	Druck des Drosseldampfes p_2 . at	8,98	9,04	9,04	9,92
8	Temperatur des Drosseldampfes t_2 °C	197	198	200	198
9	Druck vor dem 4. Satz at	3,11	3,18	3,19	3,18
10	Temperatur vor dem 4. Satz . . °C	145	160	171	189
11	Druck vor dem 8. Satz at	0,88	0,96	0,96	1,04
12	Temperatur vor dem 8. Satz . . °C	97	108	134	186
13	Druck des Abdampfes p_3 . . . at	0,16	0,17	0,17	0,19
14	Temperatur des Abdampfes t_3 . °C	55	56	79	140

nommen in den beiden Fällen (Verminderung des treibenden oder Erhöhung des widerstehenden Druckes), und es wird daher in beiden Fällen der gleiche Wärmeinhalt noch zur Verfügung stehen. Das wäre

wohl wahr; aber für die Ausnutzbarkeit der Wärme ist auch zu Heizzwecken die Temperatur des Dampfes und namentlich seiner Kondensation wesentlich, und die ist günstiger, wenn die Leistungsverminderung durch Erhöhung des Gegendruckes erzielt wird. Insofern hat also die übliche verschiedene Rechnungsweise ihre Berechtigung.

Für die Energieentnahme aus 1 kg Dampf, also für den wirtschaftlichen Wirkungsgrad

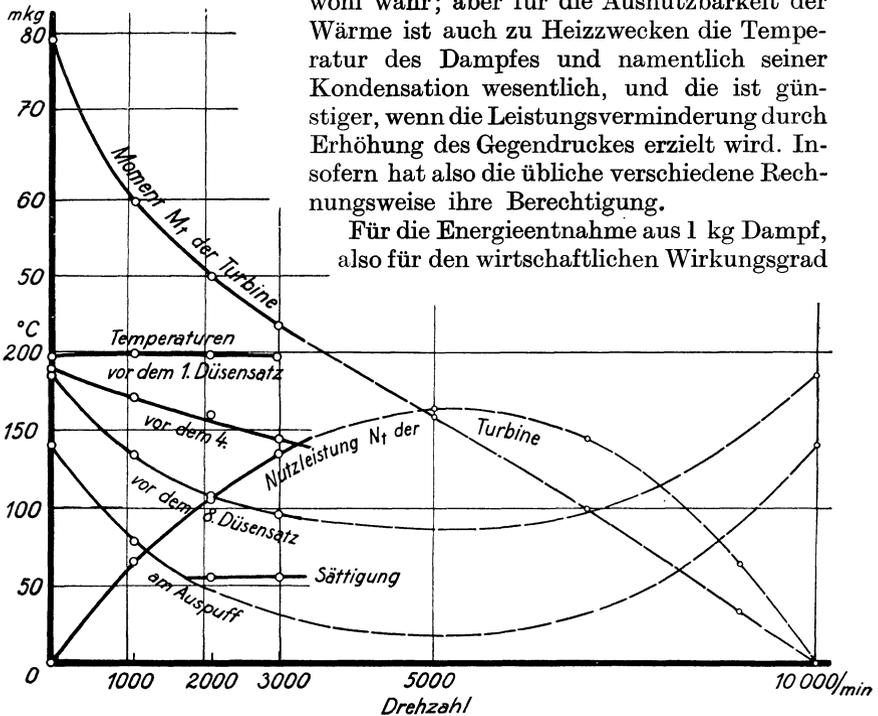


Fig. 64. Einfluß der Drehzahl auf den Leistungsumsatz und den Wärmeverbleib beim Dampfturbinenbetrieb.

ist einfach das ausgenutzte Druckverhältnis (annähernd) maßgebend, Fig. 63; beide Versuchsreihen fallen so dargestellt zu einer Kurve zusammen.

59. Dampfturbine bei wechselnder Drehzahl. Wenn man bei unverändertem — künstlich durch Regulieren von Hand festgehaltenem — Drosseldruck die Turbine mehr oder weniger belastet, so ergeben sich Zahlen, wie in Tabelle 23.

Wo sich die Drehzahl n ändert, ist das von einer Maschine überwindene Drehmoment ein besseres Kennzeichen der Belastung als die Leistung; insbesondere versagt es auch dann nicht, wenn im Grenzfall $n = 0$ wird, festgebremste Turbine.

Um die Drehzahl vom normalen Wert $n = 3000$ herabzudrücken, ist das Drehmoment zu vergrößern. Jedem Drehmoment M_t ist eine Drehzahl zugeordnet; aus beiden ergibt sich (N in kW)

$$N_t = \frac{1}{973} \cdot M_t \cdot n, \text{ oder meßtechnisch umgekehrt } M_t = 973 \cdot \frac{N_t}{n}.$$

In Fig. 64 ist das Drehmoment und die Leistung als abhängig von der Drehzahl eingetragen. Das Drehmoment nimmt mit steigender Leistung ab, es würde bei $n = 10\,000/\text{min}$ den Wert $M_t = 0$ annehmen; diese Freilaufdrehzahl nimmt die Turbine also dann an, wenn man sie ohne jede Belastung mit dem Drosseldruck 9 at beaufschlagt. Die Leistung der Turbine, gegeben durch das Produkt aus Drehzahl und Drehmoment, ist dann ebenfalls $N_t = 0$. Aber auch für $n = 0$ wird $N_t = 0$; die Leistung hat also zwischen Festbremsung und Freilauf einen Höchstwert. Das Drehmoment nimmt grundsätzlich linear ab; dem entspräche ein parabolischer Verlauf der Leistungsänderung, mit dem Parabelscheitel als Höchstpunkt beim halben Werte der Frei-

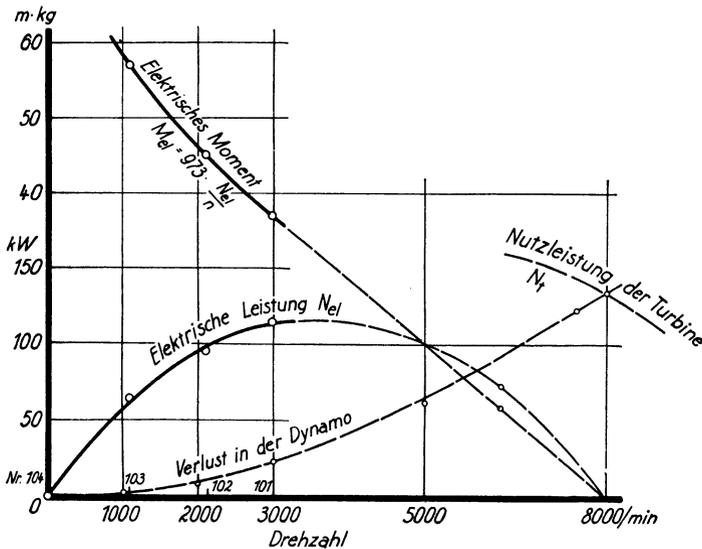


Fig. 65 Einfluß der Drehzahl auf die Leistung der Turbodynamo.

laufdrehzahl. Da die Drehmomentenkurve etwas nach unten durchgekrümmt ist, so ist der Scheitel der parabelartigen Leistungskurve etwas gegen den Nullpunkt geschoben.

Die *Leistungsparabel* ist ohne weiteres ein Maß für die Änderung der Wirtschaftlichkeit; denn es zeigt sich, daß die Dampfaufnahme der Turbine von der Drehzahl durchaus nicht beeinflußt wird. Dem Drossel-
druck von rd. 9 at entspricht ein Dampfgewicht $D \approx 1600$ kg/h in jedem Falle — nur wird der Dampf verschieden gut ausgenutzt.

Dem entspricht der ganz verschiedene Zustand des Abdampfes im Abdampfstutzen; der Abdampf ist um so kälter — unterhalb der Grenzkurve um so nasser — je besser er zur Arbeitserzeugung ausgenutzt wurde. Die Dampftemperatur würde wieder zunehmen, wenn man die Drehzahl über den Scheitel der Leistungskurve hinaus steigern könnte, ohne das Laufrad in der Festigkeit überzubeansprechen. — Besser als

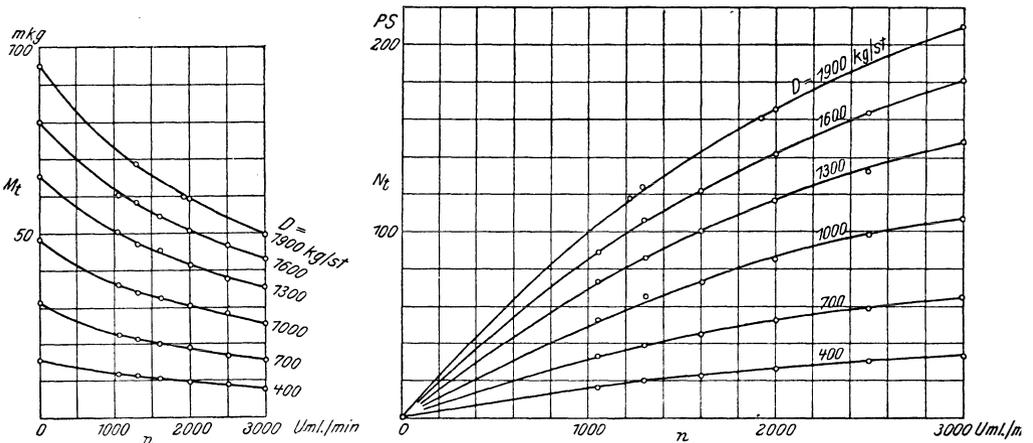


Fig. 66 und 66a. Momentenlinien und Leistungsparabeln der Dampfturbine.

am Auspuff sieht man das Gesetz in den Zwischenstufen ausgeprägt, in denen noch keine Sättigung vorkommt. Vgl. hierüber § 60.

Die Nutzleistung der Turbine erreicht den Höchstwert bei der Drehzahl 5000/min; die Turbine ist nur für 3000 Uml./min bestimmt. Man darf hieraus nicht schließen, die Turbine sei schlecht bemessen. Bei solchem Urteil wäre der Zweck der Turbine zu beachten. Die in Rede stehende ist mit einer Dynamo gekuppelt; die *Leistungsparabel des gekuppelten Satzes* aber zeigt Fig. 65. Sie hat ihren Scheitel unweit $n = 3000/min$, und auf das Verhalten des ganzen Satzes kommt es an.

Man kann auch, obwohl es in der Wirklichkeit nicht als solches vorhanden ist, ein elektrisches Moment $M_{el} = 973 \cdot \frac{N_{el}}{n}$ berechnen; es ist das jenes Moment, das für den Antrieb der Dynamo nötig wäre, wäre sie verlustfrei. Das Übergehen auf die — wenn auch irrealen — Momentenkurve hat den Vorteil, daß man diese schwach gekrümmte Kurve gut

extrapolieren und so den Freilaufwert $n \approx 8000/\text{min}$ des Satzes finden kann, um daraus erst den abfallenden Ast der Leistungsparabel zu bestimmen, für den man ohnedies keinen Anhalt hat. —

Will man bei Vermehrung der Drehzahl statt der Dampfaufnahme lieber die Nutzleistung konstant halten, so muß der Drosseldruck und daher die Dampfaufnahme zunächst steigen, nach Erreichung des Scheitels der Leistungsparabel aber muß sie wieder fallen. Diese Zustände des Satzes sind dann unstabil.

Aus mehreren Versuchsreihen, bei deren jeder die Dampfaufnahme konstant gehalten wird, während man zwischen zwei Reihen auf einen anderen Wert geht, lassen sich die Diagramme, Fig. 66, 66a und 67, aufstellen; sie sind analog dem in § 140 für Ventilatoren zu besprechenden, gewissermaßen die Umkehrung desselben.

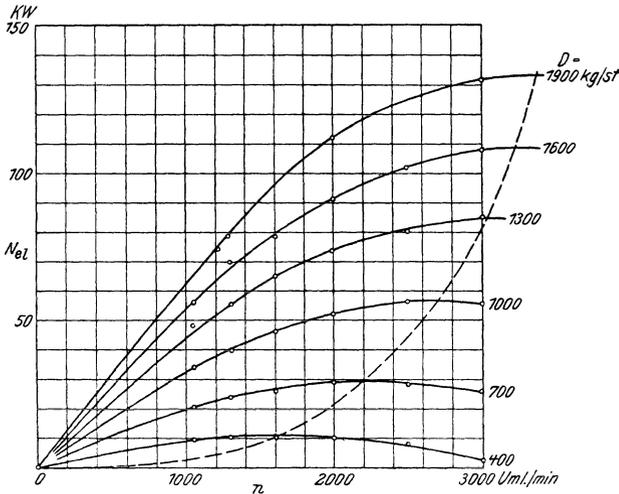


Fig. 67. Leistungsparabeln der Turbodynamo.

In Fig. 67 ergibt sich die gestrichelte Linie günstigster Drehzahlen, die die Drehzahl $n = 3000/\text{min}$ als für den Turbosatz günstigste hervortreten läßt. —

Über die Versuchsausführung sei folgendes bemerkt. Eine elektrisch belastete Maschine wird zum Nachlassen

von der normalen Drehzahl gebracht, indem man durch Parallelschalten von weiterem Widerstand den äußeren Widerstand W_a des Stromkreises vermindert, seine äußere Leitfähigkeit $1/W_a = J/E$ vermehrt. Aus den gemessenen Werten der Spannung und der Stromstärke in Verbindung mit dem Freilaufwert $J = 0$ des Maschinensatzes ergibt sich der Verlauf der in Frage kommenden Größen nach Fig. 68. Die Spannung ist — bei Fremderregung mit konstanter Stromstärke — der Drehzahl proportional; eigentlich gilt das für die elektromotorische Kraft, die aber im üblichen Belastungsbereich nur wenig von jener abweicht. Im Freilauf kommt bei offenem Stromkreis die Stromstärke auf Null, die Spannung auf einen gewissen höchsten Wert. Der Verwirklichung dieses Grenzzustandes steht nur die Rücksicht auf die Festigkeit der umlaufenden Teile im Wege, vielleicht noch Rücksicht auf die Isolation der Wicklungen. Wollte man indessen die Turbine durch elektrische Belastung auf Drehzahlen unter 1000 bringen und sie dem Festbremsen

nähern, so hätte man die Maschine kurzschließen müssen — $W_a = 0$ machen —, und dagegen hat man Bedenken. Das Festbremsen des Maschinensatzes unterbleibt daher; beide Teile des Satzes werden an der Kupplung getrennt, und die *Turbine allein* wird am einfachsten dadurch *in festgebremstem Zustande* untersucht, daß man eine Stahlstange durch die Kupplung steckt, die mit ihrem Ende auf einer Brückensäge ruht. Die Tara und der Hebelarm zur Wage werden zunächst bestimmt, dann Dampf gegeben, bis der gewollte Drosseldruck erreicht ist, und nun das Anlaufmoment abgelesen. Dabei bemerkt man, daß die Gewichte auf der Wage in gewissen Grenzen geändert werden können, und doch Gleichgewicht zu beobachten bleibt. Das ist eine Folge der Reibung, die die Turbinenwelle in den Lagern erfährt. Das übliche Verfahren zu ihrer Ausschaltung ist, in ähnlichen Fällen, zunächst Gewichte auf die Gewichtsschale zu setzen, bis die Gewichte abwärts sinkend die Welle rückwärts drehen, sodann Gewichte von der Gewichtsschale zu nehmen, bis der Druck des Dampfes die Welle wieder vorwärts dreht. Der Unterschied beider Drehmomente ist das doppelte Moment der Reibung, der Mittelwert ist das Anlaufmoment der reibungsfrei gedachten Turbine. Natürlich sind die Gewichte in kleinen Stücken und vorsichtig auf- und abzunehmen. So war bei Versuch 104 der Hebelarm 1 m, die Tara 10,9 kg, entsprechend 10,9 mkg Tara-Moment; das Turbinenrad fiel zurück bei 91,8 kg Belastung der Wage, es ging vor bei 88,8 kg. Das Reibungsmoment des Turbinenrades ist also $\frac{1}{2} \cdot (91,8 - 88,8) = 1,5$ mkg, das Anlaufmoment bei 9,02 at Drosseldruck, 198° Dampftemperatur ist $\frac{1}{2} \cdot (91,8 + 88,8) - 10,9 = 79,4$ mkg. Dieser Punkt ist denn auch als Anlaufmoment der Turbine in Fig. 64 aufgenommen worden, er paßt befriedigend zu den auf elektrischem Wege gefundenen Momenten der umlaufenden Turbine.

Die Unmöglichkeit, die Turbine elektrisch festzubremsen, war vorhin aus Bedenken wegen der Erwärmung gefolgert worden: die Stromstärke wächst schnell an, wenn man den äußeren Widerstand stark verkleinert. In Wahrheit ist dieses Bedenken gar nicht so durchschlagend, denn durch Erhöhung der Kupfer- und Wirbelstromverluste steigt die Stromstärke beim Kurzschließen der Maschine nur auf etwa das Doppelte der normalen. Das hält der Anker sehr kurze Zeit wohl aus, und nur bei plötzlichem Kurzschließen pflegen die Anschlußenden mechanisch unter der zu starken Verzögerungskraft zu leiden. Dagegen ist theoretisch die Festbremsung unmöglich. Das erkennen wir wie folgt, und sehen dabei zugleich, daß man nicht ohne weiteres die Kurven der Fig. 68 nach links verlängern darf, etwa E zum Nullpunkt und J zur asymptotischen Annäherung an die Ordinatenachse. Für $n = 0$ ist nämlich jedenfalls $E = 0$. Auch für $W_a = 0$ hat aber der Stromkreis einen endlichen Widerstand W , bestehend aus dem Ankerwiderstand $W_A = 0,011 \Omega$ und dem der Zuleitungen zum Schaltbrett, nach Tabelle 18 sind das $W_1 = 0,00063 \Omega$, zusammen also rund $W = 0,012 \Omega$. Wegen $J = E : W$ müßte also $J = 0$ sein. Schon für eine kleine, aber endliche Drehzahl würde also bei $W_a = 0$ ein Zustand eintreten, wo die geringe Leistung der Turbine durch die Erwärmung der Anker und

Kabel aufgezehrt würde. Dazu kämen noch störende Erscheinungen an den Bürsten und der Einfluß des Querfeldes. — Es ist praktisch wertlos, zu verfolgen, wie die Verhältnisse bei fortgesetzter Steigerung von W_a verlaufen, wenn man die Widerstände W_A und W_1 nicht mehr so vernachlässigen kann, wie Fig. 68 es tut. Es sollte nur dargetan werden, daß man im Verlängern von Kurven gegen die Grenzen, besonders gegen Null hin, vorsichtig sein muß.

Man kann den Turbosatz ebensowenig frei laufen lassen, wie ihn festbremsen. Rein mechanische Gründe sprechen dagegen. Die abfallenden Äste der „Leistungsparabeln“ in Fig. 64 und 65 mußten also ergänzt werden. Das läßt sich direkt nur schlecht machen. Mehr An-

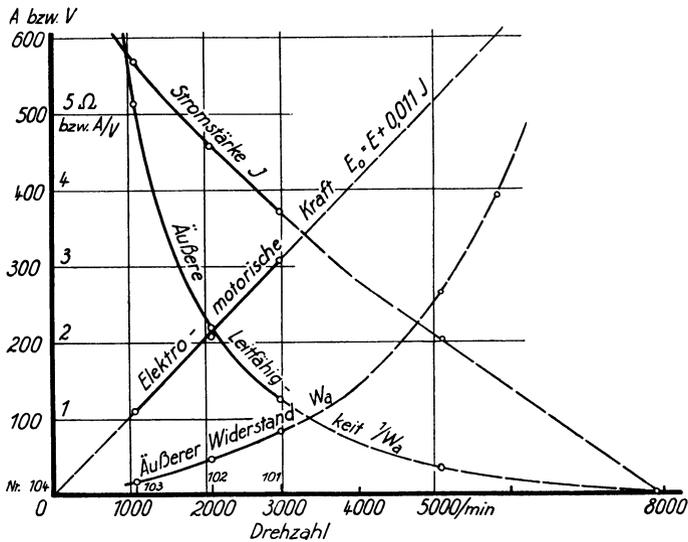


Fig. 68. Elektrische Belastung einer Turbdynamo.

halt hat man für das Verlängern der fast geradlinigen Momentenlinien bis zum Schnitt mit der Abszissenachse; aus ihrem Verlauf werden dann einige Punkte der Parabel ergänzt: $N = 973 \cdot M \cdot n$, kleine Kreise in den Figuren.

Außerdem hat man noch einen Anhalt für das Aufzeichnen der Leistungsparabeln daraus, daß beide sich um die Verluste der Dynamo voneinander unterscheiden; die aber kann man durch einen Auslaufversuch oder nach der Methode des doppelten Auslaufes (Techn. Mess. § 81) bestimmen. Durch einen solchen hat sich für unsere Dynamo ergeben (die Ermittlungen Techn. Mess. § 81 beziehen sich auf die gleiche Dynamo, aber mit Turbine):

$n = 1000/\text{min}$	$V = 2,45 \text{ kW}$	$\log n = 3,000$	$\log V = 0,389$
2000	9,2	3,301	0,964
3000	22,4	3,477	1,350.

Wir haben zu den Werten der Drehzahl n und der Verluste V sogleich die Logarithmen ermittelt und tragen diese in einem Netz auf, Fig. 69. Es zeigt sich, daß der Verlauf der Logarithmenkurve geradlinig ist; wir können sie daher sicher verlängern, und entnehmen dem Bild weitere Werte:

$$\begin{array}{c|c|c|c} n = 5000/\text{min} & \log n = 3,699; & \log V = 1,785; & V = 61 \text{ kW} \\ 7000 & 3,845 & 2,085 & 122. \end{array}$$

Zeichnen wir hiernach die Verluste abhängig von der Drehzahl auf, so muß die Kurve der elektrischen Leistung (und des Momentes) da die Abszissenachse schneiden, wo (bei $n \approx 8000/\text{min}$) die Verluste gleich der Leistung der Turbine sind (Fig. 65).

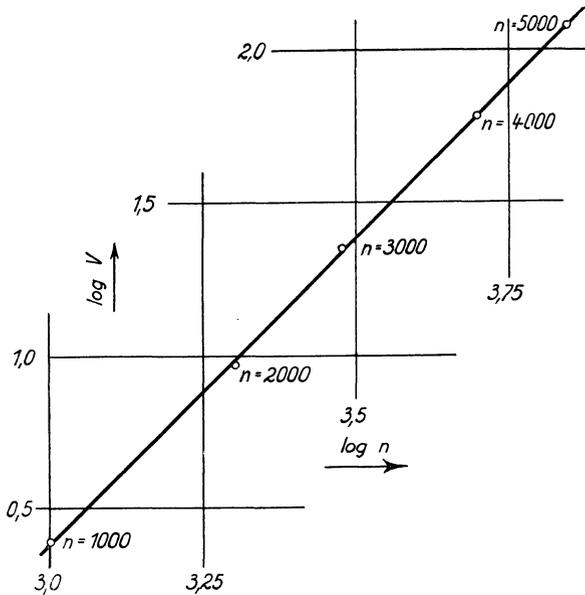


Fig. 69. Ermittlung der Hysterese- etc. Verluste in der belastenden Dynamomaschine in einer Abbildung.

Das Verfahren, an Stelle der Größen selbst (hier n und V) irgendwelche Funktionen davon (hier $\log n$ und $\log V$) aufzutragen, um eine gut inter- und extrapolierbare Kurve zu erhalten, ist sehr allgemein anwendbar. Man spricht in der Mathematik von einer *Abbildung*: statt der Größen selbst werden Funktionen von ihnen der Betrachtung unterworfen, die sich

bequemer behandeln lassen und deren jeder Punkt eindeutig einem Punkt der eigentlich zu behandelnden Kurve zugeordnet ist, ihn „abbildet“. Man darf sich aber nicht durch die Sicherheit, mit der man die Extrapolation in dieser Form bewirken kann, verleiten lassen, sie für sehr genau zu halten. So deuten die Versuchspunkte der Fig. 69 eventuell schon auf einen leicht gekrümmten Verlauf der Abbildung.

Bekanntlich deutet der geradlinige Verlauf der Beziehung zwischen den beiden Logarithmenwerten an, daß zwischen V und n die Beziehung

$$V = a \cdot n^m$$

mit einem konstanten Exponenten m gilt; dabei ist überdies

$$m = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta \log V}{\Delta \log n}$$

durch den Neigungswinkel α der Geraden gegen die Abszisse gegeben. Nehmen wir die Differenzen Δ zwischen 1000 und 3000/min, so wird für unseren Fall

$$m = \frac{1,350 - 0,389}{3,477 - 3,000} = 2,02 \approx 2.$$

Die Verlustkurve ist gut eine gewöhnliche Parabel

$$V = a \cdot n^2.$$

Wenn man das erwartet, so kann man die Extrapolation auch in der Weise machen, daß man V über n^2 statt über n aufträgt. Auch so kommt man auf eine Gerade und daher auf bequeme Extrapolation. Fig. 263 in § 140 wird hierfür ein Beispiel sein.

60. Zustandsänderung des Dampfes in der mehrstufigen Dampfturbine. Es ist lehrreich, bei verschiedenen Versuchen der besprochenen Reihen Druck und Temperatur in einzelnen Stufen der Turbine zu messen, um daraus den Zusammenhang zwischen der Wärmeabnahme im Dampf und der auf die Turbinenräder übertragenen Arbeit zu erkennen. Die folgenden Versuche sind mit zu geringer Anfangsüberhitzung ausgeführt und geben daher keine so vollkommenen Ergebnisse, wie mit überhitztem Dampf zu erwarten wären, da im Sättigungsgebiet die Messung der Feuchtigkeit und damit des Wärmeinhaltes praktisch unmöglich ist.

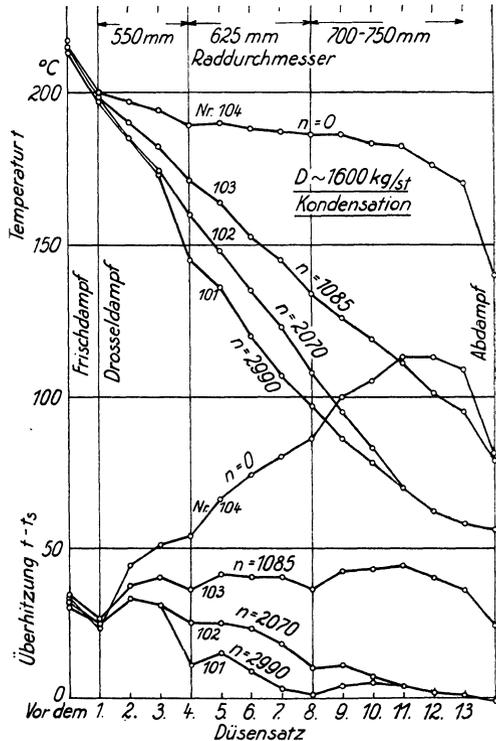


Fig. 70. Temperaturverlauf in den Turbinenrädern bei wechselnder Drehzahl.

Bei der in § 59, Tabelle 23 besprochenen Reihe wechselnder Drehzahl bei unveränderter Dampfaufnahme ergaben sich die Zahlen, deren einige schon in Tabelle 23 gegeben waren, und die ausführlicher in Fig. 70 bis 72 zur Darstellung gebracht sind.

An der mit 13 Rädern versehenen Turbine waren 14 Meßstellen (vor jedem Düsenatz und hinter dem letzten) vorhanden, die Messung von Druck und Temperatur war dadurch möglich; in Tabelle 23 sind nur einige der Stufen aufgenommen.

Der Verlauf des Druckes ist bei jeder Drehzahl etwa der gleiche, der Verlauf der Temperatur ganz verschieden. Die Temperatur sinkt um so tiefer, je mehr Leistung dem Dampf durch die Bewegung des Rades entzogen wird. In Fig. 70 ist außer den Temperaturen auch die Überhitzung aufgetragen. Für normale Drehzahl fällt die Temperatur schnell, die Überhitzung ebenso, dann hat man Sättigung, und in den letzten Stufen ist der Dampf fraglos schon naß. Ähnlich ist es noch bei 2070 Umläufen. Bei der festgebremsten Turbine dagegen fällt die Temperatur nur langsam ab, die Überhitzung steigt erheblich an. In allen Fällen kennzeichnen sich mehr oder weniger deutlich die Stufen, an denen der Laufraddurchmesser sich ändert, weil dort größere StrahlungsOber-

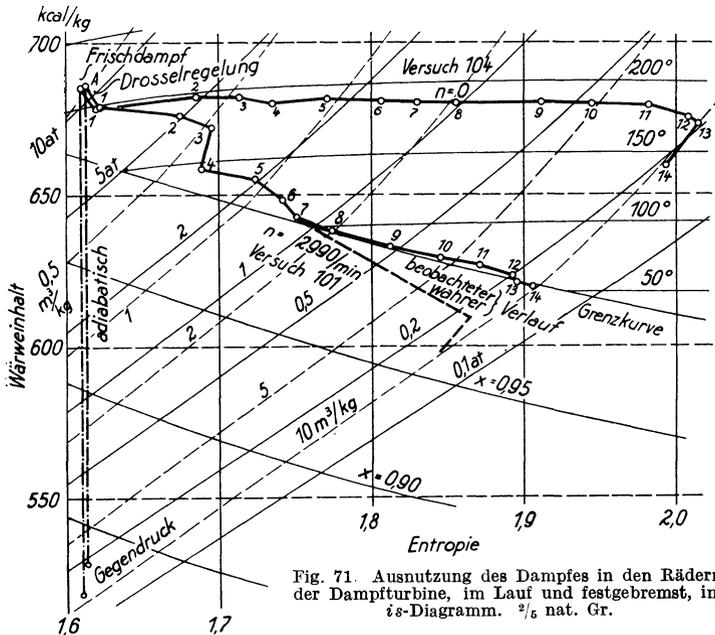


Fig. 71. Ausnutzung des Dampfes in den Rädern der Dampfturbine, im Lauf und festgebremst, im i - s -Diagramm. $\frac{2}{3}$ nat. Gr.

flächen vorhanden sind. Der starke Temperaturabfall an der letzten Stufe ist durch die Verluste der Stirnfläche hervorgerufen.

Die Versuche für $n \approx 3000$ und für $n = 0$ sind in Fig. 71 in das i - s -Diagramm eingetragen. Bei Festbremsung vermindert sich der Wärmeinhalt i kaum, dem Dampf wird keine Energie entzogen. Um so energischer wächst s , die Entropie, bei dem irreversiblen Vorgang. Bei voller Drehzahl ist die Grenzkurve nach dem gestrichelt ange deuteten Verlauf unterschritten zu denken, wenn man auch die Feuchtigkeit nicht hat messen können.

Der Temperaturverlauf, genauer der Verlauf des Wärmeinhalts, ist das genaue Gegenstück zum Verlauf der Leistungsaufnahme und trat in der Gesamtwirkung in Fig. 64 als solcher hervor. Man kann aber auch den Verlauf des Dampfzustandes zur annähernden Bestimmung des Anteiles der einzelnen Turbinenräder an der gesamten Arbeits-

leistung verwenden, und man kann andererseits aus der Dampfmenge und dem Druckabfall in den einzelnen Stufen auf die Querschnitte jedes einzelnen Düsensatzes schließen. Beides sei am Beispiel erläutert.

Die Arbeitsabgabe einer Turbine unterscheidet sich von der Wärmehergabe des Dampfes nur um die Wärmeverluste durch die Umflächen der Maschine. Das ändert sich durch die Reibung nicht. Das Verhältnis beider nannten wir in § 57, Tabelle 21 den Wirkungsgrad der Umsetzung. Derselbe war nur bequem bestimmbar, wenn auch der Abdampf noch überhitzt war — für unsere Turbine ist er daher im ganzen im normalen Betrieb nicht gut zu messen. Der Wirkungsgrad der Umsetzung ging über 80% und wird bei den nicht an den Stirnwänden liegenden Laufrädern noch höher sein. Da also die Abweichung von 100% nicht sehr groß ist, so ist die Verminderung des Wärmeinhaltes ein gutes Maß für den Arbeitsumsatz im betreffenden Rade, und man kann wenigstens für die ersten Räder folgende Untersuchung durchführen.

In Fig. 72 ist im i - s -Diagramm der Dampfzustand für Versuch 101 so wie in Fig. 71 eingetragen, soweit er im Überhitzungsgebiet verläuft und daher meßbar ist. Der Verlauf tritt als genauerer an die Stelle der Geraden GD , Fig. 60. In gleicher Weise wie dort

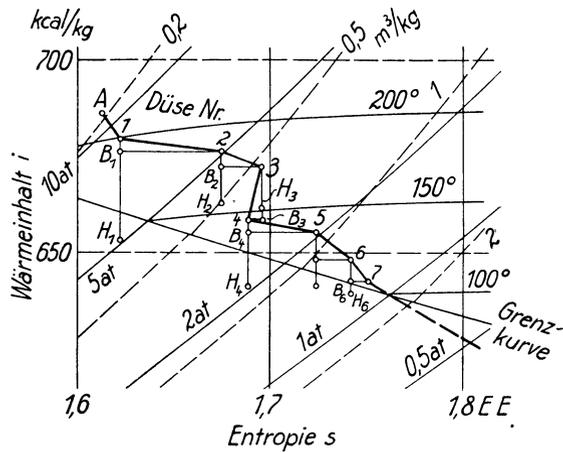


Fig. 72. Anteil der einzelnen Räder an der Dampfausnutzung, ermittelt am i - s -Diagramm, Versuch 101. $\frac{1}{2}$ nat. Gr.

läßt sich nun das im ersten Düsensatz verfügbare Wärmegefälle durch Ausmessen der Länge $1 H_1 = 26,1$ kcal bestimmen; H_1 ist ein Punkt gleichen Druckes mit Punkt 2, der den Zustand hinter dem Rad 1 darstellt. Ausgenutzt wird hiervon höchstens die Strecke $1 B_1 = 3,3$ kcal = 12,6%; denn der Rest des Wärmeinhaltes ist im Dampf vor der zweiten Düse noch enthalten; vermutlich ist noch etwas weniger ausgenutzt, da ein Teil der 3,3 kcal auch auf Wärmeverluste zu rechnen sein mag; andererseits ist gerade in der ersten Stufe die Möglichkeit der Wärmezufuhr vom Regler her nicht ganz von der Hand zu weisen, das Ansteigen der Linie 1—2 im Stillstand des Rades, Fig. 71, weist darauf hin. Dort wird für die gleiche Dampfmenge eine Zunahme um $32,1 - 28,3 = 3,8$ kcal/kg ausgewiesen; danach mögen im Gang der Turbine $3,3 + 3,8 = 7,1$ kcal = 27,2% von 26,1 kcal umgesetzt sein. Keinesfalls aber ist der Umsatz günstig. Das mag wie folgt zu erklären sein. Dem Wärmegefälle von $26,1$ kcal/kg = $26,1 \cdot 427 = 11150$ m = H entspricht theoretisch eine Dampfgeschwindigkeit

$w_{th} = \sqrt{2g \cdot H} = 468$ m/s. Bekanntlich werden günstige Umsetzungsverhältnisse bei Freistrahlrädern dann erreicht, wenn die Schaufelung rund die halbe Geschwindigkeit des auftreffenden Dampfstrahles hat. Die Schaufelung des ersten Laufrades hat, bei 550 mm Durchmesser und 2990 Umläufen minutlich, nur 86 m/s Geschwindigkeit, bleibt also weit hinter der Sollgeschwindigkeit zurück, oder besser: der Druckabfall in der ersten Düse und daher die Dampfgeschwindigkeit ist zu groß für die Schaufelgeschwindigkeit, und daher ist die Ausnutzung schlecht.

Wir stellen die entsprechenden Ergebnisse für die anderen Stufen in Tabelle 24 zusammen, soweit die Stufen im Überhitzungsgebiet liegen.

Tabelle 24. Ermittlung der Arbeitsverteilung auf die Räder einer Dampfturbine aus dem Dampfzustand. Versuch 101.

Stufe Nr. <i>x</i>	Strecke xH_x $= \Delta i_{1d}$	Strecke $x B_x$ $= \Delta i$	Δi berichtigt	Wirkungsgrad $\eta = \Delta i : \Delta i_{1d}$	Theor. Ausflußgeschw. $w_{th} = \sqrt{427 \cdot \Delta i_{1d} \cdot 2g}$ $= 91,5 \sqrt{\Delta i_{1d}}$
	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg	—	m/s
Schaufelkranzdurchmesser 550 mm, Kranzgeschwindigkeit 86 m/s.					
1	26,1	3,3	7,1	27,2	468
2	13,3	4,0	—	30,0	334
3	10,7	13,8	—	> 1	299
Schaufelkranzdurchmesser 625 mm, Kranzgeschwindigkeit 98 m/s.					
4	17,1	3,2	—	18,6	378
5	14,0	7,1	—	50,7	342
6	8,8	5,6	—	63,6	272

Stufe 3 und 4 zeigen Unregelmäßigkeiten. Die naheliegende Vermutung, es handele sich um eine Einwirkung des Absatzes im Turbinengehäuse auf die Dampftemperatur, ist deshalb hinfällig, weil der Wirkungsgrad einmal > 1 wird, dafür zum Ausgleich das nächstmal um so kleiner. Es handelt sich also offenbar um einen Meßfehler, der seinerseits allerdings durch den Einfluß des Absatzes im Gehäuse zu erklären sein wird: der Thermometerstutzen dürfte schlecht angebracht sein. Nimmt man für Zustand 4 bei gleichem Druck höhere Temperatur an, so kommt alles in Ordnung.

Sonst aber ist der so berechnete Wirkungsgrad — eigentlich Gütegrad mal Wirkungsgrad der Umsetzung — merklich um so besser, je mehr wir uns mit der Dampfgeschwindigkeit der doppelten Schaufelgeschwindigkeit nähern.

Im ganzen ist also der Dampfzustand in den Stufen ein bequemes Mittel zur Beurteilung der wirklich erzielten Leistungen. Im vorliegenden Fall hat die Turbine durchweg zu kleine Kranzgeschwindigkeiten im Vergleiche zur Dampfgeschwindigkeit. Schon Fig. 64 ergab dasselbe als durchschnittlich für die ganze Turbine gültig, aus Fig. 67 freilich ergab sich für den Turbosatz ein besseres Bild.

Über den *Einfluß des Gegendruckes auf die Zustandsänderung in den Turbinenstufen* gibt Fig. 73 Auskunft, in der die Zustandsänderungen der gleichen Dampfmenge einmal bei Kondensationsbetrieb, einmal bei Auspuffbetrieb gegeben werden. Es sind die Versuche 101 und 105 der Tabelle 22, § 58 miteinander verglichen. Der Druckverlauf in den ersten Stufen wird sehr wenig durch den höheren Gegendruck des Auspuffbetriebes beeinflusst, wohingegen der Druck in den letzten Stufen überhaupt kaum noch abfällt, so daß er also schon bald, etwa in der 9. Stufe, fast genau Atmosphärenspannung erreicht, die letzten Stufen also nur noch in Dampf überall gleichen Druckes waten. Der Temperaturabfall ist ähnlich zu beurteilen; der Vergleich wird durch mangelhaft gleiche Anfangstemperatur erschwert; die stärkere Neigung des ersteren Teiles der Temperaturkurve mag durch die Überhitzung hervorgerufen sein. Das Aufzeichnen des *i-s-Diagrammes* analog scheidet für diese Versuche an der zu geringen Überhitzung.

Es erscheint eigenartig, daß in beiden Fällen die gleiche Dampfmenge von der Turbine aufgenommen wird, und daß sie dann mit so verschiedenem Druckabfall die Schaufelungen und Düsensätze der letzten Stufen durchläuft. Die Möglichkeit dessen wird noch in § 61 Tabelle 25 besprochen.

61. Zustandsänderung des Dampfes innerhalb einer Düse; Ermittlung der Düsenquerschnitte. Im vorigen Paragraphen wurde der Dampfzustand jedesmal gemessen, nachdem der Dampf in der Düse Geschwindigkeit angenommen und diese im Laufrad mehr oder weniger an den Schaufelkranz abgegeben hatte. Die Frage, auf welchem Wege der Dampf aus dem Anfangs- in den Endzustand einer bestimmten Stufe gekommen war, wurde insoweit berührt, als wir die Zustandsänderung im Düsensatz als adiabatisch annahmen, Fig. 72. Unter dieser Annahme läßt sich aber auch die Zustandsänderung innerhalb

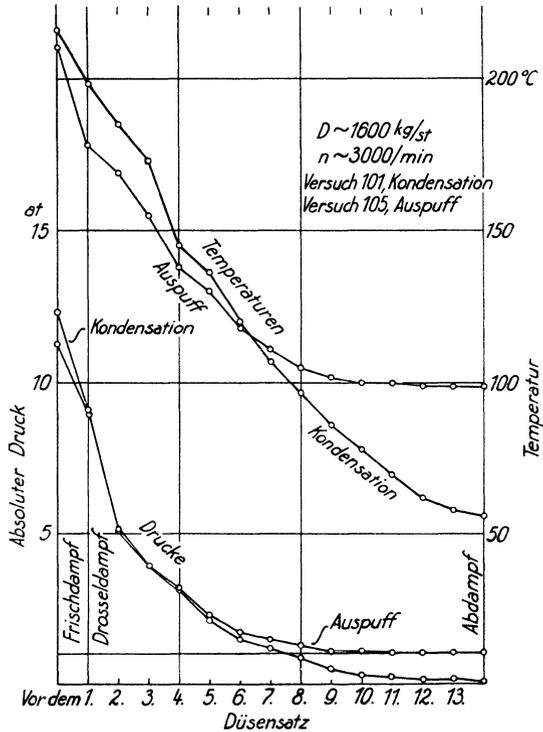


Fig. 73. Verlauf des Druckes und der Temperatur in den Turbinenrädern bei Auspuff und bei Kondensation.

der einzelnen Düse verfolgen. Das soll für den Versuch II, Tabelle 20 an der mit Gegendruck arbeitenden Turbine gezeigt werden, die nur 1 Druckstufe hat, und zwar an Hand des i - s -Diagrammes, Fig. 74a.

Der Frischdampf hat den durch Punkt A gegebenen Zustand, er wird bis G gedrosselt. Der Zustand D des Abdampfes ist auch bekannt. Die Expansion erfolgt in einer Stufe von 10,4 bis 1,52 at, das Druckverhältnis der Ausströmung ist $1,52 : 10,4 = 0,146$, also wesentlich kleiner als das „kritische“ Druckverhältnis, das für überhitzten Dampf etwa zu 0,545 anzunehmen ist¹⁾. Diesem kritischen Druckverhältnis entspreche vielmehr ein Mündungsdruck $p_m = 0,545 \cdot 10,4 = 5,7$ at. Die adiabatische Zustandsänderung in der Düse gibt die Senkrechte GH ;

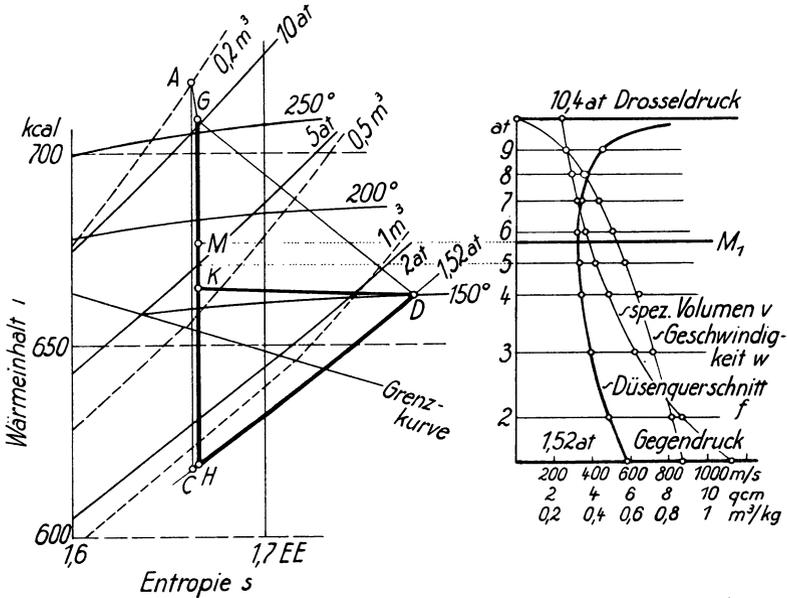


Fig. 74a und b. Dampfzustand und Düsenmaße bei einstufiger Umsetzung. Versuch II. Dampfmenge $D = 1620$ kg/h; Anfangszustand G : 10,4 at, 258°; Endzustand D : 1,52 at, 150°. $\frac{1}{2}$ nat. Gr.

auf ihr bedeutet Punkt M , bei 5,7 at gezeichnet, den Dampfzustand im engsten Querschnitt. Der Dampf ist bei M noch überhitzt, bei H aber feucht.

Bei der Expansion von G bis H haben nun $\Delta i = 708,9 - 618,9 = 90,0$ kcal Wärmeinhalt den Dampf verlassen; sie treten, wenn wir von Reibungsverlusten absehen, voll als kinetische Energie des strömenden Dampfes in die Erscheinung. Der Inhalt des Dampfes an kinetischer Energie ist also $\Delta i = 90,0 \cdot 427 = 38\,400$ mkg, bezogen auf 1 kg Dampf, also auf die Masse $m = \frac{1}{9,81}$ ME (Masseneinheiten). Die Dampfgeschwindigkeit im Punkte H ist $w = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot \Delta i} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 38\,400} = 868$ m/s. Da andererseits, ebenfalls dem i - s -Diagramm zu ent-

¹⁾ Schüle, Technische Thermodynamik, I, 3. Aufl., S. 272, Fig. 99.

nehmen, im Zustande H das spezifische Volumen $v = 1,12 \text{ m}^3/\text{kg}$ ist, so muß die Düse $1,12 \text{ m}^3/\text{s} : 868 \text{ m/s} = 0,00129 \text{ m}^2$ Endquerschnitt haben für je 1 kg/s Dampfdurchgang. Diese Zahl ist noch unabhängig von der besonderen Turbinengröße und nur durch Anfangs- und Endzustand des Dampfes bedingt; die untersuchte Turbine ließ $\frac{1}{3} \cdot 4860 = 1620 \text{ kg/h} = 0,45 \text{ kg/s}$ durch eine Düse gehen, die Düse sollte also $0,45 \cdot 0,00129 = 0,00058 \text{ m}^2 = 5,8 \text{ cm}^2$ Endquerschnitt haben, damit gerade im Endquerschnitt der Gegendruck erreicht wird.

Die gleiche Rechnung läßt sich für beliebige Punkte der Adiabaten, etwa für den Schnitt mit der 5 at-Linie machen; die Ergebnisse sind in den Kurven Fig. 74 b eingetragen. Das Wärmegefälle bis 5 at ist $38,0 \text{ kcal} = 16200 \text{ mkg}$, die Dampfgeschwindigkeit $w = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 16200} = 564 \text{ m/s}$. Das spezifische Volumen entnehmen wir dem i s-Diagramm zu $0,41 \text{ m}^3/\text{kg}$, die Mündungsweite für 1 kg/s Dampfdurchgang wird $0,41 : 564 = 0,000725 \text{ m}^2$, die wirkliche Düsenweite $0,45 \cdot 0,000725 = 0,00033 \text{ m}^2 = 3,3 \text{ cm}^2$.

Für so berechnete Punkte sind in Fig. 74 b senkrecht die Wärmegefälle aufgetragen, die bis zu gewissen Drucken durchgemessen sind, korrespondierend mit Fig. 74 a. Wagerecht ist zunächst die Geschwindigkeit angetragen, die der Dampf dort angenommen hat; wegen $w^2 = 2g \cdot \Delta i$ ist sie eine Parabel. Das spezifische Volumen v nimmt

dauernd zu. Der erforderliche Düsenquerschnitt $f = \frac{v}{w}$ als Quotient der beiden mit entgegengesetzter Krümmung begabten Kurven erreicht einen Mindestwert M_1 bei dem oben schon berechneten Druck $p_m = 5,7 = 0,545 \cdot 10,4 \text{ at}$. Zu diesem Druck gehören die Werte: Geschwindigkeit $w_m = 251 \text{ m/s}$, spezifisches Volumen $v_m = 0,35 \text{ m}^3/\text{kg}$, wirkliche Düsenweite $f_m = 3,25 \text{ cm}^2$.

Die f -Kurve gibt die Gestalt einer auf konstanten Wärmeumsatz pro Längeneinheit für die vorliegenden Druckverhältnisse berechneten Düse. Die Annahme konstanten Wärmeumsatzes ist aber nicht zwingend. Man pflegt den Teil bis zur Mündung M_1 kürzer, den dahinterliegenden Teil schlanker zu gestalten, letzteres, um Ablösung des Dampfes von der Wandung zu vermeiden; solange das erfüllt ist, gilt unabhängig von dem ausgeführten Profil, daß die auf einer Wagerechten liegenden Werte von v , w und f einander zugeordnet sind, z. B. der Druck wird 5 at, das Volumen $0,41 \text{ m}^3/\text{kg}$ und die Geschwindigkeit 564 m/s da betragen, wo gerade der Querschnitt $3,3 \text{ cm}^2$ vorhanden ist, nach der oben für 5 at gegebenen Rechnung.

Zur Beurteilung von Versuchsergebnissen dient die Bemerkung, daß unsere Düse einen engsten Querschnitt von $f_m = 3,25 \text{ cm}^2$ jedenfalls hat, das ist durch die Aufnahme von $0,45 \text{ m}^3/\text{h}$ Dampfvolmen bewiesen. Daß sie indessen auch einen Endquerschnitt von gerade $F = 5,8 \text{ cm}^2$ habe, ist nur eine Forderung, deren Erfüllung durch den Augenschein nachzuprüfen wäre. Nur bei einer Düse richtigen Endquerschnittes wird am Endquerschnitt von $5,8 \text{ cm}^2$ ein Druck von $1,52 \text{ at}$ sich einstellen und der Dampf glatt aus der Düse in den Raum gleichen Druckes strömen; ist der Endquerschnitt ein anderer, so werden Un-

regelmäßigkeiten am Düsenaustritt auftreten: ist der Endquerschnitt zu klein, so ist der Druck des austretenden Dampfes noch größer als der Gegendruck, der Drucküberschuß bleibt ungenutzt, führt zur Ausbreitung des Strahles und zu Schallschwingungen; ist der Endquerschnitt zu groß, so hätte die Expansion weiter gehen müssen als dem Gegendruck entspricht, die Geschwindigkeit hätte dadurch höher wachsen müssen als dem verfügbaren Druckgefälle entspricht und als dieses hergibt; da das dem Energiesatz widerspräche, so bleibt die Düse vom richtigen Querschnitt an ungenutzt und der Strahl löst sich dort von der Wand ab. — Im allgemeinen dürfte hiernach eine reichliche Länge der Düse weniger schädlich sein als eine knappe, da letztere zu mangelhafter Dampfausnutzung, erstere nur zu vermehrten Reibungsverlusten führt.

Es könnte übrigens schon als widersprechend dem Energiesatz erscheinen, daß in der Düse die Strecke $GH = 90,0$ kcal in kinetische Energie umgesetzt sein soll, während doch nur der Ordinatenunterschied von D gegen G im Betrage von $46,6$ kcal dem Dampf entnommen erscheint. Trotzdem ist — wenn wir von einigen Hundertteilen Reibungsverlust in der Düse in verabredeter Weise absehen — wirklich die Geschwindigkeit von 868 m/s zunächst entstanden; die hohe Lage des Punktes D deutet nur an, daß die Geschwindigkeit nicht weiter als bis zu 90 kcal ausgenutzt worden ist.

Die gesamte Zustandsänderung des Dampfes geht also zunächst in der Düse jedenfalls längs der Senkrechten GH . Weiterhin erst ist der Dampf längs der Linie gleichen Druckes HD in den Zustand D gelangt, indem der Dampf nur einen Teil der Geschwindigkeit an das Laufrad abgab — was seinen thermischen Zustand nicht änderte — während der Rest im Dampf blieb und sich — im Laufrad oder hinterher — in Wirbelung verwandelte und als Wärmezufuhr im Dampf erscheint. Ob übrigens dieser Verlauf meßtechnisch zu beobachten wäre, bleibe dahingestellt; die hohe Dampfgeschwindigkeit würde das Thermometer so beeinflussen, daß es eine höhere Temperatur zeigt als die objektiv vorhandene; vielleicht kann man aber auch von einer objektiv vorhandenen Temperatur bei dem Dampf hoher Geschwindigkeit gar nicht sprechen, weil Temperatur und Geschwindigkeit nach der kinetischen Wärmetheorie wesensgleich sind und deshalb das Thermometer gleich beeinflussen; der Übergang zu Wirbelungen verwandelt nur die geordnete Geschwindigkeit des Dampfstrahles in die ungeordnete der Turbulenz. — Die Dampfnässe in H , das Fehlen derselben in D wäre dagegen ein objektiv zu beobachtender Unterschied zwischen beiden Zuständen. —

Man kann dieselben Ergebnisse auch *rechnerisch ableiten* unter Benutzung der Formeln für den Ausfluß von Dampf.

Es kommt darauf an, ob das Druckverhältnis $p'' : p'$ zu beiden Seiten der Mündung größer oder kleiner als das kritische Druckverhältnis Π_0 ist; dieses hängt vom Exponenten k der Adiabaten ab und kann angenommen werden¹⁾:

$$\begin{array}{l} \text{für Satttdampf } k = 1,135 \text{ ist } \Pi_0 = 0,578, \\ \text{für Heißdampf } k = 1,3 \text{ ist } \Pi_0 = 0,545. \end{array}$$

¹⁾ Schüle, Technische Thermodynamik, I, 3. Aufl., S. 272, Fig. 99.

Für $p'' : p' < II_0$ wird die für bestimmten Anfangsdruck maximale Ausflußmenge G_m unveränderlich, wie weit auch der Gegendruck herabgehen möge; G_m hängt dann nur vom Anfangszustand ab, und es gelten die Näherungsformeln ¹⁾, mit p in at gerechnet:

$$\frac{G_m}{f_m} = 0,72 \cdot \sqrt{\frac{p'}{v'} \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{mm}^2}} \dots \dots \dots (13a)$$

oder

$$\frac{G_m}{f_m} = 0,5 p' + 0,1 \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{mm}^2} \dots \dots \dots (13b)$$

Die beiden Angaben führen auf fast gleiche Werte, wenigstens zwischen 3 und 15 at, dem Gültigkeitsbereich der Formel (13a).

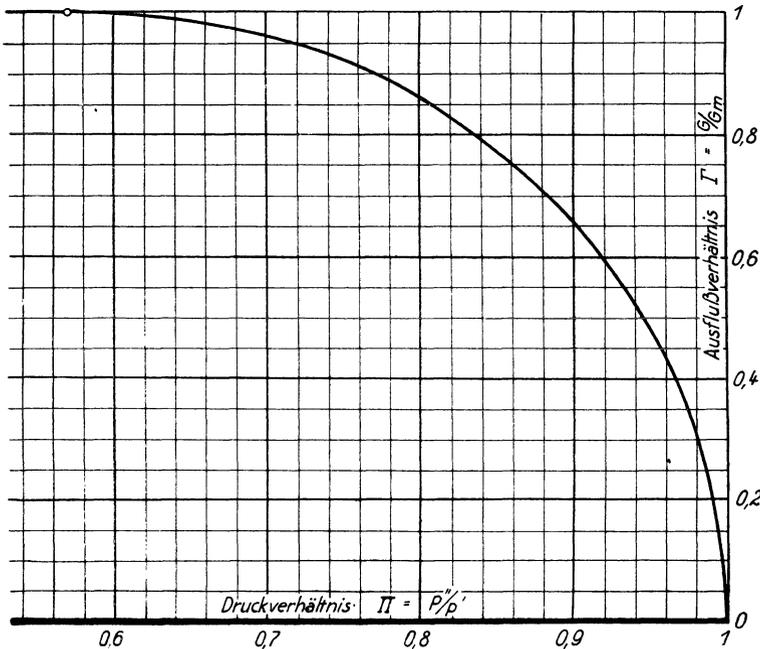


Fig. 75. Druck und Ausflußmenge bei Dampf.

Druckverhältnisse $p'' : p' > II_0$ können durch Sinken des Anfangs- oder durch Steigen des Enddruckes entstehen. Die Ausflußmenge sinkt dann. Sie läßt sich berechnen aus der Formel (p in at):

$$\frac{G}{f_m} = 100 \cdot \sqrt{2g \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p'}{v'} \left[\left(\frac{p''}{p'}\right)^{2/k} - \left(\frac{p''}{p'}\right)^{1+1/k} \right]} \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \dots (14)$$

aus der durch Differenzieren ein Höchstwert bei $\frac{p''}{p'} = II_0$ mit der Ordinate gleichwertig Formel (13a) und (13b) abgeleitet werden kann, bis zu dem die Formel nur gilt.

¹⁾ Hütte, 22. Aufl., I, S. 446; II, S. 219; Schüle, Technische Thermodynamik, 3. Aufl., I, S. 289.

Um die unbequeme Berechnung nach Formel (14) zu umgehen, dividiert man (14) durch (13a); p'/v' fällt heraus, und man kann $G/G_m = I$ abhängig von $p''/p' = II$ zur Darstellung bringen, Fig. 75; wie jede dimensionslose Darstellung (§ 71, 141) hat diese den Vorteil der Verwendbarkeit für jeden Druck, soweit die Formel (13) genügend genau ist.

Nach Fig. 75, in Verbindung mit Formel (13) sind nun die Berechnungen meist ebenso bequem zu machen wie in Fig. 74 nach dem i - s -Diagramm geschehen.

So kann man nachprüfen, *woher es kommt*, daß die in § 58 untersuchte 13stufige Turbine in ihrer Dampfaufnahme gar nicht vom Gegendruck beeinflusst wird, und daß die ersten Stufen den gleichen Druckabfall bei Kondensations- wie bei Auspuffbetrieb behalten, während nur die letzten Stufen die gesamten Druckänderungen ausgleichen. Wir machen die Nachprüfung in Tabelle 25, indem wir — nur für einige Stufen — den gesamten Querschnitt des betreffenden Düsensatzes aus den wirklich beobachteten Drucken und dem für alle Fälle gleichen Dampfgewicht berechnen; führt diese Berechnung für beide Betriebsarten auf den gleichen Querschnitt — der ja beidemal gleich sein muß —, dann ist die Einstellung der Drucke auf die gemessenen Werte erklärt. Wo der Dampf feucht ist, rechnen wir mit Sättigung, deuten aber durch ein Zeichen < an, daß das Dampfvolmen in Wahrheit kleiner ist.

Tabelle 25. Verarbeitung einer bestimmten Dampfmenge (1610 kg/h) in einer Turbine bei verschiedenem Gegendruck.

Stufe Versuch Nr.		1		4		8		13	
		101	105	101	105	101	105	101	105
1	Anfangsdruck p' at	8,98	9,06	3,11	3,21	0,88	1,29	0,19	1,03
2	Enddruck p'' at	5,08	5,18	2,12	2,31	0,53	1,10	0,16	1,03
3	Druckverhältnis p''/p' —	0,565	0,57	0,68	0,72	0,60	0,85	0,84	≈1,00
4	Anfangstemperatur t' °C	197	178	145	138	97	105	58	99
5	Adiabatisches Gefälle Δi_{ad} kcal	25,7	21,5	16,0	14,5	17,8	6,3	5,1	—
6	Spezif. Volumen beim Austritt v'' m ³ /kg	0,37	0,33	0,84	0,78	3,0	1,56	9,6	1,67
7	Dampfgeschw. $w = 91,5 \sqrt{\Delta i_{ad}}$. . . m/s	463	424	366	348	336	230	207	—
8	Endvolumen $D_v = D \cdot v''$ m ³ /h	591	536	1340	1260	<4800	2520	<15500	2700
9	Endquerschnitt $f = \frac{v}{3600} \cdot \frac{1000000}{w}$ mm ²	355	352	1020	1010	<3460	3050	<20800	—

Zunächst ist bei Stufe 1 das Druckverhältnis jedesmal etwa das kritische, $p'' : p' \approx 0,57$; Stufe 1 wird also kaum von dem Gegendruck beeinflusst; die höhere Temperatur im einen Fall ergibt zwar ein größeres Wärmegefälle und größere Geschwindigkeit, aber auch ein größeres Volumen der durchgehenden Dampfmenge; beides gleicht sich so ab, daß sich der Endquerschnitt der Düse aus beiden Versuchen fast gleich berechnet, nämlich zu ≈ 354 mm².

Dieser Ausgleich der Geschwindigkeits- gegen die Volumenwerte ist es überhaupt, worauf es ankommt. In der Stufe 4 ist bei Versuch 105 das Druckverhältnis dem Durchgang bereits merklich ungünstiger, aber

das durchgehende Volumen — bei gleichem Gewicht — ist soviel kleiner, des höheren absoluten Druckes wegen, daß die Rechnung beidemal auf den Düsenquerschnitt von 1010 bzw. 1020 mm² führt.

In Stufe 8 steigt das Druckverhältnis von 0,60 auf 0,85, wenn man zum Auspuff übergeht. Aber das spezifische Volumen sinkt zugleich von 3,0 auf 1,56 m³/kg — Sättigung beidemal angenommen — und der Endquerschnitt berechnet sich beidemal zu etwas über 3000 mm². Immerhin sind diesmal die Zahlen um 14% verschieden — 3460 gegen 3050; man möchte das auf ungenaue Druckmessung zurückführen können; zum Teil wird der Unterschied aber auch dadurch seine Erklärung finden, daß bei Versuch 101, Kondensation, die vorhergehenden Stufen stärker zur Arbeit beigetragen haben, daß also der Dampf nasser, sein Volumen kleiner ist als bei Versuch 105. Wir tragen dem durch Vorsetzen des Zeichens < vor die 4800 Rechnung und können dann das gleiche Zeichen vor die Zahl von 3460 mm² Düsenquerschnitt setzen.

In Stufe 13 endlich ist das Druckverhältnis bei Auspuffbetrieb der 1 unmeßbar nahe, gegen 0,84 bei Kondensation. Bei letzterer war noch 207 m/s Dampfgeschwindigkeit vorhanden und nötig, da 15500 m³/h durch den Querschnitt gehen müssen, der sich zu 20 800 mm² errechnet. Bei Auspuff ist das Dampfvolumen nur 2700 m³/h, und dem entspricht in 20 800 mm² Querschnitt eine Dampfgeschwindigkeit $w = \frac{2700}{3600 \cdot 0,0208} = 36,0$ m/s. Diese mäßige Dampfgeschwindigkeit, im Quadrat wirksam, ergibt einen entsprechend mäßigen Druckabfall; die zugehörige Geschwindigkeitshöhe ist $w^2 : 2g = 66,1 \text{ m} = 66,1 : 427 = 0,155$ kcal/kg. Nach dem *is*-Diagramm kommen in der Gegend des Atmosphärendruckes auf 0,1 at Druckunterschied ein adiabatisches Gefälle von 0,45 kcal/kg; der für die letzte Stufe zu erwartende Druckunterschied ist also

$$p' - p'' = \frac{0,155 \cdot 0,1}{0,45} = 0,034 \text{ at.}$$

Dieser Druckunterschied wäre an sich wohl erkennbar. Immerhin ist es nicht allzu auffallend, daß er der Messung entgangen war, indem beiderseits der Düse der gleiche Druck 1,03 at konstatiert worden war. — Es ist noch zu beachten, daß als v'' in der Rechnung das spezifische Volumen am Ende der adiabatisch gedachten Expansion eingeführt werden muß. Die höhere, in der folgenden Stufe gemessene Temperatur stellt sich erst ein, nachdem die gerichtete Strömung der Düse in Wirbelung aufgelöst ist (vgl. oben, 3 Seiten früher).

Die ganz verschiedene *Verteilung des Druckgefälles* in den beiden Fällen auf die Stufen ist also erklärt. Sie beruht letzten Endes auf der durch Fig. 75 gegebenen Beziehung¹⁾.

Die Düsen mit großem Druckabfall sorgen für konstanten Dampfdurchgang bei allen Druckabfällen, nehmen also jede Änderung des

¹⁾ Forner, Z. d. V. D. I. 1909, S. 674.

gesamten Druckgefälles ohne Änderung des Dampfdurchganges auf. Die Eigenschaft der in § 58 untersuchten Turbine, daß die Dampfnahme unabhängig vom Gegendruck ist, beruht darauf, daß für einen (den ersten) Düsensatz $p'' : p' < II_0$ ist, und daß für die letzten Sätze der schon geringe Druckabfall noch dadurch sehr verkleinert wird, daß das zu bewältigende Volumen wegen des höheren absoluten Druckes abnimmt. —

62. Grenzvakuu einer Dampfturbine. Die geschilderten Verhältnisse erlauben es auch, zu erklären, warum in Fig. 62, § 57 die Kurven der Nutzleistung und des Gütegrades — entsprechend auch die anderen — nicht immer weiter steigen bei besser werdendem Vakuum. Es ergibt sich ein *Grenzvakuu*, unter dessen Wert herunter diese Turbine ein Vakuum nicht ausnutzen kann. Das Grenzvakuu ergibt sich für jede Dampfaufnahme aus der Bedingung, daß im letzten Düsensatz bekannten Querschnittes der Dampf nur eine begrenzte Geschwindigkeit annehmen kann; bei nicht erweiterten Düsen ist die höchst erreichbare Dampfgeschwindigkeit die Schallgeschwindigkeit

$$w_m = \sqrt{g k p v} \text{ m/s} \quad (15)$$

sie tritt ein mit Erreichung des kritischen Druckverhältnisses $p'' : p' = 0,57$ zu beiden Seiten der letzten Stufe. In Formel (15) bedeutet p und v den Dampfzustand im Endquerschnitt der Düse, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ die Erdbeschleunigung, k das Verhältnis der spezifischen Wärmen, für gesättigten Dampf $k = 1,135$, für feuchten vom Dampfgehalt x ist $k = 1,035 + 0,1 x$. Nun ist für den Austritt noch bekannt aus Tabelle 25 und 18 der Austrittsquerschnitt des letzten Düsensatzes $F_{13} \sim 0,0208 \text{ m}^2$, das ausfließende Gewicht $G = 1610 \text{ kg/h} = 0,448 \text{ kg/s}$; für trocken gesättigten Dampf kann man $p v$ annähernd konstant, für sehr niederen Druck $p v \sim 14\,500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = 14\,500 \frac{\text{m} \cdot \text{kg}}{\text{kg}}$ einführen, für nassen Dampf vom Dampfgehalt x ist dann $p v = 14\,500 x$. Dieses alles in (15) eingesetzt gibt für die beim Austritt vorhandene Geschwindigkeit

$$w_m = \sqrt{g \cdot (1,035 + 0,1 x) \cdot 14\,500 x} \quad (16)$$

Der Dampfgehalt x ist nun freilich unbekannt; er wird am Ende der Turbine vielleicht $x = 0,85$ sein; hiermit wird $w_m = 368 \text{ m/s}$. Also ist das austretende Volumen $V_m = F_{13} \cdot w_m = 0,0208 \cdot 368 = 7,65 \text{ m}^3/\text{s}$, und das spezifische Volumen beim Austritt des Dampfes $v = V_m : G = 7,65 : 0,448 = 17,0 \text{ m}^3/\text{kg}$ für Dampf mit $x = 0,85$; Dampf gleichen Druckes in gesättigtem Zustande hätte dann $17,0 : 0,85 = 20,0 \text{ m}^3/\text{kg}$, und dem entspricht ein Druck (Dampftabellen oder *i*s-Diagramm) $p'_3 = 0,075 \text{ at}$.

Dieses ist also der tiefste Gegendruck, den diese Turbine bei dieser Dampfaufnahme noch mit Erfolg verarbeiten kann — wobei allerdings noch zu untersuchen bliebe, ob nicht in einem anderen Düsensatz schon früher die Schallgeschwindigkeit erreicht würde, so daß schon vorher die Ausnutzung abgeschwächt würde. In Fig. 62 dürfen wir daher die Linien der Leistungshergabe und der Wirkungs- und Güte-

grade nicht über den Schnitt mit $p'_3 = 0,075$ at nach links führen; in jener Gegend wenden die Kurven mindestens zur Wagerechten, der Gütegrad vermutlich zu schwachem Abfall. Fig. 62 zeigt jedoch, daß bis dahin die Turbine noch erheblich in der Ausnutzung gesteigert werden könnte: Das Vakuum der Kondensation ist für sie unzureichend.

Wollten wir hieraus den allgemeinen Schluß ziehen, ein Herabgehen des Gegendruckes unter $0,075$ at sei ohne Nutzen für diese Turbine, so wäre das wieder falsch. Solche Behauptung, allgemein aufgestellt, wäre doch wohl für konstante Leistungsentnahme zu verstehen und nicht für konstante Dampfaufnahme. Für konstante Leistungsentnahme aber würde bei Verbesserung des Vakuums die Dampfmenge sich verringern, und daher die Grenze der Verbesserung des Verbrauches nicht sobald erreicht werden. —

Es soll des wesentlichen Umstandes noch gedacht werden, daß die Ermittlungen der letzten Paragraphen nur auf Druck- und Temperaturmessungen beruhen, die sich ohne Betriebsstörung und ohne Kosten machen lassen, sofern die Einrichtungen vorhanden sind, insbesondere die Anbohrungen.

63. Umrechnungen auf vorgeschriebene Bedingungen. Wenn bei Abnahmeversuchen *Abweichungen der Drehzahl* von der ausbedungenen vorkommen, so sind Berichtigungen deshalb allgemein nicht anzubringen; denn bei der Dampfturbine — im Gegensatz zur Kolbendampfmaschine — benutzen wir etwa den Scheitel der Leistungsparabel (§ 4), in dessen Nähe die Drehzahl ohne Einfluß ist. Immerhin sollen sich die Abweichungen in mäßigen Grenzen halten.

Abweichungen des Druckes und der Temperatur des Frischdampfes sowie *Höherwerte des Gegendruckes* gegenüber den Sollwerten sollen in genügend engen Grenzen gehalten werden; sie werden berücksichtigt, indem man den Verbrauch umgekehrt proportional dem verfügbaren Wärmegefälle ansetzt. Ein *Minderwert des Gegendruckes* — besseres Vakuum beim Versuch als ausbedungen — kann ebenso berücksichtigt werden, insoweit als man sicher ist, die Grenze der Ausnutzbarkeit des Vakuums (§ 62) nicht unterschritten zu haben. Sonst hat die bessere Qualität des Vakuums unbeachtet zu bleiben, oder — besser — man verschlechtert beim Versuch das Vakuum durch Lufteinlassen bis auf den Sollwert.

Bei Nachprüfung der erzielbaren Höchstleistung müssen Druck und Gegendruck ihren Sollwert haben, da beide Größen die Höchstleistung äußerst stark beeinflussen; man kann in Fällen, wo die Sollwerte nicht erreichbar sind, so vorgehen, daß man jeden der Werte etwas variiert, die Abhängigkeit graphisch aufträgt, und nun auf den Sollwert extrapoliert.

64. Beispiel eines Versuchsberichtes. Die Dampfturbodynamo (Fabrikat, Nummer) wurde auf Veranlassung von einem Abnahmeversuch unterzogen, um nachzuprüfen, ob dieselbe die vom Lieferer zugesagten Gewährleistungen erfüllte. Diese Gewährleistungen sagten zu:

- a) bei 110 kW elektrischer Leistung und bei 225 Volt Spannung des Gleichstromgenerators einen Dampfverbrauch von 13,5 kg Dampf für die Kilowattstunde, vorausgesetzt einen Frischdampf, am Eintritt in die Turbine gemessen, von 10,5 at Überdruck und 220° C Temperatur, einen Kondensationsdruck, am Auspuff der Turbine gemessen, von 0,12 at absolutem Druck, und eine Drehzahl 3000 in der Minute;
- b) außerdem soll bei Auspuffbetrieb eine Leistung von 60 kW erzielbar sein.

Vor Beginn der Versuche kam man überein, die „Normen für Leistungsversuche an Dampfkesseln und Dampfmaschinen“ von 1899 als maßgebend anzusehen, soweit nicht der Turbinenbetrieb mit überhitztem Dampf eine besondere Beurteilung verlangt.

Nachprüfung der Zusage zu a). Am 1. Februar 1912 wurde ein Versuch durchgeführt, dessen Dauer wegen der Betriebsverhältnisse auf 25 min beschränkt werden mußte. Da die in je 5 min abgewogenen Kondensatmengen (133,6; 132,6; 2 · 132,8; 134,5 kg) befriedigend übereinstimmten, so liegen gegen die Versuchsdauer Bedenken nicht vor.

Die Ablesungsergebnisse im einzelnen sind der Tabelle 17 zu entnehmen. Die Ergebnisse der unmittelbaren Messung und der erforderlichen Berichtigungen sind folgende:

Drehzahl: 2998/min.

Elektrische Leistung: 234 Volt, 483 Amp; Leistung 113,0 kW am Schaltbrett. In der Zuleitung zum Schaltbrett ging 0,1 kW verloren, der Erregerstrom — der der Feldwicklung anderweit zugeführt wurde, Fremderregung — entsprach einschließlich des Verlustes in dem Feldregler 1,4 kW Leistung. Die Klemmenleistung der Dynamo ist also mit $113,0 + 0,1 - 1,4 = 111,7$ kW anzusetzen. Die Abweichung vom ausbedungenen Wert (110 kW) beträgt + 1,55% (zulässig $\pm 7,5\%$ Abweichung).

Dampfdruck: 10,2 at ÜD = 11,2 at abs.

Dampftemperatur: abgelesen im Mittel 215,5° C; Fadenkorrektion + 2,5°; Temperatur 218° C.

Gegendruck: abgelesen 63,7 cm Vakuum; Barometerstand 74,7 cm QuS; Gegendruck 0,15 at abs.

Dampfaufnahme: 1600 kg/h.

Dampfverbrauch: $1600 : 111,7 = 14,3$ kg/kW · h.

Dieser Dampfverbrauch ist bei einem vom Sollzustand abweichenden Zustand der Maschine gemessen worden. Nach dem Mollierschen *i-s*-Diagramm ergibt der verwendete Frischdampf (11,2 at; 218° C) bei der adiabatisch gedachten Expansion bis zu 0,15 at abs ein Wärmegefälle von 164,3 kcal bezogen auf 1 kg Dampf. Der ausbedungene Dampf (11,5 at abs, 220° C) hätte bei der adiabatischen Expansion bis zu 0,12 at abs ein Wärmegefälle von 172,5 kcal zur Verfügung gehabt. Die Abweichung des vorhandenen Druckgefälles vom vorgeschriebenen beträgt also — 4,75%. Auf die vorgeschriebenen Verhältnisse umgerechnet, ist

der gemessene Dampfverbrauch $14,3 \cdot \frac{164,3}{172,5} = 13,66 \text{ kg/kW} \cdot \text{h}$

Der zugesagte Dampfverbrauch ist 13,50 kg/kW · h

Der Mehrverbrauch 0,16 kg/kW · h

macht + 1,2% der Zusage. Mit Rücksicht auf den in den Normen von 1899 zugelassenen Spielraum von + 5% ist die Zusage als erfüllt zu betrachten.

Nachprüfung der Zusage zu b. Es wurde Luft in den Kondensator gelassen, im übrigen aber die Kondensation weiter betrieben und das Kondensat ebenso wie bisher abgepumpt. Die Belastung wurde so lange gesteigert, bis die Drehzahl abzufallen begann — bis die Reglerhülse aufsaß. Von dieser Grenze blieb man dann so weit entfernt, wie es ein sicherer Betrieb verlangt.

In dem so hergestellten Zustand wurde folgendes abgelesen:

Drehzahl: 3000/min.

Elektrische Leistung: 230 Volt, 271 Amp; Leistung 62,4 kW am Schaltbrett = $62,4 + 0,1 - 1,3 = 61,2 \text{ kW}$ an den Klemmen der Turbine, bezogen auf Selbsterregung.

Die verlangte Leistung von 60 kW kann also hergegeben werden.

Ergebnis: Die gemachten Zusagen sind daher als erfüllt zu betrachten.

Besondere Beobachtungen, die gegen die Brauchbarkeit der Dampfturbine zum beabsichtigten Betriebe sprechen, wurden nicht gemacht.

(Ort, Datum, Unterschrift.)

c) Kolbendampfmaschine.

α) Verbrauchsversuche.

65. Beispiel eines Verbrauchsversuches an einer Kolbendampfmaschine. Ein Versuch an einer Dampfdynamo — einem Maschinensatz aus Dampfmaschine und Dynamomaschine, beide direkt miteinander gekuppelt — lieferte das Protokoll Tabelle 26. Die Ablesungsergebnisse sind gleich systematisch zusammengestellt und am Schluß zu einem gewissen Grade verarbeitet. Eine *schematische Darstellung der Versuchsanordnung* gibt Fig. 48 bei § 48: die Dampfmenge wurde also hinter der Maschine gemessen. Die wirkliche *Dampfaufnahme* D der Maschine geht teilweise als Heizdampf (Manteldampf D_m) in die Mäntel des Hoch- und Niederdruckzylinders, zum weitaus größten Teil aber als Arbeitsdampf D_a in den Hochdruckzylinder, weiter durch den Aufnehmer in den Niederdruckzylinder. Im Aufnehmer wird ein kleiner Teil abgeschieden, das bis dahin gebildete Kondensat: Aufnehmerkondensat D' . Nur der Rest $D'' = D_a - D'$, immerhin weitaus das meiste von der Gesamtaufnahme, durchläuft den Niederdruckzylinder und wird hinter ihm niedergeschlagen und zur Messung gebracht.

In dieser Bezeichnungweise ist also die Dampfaufnahme $D = D_a + D_m = D' + D'' + D_m$, und sie wird in Gestalt dieser drei Einzel-

mengen gemessen. Es steht natürlich frei, die Vereinzelung weiter zu treiben, etwa die Mantelkondensate vom Hoch- und Niederdruckzylinder einzeln zu messen, die hier vereinigt wurden.

Die Hauptmessung ist die des Abdampfes D'' , der gegenüber die anderen beiden den Charakter als Korrekturen haben. In Tabelle 26 sind deshalb D' und D_m einfach durch Beobachten während der Versuchszeit (ohne Zwischenablesung) gemessen, bei D'' hingegen muß man sich unbedingt durch Zwischenablesungen der Meßgenauigkeit und des Beharrungszustandes vergewissern.

Das Kondensat D'' wird den Kondensator genügend kalt verlassen; die Mengen D_m und D' dagegen sind meist über 100° warm, dann würde also beim Austritt ins Freie so viel auf Kosten des Wärmeinhaltes des Restes verdampfen, daß der Rest nur noch 100° behält (bei normalem Barometerstand). Man muß, um richtig zu messen, das Kondensat vorher bis unter 100° kühlen (Fig. 48), und dann noch nötigenfalls durch Abdecken der Meßgefäße die Verdunstung einschränken.

Hinsichtlich der *Druckmessungen* ist noch der Druck p' in den Mänteln der Zylinder zu notieren, der durch ein Minderventil meist kleiner gehalten wird als der Kesseldruck, ferner den Aufnehmerdruck p_2 .

Bei kleiner Belastung an Mehrfach-Verbundmaschinen herrscht im Aufnehmer Unterdruck. Selten wird man dann die Ablaufmündung tief genug legen können, damit das *Aufnehmerkondensat* noch abläuft. Dann ist das Einfachste die Ableitung desselben durch ein Rohr zur Abdampfleitung, in der D_a im ganzen gewogen wird. Um Dampfverluste durch diese Leitung zu vermeiden, setzt man an eine senkrechte Stelle derselben ein Wasserstandsglas, fügt ein Ventil hinter dieser Stelle in die Leitung und bedient das Ventil so, daß ein Wasserspiegel im Wasserstand erscheint. Bildet man jene senkrechte Stelle weit, als Gefäß aus, so kann man es kalibrieren und durch Bedienen des Ventiles abwechselnd voll- und leerlaufen lassen; dadurch bringt man das Aufnehmerkondensat noch (für eine Korrektur genügend genau) zur Messung. —

Beispiel. (Versuch 161.) Am Amperemeter wurden im Durchschnitt 495 A abgelesen; da das Instrument nach den Ergebnissen der Eichung eine Korrektur $+ 5$ A hatte, so ist die Stromstärke 500 A; die Spannung wurde zu 228,4 V an dem richtig zeigenden Instrument direkt abgelesen. Aus beiden ergibt sich die elektrisch abgegebene Leistung $\frac{228,4 \cdot 500}{1000} = 114,2$ kW. Der Wirkungsgrad der Dynamomaschine bei dieser Belastung ist $\eta_{\text{dyn}} = 0,885$ bekannt; die von der Dynamomaschine aufgenommene, von der Dampfmaschine abgegebene Leistung ist $114,2 : 0,885 = 129,1$ kW oder $129,1 \cdot 1,36 = 175,6$ PS. — Von einer Berücksichtigung der Verluste in den Zuleitungen zum Schaltbrett (§ 49) wurde abgesehen.

Um den Dampfverbrauch zu finden, wurde die aus dem (Oberflächen-) Kondensator kommende Kondensatmenge 385,1 kg während der Versuchsdauer von 18,0 min aufgefangen; die Gleichmäßigkeit der Zwischen-

abschlüsse (127,8; 129,3; 128,0 kg in je 6 min) zeigte, daß die kurze Versuchsdauer von 18 min bei der großen Gleichmäßigkeit der Belastung genügend, und daß der Beharrungszustand praktisch vorhanden sei. Auf die Stunde bezogen ist die Abdampfmenge $D'' = 385,1 \cdot \frac{60}{18} = 1284 \text{ kg/h}$.

Das aus dem Aufnehmer kommende Kondensat wurde während ebenfalls 18 min aufgefangen, es waren 21,9 kg, also 73,0 kg/h, die vom Hochdruckzylinder aufgenommene Arbeitsdampfmenge ist $1284 + 73,0 = 1357 \text{ kg/h}$. Aus den beiden Zylindermänteln wurden in 18 min 3,4 kg Heizkondensat aufgefangen oder 11,3 kg/h. Die ganze Dampfaufnahme der Maschine ist $1284 + 73,0 + 11,3 = 1368 \text{ kg/h}$; die Heizdampfmenge macht 0,9% der gesamten Dampfaufnahme aus.

Nun läßt sich der auf die Leistungseinheit bezogene Dampfverbrauch in mehrfacher Form berechnen. Für den ganzen Maschinensatz, bestehend aus Dampfmaschine und Dynamo, findet sich der (spezifische) Dampfverbrauch $1368 \text{ kg/h} : 114,2 \text{ kW} = 11,98 \text{ kg/kW} \cdot \text{h}$. Für die Dampfmaschine allein ist der spezifische Dampfverbrauch auf die Nutzleistung N_e der Maschine zu beziehen, er wird $1368 : 129,1 = 10,59 \text{ kg/kW} \cdot \text{h}$ oder $1368 : 175,6 = 7,79 \text{ kg/PSe} \cdot \text{h}$.

Das Frischdampfmanometer zeigte 11,26 at Überdruck. Unter Berücksichtigung der Korrektur — 0,05 at des Instrumentes ergibt sich der Überdruck des Frischdampfes zu 11,21 at; hinzu der Barometerstand 751 mm QuS = 1,02 at wird der absolute Druck 12,23 at; wir runden auf 12,25 at auf. Dabei hat der Dampf 208° Temperatur; letztere fand sich aus der Ablesung 204° und der Fadenkorrektur: Faden ab 100° herausragend, Fadentemperatur 40°; $\text{FK} = \frac{(208 - 100) \cdot (208 - 40)}{6300}$

= 4°; als Ablesung wurde nicht der Mittel-, sondern der Endwert eingesetzt, weil die Maschine noch der Beharrung zustrebte. Da die Sättigungstemperatur zu 12,25 at abs nach den Dampftabellen Tafel II (Hütte, 22. Aufl., I, S. 416) 187,8° C ist, so war der Dampf mäßig überhitzt, nämlich um $208 - 187,8 = 20^\circ$. Der Kondensationsdruck des Dampfes ergibt sich aus der Vakuumablesung 64 cm QuS Unterdruck, bei einem Barometerstand 751 mm QuS, zu $751 - 640 = 111 \text{ mm} = 0,15 \text{ at abs}$ (Techn. Mess. § 24), dem entspricht nach der Dampftabelle eine Kondensationstemperatur 53,7° C. Das in der Maschine ausgenutzte Druckgefälle ist $12,25 - 0,15 = 12,1 \text{ at}$ (nicht: absolut!), das in der Maschine ausgenutzte Temperaturgefälle ist $208 - 53,7 = 154^\circ$.

Der Wärmeinhalt des Dampfes findet sich, wie in § 26 und 49 genauer angegeben, z. B. nach der Formel $i = 594,7 + 0,477 t_1 - \int p_1$ zu $i_1 = 594,7 + 0,477 \cdot 208 - 1,13 \cdot 12,25 = 680,0 \text{ kcal/kg}$. Die 1368 kg stündlicher Dampfaufnahme hatten also einen gesamten Wärmeinhalt $1368 \cdot 680,0 = 930\,000 \text{ kcal/h}$. Zu seiner Erzeugung aus 20° warmem Speisewasser wären $1368 \cdot 660 = 903\,000 \text{ kcal/h}$ nötig gewesen. Ausnutzbar war die Wärme nach Lage der Dinge, das heißt nach der Güte der Kondensationsanlage bis herab zu 53,7° C Temperatur = 53,8 kcal/kg Wärmeinhalt des abfließenden Kondensates; es haben dem Dampf also $680,0 - 53,8 = 626,2 \text{ kcal/kg}$ oder $1368 \cdot 626,2 = 856\,000 \text{ kcal/h}$

Tabelle 26.¹⁾ Protokoll über einen Dampf-
an einer Kolbendampfmaschine mit direkt ge-
Danzig, 5. Januar 1912, 4-22 bis 4-40 nachmittags.

Ab- lesung	+ 30 s			+ 1,5; + 4,5 min		0				
	Umlaufzähler			Elektr. Leistung		Dampfkondensat				
	Stand	Diff.	Diff. /min	E V	J A	Auspuff D''			Aufnehm. D' kg	Mäntel D _m kg
Stand						Diff.	Diff. kg/min			
4-22	5075			229	495	186,2			4,3	4,0
4-28	5770	695	—	229	493	314,0	127,8	—		
		694	—	228	495		129,3	—		
4-34	6464	694	—	228	493	443,3				
4-40	7158	694	—	228	498	571,3			26,2	7,4
18 min	2083 : 18 = 115,7/min			228,4	495 Korr. +5 500	385,1 × 60/18 = 1284 kg/h			21,9 kg 73 kg/h	3,4 kg 11,3 kg/h
				114,2 kW		Arbeitsdampf 1357 kg/h			Gesamte Dampfaufn. 1368 kg/h	
						12,0 kg/kW · h				

im ganzen entzogen werden müssen, und ebensoviel ist ihm bei verlustfreier Rückspeisung wieder zuzuführen, um die gemessene mechanische bzw. elektrische Arbeit zu erzeugen. Diese andererseits hat im Wärme-
maß folgende Werte: es ist (Techn. Mess. S. 203) 1 PS äquivalent
= 632 kcal/h, oder 1 kW = 859 kcal/h. Die erzeugte elektrische Leistung
ist also im Wärme-
maß gleichwertig mit $114,2 \cdot 859 = 98\,000$ kcal/h, der
wirtschaftliche Wirkungsgrad des Maschinensatzes ist $98\,000 : 856\,000$
= 0,115 oder 11,5%. Die erzeugte Nutzleistung der Dampfmaschine ist im
Wärme-
maß $129,1 \cdot 859 = 111\,000$ kcal/h, der wirtschaftliche Wirkungs-
grad der Dampfmaschine allein ist $111\,000 : 856\,000 = 0,130$ oder 13,0%.

66. Originalprotokoll und Versuchsbericht. Das Originalprotokoll
des Dampfverbrauchsversuches wird auf einem sorgfältig vorbereiteten
Schema geführt, das bei gleichen Umständen nach Anweisung von Ta-
belle 26 gemacht werden kann. Über die apparativen Versuchsanord-
nungen ist im vorigen Paragraphen das Nötige gesagt. Für die Art der
Ableseung sei das folgende zur Verwendung nach Bedarf empfohlen.

Bekanntlich (Tech. Mess. § 86) sollen Momentablesungen (*Ablesungen
von Zustandswerten*) gegen Ableseungen an integrierenden Instrumenten
(*Ablesungen von Summen*) um die halbe Ableseungsperiode verschoben
sein, da erstere den Mittelwert darstellen sollen für die Periode, für
die aus letzteren ein Mittelwert erst aus Anfangs- und Endablesung
berechnet wird. Daher sind in Tabelle 26 die Dampfdrucke immer gegen
die Ableseungen des Umlaufzählers und der Kondensatwaage versetzt.

¹⁾ Beim Versuch am besten Bleischrift, da Tintenstift in Nässe verlöscht;
spätere Auswertung durch Tintenschrift unterschieden (§ 27).

verbrauchsversuch Nr. 161.
kuppelter Dynamomaschine.
Barometerstand 751 mm QS = 1,02 at.

+ 3 min				+ 40 s		+ 1,5; + 5,5 min
Dampfdruck				Dampftemperatur		Reglerhub τ
Frishdampf. p_1	Aufnehm. p_2	Abdampf p_3	Mäntel p'	Frishdampf. t_1	N D C t_2	
at	at	cm	at	° C	° C	
11,2	1,15	-64	1,8	202	125	14,5
11,2	1,15	-64	1,7	202	125	14,8
11,35	1,2	-64	1,75	203	126	14,8
				204	124	14,0
11,26 -0,05 Korrekt. = 11,21 at ÜD = 12,23	1,17 +0,02 Korrekt. = 1,19 at ÜD = 2,21	-64 cm Vakuum +75,1 cm BSt = 111 mm abs = 0,15	1,75 at ÜD = 2,8	204° +4° Fad Korrr. = 208°	125°	14,6 mm Hub
	at abs		at abs			

Es ist nicht nötig, daß alle Ablesungen gleich oft erfolgen. Jede Ablesung kann um so seltener geschehen, je weniger die Größe sich ändert und zu Änderungen neigt. Deshalb sind in Tabelle 26 die elektrischen Instrumente und der Reglerhub doppelt so oft abgelesen worden wie der Druck und die Temperatur des Dampfes. Die Ablesung der elektrischen Größen erfolgt dann offenbar am besten nach $\frac{1}{4}$ und $\frac{3}{4}$ der Ablesungsperiode (die im Beispiel 6 min ist).

Durch diese Maßnahmen ergibt sich auch gleich eine zeitliche Verteilung der Ablesungen so, daß ein Beobachter sie nacheinander vornehmen kann. Soweit hiernach Momentanablesungen doch noch gleichzeitig zu machen sind (Volt- und Amperemeter, Reglerhub), werden sie möglichst schnell hintereinander gemacht; das genügt, da bei befriedigendem Beharrungszustand die Instrumente kaum schwanken. Wo aber zwei integrierende Instrumente, deren Angaben ja stetig fortschreiten, eigentlich gleichzeitig abzulesen wären (z. B. Umlaufzähler und Kondensatwage), da kann man sich helfen, indem man beide Ablesungen um 15 oder 30 s gegeneinander verschiebt, dann aber je pünktlich zur Sekunde abliest. So kann es selbst ein einzelner Beobachter, der keine oder doch keine verlässlichen Hilfskräfte zur Hand hat, dahin bringen, daß er alle oder doch die maßgebenden Ablesungen selbst macht; bei großer Entfernung zwischen den Ablesungsstellen werden die Ablesungsperioden natürlich groß, der Versuch muß dann länger dauern. Doch sieht man an den Zahlen der Tabelle 26, daß man unter günstigen Verhältnissen die Versuchsdauer recht kurz wählen kann und schon gleichmäßige Differenzen bekommt. — Die Zeitpunkte, zu denen die einzelnen Ablesungen gemacht werden sollen,

sind in der obersten Zeile des Protokollkopfes neben dem Stichwort „Ablesung“ vermerkt; so wurde der Umlaufzähler um $4^h 22^m 30^s$ und wieder um $4^h 28^m 30^s$ abgelesen, die elektrischen Instrumente um $4^h 23^m 30^s$ und wieder um $4^h 26^m 30^s$.

Unter den Stichworten Umlaufzähler und Auspuffdampf findet sich eine dritte, im Protokoll Tabelle 26 nicht benutzte Spalte. Sie wird bei der Ablesung integrierender Instrumente zweckmäßig vorgesehen zu folgendem Zweck: Allgemein will man aus der Gleichmäßigkeit der Differenzen für gleiche Zeiträume auf die Genauigkeit der Messung und auf die Güte des Beharrungszustandes schließen. Nun kommt es aber vor, daß man durch Unachtsamkeit, oder weil gerade irgendeine Störung zu beseitigen ist, den richtigen Zeitpunkt der Ablesung versäumt und nun eine Ablesung $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ oder 1 min zu spät macht. Die Zeitdifferenz vor der verschobenen Ablesung wird dann zu groß, die danach wird zu klein; ob die Umlaufdifferenzen stimmen, ist dann nur durch die Bezugnahme auf die normale Ablesungszeit zu erkennen. Da in Tabelle 26 eine solche Unregelmäßigkeit nicht vorkam, so wurden auch die schon vorbereiteten Spalten nicht benutzt. Vergleiche indessen die entsprechenden Spalten in Tabelle 17 und 46. — Wo mehrere Beobachter die Ablesungen der integrierenden Instrumente nicht direkt nach der Uhr, sondern auf ein Signal (Pfeife, Glocke) hin machen, zeigen sich auch wohl Differenzen in der Drehzahl und der Dampfmenge immer übereinstimmend zu groß oder zu klein. Dann darf man folgern, die Signale werden nicht genau gegeben, und erkennt den rein meßtechnischen Charakter des Fehlers, der durch Achtsamkeit und Übung, die in den einfachsten Handhabungen sichtlich sehr viel macht, zu beseitigen ist. Wenn nämlich der Fehler in der Maschine läge, so müßte dem höheren Dampfverbrauch eine höhere Leistung oder ein niedrigerer Dampfdruck zugeordnet sein (§ 67, 72), was dann auffiele; in jedem Fall müßte überdies dem höheren Dampfverbrauch ein Sinken des Reglers und daher niedrigere Drehzahl entsprechen (§ 70). — Man muß sich bei Unregelmäßigkeiten stets zunächst vergewissern, ob sie im Betriebe oder ob nur in der Meßmethode ihre Ursache haben. —

Wenn den Auftraggeber die Einzelablesungen des Versuchsprotokolls nicht interessieren, dagegen aber der Vergleich mit den Garantiezahlen für ihn wesentlich ist, so erhält er einen Versuchsbericht etwa nach dem Wortlaut von Tabelle 27.

67. Versuchsreihe mit veränderlicher Belastung. Zu Studienzwecken, oder um Unterlagen für Angebote bei irgendeiner Belastung zu gewinnen, verändert man die Belastung planmäßig und ermittelt für jede der Belastungen den Dampfverbrauch. Das gleiche wird bei Abnahmeversuchen nötig, wenn außer dem Verbrauch bei normaler Last noch Zahlen für Teilbelastungen und vielleicht auch für Überlastung festgelegt und nachzuprüfen sind.

Bei solcher Versuchsreihe wird jeder Versuch so ausgeführt wie der eben als Beispiel gegebene. Nach Beendigung eines Versuches wird die nächste gewünschte Belastung hergestellt, indem durch Verände-

Tabelle 27. Bericht über einen Dampfverbrauchsversuch,
ausgeführt an der Längsverbundmaschine Fabriknummer X der Görlitzer Maschinenbau-Anstalt und Eisengießerei am 5. Januar 1912, behufs Nachprüfung einer Gewährleistung.

Durchmesser des Hochdruckzylinders	300 mm,
der Kolbenstange KS	90 mm,
Durchmesser des Niederdruckzylinders	480 mm,
der Kolbenstange DS	90 mm, KS 80 mm,
Gemeinsamer Hub	700 mm.

Der HDC hat zwangläufige Ventilsteuerung, der NDC hat Freifall-Ventilsteuerung.

Da die Zwischenablesungen eine sehr gute Übereinstimmung zeigten, andererseits längere Aufrechterhaltung der während der Versuchsdauer sehr gleichmäßigen Belastung wegen der Rücksicht auf den Nutzbetrieb untunlich war, so wurde die Versuchsdauer auf 18 min beschränkt; Zwischenwägungen ergaben durch die Übereinstimmung der Differenzen, daß die Messung befriedigend genau und der Beharrungszustand befriedigend erreicht war; die Messung der Dampfmenge erfolgte durch Abwägen des Kondensates. Es wurde gemessen:

Kondensat aus dem NDC	. . . . .	385,1 kg in 18,0 min = 1284 kg/h
Kondensat aus dem Aufnehmer	. . . . .	21,9 kg in 18,0 min = 73,0 „
Zusammen Arbeitsdampf	. . . . .	1357 kg/h
Kondensat aus den Zylindermänteln		
(Heizdampf)	. . . . .	3,4 kg in 18,0 min = 11,3 kg/h
Gesamte Dampfaufnahme	. . . . .	1368 kg/h

Der Dampf hatte im Mittel 11,21 at Überdruck = 12,25 at absoluten Druck und 208° C Temperatur; das Vakuum, gemessen unmittelbar am Auspuffstutzen, betrug 64 cm QuS; der Barometerstand war 751 mm QuS; der absolute Druck am Abdampfstutzen war demnach 0,15 at.

Die Belastung der Dampfmaschine erfolgte, indem die mit ihr gekuppelte Dynamomaschine auf einen Wasserwiderstand arbeitete; sie konnte sehr gleichmäßig gehalten werden und betrug im Mittel $500 \text{ A} \times 228,4 \text{ V} = 114,2 \text{ kW}$. Der Wirkungsgrad der Dynamomaschine bei dieser Belastung wird von den Siemens-Schuckert-Werken zu 88,5% angegeben. Die Belastung der Dampfmaschine betrug also 129,1 kW oder 175,6 PS. — Die Drehzahl des Maschinensatzes war 115,7 in der Minute.

Der Dampfverbrauch der Dampfmaschine bei der Belastung von 175,6 PS ist also $1368 : 175,6 = 7,79 \text{ kg}$, bezogen auf die nützliche (effektive) Pferdekraftstunde.

Die Gewährleistung sagte bei 180 PS Belastung, 11,5 at Druck, 225° Temperatur, 80% Vakuum einen Dampfverbrauch von 7,6 kg zu, bezogen auf die nützliche Pferdekraftstunde. Die (minutliche) Drehzahl der Maschine war zu 115 angegeben worden. Diese Gewährleistung war auf Grund der Normen des Vereins Deutscher Ingenieure von 1899 nachzuprüfen.

Die Voraussetzungen der Gewährleistung sind befriedigend innegehalten worden, insbesondere wich die Belastung nicht mehr als +7,5% von der vorausgesetzten ab. Die ermittelte Zahl des Dampfverbrauchs (7,79) ist 2,5% ungünstiger als die zugesagte (7,6), das ist weniger als 5%. Der Mehrverbrauch würde sich überdies durch Umrechnung auf den vorausgesetzten Zustand des Frischdampfes etwas verringern.

Die Gewährleistung ist demnach als erfüllt zu betrachten.

Ort, Tag, Unterschrift.

rung der äußeren Leitfähigkeit die Stromstärke auf den richtigen Wert gebracht wird; die Spannung behält ihren Wert oder wird durch Bedienen des Feldreglers wieder auf ihn gebracht. Nachdem die Be-

lastung lange genug gehalten worden ist, um genügenden Beharrungszustand zu erzielen, beginnt der neue Versuch. Ganz entsprechend wird verfahren bei einer mechanischen Bremsung.

Jeder der Versuche wird ausgewertet wie das Beispiel in § 65; das Ergebnis einer ganzen solchen Reihe zeigt Tabelle 28 sowie Fig. 76 und 78.

Mit steigender Leistung steigt naturgemäß die Menge aufgenommenen Dampfes, und zwar im Grunde linear, jedoch mit einer leichten Krümmung aufwärts. Nach dem Zusammenhang, der in § 5 besprochen ist, folgt daraus für den (spezifischen) Dampfverbrauch D/N_{el} der

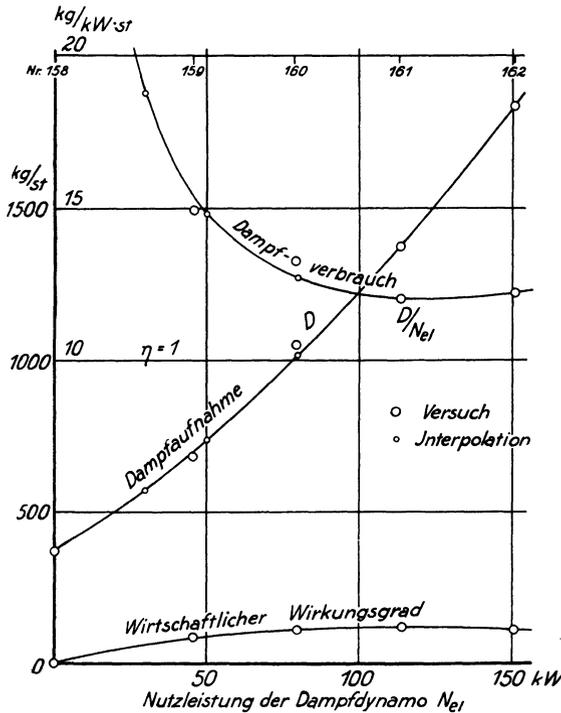


Fig. 76. Dampfmaschine bei wechselnder Leistung. Kondensationsbetrieb.

hyperbolisch abnehmende Verlauf, für den wirtschaftlichen Wirkungsgrad der hyperbolisch zunehmende Verlauf, den Fig. 76 und 78 erkennen läßt.

Der Zustand des Frischdampfes, das heißt also sein Druck und seine Temperatur, sowie der Gegendruck, im ganzen also das verwendete Wärmegefälle (§ 57) sollten bei allen Versuchen der Reihe die gleichen sein. Das sind sie auch grundsätzlich. Wenn genau gesprochen der Dampfdruck mit steigender Last etwas fällt, so hat das (§ 38) seinen Grund in dem mit zunehmender Dampfgeschwindigkeit wachsenden Druckverlust der Rohrleitung; daß die Dampftemperatur mit der Belastung ansteigt, ist eine Eigenschaft des Kessels (§ 30), die noch dadurch verstärkt wird, daß der Temperaturverlust in der Dampfleitung bei zunehmender Dampfmenge abnimmt (§ 38), weil, kurz gesprochen, bei größerer Dampfgeschwindigkeit der Dampf weniger Zeit zur Abkühlung hat. Der Kondensatordruck nimmt mit der Belastung etwas zu, das Vakuum ab; beim Kondensieren der größeren Dampfmenge läuft nämlich der Kondensator wärmer, mit der Kondensationstemperatur aber steigt der Kondensationsdruck nach der Spannungs-kurve. Allen diesen spontan eintretenden und daher normalen Änderungen könnte man entgegenarbeiten z. B. durch Regeln des Kesseldruckes,

das ist aber nicht nötig, weil es sich eben um normale Erscheinungen an der nicht künstlich beeinflussten Maschine handelt.

Die Drehzahl wird grundsätzlich vom Regler konstant gehalten; daß sie mit steigender Leistung etwas abnimmt, ist eine bei allen auf gleiche Drehzahl geregelten Maschinen zu findende Erscheinung, die in den Eigenschaften des Reglers ihre Ursache hat (§ 157).

Auch die elektrische Spannung würde mit zunehmender Stromentnahme abgenommen haben, wenn man dem nicht durch verstärkte Erregung entgegengewirkt hätte; ohne dies wäre die elektromotorische Kraft infolge der Drehzahlverminderung zurückgegangen, und die Klemmenspannung wäre wegen des größeren Spannungsabfalles im Anker noch weiter zurückgegangen; durch Bedienen des Feldreglers sind diese Wirkungen nicht nur ausgeglichen, sondern sogar ins Gegen-

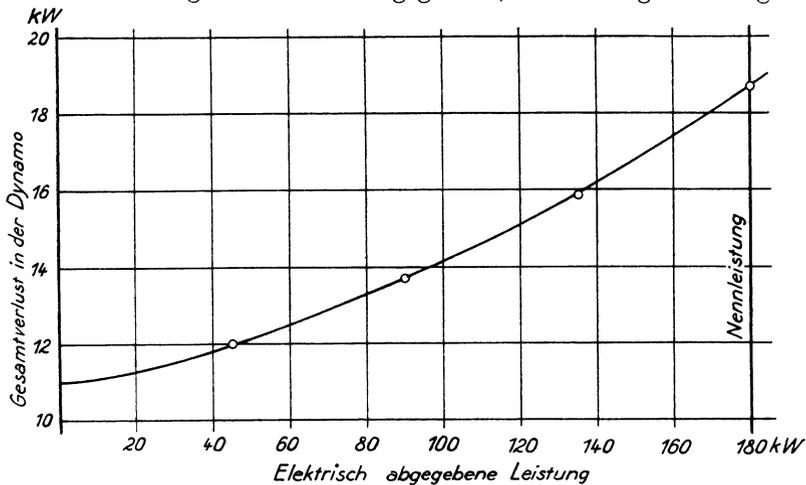


Fig. 77. Verluste in einer Dynamomaschine.

teil verwandelt, um einen entfernteren Verbrauchspunkt trotz wachsenden Spannungsabfalles der Leitung auf konstanter Spannung zu halten.

Zu erwähnen ist noch, wie man den Wert der Dampfmaschinen-Nutzleistung N_e insbesondere für $N_{el} = 0$ ermittelt. Die Verluste der Dynamomaschine werden meist in Form einer Wirkungsgradkurve von der Erbauerin angegeben, oft auch in Form einer kurzen Tabelle, etwa wie folgt:

	Vollast (180 kW)	$\frac{3}{4}$ Last	$\frac{1}{2}$ Last	$\frac{1}{4}$ Last
Wirkungsgrad η_{dyn}	0,905	0,895	0,87	0,79

Für Leerlauf kann man eine Angabe nicht machen, oder vielmehr, dabei ist stets $\eta = 0$, und die Antriebsleistung der Dynamo, die Nutzleistung

der Dampfmaschine wird $N_e = \frac{N_{el}}{\eta_{dyn}} = \frac{0}{0}$, also unbestimmt. Außerdem

kann man schwerlich gerade die angegebenen Punkte gebrauchen, weil die wirklich verwendeten Belastungen nicht glatte Bruchteile der Vollast sind. Man berechnet deshalb zweckmäßig den Verlust

Tabelle 28. Dampfverbrauch und wirtschaftlicher Wirkungsgrad einer Dampf-dynamo. Kondensationsbetrieb.

Versuch Nr.		158	159	160	161	162
1	Drehzahl n /min	120,8	119,8	118,0	115,7	113,5
2	Stromstärke J A	0	203,5	350	500	653
3	Spannung E V	224	224,5	226,5	228,4	230,5
4	Elektr. Leistung $N_{el} = \frac{E \cdot J}{1000}$. . kW	0	45,7	79,2	114,2	150,5
Dampfaufnahme:						
5	Arbeitsdampf aus NDC . . . kg/h	318	648	936	1284	1744
6	Arbeitsdampf aus Afn D' . . „	19	23	74	73	48
7	Zusammen D_a „	337	671	1010	1357	1792
8	Manteldampf D_m „	28	13	40	11	45
9	Insgesamt $D = D_a + D_m$. . „	365	684	1050	1368	1837
10	Dampfverbrauch der Dampf-dynamo $\varepsilon = D/N_{el}$. . kg/kW·h	∞	14,95	13,25	12,0	12,2
11	Verlust \mathfrak{S} in der Dynamo . . . kW	11,0	12,0	13,2	14,9	16,9
12	Nutzleistung der Dampfmaschine $N_e = N_{el} + \mathfrak{S}$ „	11,0	57,7	92,4	129,1	167,4
13	Dampfverbrauch der Dampfmaschine $\varepsilon' = D/N_e$. . kg/kW·h	33,2	11,85	10,9	10,6	10,95
14	Frischdampfdruck p_1 at abs	12,65	12,35	12,2	12,25	12,1
15	Aufnehmerdruck p_2 „	0,54	0,94	1,43	2,21	3,4
16	Kondensationsdruck p_3 „	0,07	0,11	0,12	0,15	0,19
17	Manteldampfdruck p' „	2,8	2,8	2,7	2,8	2,8
18	Frischdampf-temperatur t_1 °C	191	192	198	208	236
19	Wärmeinhalt des Frischdampfes i_1 nach Formel kcal/kg	670	670	674	680	696
20	Flüssigkeitswärme q_3 entsprechend p_3 „ Wirtschaftlicher Wirkungsgrad:	38,6	47,5	49,3	53,8	58,6
21	d. Maschinensatzes $\eta_w = \frac{859 \cdot N_{el}}{D \cdot (i_1 - t_3)}$ —	0	0,092	0,104	0,115	0,111
22	d. Dampfmaschine $\eta_w = \frac{859 \cdot N_e}{D \cdot (i_1 - t_3)}$ —	0,042	0,116	0,121	0,130	0,123

$\mathfrak{S} = N_e - N_{el} = \frac{N_{el}}{\eta_{dyn}} - N_{el}$; dieser wird nämlich auch für $N_{el} = 0$ von Null verschieden, etwa \mathfrak{S}_0 , und dann ist für Leerlauf, jedoch bei voller Erregung auf Betriebsspannung, $N_e = V_0$. Der Leerlaufverlust \mathfrak{S}_0 aber ergibt sich graphisch. Man berechnet also

	Vollast (180 kW)	$\frac{3}{4}$ Last	$\frac{1}{2}$ Last	$\frac{1}{4}$ Last
Belastung N_{el} . . .	180	135	90	45 kW
Dynamoverluste \mathfrak{S} .	18,7	15,9	13,7	12,0 „

Das ergibt die Kurve Fig. 77, und aus ihr folgt der Verlust für jede beliebige Belastung durch Interpolieren, auch $\mathfrak{S}_0 = 11,0$ kW. Zum Auftragen der Kurve dient noch, daß sie wagerecht an die Ordinatenachse anlaufen muß. — Während es sich sonst immer sehr empfiehlt, alle Skalen graphischer Darstellungen von Null beginnen zu lassen, um Verzerrungen zu vermeiden, kann für solche Interpolationskurven, um großen Maßstab zu bekommen, die Verwendung nur gerade des nötigen

Bereichs zweckmäßig sein. — In Tabelle 28 ist immer gleich mit Verlusten V , entnommen aus Fig. 77, gerechnet.

Der Versuch bei Leerlauf, $N_{el} = 0$, sollte als charakteristischer Fall tunlichst immer vorgenommen werden. Der wirtschaftliche Wirkungsgrad des Maschinensatzes wird dabei Null, der Dampfverbrauch, auf die elektrische Leistung bezogen, unendlich (asymptotische Annäherung).

In den Schaubildern fallen die Versuchspunkte (große Kreise) etwas aus der Reihe; trotzdem kann man befriedigend genau eine wahrscheinliche Kurve der Dampfaufnahme auffinden. Hinsichtlich der Verbrauchskurve hingegen fühlt man sich leicht unsicher, teils wegen des

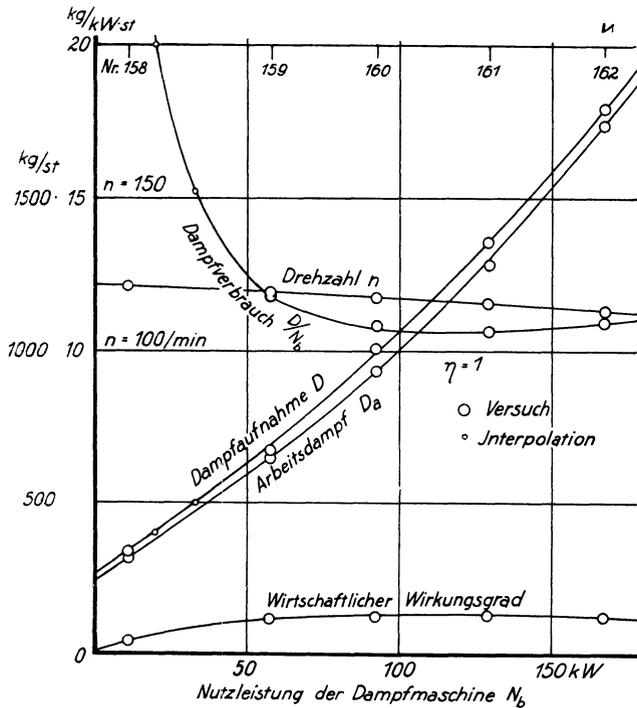


Fig. 78. Dampfmaschine bei wechselnder Leistung, Kondensationsbetrieb.

hyperbolisch gekrümmten Charakters derselben, teils auch weil der Leerlaufversuch fortfällt und nur die Asymptote gibt. Man macht das Auftragen der Verbrauchskurven viel sicherer, indem man einige Werte der Aufnahmekurve interpolierend festlegt und die zugehörigen Verbrauchswerte berechnet (kleine Kreise; in Fig. 76 ergibt sich aus $N_{el} = 50$ kW, $D = 740$ kg/h der Verbrauch $D/N_{el} = 14,8$ kg/kW·h). In dieser Weise gelangt man in Fig. 76 zu der ausgezogenen Verbrauchskurve, die der Aufnahmekurve richtig zugeordnet ist; ohne diese Maßregel hätte man durch die Versuchspunkte eher eine Verbrauchskurve gelegt, die mit der Aufnahmekurve überhaupt nicht verträglich ist. — Dieses Verfahren ist natürlich allgemeiner verwendbar;

Tabelle 29. Dampfverbrauch einer Dampfmaschine im Auspuffbetrieb. BSt. 740 mm = 1,01 at.

Versuch Nr.		164	165	166	167
1	Drehzahl n /min	119,7	118,3	115,9	113,5
2	Elektr. Leistung $N_{el} = \frac{E \cdot J}{1000}$. . kW	0	33,9	67,8	117,4
Dampfaufnahme:					
3	Arbeitsdampf aus NDC . . . kg/h	604	853	1152	1716
4	Arbeitsdampf aus Afn. D' . . . „	24	44	45	10
5	Zusammen D_a „	628	897	1197	1726
6	Manteldampf D_m „	16	18	16	12
7	Insgesamt $D = D_a + D_m$. . . „	644	915	1213	1738
8	Dampfverbrauch der Dampfmaschine $\varepsilon = D/N_{el}$. . kg/kW·h	∞	27,0	17,9	14,8
9	Frischdampfdruck p_1 at abs	12,2	12,25	12,2	12,1
10	Aufnehmerdruck p_2 „	2,06	2,88	4,06	6,5
11	Kondensationsdruck p_3 „	1,01	1,01	1,01	1,01
12	Frischdampftemperatur t_1 . . . °C	189	189	197	216
13	Wärmeinhalt des Frischdampfes i_1 nach Formel . kcal/kg	<668,3	<668,3	673,8	684,9
14	Flüssigkeitswärme q_3 entsprechend p_3 °C	99,9	99,9	99,9	99,9
15	Wirtschaftl. Wirkungsgrad des Maschinensatzes $\eta_w = \frac{859 \cdot N_{el}}{D \cdot (i_1 - q_3)}$ —	0	>0,0560	0,0836	0,0993

man sollte beim Verwerten mehrerer einander in dieser Weise zugeordneter Punktreihen stets darauf acht geben, daß auch die Kurven einander zugeordnet bleiben.

Übrigens erkennt man noch aus den Kurven der Fig. 78, daß das Streuen der Kurven ganz überwiegend in der ungenauen Bestimmung der Manteldampfmengen begründet ist. Der Aufnehmerdampf dagegen geht durchaus gesetzmäßig: er nimmt zunächst mit der gesamten Dampfmenge zu, späterhin wegen der steigenden Dampftemperatur nimmt er ab.

Endlich sei noch bemerkt, daß man beim Zusammenstellen der Schaubilder insofern sachlich vorgehen sollte, als man nur Größen als abhängig voneinander aufträgt, die — vorbehaltlich sekundärer anderer Einflüsse — in erster Linie voneinander abhängen. Fig. 76 und 78 wurden deshalb zu zwei Schaubildern auseinander gezogen, weil es unsachlich gewesen wäre, D/N_{el} über N_b oder den wirtschaftlichen Wirkungsgrad der Dampfmaschine über N_{el} aufzutragen, weil diese Größenpaare nur durch die Dynamomaschine hindurch in Beziehung zueinander gesetzt sind.

68. Versuchsreihe mit Auspuffbetrieb. Der Dampf wird zwar in einen Kondensator geführt und behufs Messung durch Kühlwirkung des Wassers niedergeschlagen, aber der Kondensator bleibt belüftet, und dadurch wird die Bildung von Vakuum vermieden. Der Dampf geht dann aus dem Niederdruckzylinder zwar nicht in die Atmosphäre,

aber doch in einen Raum atmosphärischen Druckes: die Maschine arbeitet im Auspuffbetrieb.

Die Messungen und die Auswertung des einzelnen Versuches sind genau wie bei Kondensationsbetrieb, § 67. Nur die Messung des Kondensatordruckes entfällt, der Gegendruck ist einfach gleich dem Barometerstand; bei längerer Auspuffleitung allerdings bildet sich der Widerstand der Rohrleitung zu einem Gegendruck aus, den man zugunsten der Maschine feststellen sollte durch Anbringen eines Quecksilbermanometers am Abdampfstutzen der Maschine.

Die Ergebnisse einer Versuchsreihe mit wechselnder Belastung zeigt Tabelle 29 und später Fig. 82. Die Ergebnisse sind durchaus analog denen bei Kondensationsbetrieb.

69. Indizierte Leistung, Verbrauch, mechanischer und thermischer Wirkungsgrad. Bei den Versuchsreihen der Tabellen 28 und 29 waren Diagramme mit dem Indikator am Hoch- und Niederdruckzylinder aufgenommen worden. Eine Auswahl derselben, den Deckseiten entstammend, ist in Fig. 79 und 80 abgebildet. Man sieht, wie die Fläche der Diagramme mit steigender Leistung zunimmt; um das deutlich in die Erscheinung treten zu lassen, sind bei allen Versuchen die gleichen Federn verwendet worden; zur Erreichung größtmöglicher Genauigkeit wäre Wechseln der Feder von Versuch zu Versuch besser gewesen.

Über die Gestalt der Diagramme, die bei Auspuffbetrieb trotz Verstellung der Steuerung unvorteilhafte Schleifenbildung zeigen, wird später gesprochen werden. Zunächst dienen sie rein meßtechnisch zur Bestimmung der tatsächlich vom Dampf auf die Kolben übertragenen Arbeit oder Leistung.

Die eigentliche Auswertung der Indikator diagramme ist in Techn. Mess. § 85 besprochen. Die weitere *Versuchsauswertung* zu zeigen, wird das Beispiel des § 65, betreffend Versuch 161, elektrische Belastung 114,2 kW, fortgeführt.

Für diesen Versuch war am Hochdruckzylinder eine indizierte Leistung von 88,5 kW, am Niederdruckzylinder waren 65,9 kW ermittelt worden. Die indizierte Leistung der Maschine ist dann 154,4 kW. An der Gesamtleistung hat der Hochdruckzylinder $88,5 : 154,4 = 0,573$ oder 57,3% Anteil; der Niederdruckzylinder liefert 42,7%. Im ganzen Maschinensatz sind dann $154,4 - 114,2 = 40,2$ kW Leistungsverlust eingetreten; davon kommen $154,4 - 129,1 = 25,3$ kW auf die Kraftmaschine, da nach Tabelle 28 die Nutzleistung derselben 129,1 kW beträgt. Der mechanische Wirkungsgrad der Dampfmaschine ist $\eta_m = 129,1 : 154,4 = 0,835$ oder 83,5%.

Der (spezifische) Dampfverbrauch der Maschine, auf die indizierte Leistung bezogen, ist $1368 : 154,4 = 8,86$ kg/kW · h. Der Wärmewert der indizierten Leistung ist $154,4 \cdot 859 = 132\,600$ kcal/h, die Erzeugungswärme der 1368 kg/h Dampf aus Speisewasser von der dem Gegendruck entsprechenden Temperatur $53,7^\circ$ ist $1368 \cdot (680 - 53,8) = 856\,000$ kcal/h. Der thermische Wirkungsgrad der Maschine ist also $132\,600 : 856\,000 = 0,155$.

Tabelle 30 und Fig. 81 bis 83 geben die Resultate zweier Versuchs-

Tabelle 30. Dampfverbrauch und indizierte
 Maschinenabmessungen: Hub 700 mm; Zyl.-Dm. des HDC 300 mm,
 KSt.-Dm. des HDC $\left\{ \begin{array}{l} \text{KS } 90 \text{ mm,} \\ \text{DS } 0 \text{ mm,} \end{array} \right.$
 Zylinderkonstante HDC : $c_1 = 0,074 + 0,081 = 0.155$

Versuch Nr.		Reihe a, Kondensationsbetrieb		
		158	159	
1	Drehzahl n	} Tab. 28 und 29 $\left\{ \begin{array}{l} \text{/min} \\ \text{kg/h} \\ \text{kW} \\ \text{,,} \end{array} \right.$	120,8	119,8
2	Dampfaufnahme D		365	684
3	Elektrische Leistung $N_{e,l}$		0	45,7
4	Nutzleistung der Dampfmaschine N_e		11,0	57,7
5	Indizierter Druck HDC p_{iH}	} Mittel beider Seiten $\left\{ \begin{array}{l} \text{at} \\ \text{at} \\ \text{kW} \\ \text{,,} \end{array} \right.$	1,065	2,88
6	„ „ NDC p_{iN}		0,238	0,558
7	Indizierte Leistung HDC N_H		19,8	53,3
8	„ „ NDC N_N	} Summe beider Seiten $\left\{ \begin{array}{l} \text{,,} \\ \text{,,} \end{array} \right.$	11,6	26,8
9	Zusammen N_i		31,4	80,1
10	Mechanischer Wirkungsgrad $\eta_m = N_e/N_i$	—	0,350	0,721
11	Leistungsverlust in der Dampfmaschine $\mathfrak{B}_N = N_i - N_e$ kW	20,4	22,4	
12	Verlust an Drehmoment in d. Dampfmaschine $\mathfrak{B}_M = 973 \cdot \frac{\mathfrak{B}_N}{n}$. mkg	164	182	
13	Dampfverbrauch $\varepsilon'' = D/N_i$ kg/kW·h	11,6	8,53	
14	Thermischer Wirkungsgrad $\eta_t = \frac{859 \cdot N_i}{D \cdot (i_1 - q_3)}$	0,117	0,162	
15	Reglerstand über Tiefstellung r mm	55	42	
16	Füllung des HDC φ_H	< 0	0,04	

reihen unter Feststellung auch der indizierten Leistung. Es handelt sich um dieselben Reihen wie in Tabelle 28 und 29, und einige Zahlen sind deshalb in Tabelle 30 fortgelassen oder kurz übernommen.

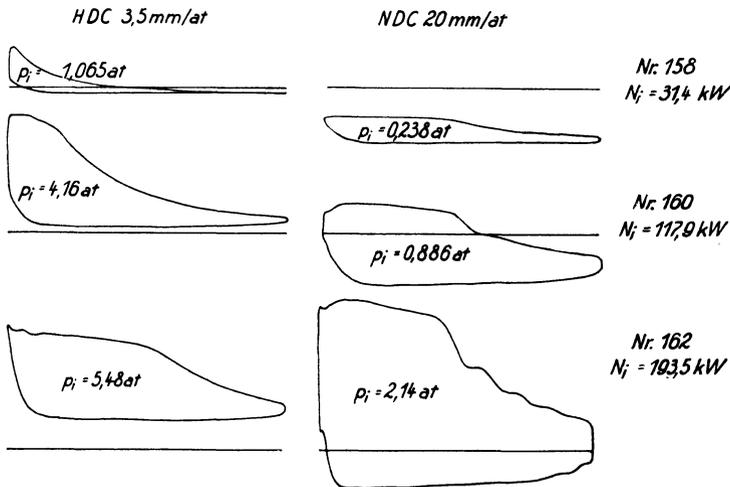


Fig. 79. Diagramme der Dampfmaschine in Kondensationsbetrieb. $\frac{2}{3}$ nat. Gr

Leistung einer Dampfmaschine.

des NDC 480 mm
 des NDC { KS 80 mm } Zyl.-Verh. 1 : 2,59.
 des NDC { DS 90 mm }

$$\text{NDC} : c_2 = 0,201 + 0,200 = 0,401 \frac{\text{kW} \cdot \text{min}}{\text{at} \cdot \text{Uml}} .$$

sationsbetrieb			Reihe b, Auspuffbetrieb			
160	161	162	164	165	166	167
118,0	115,7	113,5	119,7	118,3	115,9	113,5
1050	1368	1837	644	915	1213	1738
79,2	114,2	150,5	0	33,9	67,8	117,4
92,4	129,1	167,3	11,0	45,5	80,6	132,4
4,16	4,95	5,48	1,52	2,25	2,66	2,49
0,886	1,42	2,14	0,124	0,542	1,19	2,42
75,9	88,5	96,1	28,1	41,1	47,6	43,6
42,0	65,9	97,4	6,0	25,7	55,3	110,1
117,9	154,4	193,5	34,1	66,8	102,9	153,7
0,785	0,835	0,865	0,323	0,682	0,783	0,860
25,5	25,3	26,2	23,1	21,3	22,3	21,3
210	214	224	188	175	187	183
8,92	8,86	9,48	18,9	13,55	11,8	11,3
0,154	0,155	142,0	>0,801	>0,112	0,127	0,13
28	15	1	44	33	19	1
0,18	0,30	0,52	0,04	0,12	0,25	0,47

Über den Gang der *Verluste im Getriebe* gibt der Leistungsverlust $\mathfrak{B}_N = N_i - N_e$ kein gutes Bild, weil in der Leistung die Drehzahl der Maschine enthalten ist, während die Reibung ein bestimmtes

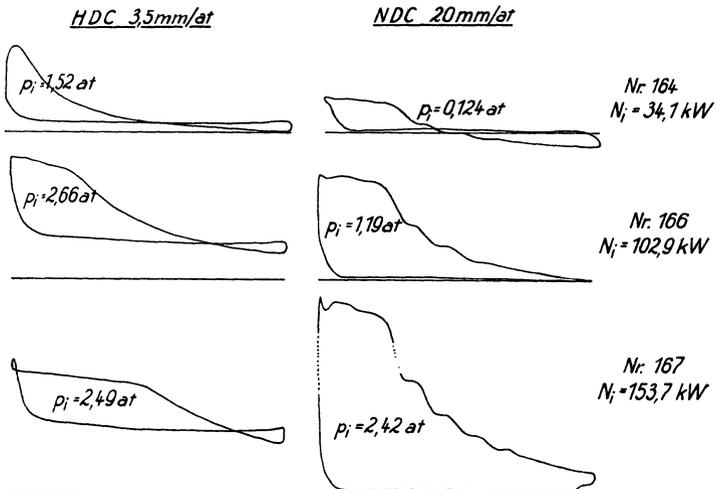


Fig. 80. Diagramme der Dampfmaschine im Auspuffbetrieb. $\frac{2}{5}$ nat. Gr.

Drehmoment verzehrt, das von der Drehzahl grundsätzlich unabhängig ist. Deshalb ist für die Reibung der *Verlust an Drehmoment* ein besseres Maß, weil es den Einfluß der etwas mit der Belastung sich ändernden Drehzahl ausschaltet. Einer Leistung von $N_i - N_e$ kW entspricht bei der Drehzahl n ein Drehmoment

$$M_{\text{mkg}} = \frac{60 \cdot 102}{2 \pi} \cdot \frac{N}{n} = 973 \cdot \frac{N^{\text{kW}}}{n}$$

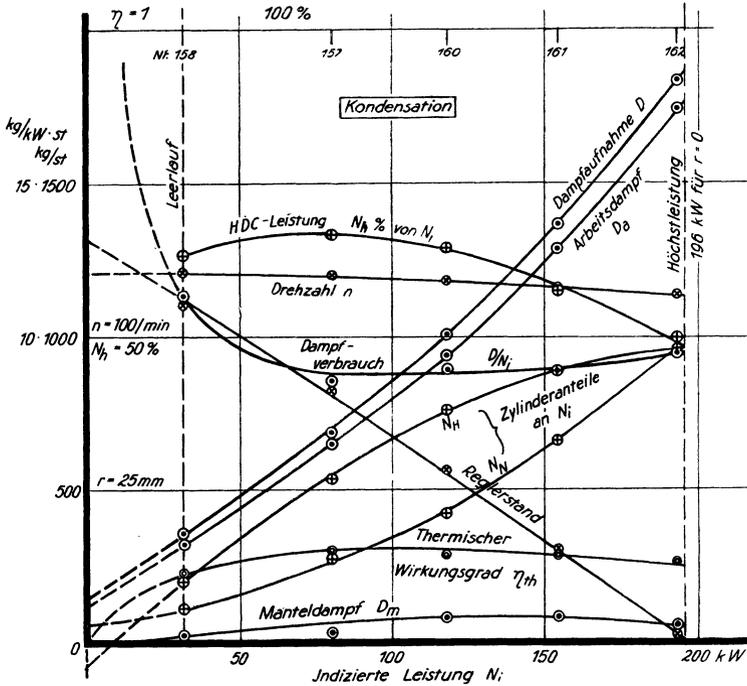


Fig. 81. Dampfmaschine im Kondensationsbetrieb.

Dem Leistungsverlust $\mathfrak{L}_N = N_i - N_e = 25,3$ kW entspricht bei 115,7 Umläufen ein Verlust an Drehmoment $\mathfrak{L}_M = 973 \cdot \frac{25,3}{115,7} = 214$ mkg.

In Fig. 81 bis 82 sind diejenigen Größen, die von der indizierten Leistung besonders abhängen, als abhängig davon aufgetragen. Die Kurven sind schätzungsweise verlängert zum Nullpunkt $N_i = 0$. Die Dampfaufnahme wird dafür nicht Null; erstens bleibt die Aufnahme an Manteldampf, zweitens nehmen auch die Zylinder noch immer Dampf auf, nur bilden sich im Diagramm bei kleiner Leistung Verlustschleifen aus, die die entstandene Arbeit schließlich wieder aufzehren. Der Verbrauch muß bei Annäherung an Null zur Asymptote emporwachsen, nachdem er bei höheren Leistungen etwa konstant war. Auch der thermische Wirkungsgrad hat den gewöhnlichen Verlauf, zum Nullpunkt gehend.

In die Figuren sind die Zylinderleistungen N_H und N_N eingetragen, ferner der prozentische Anteil $N_h = 100 \cdot \frac{N_H}{N_i}$ des Hochdruckzylinders an der Gesamtleistung. Bei den guten Diagrammen des Kondensationsbetriebes wachsen beide Zylinderleistungen einigermaßen miteinander, der Hochdruckzylinder hat, außer bei höchster Leistung, den größeren Anteil. Ungünstiger verändern sich die Zylinderleistungen beim Auspuffbetrieb. Der Hochdruckzylinder, der zunächst angesichts der

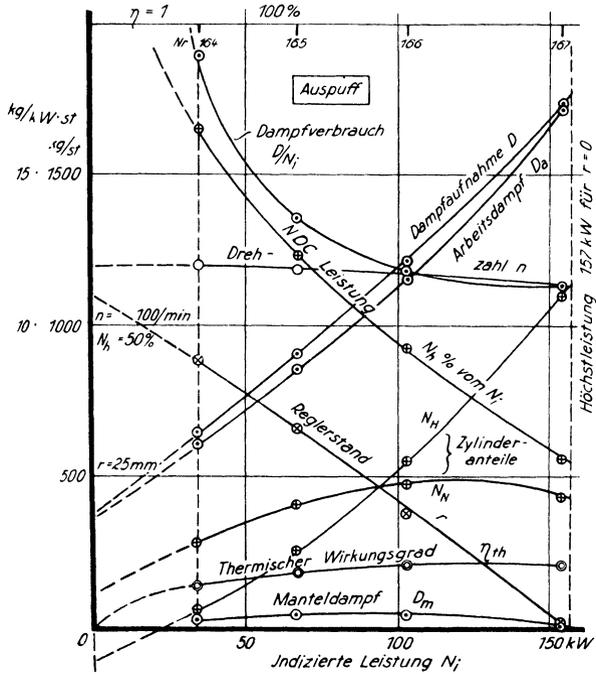


Fig. 82. Dampfmaschine im Auspuffbetrieb.

Schleifenbildung im Niederdruckzylinder die Führung hatte, gibt sie bei hohen Leistungen an den Niederdruckzylinder ab.

Zu jeder Leistung ist der *Reglerstand* an einer der Reglerhülse gegenübergestellten Teilung in Millimetern abgelesen; solche Teilung am Regler oder Reglergestänge empfiehlt sich sehr; $r = 0$ bedeutet, die Reglerhülse des Kegelreglers sitze unten auf. Mit steigender Leistung sinkt der Regler durch seinen ganzen Hub herab; entsprechend — gemäß § 146 — läßt die Drehzahl mäßig nach. Durch die tiefste Lage $r = 0$ des Reglers ist die *Höchstleistung* der Maschine bei der gegenwärtigen Einsteuerung bestimmt; sie ist $N_{i,max} = 196$ kW bei Kondensation, jedoch nur $N_{i,max} = 157$ kW bei Auspuffbetrieb. Versuchte man die elektrische Belastung über das dieser Reglerstellung entsprechende Maß zu steigern, so fiel die Drehzahl ab, ähnlich wie es in § 152 an einer Gasmaschine beschrieben wird. Dort bildet jedoch nicht

der Regler die Grenze der Belastungsfähigkeit. Am unteren Ende bildet der Leerlauf eine weniger scharfe Grenze der Belastung: die gestrichelten Kurvenstücke lassen sich realisieren, indem man der Dynamo Leistung aus einer parallel geschalteten Stromquelle zuführt — Betätigung der Feldregler.

Der *mechanische Wirkungsgrad* hat nach Fig. 83 den üblichen Verlauf — für Auspuff wird er bei Höchstleistung nicht schlechter wie bei Kondensation, obwohl doch der Umsatz bei letzterer größer ist. Tragen wir nämlich die Verluste — an Drehmoment oder an Leistung — vergleichsweise auf, so sind sie keineswegs konstant; bei Kondensation steigen sie mit der Leistung an, bei Auspuff aber fallen sie mit steigender Leistung ab. Daher wird bei höheren Leistungen der mechanische Wirkungsgrad bei Auspuff vergleichsweise günstig. — Es könnte zweifelhaft sein, ob dieser eigenartige Gang der Verluste wirklich so vorhanden ist, wie es sich darstellt, oder ob er nur Folgeerscheinung irgendwelcher meßtechnischer Umstände ist. Es kann die elektrische Leistung oder der Wirkungsgrad der Dynamo oder die indizierte Leistung so gemessen sein, daß sich der Gang der Differenz aus der Meßmethode oder dem Zustand der Instrumente ergibt. Da nun die Messung der elektrischen Leistung sehr genau zu erfolgen pflegt, zumal sie bei beiden Reihen mit den gleichen Instrumenten geschah, und da die Verlustkurve der Dynamo beidemal gleichmäßig eingeht, so sind hieraus zwar durchgehende Fehler, aber nicht Unterschiede zwischen beiden Reihen zu erklären. Die Messung der indizierten Leistung freilich kann durch Ungleichmäßigkeiten der Federmaßstäbe beeinflusst werden; es könnten etwa die Federn des Hochdruckzylinders einen steigenden, die des Niederdruckzylinders einen fallenden Federmaßstab haben; gerechnet aber ist mit einem gleichmäßigen Maßstab — und da andererseits der Anteil der Zylinder an der Gesamtleistung für beide Reihen ganz verschieden verläuft und die Höhenlage des mittleren Druckes zwar beide Male emporrückt, aber doch verschieden liegt, so kann mangels besonderer Untersuchung dieser Einfluß nicht bestimmt bestritten werden. — Aber wahrscheinlicher ist es, daß wirklich der Reibungsverlust so verschiedenartig durch die Leistung beeinflusst wird, wie Fig. 83 es darstellt. Ursache davon ist dann die ganz verschiedene Gestalt des Indikatordiagrammes, die in beiden Fällen ganz verschiedene Druckverhältnisse im Getriebe, insbesondere in der Kreuzkopfführung ergibt und wegen der Massendrucke macht das wohl auch eine Abnahme des Leistungsverlustes mit zunehmender Nutzleistung denkbar. —

Tabelle 31 gibt die Druckverhältnisse. Der *Aufnehmerdruck* nimmt mit der Leistung zu; denn da die Füllung des Niederdruckzylinders unverändert bleibt, bei höherer Leistung ein größeres Dampfgewicht mit jedem Hub eingenommen werden muß, so muß der Dampf dafür größeres spezifisches Gewicht annehmen. Näheres hierüber in § 74. Das schwache Ansteigen des Kondensatordruckes mit der Leistung rührt davon, daß der Kondensator wärmer läuft. Das schwache Abfallen des Frischdampfdruckes p_1 rührt teils davon, daß der Heizer

Tabelle 31. Druckverhältnisse in einer Dampfmaschine. Kondensationsbetrieb.

Versuch Nr.		158	159	160	160	161
1	Drehzahl n /min	120,8	119,8	118,0	115,7	113,5
2	Indizierte Leistung N_i kW	31,4	80,1	117,9	154,4	193,5
3	Frischdampfdruck p_1 at	12,65	12,35	12,2	12,25	12,1
4	Aufnehmerdruck p_2 „	0,54	0,94	1,43	2,21	3,4
5	Auspuffdruck p_3 „	0,07	0,11	0,12	0,15	0,19
6	Druckgefälle im HDC $p_1 - p_2$ „	12,1	11,4	10,8	10,0	8,7
7	„ im NDC $p_2 - p_3$ „	0,47	0,83	1,31	2,06	3,2
8	Indizierter Druck im HDC p_{i1} „	1,065	2,88	4,16	4,95	5,48
9	„ „ im NDC p_{i2} „	0,238	0,558	0,886	1,42	2,14
10	Druckausnutzung im HDC $\frac{p_{i1}}{p_1 - p_2}$ „	0,088	0,25	0,39	0,49	0,63
11	„ im NDC $\frac{p_{i2}}{p_2 - p_3}$ „	0,51	0,67	0,68	0,69	0,67
12	Indizierte Leistung des HDC N_1 kW	19,8	53,3	75,9	88,5	96,1
13	„ „ des NDC N_2 „	11,6	26,8	42,0	65,9	97,4
14	Prozentualer Anteil des HDC N' %	0,632	0,666	0,644	0,573	0,497
15	„ „ des NDC N'' %	0,368	0,334	0,356	0,427	0,503
16	Füllung des HDC φ_H %	0	4,0	18,2	29,8	52,2
17	Reglerstellung mm	55	42	28	15	1

bei höheren Belastungen den Druck etwas niedriger hält als bei kleinen (§ 84 und Tab. 11), namentlich aber von dem zunehmenden Druckabfall in der Dampfleitung. Die Frischdampf­temperatur nimmt mit der Leistung ab, teils weil sie es schon am Kessel zu tun pflegt, teils weil mit Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit — Abnahme der Strömungsdauer für einen Dampfteil — der Temperaturverlust in der Leitung (nicht auch der Wärmeverlust) sinkt, § 38. —

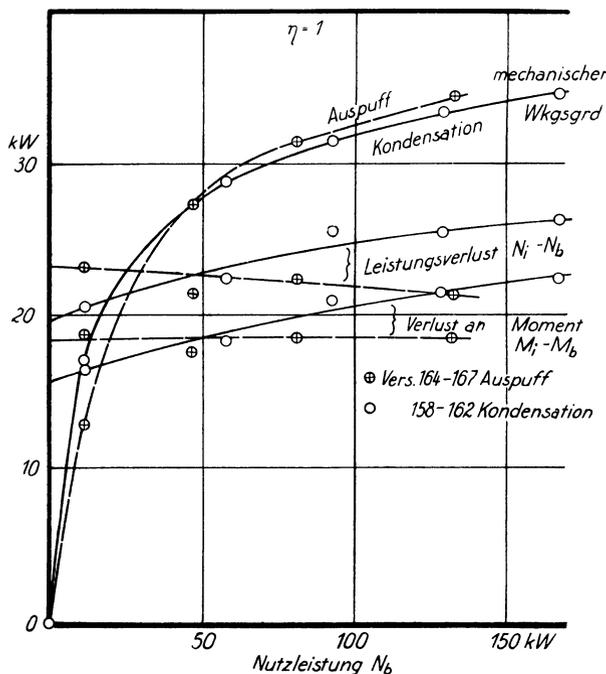


Fig. 83. Getriebeverluste der Dampfmaschine, bei Auspuff und Kondensation.

Die Zeilen 10 und 11 „Druckausnutzung“ setzen den indizierten Druck zum Druckgefälle im Zylinder in Beziehung, sind also ein Maß dafür, wie sich die Diagrammfläche zu der des umschriebenen Rechtecks verhält, die *Druckausnutzung* ist also ein Maß für den Expansionsgrad des Zylinders: je kleiner sie ist, desto stärker expandiert der Dampf.

70. Reglerstand und Füllung. Die indizierte Leistung wird auf den richtigen, der gerade verlangten Nutzleistung entsprechenden Wert eingestellt, indem der Regler die Füllung φ_H des Hochdruckzylinders — manchmal außerdem die des Niederdruckzylinders — beeinflusst. Einzelheiten des Regelvorganges bespricht Kap. V. Hier sei nur in Fig. 84 an den teilweise in Tab. 29 gegebenen Zahlen gezeigt, wie jeder Reglerstellung eine und dieselbe Füllung φ_H zugeordnet ist, gleichgültig, ob Kondensations- oder Auspuffbetrieb vorliegt. Voraussetzung ist, daß an dem Gestänge zwischen Regler und Hochdrucksteuerung Änderungen nicht vorgenommen wurden.

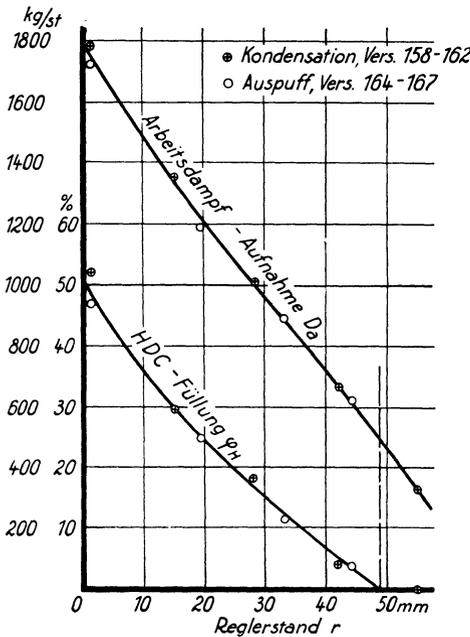


Fig. 84. Dampfaufnahme und Füllung abhängig vom Reglerstand, bei Auspuff und Kondensation.

Dann muß aber auch, bei gleichem Betriebsdruck, mit jedem Hub das gleiche Volumen Arbeitsdampf bei einer bestimmten Reglerstellung eingeführt werden; und da nach den Eigenschaften des Reglers der Reglerstellung eine bestimmte Drehzahl zugehört, so ist auch die stündliche Arbeitsdampfaufnahme in erster Linie nur von der Reglerstellung r abhängig; in zweiter Linie frei-

lich hat die Einstellung der Kompression am Hochdruckzylinder noch einen gewissen Einfluß darauf (§ 75)

Die Messung der Füllung erfolgt unmittelbar am Indikatoridiagramm. Wenn sich bei einigermaßen schnell laufender Maschine ein scharfer Übergang der Einlaß- in die Expansionslinie nicht erkennen läßt, so verlängert man beide Linien bis zum Schnitt im Punkte *E*, Fig. 85, und mißt nun

- die Länge der Füllung im Diagramm. 27,5 mm
- die Diagrammlänge 92,8 „

Aus beiden folgt die Füllung $\varphi_H = 27,5 : 92,8 = 0,298$ oder fast genau 30%.

Im allgemeinen werden die Füllungen der Kurbel- und der Deckel-seite etwas voneinander abweichen. Um Beziehungen, wie die in Fig. 84 dargestellte, darzustellen, rechnet man dann mit dem Mittelwert beider Seiten.

71. Beispiel für Berechnung der ausnutzbaren Leistung und des Gütegrades. Im Nenner der Gütegradformeln des § 47:

$$\eta_{gth} = \frac{N_i}{N'_1} \quad \text{oder} \quad \eta_{ge} = \frac{N_b}{N'_1} \quad \dots \dots (5) (6)$$

steht jedesmal diejenige Leistung N'_1 , die theoretisch in Arbeit umgesetzt werden kann. Deren Betrag hängt davon ab, welchen Kreisprozeß man der Maschinenwirkung zugrunde legt. Der Rechnungsgang soll an Hand der Zahlen des Versuches Nr. 161 gezeigt werden, dessen Zahlen schon in den §§ 65 bis 69 benutzt wurden.

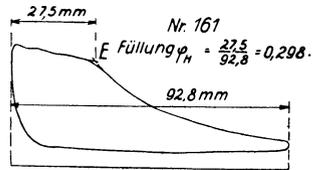


Fig. 85. Abmessung der Füllung im Dampfdiagramm. $\frac{2}{3}$ nat. Gr.

Wollen wir dem Vergleich einen Carnot-Prozeß zugrunde legen, so haben wir für Versuch 161 die Temperatur der Überhitzung (208°C) einerseits, die dem Kondensatordruck $0,15\text{ at}$ entsprechende Temperatur (nach den Dampftabellen 54°C) andererseits als Grenzen einzuführen. Der theoretische Wirkungsgrad eines Carnot-Prozesses zwischen

$$T_1 = 208 + 273 = 481^\circ \text{ und } T_3 = 54 + 273 = 327^\circ \text{ ist } \eta_{\text{opt}} = \frac{481 - 327}{481} = \frac{154}{481} = 0,320;$$

da wir den thermischen Wirkungsgrad schon in § 69 zu $0,155$ berechnet haben, so wird der thermische Gütegrad, bezogen auf den Carnot-Prozeß,

$$\eta_{gth} = \frac{0,155}{0,320} = 0,484.$$

Der Carnot-Prozeß kann von den $626,1\text{ kcal}$, die man dem bei $0,15\text{ at}$ kondensierten Wasser zuführen muß, um es wieder in Dampf vom Anfangszustand zu verwandeln, $32,0\%$, das heißt also: er kann $0,320 \cdot 626,1 = 200,5\text{ kcal}$ umsetzen. Da $1\text{ kW} \cdot \text{h} = 859\text{ kcal}$ ist, so sind, nach dem Carnot-Prozeß, $859 : 200,5 = 4,28\text{ kg}$ Dampf theoretisch zur Erzeugung der Kilowattstunde nötig.

Die Schwäche bei der Bezugnahme auf den Carnot-Prozeß ist folgende: Die Höchsttemperatur ist bei Carnot zugleich diejenige, bei der die ganze zuzuführende Wärme zugeführt wird. In Wahrheit erreicht man die Höchsttemperatur nur mit einem einzigen, dem letzten Wärmeelement der Überhitzung, alle übrige Wärme ist bei niederen Temperaturen zugeführt worden.

Wie schon § 46 gesagt, ist deshalb die Bezugnahme auf einen Idealprozeß vorzuziehen, bei dem die Wärme bei konstantem Druck zugeführt und die Arbeit in einem adiabatisch und rein umkehrbar verlaufenden Vorgang dem Wärmeträger entzogen wird.

Man findet die Wärmemenge, die bei einer adiabatischen Expansion des Dampfes bis auf den Enddruck frei wird, wie in § 49 und 57 an einem Beispiel gezeigt wurde, mittels der i - s -Tafel von Mollier; in dieser sind über der Entropie s als Abszisse die Wärmehalte i als Ordinaten aufgetragen, und zwar in Kurvenscharen gleichen Druckes, gleicher Überhitzungstemperatur, gleicher Feuchtigkeit und evtl. noch gleichen Volumens. Die Schnittpunkte der Kurvenscharen lassen jeden beliebigen Dampfzustand herausgreifen. Jede adiabatische Zustands-

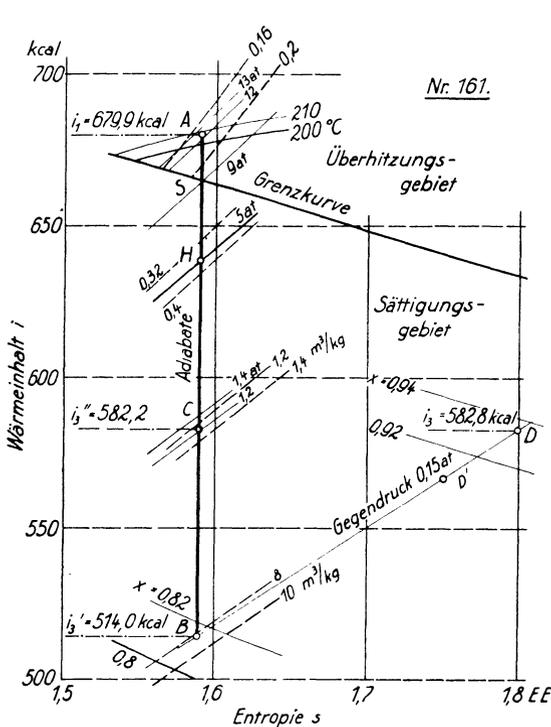


Fig. 86. Zustandsänderungen des in der Dampfmaschine arbeitenden Dampfes, dargestellt im i - s -Diagramm bezogen auf 1 kg. $\frac{2}{3}$ nat. Gr.

änderung, Entropie $s = \text{konstant}$, wird durch eine senkrechte Gerade dargestellt, deren Länge ohne weiteres die dabei umgesetzte Wärmemenge bedeutet. Zustandsänderungen gleichen Druckes, gleichen Volumens u. a. m. verfolgt man, indem man der betreffenden Kurve im Diagramm nachgeht. — Die verschiedenen Ausgaben des i - s -Diagrammes weichen etwas voneinander ab, sowohl im Umfang des dargestellten Zustandsgebietes, als auch merklich in den zahlenmäßigen Werten. Es ist im folgenden durchweg die Tafel verwendet worden, die der 4. Auflage des Stodola'schen Werkes über Dampfturbinen beiliegt¹⁾, und

die sich vor anderen — auch vor den älteren Auflagen des gleichen Werkes — dadurch auszeichnet, daß auch die spezifischen Volumina darin dargestellt sind. Gerade davon werden wir sogleich Gebrauch machen.

Als Beispiel für die Verwendung des i - s -Diagrammes soll für den eben schon durchgerechneten Versuch Nr. 161 der Gütegrad und dazu also zunächst N'_1 gefunden werden. In Fig. 86 sind die verwendeten Kurven des i - s -Diagrammes eingezeichnet. Der Anfangszustand des Dampfes bei Versuch 161 ist durch die Daten $p_1 = 12,25 \text{ at}$, $t_1 = 208^\circ \text{C}$ gegeben, Punkt A. Sein Wärmehalt ist dabei ohne weiteres zu $i_1 = 679,9 \text{ kcal}$ abzulesen. Die Entropie interessiert zahlenmäßig nicht;

¹⁾ Vgl. die Anmerkung auf S. 163.

ihre Konstanz wird durch den senkrechten Verlauf der Linie ACB gekennzeichnet; der Schnittpunkt B der Senkrechten mit der Linie des Gegendruckes $p_3 = 0,15$ at abs ergibt einen Wärmeinhalt des Dampfes $i'_3 = 514,0$ kcal; man kann auch unmittelbar die Strecke $AB = i_1 - i'_3 = 679,9 - 514,0$ zu 165,9 kcal abgreifen, um welche bei adiabatischer Expansion des Dampfes dessen Wärmeinhalt abnimmt; diese Wärmemenge kann also in eine andere Energieform verwandelt werden — im Dampfzylinder in mechanische Arbeit, in der Düse der Dampfturbine in kinetische Energie, immer jedoch verlustlos arbeiten des Zylinders und der Düse vorausgesetzt. Aus 1 kg Dampf können also 165,9 kcal in Arbeit verwandelt werden, die $165,9 : 632 = 0,262$ PS · h oder $165,9 : 859 = 0,193$ kW · h äquivalent sind; der theoretisch günstigst erreichbare Dampfverbrauch ist $1 : 0,193 = 5,18$ kg/kW · h. Dem steht gegenüber, daß ein Dampfverbrauch 8,86 kg/kW · h, eine Arbeitsausbeute von $1 : 8,86 = 0,113$ kW · h/kg in indizierter Leistung wirklich erreicht wurden; der Gütegrad ist dann $0,113 : 0,193 = 5,18 : 8,86$

$$\eta'_{gth} = 0,585 \text{ oder } 58,5\%.$$

Es läßt sich im Anschluß daran noch folgendes berechnen: Es sind in Wahrheit $859 : 8,86 = 97,1$ kcal aus 1 kg Dampf in indizierte Leistung verwandelt, es müßten also im Auspuffdampf noch $679,9 - 97,1 = 582,8$ kcal/kg Wärme enthalten sein, wenn äußere Wärmeverluste vermieden worden wären; bei 0,15 at Druck entspricht dem der Punkt D , Fig. 86. An die Stelle des theoretisch günstigsten, adiabatisch umkehrbar verlaufenden Prozesses nach AB träte dann ein anderer, längs irgendeiner Kurve zwischen A und D verlaufend, der zwar auch als adiabatisch (in wärmedichtem Zylinder) verlaufend gedacht wird, aber nicht rein umkehrbar; diese Kurve berücksichtigt also den Minderertrag an Arbeitsausbeute, der z. B. durch Nichtauszeichnen der Diagrammspitzen entsteht; sie endet im Punkte D mit — wegen der geringeren Energieentziehung — höherem Dampfgehalt von $x_3 = 0,935$ gegenüber $x'_3 = 0,815$ im Punkte B . — In Wahrheit wird der Zustand des Auspuffdampfes durch einen unterhalb D auf der 0,15 at-Linie liegenden Punkt gegeben sein, vielleicht durch D' ; der senkrecht gemessene Abstand von D gegen D' ist der Wärmeverlust in der Maschine, die Feuchtigkeit des Dampfes ist größer, als sie nach der Arbeitsentziehung zu sein brauchte. Vgl. die Untersuchungen an Turbinen, § 57 und 61. — Wie schon erwähnt, interessiert der Betrag der Entropie bei diesen Betrachtungen nicht. Wesentlich ist nur, daß der Punkt D rechts von A liegt; im Zuge AD hat die Entropie also zugenommen, entsprechend der Irreversibilität der Ausströmvorgänge in den Kanälen z. B. durch Auslassen der Diagrammspitzen. Falsch wäre es nun aber, zu schließen: der wirkliche Verlauf, etwa nach AD' , sei günstiger als der nach AD , weil die Entropie in D' kleiner sei; das ist ein Fehlschluß, weil die Entropie durch Wärmeentziehung dem Dampf entnommen, aber doch nicht überhaupt verringert worden ist; nur die im Dampf befindliche Entropie ist in D' kleiner geworden, aber nicht die Entropie überhaupt. Vgl. § 57, vorletzten Absatz.

Die eben gegebenen Gütegrade vergleichen die wirklich erreichte Arbeitsausbeute mit derjenigen eines Idealprozesses und setzen als solchen die einfache adiabatische Expansion der verbrauchten Dampfmenge vom einmal gegebenen Anfangszustand auf den ebenfalls gegebenen Gegendruck. Ersterer ist durch den Kessel, letzterer durch den Kondensator der Maschine gegeben; die von diesen beiden Teilen geschaffenen Verhältnisse werden als durch die äußeren Betriebsbedingungen gegeben hingenommen; es ist also der Gütegrad der Dampfmaschine, nicht der Dampfkraftanlage durch diese Rechnung ermittelt.

Das Abgreifen der umsetzbaren Wärmemenge im *i s*-Diagramm liefert nur das Gesamtergebnis, ohne auf die Entstehung der Arbeit in den einzelnen Phasen einzugehen. Um die Entstehung der Arbeit zu

vereinzeln, können die Verhältnisse im *p v*-Diagramm nach Anleitung von Fig. 87 dargestellt werden. A_2A ist das Volumen des in die Maschine eingeführten Dampfgewichtes im Zustande des Frischdampfes. Es sind (immer bei Versuch 161) mit stündlich $60 \times 115,7$ Umläufen 1368 kg Dampf verbraucht worden; will man also das Diagramm für 1 Umlauf = 2 Hübe

entwerfen, so gilt es für $\frac{1368}{60 \cdot 115,7} = 0,187$ kg Dampf. Im Zustande des Frischdampfes (12,25 at, 208°) hat Dampf das spezifische Volumen 0,174 m³/kg, durch Punkt A (entsprechend Punkt A der Fig. 86) muß also einem Drucke 12,25 at ein Volumen 0,197 kg · 0,174 m³/kg = 0,0343 m³ zugeordnet werden. Dabei kann das spezifische Volumen *v* entweder aus der Mollierschen Formel $v = 47 T/p + 0,001 - \mathfrak{Z}$ berechnet werden, hierin \mathfrak{Z} nach Fig. 14 bei § 26, oder einfacher kann *v* direkt der

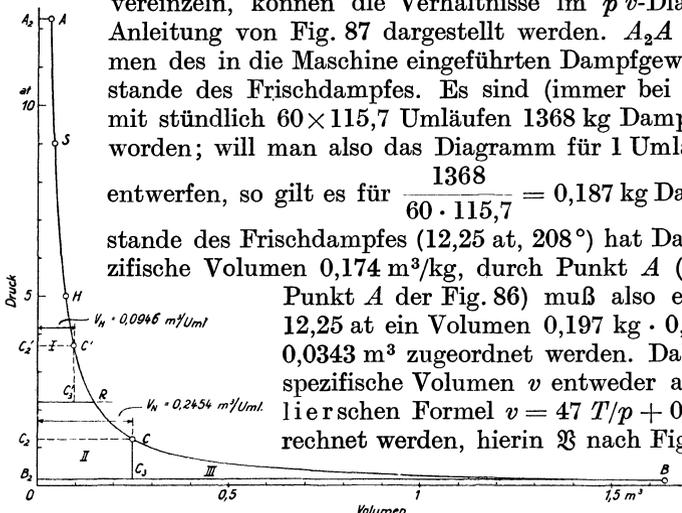


Fig. 87. Diagramm des Vergleichsprozesses einer Dampfmaschine für 1 Umlauf Dampfgewicht 0,197 kg; Anfangszustand 12,25 at, 208° C; Enddruck 0,15 at bzw. Endvolumen 0,2454 m³.

zum Zustand 12,25 at, 208° gehörig entnommen werden, Punkt A in Fig. 86, wenn man eine solche Ausführung dieser Tafel benutzt, die die Kurven des spezifischen Volumens enthält. Den Verlauf der Adiabate *AB* gibt bis zu einem Punkte, in dem Sättigung eintritt, die Formel $pV^{1,3} = \text{konst} = 12,25 \cdot 0,0343^{1,3}$; vom Sättigungspunkt an gilt $pV^{1,35} = \text{konst}$ (Hütte, I, S. 422, 421). Auch hier wird die Benutzung der Mollier-Tafel bequemer: Die durch den Punkt A, Fig. 86, gezogene Senkrechte gibt unmittelbar zu $p = 0,15$ at $v = 8,3$ m³/kg an, und in Fig. 87 ist für den Druck $p = 0,15$ at $v = 0,197 \cdot 8,3 = 1,64$ m³ einzutragen, Punkt B. Entsprechend sind zwischen A und B liegende Punkte zu bestimmen, wie für einen Punkt H, Fig. 86 und 87 (5 at, 0,37 m³/kg, 0,73 m³), beispielshalber angedeutet ist.

Durch die Adiabate *AB* wird in Fig. 87 eine Arbeitsfläche A_2ABB_2 abgeteilt, deren Flächeninhalt im Arbeitsmaß mit der Strecke *AB*,

Mollier-Tafel als

Fig. 86, übereinstimmt, die dieselbe Größe im Wärmemaß bedeutet; ersteres ist die von der verlustlos arbeitenden Maschine erzeugte Arbeit, letzteres die für die Arbeitserzeugung als äquivalent aufzuwendende Wärme. Mit der Fläche A_2ABB_2 wird im Gütegrad die Fläche der Indikatordiagramme verglichen, die jedoch, um den Vergleich äußerlich in die Erscheinung treten zu lassen, vorher durch Rankinisieren (§ 77) auf denselben Maßstab gebracht werden müssen. — Der schädliche Raum der wirklichen Maschine ist in Fig. 87 unbeachtet geblieben.

Nicht immer vergleicht man die wirklich erreichte Arbeitsausbeute mit der Arbeit bei vollständiger Expansion bis zum Gegendruck in

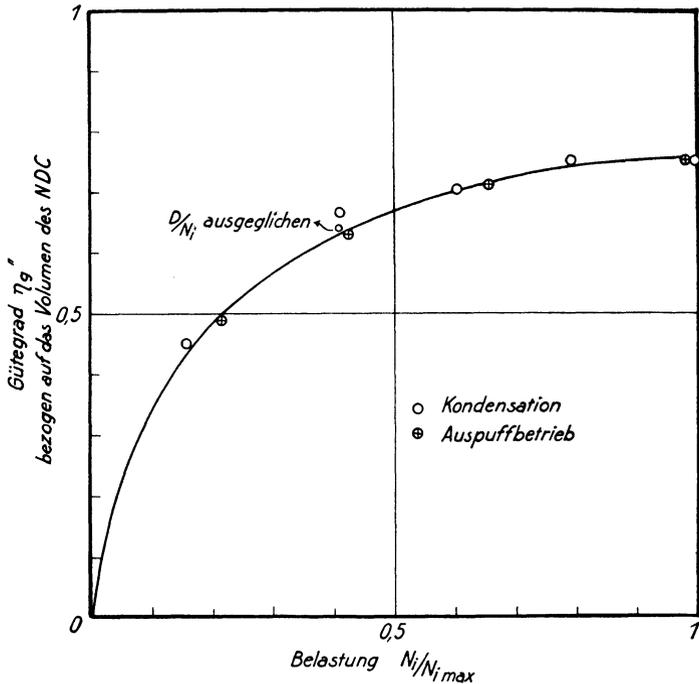


Fig. 88. Gütegrad der Dampfmaschine abhängig vom Belastungsgrad, unabhängig vom Wärmegefälle.

Punkt *B*. Das Volumen wäre hier nämlich größer als das verfügbare Zylindervolumen. Aus den Maschinenabmessungen am Kopfe von Tabelle 30 findet sich das vom Niederdruckkolben während eines Umlaufes freigelegte Volumen.

Hubvolumen für die Kurbelseite (Einwärtsgang des Kolbens)	0,1222 m ³
Hubvolumen für die Deckelseite (Auswärtsgang des Kolbens)	0,1232 „
Volumen des NDC für den Umlauf V_N	0,2454 m ³

Dieses Volumen, in Fig. 87 durch C_2C wiedergegeben, bildet an dieser Maschine eine Grenze für die Ausnutzung des Dampfes, die früher als der Gegendruck erreicht wird; und wenn man daher nur den Inhalt

Tabelle 32. Gütegrade

Versuch Nr.		Reihe a, Kondens-	
		158	159
1	Indizierte Leistung N_i kW	31,4	80,1
2	in Bruchteilen der höchsten (195,5 bzw. 157 kW) —	0,161	0,410
3	Dampfaufnahme D kg/h	365	684
4	Frischdampf: Druck p_1 at	12,65	12,35
5	„ Temperatur t_1 °C	191	192
6	Abdampf: Druck p_3 at	0,07	0,11
Ohne Beachtung der Zylinderabmessungen:			
7	Adiabatisches Wärmegefälle $\Delta i'_{ad}$ kcal/kg	185,0	173,0
8	Gütegrad $\eta'_{th} = \frac{859 \cdot N_i}{D \cdot \Delta i'_{ad}}$ —	0,400	0,582
Unter Beachtung der Zylinderabmessungen:			
9	Drehzahl n /min	120,8	119,8
10	Dampfaufnahme je Umlauf $D : 60 n = D_n$ kg	0,0504	0,095
11	Spezifisches Endvolumen $V_N : D_n = 0,2454 : D_n = v''$ m ³ /kg	4,87	2,58
12	Zugehörig: Druck p'' aus i -s-Tafel at	0,28	0,54
13	Adiabatisches Wärmegefälle bis dort $\Delta i''_{ad}$ kcal/kg	145,0	124,0
14	Verschiebearbeit $\frac{10\,000}{427} \cdot (p'' - p_3) \cdot v'' = N''$ „	24,0	26,0
15	Zusammen verfügbar $\Delta i''_{ad} + N''$ „	169,0	150,0
16	Gütegrad $\eta''_{th} = \frac{859 \cdot N_i}{D \cdot (\Delta i''_{ad} + N'')}$ —	0,437	0,671

der Fläche $A_2ACC_3B_2$ als von dieser Maschine theoretisch erreichbar ansieht, so ist der *thermische Gütegrad*

$$\eta''_{th} = \frac{N_i}{(A_2ACC_3B_2)} \dots \dots \dots (5a)$$

Zur Ermittlung der in dem einmal gegebenen Zylinder erzielbaren Arbeitsausbeute braucht man aber das Diagramm Fig. 87 nicht erst maßstäblich zu zeichnen; die im Nenner von (5a) stehende Fläche setzt sich aus der Expansionsfläche A_2ACC_2 und der Rechteckfläche $C_2CC_3B_2$ zusammen. Dabei ist C bestimmt aus der Forderung, daß das bei einem Umlauf von der Maschine ausgenutzte Dampfgewicht $D_n = 0,197$ kg gerade in dem einen Umlauf entsprechenden Volumen $V_N = 0,2454$ m³ Platz habe, daß also für den Dampfinhalt das spezifische Volumen $v'' = 0,2454$ m³ : 0,197 kg = 1,24 m³/kg sei. Man hat also in Fig. 86 auf der Adiabate AB den Punkt C für $v = 1,24$ aufzusuchen und den zugehörigen Wärmeinhalt $i''_3 = 582,2$ kcal sowie den zugehörigen Druck $p'' = 1,22$ at = 12 200 kg/m² abzulesen. Also muß entsprechen

die Expansionsfläche A_2ACC_2 der Fig. 87 $i_1 - i''_3 = 679,9 - 582,2 = 97,7$ kcal/kg die Fläche $C_2CC_3B_2 = \frac{1}{2} \cdot (p'' - p_3) \cdot v'' = \frac{1}{2} \cdot (12\,200 - 1500) \cdot 1,24 = 31,0$ „

zusammen, jetzt wieder bezogen auf 1 kg Dampf: 128,7 kcal/kg

und dies ist die bei den Zylinderabmessungen mögliche Ausnützung des Dampfes; nun war aber oben schon ausgerechnet, daß in Wahrheit 97,1 kcal aus je 1 kg Dampf in indizierte Arbeit verwandelt wurden. Der Gütegrad nach Formel (5a) ist also $97,1 : 128,7 = 0,755 = 75,5\%$.

einer Dampfmaschine.

sationsbetrieb			Reihe b, Auspuffbetrieb			
160	161	162	164	165	166	167
117,9	154,4	193,5	34,1	66,8	102,9	153,7
0,603	0,790	0,990	0,217	0,425	0,655	0,978
1050	1368	1837	644	915	1213	1738
12,2	12,25	12,1	12,2	12,25	12,2	12,1
198	208	236	189	189	197	216
0,12	0,15	0,19	1,01	1,01	1,01	1,01
169,8	165,9	163,5	<101,3	<101,3	102,1	104,4
0,567	0,585	0,555	>0,448	>0,625	0,713	0,728
118,0	115,7	113,5	119,7	118,3	115,9	113,5
0,148	0,197	0,270	0,090	0,128	0,175	0,255
1,66	1,24	0,91	2,73	1,92	1,405	0,96
0,895	1,22	1,85	0,495	0,80	1,08	1,70
107,1	97,7	85,2	<126,3	<110,1	99,8	85,2
30,1	31,0	35,4	-32,8	-9,4	2,3	15,5
137,2	128,7	120,6	<93,5	<100,7	102,4	100,7
0,701	0,755	0,752	>0,487	>0,623	0,713	0,756

Die Rücksichtnahme auf das vorhandene Zylindervolumen läßt den Gütegrad günstiger erscheinen, als wenn man auch die Fläche CBC_3 , Fig. 87, als theoretisch ausnutzbar betrachtet (0,755 gegen 0,585). Den praktischen Verhältnissen glaubt man bei Kolbenmaschinen durch Verwendung des Gütegrades $\eta''_{gt,h}$ besser gerecht zu werden, weil man verhüten will, daß im einseitigen Interesse des Gütegrades das Zylindervolumen allzu groß gewählt werde, da dadurch die Abmessungen und die Kosten der Maschine steigen, während doch der thermisch erreichte Gewinn (Fläche CBC_3) durch vermehrte Reibungsverluste wieder verzehrt werden würde. Der Ausdruck für $\eta''_{gt,h}$ nach Formel (5a) wird aber nicht einem Vergleich zwischen Kolbendampfmaschine und Dampfturbine gerecht, da in der Düse im allgemeinen die Expansion des Dampfes bis auf den Auspuffdruck möglich ist ohne unzulässige Vermehrung der Reibungsverluste. —

Wir geben noch einmal die errechneten Zahlen in übersichtlicher Zusammenstellung:

a) Nach Carnot:

Verfügbar 200,5 kcal/kg.

Dampfverbrauch theoretisch 4,28 kg/kW · h.

b) Bei adiabatischer Expansion ohne Wärmeverlust bis zum Enddruck:

Verfügbar 165,9 kcal/kg.

Dampfverbrauch theoretisch 5,18 kg/kW · h.

c) Bei adiabatischer Expansion ohne Wärmeverlust bis zum gegebenen Zylinderraum:

Verfügbar 128,7 kcal/kg.

Dampfverbrauch theoretisch 6,70 kg/kW · h.

d) Im wirklich ausgeführten Prozeß:

Umgesetzt (indiziert) 97,1 kcal/kg.

Dampfverbrauch wirklich 8,86 kg/kW · h.

Gütegrad bezogen auf a: $\eta_{g'th} = 0,484$

Gütegrad bezogen auf b: $\eta_{g''th} = 0,585$

Gütegrad bezogen auf c: $\eta_{g'''th} = 0,755$

Die gleiche Berechnung von $\eta_{g'th}$ und $\eta_{g''th}$ ist in Tabelle 32 für die beiden mehrfach besprochenen Versuchsreihen durchgeführt. Daraus ergibt sich Fig. 88; die Gütegrade bei Kondensations- und bei Auspuffbetrieb sind über dem Belastungsgrad aufgetragen, der in der zweiten Zeile von Tabelle 32 berechnet ist.

Es zeigt sich, daß durch Berechnung von $\eta_{g''th}$, dem Gütegrad bezogen auf das Volumen des Niederdruckzylinders, die äußeren Betriebsbedingungen — Kondensations- oder Auspuffbetrieb — sehr vollkommen ausgeschaltet sind; die Maschine erscheint beide Male als gleich gut — fast zu Unrecht, da doch die Diagramme bei Auspuffbetrieb merklich ungünstiger waren als bei Kondensation.

72. Einfluß des Dampfzustandes. Äußere Betriebsbedingungen für eine Dampfkraftmaschine sind: die Qualität des zu verarbeitenden Frischdampfes — Druck und Temperatur oder Feuchtigkeit —, der Gegendruck, gegen den der Abdampf ausbläst — im ganzen also das verfügbare Wärmegefälle; ferner die von der Maschine verlangte Drehzahl. Ihr Einfluß auf den Gang der Maschine kann durch Versuchsreihen belegt werden.

Den *Einfluß wechselnder Überhitzung* zeigt Tabelle 33, Fig. 89. Die abgenommene Nutzleistung N_b wurde gleichmäßig auf $\approx 127,5$ kW gehalten, bei konstantem Frischdampfdruck von gut 12 at abs und konstantem Gegendruck. Die Temperatur der Überhitzung änderte man von 190° bis 236° .

Es zeigt sich, daß die Dampfaufnahme und der Verbrauch um so günstiger ist, je höher die Überhitzung — eine bekannte und natürliche Tatsache. Dabei ist die Abnahme des Manteldampfes besonders stark. Bei etwa 250° würde Manteldampf überhaupt nicht mehr niedergeschlagen werden; ähnlich nimmt das Aufnehmerkondensat ab. Suchen wir das zu t_1 und p_1 gehörige spezifische Volumen v_1 m³/kg (*is*-Tafel oder Formel), so können wir das auf einen Umlauf kommende

Dampfvolumen $D_{v1} = \frac{D_a \cdot v_1}{60 \cdot n}$ berechnen; es zeigt sich, daß die Ab-

nahme der Dampfdichte etwas weniger Einfluß hat, als die Abnahme des aufzunehmenden Dampfgewichtes; die Dampfaufnahme sinkt auch dem Volumen nach etwas, wenngleich nur wenig. Diese Abnahme, weil auf den Umlauf bezogen, bedingt eine mit steigender Temperatur abnehmende Füllung und daher ein schwaches Steigen des Reglers — das tritt nur un-

deutlich in die Erscheinung, vielleicht weil Gestängeerwärmungen stören. Es ist hier zu bedenken, daß mit wechselnder Überhitzung und namentlich mit längerer Dauer des Überhitzungsgrades Wärmedehnungen der Steuerungsteile eintreten können, so daß nicht immer Reglerstellung und Füllung eindeutig voneinander abzuhängen brauchen. Je nach Umständen kann aber auch eine Zunahme des einzufüllenden Volumens vorkommen. Der Aufnehmerdruck fällt entsprechend dem fallenden Dampfverbrauch; die Temperatur t_2 am Eintritt in den Niederdruckzylinder würde Sättigung gezeigt haben — bei Verwendung sehr heißen Frischdampfes könnte das anders werden.

Im einzelnen zeigt sich, daß die Verbesserung des Dampfverbrauches durchaus nicht nur dem größeren Wärmeaufwand entsprechend statt-

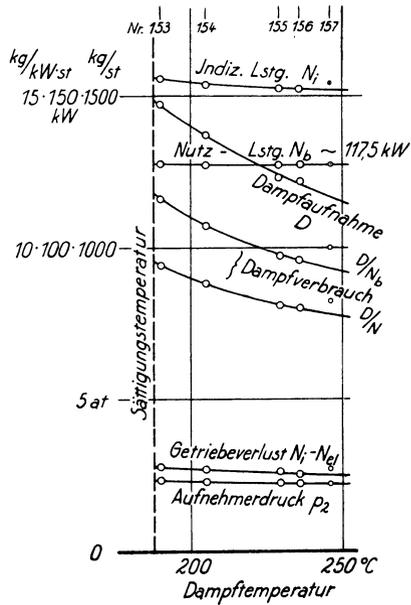


Fig. 89. Dampfmaschine bei verschiedener Überhitzung.

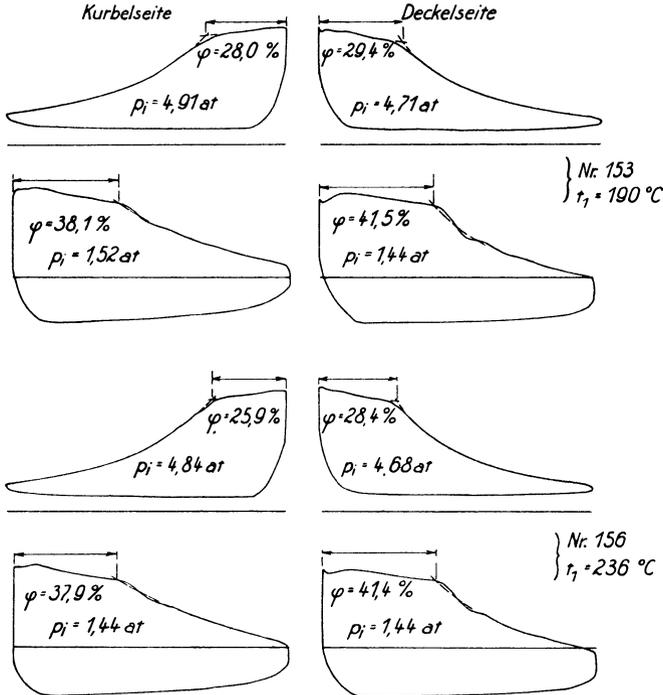


Fig. 90. Dampfmaschinendiagramme im Satttdampf- und Heißdampftrieb. $\frac{2}{6}$ nat. Gr.

Tabelle 33. Kolbendampfmaschine bei ver-
Maschinenabmessungen

Versuch Nr.		A. Steigende	
		153	154
1	Frischdampf: Druck p_1 at	12,1	12,2
2	„ Temperatur t_1 °C	190	205
3	„ Wärmehalt i_1 kcal/kg	670,0	678,8
4	Abdampf. Druck p_3 at	0,174	0,170
5	Zugehörige Flüssigkeitswärme q_3 kcal/kg	56,7	56,1
6	Wärmeverbrauch $i_1 - q_3$ „	613,3	622,7
7	Adiabatisches Wärmegefälle Δi_{ad} „	158,0	162,4
8	Wirkungsgrad des idealen Kreisprozesses $\eta' = \frac{\Delta i_{ad}}{i_1 - q_3}$ —	0,258	0,261
9	Nutzleistung N_e kW	127,7	127,2
10	Reglerstellung r mm	14,6	15,5
11	Drehzahl n /min	116,4	116,9
12	Indizierte Leistung N_i kW	155,5	154,1
13	Getriebeverlust $N_i - N_e$ „	27,8	26,9
14	Aufnehmerdruck p_2 at	2,40	2,32
15	Dampfaufnahme: Arbeitsdampf D_a kg/h	1423	1347
16	„ Manteldampf D_m „	49	18
17	Zusammen $D = D_a + D_m$ „	1472	1365
18	Aufnehmerkondensat D' „	101	70
19	Dampfverbrauch D/N_i kg/kW · h	9,47	8,86
20	Spezifisches Volumen des Frischdampfes v_1 m ³ /kg	0,168	0,173
21	Aufgenommenes Arbeitsdampfvolumen $\frac{D_a \cdot v_1}{60 \cdot n}$ m ³ /Uml	0,0342	0,0332
22	Thermischer Wirkungsgrad $\eta_{th} = \frac{859 \cdot D}{N_i \cdot (i_1 - q_3)}$ —	0,148	0,156
23	Gütegrad $\eta'_{g'_{th}} = \frac{859 \cdot D}{N_i \cdot \Delta i_{ad}}$ —	0,574	0,597
Gütegrad, bezogen auf die Zylindermaße:			
24	Dampfaufnahme je Umlauf $D_n = D : 60 n$ kg/Uml	0,211	0,195
25	Theoretisches spezifisches Endvolumen $v'' = 0,2454 : D_n$ m ³ /kg	1,16	1,26
26	Zugehörig: Druck p'' nach i -s-Tafel at	1,37	1,20
27	Adiabatisches Wärmegefälle $\Delta i''_{ad}$ kcal/kg	90,8	97,2
28	Verschiebearbeit $N'' = \frac{10\,000}{427} \cdot (p'' - p_3) \cdot v''$ „	32,5	30,4
29	Arbeitsausbeute des idealen Kreisprozesses $\Delta i''_{ad} + N''$ „	123,3	127,6
30	Wirkungsgrad des idealen Kreisprozesses $\eta'' = \frac{\Delta i''_{ad} + N''}{i_1 - q_3}$ —	0,201	0,205
31	Gütegrad $\eta''_{g''_{th}} = \frac{859 \cdot N}{D \cdot (\Delta i''_{ad} + N'')}$ —	0,735	0,760

gefunden hat; denn auch der thermische Wirkungsgrad bessert sich mit der Überhitzung recht erheblich, von 0,148 bis 0,168; der thermische Wirkungsgrad geht also bei 46° Temperatursteigerung im Verhältnis 1 zu 1,14 herauf. Seine Verbesserung hat in einer mäßigen Steigerung des Wirkungsgrades des idealen Kreisprozesses, im wesentlichen aber in einer Verbesserung des Gütegrades seine Ursache. Der auf die Zylinderabmessungen bezogene Gütegrad steigt bis 79,5% an.

schiedenen Zustand des Frischdampfes.
siehe Tabelle 30.

Überhitzung		Wechselnder Druck				
		B. Leistung konstant		C. Belastungsgrad konstant		
155	156	86	89	90	88	87
12,1	12,15	11,1	9,8	9,3	9,9	10,9
229	236	197	198	196	203	207
691,3	695,2	675,2	677,6	677,2	680,9	681,1
0,166	0,157	0,19	0,20	0,21	0,24	0,25
55,7	54,5	58,6	59,8	60,8	63,6	64,6
635,6	640,7	616,6	627,8	616,4	716,3	616,5
166,0	168,8	154,0	148,5	144,2	144,5	145,9
0,261	0,263	0,249	0,237	0,234	0,234	0,236
127,0	127,4	117,9	119,0	118,1	128,8	142,9
16,0	15,4	14,5	6	1,5	1	1
116,7	116,2	114,1	114,1	113,6	113,8	113,3
152,8	152,5	134,7	138,7	140,3	151,5	162,6
25,8	25,1	16,8	19,7	22,2	22,7	19,7
2,26	2,25	1,88	2,01	2,11	2,26	2,43
1225	1208	1259	1349	1423	1508	1640
9	12	∞25	∞25	∞25	∞25	∞25
1234	1220	1284	1374	1448	1533	1665
41	38					
8,09	8,00	9,54	9,92	10,32	10,12	10,24
0,183	0,184	0,186	0,216	0,225	0,217	0,198
0,0320	0,0318	0,0342	0,0425	0,0470	0,0479	0,0477
0,167	0,168	0,146	0,138	0,135	0,137	0,136
0,640	0,636	0,584	0,583	0,577	0,587	0,575
0,177	0,175					
1,385	1,40					
1,14	1,12					
101,7	103,4					
31,6	31,6					
133,3	135,0					
0,210	0,211					
0,797	0,795					

In den Diagrammen Fig. 90 — an deren Einzelheiten manches auszusetzen ist — zeigt der Augenschein keinen Unterschied grundsätzlicher Art. Die Füllung des Hochdruckzylinders geht etwas zurück, entsprechend dem schwachen Steigen des Reglers. Wie weit diese Erscheinungen aber in der Überhitzung direkt begründet sind, steht dahin. Sie sind nämlich auch dadurch bedingt, daß die indizierte Leistung etwas zurückgegangen ist — nicht durch Mängel der Versuchsleitung, denn

die Nutzleistung blieb sehr befriedigend konstant, sondern indem der Getriebeverlust $N_i - N_b$ mit der Überhitzung recht stark abnimmt. Ob das stets eintritt und in der größeren Dünnpflüssigkeit des Öles begründet sein mag, bleibt offen. — Das Sinken des Aufnehmerdruckes mag teilweise aus dem gleichen Zusammenhang zu erklären sein.

Die Versuchsreihe *A* der Tabelle 33 war unter Konstanthalten der Nutzleistung durchgeführt worden. Da die Reglerstellung sich kaum änderte, so ist die Reihe zugleich auf konstanten Belastungsgrad bezogen. Die Höchstleistung der Maschine wird also durch die Überhitzung kaum beeinflusst.

Für *steigenden Druck des Frischdampfes* sind zwei Reihen gegeben, indem einmal die Leistung, ein zweites Mal die Reglerstellung konstant blieb. Der Regler stand bei Reihe *C* nur 1 mm über seiner tiefsten Stellung, die Maschine war daher dauernd auf ihrer höchsten Leistung. Das praktische Interesse dieser Reihen liegt darin, daß bei Versuchen stets der Druck des Frischdampfes innerhalb gewisser Grenzen zu schwanken pflegt, und daß man daher den Einfluß dieser Unregelmäßigkeit auf Versuchsergebnisse kennen sollte. — Beide Versuchsreihen sind auch in Fig. 91 zur Darstellung gebracht.

Zunächst bei einer *konstanten Leistung* von 118 kW zeigt sich bei Reihe *B* der Tabelle 33, daß die Dampfaufnahme mit fallendem Frischdampfdruck zunimmt, und zwar erheblich: als der Dampfdruck von 11,1 bis 9,3 at sank, nahm das von der Maschine aufgenommene Dampfgewicht von 1284 auf 1448 kg/h zu, das sind 12,7% von 1284. Da überdies bei sinkendem Dampfdruck die Dichte des einzufüllenden Dampfes ab-, sein spezifisches Volumen zunimmt, so nimmt das einzufüllende Volumen noch schneller zu, nämlich auf die Umdrehung bezogen von 0,0342 auf 0,0470 m³, um 37,5%. Daher muß sich die Füllung schnell vergrößern, der Regler sinken, und bei wenig unter 9,3 at wäre es dahin gekommen, daß die Maschine die ihr auferlegte Leistung nicht weiter durchhalten könnte. — Der Aufnehmerdruck nimmt bei unveränderter Leistung mit sinkendem Frischdampfdruck zu, weil ja immer größere Dampfgewichte die Maschine durchlaufen, und bei unveränderter Füllung des Niederdruckzylinders von diesem verarbeitet werden müssen. Die Dampfverteilung der Zylinder und die Arbeitsverteilung auf die beiden Zylinder wird daher bei abnehmendem Dampfdruck ungünstiger, obwohl die Diagramme bei normalem Druck gut waren; das ist, neben der verminderten Arbeitsfähigkeit des zugeführten Dampfes, mit ein Grund für die starke Zunahme des Verbrauches.

Im ganzen resultiert nämlich diese Zunahme, wie bei Überhitzung, teils aus einer auffallenden Änderung der Getriebeverluste, einer Abnahme des mechanischen Wirkungsgrades, zum anderen Teile aus einer Abnahme des thermischen Wirkungsgrades; und letztere wieder ist ebenso sehr in einer Verschlechterung des Gütegrades wie in einer Verschlechterung des Wirkungsgrades des idealen Vergleichsprozesses begründet.

Die starke Zunahme des Dampfverbrauches ist der Grund dafür, daß im allgemeinen der Heizer eines Kessels, wenn erst einmal während

des Abschlackens der Druck abzufallen beginnt, weiterhin immer weniger in der Lage ist, dem Dampfbedarf gerecht zu werden, solange man die gleiche Leistung von der Maschine verlangt. Erst eine zeitweise Einschränkung schafft Luft. Das Zusammenarbeiten des Kessels mit der Dampfmaschine ist also ein labiler Beharrungszustand, weil bei abnehmendem Druck die Entnahme steigt.

Die in Tabelle 33 wiedergegebene Reihe *C* bezieht sich auf unverändert tiefste Reglerstellung, also konstante Füllung des Hochdruckzylinders, und zeigt, was erklärlich ist, daß bei sinkendem Druck

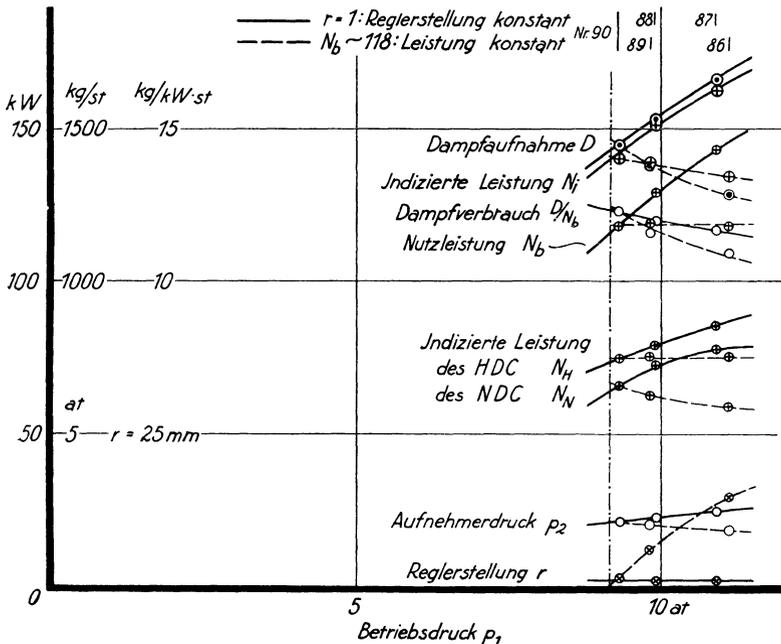


Fig. 91. Dampfmaschine bei wechselndem Dampfdruck, Leistung bzw. Belastung konstant.

die Höchstleistung der Maschine und auch die Dampfaufnahme sinkt. Über den Dampfverbrauch läßt sich daher nicht ohne weiteres etwas aussagen: Er nimmt, wie die Versuche lehren, zu, allerdings schwächer als bei konstanter Leistung, weil diesmal die Diagrammform unverändert bleibt, dank dem Umstande, daß der Aufnehmerdruck mit sinkendem Admissionsdruck ebenfalls fällt — weil ja kleinere Dampfgewichte in den Niederdruckzylinder einzufüllen sind. Die Drehzahl ist diesmal konstant.

Zu allen drei Reihen ist noch auf die Verschlechterung des Vakuums mit Zunahme des Dampfverbrauches hinzuweisen: die Verschlechterung des Vakuums erfolgt also mit sinkendem Dampfdruck, wenn man die Leistung, sie erfolgt mit steigendem Dampfdruck, wenn man die Füllung konstant hält; sie erfolgt endlich mit abnehmender Überhitzung.

Diese Ergebnisse werden sich qualitativ stets verallgemeinern lassen. Um in quantitativer Hinsicht Schlüsse über die Änderung der Verbrauchs- und Wirkungsgradzahlen wegen gegebener Abweichung vom Sollzustand des Dampfes zu ziehen, ist es lästig, daß keiner der Einzelfaktoren sich überwiegend konstant erweist. —

Das verfügbare Wärmegefälle wird durch die *Veränderung des Gegendruckes* besonders stark beeinflußt; wie man beim Abgreifen desselben aus dem *i s*-Diagramm bemerken kann, haben die mäßigen Änderungen des Gegendruckes p_3 infolge wechselnder zu verarbeitender Dampfmenge schon erheblichen Einfluß auf Δi_{ad} .

73. Einfluß der Drehzahl. Über den Einfluß der Drehzahl auf die Maschine innerhalb der mäßigen Grenzen, in denen die Veränderung bei normalen Betriebsmaschinen etwa in Frage kommt, gibt Tabelle 34 und Fig. 92 Auskunft.

Die *Regelung der Drehzahl* ist im allgemeinen durch Änderungen am Regler zu bewirken: indem man dessen Belastung — durch Gewichtszunahme oder Federanspannung, § 147 — steigert, erzwingt man die höhere Drehzahl, so daß erst bei höherer Drehzahl der Regler zu steigen beginnt, bei höherer Drehzahl als vordem in eine gewisse Stellung gelangt und damit der Maschine eine bestimmte Füllung und ein bestimmtes Drehmoment zuteilt.

Wenn man also bei unveränderter Füllung die Drehzahl zunehmen läßt, so bleibt das Drehmoment konstant, die Leistung steigt: $N = \frac{1}{973} \cdot M \cdot n$ und mit ihr die Dampfaufnahme. — Wenn man dagegen bei unveränderter Leistung die Drehzahl zunehmen läßt, so nimmt das Drehmoment ab: $M = 973 \cdot \frac{N}{n}$; die Füllung wird dann kleiner, der

Regler steigt, und würde, kann man die Steigerung fortsetzen, ohne den Bestand des Schwungrades zu gefährden, schließlich selbst in Stellungen gelangen, die dem Leerlauf entsprechen; bei der Freilaufdrehzahl wird alle vom Dampf entwickelte Energie von den Widerständen der Maschine aufgezehrt.

Diese in erster Linie gültigen Beziehungen werden gerade bei dem Versuch mit veränderter Drehzahl sekundär stark beeinflußt, indem bei höherer Drehzahl die Strömungswiderstände in den Steuerorganen an Einfluß gewinnen, so daß die Füllung sich hierdurch stark vermindert. Bei konstanter Reglerstellung wird daher mit steigender Drehzahl zwar die stündliche Dampfaufnahme natürlich steigen, die auf den Umlauf bezogene aber nicht etwa konstant bleiben, sondern schwach abnehmen; und entsprechend bleibt das Drehmoment nicht konstant, sondern nimmt schwach ab (§ 4).

Die Konstanz der Leistung ist der betriebstechnisch häufigere Fall: in einer elektrischen Zentrale ist die vom Netz verlangte Leistung zu erzeugen; die Wahl, ob man sie bei höherer oder kleinerer Drehzahl erzeugen will, steht in den Grenzen offen, innerhalb deren man mittels des Feldreglers noch die verlangte Betriebsspannung der Dynamo einstellen kann. Die Konstanz der Füllung ist näherungsweise beim Antrieb von Kolbenpumpen und Gebläsen verwirklicht, die gegen kon-

stanten Druck laufen. Beide Fälle werden durch Tabelle 34 und Fig. 92 belegt.

Tabelle 34. Dampfmaschine bei wechselnder Drehzahl.

Versuch Nr.		Leistung konstant Belastungsgrad konstant				
		95	93	92	94	96
1	Drehzahl n /min	141,2	127,9	113,8	126,3	141,2
2	Elektrische Leistung N_{ei} kW	139,0	139,4	141,3	155,6	159,7
3	Reglerstellung r mm	10,5	6,1	1,1	1,0	1,2
4	Indizierte Leistung N_i kW	177,8	178,1	177,6	192,9	202,4
5	entsprechendes Drehmoment M_i mkg	1225	1356	1519	1487	1395
6	Leistungsverlust $N_i - N_{ei}$ kW	38,8	38,7	36,3	37,3	42,7
7	entspr. Drehmoment $973 \cdot \frac{N_i - N_{ei}}{n}$ mkg	268	294	312	288	294
8	HDC: Indizierter Druck p_i' at	4,81	5,18	5,46	5,33	5,14
9	„ Indizierte Leistung N_H kW	104,4	101,8	95,5	103,4	111,4
10	„ „ „ $N_h = 100 \cdot \frac{N_H}{N_i}$ %	58,8	57,2	53,8	54,7	55,2
11	NDC: Indizierter Druck p_i'' at	1,30	1,49	1,80	1,77	1,61
12	„ Indizierte Leistung N_N kW	73,4	76,3	82,1	89,5	91,0
13	Dampfaufnahme: Arbeitsdampf D_a kg/h	1623	1670	1750	1901	1990
14	„ Manteldampf D_m „	24	25	40	26	27
15	„ Ingesamt D „	1647	1695	1790	1927	2017
16	Dampfverbrauch: D/N_{ei} kg/kW·h	11,8	12,2	12,7	12,4	12,6
17	„ D/N_i „	9,3	9,5	10,1	10,0	10,0
18	„ D/M_i kg/mkg	13,4	12,5	11,8	13,0	14,4
19	Frischdampf: Druck p_1 at	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0
20	„ Temperatur t_1 °C	216	221	224	220	223
21	Aufnehmerdruck p_2 at	1,85	2,05	2,44	2,45	2,35
22	Gegendruck p_3 „	0,24	0,26	0,24	0,29	0,24

Zunächst wurde wieder die entnommene *Leistung konstant* auf 140 kW gehalten; die indizierte Leistung war rund 178 kW. Druck, Vakuum, Dampftemperatur wurden nicht verändert, die Drehzahl änderte sich von 141 auf 114. Dabei nimmt die Dampfaufnahme der Maschine deutlich zu, also verschlechtert sich der Dampfverbrauch. Um nämlich bei sinkender Drehzahl doch noch die gleiche Leistung aus der Maschine zu ziehen, muß sich das von der Maschine geleistete Drehmoment erhöhen; um das zu zeigen, ist das der indizierten Leistung entsprechende Drehmoment $M_i = 973 \cdot \frac{N_i}{n}$ berechnet. Diese

Vermehrung führt zu einer Vergrößerung der Füllung, woraus allerdings direkt keine Vermehrung des Dampfverbrauches folgt, da zwar bei jedem Hub eine größere Dampfmenge, diese aber seltener eingefüllt wird. Mit der Vergrößerung der Füllung aber verkleinert sich der Expansionsgrad des in der Maschine wirkenden Dampfes, und aus dieser verschlechterten Dampfausnutzung folgt eine weitere Vergrößerung der Füllung und diesmal des Dampfverbrauches. Man beobachtet mit sinkender Drehzahl ein Fallen der Reglerhülse, entsprechend der

kleineren Füllung, und ein Abfallen des Aufnehmerdrucks. Letzteres hat ebenfalls eine doppelte Ursache: Einesteils wirkt die vergrößerte, durch die Maschine gehende Dampfmenge, andernteils aber auch die Tatsache auf den Aufnehmerdruck ein, daß zwar bei einem Hub stets das gleiche Volumen aus dem Aufnehmer genommen wird, solange die Füllung des Niederdruckzylinders konstant bleibt, daß aber die Entnahme öfter stattfindet, was die gleiche Wirkung haben muß, wie eine Vergrößerung der Niederdruckfüllung.

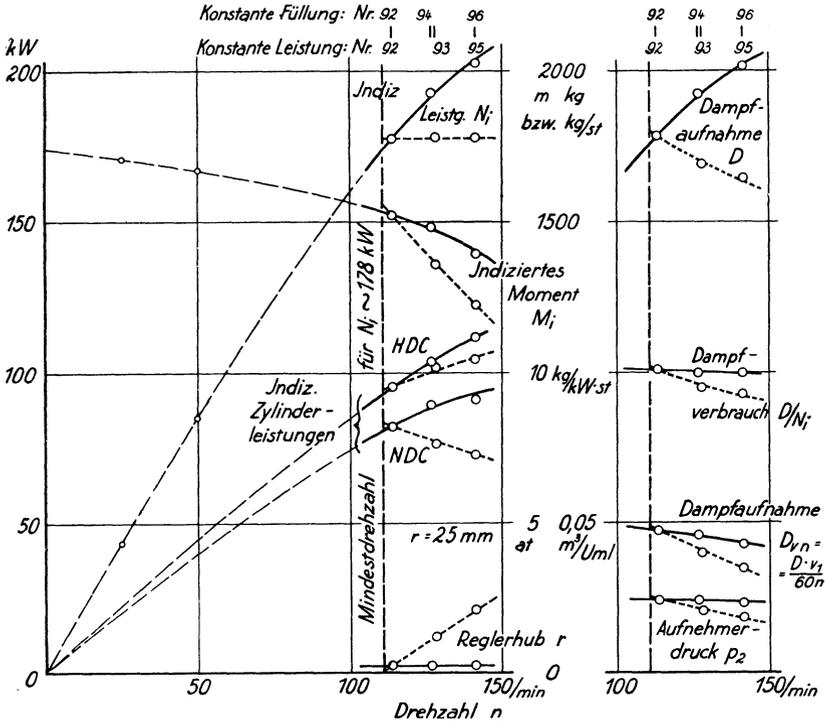


Fig. 92. Dampfmaschine bei wechselnder Drehzahl. Leistung bzw. Belastung konstant.

Schon die erwähnte Bewegung des Reglers belehrte uns, daß die Maschine bei steigender Drehzahl eine höhere Leistung herzugeben in der Lage ist; das bestätigt die Versuchsreihe B. Bei konstanter Hochdruckfüllung vermehrt sich die Dampfaufnahme der Maschine, es steigt aber auch die indizierte sowohl wie die elektrisch abzunehmende Leistung bei steigender Drehzahl. Darüber also, ob der relative Dampfverbrauch ungünstiger wird oder nicht, muß die Beobachtung entscheiden, die zeigt, daß $\frac{D}{N_i}$ fast konstant ist, vielleicht etwas sinkt.

Diese Tatsache rührt davon, daß die gesamte Diagrammform so gut wie unverändert bleibt, auch wenn die Drehzahl sich ändert: denn es sind alle die Diagrammform bedingenden Größen — zu denen

die Drehzahl erst durch Sekundäreinflüsse gehört — unverändert geblieben.

Die gedachten Sekundäreinflüsse sind darin zu finden, daß bei unveränderter theoretischer Diagrammform doch die Drosselverluste beim Ein- und Austritt beider Zylinder und beim Durchgang durch den Aufnehmer sich vergrößern. Dadurch sinkt mit steigender Drehzahl die volumetrische Aufnahme bei einem Hub von 0,0472 auf 0,0432 m³, also um 10%, es sinkt — bei steigender Leistung — der indizierte Druck selbst im Hochdruckzylinder, für den das Druckgefälle zunimmt. Das von der Maschine gelieferte Drehmoment sinkt — das aus der indizierten Leistung zu errechnende erheblich, das der elektrischen Leistung entsprechende deutlich, aber weniger.

Einen eigentümlichen Gang hat der Verlust im Getriebe einschließlich der Dynamo. Der Leistung nach ist er fast konstant, wenn die Leistung konstant bleibt; der Wirkungsgrad $\eta_{\text{mech}} \cdot \eta_{\text{dyn}}$ bleibt also unverändert. Bei gleicher Füllung steigt die verlorene Leistung mit der Drehzahl, so daß der Wirkungsgrad wieder konstant bleibt. Das verlorene Moment nimmt in jedem Falle mit steigender Drehzahl ab. Zur sicheren Beurteilung dieser Änderungen, wo die Differenzen der gemessenen Leistungen eingehen, reichen die Versuche nicht aus.

Die Nutzleistung der Dampfmaschine wurde nicht berechnet, weil es unsicher ist, wie sich die Leistungsverluste in der Dynamo (Fig. 77, § 67) mit der Drehzahl ändern mögen. Gut bemessene Dynamos freilich gehen in der Nähe des Sollzustandes durch ein Optimum hindurch, so daß die Verluste sich nahe dem Sollzustand wenig ändern: bei unveränderter Netzspannung kann mit steigender Drehzahl die Felderregung zurückgehen, die Feldverluste werden kleiner, die Zunahme der Hysteresisverluste aus der Tourenvermehrung wird geringer; andererseits steigt natürlich der Ventilations- und Reibungsverlust; beides gleicht sich einigermaßen gegeneinander ab.

Man kann nun die Frage stellen, ob *die kleinere oder die höhere Drehzahl den wirtschaftlicheren Betrieb ergibt.*

Im Falle *bestimmter verlangter Leistung* wird durch Steigerung der Drehzahl der Dampfverbrauch verbessert; im Beispiel entspricht der Drehzahlsteigerung von 113,8 auf 141,2, im Verhältnis 1 : 1,24, eine Verringerung des Verbrauches, bezogen auf die elektrische Leistung von 12,7 auf 11,8, im Verhältnis 1 : 0,93. Diese 7% Verbesserung darf indessen nicht als Reingewinn verbucht werden, sonst ergäbe sich zweifelsfrei die Regel, die Drehzahl der Dampfmaschine tunlichst zu steigern. Dagegen zu rechnen ist aber die vermehrte Abnutzung; dieselbe ist in Zylindern, Lagern, Kollektor mindestens der Drehzahl proportional anzusetzen. Wo man bei der Drehzahl 113,8/min vielleicht mit 10% Abschreibung rechnen wollte, hat man bei der höheren Drehzahl $10 \times 1,24 = 12,4\%$ dafür in Berechnung zu bringen. Bei einem Maschinenwert von rund 30 000 Mark¹⁾ ist die Abschreibung 2,4% oder 720 Mark

¹⁾ Preise von vor dem Kriege; durch die Preisänderungen verschieben sich die absoluten Zahlen, nicht aber die Relativwerte.

höher zu bemessen, will man beiden Betriebsarten gleichmäßig gerecht werden. Die Dampfersparnis aber — unter der Annahme der Leistung 140 kW für $300 \times 10 = 3000$ Betriebsstunden jährlich — wäre $(1790 - 1647) \cdot 3000 = 429\,000$ kg jährlich, das mögen $429\,000 \cdot 1,1 = 472\,000$ kg Dampf am Kessel sein, entsprechend $472\,000 : 7 = 67\,000$ kg Kohle zu 2,5 Pfg. also 1680 Mark. Ein merklicher Vorteil von rund 1000 Mark bleibt also immerhin zugunsten der höheren Drehzahl bestehen.

Im Falle *bestimmten verlangten Drehmomentes* schlägt diese Rechnung nicht durch. Meist ist hier insgesamt *eine gewisse Arbeit* zu bewältigen, etwa für ein Wasserwerk der Wasserbehälter aufzufüllen, für ein Kühlhaus der Wärmeverlust zu decken; die tägliche Betriebsdauer kann dann bei höherer Drehzahl vermindert werden. Aber nicht im Verhältnis der Drehzahl. Denn während im Beispiel die Drehzahl im Verhältnis 1 : 1,24 stieg, wuchs die Leistung nur von 141,3 auf 159,7 kW, im Verhältnis 1 : 1,13. Im bezug auf eine bestimmte zu liefernde Arbeit ist also der Betrieb mit hoher Drehzahl merklich ungünstiger. Das kann noch schlimmer werden, wenn der Arbeitsbedarf selbst mit der Geschwindigkeit der Förderung steigt; bei einer Pumpe ist das der Fall, sobald die Förderhöhe nicht rein geodätisch ist, § 116, 125, 131. Bei hydraulischer Förderhöhe, aber bestimmter, zu fördernder Wassermenge ist also die möglichst gleichmäßige, über den ganzen Tag verteilte Förderung vorteilhaft. Ähnlich bei *Kühlanlagen*: mit zunehmender Drehzahl steigt die Kälteleistung grundsätzlich ihr proportional, und die Betriebsdauer kann umgekehrt proportional verringert werden. Mit der Kälteleistung nehmen aber zu die Widerstände des Kälteträgers in Ventilen und Rohrleitung und des Wärmeüberganges durch die Heizflächen des Kondensators und Verdampfers, mit anderen Worten es wächst, thermisch gesprochen, die zu überwindende Temperaturstufe oder, mechanisch gesprochen, die zu überwindende Druckstufe und daher der indizierte Druck. Diese sekundären Einflüsse beeinträchtigen die Wirtschaftlichkeit des Betriebes mit höherer Drehzahl trotz kürzerer Betriebszeit; wieweit der Fehlbetrag wieder aufgeholt wird, wenn in der kürzeren Betriebszeit die Wärmeverluste des Kessels fallen, wenn also die Betriebspause für den Kessel sich vergrößert, das steht dahin; der Einfluß fällt jedenfalls fort, wenn der Kessel zu anderem Zweck ohnehin in Betrieb ist.

Wesentlich ist es, sich die Größenordnung der Beträge einzuprägen, um die es sich handelt. Aus den Beispielen geht hervor, daß einige, wenn auch *mit betriebstechnischen Mitteln vorgenommene Versuche über die günstigste Drehzahl* einer Kolbendampfmaschinen-Anlage den Zeitaufwand *lohnen* können, selbst bei kleineren Anlagen dann, wenn es sich um durchgehenden Betrieb handelt (Entwässerungspumpwerke, Kühlanlagen). Auch heißt „mit betriebstechnischen Mitteln“ natürlich nicht „ohne Sorgfalt“.

Für *Abnahmeversuche* folgt aus den gemachten Darlegungen, daß die Innehaltung der vorgeschriebenen Drehzahl durch die Dampfmaschine wichtig ist. Wo die Leistung festliegt, würde durch Überschreitung der Drehzahl die Innehaltung des garantierten Dampfverbrauches er-

leichtert werden auf Kosten der Lebensdauer; wo eine bestimmte Arbeit zu verrichten ist, würde durch Überschreitung der Drehzahl zwar kaum der Dampfverbrauch verändert; wohl aber würde der gesamte Kohlen- oder Dampfbedarf eines Tages ungünstig beeinflusst werden — in welchem Maße, hängt von der Charakteristik der anzutreibenden Anlage ab. —

Wir nehmen hier wie immer bisher die gleichbleibende Reglerstellung als Zeichen gleichbleibender Füllung. Gerade bei wechselnder Drehzahl aber trifft diese Annahme nur bedingt zu, nämlich nur für zwangsläufige Steuerungen. Bei Ausklinksteuerungen indessen bleibt zu beachten, daß der Fall des Ventiles stets gleiche Zeit, also bei wechselnder Drehzahl verschiedene Kolbenwege in Anspruch nimmt; das wirkt auf Vergrößerung der Füllung und damit des Drehmomentes mit der Drehzahl, und kann in Verbindung mit der normalen Abnahme der Momenten-Kennlinie (§ 4) zur Erreichung eines Höchstwertes führen. Die Diagramme Fig. 93 zeigen das: Es ergab sich:

	bei Kondensation			bei Auspuff		
	75	100	128 /min	75	100	128
bei der Drehzahl	2,99	3,04	2,78 at	2,22	2,24	2,05

und man sieht hierin, sowie weil in die Diagramme jedesmal die Füllung 10% eingetragen ist, die besprochenen Einflüsse. Die scheinbare Füllung wird um so größer, je höher die Drehzahl, trotzdem nimmt p_1 und daher das Moment nicht dauernd zu, sondern nur bis zu einem Höchstwert. — Die Diagramme sind in § 81 weiter besprochen.

74. Einfluß der Niederdruckfüllung. Innere Änderungsmöglichkeiten im Betriebe der Dampfmaschine sind: die Füllung des Niederdruckzylinders und die Kompression an allen Zylindern. Der Einfluß wechselnder Füllung des Niederdruckzylinders wird durch Tabelle 35,

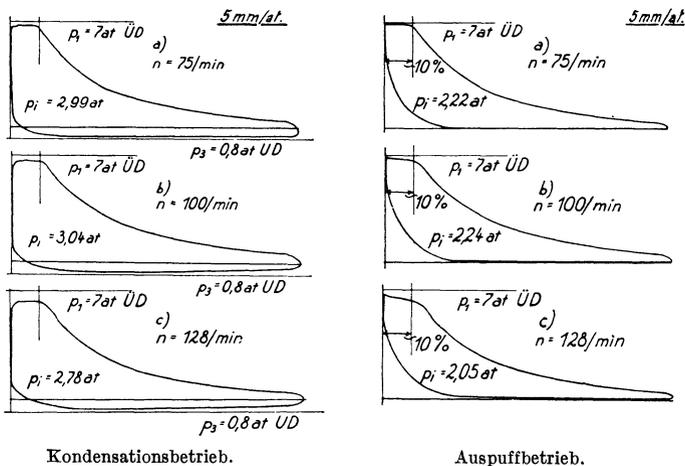


Fig. 93. Einfluß der Drehzahl auf die Diagrammform. $\frac{2}{3}$ nat. Gr. Vergleichshalber ist in den Diagrammen die Füllung 10% durch eine senkrechte Linie angemerkt.

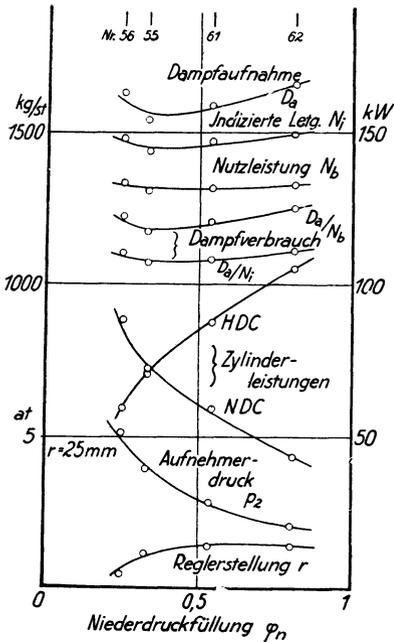


Fig. 94. Dampfmaschine bei verschiedener Füllung des NDC.

durch das Schaubild Fig. 94 und durch die Dampfdiagramme Fig. 95 erläutert.

Bei (nicht sehr gut) konstant gehaltenen Leistung von rund 132 kW, gemessen als Leistungsaufnahme der belastenden Dynamo, wurde die Füllung φ_n des Niederdruckzylinders verändert von 25 bis 81%. Der Dampfdruck p_1 war befriedigend konstant, die Dampftemperatur nicht sehr gut. Die Maschine lief mit Auspuff, der Gegendruck betrug also $p_3 = 1,05$ at (Barometerstand 767 mm QuS). Die Drehzahl n ist im wesentlichen konstant, ein geringer Anstieg bei Vergrößerung der Füllung rührt davon her, daß der Regler, dessen Höhe über dem Aufsitzen mit r bezeichnet ist, sich etwas hob; die Gründe folgen sogleich. Die indizierte Leistung schwankt in annähernd gleichen Grenzen, innerhalb deren sich die Nutzleistung durch mangelhaftes Konstanthalten bewegte. Immerhin ist der Unterschied $N_i - N_b$ in auffälliger Weise — ob zufällig, bleibt fraglich — bei mittlerer Füllung am kleinsten, so daß N_b noch schlechter konstant blieb als N_i .

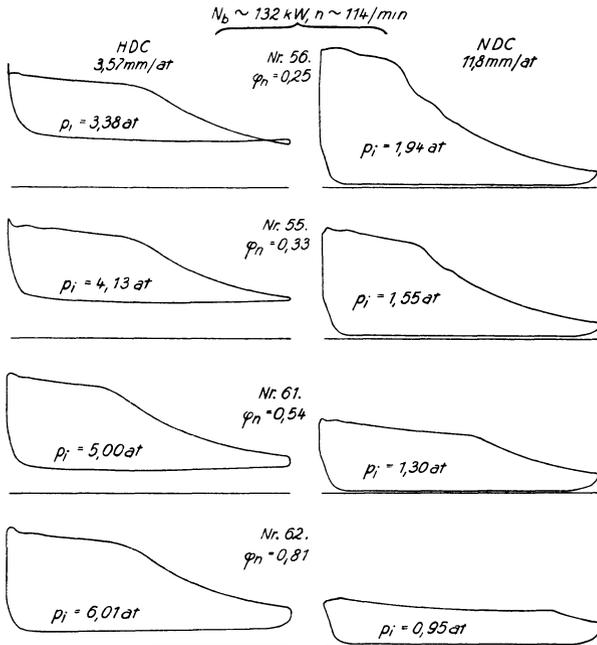


Fig. 95. Diagramme der Dampfmaschine bei verschiedener Füllung des NDC. $\frac{2}{5}$ nat. Gr.

Der Dampfverbrauch ist deutlich bei mittelgroßer Füllung des Niederdruckzylinders am günstigsten. Das Optimum scheint, bezogen auf N_b , etwa bei 40% Füllung, bezogen auf N_i , etwa bei 50% zu liegen, Werte, die natürlich von der Art der Maschine,

ihrer sonstigen Einsteuerung und von der Höhe der Belastung abhängig sein können.

Tabelle 35. Einfluß der Niederdruckfüllung auf den Gang der Dampfmaschine.

Versuch Nr.		56	55	61	62
1	Niederdruckfüllung φ_n —	0,254	0,334	0,536	0,812
2	Drehzahl n /min	113,9	114,1	114,1	114,2
3	Reglerstand r mm	2,2	5,8	6,8	7,0
4	Indizierte Leistung N_i kW	147,8	143,4	147,0	149,2
5	Bremsleistung N_b „	133,2	130,8	131,3	132,0
6	Getriebeverlust $N_i - N_b$ „	14,6	12,6	15,7	17,2
7	Dampfaufnahme (ohne Mäntel) D_a kg/h	1628	1538	1589	1657
8	Dampfverbrauch: D_a/N_i . . kg/kW·h	11,02	10,72	10,81	11,11
9	„ D_a/N_b . . „	12,22	11,76	12,08	12,51
10	Frischdampf: Druck p_1 at	11,8	11,9	11,8	12,0
11	„ Temperatur t_1 °C	234	229	207	222
12	Aufnehmerdruck p_2 at	5,1	3,95	2,85	2,1
13	Gegendruck p_3 „	1,05	1,05	1,05	1,05
14	Leistungsanteil des HDC kW	59,2	72,5	87,7	105,6
15	„ „ „ „ „ %	0,401	0,505	0,596	0,707
16	Leistungsanteil des NDC kW	88,6	70,9	59,3	43,6

Besonders stark verändert sich mit der Füllung des Niederdruckzylinders der Druck p_2 im Aufnehmer: er sinkt mit steigender Füllung φ_n . Der Grund davon ist unschwer zu erkennen. Jederzeit muß dasjenige Dampfgewicht, das in den Hochdruckzylinder vom Regler eingelassen ist, auch in den Niederdruckzylinder eingefüllt werden; dieses Dampfgewicht ist, innerhalb der oben besprochenen Grenzen, immerhin annähernd konstant. Bei einer Änderung der Füllung muß sich daher der Aufnehmerdruck so einstellen, daß bei einem Hube bis zum Absperren des Niederdruckzylinders immer das (annähernd) gleiche Dampfgewicht in ihm eingefüllt wird; das führt, bei verkleinerter Füllung, also verkleinertem, einzufüllendem Volumen, zur Vergrößerung der Dampfdichte, also des Dampfdruckes.

Das Ansteigen des Aufnehmerdruckes mit Verkleinerung der Füllung φ_n hat noch folgende Nebenwirkung. Die Kompression des Hochdruckzylinders hat stets den gleichen Wert, das heißt das Verhältnis des Kompressions-Anfangsvolumens (oder -druckes) zum Kompressions-Endvolumen (oder -druck) bleibt etwa unverändert. Bei kleinem φ_n wird also mit dem Kompressionsanfangsdruck auch der Kompressionsenddruck des Hochdruckzylinders ansteigen. Das führt bei kleinstem φ_n schon zur schwachen Schleifenbildung am Ende der Kompression. Bei kleinem Aufnehmerdruck, großem φ_n dagegen geht die Kompression bei weitem nicht auf den Frischdampfdruck. Während nun im ersten Fall die Dampfaufnahme für den Hub einfach durch die Länge der Füllung φ_H im Diagramm gegeben ist, gibt diese Länge im zweiten Fall nur einen

Teil der aufgenommenen Dampfmenge wieder, und die Dampfaufnahme ist größer als es der Füllungsänge im Hochdruckdiagramm entspricht; zu ihr kommt nämlich hinzu die Dampfmenge, die den schädlichen Raum vom Kompressionsend- auf den Einströmdruck auffüllt. Diese zusätzliche Dampfaufnahme (§ 78) hat zur Folge, daß bei der Vergrößerung von φ_n von 53,6 auf 81,2% der Regler zwar noch weiter von 6,8 auf 7,0 mm hochgeht; daraus darf man aber nicht auf weitere Verminderung der Dampfaufnahme schließen; diese ist vielmehr von 1589 auf 1657 gestiegen.

Das Heraufgehen des Reglers bei vergrößerter Niederdruckfüllung zeigt, daß die Maschine sich von ihrer Höchstleistung entfernt; die Leistung bei einer bestimmten Reglerstellung und die Höchstleistung der Maschine steigt mit wachsender Füllung des Niederdruckzylinders dauernd, zuerst unter Verbesserung, weiterhin unter Verschlechterung des Dampfverbrauches. Die Reglerstellung läßt also Schlüsse auf die Dampfaufnahme nicht zu, sobald verschieden hohe Kompressionsendrücke ins Spiel kommen.

Diese Ergebnisse dürften sich qualitativ bei anderen Maschinen wiederholen.

Tabelle 36. Einfluß der Niederdruckfüllung bei verschiedener Leistung.

Niederdruckfüllung φ_n —		0,254	0,334	0,536	0,812
Versuch Nr.					
1	Indizierte Leistung N_i kW	58	53	59	64
2	Dampfaufnahme (ohne Mäntel) D_a kg/h	74,6	79,2	76,8	76,3
3	Dampfverbrauch D_a/N_i . . . kg/kW·h	886	899	849	851
Versuch Nr.					
4	Indizierte Leistung N_i kW	11,88	11,36	11,07	11,17
5	Dampfaufnahme (ohne Mäntel) D_a kg/h	57	54	60	63
6	Dampfverbrauch D_a/N_i . . . kg/kW·h	122,2	123,4	124,1	123,6
Versuch Nr.					
7	Indizierte Leistung N_i kW	1311	1321	1300	1315
8	Dampfaufnahme (ohne Mäntel) D_a kg/h	10,72	10,70	10,48	10,63
Versuch Nr.					
9	Indizierte Leistung N_i kW	56	55	61	62
10	Dampfaufnahme (ohne Mäntel) D_a kg/h	147,8	143,4	147,0	149,2
11	Dampfverbrauch D_a/N_i . . . kg/kW·h	1628	1538	1589	1657
12	Dampfaufnahme (ohne Mäntel) D_a kg/h	11,02	10,72	10,81	11,11

Es war aber schon gesagt worden, es bleibe fraglich, ob auch *bei verschiedener Leistung* die Niederdruckfüllung $\varphi_n \approx 40\%$ stets die günstigste sei. Hierüber gibt Tabelle 36 sowie Fig. 96 Auskunft. Es zeigt sich, daß die Füllung $\varphi_n \approx 50\%$ von halber bis herauf zu voller Leistung gleichmäßig die günstigste ist. Allerdings verlaufen die Kurven $D_a = f(N_i)$ um so steiler, je größer die Füllung ist: bei 75 kW liegt die Kurve $\varphi_n = 25,4\%$ oben, bei 150 kW die Kurve $\varphi_n = 81,2\%$. Bei hoher Leistung ist also ein Übertreiben der Niederdruckfüllung schädlicher als das Gegenteil, bei kleiner Leistung ist es umgekehrt. Der Größenordnung nach handelt es sich bei hoher Leistung um Unterschiede von im ganzen $11,11 - 10,72 = 0,39$ kg/kW·h oder $3,5\%$, die bei der weitgehenden Veränderung von φ_n in Tabelle 36 vorkommen; bei

halber Leistung steigt der Mehrverbrauch bei schlechter Einstellung auf 0,81 kg/kW · h oder 7,2% des günstigst möglichen.

Wie man aus den Indikatordiagrammen die beste Einstellung finden kann, wird in § 81 und 82 besprochen.

75. Einfluß der Kompression bei verschiedenem Gegendruck.

Außer der Niederdruckfüllung kann noch die Kompression in beiden Zylindern willkürlich verändert werden. Den Einfluß der Änderung auf die Diagrammform zeigen Fig. 97a und b. Es sind noch Diagrammpaare mit Auspuff- und mit Kondensationsbetrieb übereinander gestellt, die Nutzleistung war stets etwa 125 kW. Die Diagramme entstammen den Versuchsreihen A und C, die neben 2 weiteren in Tabelle 37 gegeben sind; bei jeder dieser 4 Versuchsreihen war der Gegendruck vom Kondensatordruck bis auf den atmosphärischen durch Lufteinlassen in den Kondensator allmählich gesteigert worden.

Ausgehend von Nr. 66, Auspuff und kleine Kompression, ist bei Nr. 76 Kondensationsbetrieb erreicht. Man wird nach dem Augenschein die Diagramme der Nr. 66 für gut halten, abgesehen etwa von der zu geringen Vorausströmung am Niederdruckzylinder, vgl. § 81. Bei Nr. 75

wird man vermutlich die Kompression als zu klein tadeln, namentlich am Niederdruckzylinder, aber auch am Hochdruckzylinder. — In Nr. 77 ist die Kompression beider Zylinder vergrößert, und es sind dadurch beim Kondensationsbetrieb gute Diagramme erzielt worden. Gehen wir aber nun zum Auspuff über, so erhalten wir beträchtliche Schleifenbildung an beiden Zylindern, und daher recht mangelhafte Diagramme. Beim Übergang zur größeren Kompression (25% gegen 10%) war auch die Niederdruckfüllung vergrößert worden, weil sonst die Hochdruckschleife bei Auspuffbetrieb noch größer geworden und auch bei Kondensation aufgetreten wäre.

Bei Auspuffbetrieb gibt also der kleinere, bei Kondensationsbetrieb der größere der beiden zum Vergleich gestellten Kompressionsgrade die besten Diagramme. Geht man von einer zur anderen Betriebsart über,

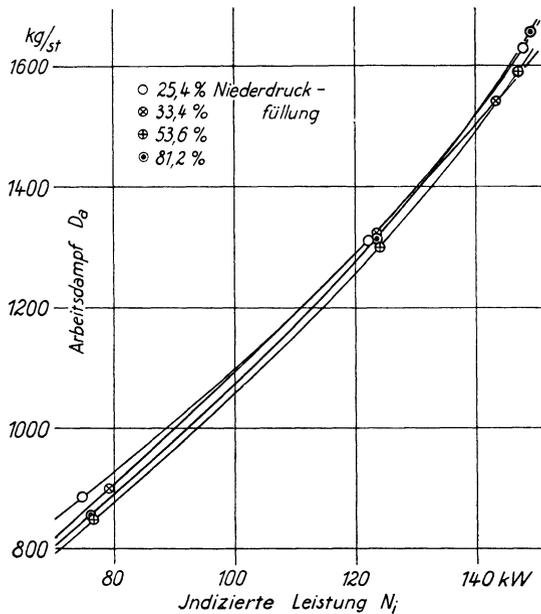


Fig. 96. Dampfaufnahme der Dampfmaschine bei verschiedener Niederdruckfüllung und verschiedener Leistung.

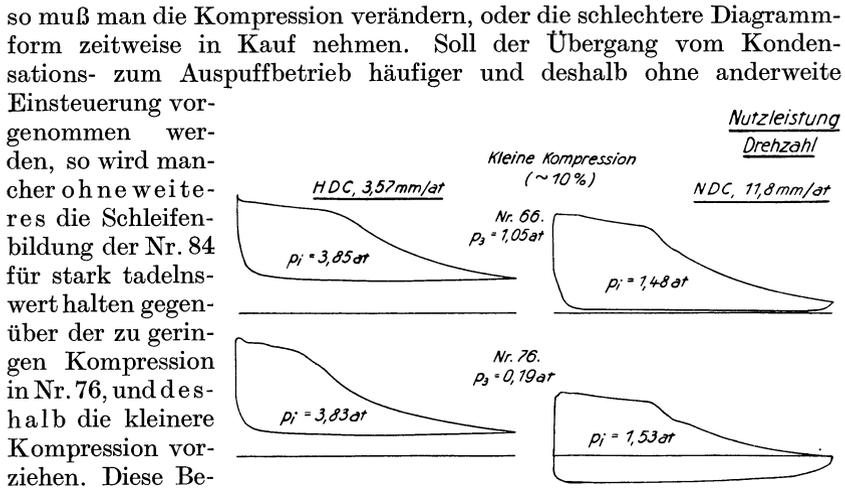


Fig. 97a. Kleine Kompression.

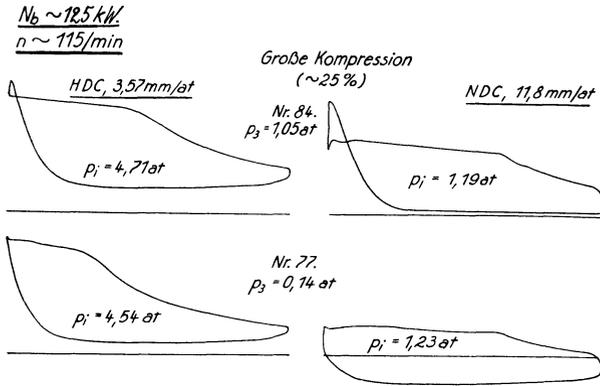
Fig. 97. Dampfmaschinenendiagramme bei

Wahl wäre vorzuziehen. Diese Begründung der Wahl wäre vorzuziehen: *grundsätzlich* ist die *beste Diagrammform* diejenige, bei der alle vorkommenden, nicht umkehrbaren Vorgänge zusammen genommen einen Mindestwert annehmen. Nun sind aber die Schleifen an sich keine nicht um-

Tabelle 37. Einfluß des Kompressionsgrades

Versuch Nr.	10% Kompression					
	A. Leistung konstant				B. Belastungs-	
	66	71	74	76	66	72
1 Nutzleistung N_b kW	118,6	118,9	119,6	119,9	118,6	131,2
2 Reglerstellung r mm	9,0	12,6	16,6	19,5	9,0	9,0
3 Gegendruck p_3 at	1,05	0,74	0,47	0,19	1,05	0,74
4 Drehzahl n /min	114,6	115,3	116,0	116,8	114,6	114,6
5 Indizierte Leistung N_i . . . kW	135,8	136,6	140,0	140,4	135,8	148,3
6 Getriebeverlust $N_i - N_b$. . . „	17,2	17,7	20,4	20,5	17,2	17,1
7 Leistungsanteil: HDC : N_H . . . „	67,8	69,8	68,8	68,7	67,8	70,4
8 „ NDC : N_N . . . „	68,0	66,8	71,2	71,7	68,0	77,9
9 „ HDC : N_h . . . %	49,9	51,2	49,2	48,9	49,9	47,5
10 Dampfaufnahme: Arbeitsdampf D_a kg/h	1466	1283	1271	1197	1466	1504
11 Dampfaufnahme: insgesamt D „	1488	1305	1286	1211	1488	1519
12 Dampfverbrauch D/N_b kg/kW · h	12,54	10,98	10,75	10,10	12,54	11,65
13 „ D/N_i „	10,96	9,55	9,18	8,62	10,96	10,30
14 Mehrverbrauch bei großer Kompression $\left. \begin{matrix} D/N_b \\ D/N_i \end{matrix} \right\}$ —						
15 Druck des Frischdampfes . . at	11,8	11,9	11,9	12,0	11,8	11,8
16 Druck im Aufnehmer . . . „	3,83	3,35	3,07	2,75	3,83	3,72
17 Frischdampf Temperatur . . °C	216	226	204	208	216	211

kehrbaren Vorgänge. Irreversibel ist bei Nr. 84 der Druckausgleich im Augenblick der Voreinströmung; es gleichen sich beim Hochdruckzylinder etwa 2 at, beim Niederdruckzylinder etwa 1,5 at aus. Aber auch in



Nr. 76 ist ein irreversibler Druckausgleich, wegen zu kleiner Kompression, vorhanden, und zwar handelt es sich hier um anscheinend etwa 5 at beim

Hochdruckzylinder, um etwa 2 at beim Niederdruckzylinder. Da die ausgeglichenen Volumina beidemal dieselben sind — beidemal der

Fig. 97 b. Große Kompression. Auspuff und Kondensation. 2/5 nat. Gr.

schädliche Raum —, so ist der Einlaßvorgang bei Nr. 76 ungünstiger als bei Nr. 84.

Diese Darlegung soll nur dem weitverbreiteten Vorurteil entgegen-

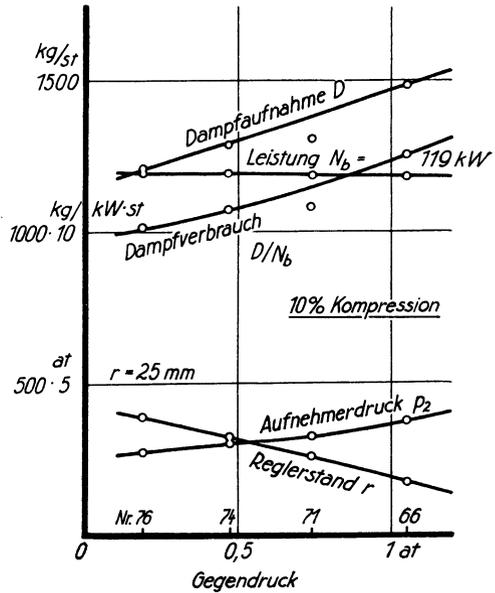
und des Gegendruckes auf die Dampfmaschine.

grad konstant		25% Kompression							
		C. Leistung				D. Belastungsgrad konstant			
73	75	84	81	80	77	83	82	79	78
140,1	145,3	118,3	119,2	117,2	119,1	105,9	116,3	127,7	134,7
9,0	9,0	4	7,2	14,5	17,5	9	9	9,3	8,8
0,45	0,22	1,05	0,73	0,47	0,14	1,05	0,73	0,46	0,22
114,6	114,8	113,7	114,0	114,1	115,2	114,0	114,0	113,8	114,1
158,4	165,1	136,7	138,1	132,3	137,0	121,6	134,0	145,3	154,5
18,3	19,8	18,4	18,9	15,1	17,9	15,7	17,7	17,6	19,8
72,7	75,9	82,4	83,4	80,6	80,4	80,4	83,1	85,5	87,7
85,7	89,2	54,3	54,7	51,7	56,6	41,2	50,9	59,8	66,8
45,9	46,1	60,3	60,4	60,8	58,7	66,2	62,0	59,8	56,8
1509	1539	1621	1517	1312	1256	1387	1411	1444	1504
1541	1556	1637	1537	1328	1305	1397	1430	1459	1515
11,00	10,71	13,84	12,89	11,33	10,96	13,20	12,29	11,42	11,24
9,73	9,43	11,98	11,13	10,04	9,53	11,49	10,67	10,04	9,81
		1,10	1,17	1,05	1,09	1,05	1,05	1,04	1,05
		1,09	1,16	1,09	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
12,0	12,0	11,8	11,9	12,0	11,9	11,9	12,0	12,0	11,9
3,63	3,54	2,86	2,56	2,08	1,81	2,54	2,46	2,26	2,13
211	207	204	205	204	196	214	219	209	204

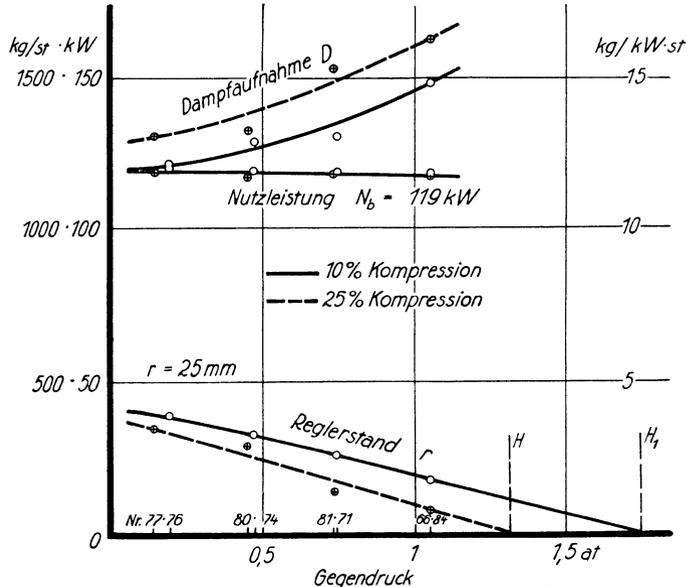
treten, als eine Schleife im Diagramm das allerschlimmste. Die Messung wird gleich die große Kompression doch als die ungünstigere erweisen; nur ist daran nicht die Schleifenbildung schuld, sondern die Vergrößerung der beim Ausströmen vorkommenden irreversiblen Spannungsausgleiche. Das Hochdruckdiagramm läuft bei Nr. 76 rechts spitz aus, bei Nr. 84 gleichen sich im Augenblick der Vorausströmung des Hochdruckzylinders etwa 1,3 at Druckunterschied aus; das Niederdruckdiagramm von Nr. 76 läßt etwa 0,7 at das von Nr. 84 aber läßt 0,9 at Druckunterschied zum Ausgleich kommen; hier ist bei beiden Zylindern der Betrieb mit kleiner Kompression im Vorteil, und das muß um so

mehr auf den Dampfverbrauch einwirken, als diesmal immer das große Zylindervolumen (zuzüglich schädlichem Raum) die irreversible Zustandsänderung durchmacht. Übrigens ist, bei dieser Betrachtungsweise, auch Nr. 66 gegen Nr. 77 im Vorteil, und deshalb läßt sich rein aus den Diagrammen annehmen, die Einsteuerung der Maschine mit kleiner Kompression werde bei Kondensation und bei Auspuff günstiger sein als die mit großer.

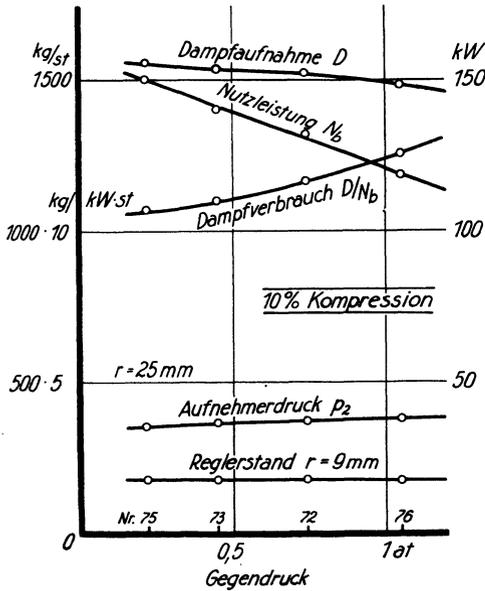
Das bestätigen nun die Versuche, die in Tabelle 37 gegeben sind; einige



Dampfmaschine bei verschiedenem Gegendruck, Fig. 98. Leistung konstant.



Dampfmaschine bei verschiedenem Gegendruck, vom Kondensations- Fig. 100. Leistung konstant.

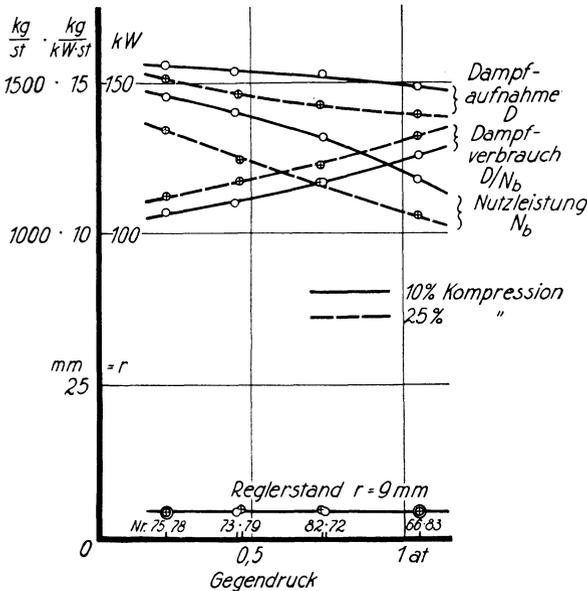


vom Kondensations- bis zum Auspuffbetrieb.
Fig. 99. Belastung konstant.

Vergleichswerte sind in Fig. 98 und 99, 100 und 101 zusammengestellt. Bei den Versuchen ist einmal die Leistung, ein zweites Mal der Belastungsgrad konstant gehalten; der Übergang vom Auspuff- zum Kondensationsbetrieb ist allmählich und mit Beobachtung einiger Zwischenstufen vorgenommen.

Über die Versuchsausführung wäre nur zu erwähnen, daß der Übergang in der Richtung vom Kondensations- zum Auspuffbetrieb jederzeit und beliebig schnell vorgenommen werden darf. Man bewirkt die Zerstörung des Vakuums, indem man in den Kondensator Luft einläßt, und die einströmende Menge mittels eines Hahnes oder anderswie regelt. Die gleiche Wirkung tut eine Verminderung der

Kühlwassermenge, doch ist diese Regelung zum Beispiel bei Verwendung von Kreiselpumpen wenig bequem. In bezug auf die Dampfmaschine sind beide Arten der Regelung gleichwertig, da unter allen



bis zum Auspuffbetrieb, und bei kleiner und großer Kompression.
Fig. 101. Belastung konstant.

Umständen im Verbindungsrohr von der Maschine zum Kondensator nur Dampf strömt, und, der Natur der Sache nach, niemals Luft zur Maschine zurücktreten kann, außer etwa im Augenblick der Regelung. — Der Übergang im entgegengesetzten Sinn, vom Auspuff- zum Kondensationsbetrieb, muß vorsichtig vorgenommen werden. Beim Auspuffbetrieb befinden sich die Eisenteile des Kondensators und der Kondensatpumpe auf 100°, Vakuum kann daher nur

in dem Maße entstehen, wie die Eisenmassen ihre Wärme abgeben; beim Absperren der Luft hört die Kondensatpumpe plötzlich auf zu fördern, sobald der Druck im Kondensator unter den Wert zu sinken strebt, der der Temperatur ihrer Eisenmassen entspricht. Dann sammelt sich Wasser im Kondensator und gelangt unter Umständen in den Zylinder der Luftpumpe oder gar der Dampfmaschine. Bei nasser Kondensatpumpe liegt diese Schwierigkeit weniger vor.

Es soll nun an Hand der Tabelle 37 und Fig. 98 und 99 zunächst der Einfluß allmählicher Veränderung des Gegendruckes besprochen werden, in Ergänzung zu dem in § 68 Gesagten. Weiterhin bleibt der Einfluß der verschiedenen Kompression an Hand von Fig. 100 und 101 zu besprechen.

Die allgemeinen Erscheinungen beim Übergang vom Auspuff- zum Kondensationsbetrieb sind die gleichen, ob nun die Kompression klein oder groß ist. Mit *sinkendem Kondensatordruck* wird die Dampfaufnahme der Maschine erheblich kleiner, sofern man die *Leistung konstant* hält. Dagegen steigt die aus der Maschine zu ziehende Leistung, sofern man den *Reglerstand r* und daher annähernd auch die Dampfaufnahme *konstant* hält. In beiden Fällen sinkt mit Übergang zum Kondensationsbetrieb der Dampfverbrauch. Mit sinkendem Gegendruck vermindert sich auch, bei konstanter Leistung, der Aufnehmerdruck, weil immer kleinere Dampfgewichte durch die Maschine gehen und also auch in den Niederdruckzylinder einzufüllen sind. Die Erscheinung erklärt sich ebenso wie die Änderungen des Aufnehmerdruckes bei wechselnder Leistung der Maschine (§ 67) oder bei wechselnder Niederdruckfüllung (§ 74).

Wenn die Reglerstellung und damit die *Füllung des Hochdruckzylinders konstant* gehalten wird, so bleibt jedoch die Dampfaufnahme nicht genau konstant; sie nimmt mit abnehmendem Kondensatordruck wenig, aber stetig zu. Es vermindert sich nämlich mit sinkendem Kondensatordruck die Kompressionsendspannung im Niederdruckzylinder und daher die zur Auffüllung seines schädlichen Raumes erforderliche Dampfmenge. Das führt zu einem schwachen aber stetigen Herabgehen des Aufnehmerdruckes mit fallendem Kondensatordruck. Hierdurch nun sinkt die Kompressionsendspannung auch des Hochdruckzylinders, es steigt die zum Auffüllen seines schädlichen Raumes nötige Dampfmenge. Die vermehrte Dampfaufnahme wirkt freilich ihrerseits dem Sinken des Aufnehmerdrucks entgegen, ohne ihn aber ganz auf gleicher Höhe halten zu können: beide gleichen sich gegeneinander ab.

Die Drehzahl steigt bei konstanter Leistung mit Verbesserung des Vakuums schwach an, weil der verringerte Dampfverbrauch den Regler steigen macht. Wird der Regler in bestimmter Stellung gehalten, so behält auch die Drehzahl ihren Wert bei.

Wir vergleichen nun die beiden Reihenpaare miteinander, die sich durch *verschiedene Kompression* beider Zylinder voneinander unterscheiden. Wir stellen durch Vergleich der Reihen *A* und *C* (Fig. 100) fest, daß die Dampfaufnahme bei bestimmter Leistung bei kleiner Kompression kleiner ist; also wird auch der Dampfverbrauch ent-

sprechend günstiger. Was nach den Diagrammen vorauszusehen war, bestätigt sich also. Es handelt sich um Unterschiede von gegen 10% (der Unterschied von 17% zwischen Nr. 71 und 81 ist in anormal niedriger Dampfaufnahme bei Nr. 71 begründet, offenbar ein Meßfehler), also nicht um Kleinigkeiten.

Die Ursache der Erscheinung ist schon oben besprochen; bei kleiner Kompression fallen die irreversibeln Vorgänge insgesamt kleiner aus. Daß die kleine Kompression günstiger ist, erhellt aber auch noch daraus, daß der Regler in der Reihe *C* durchweg tiefer steht als unter gleichen Verhältnissen bei Reihe *A*. Die Füllung ist also kleiner, die Maschine weiter ab von ihrer Höchstbelastung.

Daher ist die Leistung der Maschine bei gleicher Reglerstellung, also auch die Höchstleistung der Maschine unter gleichen Umständen größer bei kleiner als bei großer Kompression. Auch in dieser Hinsicht ist die kleine Kompression vorzuziehen. Die Verschlechterung des Dampfverbrauches bei Vergrößerung der Kompression beträgt gleichmäßig 4%, auf N_i bezogen.

Zu bemerken ist noch, daß die Verschlechterung des Dampfverbrauches fast durchweg, auf D/N_b bezogen, größer war als auf D/N_i bezogen; das heißt, der mechanische Wirkungsgrad und die Reibungsverluste wurden bei der vergrößerten Kompression ungünstiger.

Man darf aus einem Vergleich der Reihen *A* und *B* miteinander nicht den Schluß ziehen, daß mit Verringerung der Kompression der Aufnehmerdruck ansteigt. Vielmehr war in jeder der Reihen die Füllung des Niederdruckzylinders verschieden, und zwar so eingeregelt worden, daß die kleine Kompression bei Auspuffbetrieb, die große Kompression bei Kondensationsbetrieb Diagramme ergaben, die das Auge befriedigten. —

Die Ergebnisse lassen sich, soweit sie den Einfluß wechselnden Gegendrucks betreffen, ohne weiteres *verallgemeinern*. Verringerung der Kompression wird von Vorteil sein, wenn man die Veränderungen in so mäßigen Grenzen hält, wie es dem praktischen Gebrauch entspricht: Übermäßige Verschlechterungen werden eintreten, wollte man gar keine Kompression geben, oder wollte man die Kompression bis zur Schleifenbildung über den Frischdampfdruck hinaustreiben.

76. Energiebilanz der Dampfkraftanlage. Den Verbleib der im Brennstoff des Kessels zugeführten Wärme kann man bis auf einen gewissen Restbetrag nachweisen durch eine Zusammenstellung nach Tabelle 38a oder 38b. Die zugehörigen Versuchs- und Rechnungsgrundlagen werden wie folgt in abgekürzter Form gegeben; es handelt sich um den in § 34, Tabelle 8 und 9 mit *D* bezeichneten Versuch.

1. Brennstoffaufnahme 203 kg/h; Heizwert 7040 kcal/kg.

Verfügbare Wärme 1 429 000 kcal/h.

2. Brennstoffanalyse: 78% C $\equiv 0,78 \cdot 1,86 = 1,45 \frac{\text{m}^3 (\text{CO}_2 + \text{CO})}{\text{kg Kohle}}$; $0,49 \frac{\text{kg Wasser}}{\text{kg Brennst.}}$
 $= 0,61 \frac{\text{m}^3 \text{Wasser}}{\text{kg Brennstoff}}$. (Vgl. § 32 und 32a).

Temperatur im Kesselhaus 25° C, am Fuchs 225°.

Rauchgasanalyse am Fuchs: 10,6% CO₂; 8,6% O₂; 0,2% CO; 80,6% N₂.

Rauchgasvolumen trocken $\frac{1,45}{100 \cdot (10,6 + 0,2)} \cdot 203 = 2720 \frac{\text{m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right)}{\text{h}}$.

Spezifische Wärme (25 bis 225°): $\frac{1}{100} \cdot (0,425 \cdot 10,6 + 0,312 \cdot 89,3) = 0,325 \text{ kcal/m}^3$.

In den trockenen Rauchgasen bleiben $2720 \cdot 0,325 \cdot 200 = 177\,000 \text{ kcal/h}$.

In der Feuchtigkeit bleiben $203 \cdot 0,61 \cdot 0,362 \cdot 200 = 9000 \text{ kcal/h}$ (Fig. 17).

Zur Erwärmung der Abgase 186 000 kcal/h.

3. Kohlenoxydgehalt der Abgase $0,002 \cdot 2720 = 54 \text{ m}^3/\text{h}$.

Heizwert $3040 \text{ kcal/m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right)$.

Verlust durch unvollkommene Verbrennung 16 400 kcal/h.

4. Wasserspeisung 1425 kg/h.

Temperatur des Speisewassers 38,4°, des Dampfes 275°.

Dampfdruck 11,7 at $\dot{U}D = 12,71$ at abs $\equiv 189,7^\circ \text{ C}$ Sättigung = 716,3 kcal/kg

Wärmeinhalt des Dampfes.

Wärmezuwachs $716,3 - 38,4 = 677,9 \text{ kcal/kg}$.

Zur Dampferzeugung 966 000 kcal/h.

5. Leitungskondensat 16 kg/h, Dampfmenge zur Maschine 1409 kg/h.

Temperatur vor der Maschine 195° C. Druck 12,5 at abs = 187,9° C Sättigung.

$\equiv 190,9 \text{ kcal/kg}$ Flüssigkeitswe. und $672,2 \text{ kcal/kg}$ Wärmeinhalt des Dampfes.

Wärmehorhalt gegen Speisewasser $672,2 - 38,4 = 633,8 \text{ kcal/h}$.

Mehrorhalt des Dampfes vor der Maschine 893 000 kcal/h.

Wärmeverlust durch die Rohrleitung 73 000 kcal/h,

davon: $16 \cdot (190,9 - 38,4) \approx 2500 \text{ kcal/h}$ mit dem Kondensat,

der Rest: 70 500 kcal/h Wärmeabgabe der Leitung.

6. Indizierte Leistung der Dampfmaschine 161,1 kW = 138 000 kcal/h.

Nutzleistung der Dampfmaschine 138,5 kW = 119 000 kcal/h.

Nutzleistung der Dynamomaschine 123,0 kW = 106 000 kcal/h.

7. Vom (Einspritz-, Misch-) Kondensator angesaugte Kühlwassermenge 52,2 m³/h
Temperaturen: Zulauf 28,3°, Ablauf 40,6°, Erhöhung 12,3°.

Ins Kühlwasser gehen 642 000 kcal/h.

8. Mantelkondensat 23,9 kg/h, Druck in den Heizmänteln 1,9 at $\dot{U}D = 2,9$ at abs,
 $\equiv 132,2^\circ \text{ C}$ Sättigung $\equiv 133,3 \text{ kcal/kg}$ Flüssigkeitswärme.

Im Mantelkondensat bleiben $23,9 \cdot (133,3 - 38,4) \approx 2300 \text{ kcal/h}$.

9. Arbeitskondensatmenge 1409 — 23,9 = 1385 kg.

Im Arbeitskondensat bleiben $1385 \cdot (40,6 - 38,4) \approx 3000 \text{ kcal/h}$.

10. Indizierter Leistungsverbrauch der nassen Luftpumpe 1,18 kW
= 1000 kcal/h.

Kondensatordruck 0,188 at abs, also theoretisch erforderlich $1385 \cdot (1,03 - 0,188) \cdot 10 = 11\,600 \text{ mkg/h} = 0,032 \text{ kW} \approx 30 \text{ kcal/h}$.

Theoretisch nicht erforderlich 970 kcal/h.

Effektiver Leistungsverbrauch der nassen Luftpumpe (geschätzt)
2,2 kW = 1900 kcal/h.

11. Speisepumpe (elektrisch betrieben) braucht $224 \text{ V} \times 17 \text{ A} = 3,8 \text{ kW}$, indiziert
2,6 kW; sie lief von je 10 min Speiseintervall durchschnittlich 2 min 50 s,
d. i. 0,28 der Gesamtzeit. Also:

Indizierter Leistungsverbrauch der Speisepumpe $0,28 \cdot 2,6 = 0,73 \text{ kW}$
= 632 kcal/h $\approx 630 \text{ kcal/h}$.

Davon theoretisch erforderlich $1425 \cdot 11,7 \cdot 10 = 167\,000 \text{ mkg/h} = 0,46 \text{ kW}$
 $= 390 \text{ kcal/h.}$

Theoretisch nicht erforderlich 240 kcal/h.

Elektrischer Verbrauch der Speisepumpe $0,28 \cdot 3,8 = 1,06 \text{ kW}$
 $= 910 \text{ kcal/h.}$

12. Umlaufpumpe für Rückkühlung des Kondensator-Kühlwassers verbraucht
 $224 \text{ V} \times 27,7 \text{ A} = 6,2 \text{ kW} = 5340 \text{ kcal/h.}$

Damit ergibt sich die Wärmebilanz entweder bezogen auf die indizierte Leistung, Tabelle 38a, oder auf die Nutzleistung, Tabelle 38b. Grundsätzlich von Interesse ist die Stellung der Speisepumpe und der nassen Luftpumpe in den Aufzählungen. Als indizierte Leistung der Anlage ist theoretisch nur der Teil nach Abzug des Verbrauches in beiden Pumpen anzusehen; doch sind dann die Pumpen nach ihrer indizierten Leistungsaufnahme als nachgewiesener Verbleib der Energie wieder einzusetzen. Ein Teil jedoch, die Nutzleistung jener Pumpen, wird im Rückführen des Wassers vom Kondensator in den Kessel als mechanische Energie nützlich im Wasser bleiben; er ist neben dem Brennstoff als zugeführt in Rechnung zu setzen. Der Wirkungsgrad der Pumpen kommt dadurch gewissermaßen umgekehrt in die Bilanz hinein. Es handelt sich bei der Kondensationsmaschine freilich um sehr geringe Beträge.

Tabelle 38a. Wärmebilanz einer Dampfkraftanlage,
 bezogen auf die indizierte Leistung.

1. Brennstoff	1 429 000 kcal/h =	100,0%
2. Speisepumpe	390	0
3. Kondenspumpe	30	0
	<hr/>	<hr/>
	1 429 420 kcal/h =	100,0%
4. Abgase: Spezifische Wärme	186 000 kcal/h =	13,0%
5. „ Unvollkommene Verbrennung	16 400	1,1
6. Rohrleitung: Wärmeverlust	70 500	4,9
7. „ Kondensat	2 500	0,2
8. Kühlwasser	642 000	44,9
9. Mantelkondensat	2 300	0,2
10. Arbeitskondensat	3 000	0,2
11. Speisepumpe	630	—
12. Kondenspumpe	1 000	0,1
13. Indizierte Leistung $138\,000 - 1000 - 630 =$	136 370	9,5
14. Nicht nachgewiesen	368 720	25,9
	<hr/>	<hr/>
	1 429 420 kcal/h =	100,0%

Tabelle 38b. Wärmebilanz einer Dampfkraftanlage,
 bezogen auf die elektrische Nutzleistung.

1. Brennstoff	1 429 000 kcal/h =	100,0%
2. Speisepumpe	390	0
3. Kondenspumpe	30	0
	<hr/>	<hr/>
	1 429 420 kcal/h =	100,0%

4. Abgase	202 400 kcal/h =	14,1%
5. Rohrleitung	73 000	5,1
6. Kühlwasser	642 000	44,9
7. Mantelkondensat	2 300	0,2
8. Arbeitskondensat	3 000	0,2
9. Mechanisch: Getriebeverlust	19 000	1,3
10. Nasse Luftpumpe	1 900	0,1
11. Elektrisch: Dynamoverlust	13 000	0,9
12. Speisepumpe	910	0,1
13. Umlaufpumpe	5 340	0,4
14. Verfügbare Dynamoleistung 106000 — 910 — 5340 =	99 750	7,0
15. Nicht nachgewiesen	366 900	25,7
	<hr/>	
	1 429 500 kcal/h =	100,0%

Eine *Wärmebilanz der Dampfmaschine allein* läßt sich exakt eben dieser Verhältnisse wegen nicht aufstellen, weil die Dampfmaschine in sich nur einen Teil des Kreisprozesses ausführt. Dazu kommt, daß man die Posten für die Dampfkraftanlage nach der gemessenen Speisewassertemperatur zu orientieren pflegt, daß diese aber für die Dampfmaschine allein keine sachliche Bedeutung hat; man pflegt dann, namentlich wenn es sich um Dampfentnahme aus einer größeren Kesselbatterie handelt, eine normale Speisewassertemperatur von etwa 20° zugrunde zu legen. Hier, wie immer (§ 43), ist es für das Abstimmen der Bilanz gleichgültig, welche Temperatur man annimmt, aber die Prozentsätze fallen etwas verschieden aus; so wird bei 20° Bezugstemperatur (statt 38,4° Speisewassertemperatur) der Anteil des Arbeits- und Heizkondensates viel größer. Es ergibt sich folgendes für denselben Versuch D:

Tabelle 38c. Wärmebilanz einer Dampfmaschine.

Bezugstemperatur 20° C.

1. Im Dampf	919 000 kcal/h =	100,0%
2. Im Kühlwasser	642 000 kcal/h =	69,8%
3. Im Mantelkondensat	2 700	0,3
4. Im Arbeitskondensat	28 500	3,1
5. Indizierte Leistung	138 000	15,0
6. Nicht nachgewiesen	107 800	11,8
	<hr/>	
	919 000 kcal/h =	100,0%

β. Das Indikatordiagramm.

77. Das Rankinisieren der Diagramme. An den Diagrammen der Dampfmaschine lassen sich eine Reihe von Untersuchungen vornehmen, die über die im Zylinder herrschenden Verhältnisse einigen Aufschluß geben, in mäßigen Grenzen wegen mancher Unsicherheiten, mit denen sie behaftet sind. Soweit es sich um Verbundmaschinen handelt, macht man solche Untersuchungen dann am *Gesamtdiagramm*, das vorher durch Rankinisieren erhalten wurde.

Das *Rankinisieren* (nach dem englischen Maschinentheoretiker Rankine, 1820—1872) hat den Zweck, die Wirksamkeit des Dampfes in den verschiedenen Zylindern einer Verbundmaschine im Zusammenhange zu zeigen. Dazu bringt man die verschiedenen Diagramme auf

gleichen Maßstab hinsichtlich des Druckes und hinsichtlich des Volumens und legt sie richtig aneinander.

Die Diagramme der verschiedenen Zylinder pflegen nämlich mit verschiedenem Federmaßstab geschrieben zu sein, die des Niederdruck-

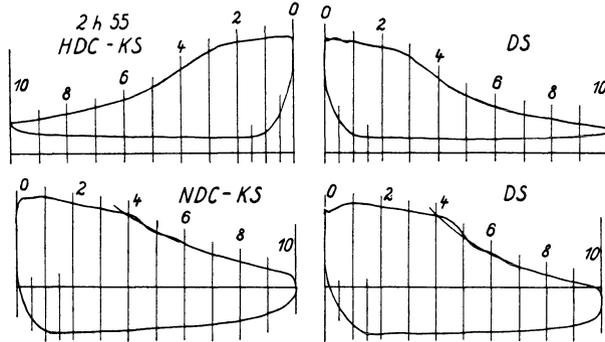


Fig. 102. Vorbereitung der Diagramme zum Rankinisieren. Versuch Nr. 153, Tab. 33, Fig. 90. HDC : 3,5 mm/at, NDC : 20 mm/at. $\frac{1}{4}$ nat. Gr.

zylinders mit weicherer Feder. Ebenso sind die Dampfvolumenta in verschiedenem Maßstabe aufgetragen, weil zwar die Diagramme der verschiedenen Zylinder etwa gleiche Länge zu haben pflegen, diesen gleichen Diagrammlängen aber verschiedene Hubvolumina der Zylinder entsprechen, die bei gleichem Hub aller Kolben den wirksamen Kolbenflächen proportional sind. Zum Rankinisieren sind nun die Diagramme auf gleichen Maßstab nach jeder der Achsen umzuzeichnen. In merklich wechselnder Weise wird dann das Aneinanderlegen der Diagramme zu einem Gesamtdiagramm bewirkt. Am besten ist für das Aneinanderlegen die folgende Weise :

In einem Achsenkreuz soll die Abszisse Volumina des Dampfes in m^3 , die Ordinate seine (absoluten) Drucke darstellen. Es empfiehlt sich, nicht zu klein zu zeichnen, also etwa den Druckmaßstab 20 mm = 1 at zu wählen ; das Diagramm wird dann meist etwa 20 cm hoch werden. Der Abszissenmaßstab ist so zu wählen, daß ein etwa quadratisches Bild entsteht, daß also auch die Länge desselben etwa 20 cm beträgt. Man kann das Diagramm auf die bei 1 Umlauf (2 Hübe) arbeitende oder auf die stündliche Dampfmenge beziehen, oder endlich auf 1 kg Dampf ; je nach-

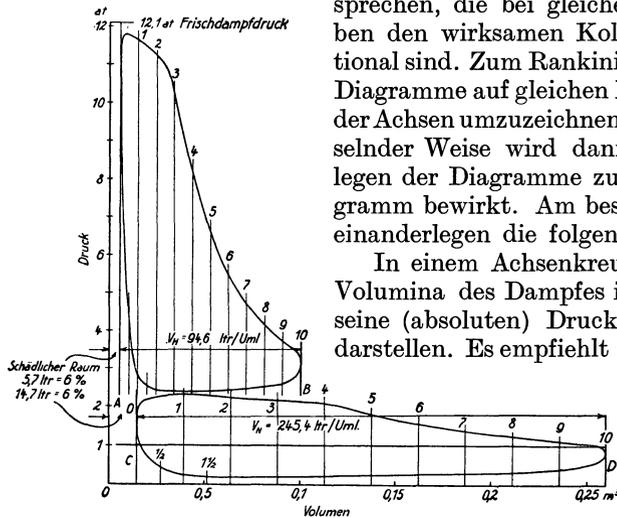


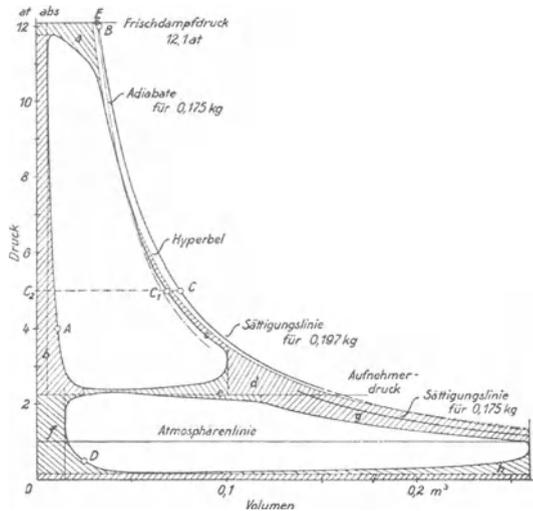
Fig. 103. Rankinisierung der Diagramme von Versuch Nr. 156, bezogen auf 1 Umlauf = 2 Hübe. $\frac{1}{4}$ nat. Gr.

zylinder mit weicherer Feder. Ebenso sind die Dampfvolumenta in verschiedenem Maßstabe aufgetragen, weil zwar die Diagramme der verschiedenen Zylinder etwa gleiche Länge zu haben pflegen, diesen gleichen Diagrammlängen aber verschiedene Hubvolumina der Zylinder entsprechen, die bei gleichem Hub aller Kolben den wirksamen Kolbenflächen proportional sind. Zum Rankinisieren sind nun die Diagramme auf gleichen Maßstab nach jeder der Achsen umzuzeichnen. In merklich wechselnder Weise wird dann das Aneinanderlegen der Diagramme zu einem Gesamtdiagramm bewirkt. Am besten ist für das Aneinanderlegen die folgende Weise :

In einem Achsenkreuz soll die Abszisse Volumina des Dampfes in m^3 , die Ordinate seine (absoluten) Drucke darstellen. Es empfiehlt sich, nicht zu klein zu zeichnen, also etwa den Druckmaßstab 20 mm = 1 at zu wählen ; das Diagramm wird dann meist etwa 20 cm hoch werden. Der Abszissenmaßstab ist so zu wählen, daß ein etwa quadratisches Bild entsteht, daß also auch die Länge desselben etwa 20 cm beträgt. Man kann das Diagramm auf die bei 1 Umlauf (2 Hübe) arbeitende oder auf die stündliche Dampfmenge beziehen, oder endlich auf 1 kg Dampf ; je nach-

dem berechnet sich der Volumenmaßstab — für den man natürlich eine glatte Zahl aussucht — verschieden. Die Dampfaufnahme der Maschine muß gegeben sein; da man nur die des ganzen Zylinders kennt, nicht die der einzelnen Zylinderseite, so kann (oder sollte) man auch das rankinisierte Diagramm als Mittel (oder Summe) aus den Indikatordiagrammen beider Seiten finden. Man muß die Kurbel- und Deckelseite des Zylinders zusammenfassen, denn jede Seite des Hochdruckzylinders ist durch den Druck des Aufnehmers abhängig von beiden Niederdruckdiagrammen, und ebenso umgekehrt. Eine Änderung der Kurbelseitenfüllung eines Zylinders ändert beide Diagramme des anderen im gesamten Verlauf. Zusammenfügung nur zweier Einzeldiagramme kann also bei ungleicher Einsteuerung der Zylinderseiten zu ganz widerspruchsvollen Ergebnissen führen.

Fig. 102 gibt die Originaldiagramme der vier Zylinderseiten einer Längsverbundmaschine; sie entstammen dem Versuch Nr. 156, Tabelle 33. Fig. 103 gibt die daraus gefundene Rankinisierung. Das Umzeichnen der Diagramme geschieht in der Weise, daß man jedes der Originaldiagramme Fig. 102 zehnfach unterteilt (am Anfang und am Ende schiebt man zweckmäßig nach Bedarf noch einen Halbtteil ein), und indem man den Druck



Rankinisierte Diagramme einer Längsverbundmaschine
Fig. 104. Für Heißdampf, Versuch 156.

im Hingang und im Rückgang bei jedem Zehntel des Hubes mißt. Wo Indikatorschwingungen dem Expansionsverlauf überlagert sind (Techn. Mess. § 80), darf man nicht versäumen, zuvor die glatte Expansionslinie durch die Schwingungen hindurchzulegen und an dieser sehr sorgfältig zu zeichnenden Linie die Messungen zu machen. — Die Drucke werden nun in ein Diagrammformular eingetragen, das man nach Fig. 103 entwirft. Es sind dort als Abszissen zunächst die schädlichen Räume (5,7 bzw. 14,7 l) und anschließend die Umlaufvolumina der Zylinder (94,6 bzw. 245,4 l/Uml) maßstäblich aufgetragen. Man legt also durch die Senkrechten *ABCD* von vornherein die Lage des einzutragenden Dampfdiagrammes im Verhältnis zur *p*-Achse fest. Man hat nun jedes der Hubvolumina in 10 Teile zu unterteilen, nach Bedarf wieder die Halbtteile einzufügen und bei jeder Ordinate den Druck aufzutragen.

Dazu muß man zunächst die Ausmessungen der Kurbelseite und der Deckelseite zu Mittelwerten vereinen, und wo man von den Zufällig-

idealen *Vergleichsprozesses*. Insofern besteht Ähnlichkeit mit der Ermittlung des (thermischen) Gütegrades. Nur wird der Vergleichsprozess anders gewählt, mehr empirisch, üblicherweise wie folgt.

Man sucht eine gleichseitige Hyperbel auf, die das Hochdruckdiagramm berührt, und begrenzt ihre Fläche gegen das Achsenkreuz durch den Frischdampfdruck, andererseits durch das Volumen des Niederdruckzylinders. Zu der so erhaltenen Fläche setzt man die Fläche des wirklichen Diagrammes ins Verhältnis.

In Fig. 104 sind die Diagramme der Fig. 103 wiederholt, und es ist die Vergleichshyperbelfläche eingetragen. Die Völligkeit ergab sich (im Original) zu $157,9 \text{ cm}^2 : 225,2 \text{ cm}^2 = 0,701$.

In Fig. 105 ist die gleiche Ermittlung an einem Diagramm des Versuches 153, Tabelle 33, § 72 durchgeführt. Die Hauptdaten beider Versuche gibt Tabelle 40.

Tabelle 40. Daten zu den rankinisierten Diagrammen.

Versuch Nr.		156	153
1	Indizierte Leistung . . . kW	152,5	155,5
	davon HDC „	85,4	86,5
2	Drehzahl /min	116,2	116,4
3	Reglerstellung mm	15,4	14,6
4	Dampfaufnahme kg/h	1220	1472
5	Arbeitsdampf „	1208	1423
6	Aufnehmerkondensat . . . „	38	101
7	Druck des Frischdampfes . . at	12,15	12,1
8	Temperatur des Frischdampfes °C	236	190
9	Gegendruck at	0,157	0,174
10	Arbeitsdampfaufnahme für 1 Uml.:		
	HDC kg	0,1733	0,2038
	NDC „	0,1678	0,1893

Die beiden Versuche unterscheiden sich also — während Leistung, Verteilung auf die Zylinder, Füllung und Admissionsdruck beidemale etwa gleich sind — hauptsächlich durch die *Überhitzung des Dampfes*. Sie ist beim ersten Versuch etwa 50° , beim zweiten nur $2,7^\circ$ — fast genaue Sättigung.

Die berührenden Hyperbeln sind beidemale eingetragen, die Planimetrierung der gesamten, der durch Schraffierung angedeuteten und der indizierten Flächen ergibt folgendes (Tabelle 41):

Die Völligkeit des Diagrammes ist also bei Überhitzung kleiner als bei Sättigung. Das ist zum merklichen Teil in dem Verlust unter c begründet; bei Sattedampf schmiegt sich die Expansionslinie des Hochdruckzylinders sehr genau der Hyperbel an, bei Heißdampf wird sie steiler. Man sieht, daß der Völligkeitsgrad kein Maß für die Güte der Maschine ist. Er ist jedoch ein für den Entwurf brauchbares Vergleichsmaß, ein Ergebnis von Erfahrungen, mit dessen Hilfe man in einfacher Weise die Arbeitsausbeute einer zu erbauenden Maschine im voraus überschläglich ermitteln kann. —

Wie sich der Dampfzustand im Zylinder während der Expansion verändert, darüber verschafft man sich am einfachsten durch *Einzeich-*

nen der Sättigungslinie in das (rankinisierte) Diagramm einen Überblick. In Fig. 104 und 105 ist das geschehen.

Dazu berechnet man das im Zylinder arbeitende Dampfgewicht, und unter Zuhilfenahme des spezifischen Gewichtes der Sättigung findet man zu jedem bestimmten Dampfdruck das Volumen, das jenem Gewicht bei Sättigung zukommt. Trägt man diese Volumina bei den betreffenden Drucken an, so ergibt sich aus dem gegenseitigen Abstand der Expansions- von der Sättigungslinie ein Maßstab dafür, wie weit der Dampf vom Zustand trockener Sättigung entfernt ist.

Das *arbeitende Dampfgewicht* ist zusammengesetzt aus dem in den Zylinder eingefüllten und dem im schädlichen Raum vom vorigen Spiel zurückgebliebenen Dampf. Es ist natürlich nur der Arbeits-, nicht der Manteldampf in Betracht zu ziehen; für den Niederdruckzylinder ist die Arbeitsdampfmenge um das dem Aufnehmer entnommene Kon-

Tabelle 41. Völligkeit der Dampfdiagramme.

Fläche	Versuch Nr.	156 Überhitzung		153 Sättigung	
		cm ³	%	cm ³	%
a	Einströmung	4,0	1,8	5,6	2,5
b	Kompression und schädl. R. HDC	15,9	7,1	15,6	6,9
c	Expansion	2,3	1,0	∞0	0
d	Spannungsabfall am HDC	6,2	2,8	5,0	2,2
e	Übergang zwischen den Zylindern	4,5	2,0	2,4	1,1
f	Kompression und schädl. R. NDC	8,3	3,7	9,2	4,1
g	Expansion	12,9	5,7	11,6	5,1
h	Ausströmung	5,0	2,2	6,2	2,7
i	Gegendruck	8,2	3,6	9,1	4,0
	Summe der Verlustflächen	67,3	29,9	64,7	28,6
	Arbeitsfläche HDC	87,4	}70,1	88,5	}71,4
	„ NDC	70,5		73,6	
	Gesamtdiagramm	225,2	100	226,8	100

densat vermindert. Wenn man die Rankinisierung auf einen Umlauf — zwei Hübe — bezogen hat, so muß die Berechnung der Sättigungslinie auf die entsprechende Dampfmenge bezogen werden.

Bei Versuch 156, für überhitzten Dampf, gestaltet sich die Rechnung wie folgt: Den Hochdruckzylinder durchlaufen 1208, den Niederdruckzylinder 1170 kg/h, bei $116,2 \times 60 = 6972$ Umläufen; jeder Umlauf bringt also $1208 : 6972 = 0,1733$ bzw. $1170 : 6972 = 0,1678$ kg Dampf in den betreffenden Zylinder. Hinzuzuzählen ist der vom vorigen Umlauf in den schädlichen Räumen verbliebene Dampf; wir berechnen ihn aus der Kompressionslinie, unter Annahme der Sättigung. Bei 4 at abs messen wir im Diagramm $0,0107$ m³ Volumen ab, Punkt A, Fig. 104; zu 4 at Druck gehört das spezifische Gewicht $\gamma = 2,124$ kg/m³, das spezifische Volumen $v = 0,4708$ m³/kg. Durch Punkt A also werden $0,0107 : 0,4708 = 0,0227$ kg Dampf zur Darstellung gebracht, als während der Kompression im schädlichen Raum abgeschlossen. Im ganzen arbeiten dann bei der Expansion des Hochdruckzylinders $0,1733 + 0,0227 = 0,197$ kg Dampf.

Für dieses Dampfgewicht ergeben sich u. a. folgende Sättigungsvolumina:

$$\text{Punkt } B: p = 12 \text{ at abs, } v = 0,167,8 \text{ m}^3/\text{kg, } V = 0,197 \times 0,168 = 0,0329 \text{ m}^3.$$

$$\text{Punkt } C: p = 5 \text{ at abs, } v = 0,382 \text{ m}^3/\text{kg, } V = 0,197 \times 0,382 = 0,0748 \text{ m}^3.$$

Die so entstehende Sättigungslinie (Fig. 104) gilt für den Hochdruckzylinder. Man sieht, daß trotz der nicht ganz geringen Überhitzung doch im Zylinder solche niemals mehr auftritt, denn durchweg ist das im Indikatorgramm gemessene Volumen kleiner als das der Sättigung. Im Punkte C_1 des Diagrammes ist der Feuchtigkeitsgehalt des Dampfes durch das Verhältnis der Strecken $C_1 C : C_2 C = 7,3 : 75,2 = 0,097$ oder 9,7% gegeben, der Dampfgehalt ist 90,3%. — Beim Arbeiten mit Sattedampf ist der Feuchtigkeitsgehalt beim gleichen Druck wesentlich höher; in Fig. 105 kann man für Punkt C_1 17,7% Feuchtigkeit ausmessen.

Am Niederdruckzylinder ist die Sättigungslinie eine andere, weil einerseits das im Aufnehmer abgezogene Kondensat abgeht, und weil andererseits im schädlichen Raum nicht gerade das gleiche Dampfgewicht abgesperrt zu werden braucht wie beim Hochdruckzylinder. In Fig. 104 ist für Punkt D bei 0,5 at abs ein Volumen von 24,8 l = 0,0248 m³ vorhanden; mit dem spezifischen Volumen der Sättigung $v = 3,294 \text{ m}^3/\text{kg}$ berechnen wir $0,0248 : 3,294 = 0,00753 \text{ kg}$ als im schädlichen Raum abgesperrt (gegen 0,0227 kg am Hochdruckzylinder). Dazu die eingefüllte Dampfmenge mit 0,1678 kg, gibt 0,175 kg arbeitendes Dampfgewicht (gegen 0,196 kg am Hochdruckzylinder). Hierzu gehört die Sättigungslinie des Niederdruckzylinders, die wir in Fig. 104 finden — entsprechend in Fig. 105. —

Die Völligkeit ist nicht identisch mit dem Gütegrad des Arbeitsprozesses. Die Völligkeit vergleicht die Diagrammfläche mit einer — recht willkürlich angenommenen — Hyperbel, der Gütegrad vergleicht sie mit der Fläche der Adiabaten, die durch den Zustand und die Menge des Frischdampfes bestimmt ist. Für unsere Versuche findet sich:

Tabelle 42.

Versuch Nr.		156	153
1	Druck des Frischdampfes at	12,15	12,1
2	Temperatur des Frischdampfes ° C	236	190
3	Spezifisches Volumennach <i>i</i> s-Diagramm od. Formel m ³ /kg	0,184	0,168
4	Dampfaufnahme bei 1 Umlauf kg	0,175	0,211
5	Aufgenommenes Dampfvolumen im Zustand des Frischdampfes	0,0322	0,0354

Und damit ergeben sich die Punkte E als Beginn der Adiabaten, die man wie früher in Fig. 87, § 71 mit Hilfe des *i*s-Diagrammes zeichnen kann. — Man darf sich nicht wundern, daß der Beginn der Adiabaten, Punkt E , auch bei überhitztem Dampf, Fig. 104, innerhalb der Sätti-

gungslinie liegt. Das kommt einfach davon, daß beide sich auf verschiedene Dampfmengen beziehen, erstere auf die bei 1 Umlauf aufgenommene, die Sättigungslinie aber auf die im Zylinder arbeitende, die um den Inhalt des schädlichen Raumes größer ist. —

Wegen der Konstruktion des *Entropiediagrammes* nach Boulvin aus einem Dampfmaschinen-Diagrammsatz sei auf die Literatur verwiesen: Schröter-Koob, Z. d. V. D. I. 1903; Schüle, Technische Thermodynamik, Band II, S. 207ff. der 2. Aufl.

Es bedarf nur kurzer Erwähnung, daß alle eben genannten Ermittlungen, die wir am rankinisierten Diagramm einer Verbundmaschine vorgenommen dachten, bei der *Einzylindermaschine* am einfachen Diagramm vorgenommen werden; daß andererseits für *Dreifach-Verbundmaschinen* die Rankinisierung ganz ebenso zu machen ist wie für solche mit zweifacher Expansion des Dampfes.

79. Verlauf der Expansionslinie. Die Gestalt des Diagrammes vom vollendeten Abschluß bis zur Vorausströmung ist durch ihre Eigenschaft als *Expansionslinie aus dem schädlichen Raum* heraus bestimmt. Trägt man nämlich an das Dampfmaschinen-Diagramm maßstäblich proportional zum Hubvolumen den Inhalt des schädlichen Raumes an, Fig. 106a, so erhält man die senkrechte Ordinatenachse *Op*. Trägt

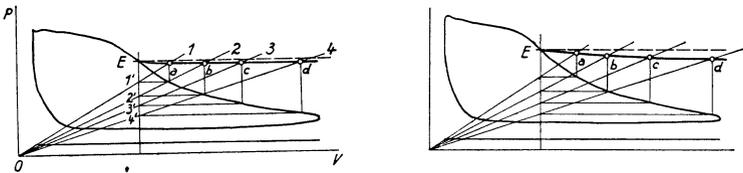


Fig. 106 a. Für Sattedampf, Versuch Nr. 153. Fig. 106 b. Für Heißdampf, Versuch Nr. 156. Dörfelsche Charakteristik. $\frac{1}{10}$ nat. Gr.

man an die vom Indikator aufgezeichnete atmosphärische Linie nach unten maßstäblich den Barometerstand an, so erhält man die Lage der Achse *OV*. Das Achsenkreuz *VOp* ist es nun, von dem aus man die jeweiligen Drucke *p* und die jeweiligen Volumina *V* des Zylinderinhaltes abzugreifen hat. Die Expansionslinie des Diagrammes wird in bezug auf dieses Achsenkreuz mehr oder weniger genau durch eine Gleichung der Formel

$$p \cdot V^n = \text{konst} \dots \dots \dots (1)$$

dargestellt.

Für Sattedampf kann die Expansionslinie befriedigend genau als gleichseitige Hyperbel mit dem Mittelpunkt *O* angesehen werden. Dann ist $n = 1$. Da es sich um Dampf handelt, so ist es falsch, wegen des hyperbolischen Verlaufs die Expansionslinie als Isotherme aufzufassen, und die Bezeichnung als Mariottesche Linie, die bei Gasen die Isotherme und daher die Hyperbel bedeutet, ist für Dampfmaschinen nicht am Platz, wird aber verwendet. In Fig. 105 ist in das Diagramm einer Sattedampfmaschine die Hyperbel eingezeichnet, um zu zeigen, wie genau der hyperbolische Verlauf zutrifft. Bei Heißdampfmaschinen pflegt die Expansionslinie steiler zu verlaufen als nach einer Hyperbel, es ist also in Gleichung (1) $n > 1$ anzunehmen, wie Fig. 104 zeigt.

Man verwendet wohl, um festzustellen, ob die Kurve hyperbolisch verläuft, die *Dörfelsche Charakteristik*. Wenn man von O aus, Fig. 106a, die Strahlen 1, 2, 3, 4 zieht, so schneiden diese eine durch den Expansionspunkt E gelegte senkrechte Gerade in den Punkten 1', 2', 3', 4'. Zieht man von jedem der letztgenannten Punkte Wagerechte bis zum Schnitt mit der zu untersuchenden Kurve und geht vom Schnittpunkt senkrecht aufwärts, bis man in den Punkten a, b, c, d die Strahlen 1, 2, 3, 4 schneidet, so liegen, nach einer bekannten Eigenschaft der Hyperbel, die Punkte a, b, c, d in gleicher Höhe mit dem Punkt E , sofern die Expansionslinie eine Hyperbel ist. Sonst senkt sich die durch die Punkte a, b und c dargestellte Linie, oder sie hebt sich, je nachdem die Expansionslinie steiler oder flacher verläuft, als hyperbolisch. Nur das sieht man; nicht aber, welcher Exponent n der richtige ist und ob überhaupt die Beziehung (1) befriedigend zutrifft; deshalb hat diese Art der Untersuchung nur beschränkten Wert. In Fig. 106b ist die gleiche Konstruktion an einem Heißdampfdiagramm vorgenommen, die Dörfelsche Charakteristik fällt ab.

Besser für die Untersuchung von Expansionskurven von der Form (1) ist folgendes *logarithmische Verfahren*: In ein Koordinatennetz werden als Abszissen und Ordinaten die Werte $\log p$ und $\log V$ eingetragen. In Fig. 107 ist das für die Punkte E bis 4 der Figuren 106a und b geschehen, unter Benutzung der Zahlenwerte aus Tabelle 43. Wie man sieht, liegen die Punkte jeweils etwa in einer Geraden. In der Tat, durch Logarithmieren der Beziehung (1) ergibt sich

$$\log p + n \cdot \log V = \text{konst} = \log p_0 + n \cdot \log V_0 \dots \dots (2)$$

also eine lineare Beziehung. Daraus folgt

$$n = \frac{\log p_0 - \log p}{\log V - \log V_0} = \frac{\log p_0/p}{\log V/V_0} \dots \dots \dots (3)$$

Das Einstellen der logarithmisch aufgetragenen Werte in eine Gerade ist daher ein Maßstab dafür, wie gut Beziehung (1) eintrifft, wie gut also n konstant ist; überdies ist der Exponent n als Richtungskonstante der geraden Linie zu finden, für jede Stelle bei gekrümmtem Verlauf als Tangente der Neigung. — Man kann auch die p - und V -Werte selbst in ein (käufliches) logarithmisch geteiltes Netz eintragen.

Nach Fig. 107 trifft die Beziehung (1) nicht genau zu, denn n ändert sich gleichmäßig. Um Meßfehler handelt es sich nicht, dazu fallen die Punkte zu gut in Reihe und ergeben eindeutig für beide Kurven eine nach unten konvexe Krümmung; aber es könnte ein systematischer Fehler untergelaufen, etwa der schädliche Raum falsch ermittelt sein.

Mittlere Werte von n ergeben sich wie folgt:

$$\begin{aligned} \text{für Sattedampf: } n &= \frac{1,4829 - 1,1038}{1,9713 - 1,6031} = \frac{0,3791}{0,3682} = 1,03, \\ \text{für Überhitzung: } n &= \frac{1,5172 - 1,0719}{1,9694 - 1,5635} = \frac{0,4453}{0,4059} = 1,10. \end{aligned}$$

Die Überhitzung gibt also steileren Verlauf, wie auch Fig. 104 und 105 zeigen. Wenn es im Vergleich zu Fig. 105 auffällt, daß jetzt $n = 1,03$

Tabelle 43. Ermittlung des Exponenten der Expansionslinien.

Hubvolumen nur der Deckelseite 49,5 l; schädlicher Raum 2,85 l = 5,8%.

Diagrammlänge: Nr. 153: $l = 93,6$ mm, also $s_0 = 0,58 \cdot 93,6 = 5,4$ mm.Nr. 156: $l = 91,0$ mm, also $s_0 = 0,058 \cdot 91 = 5,2$ mm.

Versuch Punkt	Nr. 153 $t_1 = 190^\circ$					Nr. 156 $t_1 = 236^\circ$				
	E	1	2	3	4	E	1	2	3	4
1 V . . mm	40,1	50,2	61,8	74,0	93,6	36,6	48,5	58,6	72,8	93,2
2 p . . "	30,4	23,5	19,0	16,0	12,7	32,9	23,9	19,2	15,3	11,8
3 $\log V$. .	1,6031	1,7007	1,7910	1,8692	1,9713	1,5635	1,6857	1,7679	1,8621	1,9694
4 $\log p$. .	1,4829	1,3711	1,2788	1,2041	1,1038	1,5172	1,3784	1,2833	1,1847	1,0719

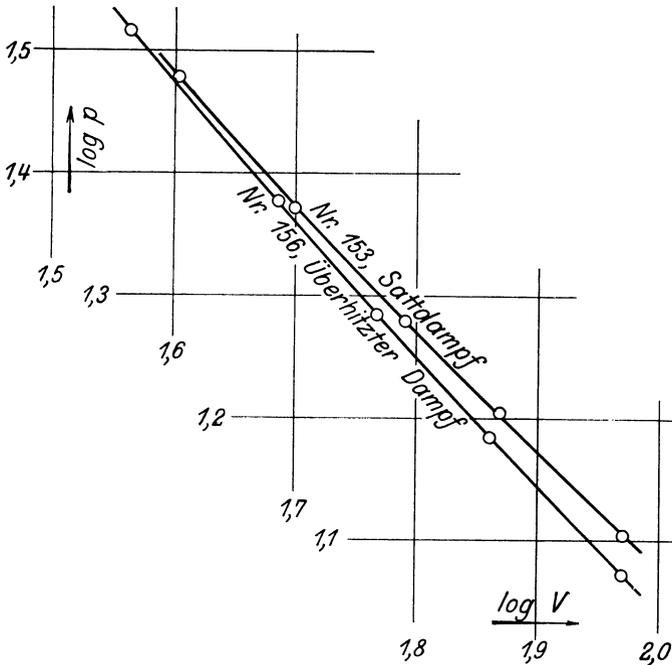


Fig. 107. Ermittlung des Exponenten der Expansionslinien.

erhalten wird, dort die Hyperbel sehr scharf sich an die Expansionslinie anlegt, so beachte man, daß die Rankinisierung als Mittel aus vorn und hinten und aus je mehreren Diagrammen erhalten worden ist, die etwas voneinander abweichen mögen.

Die Kompressionslinie des Diagrammes ist ebenfalls in ihrer Lage zu dem Achsenkreuz pOV zu beurteilen. Will man sie in der Form $p \cdot V^n = \text{konst}$ untersuchen, so muß man wieder die logarithmischen Werte auftragen. Allerdings ist solche Auftragung in bezug auf die Kompressionslinie noch vorsichtiger zu beurteilen, weil die kleineren Volumina an sich ungenauer abzugreifen sind, und weil eine Ungenauigkeit in der Annahme des schädlichen Raumes — den man selten genau

kennt — eine viel größere Rolle spielt als bei der Expansionslinie, bei der der Raum nur zum Zylindervolumen hinzutritt. Aus dem gleichen Grunde haben Undichtigkeiten der Steuerorgane und des Kolbens auf die Kompressionslinie viel größeren Einfluß als auf die Expansionslinie, und es ist an sich weniger gut zulässig, sie als reine Zustandsänderung eines abgeschlossenen Dampfvolumens aufzufassen. Im allgemeinen läuft sie etwas steiler als hyperbolisch.

80. Abhängigkeit des Diagrammes von der Steuerung. Die *theoretische Gestalt* des mit dem Indikator aufzunehmenden Diagrammes einer Einzylinder-Auspuff-Dampfmaschine ist in Fig. 108 schematisch dargestellt. Es ist zwischen den Totlagen des Kolbens eingeschlossen. Von F bis Ex füllt sich der vom Kolben bei seiner Bewegung freigelegte Raum mit Dampf von Kesselspannung. Im Expansionspunkt Ex ist die Füllung des Zylinders beendet, das Steuerorgan sperrt ab, und es beginnt die Expansion des Dampfes nach der Kurve $Ex-A$: mit zunehmendem Volumen des im Zylinder abgesperrten Dampfes sinkt der Druck. Im Totpunkt öffnet sich der Auslaßkanal des Zylinders, und es beginnt das Ausströmen des Dampfes. Zunächst von A bis B fällt der Druck auf den Gegendruck, z. B. der Atmosphäre. Von B bis Ko wird dann der Dampf gegen diesen Druck vom Kolben ins Freie geschoben. Im Kompressionspunkt Ko sperrt das Auslaßorgan dem Dampf den Weg ab, und da dies vor dem Hubende geschieht, so wird der im verbleibenden Zylinderraum noch befindliche Dampf durch den weiter zurückgehenden Kolben komprimiert; mit abnehmendem Volumen erhöht sich der Druck des Dampfes. Die zum Komprimieren nötige Arbeit wird vom Schwungrad hergegeben. Bis zum Punkte E wird der Dampf komprimiert, in der Totlage öffnet sich der Einlaßkanal, und es wird zunächst, von E bis F , der Druck im Zylinder auf Kesselspannung erhöht, weiterhin beginnt die nächste Füllung.

Man sieht also, daß von E bis Ex das Einlaßorgan geöffnet ist, von A bis Ko das Auslaßorgan. Dazwischen, von Ex bis A und von Ko bis E sind beide Organe geschlossen.

Die in Fig. 108 gegebene Einsteuerung wäre gut für eine Maschine mit sehr langsamem Gang bzw. mit sehr weiten Steuerkanälen. Für eine solche wäre die Diagrammgestalt und -fläche nur abhängig (außer von den äußeren Bedingungen Druck und Gegendruck) von der Lage des Expansions- und des Kompressionspunktes. Bei gegebener Füllung würde die Maschine ein konstantes, von der Drehzahl unabhängiges Drehmoment und deshalb als Leistungscharakteristik (§ 4) eine mit der Drehzahl proportional ansteigende Gerade liefern.

Aber schon der Einfluß *mäßiger Drehzahlen* würde die in Fig. 108 gegebene Diagrammform so abwandeln, wie durch die punktierten Linien angedeutet ist. Dem Druckabfall von A nach B entspricht ein Ausstoßen von Dampf aus dem gesamten Zylinderraum, dem Druckanstieg von E nach F ein Einfüllen von Dampf in den schädlichen Raum; diese Veränderungen erfordern Zeit. In Wahrheit wird sich bei einigermaßen schnellem Gang der Maschine dieser Zeitbedarf, wenn die Steuerorgane erst im Totpunkt öffnen, durch Abrundung der Diagrammecken

B und F kenntlich machen, es ergeben sich Arbeitsverluste entsprechend den schraffierten Flächen der Fig. 108

Die Größe der schraffierten Verlustflächen hängt von den Abmessungen der Steuerkanäle ab. Bei gegebener Maschine wachsen die Verlustflächen mit der Drehzahl der Maschine, und das bewirkt, daß das Drehmoment mit steigender Drehzahl abnimmt, die Leistungscharakteristik also ein Maximum erhält, gestrichelte Kurven der Fig. 93. Diesen Verlauf haben wir in Fig. 93, § 73, und Versuch 92 bis 96, Tabelle 34 bereits verwirklicht gefunden.

Die Kolbenmaschine liefert also eine ähnliche Leistungscharakteristik wie die Turbine, aber aus ganz anderen Gründen: bei der Turbine war primär die Wechselwirkung von Dampfstrahl und Schaufelung, bei der Kolbenmaschine sind sekundär die Verluste durch Unvollkommenheiten der Maschine an der Absenkung der Leistungsparabel schuld. — Langsamläufer arbeiten ganz in dem Bereich der Geradlinigkeit,

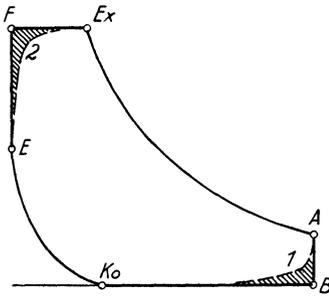


Fig. 108. Diagramm bei fehlender Voröffnung, schematisch.

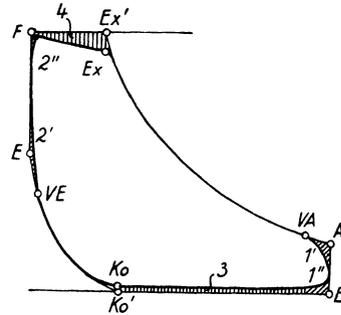


Fig. 109. Verlustflächen am Diagramm der Dampfmaschine, schematisch.

Schnellläufer gehen bis an und über das Maximum der Leistungsparabel, § 4.

Durch gute Einsteuerung kann man die Verlustflächen 1 und 2 der Fig. 108 und damit den Unterschied der gestrichelten Kurven Fig. 108 gegen die Geraden tunlichst klein halten. Dazu verwendet man *Voreinströmung* und *Vorausströmung*. Öffnet man nämlich nicht erst bei E und A im Totpunkt, Fig. 108, sondern nach Fig. 109 bei VE und VA , so erhält man zwar an jedem Totpunkt zwei Verlustflächen $1'$ und $1''$, $2'$ und $2''$, die aber zusammen kleiner sind als 1 und 2 der Fig. 108. Die Verlustflächen eines Endes werden dann am kleinsten, wenn die vor und hinter dem Totpunkt gebildeten Flächen etwa gleich werden: $1' = 1''$, $2' = 2''$; doch ist Peinlichkeit hierin nicht wesentlich, weil sich jede Größe nahe dem Optimum langsam ändert.

Weitere *Verlustflächen* 3 und 4 bilden sich aus, die weniger von der Maschine, als von den Abmessungen der *Zu- und Ableitung* bedingt sind. Fläche 3 ist durch den Widerstand der Auspuffleitung verursacht. Fläche 4 rührt mehr von der Trägheit der in der Dampfleitung befindlichen Dampfmasse her, zu deren Beschleunigung sie verbraucht wird. Die Lage der Punkte Ex und Ko in der Längsrichtung wird durch die

Bildung der Flächen 3 und 4 kaum beeinflusst, wenn man die Ausrundung des Diagrammes beachtet.

81. Abhängigkeit des Diagrammes von den Betriebsbedingungen.

Die Diagrammgestalt ist also durch die vier Punkte VE , Ex , VA , Ko wesentlich bestimmt; diese sind wie folgt festzulegen:

Der *Ex-Punkt* zunächst wird vom Regler an eine solche Stelle der Diagrammlänge gelegt, daß sich die *erforderliche Leistung* der Maschine ergibt; er entzieht sich damit der willkürlichen Beeinflussung, wenigstens soweit es sich um die mittlere Füllung, Mittel aus Kurbel- und Deckelseite, handelt. Die Abgleichung der beiden Zylinderseiten gegeneinander wird von guten Firmen nach dem Gesichtspunkt vorgenommen, der Spannungsabfall am Ende der Expansion solle beiderseits gleich groß sein; man könnte sonst auch auf gleichen Flächeninhalt die Diagramme einregeln.

Der *Ko-Punkt* ist nach den Gesichtspunkten zu wählen, daß durch große Kompression *Ruhe des Ganges* gewährleistet wird, daß dagegen kleine Kompression gemäß den Darlegungen in § 75 die *Höchstleistung* der Ma-

schine steigert und — wegen der Verkleinerung des Füllungsgrades — einen *besseren Dampfverbrauch* liefert. In letzterer Hinsicht ist Regel: in den Diagrammen sollten die irreversiblen Vorgänge — die Spannungsabfälle und -anstiege — unter Berücksichtigung des Volumens, auf das sie sich erstrecken, in Summa tunlichst klein werden. Man wähle daher nur mäßige Kompression — doch darf bei Füllungsverkleinerung nicht eine Schleife am Expansionsende entstehen — und bringe die Maschine lieber durch gute Behandlung der Lager zum ruhigen Lauf.

Von den genannten beiden Punkten hängt die Diagrammform primär ab. Von dem nun festliegenden theoretischen Diagramm sollen tunlichst kleine Verlustflächen abgehen; das ist der Gesichtspunkt für Einstellung des VA - und VE -Punktes. Kleinste Verlustflächen werden etwa erreicht sein, wenn die vor und hinter dem Totpunkt liegenden Teile einander gleich sind. Diese Abzüge bezeichnen wir als sekundär.

Wie groß hiernach die Voreinströmung und die Vorausströmung sein muß, wie weit also die Punkte VE und VA — linear oder im Kreis-

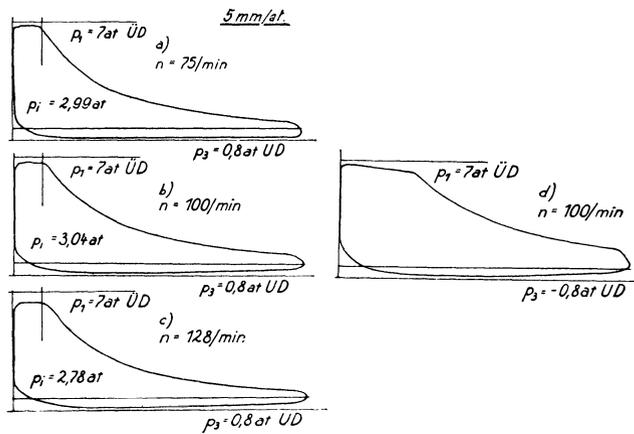
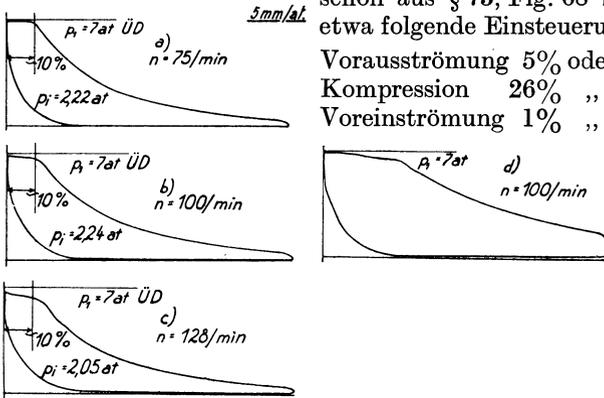


Fig. 110. Bei Kondensation.
Fig. 110 und 111. Diagramme einer Einzylindermaschine
Die Füllung 10% ist jedesmal durch Strich

maß — dem Totpunkt vorangehen sollen — ist allgemein nicht zu sagen. Es hängt ab von der Größe des beim Öffnen auszugleichenden Spannungsunterschiedes zwischen Zylinder und Ein- bzw. Ausströmrrohr, von der Weite der den Ausgleich vermittelnden Querschnitte und von der Drehzahl der Maschine. Insofern diese Verhältnisse im Betriebe der Maschine wechseln, muß man sich überdies mit einem billigen Ausgleich zwischen den Anforderungen verschiedener Betriebszustände, namentlich auch verschiedener Belastungen begnügen.

So sind in Fig. 110 und 111 eine Reihe von Diagrammen bei stets derselben Einstuerung der Dampfmaschine aufgenommen, wobei mit *verschiedener Belastung*, mit *Auspuff und Kondensation* und endlich mit *verschiedener Drehzahl* gearbeitet wurde. Die Diagramme sind teilweise schon aus § 73, Fig. 68 bekannt. Wir haben etwa folgende Einstuerung:

Vorausströmung 5% oder $\approx 26^\circ$ im Kreismaß
 Kompression 26% „ $\approx 61^\circ$ „ „
 Voreinströmung 1% „ $\approx 11^\circ$ „ „



Diese Vorausströmung zeigt sich bei Auspuffbetrieb als ausreichend, bei langsamem Gang (Fig. 110a) sogar etwas reichlich, da im Totpunkt der Gegendruck erreicht ist. Sie reicht auch bei Kondensationsbetrieb und

Fig. 111. Bei Auspuff. bei wechselnder Drehzahl und Leistung. kenntlich gemacht. $\frac{2}{3}$ nat. Gr.

langsamem Gang, Fig. 110a, wird jedoch offensichtlich knapp in Fig. 110c und d, nämlich bei großer Leistung, also vergrößertem Spannungsabfall, oder bei hoher Drehzahl, also verringerter verfügbarer Zeit.

Die vorhandene Voreinströmung ist bei Auspuffbetrieb, wegen der höheren Kompression, also des geringen Druckausgleiches, schwerlich überhaupt nötig; dafür, daß sie reichlich ist, spricht die spitze Ausarbeitung des Diagrammes am Beginn der Einströmlinie. Bei Kondensationsbetrieb ist der auszugleichende Spannungssprung viel größer, trotzdem reicht bei langsamem Gang, Fig. 110a, die Voreinströmung, deren Beginn hier deutlich erkennbar ist, aus; der Fortfall der Spitze ist immerhin ein Zeichen dafür, daß der volle Druck erst hinter dem Totpunkt erreicht war, wo der Kolben sich wieder bewegt; Fig. 110a möchten wir in bezug auf die Voreinströmung als vorzüglich bezeichnen. Deutlich kann man verfolgen, wie mit steigender Drehzahl die Voreinströmung scheinbar verschwindet — die gleichen eröffneten Querschnitte beginnen knapp zu werden — und wie eine Abrundung am Beginn der Einströmlinie die Voreinströmung als zu knapp erscheinen

läßt, was sie weder bei kleiner Drehzahl (Fig. 110a) noch bei großer Kompression (Fig. 111c) war.

Über die Kompression ist zu sagen, daß sich für Auspuffbetrieb Vollkompression ergibt, wenn im Kondensationsbetrieb mäßige Kompression eintritt. Aber auch der Kompressionsenddruck bei Kondensationsbetrieb ist nicht etwa stets der gleiche; mit steigender Drehzahl nimmt er zu, weil beim Abschluß des Ventiles das Drosseln eher beginnt, und weil schon der Kompressionsanfangsdruck, also der Zylinderdruck während des Ausströmens, höher ist, auch mit der Leistung nimmt er aus gleichen Gründen zu.

Letzterer Erscheinung ist sorgsamste Aufmerksamkeit zu widmen, wir meinen den Verlustflächen, die sich unter der Ausströmlinie bilden und übrigens entsprechend über der Einströmlinie. Da der Admissionsdruck einerseits, der Gegendruck der Atmosphäre bzw. des Kondensators andererseits jeweils eingezeichnet ist, so zeigen die Diagramme gut die auftretenden Verluste. Die Verlustflächen nehmen natürlich mit der Drehzahl zu — denn mit steigendem Dampfgewicht wachsen die Widerstände der Leitungen und Steuerorgane. Die Verlustflächen unter der Ausströmlinie sind bei Kondensationsbetrieb größer als bei Auspuffbetrieb, denn bei einander entsprechenden Versuchen ist das Dampfgewicht etwa dasselbe, aber das Volumen viel größer. Diese Verhältnisse sind leicht verständlich. Besonders ist aber hinzuweisen auf die starke Vergrößerung der Verlustflächen, sobald für den vorangegangenen Spannungsausgleich nicht genügend Zeit verfügbar war. In Fig. 110b bis d schleppt sich der Ausgleich als allmähliches Abfallen des Gegendruckes durch den größten Teil der Diagrammlänge; in Fig. 110c ist der Spannungsverlust beim Einströmen $\frac{3}{4}$ at über die ganze Einströmung hin, was in Fig. 111c nicht der Fall ist. (Auf der 10%-Ordinate ist der Spannungsverlust beidemal gleich.)

82. Abhängigkeit der Diagramme von Verbundmaschinen von der Aufnehmerspannung und ihren Schwankungen. Bei Verbundmaschinen wird die Diagrammform in gleicher Weise wie bei Einzylindermaschinen durch die Einsteuerung der Zylinder bestimmt, die nacheinander vom Dampf durchlaufen werden. Der Hochdruckzylinder wird mit Dampf von der Kesselspannung beaufschlagt und bläst den Dampf in das Verbindungsrohr zwischen ihm und dem Niederdruckzylinder aus, das oft durch eine besondere Erweiterung als Aufnehmer ausgebildet ist. Der Niederdruckzylinder entnimmt seinen Dampf dem Aufnehmer und entläßt den Dampf in die Atmosphäre oder in den Kondensator.

Über die sekundären Einflüsse der Vorein- und Vorausströmung und über den primären Einfluß der Kompression ist Neues überhaupt nicht zu sagen. Als primär das Diagramm gestaltend kommt indessen noch der Aufnehmerdruck hinzu, der seinerseits (§ 74) von der Niederdruckfüllung abhängt; diese nämlich kann, im Gegensatz zur Hochdruckfüllung, willkürlich gewählt werden. Aus den Versuchen § 74 ist bekannt, daß die richtige Wahl des Aufnehmerdruckes erheblichen Einfluß auf den Dampfverbrauch hat, und daß günstigster Dampfverbrauch erzielt wird, wenn man für tunliche Verminderung der

irreversiblen Spannungsausgleiche sorgt — wobei des größeren beteiligten Volumens wegen fast allein auf den Spannungsabfall am Expansionsende zu achten ist; Schleifenbildung am Kompressionsende wird ohnehin ausbleiben, wenn man mit geringer Kompression (§ 75) arbeitet.

Charakteristische Beeinflussungen der Diagrammform rühren daher, daß das Ausblasen des Hochdruckzylinders nicht in die unendliche Atmosphäre oder in den unter konstantem Druck stehenden Kondensator erfolgt, sondern in den Aufnehmer endlichen Inhalts. Ebenso ergeben sich charakteristische Formen für die Füllungsperiode des Niederdruckzylinders, weil derselbe den Dampf nicht dem sehr großen Kessel, sondern dem endlichen Aufnehmerinhalt entnimmt. Die entstehenden Diagrammformen sind charakteristisch verschieden voneinander, je nachdem ob die beiden Zylinder auf zwei um 90° versetzte Kurbeln arbeiten, oder ob sie auf die gleiche Kurbel arbeiten: das erstere ist der Fall bei der Querverbundmaschine, das letztere bei der Längsverbundmaschine (Tandemmaschine).

Bei der *Querverbundmaschine* (Fig. 112) wird im Hochdruckdiagramm Füllungs- und Expansionsperiode wie beim Einzylinderdiagramm verlaufen. Vom Punkte VA an erfolgt das Ausblasen in den Aufnehmer, dessen Druck dabei zunächst steigt. Denn während der Hochdruckzylinder die erste Hälfte seines Hubes rückschiebend durchmißt, befindet sich die um 90° versetzte Niederdruckkurbel in der zweiten Hubhälfte, und da die Füllung des Niederdruckzylinders meist kleiner als 50% ist, so entnimmt also der Niederdruckzylinder dem Aufnehmer nichts. Ein Stück vor der Hubmitte des Hochdruckzylinders beginnt der Niederdruckzylinder Dampf aus dem Aufnehmer zu entnehmen. Dem Punkte VE des Niederdruckzylinders entspricht nämlich der Punkt im Hochdruckdiagramm, der (die Schubstangenlängen unendlich gesetzt) durch Gleichheit der beiden Strecken a festgelegt und mit VE_N bezeichnet ist. Von VE_N an wendet sich die Kurve des Gegendruckes abwärts, indem mehr und mehr die Dampfentnahme des Niederdruckzylinders die Oberhand gewinnt, weil nämlich der Hochdruckkolben kleinere Fläche hat, auch sich mehr und mehr dem Totpunkt nähert, während der Niederdruckkolben vermöge seiner Größe und auch wegen der zunehmenden Kolbengeschwindigkeit um so stärker auf Herabgehen des Aufnehmerdruckes wirkt, je weiter wir über T_{1N} hinauskommen. In Ko wird dann der Hochdruckzylinder vom Aufnehmer abgetrennt und weiterhin findet Kompression und von VE an die Füllung des Hochdruckzylinders statt, wie wenn ein Niederdruckzylinder nicht vorhanden wäre.

Das entsprechende Diagramm des Niederdruckzylinders sieht wie folgt aus. Nachdem bis zum Totpunkt T_1 der Druckausgleich des schädlichen Raumes stattgefunden hat, wird der Druck zwar sinken, aber immerhin nur langsam abfallen bis zu dem mit Ko_H bezeichneten Punkte, der zeitlich mit dem Kompressionspunkt des Hochdruckzylinders zusammenfällt (Strecken b einander gleich). Bis Ko_H nämlich wird der Dampf, den der Niederdruckzylinder dem Aufnehmer ent-

zieht, noch teilweise vom Hochdruckzylinder ersetzt. Hinter Ko_H tritt ein schnellerer Abfall des Druckes ein, weil von jetzt an ein reiner Expansionsvorgang aus dem Aufnehmer heraus stattfindet. Meist etwas vor Hubmitte findet dann die Füllungsperiode des Niederdruckzylinders ihr Ende, Punkt Ex , und die eigentliche Expansion des Niederdruckzylinders geschieht unabhängig vom Vorhandensein des Hochdruckzylinders; auch die Ausströmung von VA bis Ko erfolgt wie bei der Einzylindermaschine.

Die Diagramme der beiden Zylinder beein-

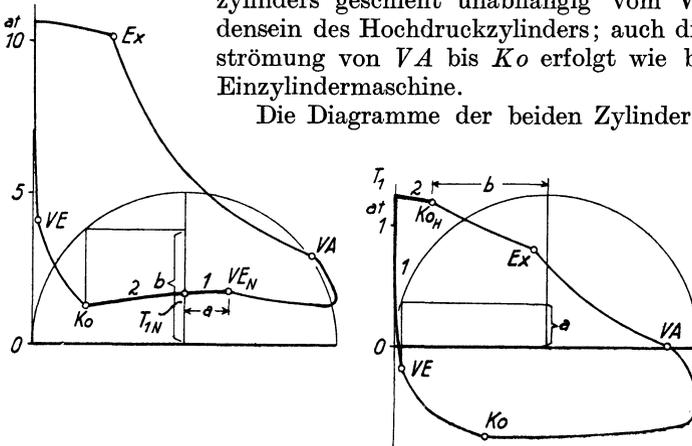


Fig. 112. Diagramme der Querverbund-Maschine, schematisch.

flussen einander also von VE_N bis Ko_H ; die einander entsprechenden Strecken der beiden Diagramme sind in Fig. 112 stark gezeichnet und mit 1 und 2 bezeichnet.

Etwas anders verläuft das *Diagramm der Längsverbundmaschine*. Auch bei ihrem Hochdruckzylinder erfolgt Füllung und Expansion unabhängig von der Verbundwirkung (Fig. 113). Vom Totpunkt an findet diesmal ein Abfallen des Druckes bis zum Punkte Ex_N hin statt, der durch Gleichheit der Strecken c bestimmt ist. Beide Zylinder beginnen diesmal gleichzeitig vom Totpunkt zurückzulaufen, beide haben also jederzeit gleiche Kolbengeschwindigkeit, doch hat die Entnahme des Niederdruckzylinders vermöge seiner größeren Kolbenfläche das Übergewicht über die Dampfzufuhr des Hochdruckzylinders. Die Entnahme des Niederdruckzylinders endet aber, je nach seiner Füllung, meist vor der Mitte des Hubes, und von da an wird der Druck des Aufnehmers, in den nur noch der Hochdruckzylinder hineinkomprimiert, wieder ansteigen, Kurve $Ex_N - Ko$. In Ko erfolgt die Absperrung des Hochdruckzylinders, der nun wieder für sich arbeitet.

Das Niederdruckdiagramm der Längsverbundmaschine weist, vom Totpunkt beginnend, zunächst ein langsames Abfallen des Druckes bis zum Punkte Ex auf, der zeitlich dem Punkte Ex_N des Hochdruckzylinders entspricht. Von da expandiert der Niederdruckzylinder und bläst den Dampf aus, unabhängig vom Vorhandensein des Hochdruckzylinders.

Während also die Ausblaselinie des Hochdruckzylinders bei der Querverbundmaschine eine Einziehung zeigt, weist diejenige der

Längsverbundmaschine eine Ausbauchung auf. Die Niederdruckdiagramme beider Maschinenarten unterscheiden sich durch das Vorhandensein des gelegentlich verwischten, oft aber sehr deutlichen Punktes Ko_H in der Admissionslinie der Querverbundmaschine (Fig. 112). Man darf diesen Punkt Ko_H nicht für den Expansionspunkt des Diagrammes halten! — Wir entnehmen hieraus, daß die in §§ 69 bis 75 gegebenen Diagramme durchweg einer Längsverbundmaschine entstammen. Fig. 114 gibt zum Vergleich Diagramme einer Querverbundmaschine.

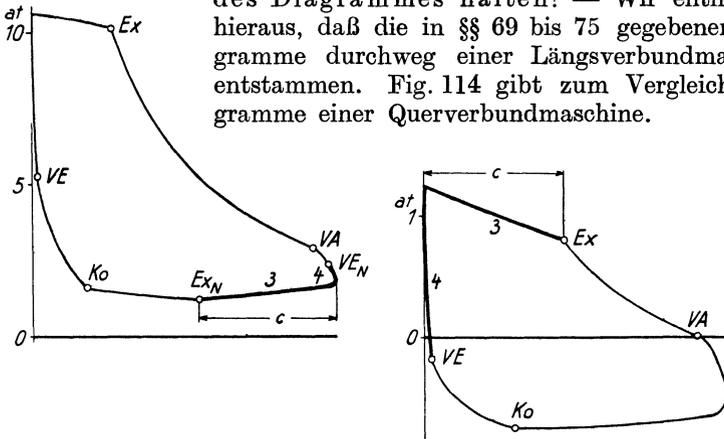


Fig. 113. Diagramme der Längsverbundmaschine, schematisch.

Im übrigen pendelt natürlich der Aufnehmerdruck im Beharrungszustand um einen Mittelwert herum; wie sein Mittelwert sich einstellt, wurde in § 74 besprochen.

Kleinere Abweichungen der Diagrammformen von den normalen können auftreten, insbesondere wie folgt: bei der Querverbundmaschine wird im Punkt VE_N des Hochdruckdiagrammes ein Sprung nach abwärts zu sehen sein, wenn erhebliche Dampfmenngen zum Auffüllen des schädlichen Raumes des Niederdruckzylinders gebraucht werden, wenn

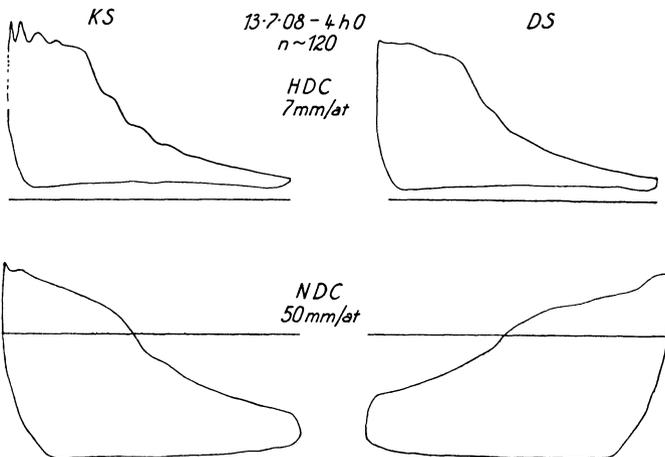


Fig. 114. Diagramme einer Querverbundmaschine. $\frac{2}{5}$ nat. Gr.

also der Spannungssprung hinter VE sehr groß, die Kompression gering, und wenn der schädliche Raum des Niederdruckzylinders groß ist. Beim Querverbunddiagramm stellen sich Sprünge ein, wenn die Kurbeln nicht um 90° gegeneinander versetzt sind, sondern etwa um 108° , wie es gelegentlich geschieht. Selten sind diese Sprünge erheblich.

83. Dampf- und Steuerungsdiagramm. Nachdem besprochen ist, welche Form das Diagramm normal haben soll, fragt es sich nun, was zu tun ist, um eine als ungünstig erkannte Diagrammform so umzugestalten, daß sie den Anforderungen entspricht, die namentlich auf geringen Dampfverbrauch, daneben auf Erzielung einer gewissen Höchstleistung und vielleicht noch auf Ruhe des Ganges gerichtet sein

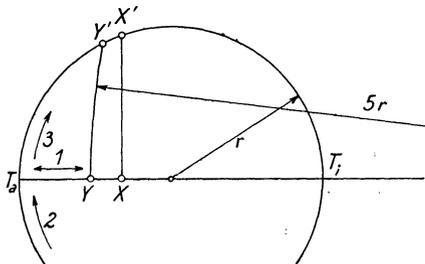


Fig. 115. Kolben- und Kurbelweg.

werden. Die als notwendig erkannte Änderung kann etwa sein: es soll die Vorausströmung früher gelegt werden, ohne daß die anderen drei Punkte, insbesondere der auch vom Auslaßorgan bestimmte Kompressionspunkt, sich ändern.

Das Diagramm ist im ganzen außer durch die Maschinenabmessungen und die Dampfzustände durch die Lage der vier Punkte Ex ,

VA , Ko , VE bestimmt; um jeden derselben beliebig einstellen zu können, brauchen wir nach allgemeinen mathematischen Regeln vier Bestimmungsstücke zu willkürlicher Änderung. Man hat zwei Steuerorgane — Ein- und Auslaß, vielleicht zu einem Stück vereinigt — und muß an jedem zwei Stücke ändern können, das ist die Überdeckung und die Voreilung. Wo über diese Größen nicht willkürlich oder nicht unabhängig von den anderen verfügt werden kann, da ist man der Steuerung nicht ganz Herr und muß Kompromisse schließen.

Bekanntlich entspricht der geradlinigen Kolbenbewegung von T_a nach T_i , Pfeil 1, Fig. 115, die Kurbelbewegung nach Pfeil 2 und 3; dabei ist einer Stellung X des Kolbens auf dem Kolbenweg $T_a T_i$ die Stellung X' der Kurbel auf dem Kurbelkreis $T_a T_i$ zugeordnet, die sich durch Projizieren von X nach X' finden läßt. Das Projizieren erfolgt durch ein geradliniges Lot XX' auf der Kolbenweglinie, wenn man unendliche Länge der Schubstange annimmt, was man für qualitative Überlegungen tun kann, nicht aber für quantitative Auswertungen. Unter Beachtung der endlichen Stangenlänge verwendet man zum Projizieren Kreisbögen, die die Punkte Y und Y' einander zuordnen. Man zieht sie mit dem Radius, der das Schubstangenverhältnis im Verhältnis zum Kurbelkreisradius wiedergibt; in Fig. 115 ist das Schubstangenverhältnis $h = 5$, der projizierende Kreisbogen ist also mit dem fünffachen Kurbelradius beschrieben.

Hiernach ergeben sich aus einem Dampfdiagramm die Kurbelstellungen, bei denen Öffnung oder Abschluß erfolgt, und die zwischen ihnen liegenden Kurbelwinkel nach Fig. 116 in folgender Weise. Etwa

der Punkt Ex des Dampfdiagrammes läßt sich zunächst als Punkt e auf die Kolbenweglinie des Schieberdiagrammes projizieren und nun mit einem Kreisbogen entsprechend der Schubstangenlänge der Punkt Ex im Steuerungsdiagramm finden. Das heißt also, wenn der Abschluß des Einlaßorgans bei einer Kurbelstellung 65 Grade hinter dem Totpunkt T_a erfolgt, so entspricht dem im Dampfdiagramm die Füllung in gekennzeichnete Größe. Ganz entsprechend findet man die Punkte VA , Ko und VE auf den Kurbelkreis, letztere beiden in dessen unterer Hälfte, als dem Rückgang des Kolbens angehörig.

Wir schließen folgende Überlegung an: VA und Ko werden von dem gleichen Steuerorgan (der gleichen Steuerkante, dem gleichen Ventil) bestimmt, ersteres durch Öffnen, letzteres durch Schließen des Auslaßkanales. Der Kreisbogen $VA-t_2-Ko$ gibt also den Bruchteil der gesamten Kurbelumdrehung ab, währenddessen das Auslaßorgan geöffnet hat. Meist wird dasselbe durch eine Exzenteranordnung bewegt, und dann muß der Totpunkt des Exzenter auf halbem Wege zwischen dem Öffnen und dem Schließen des Steuerorgans, also im Punkte t_2 liegen: der Weg zum Öffnen des Steuerorgans von VA bis t_2 muß so weit sein, wie der

Weg zum Schließen des gleichen Organs von t_2 bis Ko ,
 $\widehat{VA t_2} = \widehat{Ko t_2}$.
 t_2 gibt an, welche Stellung die Kurbel zu der Zeit hat, wo das Exzenter in seinem Totpunkt steht. Man findet die Lage, indem man auf $VA - Ko$ das Mittellot errichtet.

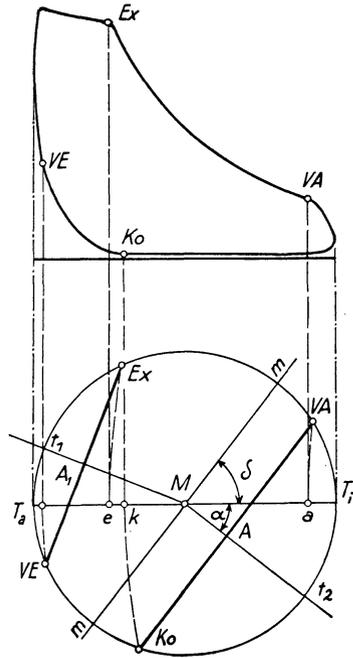


Fig. 116. Beziehung zwischen Dampf- und Steuerungsdiagramm, schematisch.

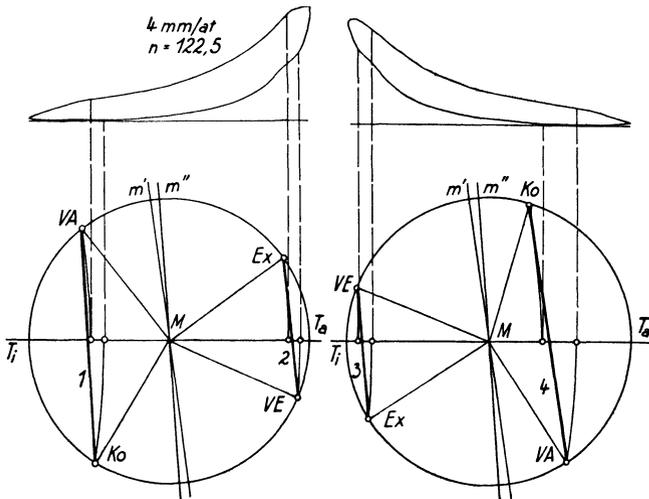


Fig. 117. Diagramme einer Kolbenschieber-Steuerung mit Achsenregler $\frac{2}{3}$ nat. Gr.

Man kann die gleiche Konstruktion für $VE—Ex$ machen, sofern die Einlaßsteuerung durch ein Exzenter (nicht durch Doppelschieber, nicht durch Ausklinkung) betätigt wird, und kommt dann auf t_1 als diejenige Kurbellage, bei der das Einlaßexzenter seine Totlage erreicht; t_1 ergibt sich als Mittellot auf $VE—Ex$. Aus diesem Zusammenhang ist ersichtlich, daß Ein- und Auslaß in Fig. 116 nicht durch das gleiche Exzenter gesteuert sind.

Wenn dagegen beide Zylinderseiten von einem Exzenter bedient werden, so müssen Ein- und Auslaß beider Diagramme gleiche Voreilung erkennen lassen. Fig. 117 zeigt die Diagramme einer Einzylinder-Auspuffmaschine mit Kolbenschieber, der von einem Flachregler beeinflusst wird. Ohne beschönigendes Probieren wurden aus den Dampfdiagrammen die darunter gezeichneten Steuerungsdiagramme gefunden. Daß die Linien 1 und 4 nicht ganz parallel sind, kann bei der unsicheren Kennzeichnung der Punkte im Dampfdiagramm kaum wundernehmen. Dazu kommt, daß die Linien gar nicht genau parallel sein können, wenn der Regler tanzt, was er unter Einwirkung der Schiebermassen sicher

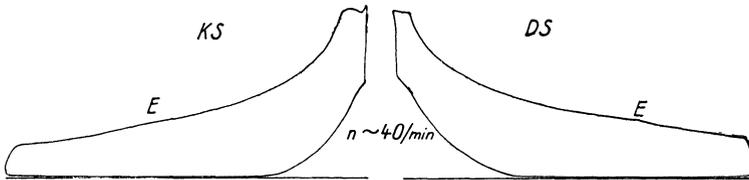


Fig. 117a. Diagramme einer Doppelschiebermaschine, mit Abschuß des Grundschiebers bei E.

tut. Die Linien 1 und 3, andererseits 2 und 4 sind aber jedesmal recht gut parallel, nämlich parallel m' bzw. m'' . Die Voreilung scheint also etwa in den durch die Lagen m' und m'' gegebenen Grenzen zu schwanken.

Bei Doppelschiebersteuerungen wird (meist) der Expansionspunkt nicht von der Steuerkante bedingt wie die anderen Punkte. Eine Konstruktion nach Fig. 116 führt daher nur dann auf parallele Geraden, wenn man statt des Expansionspunktes des Diagrammes die Punkte E der Fig. 117a einführt, die durch einen Knick der Expansionslinie den Abschluß des Grundschiebers anzeigen.

Der Exzenterototpunkt darf als Mittellage aus Öffnen und Schließen dann nicht ermittelt werden, wenn nicht beide Punkte durch das Exzenter hervorgerufen werden — bei Ausklink- oder Doppelschiebersteuerung. Dagegen ist die Konstruktion nicht davon abhängig, daß das Steuerorgan selbst eine reine Exzenterbewegung macht; eine Verschränkung im Getriebe, wie sie bei Hahnsteuerungen vorkommt, hindert ihre Anwendung nicht.

Wir wollen unsere weiteren Betrachtungen an der Auslaß-Steuerung anstellen. Die Lage der Punkte VA und Ko (Fig. 116) ist bestimmt durch die Größe des Winkels α , sowie durch die Lage des Punktes A auf dem Radius $M t_2$; durch Voreilung und Überdeckung.

Der Winkel α gibt an, wieviel später (nämlich bei t_2) das Exzenter seine Totlage durchläuft, als die Kurbel (bei T_i) die ihre. Je größer α ,

desto kleiner ist sein Komplementwinkel δ , der in der Konstruktionslehre als *Voreilwinkel* des Exzenter bezeichnet zu werden pflegt.

Die Lage des Punktes A auf dem Radius Mt_2 gibt an, um welche linear in der Stangenrichtung gemessene Strecke das Exzenter aus seiner Mittellage $m m$ verschoben sein muß, damit es zum Öffnen kommt.

Die Dauer der Eröffnung, der Bogen $\widehat{VA - Ko}$ ist durch das Verhältnis $\frac{MA}{Mt_2}$ eindeutig festgelegt. — Man bezeichnet MA bei Schiebersteuerungen als die *Überdeckung*, sofern der Kreisradius Mt_2 gleich der *Exzentrizität* gemacht worden ist; man kann $\frac{MA}{Mt_2}$ als relative Überdeckung bezeichnen. Will man die Übertragung dieser Bezeichnung auf Ventile vermeiden, bei denen es sich vielmehr um den toten Weg des Gestänges bis zum Anheben des Ventiles handelt, so kann man mit der *relativen Öffnungsdauer* rechnen, die durch das Verhältnis des Bogens $VA - Ko$ zur Länge des Kreisumfanges gegeben ist. Der Überdeckung 0 entspricht also die relative Öffnungsdauer 0,5, die Überdeckung r (gleich dem halben Exzenterhub) würde gar keine Öffnung mehr, also eine Öffnungsdauer 0 ergeben. Negativer Überdeckung entsprechen Öffnungsdauern über 0,5. Eine Vergrößerung der relativen Überdeckung bedeutet also eine Verkleinerung der Öffnungsdauer, beide hängen aber eindeutig voneinander ab.

Jede Änderung der Einsteuerung beruht auf Änderung der Voreilung und der Öffnungsdauer.

Ein *versuchsmäßiger Beleg* für den besprochenen Zusammenhang läßt sich geben, indem man die Einsteuerung durch Auskurbeln feststellt, darauf das zugehörige Dampfdiagramm mit dem Indikator aufnimmt. Zum Auskurbeln stellt man die Maschine zunächst in die Totpunkte, und markiert mit Kreide am Umfang des Schwungrades die Lage irgendeines feststehenden Teiles, etwa eines über das Schwungradgeländer gelegten Lineales. Nun stellt man, mit dem Schaltwerk drehend und dabei die Steuerung beobachtend — der Schieberdeckel ist zu entfernen — der Reihe nach auf die charakteristischen Punkte beider Zylinderseiten — Öffnen und Schließen — und markiert jedesmal wieder die Stellung des Schwungrades. Zum Schluß werden die Abstände der Kreidemarken von den beiden Totpunkten mit einem Bandmaß ausgemessen, das man über das Schwungrad legt. Das Ergebnis solcher Ausmessung zeigt Tabelle 44, in der unteren Zeile sind die Kurbelwinkel berechnet, zu denen Öffnen und Schließen erfolgt. Diese nun trägt man an einem Kreis an, dem man die Länge des als zugehörig aufgenommenen Dampfdiagrammes zum Durchmesser gibt, Fig. 118.

So war der Expansionspunkt der Kurbelseite (vorn) 2611 mm hinter dem äußeren Totpunkt (d. h. wo die Kurbel außen, der Kolben innen steht). Der halbe Schwungradumfang war 5515 mm. Also stand die

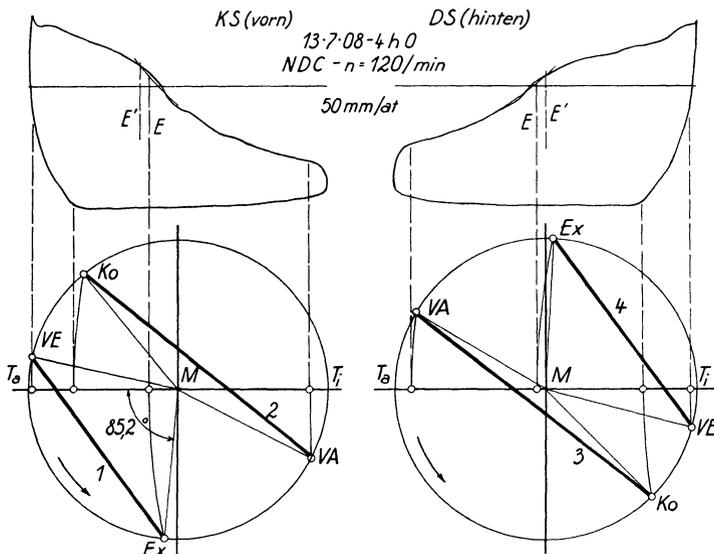
Kurbel beim Abschluß der Einströmung $180 \cdot \frac{2611}{5515} = 85,2^\circ$ hinter T_a .

So ergibt sich ein Punkt Ex , der mit Kreisbogen auf den Durchmesser

Tabelle 44. Auskurbelung

	Bezeichnung des Punktes	T_a	Exv	Koh	VAv	VEh
1	Abstand von T am Schwungradumfang . mm	0	2611	4124	4741	5079
2	entsprechend Kurbelwinkel . .	0°	$85,2^\circ$	$134,5^\circ$	$154,5^\circ$	$165,7^\circ$

projiziert wird. Entsprechend für die anderen Punkte. — Man sieht in Fig. 118, wie durch Drosselwirkung die Expansion und die Kompressionslinie schon etwas früher einsetzen, als dem Abschluß des Steuerorganes entspricht; besonders deutlich tritt das dann hervor, wenn man durch die Schwingungen der Indikatorfeder die ausgleichende glatte Kurve legt, die den wahren Verlauf des Druckes angibt; der Expansionspunkt des Indikatorgrammes sollte bei E liegen, er liegt bei E' .

Fig. 118. Dampfdiagramm mit Schieberdiagramm verglichen. $\frac{2}{5}$ nat. Größe.

84. Änderungen der Einstuerung. Jede Änderung der Einstuerung besteht in Änderung der Voreilung und der Öffnungsdauer. Beide zusammen geben die Möglichkeit, die Punkte VA und Ko — entsprechend VE und Ex — jeden unabhängig vom anderen zu verstellen.

Es kann etwa die Aufgabe sein, beim Übergang von Kondensations- zum Auspuffbetrieb die Kompression zu verringern, ohne daß die Vorausströmung wesentlich verlegt werden soll. Das geschieht nach Fig. 119a bis c.

Durch eine Verkleinerung des Voreilwinkels δ auf den Wert δ' , Fig. 119a, wird VA und Ko nach AV' und Ko' auf eine spätere Kurbelstellung verlegt, Vorausströmung und Kompression werden beide vergrößert. Diese Wirkung kann man praktisch erzielen, indem man bei nicht laufender Maschine das Exzenter entgegen der Drehrichtung

einer Schiebersteuerung.

T_i	T_t	Exh	Kov	VAh	VEv	T_a
5515	0	2668	3957	4568	5127	5510
180°	0°	87,0°	129,0°	149,0°	167,3°	180°

verstellt. Dadurch wandert t_2 nach t'_2 . Durch Änderung der Voreilung wird also der (mittlere) Zeitpunkt der Öffnung des Ausströmorganes verschoben, die Dauer der Öffnung bleibt unverändert. — Man

beachte bei Überlegungen, daß t_2 im Drehsinn der Maschine wandert, wenn das Exzenter entgegen dem Drehsinn verstellt wird.

Wenn man nun weiterhin (Fig. 119b) den Abstand a der Verbindungslinie $Ko—VA$ oder $Ko'—VA'$ auf den Wert a' verkleinert, so wandern diesmal die beiden Endpunkte in einander entgegengesetztem Sinne: der mittlere Zeitpunkt der Eröffnung bleibt erhalten, die Öffnungsdauer wird verändert. Dadurch wandert VA' nach VA zurück, Ko' wandert im Sinne wie vorher weiter und kommt nach Ko'' . Beide Änderungen verstärken sich also in bezug auf den einen der von ihnen beeinflussten Punkte (Öffnung oder Schluß), während sie in bezug auf den anderen einander aufheben. Durch beide zusammen ist man also in der Lage, etwa in Fig. 119c VA festzuhalten, Ko aber nach Ko'' zu verlegen, also die Kompression zu verkleinern.

Die *praktische Verwirklichung der Verstellung* geschieht wie folgt. Es war schon gesagt, daß die *Änderung der Voreilung* durch Verdrehen des Exzenter auf der Welle erzielt werden kann; der gleiche Zweck kann, wo eine Steuerwelle vorhanden ist, durch Änderung des antreibenden Zahneingriffs erzielt werden, oder wenn in der Steuerwelle eine Kupplung vorhanden ist, durch Änderung dieser. Die *Änderung der Öffnungsdauer* erfolgt am häufigsten durch Verstellung einer wirksamen Stangenlänge; dazu pflegen Stangenschlösser oder Verbindungen mit Gewinde und Gagenmutter im Gestänge vorgesehen zu sein; deren Änderung wirkt dann stets nur auf die Öffnungsdauer, nie auf die Voreilung. Dem gleichen Zweck dient aber auch anderweites Fassen des Schiebers mit dem Gestänge und Änderung der Wälzhebelangriffe, sei es auf der Ventilspindel, eines festen Wälzhebeldrehpunktes — vorausgesetzt, daß hierdurch nicht die Wälzwirkung (§ 85) gestört wird.

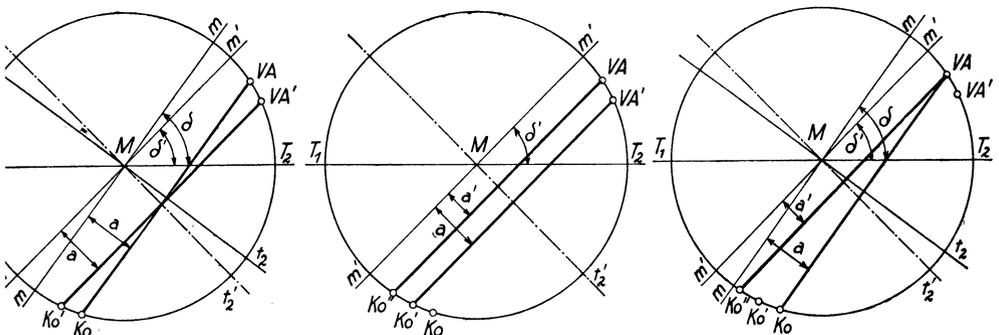


Fig. 119a—c. Maßnahmen zur Verkleinerung der Kompression.

Der Einfluß der beiden Verstellmöglichkeiten: Voreilwinkel und Stangenlänge, ist hiernach klar; mit ihrer beider Hilfe kann man zwei Größen, also Öffnung und Schluß einer Steuerkante, eines Ventils völlig beherrschen. Wo mehrere Organe (z. B. die vier Steuerkanten des Muschelschiebers) von einem Gestänge bewegt werden, da wird man nur unter den Ansprüchen der verschiedenen Organe vermitteln können; oder man müßte z. B. eine Steuerkante des Muschelschiebers ändern (fortnehmen oder mit Schwalbenschwanz ansetzen oder neuen Schieber), was einer Änderung der Stangenlänge für diese Steuerkante entspricht.

Der *Einfluß anderer Verstellmöglichkeiten* muß von Fall zu Fall untersucht werden. Eine Verkleinerung der Exzentrizität — des Gestängehubes — kommt bei unveränderter absoluter Überdeckung auf eine Vergrößerung der relativen heraus, auf eine Verkleinerung der Eröffnungsdauer. Der Einfluß einer Kulissenverstellung kann graphisch untersucht werden, und indem man Diagramme bei verschiedener Einstellung nimmt und die Wirkung der Verstellung direkt am Dampfdiagramm beobachtet.

Es empfiehlt sich, alle Verstellmöglichkeiten einer Steuerung mit Skala zu versehen, sobald sich die Notwendigkeit mehrfacher Verstellung ergibt — jedenfalls bei Versuchsmaschinen und im Laboratorium. Die Skala kann rein empirisch, etwa in Millimeter, geteilt sein und dient, um die Wirkung von Änderungen besser numerisch beurteilen, sowie namentlich um eine frühere Einstellung genau wiederfinden zu können.

85. Bewegung der Steuerorgane. Die von den Steuerorganen einer Dampfmaschine ausgeführte Bewegung kann man empirisch aufnehmen, indem man einen Schreibstift an irgendeinem Teil anbringt, der mit dem zu untersuchenden Steuerorgan fest verbunden ist, und indem man diesen Schreibstift auf einem Papier schreiben läßt, das sich senkrecht zur Bewegung des Schreibstiftes fortbewegt. Man kann die Bewegung des Papiers vom Kreuzkopf ableiten, so daß es hin und her gehende, dem Kolbenweg proportionale Wege macht, oder aber man erteilt dem Papier eine gleichmäßige fortschreitende Bewegung; man erhält die Bewegung der Steuerorgane als abhängig vom Kolbenweg oder von der Zeit aufgetragen.

In den meisten Fällen entspricht die *Auftragung abhängig vom Kolbenweg* den Bedürfnissen, und man kann sich zum Aufzeichnen eines gewöhnlichen Indikators bedienen, dessen Trommel man in gewohnter Weise vom Kreuzkopf antreibt, während man den Kolben durch eine Druckstange von dem betreffenden Steuerorgan aus betätigen läßt. Voraussetzung dabei ist, daß das Steuerorgan nicht mehr als 15 mm Bewegung macht, da sonst wegen der sechsfachen, im Schreibzeug des Indikators liegenden Übersetzung die Höhe des Papiers nicht ausreicht. Gegebenen Falles muß man den Schreibstift selbst von dem Steuerorgan aus anzutreiben suchen, so daß die Übersetzung fortfällt; das Schreibstiftgetriebe dient dann nur noch zur Geradföhrung.

Meist wird eine *Feder für den Kraftschluß* in den Indikator einzubauen sein. Dieselbe ist möglichst schwach zu halten, um die Be-

wegung von nicht zwangsläufig bewegten Organen wenig zu stören. Man kann eine schwache Feder aus beliebigem Draht selbst wickeln, da die Feder nichts zu messen hat. Zur Schonung des Indikators kommt es in Frage, den Kolben herauszunehmen und durch einen Teil zu ersetzen, der sich nicht im eigentlichen Indikatorzylinder, sondern in dem unteren Verbindungsstutzen des Indikators führt. Es ist nämlich zu bedenken, daß das Schreibzeug in vielen Fällen so lange durchlaufen muß, wie die Maschine betrieben wird, da man es nicht immer im Betriebe ab- und anstellen kann. Zum Abstellen kann man sich wohl einer Gabel bedienen, die unter die Flügelmutter des Indikators so geklemmt wird, daß sie den Schreibstift in seiner höchsten Stellung festhält (bei Warmfederinstrumenten).

In dieser Weise läßt sich die Bewegung jedes Steuerorgans verfolgen. Bei *zwangsläufig bewegten Organen* pflegt es reichlich so einfach zu sein, den Zusammenhang zwischen Kolbenbewegung und Bewegung des Steuerorgans im Auskurbeln der Maschine punktweise festzulegen. Man trägt dann die Schieberausschläge abhängig vom Kolbenweg auf. Die Gestalt der entstehenden Kurve ist mannigfaltig. Beim einfachen Muschelschieber ergibt sich die *Schieberellipse*. Die Schieberellipse gibt mehr als das einfache Steuerdiagramm (Fig. 116), indem man außer Öffnung und Abschluß noch jederzeit die Weite hat, um die der Kanal geöffnet ist, und damit den freigelegten Kanalquerschnitt.

Wichtiger ist das Aufnehmen der Bewegung von Steuerorganen in solchen Fällen, wo die Bewegung keine zwangsläufige ist, wie bei den Ventilen der Freilaufsteuerungen, oder doch keine ganz zwangsläufige, wie bei den vom Regler beeinflussten Ventilen oder Schiebern.

Ventilsteuerungen werden bezeichnet als *zwangsläufig*, sofern der Aufgang sowohl wie der Niedergang unter dem Einfluß des Steuergetriebes erfolgt. Trotzdem ist das Getriebe nur dann ganz zwangsläufig, wenn nicht der Regler die Steuerung beeinflusst. Wo aber der Regler in das Steuergetriebe eingreift, erfährt er einseitig einen größeren oder kleineren Rückdruck, der meist zu einem schwachen „Tanzen“ des Reglers führt. Sobald das eintritt, ist die Bewegung des betreffenden Ventils nicht genau eindeutig der Kolbenstellung zugeordnet, da die Bewegung des Steuergetriebes von der Tanzbewegung des Reglers beeinflusst wird. In diesem Falle ist also auch ein empirisches Aufnehmen der Ventilbewegung nötig, und zwar wird die Ventilbewegung, auch bei gleicher mittlerer Reglerstellung, bei verschiedenen Drehzahlen der Maschine etwas verschieden ausfallen.

Fig. 120 zeigt *Ventilerhebungsdiagramme*, aufgenommen an einer sog. „alten“ Collmann-Steuerung bei wechselnder Füllung. Ein solches

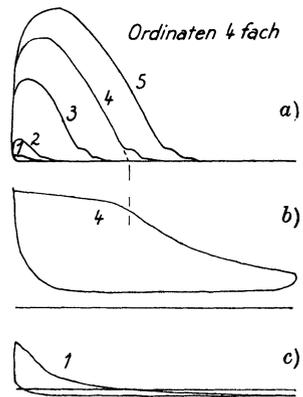


Fig. 120. Ventilerhebung einer zwangsläufigen Steuerung nebst Dampfdiagramm. $\frac{2}{3}$ nat. Gr.

Diagramm läßt sich aufnehmen, indem man das Frischdampfventil soweit drosselt, daß die Maschine nicht durchgehen kann, und nun durch Anfassen am Stellzeug den Regler allmählich aus der tiefsten in die höchste Stellung überführt. Je nach der Bauart wird man das durch Angreifen an der Muffe des Reglers, an einer Steuerwelle oder ähnlichem bewirken. — Gekennzeichnet ist das Diagramm dadurch, daß schon ziemlich vom Anfang des Ventilhebens an die Ventilbewegung verschieden ausfällt, je nach der Füllung, mit der die Maschine arbeitet.

In dieser Hinsicht charakteristisch verschieden sind die *Ausklinksteuerungen*, bei denen das Anheben des Ventils stets nach der gleichen Kurve erfolgt, worauf nach dem Ausklinken das Ventil, einer Feder folgend, der Schlußstellung zufällt. Bei verschiedener Füllung, die man in ganz gleicher Weise, wie bei einer zwangläufigen Steuerung angegeben, erreichen kann, ergibt sich ein Bild wie Fig. 121. Die gleiche Erhebungskurve — die man als zwangläufig auch im

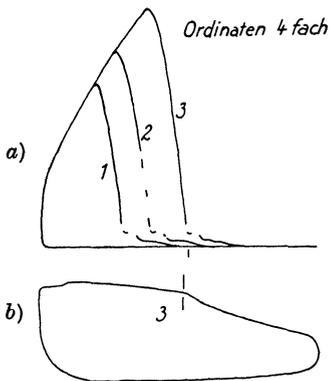


Fig. 121. Ventilhebung einer Freifallsteuerung nebst Dampfdiagramm. $\frac{2}{5}$ nat. Gr.

wird früher oder später durch Ausklinken unterbrochen, worauf in verschiedenen Kurven des Abfalles in einander ähnlicher Weise verlaufen. — Ähnliche Diagramme kann man auch an ausklinkenden Corliss-Steuerungen erhalten, bei denen man an Stelle der Hübe die Drehungen im Bogenmaß aufgetragen hatte.

Zu den Ventilerhebungen 1 und 4, Fig. 120, und zu 3, Fig. 121, sind auch noch die zugehörigen Indikatordiagramme gegeben. Die der Fig. 120 zugrunde liegende Steuerung wirkt bei kleinen Füllungen, Diagramm 1, ganz durch Drosselung. —

Den zwangläufigen Steuerungen (mit Ausnahme der Nockensteuerungen) ist

fast durchweg die Beschleunigung und Hemmung des Ventils durch Wälzhebel gemeinsam. Bei den ausklinkenden Steuerungen pflegt die Eröffnung bei passender Wahl der Abmessungen ohne weiteres sanft genug zu erfolgen; beim Abschließen wird ein Schlag auf den Ventilsitz durch einen Luft- oder Ölpuffer vermieden. Die Wirkung eines teils des Wälzhebels, andererseits des Puffers, läßt sich durch Versuche nachprüfen; da auf die hemmende Wirkung dieser Maschinenteile viel ankommt, so hat man sich von Zeit zu Zeit von ihrer richtigen Wirkung zu überzeugen. Falsche und richtige Wirkung läßt sich in folgender Weise demonstrieren:

Bei *Wälzhebeln* lege man zwischen die beiden sich aufeinander abwälzenden Hebel eine Reihe sehr dünner, schmaler Papierstreifen. Wenn beim Auskurbeln der Maschine die Abwälzung vonstatten geht, so wird immer nur einer der Streifen festgeklemmt sein, während die anderen lose sind, und hin und her geschoben werden können; die verschiedenen Streifen werden aber der Reihe nach eingeklemmt. Die

Maßnahmen zur richtigen Einstellung schlecht eingeklemmter Wälzhebel werden von Fall zu Fall durch den Augenschein entschieden werden können. — Man kann sich auch im Gange von der richtigen Wirksamkeit von Wälzhebeln überzeugen, indem man zwischen die beiden Wälzhebel einen ähnlichen Streifen nicht allzu schwachen Papiers hält; die Wälzhebel werden dann nicht mehr richtig wälzen und das Ventil wird schlagen. Es ist ein Kennzeichen für die richtige Wirksamkeit der Wälzhebel, daß das Ventil ruhig aufsitzt, solange der Streifen nicht eingeschoben ist, daß es aber schlägt, an welcher Stelle man ihn auch einschiebt.

Die *Puffer ausklinkender Steuerungen* müssen insbesondere bei Ventilen (bei Hähnen, die durchschlagen können, kommt es weniger darauf an) sehr prompt auffangen, so daß einerseits das Ventil nicht wesentlich auf den Sitz haut und doch auch nicht längere Zeit ein wenig geöffnet bleibt und dann wesentliche Nachfüllungen gibt. Meist ist an der Ventilspindel oder an den Puffern eine Einstellvorrichtung, die den Abstand des Ventils von der steuernden Kante regeln läßt, so daß also die puffernde Wirkung mehr oder weniger hoch über dem Sitz einsetzt. Fig. 122 zeigt ein Diagramm, aufgenommen an einer „neuen“ Collmann-Steuerung im Gegensatz zu Fig. 121 bei zu frühem Abfangen des Ventils. In diesem Falle läßt das Ventil Dampf nachströmen. Mäßigem Schlagen wird gelegentlich nachgerühmt, es sorge für dauerndes Dichtbleiben des Ventils — übermäßiges wird zur Abnutzung und zum Bruch führen. — Gelegentlich läßt sich nicht nur der Zeitpunkt, sondern auch die Stärke der Hemmung regeln, z. B. durch Einstellen eines Öldurchganges. Starke Hemmung, die dann freilich später einsetzen kann, ohne daß das Ventil schlägt, führt leicht zum Abreißen der Spindel (wenn diese auf Zug beansprucht wird), schwache Hemmung, die dann früher einsetzen muß, läßt gedrosselten Dampf nachströmen.

Einiges Interesse bietet es, bei unverändertem Zeitpunkt der Ausklinkung die Drehzahl der Maschine zu verändern. Man kann den Versuch leicht im Einlaß oder Auslaß der Maschine machen und erhält ein Bild wie folgt: Die Zeitdauer des Falles ist stets die gleiche, die Kurve des Abfalls nimmt um so größere Neigung an, je schneller das Papier bei schnellem Gang der Maschine unter dem Schreibstift durchgeschoben wird, gleicher Zeitpunkt der Ausklinkung ergibt also bei wechselnder Drehzahl nicht die gleiche Füllung. Der Einfluß dieser Erscheinung auf die Leistungscharakteristik wurde schon in § 73 am Ende besprochen.

86. Dampfbewegung in den Steuerorganen. Bei jeder Art von Steuerorganen kann man die Strömungsgeschwindigkeit des Dampfes in dem steuernden Querschnitt näherungsweise berechnen, wenn nach dem vorigen Paragraphen das Gesetz für die Öffnung des steuernden Organes ermittelt ist.

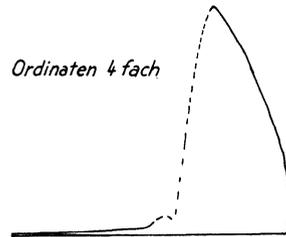


Fig. 122. Freifallventil zu früh abgefangen.
2/3 nat. Gr.

Während eines kurzen Zeiteiles dt der Füllungsperiode geht der Kolben um das Stück ds vorwärts und legt dabei das Volumen

$$dV = F \cdot ds$$

hinter sich frei. F ist die „wirksame“ Kolbenfläche (Techn. Mess. § 85). Um so viel mehr Dampfvolumen ist am Ende der Zeit dt im Zylinder. Dieses Mehr ist teils durch das Steuerorgan eingetreten, teils aber durch Expansion, also Druckabnahme des im Zylinder Befindlichen, entstanden.

Wir bezeichnen mit dD das während des kurzen Zeiteiles dt der Füllungsperiode in den Zylinder eingefüllte Dampfgewicht; es ist das der Unterschied des am Ende und am Anfang von dt im Zylinder befindlichen Gewichtes. Am Anfang möge V das vom Steuerorgan bis an den Kolben heran gerechnete Zylindervolumen und daher Dampfvolumen sein, γ sein spezifisches Gewicht, das für Satttdampf nur vom Druck p abhängt, dann ist

$$D_1 = V \cdot \gamma$$

anfangs im Zylinder. Am Ende des Zeiteiles hat V , entsprechend der Kolbenbewegung, um dV zugenommen, es beträgt also nachher $V + dV$. Das spezifische Gewicht γ möge um $d\gamma$ auf einen Wert $\gamma + d\gamma$ geändert sein; meist wird $d\gamma$ negativ sein. Dann ist am Ende von dt im Zylinder vorhanden

$$D_2 = (V + dV) (\gamma + d\gamma).$$

Eingefüllt ist also worden

$$\begin{aligned} dD &= D_2 - D_1 = (V + dV) (\gamma + d\gamma) - V \cdot \gamma \\ dD &= \gamma \cdot dV + V \cdot d\gamma, \end{aligned}$$

indem $V \cdot \gamma$ fortfällt und $dV \cdot d\gamma$ als unendlich klein höherer Ordnung fortbleibt. Hieraus folgt das in der Zeiteinheit eingefüllte Dampfgewicht

$$\frac{dD}{dt} = \gamma \cdot \frac{dV}{dt} + V \cdot \frac{d\gamma}{dt} \dots \dots \dots (4)$$

was auch ohne weiteres anzuschreiben war.

Solange der Druck p und damit γ unverändert bleibt, wenn also die Einströmlinie wagerecht geht, ist

$$\frac{dD}{dt} = \gamma \cdot \frac{dV}{dt}$$

und da $dV = F \cdot ds$, so ist das sekundlich eingefüllte Dampfgewicht:

$$\frac{dD}{dt} = \gamma \cdot F \cdot \frac{ds}{dt}$$

und das sekundlich eingefüllte Dampfvolumen

$$\frac{dD_v}{dt} = F \cdot \frac{ds}{dt} \dots \dots \dots (5)$$

Hat aber zur selben Zeit dt das Steuerorgan den Querschnitt f freigelegt, so wird die Geschwindigkeit w im Steuerquerschnitt

$$w = \frac{dD_v/dt}{f}$$

also nach Gleichung (5):

$$w = F \cdot \frac{ds/dt}{f} \dots \dots \dots (6)$$

ds/dt ist die Kolbengeschwindigkeit, die über dem Kolbenweg aufgetragen als Ellipse oder Kreisbogen erscheint. Die Geschwindigkeit des Dampfes im Ventil ist außer durch die konstante Kolbengröße noch durch den Quotienten aus Kolbengeschwindigkeit und Steuerquerschnitt bestimmt; beide Größen sind bestimmbar.

Das gilt aber nur so lange näherungsweise, wie die Einströmlinie wagerecht läuft, also $d\gamma/dt = 0$ ist. Sonst fällt das letzte Glied von Gleichung (4) nicht fort, es bildet eine Korrektion, solange die Einströmlinie sich mäßig senkt, und wird maßgebend, sobald das Steuerorgan erheblich zu drosseln beginnt. — Von dem Gliede $V \cdot \frac{d\gamma}{dt}$ ist V für jede Kolbenstellung bekannt, sofern freilich der schädliche Raum bekannt ist. Wir setzen, indem wir mit dp und mit ds multiplizieren und dividieren,

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{d\gamma}{dp} \cdot \frac{dp}{ds} \cdot \frac{ds}{dt} \dots \dots \dots (7d)$$

und haben nun das Produkt dreier bestimmbarer Größen. $\frac{d\gamma}{dp}$, die Änderung des spezifischen Gewichtes mit dem Druck, ist für Sattedampf den Dampftabellen zu entnehmen; sie ist übrigens über weite Bereiche hin wenig verändert:

im Mittel von 11 bis 12 at abs ist $\frac{d\gamma}{dp} = 5,96 - 5,49 = 0,47$

„ „ „ 2 bis 3 at abs ist $\frac{d\gamma}{dp} = 1,62 - 1,11 = 0,51$.

Ferner ist $\frac{dp}{ds}$ die Neigung der Einströmlinie im Indikatorgramm, und $\frac{ds}{dt}$ die Kolbengeschwindigkeit.

Im ganzen ist das in der Zeiteinheit eingefüllte Dampfgewicht

$$\frac{dD}{dt} = \gamma \cdot F \cdot \frac{ds}{dt} + V \cdot \frac{d\gamma}{dp} \cdot \frac{dp}{ds} \cdot \frac{ds}{dt}$$

oder unter Division mit γ ist das Volumen

$$\frac{dD_v}{dt} = \left(F + \frac{V}{\gamma} \cdot \frac{d\gamma}{dp} \cdot \frac{dp}{ds} \right) \cdot \frac{ds}{dt} \dots \dots \dots (8)$$

oder endlich die Strömungsgeschwindigkeit des Dampfes im Steuerquerschnitt der Größe f :

$$w = \frac{1}{f} \cdot \left(F + \frac{V}{\gamma} \cdot \frac{d\gamma}{dp} \cdot \frac{dp}{ds} \right) \cdot \frac{ds}{dt} \dots \dots \dots (9)$$

Für überschlägliche Rechnungen an Punkten weit vom Abschluß und auch von der Eröffnung dient (6), für genauere (9); doch bleibt in der Rechnung namentlich für die Zeit vom Eröffnen bis zum annähern-

den Druckausgleich immer die Unsicherheit, daß Verdampfungs- und Kondensationsvorgänge unbeachtet sind. Bei sehr hoher Anfangsüberhitzung kann auch die Annahme der Sättigung unzutreffend werden.

Der Rechnungsgang werde an einem *Beispiel* erläutert. Dazu dienen die Diagramme Fig. 123; die unterste Teilfigur *c* gibt das Erhebungsdiagramm eines freifallend schließenden Ventils; die Ventilerhebung war im Diagramm vierfach vergrößert. Über der Grundlinie des Diagrammes ist einmal ein Halbkreis geschlagen mit der Diagrammlänge als Durchmesser — er gibt die Kolbengeschwindigkeit $\bar{d} s/d t$ in einem noch zu ermittelnden Maßstab bei Annahme unendlicher Schubstangenlänge; ein zweites Mal ist die wahre, von der endlichen Schubstange beeinflusste Kolbengeschwindigkeit im gleichen Maßstab eingetragen; je nach der gewünschten Genauigkeit mag man die eine oder andere Kurve für die Rechnung benützen; man braucht aber auch überhaupt keine Kurve zu benützen, da das Verhältnis der Kolbengeschwindigkeit an beliebiger Stelle zu der größten bekannt ist. Die Diagramme entstammen der Deckseite.

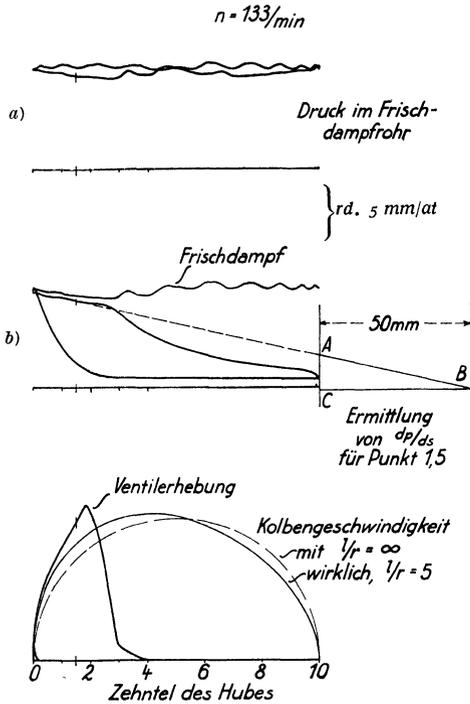


Fig. 123. Druckverlust und Ermittlung der Dampfgeschwindigkeit im Freifallventil. $\frac{2}{5}$ nat. Gr.

der Einfüllinie entstanden ist; der Druckverlust im Steuerorgan ist dadurch zu sehen.

Für die Abszisse $1\frac{1}{2}$ Zehntel der Fig. 123c ergibt sich folgende Rechnung: Die Ordinate der Ventilerhebung ist 45,8 mm (im Original, wiedergegeben in $\frac{2}{5}$ n. Gr.). Der Maßstab für die Kurve ist folgender: 1 mm im Diagramm war $\frac{1}{4}$ mm Ventilhub (Schreibzeigübersetzung), und da die beiden Ventilsitze des doppelsitzigen Ventils $(142 + 150) \cdot \pi = 917$ mm Umfang haben, so ist

1 mm im Ventilerhebungsdiagramm = $0,25 \cdot 917 = 229 \text{ mm}^2 = 0,000229 \text{ m}^2$
vom Ventil freigegebener Querschnitt f . Also ist für die Abszisse $1\frac{1}{2}$ Zehntel

$$f = 0,000229 \cdot 45,8 = 0,0105 \text{ m}^2.$$

Die Kolbengeschwindigkeit zunächst für die Kurbelstellung 90° ist gleich der Kurbelgeschwindigkeit, also bei 700 mm Kolbenhub $\equiv 0,35$ m Kurbelradius und der Drehzahl 133/min ist $c_{90} = 2 \cdot 0,35 \cdot \pi \cdot \frac{133}{60} = 4,86$ m/s.

Für die Kolbenstellung $x = 0,15$ aber gibt die Tabelle Hütte, 22. Aufl., II, S. 151 den Kurbelwinkel $\alpha = 41,8^\circ$, und damit ist $\frac{c}{c_{90}} = \sin \alpha \cdot (1 \pm \frac{1}{2} \cdot \cos \alpha) = 0,667 \cdot (1 + \frac{1}{2} \cdot 0,745) = 0,766$, worin $\frac{1}{2}$ das Schubstangenverhältnis ist und das + Zeichen dem Einwärtsgang des Kolbens (Füllung der Deckelseite) entspricht; die Kolbengeschwindigkeit ist also

$$c = \frac{ds}{dt} = 0,766 \cdot 4,86 = 3,72 \text{ m/s.}$$

Der Maßstab der in Fig. 123c eingezeichneten Kurven der Kolbengeschwindigkeit (für $l/r = \infty$ als Halbkreis gezeichnet; Kurve hier nicht benutzt) ist durch den Wert der halben Diagrammlänge gegeben: $\frac{1}{2} \cdot 94,2 \text{ mm} = 4,86 \text{ m/s}$; also

1 mm im Kolbengeschwindigkeitsdiagramm = $4,86 : 47,1 = 1,03$ m/s.

Endlich ist noch die wirksame Kolbenfläche (Durchmesser des Kolbens 480 mm, der Stange 90 mm)

$$F = 0,1810 - 0,0064 = 0,1746 \text{ m}^2.$$

Diese Zahlen alle in Formel (6) eingesetzt, erhalten wir die Strömgeschwindigkeit des Dampfes angenähert

$$w \approx 0,1746 \cdot \frac{3,72}{0,0105} = 61,9 \text{ m/s.}$$

Wenn wir jedoch genauer nach Formel (9) rechnen, so sind noch folgende Größen zu bestimmen: Das vom arbeitenden Dampf erfüllte Volumen ist (für eine Seite, vergleiche jedoch Fig. 103):

der schädliche Raum $7,3 \text{ ltr} = 0,0073 \text{ m}^3$
 ein Teil des Hubraumes $0,15 \cdot F \cdot s = 0,15 \cdot 0,1746 \cdot 0,7 = 0,0183 \text{ „}$
 im ganzen beim Kolbenstand 1,5 Zehntel $\frac{7,3 + 0,0183}{V} = 0,0256 \text{ m}^3$.

An jener Stelle des Frischdampfdiagrammes finden wir die Ordinate 30,8 mm, also bei einem Federmaßstab des Indikators von 5,07 mm/at den Frischdampfdruck 6,07 at $\bar{U}D = 6,07 + 1,03 = 7,10$ at abs; der Dampf war wenig überhitzt, mag also beim Eintritt ins Ventil seine Überhitzung bald verloren haben; im trocken gesättigten Zustande ist sein spezifisches Gewicht dann

$$\gamma = 3,64 \text{ kg/m}^3.$$

Das spezifische Gewicht trocken gesättigten Dampfes ist bei

$$\begin{array}{l} 7,0 \text{ at: } 3,589 \text{ kg/m}^3 \\ 7,5 \text{ „ } 3,829 \text{ „} \end{array}$$

Die Zunahme für 0,5 at: $0,240 \text{ kg/m}^3$.

Demnach ist für 1 at Druckzunahme

$$\frac{d\gamma}{dp} = 2 \cdot 0,240 = 0,480 \frac{\text{kg/m}^3}{\text{at}}.$$

Endlich bleibt $\frac{dp}{ds}$ zu ermitteln, das ist die Neigung der Drucklinie im Zylinderdiagramm an der Stelle 1,5 Zehntel. Zu ihrer Bestimmung kann der Spiegelderivator dienen (Techn. Mess. § 81). Wir können auch einfach zeichnerisch verfahren, indem wir nach Anleitung von Fig. 123b die Linie AB in Richtung der Drucklinie zeichnen und die zwischen zwei Parallelen von 50 mm Abstand abgeschnittene Höhe $AC = 11,4$ mm messen;

die Neigung der Drucklinie ist also $-\frac{11,4}{50} = -0,228$.

Hierfür die Ermittlung des Maßstabes: es ist im Zylinderdiagramm der Maßstab

für p : Federmaßstab 5,0 mm = 1 at
für s : Diagrammlänge 94,5 mm = 0,7 m Hub,

also für den Quotienten $\frac{dp}{ds}$: 0,0529 = 1,43 at/m

oder $1 = \frac{1,43}{0,0529} = 27,0$ at/m.

Dies ist der Wert der Einheit, während wir für $dp:ds$ die unbenannte Zahl $-0,228$ erhalten haben; diese bedeutet also den Wert

$$\frac{dp}{ds} = -0,228 \cdot 27,0 = -6,15 \text{ at/m}.$$

Alle Zahlen in Formel (9) eingesetzt, ergibt sich die Dampfgeschwindigkeit im Ventil

$$\begin{aligned} w &= \frac{1}{0,0105} \cdot \left(0,1746 - \frac{0,0256}{3,64} \cdot 0,480 \cdot 6,15 \right) \cdot 3,72 \\ &= \frac{3,72}{0,0105} \cdot (0,1746 - 0,0208) \\ &= 61,9 - 7,4 = 54,5 \text{ m/s}. \end{aligned}$$

Ohne den vorhin als Korrektion bezeichneten zweiten Teil der Formel wird die Dampfgeschwindigkeit also immerhin um 7,4 m zu hoch berechnet: die im Zylinder schon während der Einströmung stattfindende Expansion hat recht merklichen Einfluß auf das Ergebnis.

In Fig. 124 sind nun außer dem Punkt für $1\frac{1}{2}$ Zehntel weitere eingetragen, jedesmal sowohl nach der einfacheren als nach der genaueren Rechnung. Die Ergebnisse der ungenauen werden ganz unbrauchbar, sobald das Ventil sich zu schließen beginnt, schon bei $2\frac{1}{2}$ Zehntel. Während der Schlußperiode nimmt die Dampfgeschwindigkeit zunächst zu, entsprechend dem zunehmenden Druckunterschied zu beiden Seiten des Ventiles; nachher nimmt sie ab, offenbar weil bei sehr schmalen Ventilspalt Reibungserscheinungen sie vermindern. —

Das Ansteigen des Druckabfalls vor dem Abschluß des Ventiles ist auch die Ursache dafür, daß die im Dampfdiagramm zu messende Füllung stets merklich kleiner ist als die dem Steuerungsdiagramm

entnommene, vergleiche die übereinstimmend gezeichneten Marken in den Diagrammen *a* und *b* der Fig. 120 und 121. —

Die Dampfgeschwindigkeit entsteht durch Ausgleich des Druckunterschiedes vor und hinter dem Ventil. Sie ist das Äquivalent für denselben, bei kleinen Druckunterschieden gemäß der Formel

$$w = \sqrt{2g \cdot \frac{p_1 - p'}{\gamma}} \dots \dots \dots (10)$$

Hierin ist p_1 der Frischdampfdruck, gemessen für die bestimmte dem Indikatordiagramm des Dampfraumes, p' ist der Druck im Zylinder; die Drucke sind in kg/m^2 einzuführen; die Vernachlässigung der Druckverluste in den Kanälen der Steuerung braucht nicht immer geringfügig zu sein. — Sobald der Druckunterschied größer wird, wären die thermodynamischen Vorgänge in Betracht zu ziehen. Man kann die Geschwindigkeit nach Anleitung des § 61 aus dem *i s*-Diagramm bestimmen, wird aber merken, daß das nur sehr ungenau geht bei dem üblichen Maßstab dieser Diagramme. Man kann die Geschwindigkeit nach Anleitung des § 61 unter sinnge-

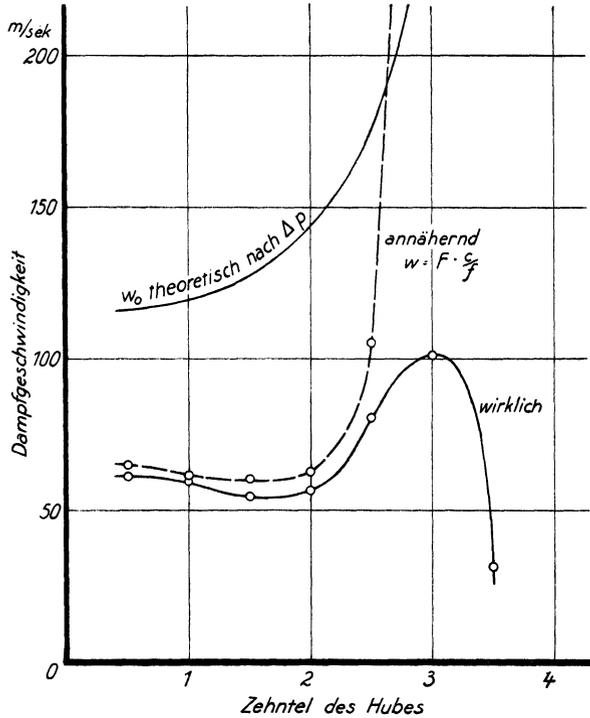


Fig. 124. Dampfgeschwindigkeit und Ausflußzahl bei einer Freifallsteuerung.

mäßiger Benutzung von Fig. 75 bestimmen. Zur Abwechslung soll hier die Berechnung nach der Formel

$$w = \sqrt{2g \cdot \frac{k}{k-1} \cdot p_1 v_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{p'}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \dots \dots (11)$$

erläutert werden, worin $k=1,135$ für Sattdampf gesetzt wird. Da das zweite Glied in der eckigen Klammer von der Eins nur wenig verschieden ist, so genügt der Rechenschieber in der Genauigkeit nicht; man muß vierstellige Logarithmen zu Hilfe nehmen, wie die Hütte sie gibt.

In Formel (10) und (11) pflegt man an den Anfang der rechten Seite, vor die Wurzel, eine Ausflußzahl φ zu setzen. Indem wir zunächst einfach nach den Formeln rechnen, und das Ergebnis dann mit der schon berechneten wirklichen Geschwindigkeit vergleichen, können wir φ als Quotienten der wirklichen und der theoretischen Geschwindigkeit (eigentlich: Ausflußmenge) finden.

Die Rechnung nach Formel (11) wird am gleichen Punkt $1\frac{1}{2}$ Zehntel der Fig. 123 erläutert.

Wir haben

	im Frischdampfdiagramm	im Zylinderdiagramm
Ordinate . . .	30,8 mm	29,0 mm
Federmaßstab .	5,07 mm/at	5,0 mm/at
Überdruck . . .	6,07 at	5,80 at
abs. Druck . . .	7,10 at = 71 000 kg/m ²	6,83 at = 68 300 kg/m ² .

Also ist $p_1 - p' = 0,27 \text{ at} = 2700 \text{ kg/m}^2$; $\frac{p'}{p_1} = 0,962$.

In Formel (11) ist ferner

$$2g \cdot \frac{k}{k-1} = 164,9.$$

Weiter ist, als wenig veränderlich, $p v$ am bequemsten in eins zu interpolieren; es ist (Dampftabellen)

$$\text{für } p = 70\,000 \text{ kg/m}^2 : p v = 19\,510 \text{ m} \cdot \text{kg},$$

$$\text{für } p = 75\,000 \text{ kg/m}^2 : p v = 19\,580 \text{ kg},$$

$$\text{also für } p = 71\,000 \text{ kg/m}^2 : p v = 19\,525 \text{ m} \cdot \text{kg}.$$

Es bleibt $\left(\frac{p'}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 0,962^{0,1190}$ zu berechnen.

$\log 0,962 = 0,9832 - 1$, zu multiplizieren mit 0,1190, abermals logarithmisch:

$$\log 0,9832 = 0,9927 - 1$$

$$\log 0,1190 = 0,0755 - 1$$

$$\Sigma = 0,0682 - 1; \text{ Num log} = 0,1170. \text{ Also}$$

$$0,1190 \cdot \log 0,962 = 0,1170 - 0,1190 = 0,9980 - 1; \text{ Num log} = 0,9954.$$

Demnach wird in Formel (11)

$$[] = 1 - 0,9954 = 0,0046.$$

Insgesamt ist die theoretische Geschwindigkeit entsprechend $\Delta p = p_1 - p'$

$$v_0 = \sqrt{164,9 \cdot 19\,525 \cdot 0,0046} = 122 \text{ m/s}.$$

Das Verhältnis aber der wirklich erreichten zur theoretischen Geschwindigkeit wird

$$\varphi = \frac{54,5}{122} = 0,45,$$

die Ausflußzahl für den Ausströmvorgang.

Das Ergebnis wäre unter Vermeidung der umständlichen Logarithmenrechnung befriedigend genau nach Formel (10) zu erzielen gewesen.

Dabei hätte sich ergeben

$$w_0 = \sqrt{2g \cdot \frac{2700}{3,64}} = 121 \text{ m/s.}$$

Selbst in der Gegend recht großen Druckunterschiedes entspricht die einfachere Berechnung nach Formel (10) mehr der Genauigkeit der Unterlagen, da die Abmessung einer so kleinen Druckdifferenz aus zwei verschiedenen Diagrammen immer nur mäßig genau erfolgt, selbst wenn wir die Verschiedenheit des Federmaßstabes beider Diagramme beachteten. Für die verschiedenen Punkte der Diagramme Fig. 123 ergibt sich nämlich:

Tabelle 45. Vergleich der Ergebnisse von Formel (10) und (11).

Punkt		1/2	1	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2
1	p_1 at	7,32	7,30	7,10	7,02	6,96	7,14	7,22
2	p' „	7,07	7,01	6,83	6,61	6,47	5,99	5,25
3	Δp „	0,25	0,29	0,27	0,41	0,49	1,15	1,97
4	w_0 nach (10) m/s	114	123	121	150	164	248	323
5	nach (11) „	116	127	122	152	169	259	348
6	φ	0,53	0,46	0,43	0,37	0,47	0,39	0,09

Die Kurve w_0 der Fig. 124 ist nach beiden Rechnungen als Mittelwert, wegen der Unsicherheit ohne Punkte, gezeichnet. Das Gesamtergebnis ist immerhin glaublich.

Um allerdings solches Ergebnis zu erreichen, muß p mit entsprechender Sorgfalt gemessen werden. Kleine Abweichungen im Maßstab der beiden Indikatorenfedern vor und hinter dem Ventil ergeben unverhältnismäßig große Fehler im Werte von Δp . Man muß die beiden Federn in ganz gleicher Weise eichen; beim Übereinanderlegen der Diagramme, Fig. 123b, bringt man nicht die Atmosphärenlinien zur Deckung, sondern diejenigen beiden Eichlinien, die dem Frischdampfdruck am nächsten kommen. Ist im Eichdiagramm zu Fig. 123a die 6-at-Linie um 30,4 mm von der Atmosphärenlinie entfernt, beim anderen Eichdiagramm aber 30,0 mm, so müßten beim Übereinanderlegen der Diagramme (Fig. 123b) die beiden Atmosphärenlinien 0,4 mm voneinander abweichen. — Man kann natürlich auch das Diagramm umzeichnen.

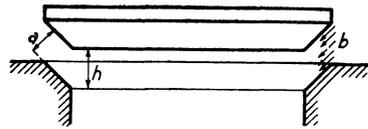


Fig. 125. Messung des freien Ventilquerschnittes.

Eine weitere Unsicherheit bei dieser Berechnung besteht darin, daß man im Zweifel sein kann, welchen Querschnitt man als maßgebend für die Berechnung der Dampfgeschwindigkeit anzusehen hat. Insbesondere bei Ventilen (Fig. 125) bestehen in dieser Hinsicht Zweifel. Nur wenn der Dampf das Ventil zentripetal durchströmt, ist es ohne weiteres richtig, den inneren Durchmesser des Ventilkegels in die Rechnung einzuführen. Wo der Dampf den Ventilspalt von innen nach außen durchströmt, braucht nicht die innere Spaltbegrenzung die Stelle

größter Dampfgeschwindigkeit zu sein; denn nach außen hin nimmt mit abnehmendem Druck das Volumen V zu. Die größte Dampfgeschwindigkeit und der für den Ausfluß maßgebende Querschnitt liegt da, wo $V:r$ am größten ist — innen, außen oder dazwischen. — Weiterhin bleibt es bei Ventilen mit konischem Sitz im Zweifel, ob man als Breite des mäßig eröffneten Spaltes den Hub h des Ventiles, Fig. 125, einzuführen hat, oder ob vielmehr der Abstand vom Ventilkegel zum Sitz lotrecht zu den Dichtungsflächen zu messen, also der Abstand a in Rechnung zu setzen ist. Letzteres erscheint in der Nähe des Ventilschlusses richtiger; doch kann man sich auch vorstellen, daß die Dampf-

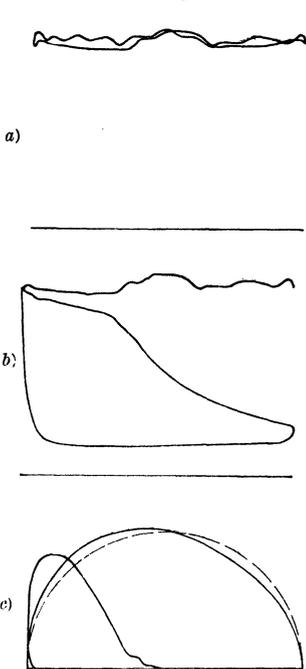


Fig. 126. Zur Ermittlung der Dampfgeschwindigkeit in einer zwangsläufigen Ventilsteuerung. $\frac{2}{5}$ n. Gr.

und das Auslaßdiagramm gegeben, um auch für einen Auslaß den Druckverlauf zu zeigen. In den Diagrammen des Frischdampfstutzens (Fig. 123 a, 126 a) sieht man den Spannungsabfall während der Einströmung und erhebliche Massenschwingungen der gestauten Dampfsäule nach erfolgtem Schluß des Ventils; aus der Schwingungszahl ließe sich die schwingende Säule feststellen. Im Diagramm des Abdampfstutzens, Fig. 128 a, steigt umgekehrt der Druck während des Auslassens an; in jedem Falle vermindert sich also durch diese Erscheinungen das verfügbare Druckgefälle.

87. Fehler im Dampfdiagramm; Undichtheiten der Maschine. Abweichungen der Dampfmaschinen-Indikatordiagramme von den normalen

teilchen sich so in Ringschichten durch die Öffnung schieben, wie die Pfeile bei b , Fig. 125, andeuten, so daß doch der Hub in Rechnung zu setzen wäre. Man wird über diese Schwierigkeit nicht anders hinwegkommen können als durch folgende Überlegung: Zweck solcher Untersuchung ist es, durch Versuche an einer Maschine Grundlagen zu erhalten für die Vorausberechnung anderer Maschinen mit abweichenden Abmessungen, aber grundsätzlich gleicher Ventilform. Man wird diese Schlüsse mit befriedigender Genauigkeit ziehen können, wenn man bei der Konstruktion den gleichen Rechnungsgang rückwärts macht, den man bei der Versuchsauswertung vorwärts gemacht hatte: Die Frage, ob a oder h maßgebend ist, wird belanglos, sobald man beide Male die gleiche Größe in die Rechnung einführt. Für die Verwendung bei Rückwärtsrechnung ist dann die dimensionslose Ausflußzahl bequem.

In Fig. 126 und 127 ist die gleiche Untersuchung für eine *zwangsläufige Ventilsteuerung* durchgeführt, sodann sind in Fig. 128 für eine ebenfalls *zwangsläufige Drehschiebersteuerung* nur für den Auslaß das Zylinder-

Formen (Fig. 109 bis 113 und andere) können in *Mängeln des Indikators selbst* und seines Antriebes begründet sein; hierhin gehören: Anstoßen der Trommel und des Schreibstiftes an seine Hubbegrenzung, Reibungen im Getriebe des Indikators, Klemmen des Schreibzeuges. Zu beachten sind auch die normalen Erscheinungen an Indikatoren, die auf die Diagrammgestalt Einfluß gewinnen: Schnurdehnung wegen Massenwirkung der Trommel, Federschwingungen wegen Massenwirkungen des Schreibetriebes. Alle diese Erscheinungen sind nicht allein für die Dampfmaschine typisch, sie sind daher beim Indikator (Techn. Mess. § 90 bis 92) besprochen.

Das Indikator-*diagramm* läßt die *Einstellung* der Maschine erkennen; *fehlerhafte Einsteuerung* ergibt mehr

oder weniger eigenartige Diagramme, wie das in § 80 besprochen ist.

Es bleiben zu besprechen die *eigentlichen Betriebs- und Instandhaltungsfehler* der Maschine in ihrem Einfluß auf das Diagramm, namentlich *Undichtheiten*. Es kann der Kolben oder die Steuerung mangelhaft abdichten. Sollte in seltenen Fällen z. B. der Heizmantel gegen den Zylinder undicht sein, so ergeben sich ähnliche Erscheinungen.

Fig. 129 zeigt den *Einfluß einer Kolbenundichtheit* auf das Diagramm. Dieselbe hat zur Folge, daß dauernd Dampf zwischen beiden Zylinderhälften ausgetauscht wird, und zwar erfährt natürlich die Seite momentan niederen Druckes einen Zuwachs, die andere einen Abgang an Dampfmenge.

In Fig. 129 ist nun das normale Diagramm gestrichelt zum Vergleich eingezeichnet. Schon die *Einlaßlinie* liegt, wegen des steten Dampfverlustes, etwas unter der normalen; hinter

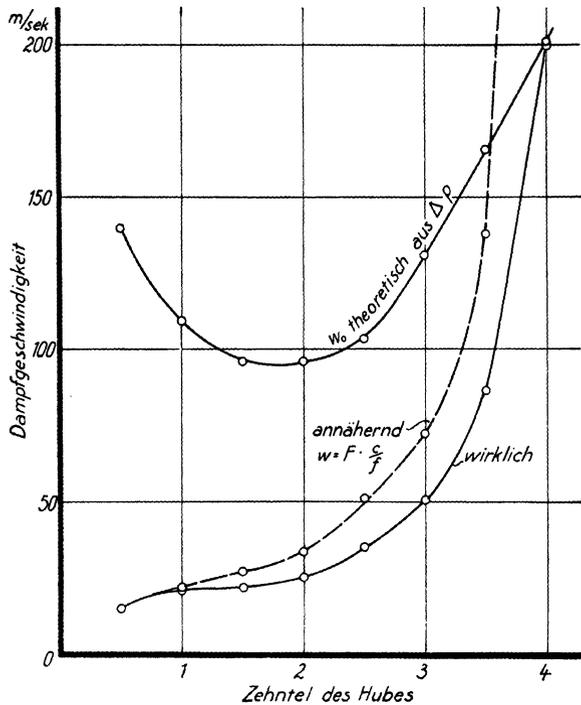


Fig. 127. Dampfgeschwindigkeit und Ausflußzahl bei einer zwangsläufigen Ventilsteuerung.

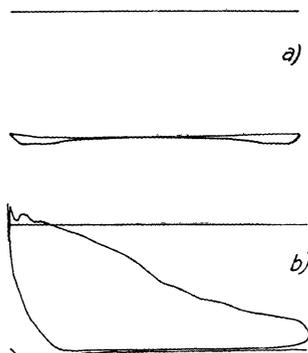


Fig. 128. Druckverlust im Auslaß, Hahnsteuerung.

dem Expansionspunkt *a* nimmt der Unterschied zwischen beiden Seiten dauernd zu — jedoch nur bis bei *b* ein Zustand erreicht ist, wo der Druck auf beiden Seiten des Kolbens derselbe ist; wenn beide Maschinen-seiten identische Diagramme geben, so ist *d* der zu *b* zugeordnete Punkt der anderen Seite, wenn *b* und *d* gleichweit vom Totpunkt abliegen. Von *b* an kehrt die Strömrichtung in der Undichtheit sich um, das wirkliche Diagramm nähert sich wieder dem normalen fehlerfreien Diagramm; die Expansionslinie kann fast wagerecht werden und unter Umständen sogar ansteigend eine Nase am Diagramm bilden. — Während des Auspuffes erhält die Zylinderseite dauernd Dampf von der anderen, die Diagrammlinie liegt daher wenig über der normalen; die Kompression steigt zunächst steiler an, aber nur bis in *d* die schon besprochene Umkehrung des Ausgleichsstromes erfolgt; nun aber kennzeichnet sich die Umkehrung an dem kleineren schädlichen Raum viel deutlicher als an dem großen Zylindervolumen: es bildet sich die Nase *e* aus, das deutliche Kennzeichen für eine Undichtheit zwischen beiden Zylinderseiten.

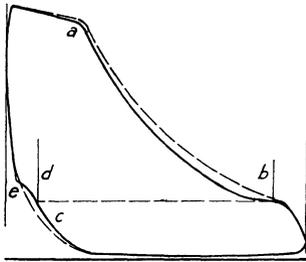


Fig. 129. Diagramm bei undichtigem Kolben, verglichen mit normalem.

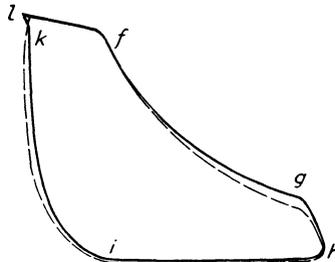


Fig. 130. Diagramm bei undichtigem Einlaßorgan, verglichen mit normalem.

Demgegenüber beeinflusst ein undichtiges Einlaßorgan das Diagramm nach Ausweis von Fig. 130. Während der Einströmung ist die Undichtheit bedeutungslos; die Expansionslinie verläuft, wegen Nachströmens von Dampf, über der normalen und daher flacher; auch die Ausström- und die Kompressionslinie liegen über der normalen, gegenüber hoher Kompression aber ist ein deutliches Kennzeichen darin gegeben, daß kein Bestreben zum Überschreiten der Einströmlinie und daher zur Schleifenbildung besteht; bei *k* hat die Kompressionslinie einen Wendepunkt als deutlichstes Kennzeichen der Undichtheit.

Wenn man im normalen Betrieb kein fehlerfreies Diagramm zum Vergleich hat, so sind die Wendepunkte bei *d* und bei *k* deutliche und auch voneinander unterscheidbare Kennzeichen von Undichtheiten.

Im *Laboratorium* *verwirklicht* man die Undichtheiten zweckmäßig so, daß man das normale und das falsche Diagramm schnell nacheinander auf ein Blatt schreiben kann; man macht eine künstliche Undichtheit durch einen Hahn verschließbar, benutzt z. B. einfach die Wasserablaßrohre beider Zylinderseiten, wenn sie zusammengehen, als Umföhrung; und man läßt ein Einlaßventil undicht werden, indem man es irgendwie am festen Abschluß hindert.

Es ist natürlich, daß Undichtheiten ihren Einfluß besonders bei langsamem Maschinengang äußern. Man wird also im Laboratorium die Diagramme bei geringer Drehzahl aufnehmen; andererseits kann man auch im praktischen Betriebe die Wendepunkte d und k deutlich werden lassen, indem man die Maschine langsam laufen läßt. Fig. 117a bei § 83 zeigte schon ein Diagramm mit undichtem Kolben.

d) Abdampfausnutzung.

87a. Allgemeine Bedingungen. Die Umsetzung der im Wärmeträger steckenden Wärme in Arbeit ist durch die Bedingungen des zweiten Hauptsatzes beschränkt. Ein mit der absoluten Temperatur T_1 zugeführtes Wärmeteilchen, das bei der Umsetzung bis auf die Temperatur T_2 herabsinkt, kann für die Arbeitsumsetzung nach dem Satz von Carnot äußersten Falles den *maximalen Wirkungsgrad*

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \dots \dots \dots (1)$$

verwirklichen. Dieser maximale Wirkungsgrad bedeutet den Bruchteil der aufgewendeten Wärmemenge Q_1 , der in Arbeit L umgewandelt wird; also als Definition gilt

$$\eta_{\max} = \frac{L_{\max}}{Q_1} \dots \dots \dots (2)$$

Nach dem ersten Hauptsatze ist außerdem die nicht umgesetzte Wärmemenge

$$Q_2 = Q_1 - L \dots \dots \dots (3)$$

nachher noch als Wärme vorhanden und muß bei der Temperatur T_2 abgeführt werden. Wegen

$$L = Q_1 - Q_2 \dots \dots \dots (3a)$$

gilt also auch

$$\eta_{\max} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \dots \dots \dots (1a)$$

als Ausdruck des Carnotschen Prinzips.

In den Formeln ist angenommen, daß Q und L in gleichen Maßeinheiten gemessen sind, also entweder beide in mechanischem Maß, etwa nach $\text{m} \cdot \text{kg}$, oder was üblicher ist, beide in kalorischem Maß in kcal; die Einsetzung des mechanischen Wärmeäquivalentes

$A = \frac{1}{427} \frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{kg}}$ erübrigt sich bei dieser Voraussetzung, die der Einheitlichkeit der Energieformen entspricht.

Aus dem Vergleich von 1) und 1 a) folgt, daß bei gegebenem Q_1 und T_1 die Wärmemenge Q_2 mit um so höherer Temperatur T_2 erhalten wird, mit je kleinerem Wirkungsgrad η_{\max} man sich zu begnügen bereit ist. Die Arbeitsausbeute L_{\max} aus gegebener Wärmemenge Q_1 wird dann zwar kleiner, aber es kann vorteilhaft sein, sich hiermit zu begnügen, um dadurch Q_2 auf einer technisch brauchbaren Temperatur und technisch verwertbar zu halten. Das ist allgemein dann vorteilhaft, wenn ohnedies eine entsprechende Wärmemenge Q_2 anderweitig erzeugt werden müßte, weil Wärme von gewisser Temperatur für einen technischen Zweck gebraucht wird.

Die zu verlangende Temperatur bestimmt sich nach dem Zweck, zu dem die Abwärme gebraucht werden soll. Sie muß höher sein als die endgültig verlangte, da Temperaturgefälle zum Übertritt der Wärme nötig ist; sie ist insofern auch eine Frage der Heizflächengröße. Soll z. B. eine Gebäudeheizung betätigt werden, so genügt an sich 20°C ; mit Rücksicht darauf jedoch, daß die Heizkörper in den Räumen nicht allzu groß ausfallen sollen, pflegt man Heizkörpertemperaturen von 70 bis 90° anzuwenden; bei Verwendung von Niederdruck-Dampfheizkörpern ist man ohnehin je nach dem Barometerstand an die Temperatur von nahezu 100° gebunden, bei Warmwasser- oder bei Vakuumheizung indessen könnte man niedrigere Temperatur zulassen. Für Trocknungen braucht man Temperaturen von 60° bis 100° und mehr, für Kochzwecke werden vielfach Temperaturen merklich über 100° verlangt, sowohl für die Küche wie für Destillations- und Siedevorgänge der Industrie.

Ist nun der arbeitliefernde Wärmeträger Wasserdampf, so hängt der Gegendruck, gegen den die Maschine arbeitet, unmittelbar nach der Dampftabelle von der verlangten Temperatur ab. Es ist also folgende Tabelle maßgebend:

Temperatur $t =$	60	80	100	125	150 °C
Dampfdruck $p \cong$	0,20	0,48	1,03	2,4	4,9 at abs

Mit der verlangten Temperatur steigt also schnell der Gegendruck, damit fällt die Arbeitsausbeute, deren Größe übrigens von Kesseldruck p_1 und von t_1 abhängt. Um unnötig große Übertemperaturen und höheren Gegendruck als nach der Natur der Sache nötig zu vermeiden, bleibt nach Bedarf zu prüfen, ob durch Vergrößerung der Heizflächen eine merkliche Verbesserung erzielbar ist.

Welche Arbeitsausbeute bei verschiedenen Temperaturen möglich ist, ergibt sich am bequemsten unter Benutzung des $i s$ -Diagrammes (§ 49, 57). Von dem dem Anfangszustand (p_1, t_1) des Frischdampfes entsprechenden Punkt senkrecht herabgegangen bis zum Schnitt mit der (meist im Sättigungsgebiet liegenden) Linie des Gegendruckes ergibt sich unmittelbar als Strecke derjenige Anteil der zugeführten Wärme, der in Arbeit umgewandelt werden kann, adiabatische Expansion ohne Verluste vorausgesetzt. Man bezeichnet ihn als adiabatisches Wärmegefälle Δi_{ad} . Einige bezügliche Werte gibt Tabelle 45 a.

Mit steigender Temperatur steigt hiernach die Arbeitsausbeute aus 1 kg Dampf merklich, trotz des etwas gesteigerten Wärmeeaufwandes wird auch der Wirkungsgrad hierbei besser, wie die kursiven Zahlen der Tabelle 45 a erkennen lassen. Hinsichtlich des Druckes zeigt sich, daß der Wirkungsgrad außer von der Temperatur fast nur vom Druckverhältnis abhängt; daher gelten befriedigend genau die in Fig. 131 a dargestellten Werte. Aus ihnen folgt, daß eine Steigerung des Kesseldruckes bei Kondensationsmaschinen einige, bei Gegendruckbetrieb jedoch erhebliche Vorteile ergibt. Die Steigerung von 15 auf 20 at gibt bei 0,1 at Kondensatordruck 4%, bei 5 at Gegendruck jedoch 24% Verringerung des Dampfdurchsatzes.

Tabelle 45 a. Wärmegefälle Δi_{ad} und maximaler Wirkungsgrad η_{max} bei adiabatischer Expansion von Wasserdampf vom Zustande $p_1 t_1$ bis zum Gegendruck p_2 .

Anfangs- zustand	t_1		10		5		300		10		5		400		°C at abs kcal/kg
	p_1	t_1	p_1	t_1	p_1	t_1	p_1	t_1	p_1	t_1	p_1	t_1	p_1	t_1	
	200	20	10	5	300	10	5	400	20	10	5	300	10	5	
	668	678	682,4	727	720	731,4	778	779	780,9						
$p_1/p_2 = 1,5$	17,5 0,026	19,0 0,028	19,0 0,028	22,5 0,031	23,5 0,032	22,5 0,031	29,0 0,037	29,0 0,037	29,0 0,037						kcal/kg —
2,5	40,0 0,060	41,0 0,0605	42,0 0,0615	48,2 0,0665	51,0 0,067	52,5 0,070	56,4 0,0725	60,8 0,078	61,2 0,0785						kcal/kg —
5	68,0 0,102	69,5 0,1025	70,8 0,1035	79,5 0,1095	82,5 0,113	84,5 0,116	94,5 0,1215	99,3 0,128	100,0 0,128						kcal/kg —
10	94,2 0,141	96,2 0,142	96,4 0,1415	108,8 0,150	111,5 0,153	112,0 0,153	126,8 0,163	131,4 0,169	131,8 0,169						kcal/kg —
25	126,5 0,1895	129,0 0,1905	127,8 0,1875	143,9 0,198	145,4 0,1995	145,1 0,1985	164,1 0,211	167,6 0,215	168,3 0,215						kcal/kg —
50	149,0 0,223	150,0 0,221	149,5 0,219	169,2 0,233	169,0 0,232	168,3 0,230	190,1 0,244	192,1 0,246	192,5 0,246						kcal/kg —
100	170,0 0,255	170,5 0,252	170,0 0,249	190,7 0,263	191,0 0,262	189,5 0,259	213,9 0,275	215,4 0,276	214,5 0,274						kcal/kg —
250	195,2 0,292	195,4 0,288	194,0 0,284	218,0 0,300	217,3 0,298	215,1 0,294	242,9 0,312	243,0 0,312	241,6 0,309						kcal/kg —
500	212,7 0,319	212,5 0,313	211,3 0,310	236,8 0,326	235,6 0,323	232,6 0,319	262,7 0,338	262,3 0,336	260,7 0,334						kcal/kg —

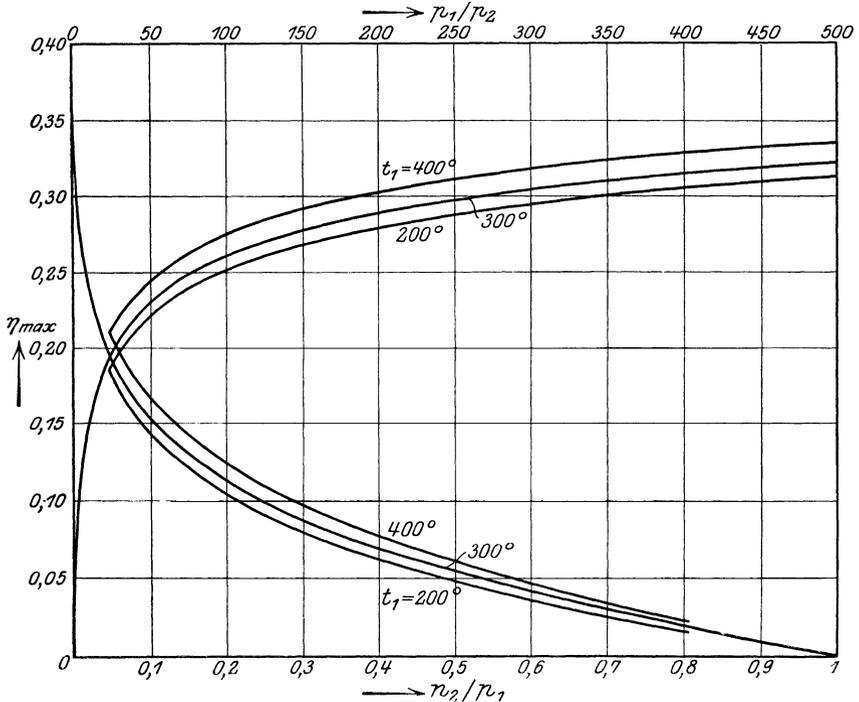


Fig. 131a. Theoretisch mit Wasserdampf erreichbare Wirkungsgrade bei verschiedener Anfangstemperatur t_1 und verschiedenem Expansionsverhältnis p_2/p_1 .

Bei Ausführungen mit Gegendrucken von 1 at abs oder weniger spricht man davon, man nutze den Abdampf der Maschine aus, ist der Gegendruck über 1 at abs, so spricht man von Gegendruckbetrieb; zwischen *Abdampfausnutzung* und *Gegendruckbetrieb* besteht aber kein grundsätzlicher Unterschied, und für beide gelten die gleichen allgemeinen Betrachtungen.

Es ist auch grundsätzlich falsch und dem Verständnis der Betriebsbedingungen vielfach abträglich, wenn man von der Voraussetzung ausgeht, eine Maschine sei vorhanden und für deren Abwärme sei eine Verwendung zu suchen. Man kann das Verhältnis mit gleichem Recht umkehren und sagen: ein Wärmeverbraucher sei vorhanden, der mit Wärme von mäßiger Temperatur zufrieden ist, so daß ihm der Dampf unter oder wenig über Atmosphärenspannung, im Grenzfall vielleicht mit 6 at abs Spannung geliefert werden kann. Man will dann zu ihm als Nebenbetrieb die Elektrizitätserzeugung schaffen, indem man jedes Kilogramm von ihm benötigten Dampfes vorher zur Erzeugung von Elektrizität benutzt. Während also die übliche Auffassung den elektrischen Betrieb als Hauptbetrieb erscheinen läßt, erscheint dann der Wärmeverbraucher als Hauptbetrieb.

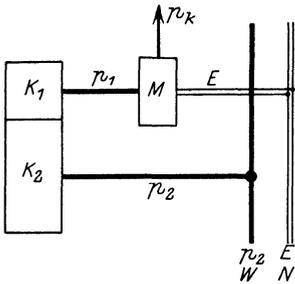


Fig. 131 b. Getrennter Betrieb.

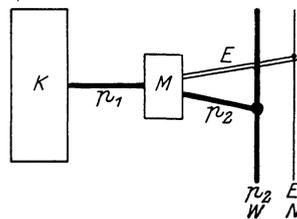


Fig. 131 c. Gekoppelter Betrieb, reine Abdampfausnutzung.

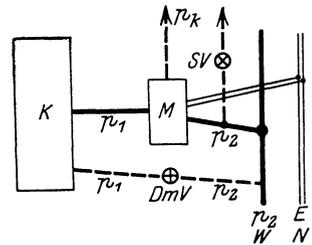


Fig. 131 d. Allgemeiner Fall des gekoppelten Betriebes.

Schematische Darstellung der Versorgung mit Strom und Wärme.

Man wird allen möglichen Verhältnissen am besten gerecht, wenn man keinen der beiden Beteiligten bevorzugt, sondern sie als gleichberechtigt ansieht.

Danach sind also in Fig. 131 b bis d jedesmal *zwei Netze mit Energie zu versorgen*; es ist ein elektrisches Leitungsnetz unter der Spannung E Volt zu halten und ein Dampfrohrnetz unter der Spannung p_2 at. Diese Aufgabe kann nach Fig. 131 b in *getrennter Betriebsweise* gelöst werden. Man erzeugt in einem Kesselhaus K_1 Hochdruckdampf von der Spannung p_1 , läßt ihn in Kondensationsmaschinen M möglichst viel Arbeit verrichten und entläßt ihn mit der Kondensatorsspannung p_k , die bei Kolbenmaschinen etwa 0,2 at abs, bei modernen Turbinen etwa 0,05 at abs zu betragen pflegt. Die diesen Drücken entsprechenden Sättigungstemperaturen sind 60° und 35° , beide sind so niedrig, daß man die abgehende Wärme selten verwerten kann, obwohl sie nach Fig. 131 a selbst theoretisch bei einem Expansionsverhältnis von rund $p_1/p_2 = 300$ den größten Teil der gesamten Wärme ausmacht. — Man

kann dieselbe Aufgabe aber auch nach Fig. 131 c *im gekoppelten Betriebe* lösen. Man erzeugt lediglich Hochdruckdampf vom Druck p_1 , läßt ihn in Gegendruckmaschinen M auf die Spannung p_2 expandieren und ins Niederdruckdampfrohrnetz gehen, während die angetriebenen Dynamomaschinen das elektrische Netz mit der Spannung E versorgen.

Das Vorhandensein der genannten beiden Netze ist die Voraussetzung für die Anordnung jeder Abdampfausnutzung. Wo einer der beiden Abnehmer allein vorhanden ist, muß er, um der Vorteile der Abdampfausnutzung teilhaftig zu werden, in kleinerer oder größerer Entfernung einen Abnehmer für die andere Energieform suchen.

Die Möglichkeit, eine einfache Anordnung nach Fig. 131 c anzuwenden, ist aber noch an folgende Bedingung geknüpft. Die Abnehmerschaft im Dampfnetz verlangt eine bestimmte Wärmemenge, die, als Normaldampf von 640 kcal/kg Wärmeinhalt ausgedrückt, durch die Zahl W kg ND/h angegeben sei; und die Abnehmerschaft im elektrischen Netz verlangt eine gewisse Gesamtleistung N kW. Das Verhältnis beider $\frac{W}{N}$ hat die Benennung $\frac{\text{kg ND}}{\text{kW} \cdot \text{h}}$, und es ist nicht Zufall, daß diese Benennung gleichlautend ist mit derjenigen, die für den Dampfdurchgang durch die Dampfmaschine gilt, für die die spezifische Dampfaufnahme d_1 , oder hier besser maßgebend die spezifische Dampfabgabe d_2 in kg ND/kWh angegeben wird. Die Beziehung

$$\frac{W}{N} = d_2 \dots \dots \dots (4)$$

ist die Bedingung dafür, daß ein *reiner Gegendruckbetrieb*, eine *reine Abdampfausnutzung* nach Fig. 131 c möglich ist. Sonst bleibt ein Fehlbetrag entweder von W oder von N , da die Gegendruckmaschine beide Abnehmer stets in dem durch d_2 festgelegten Verhältnis beliefert.

Ist also $\frac{W}{N} > d_2$, so überwiegt in der Abnehmerschaft der Dampfbedarf, und es ist der Fehlbetrag an Abdampf hilfsweise durch direkten Dampf zu beschaffen, entweder aus besonderen Niederdruckkesseln oder aus den Hochdruckkesseln unter Einschaltung eines Druckminderventils DmV . Ist $\frac{W}{N} < d_2$, so ist umgekehrt ein Fehlbetrag an Strom durch hilfsweis betriebene Kondensationsmaschinen oder durch einen an die Gegendruckmaschine angehängten Kondensationsteil (*Zwischendampfenahme*) zu decken. In Fig. 131 d sind die beiden Hilfsanordnungen durch die Zeichen DmV und p_k angedeutet.

Wenn im *allgemeinen Fall* zeitlich wechselnd $\frac{W}{N} \geq d_2$ sein kann, so muß man beide Hilfsanordnungen vorsehen. Ob man dabei statt einer Hilfskondensation lieber einen Hilfsauspuff anordnet, bestimmt sich nach den allgemeinen Gesichtspunkten für die Wahl zwischen Kondensations- und Auspuffbetrieb, insbesondere also nach der voraussichtlichen Benutzungsdauer der Hilfseinrichtung.

Außer dem Druckminderventil wird regelmäßig noch ein Sicherheitsventil *SV*, Fig. 131 d, angebracht. Das Druckminderventil, eine Umgehung um die Maschine herum, wirkt, wenn die Maschine unerwartet keinen Dampf durchläßt, etwa weil die elektrische Sicherung durchbrannte und die Belastung mit mechanischer Leistung plötzlich fortfiel; das Sicherheitsventil wirkt, wenn die Dampfabnahme unerwartet ausbleibt, etwa durch Schließen eines Ventils, und verhütet dann plötzliches Ausbleiben des elektrischen Stromes. Diese beiden selbsttätigen Regeleinrichtungen sind so abgestimmt, daß zwischen dem Ansprechen beider ein Spielraum bleibt, der etwa $\frac{1}{10}$ des absoluten Gegendruckes beträgt; soll also mit dem Abdampf eine Niederdruckdampfheizung betrieben werden, absoluter Druck etwa 1,1 at, so sind passende Druckgrenzen 1,05 at abs für das Ansprechen des Minderventils und 1,15 at abs für das Ansprechen des Sicherheitsventils.

Jede praktisch arbeitende Anlage mit Abdampfausnutzung besteht also aus einem wirklich mit Abdampfausnutzung arbeitenden Teil

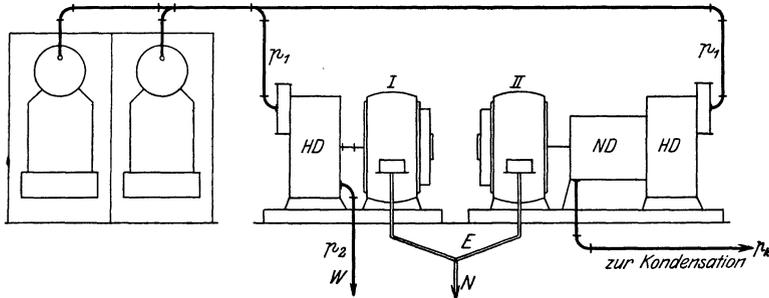


Fig. 131 e. Elektrische Kupplung der Maschinen.

für den Gleichung (4) gilt, und einer Ergänzung zum Ausgleich der Abweichungen von Gleichung (4). Der wirtschaftlich günstigste Fall ist der, wo Gleichung (4) erfüllt ist; ihm kann man sich annähern durch Veränderung von $\frac{W}{N}$ oder von d_2 . Das Verhältnis $\frac{W}{N}$ beeinflusst man im günstigen Sinne, indem man denjenigen Teil, Zähler oder Nenner, der der relativ kleinere ist, vergrößert, indem man also, wo in der Abnehmerschaft der Kraftbedarf überwiegt, einen neuen Abnehmer für Abwärme aufsucht, und umgekehrt. Die spezifische Dampfabgabe d_2 beeinflusst man im günstigen Sinne, indem man den Gegendruck tunlichst herabzusetzen sucht oder indem man eine Maschinenart wählt, die den Dampf besser ausnutzt, und zwar bis zu der Grenze, wo $\frac{W}{N} = d_2$ ist. Darüber hinaus hat die Verbesserung von d_2 keinen Wert. Doch ist es falsch, hieraus zu folgern, in Fällen $\frac{W}{N} > d_2$ habe die Verwendung einer Maschinenart mit besserem Dampfverbrauch keinen Wert; diese Annahme ist nämlich nur dann richtig, wenn N nicht mehr vergrößert werden kann, weil eine Verwendung für weiteren Strom

nicht zu finden ist; sonst aber gilt die Regel: es ist zunächst d_2 zu verbessern, so weit wie möglich, und für die dann dem feststehenden Wärmebedarf entsprechende Krafterzeugung ist eine Abnehmerschaft, soweit nicht vorhanden, aufzusuchen. — Über die Wahl der Maschinentype zur Verbesserung von d_2 ist zu sagen: Die Dampfturbinen geben nach der Stufenzahl und anderen Eigenarten aus gegebener Dampfmenge recht verschieden viel mechanische Energie her, und teurere Typen sind vielfach ergiebiger. Viel besser als alle Dampfturbinen arbeiten aber in den höheren Druckbereichen die Kolbenmaschinen, die dann meist als Einfach-Expansions-Maschinen gebaut werden können; die Stärke der Dampfturbine liegt im Niederdruckteil, indem sie bessere Vakua ausnutzen kann. Der Verwendung von Kolbenmaschinen stehen aber wegen des Ölgehaltes ihres Abdampfes in vielen Fällen unüberwindbare Bedenken entgegen; eine Verölung der Heizflächen kann zu einer Steigerung der Abdampftemperatur und daher des Gegendruckes zwingen und die sonst vorhandenen Vorteile mehr als ausgleichen.

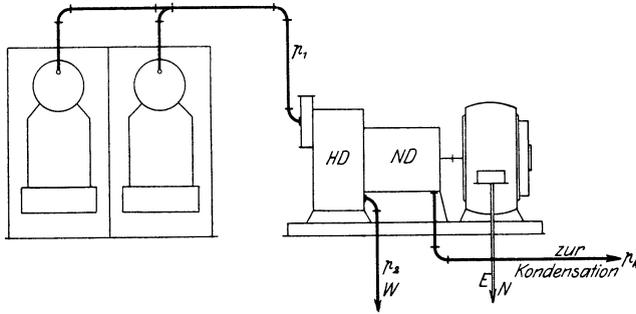


Fig. 131f. Mechanische Kupplung der Maschinen (Zwischendampfentnahme).

87b. Regelung. Zwischen beiden Druckgrenzen, nämlich zwischen Öffnen des Sicherheits- und Öffnen des Druckminderventils, unterliegt die Gegendruckmaschine der Herrschaft ihres Reglers, der einerseits die Drehzahl, andererseits die elektrische Leistung herzustellen hat. Die Wirkung der Regelung ist hierbei, stets in dem Bestreben, einen möglichst großen Teil des Dampfes der doppelten Ausnutzung nach Arbeit und Wärme zu unterziehen, verschieden, je nachdem ob $\frac{W}{N} < d_2$ oder $\frac{W}{N} > d_2$ ist.

1. $\frac{W}{N} < d_2$ (Fehlbetrag an Arbeit). Die Anordnungen nach Fig. 131e und Fig. 131f sind möglich. Bei Fig. 131e versorgt eine für die Druckstufe p_1 bis p_2 eingerichtete Maschine I das Gegendruckdampfnetz mit Abdampf, eine zweite mit Kondensation arbeitende Maschine II ergänzt den Fehlbetrag an elektrischer Leistung. Maschine I liefert jederzeit so viel Strom, wie sich in ihr mit der Dampfmenge W erzeugen läßt; den Rest gibt Maschine II her. Der Regler von II ist ein gewöhnlicher Drehzahlregler; er erhält die Drehzahl auf beispielsweise 3000/min. Turbine I hat eine Regelung nach Fig. 131g, die den Zutritt von Frischdampf

zur Turbine von der Aufnahme W des Dampfnetzes abhängig macht; sinkt W , so wird also der Turbine weniger Dampf abgenommen als bisher und als ihr zuströmt; der Gegendruck am Auslaß der Turbine I steigt also; dadurch wird im Zylinder Z ein Kolben heraufgedrückt, und durch Drehung des Hebels $A B$ um B , durch Heben von A wird die Dampfzufuhr zur Maschine gemindert, so daß sich in bezug auf den Dampf ein neuer Beharrungszustand einstellt. Mit der Minderung des Dampfdurchganges durch die Maschine mindert sich aber gleichzeitig die Leistungshergabe der Maschine I , und so viel Leistung muß auf Maschine II übergehen. Beide Maschinen lassen nämlich, da die Dampfaufnahme der Leistungsentnahme N nicht mehr entspricht, in der Drehzahl etwas nach, der Drehzahlregler der Maschine II kommt zum Ansprechen wie bei jeder Leistungsänderung einer Kraftmaschine, und II übernimmt so viel Leistung, wie I nicht mehr hergibt. Das Umgekehrte findet bei einer Vermehrung des Dampfbedarfes W

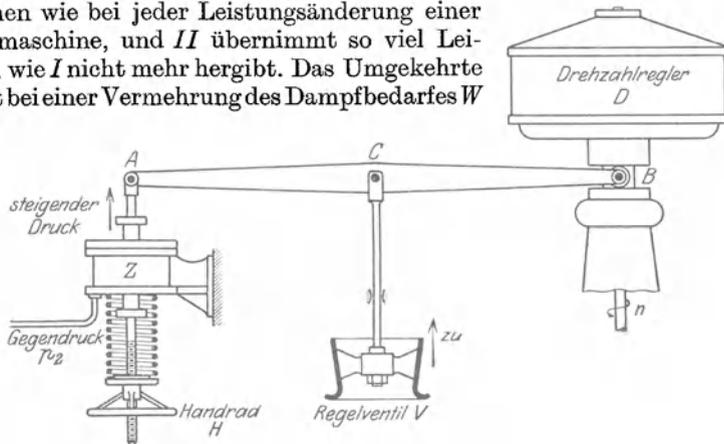


Fig. 131 g. Druckregelung für Gegendruckmaschinen in Parallelschaltung mit anderen Kraftquellen.

statt. Wenn dagegen der Leistungsbedarf N sich ändert, so veranlaßt nach leichter Änderung der Drehzahl einfach der Drehzahlregler von Maschine II , daß diese Maschine die erforderliche größere Dampfmenge erhält, Maschine I wird dann im Dampfdruckgang gar nicht beeinflußt.

Bei diesen Vorgängen kommt der Drehzahlregler D von I nicht zur Wirkung, seine Feder wird so angespannt, daß er erst bei höherer Drehzahl anspricht als der Regler von II , er dient nur als Sicherheitsregler, denn hinsichtlich der Drehzahl sind I und II als elektrisch gekuppelt anzusehen. Namentlich bei Wechsel- oder Drehstrom sind die beiden in das gleiche Netz speisenden Generatoren gehalten, synchron zu laufen, solange, bis etwa eine aus dem Tritt fällt. Die kleinen Drehzahländerungen, die die Maschine II beim Wirken ihres Drehzahlreglers erfährt und die deren Ungleichförmigkeit zwischen Leerlauf und Vollast entsprechen, ist also I gezwungen mitzumachen, ohne daß der Dampfdruckgang dadurch merklich beeinflußt wird. Ob dabei die Maschinen I und II mit gleicher Phasenverschiebung und gleichem Leistungsfaktor arbeiten, hängt von ihrer beider Erregung ab; durch Abgleichen der Erregung trägt man für etwa gleichen $\cos \varphi$ Sorge. Bei

Gleichstrom ist die Kuppelung ebenfalls vorhanden; die Leistung jeder Dynamo ist durch Erregung und Drehzahl festgelegt; die Leistung von I liegt wegen der Dampfabnahme W fest und die Leistung von II muß jene zu N ergänzen; eine bestimmte Erregung von II ist also nötig, um die Spannung E sicherzustellen, bei der Drehzahl, die der Regler dem Satz II aufzwingt; ist nun I in gewissem Maße erregt, so kann nur eine Drehzahl die Dynamo I veranlassen, die gleiche Spannung zu erzeugen, und auf diese Drehzahl wird sie sich einstellen; nur muß eben der Drehzahlregler von I noch nicht wirken, sondern in seine tiefste Stellung gedrückt sein und nur als Sicherheitsregler wirken. Ein Nachregeln der Erregung kann diesmal, im Gegensatz zu einfach parallel arbeitenden Gleichstrommaschinen, keinen Einfluß auf die Leistungsverteilung üben, es ändert nur das gegenseitige Drehzahlverhältnis.

Im ganzen übernimmt also die Gegendruckmaschine hinsichtlich der Leistung die Führung und die Kondensationsmaschine hat sich anzupassen; hinsichtlich der Drehzahl indessen übernimmt die Kondensationsmaschine die Führung und die Gegendruckmaschine hat sich anzupassen.

Ältere Gegendruckmaschinen haben wohl einfach einen Drehzahlregler. Sie sind dann in Bezug auf den Gegendruck im *labilen Beharrungszustand*. Steigt mangels Dampfabnahme der Gegendruck, so muß der Drehzahlregler zur Au'rechterhaltung der Drehzahl die Füllung vergrößern; der vermehrte Dampfdurchsatz erhöht den Gegendruck, der Drehzahlregler sinkt weiter, und nicht immer tritt überhaupt ein neuer Beharrungszustand ein. Solchen betriebsmäßig oft unerträglichen Verhältnissen hilft man durch Änderung der Regelung ab.

Bei der Anzapfmaschine Fig. 131f gelten ähnliche Betrachtungen, nur ist die Drehzahl beider Maschinenteile, als auf eine Welle wirkend, mechanisch zwangsläufig dieselbe. Die Anzapfturbine wird mit einer Regelung nach Fig. 131g ausgerüstet, deren Wirksamkeit jedoch merklich anders ist als bei getrennten Maschinensätzen. Der Drehzahlregler dient nicht nur als Sicherheitsregler, sondern er spielt im normalen Gang und erzwingt die Drehzahl; der Anzapfdruck wird in den Zylinder Z geleitet und dieser erzwingt die Konstanz des Anzapfdruckes. Ändert sich der Dampfbedarf W , so spielt zunächst der Kolben im Zylinder Z , die Änderung des Dampfdurchganges ändert die Drehzahl, und der Drehzahlregler bringt endgültig die Dampfaufnahme der Maschine auf den richtigen Wert; ändert sich dagegen die verlangte Leistung N , so dreht sich Hebel AB einfach unter der Wirkung des Drehzahlreglers um A und ändert die Dampfaufnahme. — Es versteht sich, daß die mechanische Kuppelung der Anzapfturbine zuverlässiger ist als die elektrische der Fig. 131e; letztere kommt also nur in Betracht, wo einer der Teile, etwa die Kondensationsmaschine, schon vorhanden ist.

2. $\frac{W}{N} > d_2$ (Fehlbetrag an Wärme). Die Regelung wird viel einfacher.

Es sind besondere Niederdruckkessel vorhanden, die mit dem Druck p_2 betrieben werden und den Fehlbetrag an Dampf $W - Nd_2$ zugeben, oder ein Minderventil ist als Umgehung parallel zur Maschine angeordnet, das den Fehlbetrag hinzugibt, sobald der Gegendruck sinkt;

gegen den Gegendruck arbeitet die Maschine so wie sonst gegen den Druck der Kondensation, indem der Regler einfach auf Drehzahl regelt. — Dieser Fall liegt auch vor, wenn eine Maschine den Dampf in ein übermächtiges „Netz“ entläßt, dieses mitspeisend und von seinem Druck abhängig.

Eine besondere Wirkung kommt der Verstellung des Handrades H zu in dem Fall, wo zwei Gegendruckmaschinen miteinander parallel laufen. Dann ist als äußere Betriebsbedingung nur die Summe der beiden Dampfdurchgänge und daher die Summe der beiden elektrischen Leistungen gegeben, die Verteilung der Leistung auf die beiden Maschinen dagegen hängt von der Einstellung der beiden Handräder ab und kann durch Änderung der gegenseitigen Federspannung eingeregelt werden, während die Höhe des Gegendruckes von der mittleren Federspannung bei beiden Maschinen abhängt. Nach den allgemeinen Gesetzen der Regelung (Kap. V) wird nämlich durch jede Einstellung der Federbelastung eine Beziehung zwischen der Leistung und der geregelten Größe festgelegt, als welche letztere hier nicht wie in Fig. 297 die Drehzahl, sondern der Gegendruck eintritt; diese Beziehung kennzeichnet die statischen Verhältnisse der Regelung. Nur bei gleicher Einstellung beider Federn entspricht dem nach der Natur der Sache für beide Maschinen gleichen Gegendruck auch gleiche Stellung von A und daher gleiche Stellung des Regelventils V , gleiche Dampfmenge und gleiche Leistung beider Maschinen. Durch Nachlassen der einen und Anspannen der anderen Reglerfeder wird die Leistung von der erstgedachten auf die andre Maschine gelegt, während die Summe der Dampfmengen und daher der Leistungen und auch der Gegendruck unverändert bleibt. — Es kann aber auch sein, daß beide Maschinen nicht nebeneinanderstehend in das Dampfnetz speisen, sondern an verschiedenen Stellen desselben. Dann werden je nach den Strömungsverhältnissen im Netz Druckunterschiede zwischen den beiden Speisestellen vorkommen; gleiche Leistung beider Maschinen ist dann an gleiche Stellung der Regelorgane und daher an eine dem Druckunterschied der Speisestellen entsprechend ungleiche Stellung der Federbelastung gebunden, während das Anspannen und Nachlassen der Federn die Leistungsverteilung in gleicher Weise wie vorher beeinflußt. Die Leistungsverteilung wird jedoch auch von allen Änderungen des Druckunterschiedes beeinflußt, wie solche durch Verlegung des Schwerpunktes der Dampfentnahme oder aber durch Änderung der Gesamtentnahme eintreten; bei hochbelasteten Maschinen kann das unzulässig werden, indem allzu oft das Umgehungs-Druckminderventil der einen Station in Tätigkeit tritt, während bei der andern Maschine die Belastung abfällt; bei schwachbelasteten Maschinen kann umgekehrt unerwartet das Sicherheitsventil der einen Station zum Abblasen kommen, während die andere Maschine noch merklich belastet ist; bei mittelbelasteten Maschinen endlich werden zwar solche unwirtschaftlichen Störungen im Dampfbetrieb nicht vorkommen, aber das Hin- und Herwandern der Belastung kann den elektrischen Betrieb erschweren. Wo starke Schwankungen der Dampfentnahme nach

Gesamtwert oder Schwerpunktslage zu erwarten sind, ist den geschilderten Verhältnissen durch Anpassung der Regelungen an die Druckunterschiede Rechnung zu tragen: die statischen Verhältnisse der Regelung in Bezug auf Druckänderungen (nach Analogie von Fig. 295, § 157) müssen so sein, daß die vorkommenden Druckunterschiedsänderungen zwischen den Speisestellen keine zu großen Verteilungsänderungen der Leistung im Gefolge haben. In diesem Sinne wirksame Maßnahmen sind: Vergrößerung der Ungleichförmigkeit der Regelung (§ 157) durch Anwendung einer Feder geringerer Durchbiegung für die Kräfteinheit, die durch passende Vorspannung dieselbe mittlere Kraft ergibt; oder Verringerung der zwischen den Speisestellen vorkommenden Druckverluste, wozu die Rohrweite zu vergrößern, vielleicht aber mit besserem wirtschaftlichem Erfolg eine Näherrückung oder Zusammenlegung der Zentralen ins Auge zu fassen ist.

87c. Wirtschaftlichkeit. Für die Ermittlung der zu erwartenden wirtschaftlichen Ergebnisse bedeutet $\eta_{\max} = F(p_1/p_2, t_1)$ den theoretisch höchst erzielbaren Wirkungsgrad der Umsetzung bei der Expansion vom Zustand p_1, t_1 bis zum Gegendruck p_2 , gemäß Fig. 131 a, es bedeutet η_g den Gütegrad der Maschine, mit oder ohne Einschluß der Verluste im Elektrogenerator. Dann gilt für die spezifische, d. h. auf die Arbeits-einheit 1 kWh bezogene Dampfaufnahme der Maschine

$$d_1 = \frac{1,34}{\eta_{\max} \cdot \eta_g} \dots \dots \dots (5)$$

Hierbei ist 1,34 kg Normaldampf von 640 kcal/kg der Äquivalenzwert von 1 kWh, die gleich 859 kcal ist. Wählen wir $\eta_{\max} = \eta_{\max k}$ entsprechend dem bei einer Kondensationsmaschine geltenden Druckverhältnis, so erhalten wir nach der gleichen Formel die spezifische Dampfaufnahme einer Kondensationsmaschine, die dort zugleich der Dampfverbrauch ist:

$$d_k = \frac{1,34}{\eta_{\max k} \cdot \eta_{gk}} \dots \dots \dots (5a)$$

Weiter sei η_M derjenige Wirkungsgrad des Maschinensatzes, der außer der in Arbeit umgesetzten Wärme nur noch die gesamte Wärmeausstrahlung der Maschine (und gegebenenfalls der Dynamo) umfaßt, während z. B. Wirbelungsverluste des Dampfes nicht als Verlust im Sinne dieses Wirkungsgrades anzusehen sind, weil die aus ihnen entstehende Wärme zwar Arbeitsverluste bedingt, aber doch als Wärme im Dampf bleibt. Dann ist die spezifische Abnahme der Dampfmenge im Maschinensatz

$$d_1 - d_2 = \frac{1,34}{\eta_M} \dots \dots \dots (5b)$$

Daher wird die spezifische Dampfabgabe des Satzes

$$d_2 = 1,34 \cdot \left(\frac{1}{\eta_{\max} \cdot \eta_g} - \frac{1}{\eta_M} \right) \dots \dots (5c)$$

Durch die Bezugnahme auf einen Normaldampf tritt ein Dampfverbrauch $d_1 - d_2$ der Gegendruckmaschine zutage, der als solcher in Wirklichkeit nicht besteht. Die Vorgänge pflegen sich im Über-

hitzungsgebiet abzuspielen, und bei unveränderter Dampfmenge findet dann eine Abnahme des Wärmeinhaltes statt. Durch das Rechnen mit Normaldampf ist an Stelle der Qualitätsverschlechterung eine Quantitätsverminderung in die Erscheinung getreten. Für die weitere Verwendung des Dampfes für Heiz- oder Kochzwecke ist das gleichgültig.

1. Der Fall reiner Abdampfausnutzung, $\frac{W}{N} = d_2$, ist durch die *Abnehmerkennzahl* $\epsilon = \frac{N \cdot d_2}{W} = 1$ bestimmt. Er sei zunächst behandelt. Wir beziehen alle Dampfmen gen auf die für Heizdampf benötigte Dampfmenge W kg ND/h als Einheit. Der Gegendruckmaschine ist bei einer Leistung N und einer spezifischen Dampfaufnahme d_1 die stündliche Dampfmenge $N \cdot d_1$ zuzuführen. In Vielfachen von W sind das $\frac{N \cdot d_1}{W}$ kg ND/h, und da für $\epsilon = 1$ noch $W = N \cdot d_2$ ist, so haben wir die in die Gegendruckmaschine einzuführende Dampfmenge anzugeben als

$$\frac{N \cdot d_1}{N \cdot d_2} = \frac{d_1}{d_2} = \frac{1,34}{1,34 \cdot \left(\frac{1}{\eta_{\max} \cdot \eta_g} - \frac{1}{\eta_M} \right)} = \frac{1}{1 - \frac{\eta_{\max} \cdot \eta_g}{\eta_M}}$$

Als für Kraftzwecke verbraucht ist anzusetzen

$$\delta_{a_1} = \frac{N \cdot d_1 - W}{W} = \frac{d_1 - d_2}{d_2}$$

$$\delta_{a_1} = \frac{1}{\frac{\eta_M}{\eta_{\max} \cdot \eta_g} - 1} \dots \dots \dots (6)$$

Dagegen wird bei getrenntem Betrieb, wenn d_k , wie oben erläutert, den Dampfverbrauch (die spezifische Dampfaufnahme) der Kondensationsmaschine bedeutet, die insgesamt zu erzeugende Dampfmenge

$$\frac{N \cdot d_k + W}{W} = \frac{N \cdot d_k}{N \cdot d_2} + 1 = \frac{d_k}{d_2} + 1 = \frac{d_k}{1,34 \cdot \left(\frac{1}{\eta_{\max} \cdot \eta_g} - \frac{1}{\eta_M} \right)} + 1.$$

Als für Kraftzwecke verbraucht, ist anzusetzen

$$\delta_{k_1} = \frac{N \cdot d_k}{W} = \frac{d_k}{1,34 \cdot \left(\frac{1}{\eta_{\max} \cdot \eta_g} - \frac{1}{\eta_M} \right)} \dots \dots \dots (7)$$

Die Dampfersparnis, in Vielfachen von W ausgedrückt, ist

$$\delta_{k_1} - \delta_{a_1} = \frac{d_k}{d_2} + 1 - \frac{d_1}{d_2} = \frac{d_k - (d_1 - d_2)}{d_2} \dots \dots \dots (8)$$

In Bruchteilen des Dampfbedarfes bei getrenntem Betrieb ausgedrückt, ist der Dampfbedarf bei reiner Abdampfausnützung

$$\frac{1 + \delta_{a_1}}{1 + \delta_{k_1}} = \frac{\frac{d_1}{d_2}}{\frac{d_k}{d_2} + 1} = \frac{d_1}{d_k + d_2} = \frac{1,34}{\eta_{\max} \cdot \eta_g} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{\max} \cdot \eta_g} - \frac{1}{\eta_M} \right)$$

$$\eta_1 = \frac{1 + \delta_{a_1}}{1 + \delta_{k_1}} = \frac{1}{\eta_{\max} \cdot \eta_g \cdot \left(\frac{d_k}{1,34} - \frac{1}{\eta_M} \right)} \dots \dots \dots (9)$$

In Bruchteilen des Arbeitsdampfbedarfes bei getrenntem Betriebe ist der Arbeitsdampfbedarf bei reiner Abdampfausnützung

$$\frac{\delta_{a_1}}{\delta_{k_1}} = \frac{d_1 - d_2}{d_k} \dots \dots \dots (10)$$

δ_{a_1} und δ_{k_1} bedeuten also den Dampfbedarf für Kraftzwecke bei Gegendruck- und bei Kondensationsbetrieb, in Voraussetzung des Falles $\varepsilon = 1$, wo also Dampfbedarf W und Kraftbedarf N in dem für eine restlose Durchführung der Abdampfausnützung erforderlichen Verhältnis zueinander stehen, die Dampfbedarfszahlen sind gegeben als Vielfache des Heizdampfbedarfes.

2. δ_a und δ_k sollen nun dieselben Größen, jedoch für beliebige Werte der Abnehmerkennzahl $\varepsilon = d_2 \cdot \frac{N}{W}$ bedeuten, wobei der Gegendruckbetrieb immer soweit angewendet werden soll, wie es nach Maßgabe der Kennzahl ε möglich ist. Es darf also gleichzeitig stets nur entweder Kraft aus Kondensationsmaschinen oder Wärme aus Hilfskesseln zugefügt werden.

Ist zunächst $\varepsilon < 1$, ist also der Kraftbedarf kleiner als dem Dampfbedarf entspricht, so kann bei Gegendruckbetrieb der Bruchteil ε des ganzen Dampfbedarfes W aus Abdampfmengen gedeckt werden; es ist also noch $(1 - \varepsilon) \cdot W$ durch direkte Dampferzeugung in Niederdruckkesseln oder aus reduziertem Dampf zu decken. Der ganze Heizdampfbedarf wird also belegt als

$$W = (1 - \varepsilon) \cdot W + \varepsilon \cdot W = 1.$$

Hinzu tritt als für Kraftzwecke verbraucht das ε fache dessen, was bei reiner Abdampfausnützung verbraucht worden wäre, also $\varepsilon \cdot \delta_{a_1}$. Insgesamt ist also zu erzeugen

$$1 + \varepsilon \cdot \delta_{a_1}$$

und für Kraftzwecke ist verbraucht

$$\delta_a = \varepsilon \cdot \delta_{a_1} \dots \dots \dots (6a)$$

Bei getrenntem Betrieb würde ebenso die gesamte Dampferzeugung

$$1 + \varepsilon \cdot \delta_{k_1}$$

und für Kraftzwecke ist verbraucht

$$\delta_k = \varepsilon \cdot \delta_{k_1} \dots \dots \dots (7a)$$

Die Dampfersparnis wird, in Vielfachen des Heizbedarfs

$$\delta_k - \delta_a = \varepsilon \cdot (\delta_{k_1} - \delta_{a_1}) \dots \dots \dots (8a)$$

Der Dampfbedarf bei weitmöglichst ausgebildetem Gegendruckbetrieb im Falle $\varepsilon < 1$ ist also, in Bruchteilen desselben bei getrenntem Betriebe,

$$\eta = \frac{1 + \delta_a}{1 + \delta_k} = \frac{1 + \varepsilon \cdot \delta_{a_1}}{1 + \varepsilon \cdot \delta_{k_1}} \dots \dots \dots (9a)$$

Der Dampfverbrauch für Kraftzwecke bei weitmöglichst ausgebildetem Gegendruckbetrieb im Falle $\varepsilon < 1$ ist in Bruchteilen desselben Kraftdampfverbrauches bei getrenntem Betrieb

$$\frac{\delta_a}{\delta_k} = \frac{\varepsilon \cdot \delta_{a_1}}{\varepsilon \cdot \delta_{k_1}} = \frac{\delta_{a_1}}{\delta_{k_1}} \dots \dots \dots (10a)$$

3. Wenn dagegen andererseits $\varepsilon > 1$ ist, so daß also der Kraftbedarf größer ist als aus dem Heizdampf vorgängig herausgezogen werden kann, so muß der Fehlbetrag an Kraft auch bei weitmöglichst ausgebildetem Gegendruckbetrieb aus Kondensationsmaschinen gedeckt werden. Der Gegendruckbetrieb behält dabei die Größe wie im Falle $\varepsilon = 1$; die Kondensationsmaschinen verbrauchen im Verhältnis $\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}$ weniger Dampf als bei getrenntem Betrieb. Insgesamt ist also an Dampf zu erzeugen :

die Heizdampfmenge, die = 1 gesetzt ist,

der Verbrauch der Gegendruckmaschinen $\delta_a = \delta_{a_1}$,

zusammen geht also in die Gegendruckmaschinen $1 + \delta_a = 1 + \delta_{a_1}$,
der Dampfverbrauch der Kondensationsmaschinen $\delta_k = (\varepsilon - 1) \cdot \delta_{k_1}$.

Die Kessel erzeugen bei tunlichst weitgehender Abdampfausnutzung im Fall $\varepsilon > 1$

$$1 + \delta_a = 1 + \delta_{a_1} + (\varepsilon - 1) \cdot \delta_{k_1} = 1 + \varepsilon \cdot \delta_{k_1} + (\delta_{a_1} - \delta_{k_1})$$

und für Kraftzwecke ist verbraucht

$$\delta_a = \delta_{a_1} + (\varepsilon - 1) \cdot \delta_{k_1} \dots \dots \dots (6b)$$

Bei getrenntem Betrieb würde genau wie im Fall $\varepsilon < 1$ auch für $\varepsilon > 1$ die gesamte Dampfmenge $1 + \varepsilon \cdot \delta_{k_1}$ zu erzeugen sein, und es ist

$$\delta_k = \varepsilon \cdot \delta_{k_1} \dots \dots \dots (7b)$$

für Kraftzwecke verbraucht. Die Dampfersparnis in Vielfachen des Heizbedarfes ist

$$\delta_k - \delta_a = \varepsilon \cdot \delta_{k_1} - \delta_{a_1} - (\varepsilon - 1) \cdot \delta_{k_1} = \delta_{k_1} - \delta_{a_1} \dots \dots (8b)$$

sie ist für alle Werte $\varepsilon > 1$ unveränderlich. Der Dampfbedarf bei möglichst weitgehender Abdampfausnutzung ist im Falle $\varepsilon > 1$, ausgedrückt in Bruchteilen des Bedarfes bei getrenntem Betrieb,

$$\eta = \frac{1 + \delta_a}{1 + \delta_k} = \frac{1 + \delta_{a_1} + (\varepsilon - 1) \cdot \delta_{k_1}}{1 + \varepsilon \cdot \delta_{k_1}} = \frac{1 + \varepsilon \cdot \delta_{k_1} + (\delta_{a_1} - \delta_{k_1})}{1 + \varepsilon \cdot \delta_{k_1}}$$

$$\eta = 1 + \frac{\delta_{a_1} - \delta_{k_1}}{1 + \varepsilon \cdot \delta_{k_1}} \dots \dots \dots (9b)$$

Endlich der Dampfverbrauch für Arbeitszwecke bei möglichst weitgehender Abdampfausnutzung, ausgedrückt in Bruchteilen des Arbeitsdampfbedarfes bei getrenntem Betrieb, ist für $\varepsilon > 1$

$$\frac{\delta_a}{\delta_k} = \frac{\delta_{a_1} + (\varepsilon - 1) \cdot \delta_{k_1}}{\varepsilon \cdot \delta_{k_1}} = \frac{\varepsilon \cdot \delta_{k_1} + (\delta_{a_1} - \delta_{k_1})}{\varepsilon \cdot \delta_{k_1}}$$

$$\frac{\delta_a}{\delta_k} = 1 + \frac{\delta_{a_1} - \delta_{k_1}}{\varepsilon \cdot \delta_{k_1}} \dots \dots \dots (10b)$$

Hiermit sind alle Werte δ_a und δ_k sowie die daraus folgenden Ersparniswerte zurückgeführt auf die entsprechenden Werte δ_{a_1} und δ_{k_1} für $\varepsilon = 1$ und sind von ε abhängig gemacht; δ_{a_1} und δ_{k_1} aber sind ihrerseits abhängig gemacht von den Wirkungsgradwerten η_g , η_M und $\eta_{\max} = F(p_1/p_2, t_1)$ oder von den daraus folgenden spezifischen Dampfverbrauchs-zahlen d_1 und d_2 , sowie endlich noch von d_k . Tabelle 45 b stellt das Ergebnis zusammen.

Die in Tabelle 45 b vorkommenden Größen sind wie folgt zu bestimmen: In der Kennzahl $\varepsilon = \frac{N \cdot d_2}{W}$ sind N und W festliegende äußere Betriebsbedingungen; man kann suchen auf sie Einfluß zu üben in dem Sinne, daß man ε möglichst der Einheit nähert. d_2 ist abhängig von den drei Wirkungsgraden η_{\max} , η_g und η_M , von denen die letzten beiden Erfahrungszahlen sind, die die Annäherung der Ausführung an den denkbar günstigsten Zustand der Maschine ausdrücken, für den sie gleich der Einheit würden. Es pflegt zu sein $\eta_g = 0,50$ bis $0,60$ und für eine Kolben- oder Turbodampfmaschine allein $\eta_M = 0,80$ bis $0,90$, bei guter Belastung und guter Ausführung. Doch ist η_M entsprechend niedriger anzunehmen, wenn und soweit man in die Betrachtung die Verluste einbeziehen will, die in einer Dynamomaschine und in den Rohrleitungen statthaben; nur hat man diese Annahmen für eine Vergleichsberechnung bei getrenntem Betrieb entsprechend zu wählen. η_{\max} hängt theoretisch ab von p_1/p_2 und von t_1 , Tabelle 45 a; man sollte p_1 so weit steigern oder p_2 so weit herabdrücken, wie es möglich ist.

In den durch die Schaubilder Fig. 131 h bis m belegten *Zahlenbeispielen* ist angenommen: $p_1 = 14$ at UeD = 15 at abs, $t_1 = 300^\circ \text{C}$; $\eta_g = 0,50$; $\eta_M = 0,67$, also $d_1 - d_2 = \frac{1,34}{0,67} = 2,0$ kg ND/kWh; $p_k = 0,05$ at, also nach Fig. 131 a für $\frac{p_1}{p_k} = \frac{15}{0,05} = 300$ ist $\eta_{\max k} = 0,305$, und mit $\eta_{gk} = 0,50$ wird $\eta_k = 0,152$, $d_k = 8,8$ kg ND/kWh.

Denkt man nun einmal ε verändert durch verschiedene Werte von $\frac{N}{W}$, dabei sei $p_2 = 0,5$ at UeD = 1,5 at abs, also $p_1/p_2 = 10$. Nach Fig. 131 a

Tabelle 45 b. Wirtschaftlichkeit

Spezifische Dampfaufnahme der Gegendruckmaschine $d_1 = \frac{1,34}{\eta_{\max} \cdot \eta_g}$ kg ND/kWh

Spezifische Dampfabgabe der Gegendruckmaschine $d_2 = 1,34 \cdot \left(\frac{1}{\eta_{\max} \cdot \eta_g} - \frac{1}{\eta_M} \right)$

Kennzahl des Betriebes $\varepsilon = \frac{N}{W} \cdot d_2$	$\varepsilon < 1$
Gegendruckbetrieb:	
Erzeugung für Heizzwecke	$1 - \varepsilon$
Erzeugung für Gegendruckmaschine . .	$\varepsilon \cdot (1 + \delta_{a1})$
Erzeugung für Kondensationsmaschine	0
Gesamterzeugung = Gesamtverbrauch .	$1 + \delta_a = 1 + \varepsilon \delta_{a1}$
Verbrauch für Kraftzwecke	$\delta_a = \varepsilon \cdot \delta_{a1}$
Verbrauch für Heizzwecke, gesetzt = 1	1
Getrennter Betrieb:	
Erzeugung = Verbrauch, beides f. Heizzw.	1
Erzeugung = Verbrauch, beid. f. Kraftzw.	$\delta_k = \varepsilon \cdot \delta_{k1}$
Gesamterzeugung = Gesamtverbrauch .	$1 + \delta_k = 1 + \varepsilon \cdot \delta_{k1}$
Der Gegendruckbetrieb erspart in Vielfachen des Heizbedarfes hat einen Dampfbedarf (in Vielfachen des Heizbedarfes bei getrenntem Betrieb)	$\delta_k - \delta_a = \varepsilon \cdot (\delta_{k1} - \delta_{a1})$ $\frac{1 + \delta_a}{1 + \delta_k} = \frac{1 + \varepsilon \cdot \delta_{a1}}{1 + \varepsilon \cdot \delta_{k1}}$
hat einen Arbeitsdampfbedarf (in Viel- fachen des Heizbedarfes bei getrenntem Betrieb)	$\frac{\delta_a}{\delta_k} = \frac{\delta_{a1}}{\delta_{k1}}$

ist dann $\eta_{\max} = 0,153$, also $d_1 = \frac{1,34}{0,153 \cdot 0,5} = 17,4$ kg ND/kWh und $d_2 = 17,4 - 2,0 = 15,4$ kg ND/kWh. Bezogen auf $W = 1$ wird für $\varepsilon = 1$ der Verbrauch für Kraftzwecke bei Gegendruckbetrieb

$$\delta_{a1} = \frac{2,0}{15,4} = 0,130,$$

der Verbrauch für Kraftzwecke bei getrenntem Betrieb

$$\delta_{k1} = \frac{8,8}{15,4} = 0,571.$$

In Fig. 131 h ist der Heizbedarf \overline{AD} gleich der Einheit gesetzt. Dann stellt $\overline{AB} = 0,130 \cdot \overline{AD}$ den Verbrauch bei Gegendruckbetrieb und $\overline{AC} = 0,571 \cdot \overline{AD}$ denselben bei getrenntem Betrieb dar — alles für $\varepsilon = 1$. Wegen der in Tabelle 45 b ersichtlichen linearen Abhängigkeit aller Größen von ε ist durch diese Lage von B und C das gesamte Diagramm Fig. 131 h bestimmt, in welchem für alle Werte ε Herkunft und

des Gegendruckbetriebes.

Spezifischer Dampfverbrauch der Gegendruckmaschine $d_1 - d_2 = \frac{1,34}{\eta_M}$ kg ND/kWh

Spezifische Dampfaufnahme, zugleich Dampfverbrauch der Kondensationsmaschine $d_k = \frac{1,34}{\eta_{\max k} \cdot \eta_{gk}} = \frac{1,34}{\eta_k}$

$\varepsilon = 1$	$\varepsilon > 1$
$1 + \delta_{a1} = \frac{0}{d_2} = \frac{1}{1 - \frac{\eta_{\max} \cdot \eta_g}{\eta_T}}$ $\delta_{a1} = \frac{0}{d_2} = \frac{1 + \delta_{a1}}{\frac{\eta_T}{\eta_{\max} \cdot \eta_g} - 1}$	0 $1 + \delta_{a1}$ $(\varepsilon - 1) \cdot \delta_{k1}$ $1 + \delta_a = 1 + \varepsilon \cdot \delta_{k1} + (\delta_{a1} - \delta_{k1})$ $\delta_a = \delta_{a1} + (\varepsilon - 1) \cdot \delta_{k1}$
$\delta_{k1} = \frac{1}{d_2} = \frac{\delta_k}{1,34 \cdot \left(\frac{1}{\eta_{\max} \cdot \eta_g} - \frac{1}{\eta_M} \right)}$ $1 + \delta_{k1}$	1 $\delta_k = \varepsilon \delta_{k1}$ $1 + \delta_k = 1 + \varepsilon \cdot \delta_{k1}$
$\delta_{k1} - \delta_{a1} = \frac{d_k - (d_1 - d_2)}{d_2}$ $\frac{1 + \delta_{a1}}{1 + \delta_{k1}} = \frac{1}{\eta_{\max} \cdot \eta_g \cdot \left(\frac{d_k}{1,34} - \frac{1}{\eta_M} \right) + 1}$ $\frac{\delta_{a1}}{\delta_{k1}} = \frac{d_2 - d_2}{d_k}$	$\delta_k - \delta_a = \delta_{k1} - \delta_{a1}$ $\frac{1 + \delta_a}{1 + \delta_k} = 1 + \frac{\delta_{a1} - \delta_{k1}}{1 + \varepsilon \cdot \delta_{k1}} = \frac{1 + \delta_{a1} + (\varepsilon - 1) \cdot \delta_{a1}}{1 + \varepsilon \cdot \delta_{k1}}$ $\frac{\delta_a}{\delta_k} = 1 + \frac{\delta_{a1} - \delta_{k1}}{\varepsilon \cdot \delta_{k1}}$

Verbleib des Dampfes nachgewiesen wird. Die Ersparniswerte sind in Fig. 131i dargestellt.

Für die Beurteilung der aus Veränderungen der Annahmen folgenden Verhältnisse darf man nicht aus dem Auge lassen, daß zwar die Relativzahlen, die auf den Heizbedarf W als Einheit Bezug nehmen, nur vom Verhältnis $\frac{N}{W}$ der beiden Abnehmerschaften abhängen.

Für die absoluten Ersparnisse jedoch ist es ein Unterschied, ob eine Verkleinerung von $\frac{N}{W}$, also von ε , durch eine Verkleinerung von N oder durch eine Vergrößerung von W hervorgerufen ist, denn ersteres bedeutet eine Verkleinerung, letzteres eine Vergrößerung des Gesamtbetriebes, also beim Neubau: der Maschineneinheiten, oder beim Betriebe: der Umsätze und daher der Ersparnisse, in Mark gerechnet.

Deshalb werden in Fig. 131k und l noch einmal die Ergebnisse aus Fig. 131h und i wiederholt, jedoch dient als Abszisse der reziproke Wert

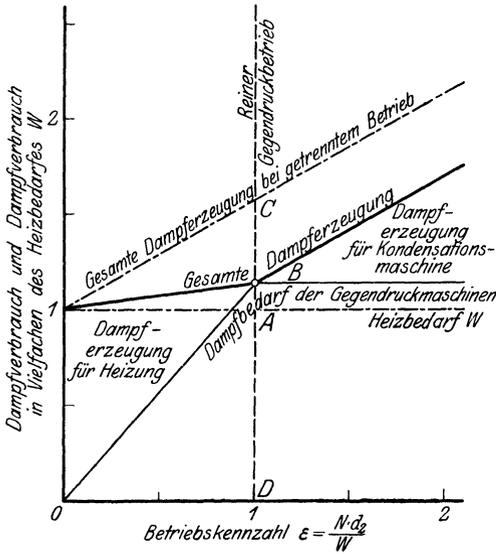


Fig. 131 h. Einfluß verschiedenen Kraftbedarfes auf den Dampfbedarf einer Gegendruckanlage.

$\frac{1}{\varepsilon} = \frac{W}{N \cdot d_2}$ und als Einheit der Ordinatenzählung dient $N \cdot d_k$, der Dampfverbrauch für Kraft-

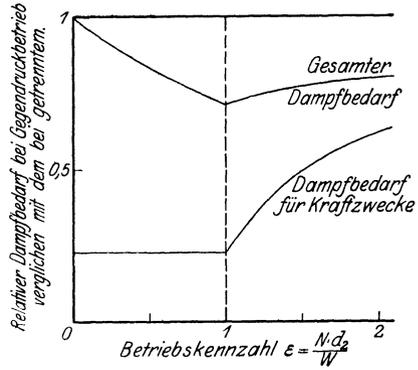


Fig. 131 i.

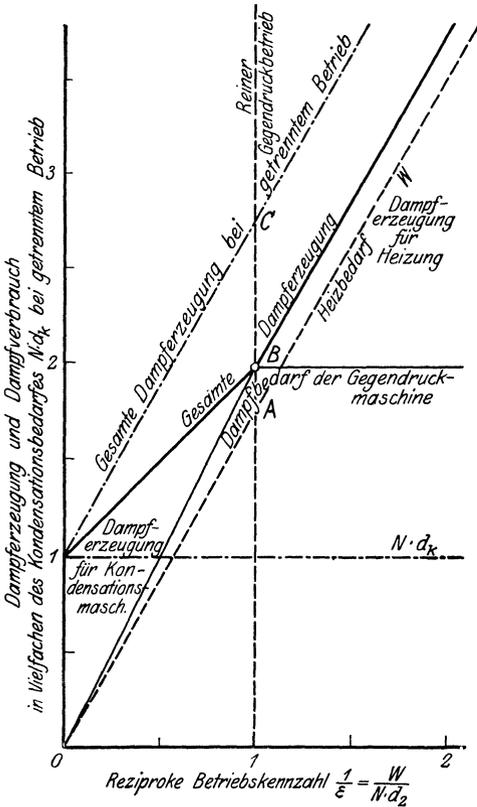


Fig. 131 k. Einfluß verschiedenen Wärmebedarfes auf den Dampfbedarf einer Gegendruckanlage.

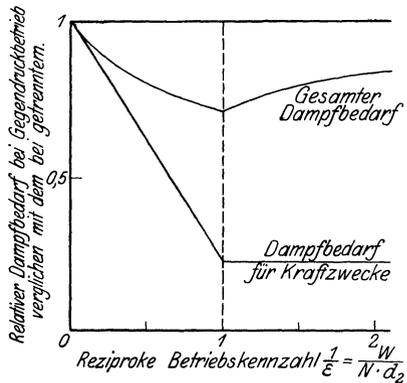


Fig. 131 l.

zwecke bei getrenntem Betrieb. In diesen Darstellungen wird also die verlangte Leistung N als festliegend und W als veränderlich gedacht. —

Denkt man weiter ein zweites Mal ε verändert durch Änderung von d_2 , während $\frac{N}{W}$ für eine gewisse Abnehmerschaft festliegt, so wird im allgemeinen (außer durch Wahl verschieden wirtschaftlicher Maschinentypen) die Änderung von d_2 durch die will-

kürliche Wahl des Gegendruckes bedingt sein. Es ändert sich also p_2/p_1 . Mit $\frac{W}{N} = 20 \text{ kg/kWh}$ und übrigens denselben Werten ergibt sich dann Fig. 131 m. Zunächst findet man die Kurve der Dampfabgabe der betreffenden, durch $\eta_g = 0,50$ und $\eta_M = 0,66$ gekennzeichneten Maschinentype. Es ist dabei nicht daran zu denken, daß für eine Maschine der Gegendruck verändert wird, sondern daß für jeden Gegendruck die passende Maschine erst auszuwählen ist — gegebenenfalls ist anzunehmen, daß man die Füllungsverhältnisse einer Kolbenmaschine, die Düsensätze einer Turbomaschine entsprechend ändert oder auswechselt, wenn man dauernd zu einem anderen Betriebsdruck übergeht. Statt errechneter Werte kann man der Kurve d_2 nach Befund auch die für verschiedene Gegendrucke gegebenen Garantiewerte zugrunde legen.

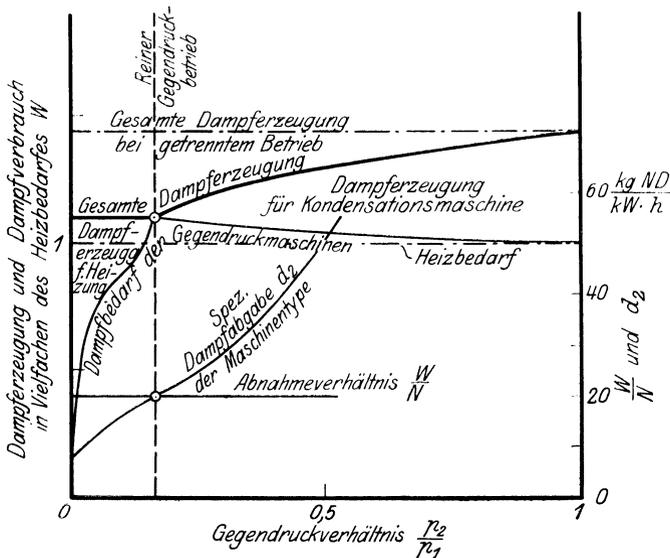


Fig. 131 m. Einfluß des Gegendruckes auf den Dampfbedarf.

Zu dem Heizdampfbedarf gleich der Einheit addiert sich bei getrenntem Betrieb bei allen Gegendrücken derselbe Bedarf der Kondensationsmaschine, der durch die Strecke $\frac{8,8}{20} = 0,44$ vergleichsweise gegeben ist. Der Wert $\epsilon = 1$ ist durch den Schnittpunkt der Wagerechten $\frac{W}{N} = 20$ mit der Kennlinie der Maschinentype gegeben, er liegt bei $\frac{p_2}{p_1} = 0,165$, also $p_2 = 2,5 \text{ at abs.}$ Beiderseits davon finden sich dieselben Flächen wie in Fig. 131h.

Die Kurven zeigen, daß es erstrebenswert ist, $\epsilon = 1$ zu erreichen; wird $\epsilon < 1$, so tritt keine weitere Ersparnis ein. Bis zur Erreichung dieses Zustandes aber hat man einerseits N tunlichst zu verringern,

selbst auf Kosten von W — wo man z. B. bei Kompressions- oder Absorptions-Kältemaschinen zwischen Anwendung beider die Wahl hat —; andererseits hat man bis zur Erreichung dieses Zustandes durch Wahl der bestmöglichen Maschinentype d_2 tunlichst zu verkleinern; erst im Gebiet $\varepsilon < 1$ trifft die oft gehörte Annahme zu, bei einer mit Abdampfausnutzung arbeitenden Anlage komme es auf den Wirkungsgrad der Maschinen nicht an.

Allgemein sind die aus einem Gegendruckbetrieb unter den genannten Annahmen für die Wirkungsgrade zu erzielenden Ersparnisse, wie sie sich aus Tab. 45b ergeben, in Fig. 131n dargestellt. —

Bei einer gegebenen Anlage hat man also zunächst den zeitlichen Verlauf von N und W durch Betriebsbeobachtungen festzustellen,

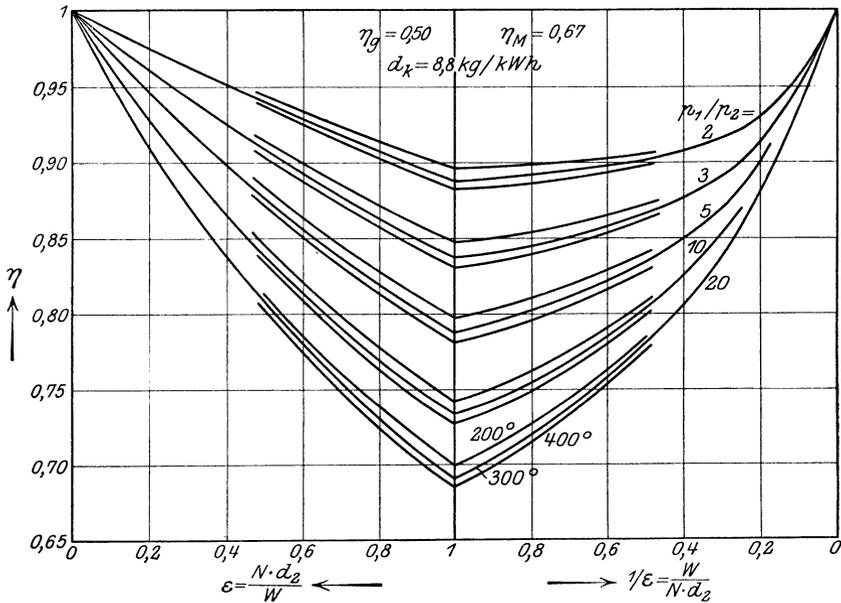


Fig. 131 n. Dampfbedarf bei Gegendruck im Verhältnis zu dem bei getrenntem Betrieb, genau für die angegebenen Zahlenannahmen, sonst annähernd gültig.

sodann sich über p_1 , t_1 , p_2 schlüssig zu werden. Der Anfangszustand des Dampfes wird oft im Anschluß an vorhandene Kessel festliegen, der Enddruck ist als erforderlicher Betriebsdruck der Wärmeverbraucher gegeben, er ist möglichst herabzudrücken. Für die Berechnung von d_2 kann man dann Angebote über Dampfmaschinen einholen. Oft wird es

genügen, zur Vollast $\eta_g = 0,50$ und $\eta_M = \frac{1,34}{d_1 - d_2} = \frac{1,34}{2} = 0,67$ zu setzen. Man findet dann $\varepsilon = \frac{N}{W} \cdot d_2$ in seinem zeitlichen Verlauf und

entnimmt der Fig. 131n für jeden Zeitpunkt die eintretende prozentuale Dampfersparnis, die man abhängig von der Zeit aufträgt; durch Planimetrieren der unter der Kurve liegenden Fläche ergibt sich der Mittelwert der Ersparnis im Jahresverlauf. Stets hat man die Änderung

von d_2 mit wechselnder Belastung der Maschinen zu beachten. Hierbei ist es wesentlich, daß Gegendruckmaschinen nach Art der Gasmaschinen (§ 5, 92) zu den Maschinenarten gehören, deren Durchsatz bei abnehmender Belastung schnell ungünstiger wird. Nur bei guter Belastung der Maschine erreicht man also die Vorteile des Gegendruckbetriebes und sollte die Maschinengröße nicht reichlich wählen, sondern lieber Spitzen in der Abnahme von Dampf und Kraft ungenutzt lassen. Die unangenehme Eigenschaft der Gegendruckmaschine (namentlich: -turbine), bei schwächerer Belastung ungünstig zu arbeiten (§ 56, Fig. 58), wird durch *Steigerung des Kesseldruckes* gemildert, da sie vom Druckverhältnis abhängt. Dies spricht neben den in § 87a gegebenen Zahlen für tunliche Steigerung des Kesseldruckes insbesondere bei Gegendruckanlagen. Gute Belastung aber bedeutet bei der Gegendruckmaschine, daß nicht nur Strom, sondern auch Dampf abgenommen werden muß, sie ist hier also an das Zusammentreffen zweier Bedingungen geknüpft.

Sind Dampfmaschinen oder Dampfturbinen in Verfolg des Überganges zum Gegendruckbetrieb mit anderen Drucken als bisher zu betreiben, so ist die Steuerung oder der Düsensatz nach Maßgabe des in § 61 und 84 Gesagten zu verändern.

e) Verbrennungskraftmaschinen.

88. Verbrauch und wirtschaftlicher Wirkungsgrad. Im Verbrauchsversuch wird an der Verbrennungskraftmaschine einerseits die Menge des aufgenommenen Brennstoffes, andererseits die von der Maschine erzeugte Nutzleistung bestimmt. Der Quotient beider ist der Verbrauch.

Es sei also B die Brennstoffmenge — die Gasmenge in m^3/h , reduziert auf 0° Temperatur und 760 mm QS Druck, das Gewicht verbrauchten Öles oder Benzins in kg/h gemessen — und es sei N_b die Nutzleistung der Maschine in kW, etwa durch Abbremsen mit dem Zaum oder bei kleinen Maschinen nach der Rückdruckmethode (Techn. Mess. § 78) bestimmt; dann ist der (spezifische) Brennstoffverbrauch

$$\varepsilon = \frac{B}{N_b} \frac{\text{m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right)}{\text{kW} \cdot \text{h}} \text{ bzw. } \frac{\text{kg}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \dots \dots \dots (1)$$

Wir geben nämlich die Leistung, auch die mechanische, meist in kW statt in PS an.

ε ist insofern ein Maß für die Wirtschaftlichkeit des Betriebes, als der Preis des Brennstoffes für das Kubikmeter bzw. für das Kilogramm bezahlt zu werden pflegt. Aber ein Vergleich verschiedener mit verschiedenen Brennstoffen betriebenen Maschinen ist wissenschaftlich und praktisch nicht möglich, wenn dabei verschiedene Brennstoffe verwendet werden, wenn insbesondere der (untere, Techn. Mess. § 110) Heizwert ξ_u verschieden ist. Man bezieht dann die Angabe auf einen Brennstoff bestimmten Heizwertes; für Leuchtgas wird der Heizwert von $5000 \text{ kcal}/\text{m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right)$ oft als normal angesehen, oft auch geradezu vertraglich festgelegt; für Treiböle nimmt man meist $10\,000 \text{ kcal}/\text{kg}$

als normalen Heizwert an. Hiernach läßt sich der reduzierte Brennstoffverbrauch berechnen zu

$$\epsilon_0 = \frac{B}{N_b} \cdot \frac{5000}{\xi_u} \frac{\text{m}^3}{\text{kW} \cdot \text{h}} \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right) \text{ bzw. } \cdot \epsilon_0 = \frac{B}{N_b} \cdot \frac{10\,000}{\xi_u} \frac{\text{kg}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \dots (2)$$

Die Anwendung der Formeln setzt voraus, daß der Verbrauch dem Heizwert umgekehrt proportional ist, daß also die verbrauchte Wärmemenge gleich bleibt; das trifft für gleichartige Brennstoffe ähnlicher Qualität befriedigend zu, etwa für zwei Sorten Leichtbenzin oder für zwei Sorten Teeröl. Verschiedene Brennstoffarten neigen oft in so verschiedenem Maße zum Rußen und zeigen auch sonst so verschiedene Verbrennungsverhältnisse (z. B. Benzol oder Benzin), daß die Umrechnung nach dem Heizwert ihren Wert verliert. — Wenn zwei verschiedene Brennstoffe — Treiböl und Zündöl — verwendet werden, so ist außer der Umrechnung nach dem Heizwert eine besondere Umrechnung nach dem Preis in Gebrauch, über die in § 109 berichtet wird.

Außer im Verkehr mit einem Laienpublikum ist der Umrechnung des Verbrauches auf einen normalen Brennstoff stets die Verwendung des *wirtschaftlichen Wirkungsgrades* als klarer vorzuziehen. Der wirtschaftliche Wirkungsgrad ist der Quotient aus dem Wärmeäquivalent der geleisteten Arbeit und aus dem Wärmewert des eingeführten Brennstoffes. Der Leistung N_b kW entspricht das Wärmeäquivalent $859 N_b$ kcal/h, der Brennstoff k ann andererseits die Wärmemenge $\xi_u \cdot B$ kcal/h entwickeln. So wird der wirtschaftliche Wirkungsgrad

$$\eta_w = \frac{859 \cdot N_b}{\xi_u \cdot B} \dots \dots \dots (3)$$

ein Maß für die Wirtschaftlichkeit, das den Heizwert ebenso beachtet wie Formel (2).

Überall in den Formeln kann, bei einer direkt gekuppelten oder auch mit Riemenübertragung arbeitenden Kraftdynamo, N_{el} an die Stelle von N_b treten, wenn man den *Maschinensatz als Ganzes betrachtet*; man erhält z. B.

$$\eta_w = \frac{859 \cdot N_{el}}{\xi_u \cdot B} \dots \dots \dots (4)$$

als wirtschaftlichen Wirkungsgrad einer Gasdynamo; oder es kann die Nutzleistung N_e in gehobenem Wasser bei einer Gaskraft-Pumpmaschine eingeführt werden.

Der Unterschied $\xi_u \cdot B - 859 \cdot N_b$ gibt die Verluste bei der Umsetzung. Durch Bestimmung der indizierten Leistung N_i unterteilt man die Verluste in zwei Teile. Der eine

$$V_{th} = \xi_u \cdot B - 859 \cdot N_i \dots \dots \dots (5)$$

ist nicht zur Umsetzung in mechanische Arbeit gekommen; ihm entspricht der *thermische Wirkungsgrad* als Maß für die Umsetzung, die die Maschine der im Brennstoff steckenden Energie zuteil werden läßt:

$$\eta_{th} = \frac{859 \cdot N_i}{\xi_u \cdot B} \dots \dots \dots (6)$$

Der andere Teil stellt die mechanischen Verluste dar, die nach erfolgter Umsetzung entstehen durch Reibung des Kolbens im Zylinder,

durch Lagerreibung, Luftwirbelung des Schwungrades und ähnliches. Diese werden als

$$V_m = N_i - N_b \dots \dots \dots (7)$$

gemessen; ihnen entspricht ein *mechanischer Wirkungsgrad*

$$\eta_m = \frac{N_b}{N_i} \dots \dots \dots (8)$$

Der Verlust Formel (5) ist in kcal/h, der Verlust Formel (7) aber in kW gegeben.

Wieweit die Trennung der beiden Verlustarten eine scharfe ist, wird in § 94 an Fig. 138 besprochen. Für den Abnehmer ist nicht nur der wirtschaftliche Wirkungsgrad von Interesse, sondern auch der mechanische, weil es nämlich von diesem abhängt, wie stark sich die Wirtschaftlichkeit der Maschine mit der Belastung verändert.

89. Beispiel eines Verbrauchsversuches an einer Gasdynamo. Die Belastung der Gasmaschine erfolgte durch eine Dynamomaschine. Man mißt dann als Nutzleistung N_{el} des aus Gasmaschine und Dynamo bestehenden Maschinensatzes die von der Dynamo in elektrischer Form hergegebene Energie. Bei Gleichstrom wird diese gemessen durch Ablesen des Amperemeters, das die von der Maschine gelieferte Stromstärke J anzeigt, und des Voltmeters, das die Spannung E gibt, bei der die Stromentnahme stattfindet. Es ist

$$N_{el} = \frac{1}{1000} \cdot E \cdot J \text{ kW} \dots \dots \dots (9)$$

Bei Wechselstrom wird direkt die Leistung mittels Wattmeters beobachtet. Bei Drehstrom geschieht das ebenso, doch ist die Ablesung mit $\sqrt{3}$ zu vervielfachen, wenn die Messung bei gleich belasteten Phasen mit nur einem Wattmeter erfolgt; oder bei der Zweiwattmeterschaltung (Arons-Schaltung) sind die Angaben der beiden Wattmeter (evtl. algebraisch) zueinander zu zählen. Im folgenden soll auf Gleichstrom gerechnet werden, den man wegen der größeren Einfachheit und Genauigkeit der Messung im Laboratorium bevorzugt. Über die Schaltung im einzelnen und über die Einregelung der Belastung vgl. § 91.

Die Maschine muß, richtig belastet, so lange laufen, bis sie in den *Beharrungszustand* bezüglich der Wärmeverteilung kommt; als Kennzeichen dafür dient die Ablauftemperatur des Kühlwassers, die nach gewisser Zeit zu steigen aufhört; man kann ein Steigen noch nach 1 h konstatieren, aber zuletzt erfolgt es langsam, und je nach der Wichtigkeit der Versuche wird man schon nach $\frac{1}{2}$ oder $\frac{1}{4}$ h mit der Ablesung beginnen können.

In Tabelle 46 ist das Protokoll eines Versuches nebst der Aufrechnung gegeben.

Wenn man eine verlangte Belastung hergestellt hat, so erfolgt die Messung der Gasaufnahme G durch Ablesung der Gasuhr in Abständen von 3 bis 5 min (bei Tab. 46: 4 min), die Ablesung der elektrischen Leistung erfolgt in gleichlanger Periode; man versetzt zweckmäßig

Tabelle 46. Verbrauchsversuch an einer
Versuch 6 am 15. Dezember 1911.

Ablesung	+ 1½ min			+ ½ min		
	Drehzähler					
	Gasmaschine			Dynamo		
	Stand	Diff.	/4 min	Stand	Diff.	/4 min
	—	—	—	—	—	—
9·26	0586	741	—	17 360	4460	—
9·30	9845	747	—	12 900	4455	—
9·34	9098	746	—	08 445	4365	—
9·38	8352			04 080 03 980	4465	
12 min	2234 : 12 = 186,2/min			13 380 : 12 = 1115,0/min		

beide Ablesungen gegeneinander um die halbe Periode, da die Leistung (Momentanablesung) dem Mittelwert des Gasverbrauches der betreffenden Periode entsprechen soll. Die Nachregelung der Belastung erfolgt dann um das Ende einer Periode. Die Drehzahl der Gas- und der Dynamomaschine braucht nicht abgelesen zu werden, da sie zur Messung der elektrischen Leistung nicht benutzt wird. Der Ordnung halber ist die Drehzahl auch in solchen Fällen stets abzulesen, als die für die gleichmäßige Wirksamkeit der Maschine markanteste Größe.

Die Ablesungen sind, um von einem Beobachter gemacht werden zu können, planmäßig gegeneinander versetzt, so wie die erste Zeile Tab. 46 angibt: Die Gasuhr wurde 9 h 26 min 0 s, der Stand des Drehzählers der Dynamo 9 h 26 min 30 s abgelesen und so fort. Bei allen späteren Ablesungen wurden immer alsbald die Differenzen gebildet, zur Kontrolle der Gleichmäßigkeit des Ganges und der Genauigkeit der Ablesung. Die Differenzen in den Drehzahlen und im Stand der Gasuhr stimmen so gut, daß man die Versuchsdauer von nur 12 min für befriedigend erachten darf. Die Spalten mit der Überschrift: /4 min sind unbenutzt; sie dienen in dem Fall, wenn man eine Ablesung an integrierendem Instrument, wo es auf die Sekunde ankommt, versäumt haben sollte und nun eine bestimmte Anzahl Sekunden später abliest (vgl. Tab. 5 bei § 27, Spalte 10), so daß die beiden jederseits der Ablesung liegenden Perioden länger bzw. kürzer ausfallen, zur Eintragung der Umrechnung; denn die Nachprüfung der Gleichmäßigkeit der Differenzen ist die Grundlage jeder genauen Versuchsausführung. In der Spalte: „Stand des Dynamo-Drehzählers“ wurde die letzte Zahl unbedenklich geändert: die Differenz war fast genau um 100 zu klein (4365 statt 4465); ändert man sie, so geht die Hunderterzahl im Stand gerade von 0 auf 9, die Tausender von 3 auf 4, und dieser Übergang

Gasdynamo mit Riemenübertragung.

Bar. St. 764 mm QS.

+ 2 min			+ 0 min					+ 1 min	
Elektr. Leistung			Gasuhr					Kühlwasser- temperatur	
Strom	Spannung	Leistung	Stand	Diff.	/4 min	Temp.	Druck	Zulauf	Ablauf
A	V	kW	m ³	m ³	m ³	° C	mmWS	° C	° C
67,8	219	14,85	4,160	0,890	—	16	59	7,8	42,0
67,8	221	15,0	5,050	0,890	—			7,8	42,0
67,6	219	14,8	5,940	0,900	—			8,1	42,0
			6,840					8,0	42,2
14,9 kW			$\frac{2,680 \times 60/12}{13,40} = 13,40 \text{ m}^3/\text{h}$			$= 4,4 \text{ mm QS}$			
			<i>reduziert</i>						
			$13,40 \cdot \frac{273}{289} \cdot \frac{764 + 4,4}{760} = 12,79 \text{ m}^3/\text{h}$						
			$\text{Verbrauch } 12,79 : 14,9 = 0,858 \frac{\text{m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right)}{\text{kW} \cdot \text{h}}$						

fand in Wahrheit nur 20 Umdrehungen vor der Ablesung statt; erfahrungsgemäß versieht man sich in solchem Fall sehr leicht um eine Stelle höherer Ordnung, indem man nicht sicher ist, ob sie schon gesprungen ist oder ob nicht; es kann in so klar liegenden Fällen unbedenklich angenommen werden, daß der Stand des Zählwerkes 03980 war und nicht 04080, wie abgelesen.

Die Gasaufnahme ist auf Normalzustand zu reduzieren. Dazu war (Techn. Mess. § 68) die Temperatur des Gases bei der Messung, also hinter der Gasuhr, festzustellen, sie war 16° C; ferner der Überdruck vor der Gasuhr mit 4,4 mm QS, der zum Barometerstand von 764 mm QS gezählt den absoluten Druck des Gases zu 768 mm gibt. Die Reduktion selbst (Techn. Mess. § 44) ist im Fuß der Tabelle gegeben, ebenso die Berechnung des Verbrauches, $0,858 \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right) / \text{kW} \cdot \text{h}$.

Die Aufzeichnungen während des Versuches sind in Tab. 46 in Antiqua, die spätere Auswertung ist kursiv gegeben, vgl. Tab. 5, 17 und 26.

Der wirtschaftliche Wirkungsgrad η_w ist durch den Quotienten aus der elektrischen Leistung 14,9 kW und der in die Maschine eingeführten Leistung $\xi_u \cdot G_0 = 4850 \cdot 12,79 = 62\,000 \text{ kcal/h}$ gegeben; 4850 kcal ist der untere Heizwert ξ_u eines Kubikmeters Gas. Behufs Division sind beide Werte auf gleiche Einheit zu bringen: $14,9 \text{ kW} \cdot 859 = 12\,800 \text{ kcal/h}$. Nun ist $\eta_w = 12\,800 : 62\,000 = 0,206$ oder 20,6%.

Im Zylinder der Gasmaschine findet in merklichem Maße eine *Verbrennung des zur Kolbensmierung eingeführten Schmieröles* statt. Diese an sich normale Erscheinung kann künstlich gesteigert werden durch Steigerung der zugeführten Ölmenge; das ist daher ein bei Abnahmeversuchen zur Erzielung guter Wirkungsgrade gern angewendetes Mittel, das aber sehr unwirtschaftlich ist, da der Preis der Wärmeinheit in Gestalt von Schmieröl ein sehr hoher ist. Außerdem können die sich aus dem Schmieröl bildenden Krusten mit der Zeit zu Betriebschwierigkeiten — Vorzündungen durch glühende Krusten — führen. Die Einführung besonders großer Schmierölmengen ist also auch bei Abnahmeversuchen zu vermeiden; die Menge verbrauchten Schmieröles im ganzen und im besonderen des für die Zylinder verbrauchten festzustellen sollte bei wichtigen Versuchen nicht versäumt werden, und am besten sollte die Angabe eines bestimmten Schmierölverbrauches im beiderseitigen Interesse in die Gewährleistung aufgenommen werden.

Die Wirkung reichlicher Schmierung ist eine doppelte. Neben der Verbrennung im Zylinder wirkt im Zylinder wie im Getriebe reichliche Schmierung nach Maßgabe des Beispiels in § 12 auf Verringerung der Getriebeverluste. Letztere Erscheinung führt zur Verbesserung des mechanischen Wirkungsgrades, die Ölverbrennung wirkt auf eine (nur scheinbare) Verbesserung des thermischen Wirkungsgrades.

90. Gasdynamo bei veränderlicher Belastung. Wenn man den aus Gasmaschine und Dynamo bestehenden Maschinensatz veränderlich belastet, so kann man bei jeder Belastung durch einen Versuch wie den eben beschriebenen den Verbrauch feststellen und erhält durch Zusammenstellung der Ergebnisse eine Tabelle 47 und Fig. 132.

Die Herstellung der gewünschten Belastung geschieht jeweils durch Parallelschalten von mehr oder weniger Widerständen, z. B. Lampen. Da mit steigender Belastung die Drehzahl der Gasmaschine etwas nachläßt, so sinkt die elektromotorische Kraft der Dynamo — um so mehr, da auch der Riemen beim Steigern der Belastung in steigendem Maße schlüpft; und noch etwas mehr sinkt die Klemmenspannung E_p , die wir messen, weil der Spannungsverlust im Anker mit der Stromstärke wächst. Aus allen diesen Gründen muß die Stärke i des Erregerstroms gesteigert werden, soll die Klemmenspannung stets auf 220 V gehalten werden — ganz wie bei andersartigen Kraftmaschinen.

Als Grenzwert ist der *Leerlauf des Maschinensatzes*, $N_{el} = 0$, in die Reihe aufgenommen. Sollen die Leerlaufwerte einer Versuchsreihe den übrigen Werten richtig zugeordnet sein und die Versuchspunkte in Reihe mit den übrigen fallen, so muß der Leerlauf in einer Weise erreicht werden, die den sonst beim Einstellen der Versuche vorgenommenen Veränderungen durchaus entspricht. Im besonderen Fall heißt das, die Dynamomaschine müsse auch im Leerlauf auf volle Spannung gebracht, also erregt sein. Die übrigen Versuche der Reihe Tabelle 47 sind bei verschiedener entnommener Stromstärke, aber unveränderter Spannung von rund 220 V gemacht; also muß auch der Leerlaufspunkt durch die Werte $J = 0$, $E = 220$, $N_{el} = 0$ gekennzeichnet sein, nicht aber etwa durch die Werte $J = 0$, $E = 0$, durch die allerdings auch

Tabelle 47. Gasdynamo bei veränderlicher Belastung.

Versuch Nr.		6	7	8	9	10
1	Elektrische Spannung E V	220	221	218	220	221
2	„ Stromstärke J A	67,7	51,2	36,6	19,4	0
3	„ Leistung $N_{el} = \frac{1}{1000} E \cdot J$. . kW	14,90	11,32	7,97	4,26	0
4	„ Erregung i A	0,75	0,68	0,64	0,60	0,57
5	Drehzahl der Gasmaschine n /min	186,2	189,8	190,3	191,1	192,6
6	„ „ Dynamo n_D „	1115	1138	1144	1147	1158
7	Verhältnis $n_D : n$ —	5,988	5,996	6,010	6,004	6,012
8	Gasaufnahme reduziert G_0 $m^3 \left(\frac{0}{760}\right)/h$	12,79	11,07	9,52	7,85	5,89
9	Gasverbrauch $G_0 : N_{el}$ $m^3 \left(\frac{0}{760}\right)/kW \cdot h$	0,858	0,977	1,194	1,832	∞
10	Wirtschaftl. Wirkungsgrad $\eta_w = \frac{859 \cdot N_{el}}{4850 \cdot G_0}$ —	0,206	0,181	0,148	0,097	0

$N_{el} = 0$ gegeben wäre; beim Fortfallen der Erregung würden sich die Eigenverluste der Dynamomaschine so erheblich ändern, daß ein solcher Leerlaufpunkt „höherer Ordnung“ aus der Reihe fiel.

Die Gasaufnahme G_0 hat schon bei Leerlauf einen beträchtlichen Wert, etwa 46% deren bei Höchstlast; sie steigt etwa linear mit der Belastung der Maschine. Der Gasverbrauch wird bei steigender Belastung immer günstiger. Die Kurve hat hyperbelähnlichen Verlauf und nähert sich asymptotisch der senkrechten Achse: bei Leerlauf kann die Maschine beliebig lange laufen und beliebig viel Gas verbrauchen, ohne doch nur eine Pferdestärke zu leisten. Die Drehzahl der Maschine ging mit wachsender Belastung wenig, aber dauernd herab; diese Erscheinung ist bei allen Maschinen zu finden, die der Einwirkung ihres Reglers überlassen bleiben, so

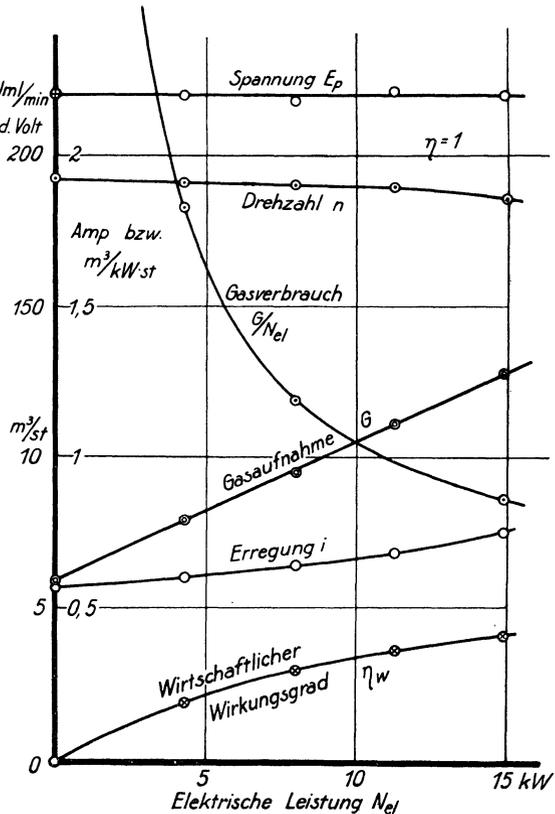


Fig. 132. Gasdynamo bei verschiedener Belastung.

daß dieser ihnen jeweils die der eignen entsprechende Drehzahl aufzwingt. Vgl. hierüber Kap. V. Die Drehzahl läßt in diesem Falle um $6,4/\text{min} = 3,3\%$ der Leerlaufdrehzahl nach, wenn die Maschine von Leerlauf bis Vollast belastet wird.

Mit abnehmender Belastung der Dynamo steigt das Übersetzungsverhältnis des Riementriebes von 5,988 auf 6,012, um $0,4\%$, infolge wechselnden *Riemenschlupfes*.

91. Laboratoriumsschaltung für Gasdynamountersuchungen. Um die Dynamomaschine mit beliebiger Stromstärke belasten zu können, läßt man sie auf einen Belastungswiderstand arbeiten. Als solche kommen Wasser- oder Drahtwiderstände in Frage (Techn. Mess. § 80). Indem man durch Schalter einen Widerstand zu dem schon vorhandenen parallel schaltet, verringert man den äußeren Widerstand W , vergrößert also den äußeren Leitwert $G = \frac{1}{W}$ des Stromkreises und erhöht dadurch,

bei konstant gehaltener Spannung, die Stromstärke $J = E \cdot G$. Die Einheit des Leitwertes ist nach den Vorschriften des AEF das Siemens, das dann vorhanden ist, wenn ein Leiter 1 A aufnimmt für 1 V an seine Enden gebrachte Spannung; ein solcher Leiter hat 1 Ω Widerstand und 1 S Leitwert. Widerstand oder Leitwert sind diejenigen Größen, die im praktischen Betriebe — durch Parallelschalten von Lampen, Motoren usw. — einen bestimmten, durch äußere Bedingungen vorgeschriebenen Wert haben. Der Leitwert ist aber ein besseres Maß für die Belastung, weil ihm die Leistung $N = E \cdot J = E^2 \cdot G$ direkt proportional ist, und weil daher mit dem Übergang zum Leerlauf nicht der Wert $W = \infty$, sondern der bequemere Wert $G = 0$ in die Rechnung und in Schaubilder kommt. Fig. 322 bei § 164 zeigt das.

Für Laboratoriumszwecke besteht der Widerstand zweckmäßig aus einer Reihe von parallel geschalteten Widerständen gleicher Größe, dazu einem feinstufig regulierenden Schiebewiderstand, der das Einstellen von Zwischenstufen ermöglicht.

Statt die elektrische Energie in einem Widerstand nutzlos zu vernichten, kann man sie in ein Netz speisen, dessen Spannung durch andere, auf das gleiche Netz arbeitende Maschinen oder durch eine Sammlerbatterie konstant gehalten wird. Zur Einstellung der Leistung dient in diesem Falle der Feldregler der Dynamo, man verändert durch ihn die überschüssige elektromotorische Kraft der Dynamo über die Netzspannung E hinaus. Da die Stromstärke von der Differenz $E_0 - E$ der EMK gegen die Netzspannung abhängt, so ändert sie sich stark mit kleinen Änderungen von E_0 oder E . Nur ein sehr feinstufiger Feldregler ergibt also gute Einstellung einer gewollten Belastung, und kleine Schwankungen der Netzspannung sind für Versuche sehr störend. Das Arbeiten auf einen Widerstand ist also bequemer und genauer, aber wegen der Energievergeudung teurer.

Bei Verbrennungskraftmaschinen insbesondere benutzt man einen Anschluß ans Netz zum Anlassen der Maschine. Um dem dreifachen

Bedürfnis: Anlassen, Arbeiten auf das Netz oder auf den Widerstand, gerecht zu werden, schaltet man nach Fig. 133.

Der eine Pol (z. B. der positive) der Maschine kann durch Umlegen des Umschalters I mit dem Netz oder mit dem Widerstand verbunden werden. Der andere ist ebenfalls mit beiden zu verbinden durch Schließen des Minimalschalters bzw. des Schalters II. Um beim Anlassen der Maschine die Stromstärke zu begrenzen, ist der Anlasser in die eine Zuleitung gelegt; dieselbe wird durch den Anlasser unterbrochen, wenn er links steht, steht er rechts, so ist der Anlasser kurz geschlossen und gestattet dauernden Durchgang der vollen Stromstärke. Die Erregung der Dynamomaschine wird durch Bedienen des Feldreglers verändert, der in eine Zuleitung derselben gesetzt ist; in der anderen

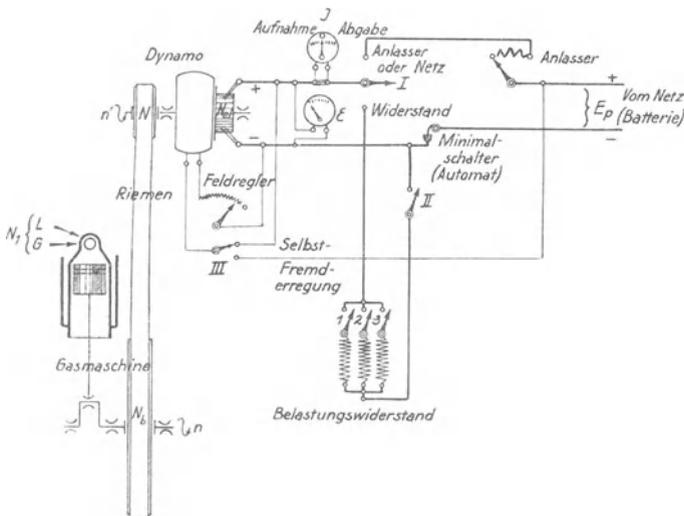


Fig. 133. Schaltungsschema für elektrische Belastung einer Gasdynamo mit Selbst- oder Fremderregung, und zum Anlassen.

Zuleitung ist der Umschalter III, der entweder zur Dynamo oder zum Netz führt und daher Selbst- oder Fremderregung für sie ergibt, die allerdings beide identisch werden, sobald der Umschalter I nach oben gelegt und der Anlasser kurz geschlossen ist. Zum Messen der Energie ist das Voltmeter E so angeschlossen, daß es die Klemmenspannung der Dynamomaschine angibt, und das Amperemeter J so, daß es die Nutzstromstärke der Maschine mißt, die um die Feldstromstärke i kleiner ist als der Ankerstrom J_a . Ein zweites Amperemeter i für den Feldstrom kann dadurch umgangen werden, daß man für jede Kontaktstellung des Feldreglers die Stromaufnahme und daher den Widerstand des ganzen Feldes einschließlich Regler vorgängig bestimmt; doch wechselt der Widerstand etwas mit der Temperatur.

Die Bedienung ist folgende: Zum Anlassen der Gasmaschine durch die als Motor arbeitende Dynamo wird Umschalter I nach oben gelegt, der Minimalschalter eingeschaltet und am besten in dieser Stellung

irgendwie befestigt. Die Erregung muß beim Anlassen voll eingeschaltet sein, dazu wird Schalter III auf Fremderregung gestellt und der Feldregler kurz geschlossen (meist Linksdrehung bis zum Anschlag). Wenn man nun den Anlaßwiderstand, wie bei jedem Elektromotor üblich, allmählich ausschaltet, immer das Amperemeter beobachtend, so beginnt der Maschinensatz zu laufen. Man gibt Gas und wartet die Zündung ab. — Indem nun unter dem Einfluß des Gasmotors der Maschinensatz auf Drehzahl kommt, sinkt, wenn man den Anlasser nicht weiter betätigt, die Stromaufnahme des Motors, die von dem Unterschied der Spannungen der Dynamo und des Netzes abhängt. Kurz bevor beide Spannungen einander gleich sind und die Stromaufnahme in Stromabgabe übergehen will, fällt der Minimalschalter heraus, dessen Feststellung man rechtzeitig gelöst hatte. Der Maschinensatz läuft nun im Leerlauf, man muß alsbald durch Bedienen des Feldreglers verhüten, daß die Spannung zu hoch steigt, oder man schaltet den Feldregler ganz aus, um dann den Schalter III auf Selbsterregung zu stellen.

Will man nun an das Netz Strom abgeben, so bleibt Umschalter I oben, der Anlasser wird kurzgeschlossen (rechts). Mittels des Feldreglers läßt man die Dynamo sich selbst erregen, bis man in bekannter Weise etwas Überspannung über die Netzspannung hat, und dann wird der Minimalschalter eingelegt, aber nicht festgestellt. Mittels des Feldreglers kann nun jede Stromabgabe eingestellt werden.

Will man dagegen auf den Belastungswiderstand arbeiten, so schaltet man am besten zunächst den Anlasser aus, legt Umschalter I nach unten und Schalter II ein. Man erregt nun mit dem Feldregler und kann durch Einschalten von Widerständen die Belastung herstellen.

Die Verwendung des Belastungswiderstandes hat vor dem Arbeiten in ein Netz noch den Vorzug, daß man mit beliebiger Spannung arbeiten kann; das ist z. B. bei anormaler Drehzahl der Dynamo nötig, wenn der Feldregler nicht reicht (nicht genau passende Riemenscheiben bei Prüffeldversuchen, Versuche mit stark wechselnder Umlaufzahl). Wichtig ist aber für ebendiesen Fall die Möglichkeit, vom Netz her mittels Umschalter III fremd zu erregen, da die Erregung jedenfalls den normalen Wert haben muß. Auch ist beim Arbeiten auf den Widerstand die Spannungsregelung durch Fremderregung feinfühlicher.

Man kann auf das Netz arbeitend nur bis zu der augenblicklichen Netzbelastung kommen, bis also die anderen auf das Netz geschalteten Stromquellen leerlaufen. Um größere Belastungen nicht ganz in den Belastungswiderstand gehen lassen zu müssen, ist es erwünscht, das Netz und den Belastungswiderstand parallel schalten zu können. Dazu kann man einen Umgehungsschalter (für volle Stromstärke) um Umschalter I herum anordnen, oder man muß Umschalter I durch zwei Einzelschalter für Anlassen und Widerstand ersetzen.

Für Dampfmaschinen sowie für Verbrennungskraftmaschinen mit Druckluftanlassung kann man den Anlasser fortlassen; die Fremderregung ist dann weniger wichtig. Alles übrige bleibt unverändert.

Es ist an sich gleichgültig, ob eine Maschine gegen einen Widerstand oder ob sie gegen ein Netz läuft, in dem eine Batterie oder in dem

parallel geschaltete Maschinen genügender Größe die Spannung zwangsweise konstant halten; es ist ebenso gleichgültig, ob die Dynamo durch Selbsterregung oder durch Fremderregung betrieben wird (die übrigens beim Arbeiten gegen die Netzspannung identisch sind). Die verschiedenen Belastungsarten bringen keine Verschiedenheiten für den Betrieb im Beharrungszustand. Für Regelvorgänge bei Belastungsschwankungen oder -änderungen hingegen ist die Art der Belastung nicht gleichgültig (§ 154), und die Möglichkeit, jede zu wählen, ergibt dann eine gewisse experimentelle Vielseitigkeit.

92. Bremsung einer Gasmaschine. Statt durch eine Dynamo kann die Gasmaschine mit einer Bremse, etwa durch einen Pronyschen Zaum, belastet werden.

Nachdem der Bremsarm mit den Gewichten der gewünschten Maschinenbelastung entsprechend beschwert ist, wird die Maschinenbelastung hergestellt, indem die Bremsbacken so lange angezogen

Tabelle 48. Bremsung einer Gasmaschine.
Hebelarm der Bremse 1,00 m, Tara der Bremse + 9,6 kg.

Versuch Nr.		1	2	3	4	5
1	Gewicht an der Bremse P kg	75	55	35	15	—
2	Drehmoment für die Gasmaschine $M = (P + 9,6) \cdot 1,00$ mkg	84,6	64,6	44,6	24,6	0
3	Drehzahl n /min	188,3	190,2	190,5	191,4	193,5
4	Nutzleistung d. Gasmaschine $N_b = \frac{M \cdot n}{973}$ kW	16,38	12,63	8,74	4,84	0
5	Gasaufnahme reduziert G_0 m ³ /h	12,51	11,12	9,61	7,88	5,70
6	Gasverbrauch G_0/N_b m ³ /kW · h	0,764	0,880	1,100	1,628	∞
7	Wirtschaftl. Wirkungsgrad $\eta_m = \frac{859 \cdot N_b}{4850 \cdot G_0}$ —	0,232	0,201	0,161	0,109	0

werden, bis die Bremse ins Gleichgewicht kommt; die Bremse wird dann dauernd beobachtet und so nachgeregelt, daß sie sich zwischen ihren Hubbegrenzungen frei bewegt. Über Konstruktion, Schmierung und Kühlung der Bremse ist in Techn. Mess. § 76 das Nötige gesagt; wird die Bremse auf das Schwungrad aufgesetzt, so ist wegen der auftretenden ungleichmäßigen Erwärmung des Rades Vorsicht am Platze (Explosionsgefahr!), außer bei kurzen Versuchen.

Eine Versuchsreihe mit fallender Belastung gibt Tabelle 48. Vor dem Versuchsbeginn war die Tara der Bremse zu + 9,6 kg bestimmt worden. Wenn also bei Versuch 1 75 kg an der Bremse hingen, so ist die von der Bremse zu tragende Last $75 + 9,6 = 84,6$ kg, und bei gerade 1 m Arm der Bremse entspricht das zugleich einem bremsenden Moment $M = 84,6$ mkg.

Beim Leerlaufversuch, $M = 0$, wird die Bremse ganz abgenommen, mindestens so abgestützt, daß auch ihr Eigengewicht der Maschine nicht zur Last fällt.

Protokollführung und Auswertung sind wie bei der Belastung mit Dynamo. Fig. 134 stellt die Ergebnisse dar.

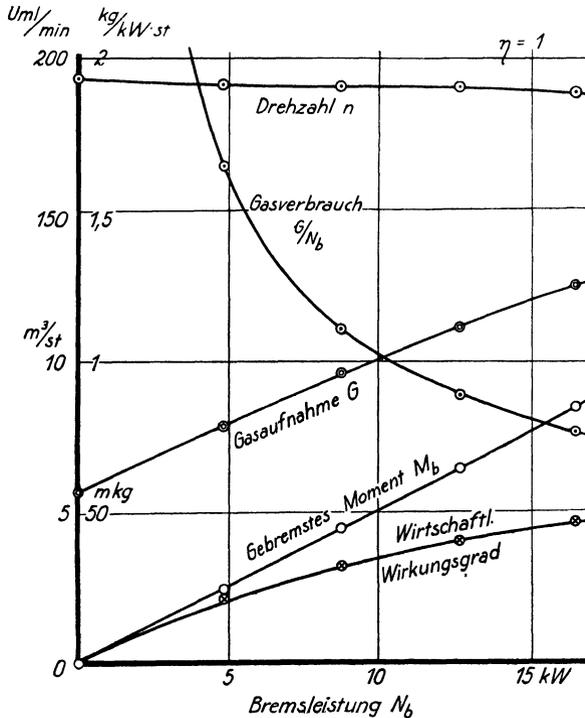


Fig. 134. Gasmaschine mit wechselnder Belastung abgebrämst.

93. Indizierte Leistung, thermischer Wirkungsgrad. Mittels des Indikators wird (Techn. Mess. § 84) diejenige Leistung ermittelt, die das arbeitende Mittel — die Verbrennungsgase — auf den Kolben der Kraftmaschine überträgt. Als indizierte Leistung N_i einer Verbrennungskraftmaschine gilt die indizierte Leistung der Arbeitshübe, vermindert um die indizierte Leistung der Hilfhübe, die zum Einsaugen des brennbaren Gemisches und zum Ausstoßen der Verbrennungsgase dienen. Letzterer Leistungsaufwand wird bei der Viertaktmaschine am selben Zylinder gemessen, dazu werden Schwachfederdiagramme aufgenommen. Bei Zweitaktmaschinen werden die Pumpenzylinder besonders indiziert, und ihre Leistung wird von der der Arbeitszylinder abgezogen. Wenn bei Verpuffungsmaschinen die Arbeitsdiagramme streuen, so werden Bündel von fünf Diagrammen aufgenommen.

An der Versuchsdurchführung kommt gegen die früheren Versuche nur die Indizierung hinzu. Sie findet nach Art der Momentanablesungen zweckmäßig in der Mitte der Periode statt, für die sie einen Mittelwert der Leistung geben soll, also mitten zwischen den Ablesungen des Drehzählers und Gasuhrstandes, aber gleichzeitig mit der Ablesung

des Tachometers, der elektrischen Leistung, der Thermometer und Manometer. Es empfiehlt sich, auf jedes Diagramm sofort die Zeit der Aufnahme zu schreiben, sowie im Zweifelsfall, von welchem Zylinder es stammt. Alle weiteren Notizen finden sich dann im Protokoll, das ja auch nach der Zeit geordnet ist. Fortlaufende Numerierung der Diagramme führt leicht zu Irrtümern, z. B. beim Wechsel des Beobachters, während die Zeit stets feststeht, wenn man einmal die Uhren verglichen hat. Auch hält Verfasser das Arbeiten nach der gewöhnlichen Uhr für zweckmäßiger als nach der Stechuhr, die beim Versuchs-

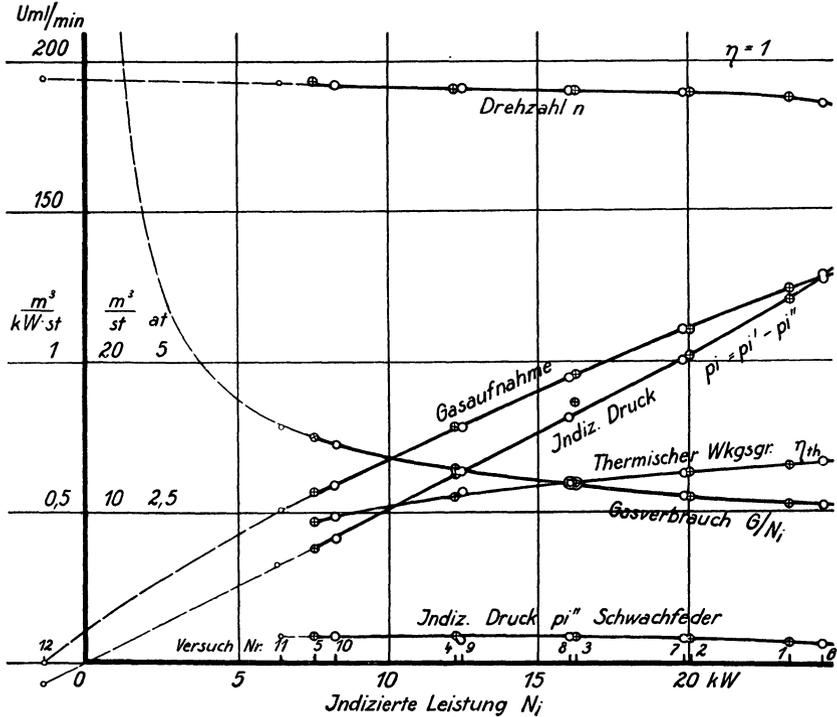


Fig. 135. Wirtschaftlichkeit der Gasmaschine bei wechselnder indizierter Leistung.

beginn gestochen wird; bei verschiedenen Versuchen kommen sonst immer wieder dieselben Zeiten vor, und das führt zu Verwechslungen. Damit nicht ein Versuch verloren ist, wenn man versehentlich im Verlauf den Stecher drückt und die Uhr anhält, sollte jedenfalls die Uhrzeit zur Kontrolle nebenbei festgestellt werden.

Beim Indizieren einer Verbrennungskraftmaschine entstehen zwei Flächen, die — nach Art einer 8 — in entgegengesetztem Sinne umfahren sind. Die obere, regelmäßig größere, bedeutet die von den verbrannten Gasen gelieferte Arbeit; die untere entsteht entsprechend dem Widerstand, den einerseits das verbrannte Gas beim Verlassen des Zylinders, andererseits das frische Gasgemisch beim Einsaugen er-

fährt. Wir bezeichnen die beiden Flächen als die *Arbeitsfläche* und als die *Förderfläche*; beide sind voneinander in Abzug zu bringen. Meist findet man die Förderfläche aus einem besonderen *Schwachfederdiagramm*, das man mit solcher Feder aufnimmt, daß das Schreibgetriebe vor Beendigung der Kompression die Hubbegrenzung erreicht; die Hubbegrenzung ist nötigenfalls durch über die Kolbenstange geschobene Ringe passend herzustellen. Da bei guter Regelung die Förderfläche nicht streut, so brauchen die Schwachfederdiagramme nur einmal umfahren zu werden; auch kann man die Zahl der Schwachfederdiagramme meist ruhig beschränken.

Tabelle 46a. Gasdynamo unter veränderlicher Belastung.

Versuch 6 am 15. Dezember 1911; BStd 764 mm QS.

Zylindermaße:	Hub	470 mm
	Durchmesser	260 mm
	Kolbenfläche	530,9 cm ² . Viertakt,
Federmaßstäbe:	Arbeitsdiagramm	2,5 mm = 2 at
	Schwachfederdiagramm	12 mm = 1 at.

$$N_i = C \cdot p_i \cdot n \text{ kW}; \quad C = \frac{0,470 \cdot 530,9}{2 \cdot 60 \cdot 102} = 0,0204.$$

Ablesung	Erste Spalten wie Tab. 46	+ 2½ min			
		Indikatordiagramme			
		Arbeitsdiagramme		Schwachfederdiagramme	
		Fläche	Länge	Fläche	Länge
	mm ²	mm	mm ²	mm	
9·26	—				
9·30	—	2120 : 3 = 707	87,0	340	88,0
9·31	—	2114 : 3 = 704	87,0	318	88,0
9·38	—	2087 : 3 = 695	87,0	300	88,4
		702 : 87,0		319 : 88,1	
		= 8,07 mm : 1,25		= 3,62 mm : 12	
		= 6,46 at		= 0,30 at	
		p _i = 6,16 at;			
		N _i = 0,0204 · 186,2 · 6,16 = 23,4 kW			

Tabelle 46a ist eine Ergänzung zu Tabelle 46; für den Fall, daß auch indiziert wurde, gibt sie die Auswertung der Diagramme. Die Diagramme selbst gibt in Auswahl Fig. 136 in der obersten Reihe. Die Arbeitsdiagramme sind in Bündeln zu 3 bis 5 aufgenommen; das Umfahren aller drei in einem Zuge gab für das erste Diagramm 2120 mm², daraus folgt als Diagrammfläche 2120 : 3 = 707 mm². Die Feder von 2,5 mm/at Federmaßstab wurde mit dem Kolben halber normaler

Tabelle 49. Indizierte Leistung und thermischer Wirkungsgrad der Gasdynamo.

Hauptabmessungen: wie in Tab. 46a.

Versuch Nr.		6 ¹⁾	7	8	9	10	11	12
1	Drehzahl der Gasmaschine n . /min	186,2	189,8	190,3	191,1	192,6	193,4	195,3
2	Leistung der Dynamo N_{el} . . . kW	14,90	11,32	7,97	4,23	0	-1,83	-12,2
3	Gasaufnahme G_0 reduziert . . m ³ /h	12,79	11,07	9,52	7,85	5,89	5,02	0
4	Indizierter Druck:							
	Arbeitsdiagramm at	6,46	(5,50)	4,50	3,56	2,49	2,03	-0,06
5	Schwachfederdiagramm „	0,30	0,39	0,40	0,36	0,42	0,41	0,31
6	wirksamer p_i „	6,16	(5,11)	4,10	3,20	2,07	1,62	-0,37
7	Indizierte Leistung N_i kW	23,4	19,8	16,0	12,4	8,2	6,4	-1,5
8	Gasverbrauch $G_0 : N_i$. . . m ³ /kW · h	0,546	0,559	0,595	0,633	0,718	0,785	—
9	Therm. Wirkungsgrad $\eta_{th} = \frac{859 \cdot N_i}{4850 \cdot G_0}$ —	0,324	0,317	0,297	0,280	0,247	0,226	—
10	Getriebeverlust $N_i - N_{el}$ kW	8,5	8,5	8,0	8,1	8,2	8,2	10,7
11	Mechanisch-elektrischer Wirkungsgrad $\eta_m \cdot \eta_{el} = N_{el} / N_i$ —	0,64	0,57	0,50	0,345	0	-0,285	+ 8,1

Fläche verwendet, das macht einen wirksamen Federmaßstab 2,5 mm = 2 at; 1,25 mm = 1 at.

Die Rechnung ist auf kW gestellt, daher in der Zylinderkonstanten C der Umrechnungsfaktor 102 mkg/s = 1 kW.

In Tabelle 49 und 50 werden die entsprechenden weiteren Zahlen für die Versuche Nr. 1 bis 10 gegeben, die schon aus Tabelle 47 und 48 bekannt sind: bei wechselnder Leistung einmal die Gasdynamo elektrisch belastet, einmal die Gasmaschine mechanisch gebremst. Die Ergeb-

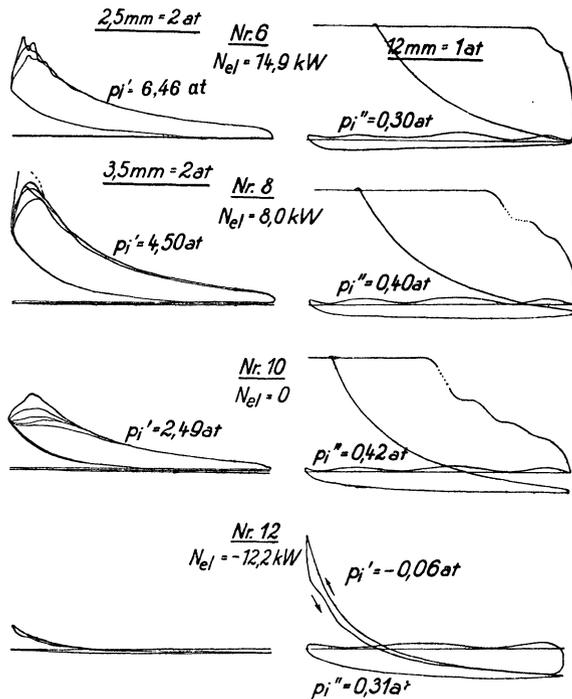


Fig. 136. Diagramme einer Gasmaschine bei wechselnder (auch negativer) indizierter Leistung. $\frac{2}{5}$ nat. Gr.

1) Für Versuch 6 war durch einen Rechenfehler $p_i = 6,42$ at, $N_i = 24,4$ kW errechnet worden; in den Figuren ist der Fehler stehengeblieben. Man hätte durch den hohen Wert $N_i - N_{el}$ (Fig. 137 b) gleich aufmerksam werden können.

Tabelle 50. Indizierte Leistung, thermischer und mechanischer Wirkungsgrad einer Gasmaschine (durch Bremsen).

Hauptabmessungen: wie in Tabelle 46a.

Versuch Nr.		1	2	3	4	
1	Drehzahl n /min	188,3	190,2	190,5	191,4	193,5
2	Bremsleistung N_b kW	16,38	12,63	8,74	4,84	0
3	Gasaufnahme G_0 reduziert . . m ³ /h	12,51	11,12	9,61	7,88	5,70
4	Indizierter Druck: Arbeitsdiagramm at	6,42	5,54	4,77	3,75	2,33
5	Schwachfederdiagramm „	0,35	0,39	0,41	0,43	0,42
6	wirksamer p_i „	6,07	5,15	4,36	3,32	1,91
7	Indizierte Leistung N_i kW	23,3	20,0	16,2	13,0	7,5
8	Gasverbrauch $G_0 : N_i$. . m ³ /kW · h	0,537	0,555	0,593	0,606	0,760
9	Therm. Wirkungsgrad $\eta_{th} = \frac{859 \cdot N_i}{4850 \cdot G_0}$ —	0,330	0,319	0,299	0,292	0,233
10	Getriebeverlust $N_i - N_b$ kW	6,9	7,4	7,5	8,2	7,5
11	Mechanischer Wirkungsgrad $\eta_m = N_b/N_i$ —	0,705	0,63	0,54	0,37	0

nisse beider Reihen — die ja in bezug auf N_i identisch sind — sind in Fig. 135 zur Darstellung gebracht, beide Reihen fallen gut zusammen. Die Indikator diagramme der Reihe mit elektrischer Belastung gibt Fig. 136.

In Fig. 135 wächst der indizierte Druck p_i etwa proportional der Leistung N_i — natürlich, denn die Drehzahl ist fast konstant. Die Gasaufnahme ist in dieser Darstellung auch annähernd proportional der Leistung, daher der Gasverbrauch auch bei halber Leistung nicht viel — nur 23% — ungünstiger als bei Vollast, im Gegensatz zu den

Tabelle 51. Wirtschaftlichkeit der Gasmaschine bei voller und bei halber Last.

Bezogen auf		N_i	N_b	N_{ei}
1	Volle Last kW	$N_i = 25,5$	$N_b = 19,2$	$N_{ei} = 15,6$
2	Halbe Last „	$= 12,25$	$= 9,6$	$= 7,8$
3	Gasverbrauch: bei voller Last . . kg/kW · h	$G/N_i = 0,52$	$G/N_b = 0,69$	$G/N_{ei} = 0,85$
4	bei halber Last . . „	$= 0,64$	$= 1,04$	$= 1,21$
5	Verhältnis —	1,23	etwa 1,45	

Ergebnissen aus Fig. 134 oder Fig. 132; vergleiche hierüber die Darlegungen in § 5. In unserem Falle gilt Tabelle 51, aus der der ungünstige Einfluß der konstanten Leerlaufwiderstände auf den Verlauf — außer auf den Absolutwert — der Verbrauchskurve deutlich hervorgeht. Zur Ermittlung der „vollen Lasten“ sind übrigens die noch zu besprechenden Ergebnisse der Fig. 140 (Abfallen des Reglers) und Fig. 138 (Eigenverluste) bereits herangezogen.

Der Leerlauf ist bei elektrischer Belastung nicht unbedingt Grenzwert: man kann, wenn man den Maschinensatz auf ein Netz konstanter,

von anderer Stromquelle (z. B. Sammlerbatterie) aufrechterhaltener Spannung laufen läßt, durch Schwächung der Erregung Stromaufnahme und daher Punkte $N_{el} < 0$ erzielen; solange die Stromaufnahme nicht die Eigenverluste des ganzen Maschinensatzes deckt, wird die Gasaufnahme zwar unter den Leerlaufwert sinken, aber doch bestehen bleiben, und auch nutzbar werden, solange die Zündung nicht aussetzt. Auf diese Weise sind die Zahlen eines mit Nr. 11 bezeichneten Versuches entstanden; bei diesen *Versuchen mit negativer Nutzleistung* ist, ähnlich wie es schon für Leerlauf verlangt wurde, um ein Einfallen der Punkte in Fig. 135 zu erreichen, auf Innehaltung der auch sonst konstanten Klemmenspannung zu achten, durch entsprechende Einstellung der Erregung. Dann werden auch die anderen Werte, die Gasaufnahme und später (Tabelle 52, Fig. 140) die volumetrischen Verhält-

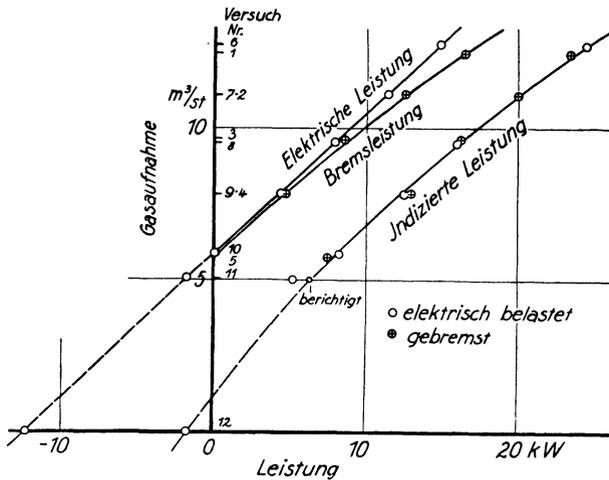


Fig. 137a. Mechanische Verluste der Gasmaschine und der Gasdynamo.

nisse in Reihe mit den bisherigen Werten fallen. — Bei Versuch 12 endlich war der Gashahn kurzerhand geschlossen worden, $G_0 = 0$. Die elektrische Leistungsaufnahme und die indizierte Leistung werden negativ, der Energieverlust $N_i - N_{el}$ bleibt (mathematisch und wirklich) positiv. Man beachte, wie in Fig. 135, 137, 140 solche über die normale Versuchsreihe gehenden Punkte sich doch der Reihe einfügen. Im Diagramm des Versuches 12, Fig. 136, kann man über den Umfahrungssinn nicht im Zweifel sein, wenn man die Indikatorschwingungen beachtet, die natürlich im abgehenden Ast (in der Expansionslinie) sein müssen; beide Flächen — Arbeits- und Förderfläche — sind also negativ und entsprechend zu umfahren, wenn man diesmal auch die Arbeitsfläche dem Schwachfederdiagramm entnimmt.

In Fig. 137a und b sind noch folgende den *Getriebeverlust* in der Gasmaschine betreffenden Ermittlungen gemacht. In Fig. 137a ist zunächst die Gasaufnahme dargestellt als abhängig einmal von der

elektrischen, dann von der gebremsten, endlich von der indizierten Leistung, und zwar für letztere Kurve wieder beide Versuchsreihen durcheinander. Zunächst zeigt sich, daß die Punkte $G_0 = f(N_{el})$ sehr sauber in Reihe fallen, die Punkte $G_0 = f(N_b)$ fast ebenso; die Punkte $G_0 = f(N_i)$ dagegen streuen merklich. Es ist also offenbar, daß das Streuen der letzteren nicht in ungenauer Messung von G_0 , sondern in Unsauberkeiten der Indizierung begründet ist. Hiernach kann man zunächst die Werte der indizierten Leistung berichtigen, wie das bei Versuch 11 angedeutet ist. Für die Differenzen $N_i - N_{el}$ und $N_i - N_b$ ist diese Berichtigung nicht unwesentlich.

Die so berichtigten Differenzen sind nun in Fig. 137 b als abhängig von den berichtigten Werten N_i aufgetragen; die Punkte fallen nun entsprechend glatt ein, entsprechen aber teilweise (für Versuch 11, 5, 4 und 1) nicht mehr genau den Angaben der Tabellen 49 und 50. — Wo

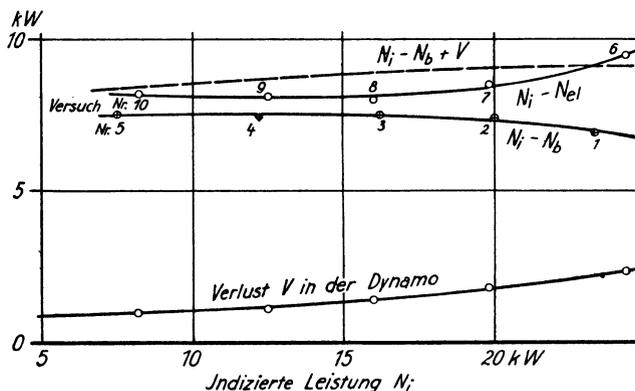


Fig. 137 b. Mechanische Verluste der Gasmachine und der Gasdynamo.

solche Differenzen zu ermitteln sind, kann man eine derartige Verarbeitung der unmittelbaren Versuchsergebnisse nicht immer umgehen. Durch Vorstehendes sollte ein *Beispiel einer systematischen Fehlerberichtigung* gegeben werden, die im vorliegenden Fall nach Lage der Sache durchaus sachgemäß und unbedenklich, keine Verschönerung ist.

In Fig. 137 b ist nun noch ferner der Verlust V in der Dynamo aufgetragen, ermittelt aus Angaben analog § 67, Fig. 77. Und indem wir die Kurven $N_i - N_b = f(N_i)$ und $V = f(N_i)$ zueinander zählen, ergibt sich die gestrichelte Kurve $N_i - N_b + V = f(N_i)$; diese sollte unterhalb $N_i - N_{el} = f(N_i)$ liegen, um den *Verlust in der Riemenübertragung*. Es zeigt sich aber das eigenartige Ergebnis, daß $N_i - N_b + V < N_i - N_{el}$ ist, das heißt, der Riemenverlust ergibt sich als negativ. Die Ursache dieses Ergebnisses bleibt zu besprechen.

Durch die Berichtigung von N_i an Hand von Fig. 137 a sind nur zufällige Fehler der einzelnen Versuche beseitigt, ebenso wird durch das gute Einstraken der Punkte von N_{el} und N_b nur die Abwesenheit zufälliger Fehler festgestellt. Systematische Fehler (Techn. Mess.

§ 18), wie etwa Fehlanzeige der elektrischen Instrumente, mangelhafte Eichung der Indikatorfedern, Falschtarierung der Bremse bleiben noch möglich; sie werden nur dadurch unwahrscheinlich, daß bei den Eichungen und bei der Tarierung sehr sorgsam vorgegangen war; ein Fehler in der Federeichung würde überdies wieder herausfallen. Die Möglichkeit eines systematischen Fehlers bleibt aber bei dem schwierigen Übergang von elektrischer auf mechanische Messung immerhin bestehen. — Betrachten wir jedoch einen solchen Meßfehler, der in dem Bereich um $N_i = 15 \text{ kW}$ immerhin rd. 1 kW betragen müßte, in dieser Höhe als ausgeschlossen, so bleibt als sachliche Erklärung für die auffällige Erscheinung nur übrig, daß bei der elektrischen Belastung die Getriebeverluste in der Gasmaschine selbst bis zu 1 kW kleiner sind als bei Belastung durch den Bremszaum, daß sie also bei ersterer rd. $7,5 \text{ kW}$ betragen, gegenüber $8,5 \text{ kW}$ bei letzterer. Das wäre dadurch zu erklären, daß der Riemenzug, wagerecht wirkend, sich mit dem Schwunradgewicht und den periodisch wechselnden Kolbendruck- und Massenkraften in solcher Weise zusammensetzt, daß die durchschnittliche Gesamtkraft kleiner ausfällt als ohne Riemenzug. Die Möglichkeit solcher Wirkung leuchtet ohne weiteres ein für den Fall, wo der Riemen nach oben geht und das Schwunradgewicht gewissermaßen trägt. Wie im vorliegenden Fall der Erfolg zustande kommt, kann nur eine genaue dynamische Nachprüfung der Verhältnisse zeigen. Die weitläufige Ermittlung wäre im einzelnen ohne Interesse. Im ganzen aber zeigt sich, wie große *Vorsicht beim Ermitteln von Nutzleistungen unter Verwendung von Leerlaufversuchen* am Platze ist.

94. Theoretische und praktische Festlegung des Begriffes der indizierten Leistung. Wir haben kurzerhand als selbstverständlich unterstellt, daß als indizierter Druck p_i der Viertaktmaschine der Unterschied aus dem in der Arbeitsfläche und in der Förderfläche indizierten anzusehen sei. Diese Rechnungsweise, die man als *Abzugsverfahren* bezeichnet, war nicht immer üblich; sie ist im wesentlichen durch das Auftreten der Zweitaktmaschinen zur Diskussion¹⁾ und dann zur Annahme gekommen. Die Sachlage ist folgende.

Bei der *Zweitakt-Verbrennungskraftmaschine* ist der gesamte Vorgang auf zwei oder mehr Zylinder verteilt, deren jeder für sich indiziert werden kann. Im Arbeitszylinder findet die Verbrennung statt, die übrigen (Hilfs-) Zylinder fördern Brennstoff und Luft in einen Hilfsbehälter, in dem beide unter mäßigem Druck stehen. Nachdem gegen Ende des Expansionshubes des Arbeitszylinders der Auslaß für die Abgase geöffnet ist, wird durch Spülluft der Rest der Abgase ausgewaschen und im Anschluß daran Luft und Gas im vorkomprimierten Zustand eingeführt, dann wird zu Ende komprimiert und endlich gezündet. Die Frage ist, ob als indizierte Leistung der Maschine diejenige des Arbeitszylinders (die *brutto* indizierte Leistung) anzusprechen ist, oder ob und wie weit der Leistungsverbrauch der Hilfszylinder ab-

¹⁾ Darlegungen von E. Meyer, Riedler, Wagener und namentlich Stodola, Z. d. V. D. I. 1905.

gezogen werden soll, um dadurch eine „netto“ indizierte Leistung zu ermitteln.

Der Zweck der von den Hilfszylindern ausgeführten Vorkompression ist an sich nur, den Druck zu gewinnen für genügend schnelles Auspülen und Laden des Arbeitszylinders; denn für diese Vorgänge stehen nicht wie beim Viertaktverfahren zwei volle Hübe, es steht nur ein kleiner Bruchteil einer Umdrehung dafür zur Verfügung. Eine an sich nicht beabsichtigte Nebenwirkung ist die, daß am Beginn des Kompressionsvorganges im Arbeitszylinder die Gase bereits höheren als atmosphärischen Druck haben, so daß also ein Teil des eigentlichen Kompressionsvorganges in die Hilfszylinder verlegt ist.

Wenn nun meßtechnisch eine gewisse als „brutto“ bezeichnete Art indizierter Leistung N'_i und eine am Schwungrad abzunehmende Nutzleistung N_e festliegen, so fragt es sich, wie die Stufe $N'_i - N_e$ durch die wirkliche „netto“ indizierte Leistung unterteilt werden soll. Grundsatz für die Unterteilung ist, es solle abgezogen werden von der Leistung N'_i der Hauptleistungsquelle das, was aufgewendet wurde zwecks Erhöhung des Wirkungsgrades, zwecks Verbesserung des Kreis- oder Arbeitsprozesses und was daher ein integrierender Bestandteil des Arbeitsprozesses ist; nicht solle abgezogen werden, was nur rein äußerlich der Verwirklichung des Kreisprozesses dient. Letztere Teile sind dadurch gekennzeichnet, daß man sie durch eine, wenn auch in gewissem Sinn einseitige Vervollkommnung der Maschine auf Null zusammenschrumpfend denken kann, durch welche Kennzeichnung sie mit den mechanischen Verlusten im Getriebe wesensgleich erscheinen.

In diesem Sinne ist die Kompressionsleistung von der brutto indizierten Leistung abzuziehen, soweit das nicht ohnehin automatisch im Indikator erfolgt; denn durch Erhöhung der Kompression wird der (ideale und wirkliche) Kreisprozeß verbessert (§ 104), diese Verbesserung ist geradezu der Zweck der Kompression, und man kann daher sagen: je höher die Kompressionsleistung, desto besser, ihre Verminderung wird nicht angestrebt. Es wäre aber unbillig, den durch Kompression erzielten Mehrgewinn als Einnahme zu verbuchen, ohne den hierfür grundsätzlich und verbend erforderlichen Aufwand abzusetzen. Es ist also $N_i = N'_i - N''_i$, und die Kompressionsleistung ist in N''_i enthalten.

Im Gegensatz dazu ist die Spül- und Ladearbeit den mechanischen Verlusten beizuzählen, kann sie doch wie jene durch mechanische Maßnahmen, wie Vergrößerung der Strömquerschnitte beliebig gegen Null konvergierend gedacht werden — wenn das auch nicht wirtschaftlich wäre. Es ist also $N_i = N_e + V_{\text{mech}}$, und die Spül- und Ladearbeit ist in V_{mech} enthalten.

Die Schwierigkeit angesichts dieser theoretisch klaren Sachlage ist nur, daß die Trennung der Pumpenleistung in den Anteil für Vorkompression und den für Spülen und Laden nicht durch Messung möglich ist. Um also meßtechnisch zum Ziele zu kommen, muß man von den beiden Möglichkeiten: die Leistung der Hilfspumpen gar nicht, oder

aber ganz abzuziehen, diejenige wählen, die dem Sollwert näher kommt und die gleichmäßige Ergebnisse verspricht.

Demgegenüber liegen bei *Viertaktmaschinen* die Verhältnisse meßtechnisch günstiger. Die gesamte Kompressionsleistung wird automatisch schon von der brutto indizierten Leistung in Abzug gebracht, indem der Indikator selbst die Kompressionslinie beschreibt, die Schleife, die im Schwachfederdiagramm besonders ermittelt zu werden pflegt, gibt den Gesamtbetrag des Leistungsaufwandes für das Ausstoßen der Abgase und für das Ansaugen der frischen Ladung. Die indizierte Leistung der Viertaktmaschine im Sinne der theoretischen Forderungen ist hiernach einwandfrei durch die indizierte Hauptfläche ohne Abzug der Förderfläche gegeben.

Maßgebend für die praktische Bestimmung, das Abzugsverfahren solle angewendet werden, war nun die *Forderung nach Vergleichbarkeit* der Ergebnisse an Zweitakt- und an Viertaktmaschinen, eine Forde-

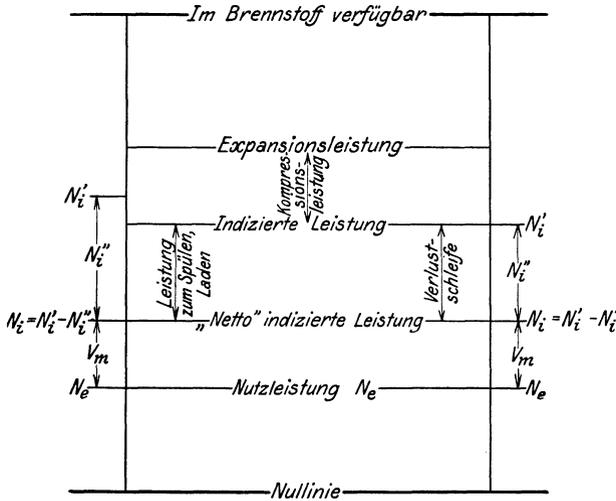


Fig. 138. Zur Bestimmung des Begriffes der indizierten Leistung bei Gasmotoren. Zweitaktmaschine. Viertaktmaschine.

rung, die jetzt wieder zurücktreten könnte, nachdem die Viertaktmaschinen fast allein das Feld behaupten. Aus dem Vorstehenden ergibt sich, daß man vergleichbare Meßergebnisse nur erhält, wenn man bei beiden Maschinenarten die Kompressions- sowie die Spül- und Ladearbeit von der brutto indizierten Leistung abzieht. — Aus diesem rein praktischen Gesichtspunkt rechtfertigt sich die zur Übung gewordene Vorschrift der Regeln.

In Fig. 138 ist zur Darstellung gebracht, daß nur die nach dem Abzugsverfahren ermittelte, hier als netto indiziert bezeichnete Leistung bei beiden Maschinenarten übereinstimmend gemessen werden kann.

Unsere Darlegung hat allgemeinere Bedeutung im Anschluß an das in § 6 Gesagte in allen Fällen, wo *Hilfsmaschinen oder -einrichtungen eine*

Hauptmaschine bedienen. Bei der Dampfkraftanlage sind die Kondensatorpumpen und die Kesselspeisepumpe dazu bestimmt, die Druckstufe aufwärtsgehend zu durchmessen und den Kreisprozeß zu schließen, die bei der Expansion abwärts durchmessen worden ist. Die Kompressionslinie des Indikatordiagrammes bei der Kolbenmaschine schließt den Kreisprozeß nicht, da sie sich nur auf den Dampfrest im schädlichen Raum bezieht. Der Leistungsverbrauch der Kondensation ist daher so weit abzugsfähig, wie er der Überführung des Kondensates bis auf Atmosphärendruck dient, und der theoretische Leistungsverbrauch der Speisepumpe ist voll abzugsfähig. Man unterläßt den Abzug in erster Linie wohl aus alter Gewohnheit, aber auch aus folgenden praktischen Gründen. Zunächst handelt es sich nur um kleine Beträge, die die Mühe kaum lohnen (Tabelle 38). Weiterhin darf nach unseren Grundsätzen der Leistungsaufwand für Förderung des Kühlwassers und für Auspumpen der Luft — letztere nur zufälligen Undichtheiten entstammend — nicht abgezogen werden, beide Posten sind jedoch von dem Abziehenden bei Mischkondensationen nicht zu trennen. Bei Zentralkondensationen aber ist es überhaupt nicht möglich, den Anteil einer bestimmten Maschine zu fassen, auch ist es unbillig, die Unvollkommenheiten einer getrennt arbeitenden Kondensation und eines weitverzweigten Rohrnetzes der Dampfmaschine zur Last zu legen. Endlich untersucht man selten (nur z. B. bei Lokomobilen) eine in sich geschlossene Dampfkraftanlage, meist nur die Kraftmaschine, die einen Kreisprozeß überhaupt nicht ausführt. Bei dieser Vielfältigkeit und Unklarheit der tatsächlichen Verhältnisse ist daher wieder der Gesichtspunkt ausschlaggebend, es sollten vergleichbare Werte erzielt werden, und das ist in diesem Fall nur zu erreichen, wenn jeder Abzug der Kondensations- und Speiseleistung bei Berechnung der indizierten Leistung — nicht aber in der Wärmebilanz, § 76 — überhaupt unterbleibt. — Bei einer Heißluftmaschine würde hingegen, bei theoretisch ganz gleicher Lage, doch das Unterlassen des Abzuges auf numerisch ganz schiefe Verhältnisse führen.

Diese Erwägungen sind auf alle Fälle sinngemäß zu übertragen, wo Hilfseinrichtungen eine Hauptmaschine bedienen.

95. Volumetrische und Regelungsverhältnisse der Gasmaschine. Als *Lieferungsgrad* bezeichnen wir den Quotienten aus der je Saughub aufgenommenen Gemischmenge und dem Hubvolumen der Maschine — die Gemischmenge auf 0° und 760 mm reduziert. Ist $G_0 + L_0$ die Summe aus stündlich aufgenommener reduzierter Gas- und Luftmenge, also bei Viertakt $\frac{G_0 + L_0}{30n}$ die beim Saughub aufgenommene Gemischmenge, und ist V_h das Hubvolumen, so ist der Lieferungsgrad

$$\eta_l = \frac{G_0 + L_0}{30n \cdot V_h} \cdot \dots \dots \dots (10)$$

Als *volumetrischen Wirkungsgrad* der Gasmaschine bezeichnen wir einen Quotienten, der dem Diagramm zu entnehmen ist; wir messen die auf der Atmosphärenlinie des Diagrammes zwischen Saug- und

Drucklinie abgeschnittene Strecke s_v und vergleichen sie mit der Diagrammlänge l ; es ist

$$\eta_{vol} = \frac{s_v}{l} \dots \dots \dots (11)$$

Der Lieferungsgrad wird stets erheblich unter 1 sein. Der Minderbetrag rührt davon her, daß das brennbare Gemisch mit Unterdruck in den Zylinder gelangt, also, auf den Barometerstand bezogen, den Zylinder nicht vollfüllt; im gleichen Sinne wirkt ein verspäteter Schluß der Ventile, insbesondere bei Schnellläufern und bei nicht gesteuerten Ventilen; weiter davon, daß das Gemisch im Zylinder wesentlich über 0° liegende Temperaturen annimmt; endlich hat (günstigen oder ungünstigen) Einfluß auf die Lieferung die Abweichung (nach oben oder nach unten) des Barometerstandes von 760° . Von diesen drei Einflüssen werden die ersten durch den volumetrischen Wirkungsgrad gemessen; daher erhält man in dem Quotienten

$$\frac{\eta_i}{\eta_{vol}} \dots \dots \dots (12)$$

ein Maß für die anderen. Dieser Quotient ist also auch ein Maß für den Einfluß verschiedenen Barometerstandes; wenn aber bei einer Versuchsreihe der Barometerstand wesentlich konstant ist, so sind die Änderungen des Quotienten ein Maß für die Erwärmung des Gasgemisches während der Ansaugperiode. Wir bezeichnen ihn deshalb als *thermometrischen Füllungsgrad*.

In Tabelle 52 sind die Füllungsverhältnisse für die in Tabelle 49 schon gegebenen Versuche berechnet, in Fig. 140 sind diese und noch die entsprechenden Ergebnisse der Bremsung Tabelle 53 dargestellt. Fig. 139 zeigt eine Auswahl der Indikatordiagramme.

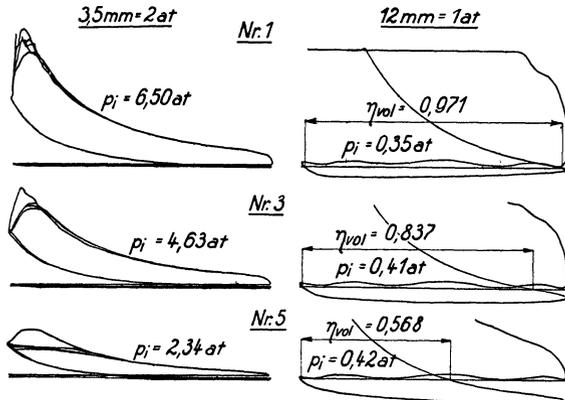


Fig. 139. Volumetrischer Wirkungsgrad der Gasmaschine bei wechselnder Belastung (Mengenregelung). $\frac{2}{5}$ nat. Gr.

Zur Durchführung der Rechnung war außer den schon bekannten Zahlen noch die *Messung der Luftmenge* nötig. Die Messung geschieht entweder — am bequemsten — mit einer Luftpumpe, die aber bei Leuchtgasbetrieb etwa das Neunfache der Gasmenge messen muß, also sehr voluminös wird; oder sie geschieht mittels einer in die Saugleitung gelegten Drosselscheibe für recht geringen Druckverlust, um das Mischungsverhältnis wenig zu ändern. In beiden Fällen muß man für Ausgleich der Schwankungen sorgen,

Tabelle 52. Füllungsverhältnisse der Gasmaschine.
Zylinderdurchmesser 260 mm. Hub 470 mm. Hubvolumen 24,95 l.

Versuch Nr.	6	7	8	9	10	11	12
1 Elektrische Leistung kW	14,9	11,3	8,0	4,3	0	-1,8	-12,2
2 Drehzahl n /min	186,2	189,8	190,3	191,1	192,6	193,4	195,3
3 Indizierte Leistung N . . . kW	23,4	19,8	16,0	12,4	8,2	6,4	-1,5
4 Gasaufnahme reduziert G_0 . . m ³ /h	12,79	11,07	9,52	7,85	5,89	5,02	0
5 Luftaufnahme reduziert L_0 . . „	94,2	86,3	77,8	68,1	54,9	48,3	13,1
6 Mischungsverhältnis $L_0 : G_0$. . —	7,37	7,80	8,17	8,68	9,32	9,61	∞
7 Gesamtaufnahme $G_0 + L_0$. . m ³ /h	107,0	97,4	87,3	76,0	60,8	53,3	13,1
8 bei 1 Saughub $\frac{G_0 + L_0}{30 n} = A$. . l	19,15	17,1	15,3	13,25	10,5	9,2	2,2
9 Lieferungsgrad $\eta_l = \frac{A}{24,95}$. . . —	0,767	0,685	0,613	0,531	0,422	0,368	0,088
10 Volumetr. Wirkungsgrad η_v lt. Diagr. —	0,973	0,938	0,864	0,756	0,608	0,540	0,322
11 Reglerstand r mm	27	38,5	40,5	42,5	44	45	48
12 Thermometr. Füllungsgrad η_t/η_v —	0,789	0,730	0,709	0,701	0,694	0,681	0,274

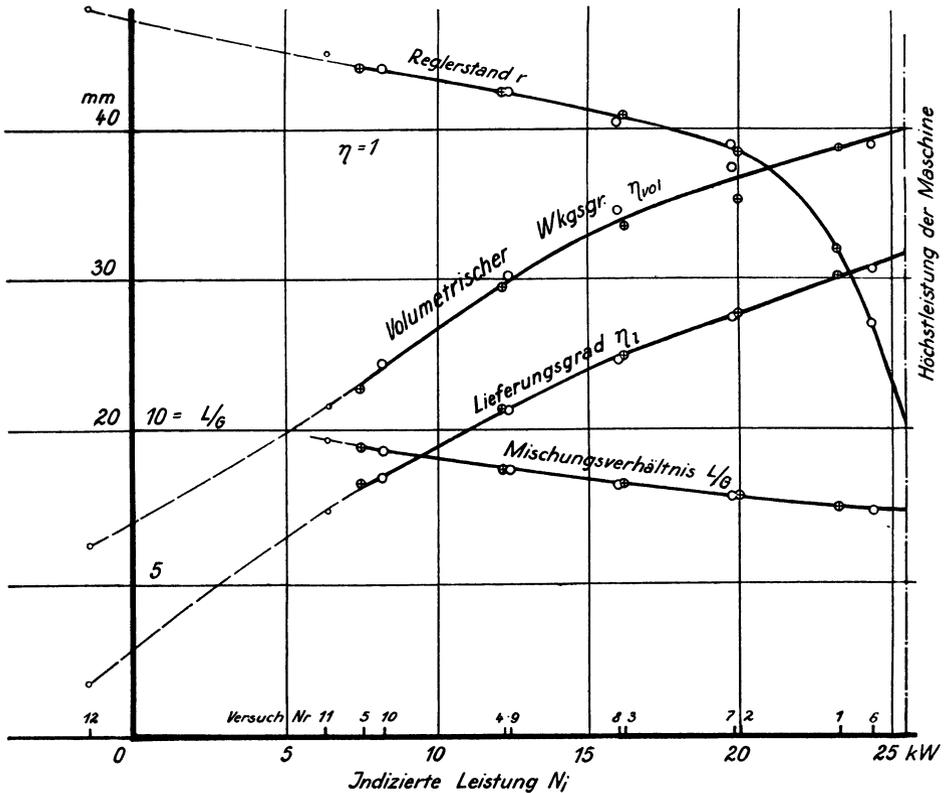


Fig. 140. Füllungsverhältnisse der Gasmaschine bei verschiedener Belastung.

die von der pulsierenden Entnahme herrühren. Ein einfacher Behälter muß erhebliche Größe haben; man kann ihn aber elastisch machen, indem man ihn mit einer Membran aus luftdichtem Segeltuch verschließt, die durch eine Feder, dem Unterdruck entgegen, nach außen gezogen wird (Techn. Mess. § 179). — Man kann auch die Messung der Luftmenge — besser dann gesagt: des Mischungsverhältnisses — durch chemische Analyse bewirken, indem man den Sauerstoffgehalt o_2 des angesaugten Gemisches und denjenigen o_1 des verwendeten Gases mit dem Orsatapparat bestimmt (Techn. Mess. § 49). Es ist dann

$$L_0 = \frac{o_2 - o_1}{21 - o_2} \cdot G_0 \dots \dots \dots (13)$$

Diese Methode ist für nicht gasförmigen Brennstoff kaum brauchbar. — Wenn man endlich die notwendige Luftmenge L_1 des Brennstoffes kennt oder bei chemisch definierten Stoffen (Benzol, wenn rein) stöchiometrisch berechnen kann, so kann man aus der Rauchgasanalyse die Luftüberschubzahl l finden (Techn. Mess. § 116) und hat dann

$$L_0 = l \cdot L_1 \dots \dots \dots (14)$$

In Tabelle 52 ist die Luftmenge direkt gemessen worden. Es ergibt sich z. B. bei Versuch 6 die Luftmenge $L_0 = 94,2 \text{ m}^3 \left(\frac{0}{760}\right)/\text{h}$, daher das Mischungsverhältnis $L_0 : G_0 = 94,2 : 12,79 = 7,37$. Die Maschine nimmt im ganzen $94,2 + 12,79 = 107,0 \text{ m}^3 \left(\frac{0}{760}\right)/\text{h}$ auf, das sind, bei der Drehzahl 186,2 min also $93,1 \times 60 = 5586$ Saughüben, stündlich $107,0 : 5586 = 0,01915 \text{ m}^3 \left(\frac{0}{760}\right)/\text{Hub} = 19,15 \text{ l} \left(\frac{0}{760}\right)/\text{Hub}$. Das Hubvolumen folgt aus den Zylindermaßen zu 24,95 l, also ist der Lieferungsgrad $\eta_l = 19,15 : 24,95 = 0,767$. — Der volumetrische Wirkungsgrad wird auf der Atmosphärenlinie des Schwachfederdiagrammes abgemessen, so wie in Fig. 139 angedeutet ist: bei Nr. 3 ist er 72,8 : 87,0 = 0,837. — Danach ist der von uns als thermometrischer Füllungsgrad bezeichnete Quotient zu berechnen. Der Regler hatte bei dem Versuch 6 den Abstand $r = 27 \text{ mm}$ von seinem unteren Sitz.

Bei fallender Leistung nimmt (Fig. 140)¹⁾ bei der untersuchten Maschine $L_0 : G_0$ zu, das Gemisch wird ärmer, jedoch nur in mäßigen Grenzen. Insoweit arbeitet die Maschine mit Gemischregelung. Zum wesentlichen Teil indessen erfolgt die Regelung dadurch, daß der Lieferungsgrad und damit die Aufnahme brennbaren Gemischgewichtes vermindert wird; der Lieferungsgrad nimmt mit 0,767 einen besonders hohen Wert an, er sinkt beim elektrischen Leerlauf auf 0,422, beim Leerlauf der Gasmaschine auf 0,412 (Mengenregelung). — Diese Abnahme des Lieferungsgrades wird durch die des volumetrischen Wirkungsgrades bedingt, der von 0,973 auf 0,608 (bei elektrischem Leerlauf) herabgedrückt wird, indem der Regler den Luft- und Gaszutritt drosselt; die

¹⁾ In Fig. 140 und manchen anderen ist versehentlich L und G geschrieben statt L_0 und G_0 . Beim Maßstab der Figuren ist das Versehen belanglos. Berechnet und eingetragen war stets die reduzierte Aufnahme.

Sauglinie sinkt dadurch tiefer unter die Atmosphärenlinie, der Abschnitt auf der Atmosphärenlinie wird verkürzt. Vom Quotienten η_i/η_{vol} könnte man erwarten, da er nur auf die Temperatur am Ende des Saughubes anspricht, daß er mit fallender Leistung steigt, da die Maschine kälter läuft; das Gegenteil ist der Fall, vermutlich weil das kleinere aufgenommene Gemischgewicht selbst in der kälteren Maschine doch noch stärker erwärmt wird; für den Regelvorgang und für Erreichung einer guten Höchstleistung ist das günstig.

Der Regler steigt bei der Entlastung der Maschine von 27 auf 44 mm über dem unteren Sitz. Man könnte meinen, bei Versuch 6 sei die Höchstleistung noch gar nicht erreicht, da der Regler noch 27 mm hoch steht. Aber nicht hierauf kommt es an, sondern die Höchstleistung ist erreicht, wenn der volumetrische Wirkungsgrad gleich der Einheit wird — praktisch schon etwas vorher. Was die Maschine bei den tieferen Reglerstellungen macht, wird in § 164 besprochen werden. Hier wird also die Höchstleistung durch Erreichung der Vollfüllung bestimmt — bei der Dampfmaschine, § 69, durch Aufsitzen des Reglers. Maßgebend ist, was von beidem zuerst eintritt — in der Hinsicht sollten die Verhältnisse für die beiden Maschinenarten stets so liegen wie in den vorliegenden beiden Fällen, aus Wirtschaftlichkeitsgründen.

96. Höchstleistung abhängig von Lufttemperatur und Barometerstand. Da die Höchstleistung der Maschine durch den volumetrischen Wirkungsgrad Eins bestimmt ist, da aber das angesaugte Gemischgewicht von der Dichte des Gases und der Luft abhängt, so wächst die erzielbare Höchstleistung, solange man nichts weiter an der Maschine ändert, einfach mit der Dichte des Gemisches, also mit dem Barometerstand und umgekehrt mit der absoluten Temperatur. Hat man daher beim Barometerstand b und der Lufttemperatur t die Höchstleistung N_{max} gemessen, während für den betreffenden Aufstellungs-ort b_o und t_o normale Werte sind, so ist bei den normalen Verhältnissen die Höchstleistung

$$N_{max}^o = N_{max} \cdot \frac{b_o}{b} \cdot \frac{273 + t}{273 + t_o} \dots \dots \dots (15)$$

erzielbar.

Hat also eine Maschine bei der Abnahme die Höchstleistung nicht hergegeben, so kann vom Lieferer eingewendet werden, die Abnahme sei an einem Tage geringen Barometerstandes gemacht, er beanspruche Umrechnung nach eben genannter Formel auf den normalen Barometerstand. Ob diesem Verlangen zu entsprechen ist, das hängt von den geschäftlichen Umständen ab; im allgemeinen wird man es nicht tun dürfen. Denn einem Fabrikbetrieb, der 30 kW braucht und sich zu ihrer Erzeugung eine Gasmaschine beschafft, ist nicht damit gedient, wenn er nun die 30 kW nur bei gutem Wetter erzielen kann, oder auch nur bei normalem. Man wird ihm den Anspruch darauf nicht versagen können, daß er bei jedem üblicherweise vorkommenden Wetter die erforderliche und gewährleistete Leistung auch erzielen kann; die ungünstigsten, nur in Jahren einmal vorkommenden Wetterverhältnisse wird man vielleicht ausnehmen dürfen. Auch wird man zulassen

dürfen und müssen, daß außergewöhnlichen Wetterverhältnissen durch leichte Verstellung der Zündung (§ 97) auf Kosten der Wirtschaftlichkeit Rechnung getragen wird.

Im Gegensatz wird man eher, wenn man die Zufälligkeiten der Witterung auszugleichen für angemessen findet, dem Anspruche des Bestellers nachgeben, der da anführt: Wenn bei ausnahmsweise günstigen oder unter normalen Verhältnissen die verlangte Leistung knapp zu erreichen sei, so genüge ihm das nicht. Er verlange Umrechnung auf die schlechtesten üblicherweise vorkommenden Verhältnisse. — Selbst in Meereshöhe geht der Barometerstand merklich oft auf 735 mm QuS = 1 kg/cm² herab; je 10 m Höhe entsprechen rd. 1 mm Abnahme des Barometerstandes. Ungünstiger noch wirken sehr hohe Temperaturen, die man aber in unseren Gegenden nicht gleichzeitig mit sehr niedrigem Barometerstand anzunehmen braucht.

Es kommt auch darauf an, ob eine Maschine für Aufstellung an einem bestimmten Ort gekauft ist, oder ob sie listenmäßig bezogen wurde. Endlich kann es auch vorkommen, daß die bei einem Hub der Maschine zu leistende Arbeit selbst vom Barometerstand abhängig ist (§ 11); geschieht das dann ebenfalls linear mit dem Barometerstand, dann hat es keinen Sinn, die gerade zugesagte Höchstleistung anders als beim normalen Barometerstand zu verlangen. So liegen die Verhältnisse beim Antrieb von Ventilatoren und Gebläsen. — Bei anormal niedrigen Drücken — Flugmotoren in großer Höhe — scheint das Drehmoment schneller als linear mit dem Luftdruck abzunehmen.

97. Wärmeumsatz in der Gasmaschine. Über den Verbleib der in die Gasmaschine hineingegebenen Energie gibt eine *Wärmebilanz* Auskunft, die auf der rechten Seite drei Posten aufführt: Der nutzbare Teil Q_N wird als indizierte Leistung ausgewiesen; ein weiterer Teil Q_W geht ins Kühlwasser über, dasselbe erwärmend; endlich läßt sich ein Teil Q_A als in den Abgasen verblieben nachweisen. Die drei Posten zusammen sollten gleich der zugeführten Wärme sein.

Diese Posten lassen sich befriedigend genau nachweisen. Man hat dazu, außer den bisher besprochenen Messungen, noch die folgenden auszuführen: Messung der Wassermenge W und der Zu- und Ablauftemperaturen t_1 und t_2 , Messung der Abgastemperatur t_a , sowie Analyse der Abgase. Keine der Messungen erfordert besondere Besprechung; höchstens wäre zu merken, daß man als Ablauftemperatur des Kühlwassers zweckmäßig nicht die mittlere der Versuchszeit einführt, sondern solange ein (natürlich nur schwacher bei einiger Einlaufdauer) Gang in den Ablesungen zu erkennen ist, ist der Endwert eine bessere Annäherung an den Beharrungswert als ein Mittelwert.

Die *ins Kühlwasser* gegangene Wärmemenge ist einfach

$$Q_W = W \cdot (t_2 - t_1) \dots \dots \dots (16)$$

mit $c = 1$ als der spezifischen Wärme des Wassers (Techn. Mess. § 104). Die *Abgaswärme* ist

$$Q_A = R_0 \cdot (t_2 - t') \cdot c_p \dots \dots \dots (17)$$

hierin unter t' die Zutrittstemperatur von Gas und Luft bzw. die Mischungstemperatur des Gasluftgemisches verstanden. $G_0 + L_0 = R_0$ kann als (reduziertes) Volumen der Abgase eingeführt werden, wenn eine Änderung des Volumens des Gemisches bei der Verbrennung nicht stattfindet; c_p ist aus der Gasanalyse zu berechnen (Fig. 17, § 32 a). Eventuell wird auch die Abgasmenge erst aus der Gasanalyse gefunden, wie das vom Kessel her bekannt ist (§ 31).

Als *Beispiel* für die gesamte Berechnung rechnen wir die Werte des Versuches 6 durch, wie schon bisher.

Aus der Gasaufnahme $G_0 = 12,79 \text{ m}^3 \left(\frac{0}{760}\right)/\text{h}$ und dem Heizwert $4850 \text{ kcal/m}^3 \left(\frac{0}{760}\right)$ folgt die aufgewendete Wärmemenge $Q_1 = 12,79 \cdot 4850 = 62\,000 \text{ kcal/h}$.

Die indizierte Leistung $23,4 \text{ kW}$ bedeutet eine Wärmemenge $Q_N = 23,4 \cdot 859 = 20\,100 \text{ kcal/h}$; das sind $q_N = 32,4\%$ von $62\,000$, gleich dem thermischen Wirkungsgrad.

Die Maschine erhielt 590 kg/h Kühlwasser von $7,9^\circ \text{C}$ im Zulauf und $42,0^\circ$ im Ablauf; die Wärmefaufnahme des Kühlwassers ist $Q_W = 590 \cdot (42,0 - 7,9) = 20\,100 \text{ kcal/h}$ oder $q_W = 32,4\%$ von $62\,000$.

Die Gesamtaufnahme an Gas und Luft war $107,0 \text{ m}^3 \left(\frac{0}{760}\right)/\text{h}$, die man etwa gleich der Abgasmenge, ebenfalls auf $\left(\frac{0}{760}\right)$ reduziert, setzen kann. Die Abgase hatten 434°C Temperatur. Die Luft hatte bei der Messung 21° , das Gas hatte 16°C gehabt. Man kann also die Einführungstemperatur genügend genau (im folgenden stets) zu 20° ansetzen. Die Gasanalyse ergab

$$k = 7,0\% \text{ CO}_2, \text{ dazu von } 0 \text{ bis } 434^\circ \text{ die spez. Wärme } 0,453 \text{ (Fig. 17, § 33)}$$

$$\qquad \qquad \qquad \text{von } 0 \text{ bis } 20^\circ \text{ ,, ,, ,, } 0,388$$

$$\qquad \qquad \qquad \text{also von } 20 \text{ bis } 434^\circ: \frac{1}{414} \cdot (434 \cdot 0,453 - 20 \cdot 0,388) = 0,456$$

$$\left. \begin{array}{l} o = 8,2\% \text{ O}_2 \\ n = 84,8\% \text{ N}_2 \end{array} \right\} \text{ dazu von } 20 \text{ bis } 434^\circ \text{ die spez. Wärme } 0,312 \text{ kcal/}^\circ \text{C} \cdot \text{m}^3 \left(\frac{0}{760}\right)$$

$$\underline{100,0\% \text{ trockenes Verbrennungsgas.}}$$

Ferner ergab sich bei der Verbrennung im Junkers-Kalorimeter eine Wassermenge von $0,98 \text{ kg}$ Wasser als zu $1 \text{ m}^3 \left(\frac{0}{760}\right)$ verbranntem Gas gehörig; das sind $0,98 : 0,805 = 1,22 \text{ m}^3$ Wasserdampf aus 1 m^3 verbrannten Gases oder $1,22 \cdot G_0 \text{ m}^3 \left(\frac{0}{760}\right)$ Wasserdampf auf die Abgasmenge $G_0 + L_0$, das wären $\frac{122 \cdot G_0}{G_0 + L_0} \%$ bezogen auf feuchtes Abgas;

bezogen auf trockenes Abgas dagegen ist der prozentuale Feuchtigkeitsgehalt $w = \frac{122 \cdot G_0}{G_0 + L_0} \cdot \frac{100 + w}{100}$; $w = \frac{1}{1/122 \cdot (1 + L_0/G_0) - 1/100}$. Für Versuch 6 wird der Wasserdampfgehalt

$$w = 17,1\% \text{ H}_2\text{O, dazu von } 20 \text{ bis } 434^\circ \text{ die spez. Wärme } 0,369$$

$$\underline{117,1\% \text{ feuchtes Verbrennungsgas.}}$$

Die spezifische Wärme der feuchten Verbrennungsgase ist also

$$\frac{7,0 \cdot 0,456 + 93,0 \cdot 0,312 + 17,1 \cdot 0,369}{117,1} = 0,329 \text{ kcal/}^\circ\text{C} \cdot \text{m}^3 \left(\frac{0}{760}\right).$$

Nun wird der Wärmehreinhalt der Abgase gegenüber dem Wärmeinhalt des eingeführten Gemisches $Q_A = 0,329 \cdot (434 - 20) \cdot 107,0 = 14\,600 \text{ kcal/h}$; das sind $q_A = 23,6\%$ von $62\,000$.

Statt jedesmal die spezifische Wärme von 20 bis 434° zu berechnen, hätte man kurzerhand die von 0° bis 434° gültige einführen können; auch dann bleibt die Rechnung noch unverhältnismäßig genau aus-

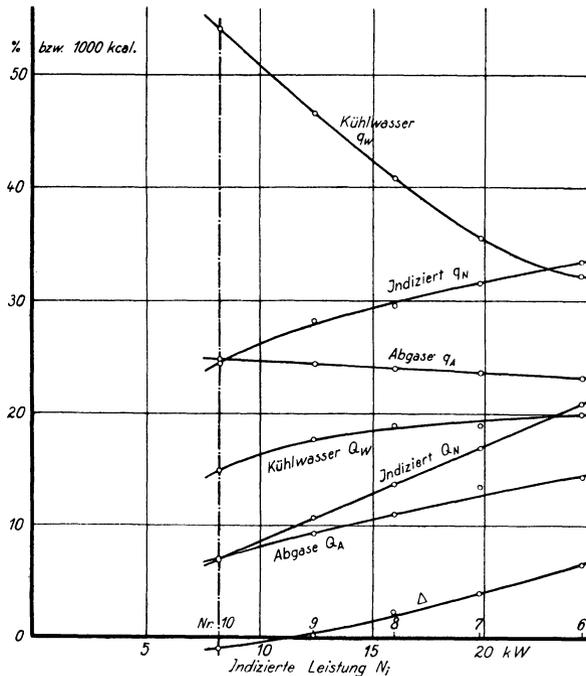


Fig. 141. Wärmeverbleib der Gasmaschine bei wechselnder Belastung.

geführt gegenüber der Tatsache, daß Abgas- und Gemischmenge nicht genau einander gleich sind, und in Anbetracht dessen, daß man bei dem intermittierenden Auspuff schwerlich sauber die durchschnittliche Temperatur der Abgase mißt.

Trotz dieser Bedenken stimmt die Wärmebilanz befriedigend. Wir stellen zusammen:

Hinein:

Heizwert des Gases $62\,000 \text{ kcal} = 100\%$

Heraus:

Indizierte Leistung $20\,100 \text{ kcal} = 32,4\%$

Ins Kühlwasser $20\,100 \text{ „} = 32,4\%$

In den Abgasen $14\,600 \text{ „} = 23,6\%$

Fehlbetrag Δ $7\,200 \text{ „} = 11,6\%$

62 000 kcal = 100%

62 000 kcal = 100,0%

In Tabelle 53 und in Fig. 141 sind die Versuchs- und Auswertungsergebnisse der übrigen Versuche zusammengestellt. Mit abnehmender

Tabelle 53. Wärmeumsatz in der Gasmaschine bei wechselnder Leistung, auf die Stunde bezogen.

Versuch Nr.		6	7	8	9	10
1	Drehzahl n /min	186,2	189,8	190,3	191,1	192,6
2	Gasaufnahme G_0 $m^3 \binom{0}{760}/h$	12,79	11,07	9,52	7,85	5,89
3	Wärmewert $Q_1 = 4850 \cdot G_0$ 1000 kcal/h	62,0	53,7	46,2	38,1	28,6
4	Indizierte Leistung N_i . . . kW	23,4	19,8	16,0	12,4	8,2
5	Wärmewert Q_N . . . 1000 kcal/h	20,1	17,0	13,7	10,8	7,0
6	.. q_N %	32,4	31,7	29,7	28,4	24,5
7	Kühlwassermenge W . . . kg/h	590	612	604	604	600
8	Zulauftemperatur t_1 °C	7,9	8,0	8,0	8,0	8,0
9	Ablauftemperatur t_2 °C	42,0	39,0	39,4	37,5	33,8
10	Wärmeaufnahme des Wassers Q_W 1000 kcal/h	20,1	19,1	19,0	17,8	15,5
11	„ q_W %	32,4	35,6	41,0	46,7	54,2
12	Luftaufnahme L_0 . . $m^3 \binom{0}{760}/h$	94,2	86,3	77,8	68,1	54,9
13	Gesamtaufnahme $G_0 + L_0$ „	107,0	97,4	87,3	76,0	60,8
Abgasanalyse:						
14	CO ₂ -Gehalt = k } %	7,0	6,4	6,4	5,9	5,3
15	O- „ = o } 100% . . „	8,2	9,2	9,5	9,9	10,9
16	N- „ = n } „	84,8	84,4	84,1	84,2	83,8
17	H ₂ O- „ = w } „	17,1	16,1	15,3	14,4	13,4
18	Temperatur der Abgase t_a . . °C	434	426	413	402	387
19	Eintrittstemperatur des Gases t' „	16	16	17	17	18
20	Eintrittstemperatur der Luft t'' „	21	21	21	21	22
21	Spezifische Wärme der Abgase —	0,329	0,327	0,327	0,326	0,325
22	Wärmeüberschuß der Abgase Q_A 1000 kcal/h	14,6	12,9	11,2	9,4	7,2
23	.. q_A %	23,6	24,0	24,2	24,7	25,2
24	Fehlbetrag Δ 1000 kcal/h	7,2	4,7	2,3	0,1	-1,1
25	.. δ %	11,6	8,7	5,1	0,2	-3,9

Leistung sinkt die Ablauftemperatur des Kühlwassers — dessen Menge unverändert blieb — und die Temperatur der Abgase. Es sinken daher die beiden entsprechenden Wärmemengen, allerdings beide langsamer als die Leistung. Prozentual bleibt stets etwa gleich viel in den Abgasen, und was der thermische Wirkungsgrad kleiner wird, geht mehr in das Kühlwasser — sogar reichlich mehr, denn der Fehlbetrag wird, absolut und prozentual, immer kleiner, je mehr die Leistung sinkt, er wird schließlich sogar negativ ausgewiesen. Das kann zum Teil daraus erklärt werden, daß die *Kolbenreibung in der Wärmebilanz stets doppelt berechnet* wird — erstmals in der indizierten Leistung, von der sie dann abgeht, sich in Wärme umsetzt und dann im Kühlwasser bzw. in den Abgasen nochmals gemessen wird. Zweifellos macht die Kolbenreibung einen erheblichen Bruchteil des Getriebeverlustes aus, und der ist bei der Maschine nach Tabelle 49 und 50, Fig. 138, rund 8 kW oder 7300 kcal/h. Der negative Fehlbetrag ist also aus der Kolbenreibung wohl zu erklären. — Der Fehler der Wärmebilanz aus der

Kolbenreibung ist bei der Dampfmaschine ebenso vorhanden, nur dort von geringerem Einfluß als bei der Gasmaschine mit ihren zahlreichen und stark gespannten Kolbenringen.

Als Ursache dafür, daß die Summe der nachweisbaren Verbleibszahlen die im Brennstoff eingeführte Wärmemenge übersteigt, kommt ferner stets die *Verbrennung des zur Kolbensmierung eingeführten Schmieröles* in Betracht; soweit dieses verbrennt, tritt seine Wärmeerzeugung zu der des Brennstoffes hinzu, und bei reichlicher Schmierung kann sein Anteil wohl von Einfluß sein — wie ja denn reichliche Schmierung ein beliebtes Mittel zur Erzielung guter Wirkungsgrade ist (§ 12).

Andererseits sollte der Fehlbetrag auch noch der *Wärmeabgabe des Kühlmantels* nach außen Genüge leisten. Die äußere Oberfläche der betreffenden Gasmaschine mag $1,3 \text{ m}^2$ sein. Bei Wasserheizkörpern rechnet man mit einer Wärmeabgabe von $\approx 7 \text{ kcal}/^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}$; wie weit sich diese Zahl durch Spachtelung und Anstrich sowie durch Ölbelag vermindert, steht dahin. Bei 20° Raumtemperatur beträgt also überschläglich die Wärmemenge, die vom Kühlwasser zwar angenommen, aber vor erfolgter Messung wieder abgegeben wird

bei Versuch 6: $7 \cdot 1,3 \cdot (42,0 - 20) = 200 \text{ kcal/h} = 0,32\%$ von 62 000,
 bei Versuch 10: $7 \cdot 1,3 \cdot (33,8 - 20) = 125 \text{ kcal/h} = 0,44\%$ von 28 600.

Die Wärmeabgabe der Gasmaschine ist also relativ unbedeutend.

Einigen Einwendungen gegen die Wärmebilanz und einer großen Anzahl von Messungen und Rechnungen entgeht man, wenn man den Wärmeinhalt der Abgase direkt bestimmt mittels des *Abgaskalorimeters*¹⁾. Bei diesem wird der Wärmeinhalt der Abgase unmittelbar durch Übertragung auf Wasser festgestellt. Die Bauweise des Kalorimeters entspricht der der Kondensatoren. Man kann in einem Oberflächenapparat die Wärme auf Wasser übertragen; die Oberfläche muß reichlich sein, damit die Gase weit genug abgekühlt werden und damit der Wärmerest in ihnen nur eine mäßige Korrektur ergibt. Konstruktiv einfacher wird ein Rieselkalorimeter, bei dem die Abgase durch einen Regen von Wassertropfen gelassen werden, an den sie ihre Wärme abgeben. Die Wassermenge muß wieder reichlich sein, damit das Gas so ausgekühlt wird, daß nicht wesentliche Mengen Wassers in Dampf- form mitgerissen werden. — Wassermenge und Temperaturerhöhung werden in üblicher Weise gemessen.

98. Einfluß der Zündungszeit. Um durch eine Versuchsreihe den Einfluß der Zündungszeit auf die Wirtschaftlichkeit und auf die erzielbare Leistung zu ermitteln, wird die Zündung, von normaler Zündung beginnend, zunächst mehr und mehr verfrüht, sodann mehr und mehr verspätet eingestellt. Dabei kann man die Leistung der Maschine unverändert halten, wie es im praktischen Betriebe einer vorhandenen Anlage der Fall ist; man kann aber auch die Maschine jedesmal mit der höchsten zu erzielenden Leistung belasten, wenn man feststellen will, wie die Höchstleistung vom Zündungszeitpunkt abhängt. Bei den

¹⁾ Staus, Z. d. V. D. I. 1902, S. 649. Auch gibt es Abgas-Wasserwärmer für Gasmaschinen, die als Kalorimeter dienen können; Z d. V. D. I. 1911, S. 673.

Versuchen wird der Gasverbrauch abgelesen, um die Wirtschaftlichkeit festzustellen. Der Luftverbrauch kann gemessen oder der Luftüberschuß durch Analyse bestimmt werden, weil bei allen Versuchen das gleiche Mischungsverhältnis beibehalten werden sollte, damit nicht der Einfluß wechselnden Mischungsverhältnisses den Einfluß der Zündung überdeckt. Empfehlenswert ist Messung der Abgastemperatur.

Durch *Vorversuch* ist festzustellen, welche Kurbelstellung den verschiedenen Einstellungen der Verstellrichtung als Zeitpunkt des Abreißen zugeordnet ist; im allgemeinen ist die Verstellrichtung mit einer empirischen Teilung versehen, sonst versieht man sie damit. Bei der Kerzenzündung mit Abreißen des Primärstromes ist die Zeit des Abreißen zugleich die der Zündung; den Augenblick des Abreißen beobachtet man, indem man einen dünnen Papierstreifen in den geschlossenen Unterbrecher klemmt, die Maschine langsam dreht und aufpaßt, wann der Streifen lose wird. Die älteren Zündvorrichtungen, die den hochgespannten Strom im Innern des Zylinders unterbrechen, pflegen einen Hebel abzureißen und durch seinen Schlag zugleich den Anker betätigen zu lassen, der vor dem Magneten spielt; bei ihnen ist es noch nötig, die Zeit festzustellen zwischen dem Abschneiden des Hebels und dem Ziehen des Funkens, die einen immerhin merklichen Bruchteil einer Sekunde auszumachen pflegt. Man kann dazu den Weg des abreißen Hammers auf eine umlaufende Trommel aufschreiben lassen, oder auch nur einen elektrischen Kontakt vom Hammer öffnen lassen, der dann ein Wagenerisches Markenschreibzeug (Techn. Mess. § 88) betätigt; so wie zur Bestimmung der Nacheilung des Markenschreibzeuges selbst, so kann man auch hier einmal die Marke auf langsam bewegter Trommel, ein zweites Mal auf der Trommel schreiben lassen, die mit bekannter Geschwindigkeit umläuft; die Marken müssen auf einer Trommel geschrieben werden, die mit der Auslösung starr gekuppelt ist, etwa auf einem Kuppelflansch der Steuerwelle. Der Unterschied beider Markenstellungen ist die Nacheilung von Abreißer und Schreibzeug; die bekannte Nacheilung des Schreibzeuges wird davon abgezogen.

So war bei einem Versuch (Nr. 51, Tab. 54) die Zündung auf Strich 1 der empirischen Skala eingestellt; dem entspricht, nach dem Ergebnis der Auskurbelung, daß der Zündapparat bei 3° vor dem Totpunkt abreißt, wir sagen bei $z' = -3^\circ$. Durch einen Versuch, wie eben beschrieben, war ermittelt worden, daß vom äußeren Abreißen der Zündung bis zum Ziehen des Funkens im Zylinder $0,025 = \frac{1}{40}$ s vergeht; bei der Drehzahl $n = 171,3/\text{min}$ bedingt diese Zeit einen Drehwinkel

$$\frac{360 \cdot 0,025 \cdot 171,3}{60} = 25,7^\circ, \text{ um den die Zündung dem Abreißen nach-}$$

eilt. Bei dem besprochenen Versuch wäre also die Zündung bei $z = +22,7^\circ$ hinter dem Totpunkt erfolgt. Diese Ermittlung läßt sich für jeden Strich der Abreißkala und für jede Drehzahl machen — wobei man bei den kleinen Änderungen der Drehzahl, die dem natürlichen Abfall des steigenden Reglers entsprechen, gelegentlich eine konstante Nacheilung einführen wird.

Die Dauer des Zündfunken ist nicht unmerklich; um seine Dauer ist man über die Zeit im unklaren, wann die Zündung das Gemisch ergreift. Man kann¹⁾ die Dauer des Funken nach Fig. 142 feststellen,

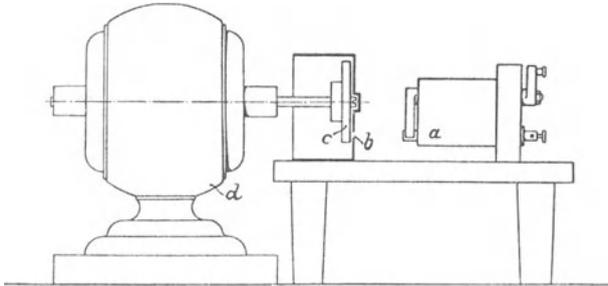


Fig. 142. Anordnung zur Bestimmung der Funkendauer¹⁾.

indem man den Zündapparat herausnimmt und dicht gegenüber einer Scheibe *c* aufstellt, die durch einen Elektromotor *d* in schnellen Umlauf versetzt wird, und auf deren Stirnfläche ein Blatt Bromsilberpapier gespannt wird. Der Versuch wird im Dunkeln bei roter Lampe gemacht, und man bedeckt Scheibe und Zünder mit einem Pappkästchen. Durch ein einfaches Hebelwerk wird der Zünder *a* in gleicher Weise zum Abreißen gebracht wie im Betriebe. Dadurch ergibt sich auf dem Papier, vom Lichtschein des Funken durch den Schlitz *b* hindurch erzeugt, ein schwarzer Streifen, dessen Länge man mißt. Aus ihr und der Drehzahl der Scheibe findet sich die Zeit, die der Funken dauert, und auch einigermaßen der Verlauf seiner Intensität.

So ergibt sich aus den Bromsilberblättern *a* und *c*, Fig. 143, eine Dauer des Funken

$$\frac{60}{360} \cdot \frac{60}{1600} = 0,0062 \text{ s bzw.}$$

$$\frac{100}{360} \cdot \frac{60}{2800} = 0,0059 \text{ s}$$

im Mittel 0,006 s, bei einer Drehzahl der Gasmaschine $n = 171,3/\text{min}$ entspricht das einem Drehwinkel von 6° . Können wir auch annehmen, daß die Zündung des Gemisches um das erste Drittel herum erfolgt, so bleibt die Unsicherheit doch immerhin merklich.

Natürlich sind diese Versuche nur einmal für einen bestimmten Zündapparat als Fundamentalversuch auszuführen. Nach Vornahme

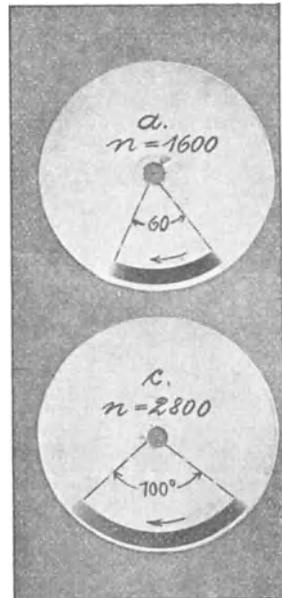


Fig. 143. Zur Bestimmung der Funkendauer¹⁾.

¹⁾ Borth, Z. d. V. D. I. 1908, S. 523 oder Forschungsarbeiten Heft 54.

desselben ist bekannt, wieviel Zeit nach dem Auslösen, also bei gegebener Drehzahl der Maschine auch, wieviel Grade vor oder hinter dem Totpunkt die Zündung im Zylinder eintritt.

Im Indikatordiagramm Fig. 145 und 147 macht sich der wechselnde Zündungspunkt deutlich kenntlich. Bei Versuch Nr. 51, wo, wie eben berechnet, $z = +23^\circ$ ist, wird zunächst die Kompression ein kurzes Stück abwärts wieder durchlaufen, bevor die Drucksteigerung beginnt; diese kann dann über-

dies, wegen des schon schnell voreilenden Kolbens, nicht sehr erheblich werden, die Drucksteigerung wird flau. Im Gegensatz dazu setzt im Diagramm Nr. 61 die Drucksteigerung ersichtlich vor dem Totpunkt ein: es ist $z = -38^\circ$.

Das Diagramm erhält

$2,5\text{ mm} \cdot 2\text{ at}$

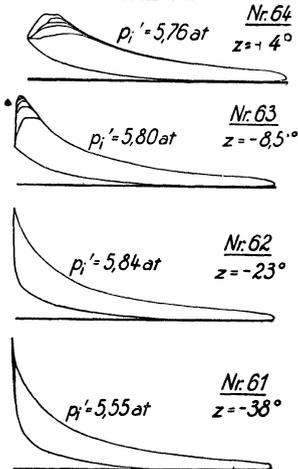


Fig. 145. $\frac{2}{5}$ nat. Gr.

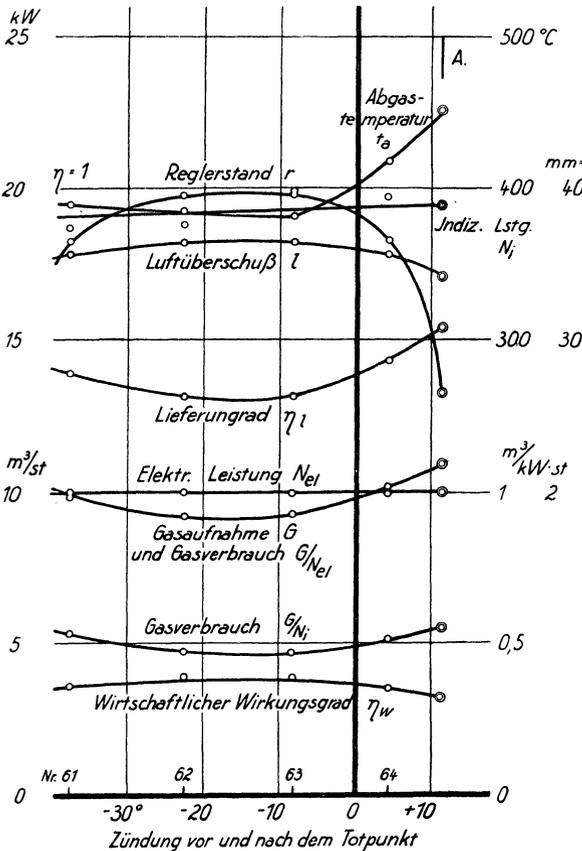


Fig. 144.

Fig. 144 und 145. Gasmaschine bei wechselnder Zündungszeit, Leistung unverändert.

eine scharfe Spitze im, ja vor dem Totpunkt mit nachfolgender Schleife; die hohen, entgegen der Einwärtsbewegung des Kolbens auftretenden Drücke bewirken unruhigen Gang, die sich übrigens auch als Druckwechsel im unrechten Punkt in einer graphischen Darstellung der Getriebedrucke nachweisen ließen.

Betreffs der Wirtschaftlichkeit läßt sich folgendes vorhersehen: Weder bei zu später noch bei zu früher Zündung kommt die der Maschine

eigene Kompression voll zur Geltung, denn im einen Fall ist die Verdichtung im Augenblick der Zündung und daher der Wärmezufuhr bereits wieder herabgegangen, im anderen Fall ist sie noch nicht erreicht. Da nun aber (§ 105) der Gütegrad des Kreisprozesses mit dem Verdichtungsverhältnis steigt, so ist zu erwarten, daß bei zu früher wie bei zu später Zündung die Wirtschaftlichkeit zurückgeht.

Das zeigen denn auch die Versuchsreihen, die durch Tabelle 54

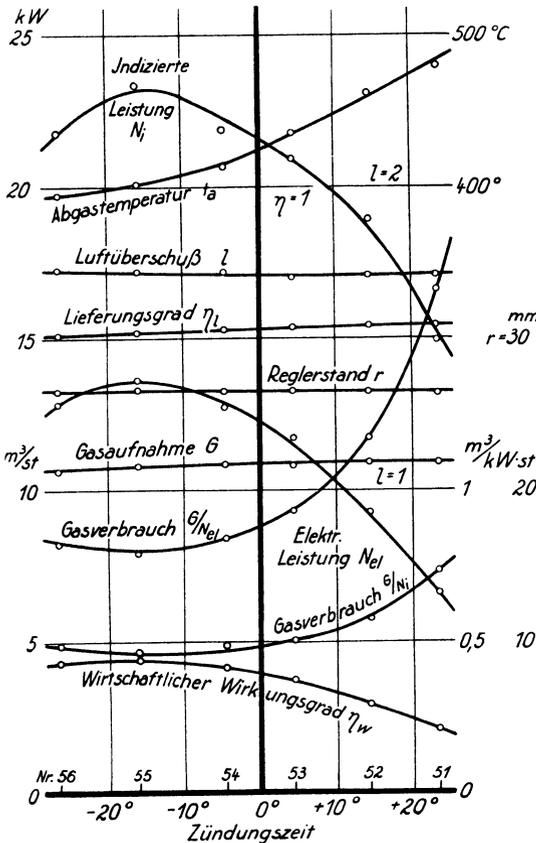


Fig. 146 und 147. Gasmaschine bei wechselnder Zündungszeit, Belastungsgrad unverändert.

und Fig. 144 und 146 gegeben sind. Einmal ist die Leistung konstant gehalten, ein zweites Mal der Reglerstand und daher die Füllung. Jeder der Versuche ist ausgeführt worden, wie in den bisherigen Paragraphen beschrieben. Die Wirt-

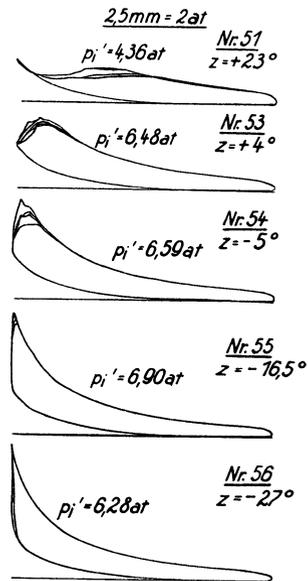


Fig. 147. $\frac{2}{3}$ nat. Gr.

schaftlichkeit wird bei beiden Reihen am besten bei Zündung etwa 15° oder $0,014$ s vor dem Totpunkt. Bei konstanter Leistung wird der günstigste Zustand gekennzeichnet durch die geringste Temperatur t_a der Auspuffgase. Auch hinsichtlich der erzielbaren Leistung ist die Zündung etwa 15° oder $0,014$ s vor dem Totpunkt am günstigsten.

Den günstigsten Verhältnissen entspricht die günstigste Diagrammform Nr. 55, Fig. 147, jedoch sind Nr. 62 und 63, Fig. 145, in der Wirt-

Tabelle 54. Einfluß des Zündungszeitpunktes auf

Versuch Nr.		Leistung N_{el} , konstant 10 kW			
		64	63	62	61
1	Abreißen der Zündung } vor - } dem Totpunkt ° Ungef. Zündzeitpunkt } nach + }	-22	-34,5	-49	-64
2		+ 4	- 8,5	-23	-38
3	Elektrische Leistung N_{el} kW	9,98	9,98	10,0	10,0
4	Indizierte Leistung N_i „	19,9	19,7	19,9	18,7
5	Reglerstellung r mm	36,5	39,5	39	36,5
6	Drehzahl n /min	177,8	178,6	178,6	178,1
7	Gasaufnahme reduziert G_0 m ³ /h	10,15	9,24	9,22	9,88
8	Gasverbrauch G_0/N_{el} m ³ /kW · h	1,017	0,926	0,922	0,988
9	„ G_0/N_i „	0,510	0,469	0,464	0,529
10	Luftüberschubziffer l —	1,78	1,82	1,82	1,78
11	Lieferungsgrad η_l —	0,715	0,659	0,658	0,693
12	Abgastemperatur t_a ° C	418	381	385	389
Wärmebilanz:					
13	Verfügbare Wärmemenge Q_1 1000 kcal/h	49,2	44,8	44,7	47,9
14	Nachweisbar als indizierte Leistung Q_N „	17,1	17,0	17,0	16,0
15	„ im Kühlwasser Q_W „	18,4	18,1	18,8	19,4
16	„ in den Abgasen Q_A „	12,2	10,2	10,3	10,9
17	Restbetrag Δ „	1,5	-0,5	-1,4	1,6
18	Nachweisbar als indizierte Leistung q_N %	34,8	37,8	38,2	33,4
19	„ im Kühlwasser q_W %	37,4	40,4	41,9	40,5
20	„ in den Abgasen q_A %	24,8	22,8	23,0	22,8
21	Restbetrag δ %	3,0	-1,0	-3,1	3,3

schaftlichkeit und Höchstleistung kaum minderwertig, letztere aber hat den Vorteil sanfteren Maschinenganges.

Die Wärmebilanzen in Tabelle 54 und Fig. 148 zeigen nichts Bemerkenswertes.

99. Einfluß des Mischungsverhältnisses. Das Verhältnis, in dem Gas und Verbrennungsluft der Maschine zugeführt werden, beeinflusst die Diagrammform, indem sich je nach der Zusammensetzung der Mischung die Geschwindigkeit verändert, mit der die Zündung sich durch die brennbare Masse fortpflanzt.

Eine willkürliche Änderung des Mischungsverhältnisses kann man herbeiführen durch Drosseln einerseits des Luft- und andererseits des Gaszutrittes. Der Gaszutritt wird einen Hahn haben, der direkt zum Regeln dienen kann, nötigenfalls ist er genügend fein stellbar zu machen und mit Skala zu versehen. Wo die Luft durch eine besondere Leitung entnommen wird, kann man Drosselflansche in diese setzen oder besser eine Drosselklappe in sie einbauen. Wenn kleinere Maschinen die Luft durch ihr Gehäuse hindurchsaugen, so verschließt man nach Bedarf einige der Löcher, durch die die Luft in den Rahmen eintritt. Voraus-

den Gang der Gasmachine.

Etwa Höchstleistung, Regler Strich 26,5			
51	53	55	56
- 3	-22	-42,5	-53
+23	+ 4	-16,5	-27
6,62	11,65	13,6	12,8
14,9	21,7	23,4	21,7
26,5	26,5	26,5	26,5
171,3	170,8	173,2	171,4
10,95	10,86	10,80	10,57
1,654	0,932	0,794	0,825
0,735	0,500	0,462	0,487
1,71	1,70	1,72	1,73
0,771	0,766	0,757	0,753
479	434	401	394
53,1	52,7	52,4	51,3
12,8	18,6	20,1	18,6
20,0	19,4	19,5	19,8
14,7	13,1	12,0	11,6
5,6	1,6	0,8	1,3
24,0	35,4	38,4	36,3
37,7	36,8	37,2	38,6
27,7	24,9	23,0	22,5
10,6	2,9	1,4	2,6

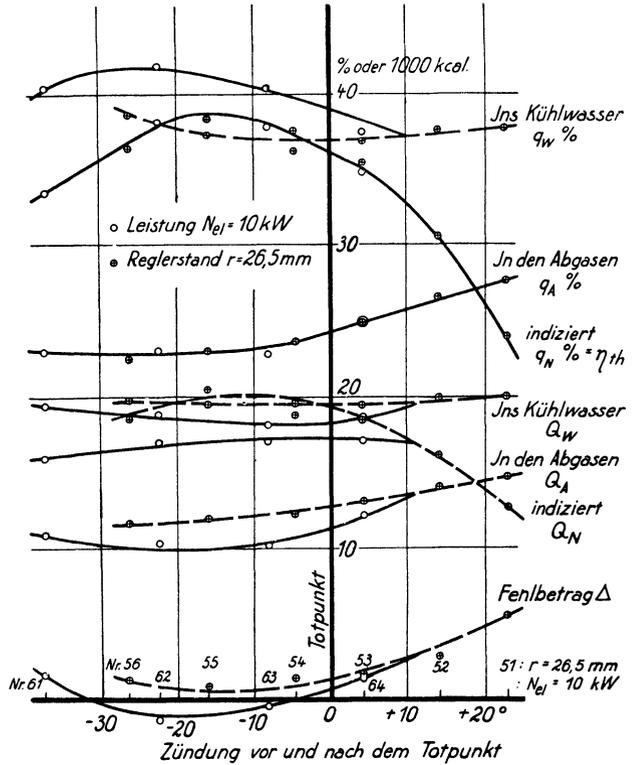


Fig. 148. Wärmeverbleib der Gasmachine bei verschiedenem Zündungszeitpunkt.

setzung ist allerdings, daß die Querschnitte für den jeweils anderen Bestandteil groß genug sind, damit nicht ein allzu erheblicher Unterdruck im Zylinder entsteht, wenn der Zylinder sich überwiegend mit jenen anderen Bestandteil — Luft oder Gas — füllen muß. Im Notfalle wäre hier Abhilfe zu schaffen.

Auf diese Weise kann man das Mischungsverhältnis in sehr weiten Grenzen verändern. Die Grenzen der Änderung sind dadurch gegeben, daß bei Annäherung an die theoretisch richtige Mischung — Luftüberschußzahl $l = 1$ — die Ladung zu brisant wird, der Maschinengang unruhig wird und Bedenken erregt; die andere Grenze wird erreicht, wenn bei immer schwächerer Mischung entweder die Grenze der Zündfähigkeit eintritt, so daß Zündungen aussetzen, oder aber je nach Umständen schon vorher der Leerlauf erreicht ist.

Die Diagrammform verändert sich charakteristisch in dem Sinn, daß die Zündung um so schneller durchschlägt, daß die Ladung um so brisanter wird, je mehr man sich dem Luftüberschuß $l = 1$ nähert. Die Diagramme werden spitzer, Fig. 149, aber gegenüber den Reihen Fig. 145 und 147 mit verschiedenerer Zündung können dennoch Ver-

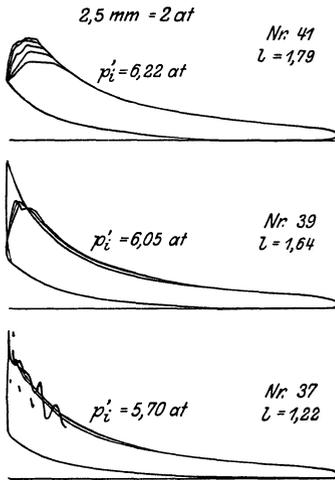


Fig. 149. Diagramme der Gasmaschine bei verschiedenem Mischungsverhältnis (Luftüberschuß). Leistung unverändert. $\frac{1}{2}$ nat. Gr.

wechslungen nicht auftreten. Die Zündung setzt diesmal sichtlich gleichmäßig, ziemlich genau im Totpunkt ein, nur eben verläuft die Verbrennung verschieden schnell. Nur bei Versuch Nr. 39 ist ein Hub vorgekommen, bei dem das Gemisch durch irgendeine Ursache vorzeitig gezündet worden war, wie man deutlich sieht — vielleicht durch eine glimmende Rußflocke, die dann durch die scharfe Verbrennung fortgeblasen zu werden scheint.

Dieser Veränderung der Diagrammform entsprechen Änderungen der Wirtschaftlichkeit, die durch Tabelle 55 und Fig. 150 und 151 gegeben sind. Wird zunächst bei konstanter Leistung N_{el} der Luftüberschuß gesteigert, Fig. 151, so bleibt die Gasaufnahme G_0 annähernd unverändert, doch sinkt sie ein wenig;

Tabelle 55. Verhalten einer Gasmaschine bei wechselndem Gasge-
Zündung unverändert: Abreißen — 25,5°

Versuch Nr.	Leistung unverändert			Fül-
	37	39	41	43
1	Luftüberschußzahl l	—	—	—
2	Elektrische Nutzleistung N_{el} kW	13,0	13,05	13,0
3	Reglerstand r mm	40,5	37	28,5
4	Gasaufnahme G_0 m ³ /h	11,4	10,8	10,6
5	Gasverbrauch G_0/N_{el} m ³ /kW · h	0,879	0,826	0,814
6	Indizierte Leistung N_i kW	19,8	21,0	20,8
7	Gasverbrauch G_0/N_i m ³ /kW · h	0,580	0,512	0,508
8	Drehzahl n /min	179,6	180,0 ?	173,2
9	Lieferungsgrad η_l —	0,571	0,696	0,769
10	Abgastemperatur t_a °C	452	431	419
Abgasanalyse:				
11	Gehalt k an CO ₂ %	—	—	9,0
12	Gehalt $k + o$ an CO ₂ und O ₂ %	—	—	13,3
Wärmebilanz:				
13	Im Brennstoff verfügbar Q_1 . . . 1000 kcal	55,4	52,2	51,3
14	Nachgewiesen: Leistung Q_N	17,0	18,0	17,9
15	„ im Kühlwasser Q_W	20,3	17,5	16,6
16	„ in den Abgasen Q_A	11,0	12,5	12,8
17	Fehlbetrag Δ	7,1	4,2	4,0
18	Nachgewiesen: Leistung q_N %	30,5	34,5	34,9
19	„ im Kühlwasser q_W %	36,7	33,5	32,4
20	„ in den Abgasen q_A %	19,8	24,0	25,0
21	Fehlbetrag δ %	13,0	8,0	7,7

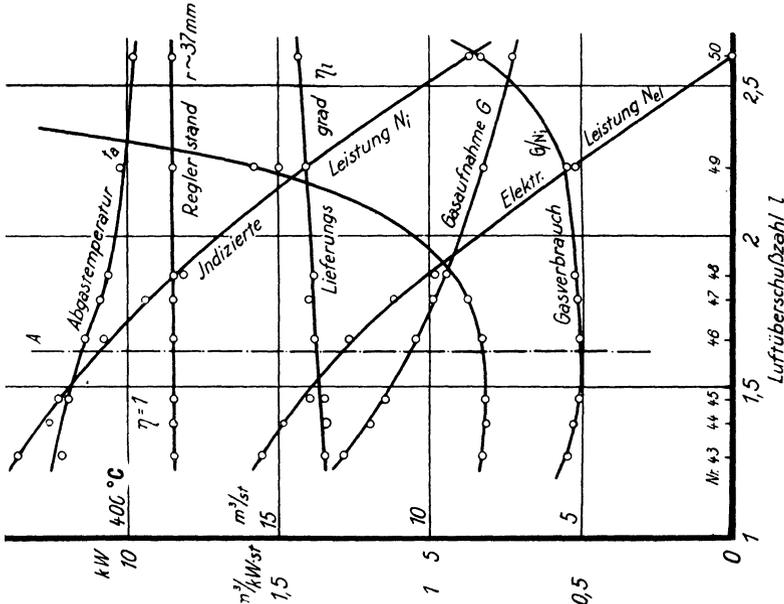


Fig. 150. Bei konstantem Belastungsgrad.

misch (Luftüberschuß).
Zünden etwa +5°.

lung unverändert			
44	46	48	50
1,38	1,66	1,87	2,60
14,8	12,7	9,6	0
37	37	37	37
12,0	10,5	9,4	7,3
0,808	0,826	0,982	2
22,6	20,8	18,1	8,7
0,525	0,504	0,520	0,835
178,8	178,3	178,8	178,4
0,672	0,692	0,691	0,719
445	429	413	396
8,5	6,6	5,7	3,7
14,0	15,3	16,1	17,8
58,0	50,9	45,7	35,3
19,4	17,9	15,6	7,4
18,7	18,0	16,1	12,4
12,5	12,2	11,7	11,4
7,4	2,8	2,3	4,1
33,5	35,2	34,0	21,1
32,3	35,4	35,2	35,3
21,6	24,0	25,6	32,3
12,6	5,4	5,2	11,3

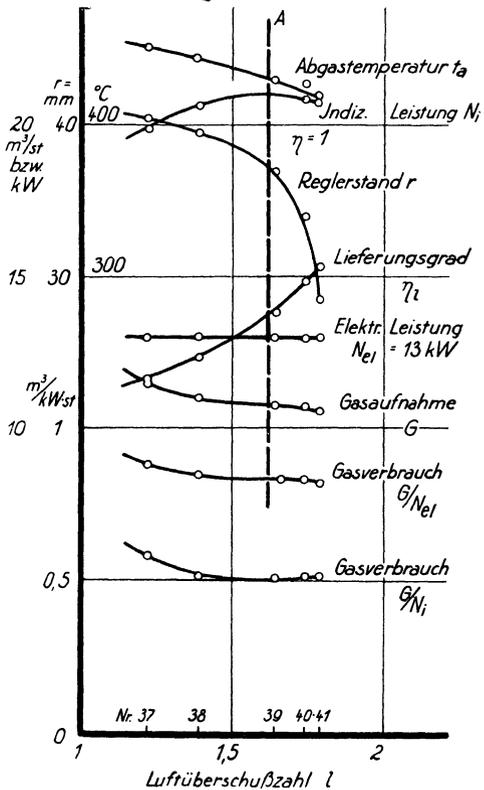


Fig. 151. Bei unveränderter Leistung.

Fig. 150 und 151. Gasmaschine bei wechselndem Mischungsverhältnis, Zündung unverändert.

die Wirtschaftlichkeit des Satzes wird also in denselben engen Grenzen verbessert. Allerdings gilt das nur bezogen auf N_{el} ; dagegen nimmt N_i in demselben Sinne ab wie G_0 , so daß sich daher G_0/N_i und der thermische Wirkungsgrad kaum verändern. Die Auspufftemperatur nimmt in etwa gleichem Maße ab, ist auch hier wieder ein Anhalt für den günstigsten Betrieb. Der Regler geht abwärts und fällt bereits so schroff,

daß demnach die Leistung $N_{el} = 13 \text{ kW}$ nur bei Luftüberschüßzahlen bis zu $l = 1,8$ erreichbar ist.

Wird andererseits der Reglerstand festgehalten, Fig. 150, so daß demnach die Füllung und der volumetrische Wirkungsgrad unverändert bleiben, so fällt mit zunehmendem Luftüberschüß die Leistung, natürlich aber auch die Gasaufnahme. Beides geschieht in solchem Verhältnis, daß der Gasverbrauch G_0/N_i und ähnlich G_0/N_{el} über einen weiten Bereich hin fast konstant bleiben; bei sehr großem Luftüberschüß allerdings nimmt die Wirtschaftlichkeit ab, und zwar muß G_0/N_{el} bei $l = 2,6$ unendlich werden, weil dort $N_{el} = 0$ ist. Die Abgastemperatur t_a ist nicht, wie bei unveränderter Leistung, ein Zeichen der Wirtschaftlichkeit; sie nimmt dauernd ab.

Die Wärmebilanzen, Tabelle 55, bieten nichts Besonderes.

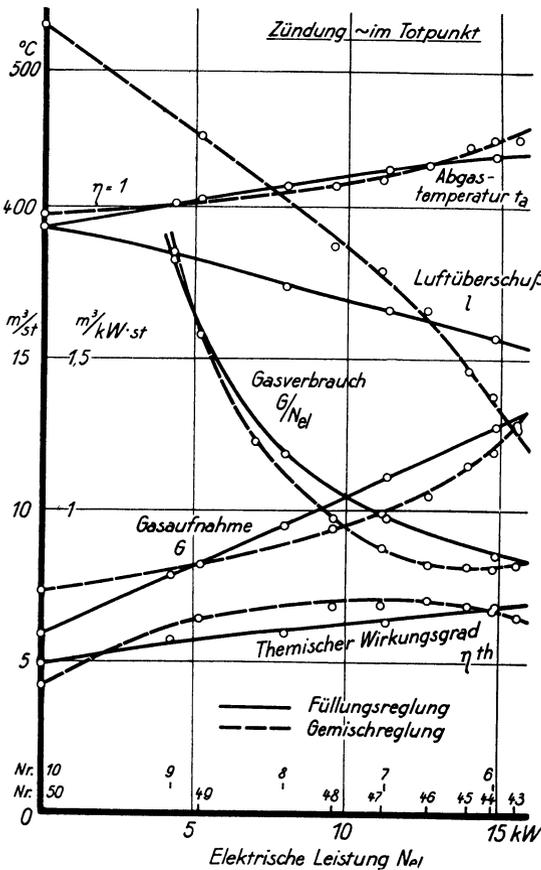


Fig. 152. Vergleich zwischen Füllungs- und Gemischregelung an der Gasmachine.

Die letzte Reihe (Versuch 43 bis 50) entspricht der als Qualitäts- oder Gemischregelung bezeichneten Regelungsart der Gasmachine; man bezeichnet dann die Regelung durch Beeinflussung des volumetrischen Wirkungsgrades als Quantitäts- oder Füllungsregelung, wie solche — nicht ganz rein — in den Versuchen 6 bis 10, § 90, 93 und 95, vorkam. Bei der Gemischregelung wird nur der Brennstoff, bei der Füllungsregelung wird auch die Luft vom Regelorgan — bei Versuch 43 bis 50 nicht selbsttätig — beeinflußt.

Einen Vergleich zwischen Füllungs- und Gemischregelung gibt Fig. 152. Die dargestellten Kurven sind im Grundcharakter ähnlich. Doch ist

für Füllungsregelung das Verhältnis der Leerlauf- zur vollen Gas-aufnahme günstiger als bei der Gemischregelung. Hierauf hat man bei einem Vergleich mehr Wert zu legen als auf die Tatsache, daß die Verbrauchszahlen für einen großen Teil des Verlaufes bei Füllungsregelung höher liegen. Bei zeitlich auseinanderliegenden Reihen darf man hieraus nichts Wesentliches schließen; müßten doch eigentlich bei 12,5 kW Leistung, wo die Luftüberschüsse einander gleich sind, alle Kurven sich kreuzen. An dieser Unstimmigkeit scheint weder ein Meßfehler noch eine Änderung der Getriebeverluste schuld zu sein; denn der Gang stimmt bei G_0/N_{el} und bei η_{th} (also G_0/N_i) überein und selbst bei t_a .

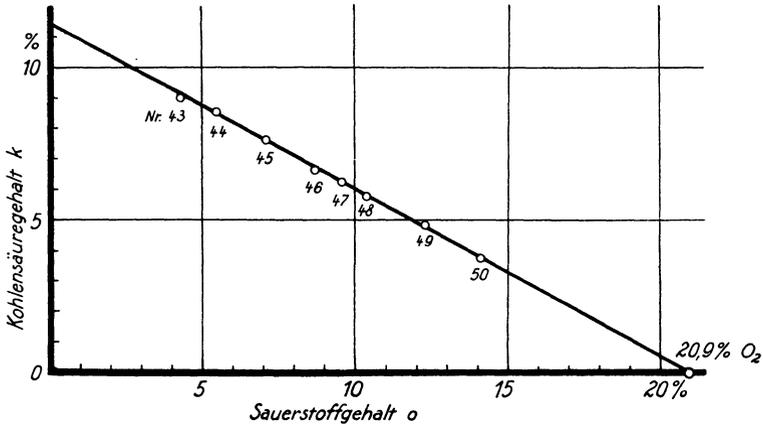


Fig. 153. Rauchgasanalyse der Gasmaschine bei wechselndem Mischungsverhältnis.

100. Abgaszusammensetzung nach dem Mischungsverhältnis. Für häufigere Versuche mit dem gleichen Brennstoff spart man viel Rechenarbeit, indem man aus allgemeinen Gesetzen die Zusammensetzung der Abgase für jedes Mischungsverhältnis von vornherein findet.

In Fig. 153 sind die Gehalte k und o der Abgase an CO_2 und O_2 dargestellt; aus bekannten Gründen (Techn. Mess. § 18) ergibt sich eine Gerade, für dieses Gas mit der Gleichung

$$\frac{o}{20,9} + \frac{k}{11,4} = 1 \dots \dots \dots (18)$$

Hierin ist die Zahl $k_{\max} = 11,4$ ein Kennzeichen des gerade vorliegenden Brennstoffes, abhängig von seinem Gehalt an nicht ausgeglichenem Wasserstoff, aus Fig. 153 gefunden.

Daneben hat man die Gleichung für die Luftüberschußzahl

$$l = \frac{n}{n - \frac{79,1}{20,9} \cdot o} \dots \dots \dots (19)$$

endlich ist

$$k + o + n = 100 \dots \dots \dots (20)$$

Aus diesen 3 Gleichungen mit 4 Unbekannten folgen die Beziehungen:

$$k = \frac{10,17}{l - 0,107} \dots \dots \dots (21)$$

$$o = \frac{88,6 \cdot (l - 1)}{4,24 \cdot l - 0,455} \dots \dots \dots (22)$$

$$n + o = \frac{100 \cdot l - 20,9}{l - 0,107} \dots \dots \dots (23)$$

die aus l die gesamte Zusammensetzung der trocken gedachten Rauchgase ergeben. Sie sind wegen Benutzung der Zahl 11,4 nur für diesen Brennstoff gültig.

Der Luftüberschuß l aber findet sich, wenn man L_0 und G_0 gemessen hat, aus

$$l = \frac{L_0/G_0}{L_1} \dots \dots \dots (24)$$

darin L_1 die theoretisch erforderliche Luftmenge, die aus der Elementaranalyse stöchiometrisch oder aus einigen Gasanalysen bekannt sein

Tabelle 56. Ermittlung des notwendigen Luftbedarfs L_1 .

Versuch Nr.		43	44	45	46	47	48	49	50
1	Gasaufnahme G_0 . . . m ³ /h	12,9	12,0	11,5	10,5	9,95	9,43	8,22	7,27
2	Luftaufnahme L_0 . . . "	76,8	77,9	79,0	81,9	83,9	83,1	86,0	88,7
3	Mischungsverhältnis L_0/G_0 -	5,96	6,51	6,87	7,80	8,43	8,81	10,46	12,20
Abgasanalyse:									
4	Gehalt k an CO ₂ %	9,0	8,5	7,6	6,6	6,2	5,7	4,8	3,7
5	" o an O ₂ %	4,3	5,5	7,1	8,7	9,6	10,4	12,3	14,1
6	" n an N ₂ %	86,7	86,0	85,3	84,7	84,2	83,9	82,9	82,2
7	Luftüberschuß lt. Analyse -	1,23	1,32	1,46	1,64	1,76	1,89	2,28	2,85
8	Theor. Luftbedarf $L_1 = \frac{L_0}{l G_0}$ -	4,85	4,93	4,70	4,76	4,79	4,66	4,59	4,28
Durchschnitt: 4,70 $\frac{\text{m}^3 \text{Luftbedarf}}{\text{m}^3 \text{Brennstoff}}$, also									
9	Luftüberschuß $l = \frac{L_0}{4,70 \cdot G_0}$ -	1,27	1,38	1,46	1,66	1,79	1,88	2,22	2,60

muß. Aus den Messungen der Tabelle 55 folgt z. B. die Rechnung der Tabelle 56. Nachdem in ihr aus dem Durchschnitt von 8 Analysen der theoretische Luftbedarf für die Verbrennung von 1 m³ Brennstoff zu 4,70 m³ festgestellt ist, berechnet sich nun der Luftüberschuß nach der Formel

$$l = \frac{L_0}{4,70 \cdot G_0} \dots \dots \dots (25)$$

genauer als aus der einzelnen Analyse, vorausgesetzt, daß die Messung von L_0 mittels einer Luftpumpe genauer erfolgen konnte als die meist nur mäßige Genauigkeit der Analyse es gestattet. In Tabelle 55, Zeile 1 sind deshalb auch die Endergebnisse, Zeile 6, von Tabelle 56 wiedergegeben und nicht die vorher ermittelten Zahlen aus der Analysenberechnung, Zeile 4 der Tabelle 56, die unmittelbar aus der einzelnen Analyse, Tabelle 55, Zeile 11 und 12 folgen würden. Endlich wird noch

(§ 97) der Wasserdampfgehalt der Abgase, der über 100% überschießt, so daß $100 + w$ das gesamte Volumen derselben ist,

$$w = \frac{1}{0,0386 \cdot l - 0,0002} \approx \frac{25,9}{l} \dots \dots \dots (26)$$

Bei den Versuchen Nr. 37 bis 41, Tabelle 55, und bei den anderen von uns wiedergegebenen Reihen, außer Nr. 43 bis 50, war bereits die Zusammensetzung der Abgase und daraus ihr Wärmehalt in dieser Weise berechnet, unter Messung von L_0 und G_0 , ohne Rauchgasanalyse. Man kann aber auch umgekehrt analysieren und die oft schlecht zu bewirkende L_0 -Messung fortlassen; dann ist aber L_1 ein mal festzustellen, entweder aus einer Elementaranalyse — auf die ja unser Verfahren herauskommt — oder durch Verbrennen eines kleineren Quantums, z. B. in einem Brenner, unter Messung der Luftmenge. Theoretisch genügt ja die Bestimmung eines einzigen Punktes der Geraden Fig. 153, um in Verbindung mit dem Punkt 20,9% O_2 die Gerade festzulegen; die Bestimmung einiger Punkte wird sich immerhin empfehlen.

101. Abgleichung von Mischung und Zündzeitpunkt gegeneinander. Die Diagramme für wechselnde Mischung, Fig. 151, und für wechselnden Zündzeitpunkt, Fig. 145 und 147, zeigen im Gange eine gewisse Ähnlichkeit miteinander; durch beide Änderungen kann man das Diagramm spitzer und flacher gestalten. Man kann also auch beide Bestimmungsstücke so gegeneinander abgleichen, daß sie miteinander die jeweils günstigsten Verhältnisse geben. Als Kennzeichen kann man ein gewisses Maß von Unruhe im Maschinengang ansprechen oder auch eine gewisse für günstig gehaltene Diagrammform. Letzteres Verfahren ist weniger subjektiv, wir ziehen es deshalb vor und verändern die beiden genannten Größen miteinander so, daß der Abstand vom Diagrammanfang (links in Fig. 154) bis zum Höchstdruck etwa unverändert bleibt. Dazu muß natürlich die Zündung um so früher erfolgen, je weniger schnell das Gemisch durchschlägt, je weniger brisantes ist, das heißt also je weiter wir vom Luftüberschuß $l = 1$ entfernt sind.

Fig. 154 zeigt, daß bei brisantestem Gemisch und Spätzündung (Nr. 29 und 31) Diagramme entstehen, die normalen recht ähnlich sind, nur daß einzelne Selbst-(Früh-)zündungen des brisanten Gemisches dazwischen kommen und die Maschine hörbar heftig stoßen lassen. Immerhin sind auch die nicht vorgezündeten Diagramme deutlich von normalen zu unterscheiden, sie zeigen die Spätzündung.

Die Reihe Fig. 154, zu der Tabelle 57 und Fig. 155, 156 die übrigen Daten geben, erstreckt sich nicht nur über den Bereich des Luftüberschusses, sondern umfaßt auch den Fall des Luftmangels, des Brennstoffüberschusses. Man kann diesen Fall durch einfaches weiteres Abdrosseln des Luftzutrittes herbeiführen und hat nur darauf bedacht zu sein, im Übergang keine zu großen Stöße in die Maschine kommen zu lassen. Man braucht dazu den Übergang nur plötzlich zu machen. Weitere Gefahren sind mit der Arbeitsweise nicht verbunden, außer daß nun durch Undichtheiten der Auspuffleitung merkliche Mengen unverbrannten oder unvollkommen verbrannten Gases austreten und giftig wirken können. Der Versuch mit Brennstoffüberschuß ist insofern

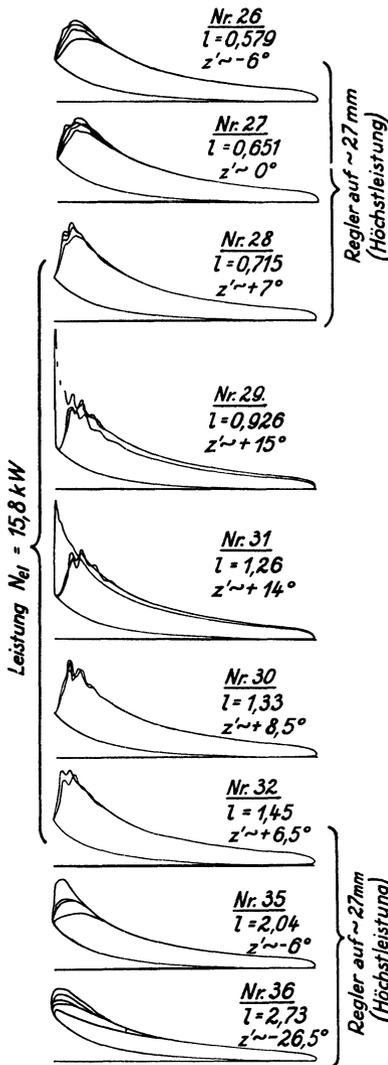


Fig. 154. Gasmaschine bei Veränderung des Mischungsverhältnisses und zugleich des Zündungzeitpunktes, auf gute Diagrammform geregelt. $\frac{2}{5}$ nat. Gr.

starke Stöße in der Maschine zu vermeiden, mußten in der Mitte, nahe $l = 1$, einige Punkte mit gleichbleibender Leistung eingefügt werden.

In Fig. 155 sieht man, daß die Zündung gut gesetzmäßig, und zwar linear mit l gehend, geändert wurde, indem man einfach auf Konstanz des Spitzenabstandes achtete; ebenso steigen die Leistungen linear mit abnehmendem Luftüberschuß. Die Gasaufnahme dagegen geht einfach mit l nach der Beziehung

Tabelle 57. Verhalten einer Gas- und der

Versuch Nr.	
1	Luftüberschußziffer l
2	Zündungszeit (Abreißen) z °
3	Elektrische Leistung N_{el} kW
4	Reglerstand r mm
5	Gasaufnahme reduziert G_0 m ³ /h
6	Gasverbrauch G_0/N_{el} m ³ /kW · h
7	Indizierte Leistung N_i kW
8	Thermischer Wirkungsgrad $\eta_{th} = \frac{859 \cdot N_i}{4850 \cdot G_0}$ —
9	Drehzahl n /min
10	Lieferungsgrad η_l —
11	Abgastemperatur t_a °C
12	Luftaufnahme reduziert L_0 m ³ $\left(\frac{0}{760}\right)$ /h
13	Luftverbrauch L_0/N_{el} m ³ /kW · h
14	Thermischer Wirkungsgrad $\eta'_{th} = \frac{859 \cdot N_i}{1030 \cdot L_0}$ —
15	Mischungszahl $\frac{1}{1+l}$ —
Wärmebilanz:	
16	Im Brennstoff verfügbar Q_1 1000 kcal/h
17	Nachweisbar als indiziert Q_N „
18	„ im Kühlwasser Q_W „
19	„ in Abgasen Q_A „
20	„ als indiziert q_N %
21	„ im Kühlwasser q_W „
22	„ in Abgasen q_A „
23	Fehlbetrag δ „

nicht nur theoretisch von Bedeutung, als schnelllaufende, insbesondere Auto- und Flugmotoren normal mit Luftmangel arbeiten.

Die Reihe Tabelle 57, Nr. 26 bis 36, sollte bei unverändertem Reglerstand durchgeführt werden; um jedoch zu

maschine bei gleichzeitiger Veränderung des Gemisches Zündungszeit.

Reglerstellung unverändert						Reglerstellung unverändert		
26	27	28	29	30	31	32	35	36
0,579	0,651	0,715	0,926	1,26	1,33	1,45	2,04	2,73
—32	—26	—19	—9	—12	—15,5	—19,5	—32	—52,5
13,8	15,2	15,9	15,8	15,8	15,8	15,3	11,0	5,8
26,5	28,0	27,0	35,5	31,5	30,5	27,5	28,5	27,5
			Luftmangel			Luftüberschuß		
24,7	22,2	20,4	16,8	13,7	13,1	12,3	9,5	7,4
1,79	1,46	1,28	1,06	0,86	0,83	0,80	0,86	1,28
20,8	22,0	23,2	23,6	23,6	23,1	23,1	18,1	12,8
0,149	0,175	0,201	0,249	0,307	0,312	0,333	0,338	0,307
172,0	173,3	172,3	177,5	176,3	176,0	172,3	173,8	173,3
0,714	0,705	0,706	0,675	0,714	0,723	0,746	0,772	0,791
414	452	472	490	491	481	462	392	339
67,2	69,3	70,6	73,0	80,5	82,2	83,9	91,0	95,2
4,87	4,56	4,44	4,62	5,09	5,20	5,48	8,28	16,4
0,258	0,265	0,274	0,270	0,244	0,234	0,230	0,166	0,112
0,633	0,605	0,583	0,519	0,442	0,429	0,408	0,329	0,268
Leistung unverändert								
119,9	107,8	98,7	81,4	66,2	63,7	59,6	46,0	35,9
17,9	18,9	19,9	20,2	20,3	19,8	19,8	15,6	11,0
18,5	19,8	21,1	23,4	21,5	22,0	20,0	15,6	12,4
—	—	—	—	14,7	14,4	13,9	11,9	10,3
14,9	17,5	20,4	24,8	30,7	31,2	33,3	33,8	30,7
15,4	18,4	21,6	28,8	32,5	34,5	33,6	33,9	34,7
—	—	—	—	21,8	23,1	23,3	26,0	28,7
—	—	—	—	15,0	11,2	9,8	6,3	5,9

$$G_0 = \frac{\frac{1}{2} n \cdot V_h}{4,70 \cdot l + 1},$$

worin V_h das Hubvolumen und 4,70 das theoretische Mischungsverhältnis ist; G_0 ist deshalb, und weil auch mit der Temperatur der Abgase der Lieferungsgrad etwas wechselt, hyperbelähnlich gekrümmt. Hiernach haben die Wirtschaftlichkeitskurven G_0/N_i und G_0/N_{el} Bestwerte rechts von $l = 1$, und zwar liegt bezogen auf die indizierte Leistung ein flacher Bestwert bei etwa $l = 2$, bezogen auf die elektrische Leistung liegt er, wegen der größeren Leistungsausbeute, bei $l = 1,5$ und ist schärfer ausgeprägt.

Bezüglich der Darstellung kann folgendes bemerkt werden: Wärmetheoretisch besteht zwischen den beiden Mitwirkenden beim Verbrennungsvorgang, dem Brennstoff und der Luft, kein Unterschied zugunsten des ersteren; beide reagieren miteinander, und zwar am

besten bei $l = 1$; daher erzielen wir bei $l = 1$ trotz geringsten Lieferungsgrades die höchste Leistung. Praktisch liegen die Verhältnisse so, daß der Brennstoff Geld kostet, die Luft nicht, und nur deshalb ist uns die Gasaufnahme und der Gasverbrauch wesentlich, nicht aber die Luftaufnahme und der Luftverbrauch. Auch die Anwendung der Luftüberschußzahl $l = \frac{L_0}{4,70 \cdot G_0}$ als Abszisse bevorzugt den einen der beiden Bestandteile, da l von L_0 linear, von G_0 aber hyperbolisch ab-

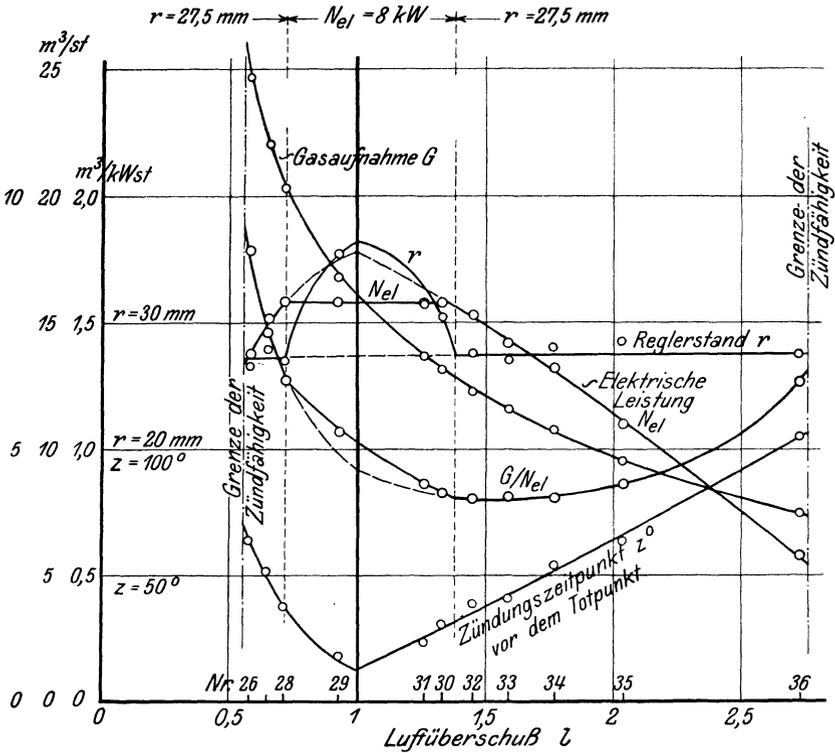


Fig. 155 und 156. Verhalten der Gasmaschine bei Veränderung

hängt. Praktischen Verhältnissen wird also Fig. 155 gerecht, theoretischen entspricht besser Fig. 156, wo links nicht l , sondern $1/l$, der Gasüberschuß aufgetragen ist. Die Kurven erhalten dann sämtlich bei $l = 1$ einen Knick, aber der symmetrische Verlauf der z - und der N -Kurven spricht für die theoretisch bessere Darstellungsweise.

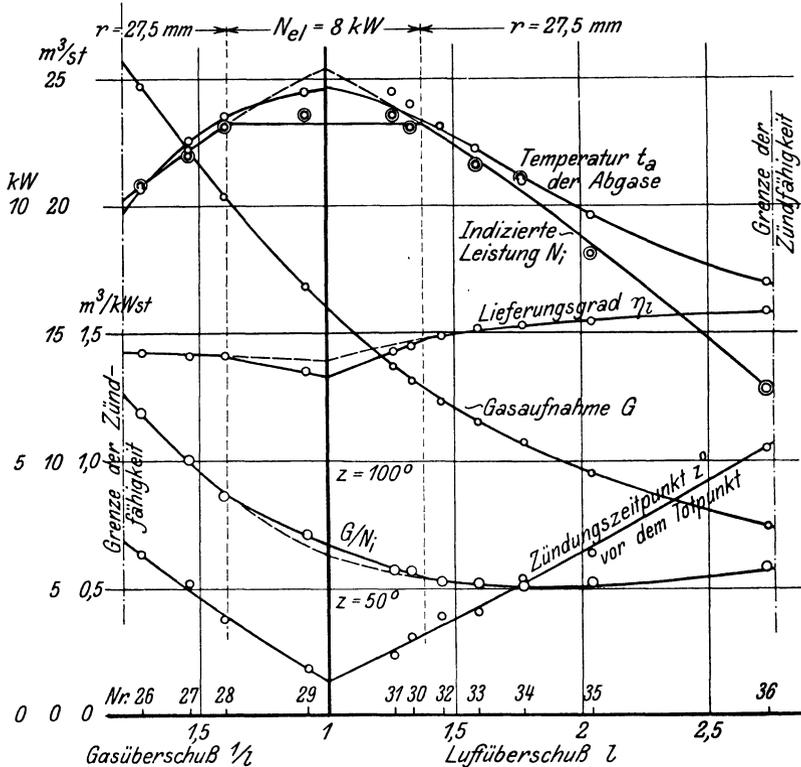
Es ist auch wärmetheoretisch unbegündet, den thermischen Wirkungsgrad gerade durch $\eta_{th} = \frac{859 \cdot N_i}{4850 \cdot G_0}$ zu definieren; ebenso berechtigt ist es, $\eta'_{th} = \frac{859 \cdot N_i}{1030 \cdot L_0}$ anzusetzen, worin $1030 \text{ kcal/m}^3 \left(\frac{0}{760} \right)$ die Ver-

bindungswärme, gewissermaßen der Heizwert der in Gas verbrennenden Luft ist. Es gilt nämlich

$1 \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right) \text{ Gas} + 4,70 \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right) \text{ Luft} = 5,70 \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right) \text{ Abgas} + 4850 \text{ kcal}$
 oder durch Division mit 4,70:

$1 \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right) \text{ Luft} + 0,213 \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right) \text{ Gas} = 1,21 \text{ m}^3 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 760 \end{smallmatrix} \right) \text{ Abgas} + 1030 \text{ kcal}.$

Der thermische Wirkungsgrad auf Luft bezogen ist in Tabelle 57 auch berechnet und in Fig. 158 mit dem auf Gas bezogenen verglichen. Als



des Mischungsverhältnisses und der Zündung.

Abszisse dient die Mischungszahl $\mu = \frac{1}{1+l}$, die die beiden reagierenden

Bestandteile ganz gleich behandelt: sie wird $\mu = 0$ für $l = \infty$, also für $G = 0$; sie wird $\mu = 1$ für $l = 0$, also $L = 0$; und zwischen 0 und 1 wird das theoretische Mischungsverhältnis, $l = 1$, gerade durch $\mu = 0,5$ dargestellt. — Es zeigt sich, daß der auf Luft bezogene Wirkungsgrad etwas schlechter ist als der auf Gas bezogene.

Auch die Wärmebilanz, deren Hundertteile in Tabelle 57 auf den Heizwert des Gases bezogen wurden, könnten statt dessen auf den Heizwert der Luft bezogen werden.

Die Grenze der Versuchsreihe nach beiden Seiten hin ist dadurch gegeben, daß zunächst einzelne Zündungen, dann alle ausbleiben, wenn der Luftüberschuß über 2,76 oder der Gasüberschuß über 1,8

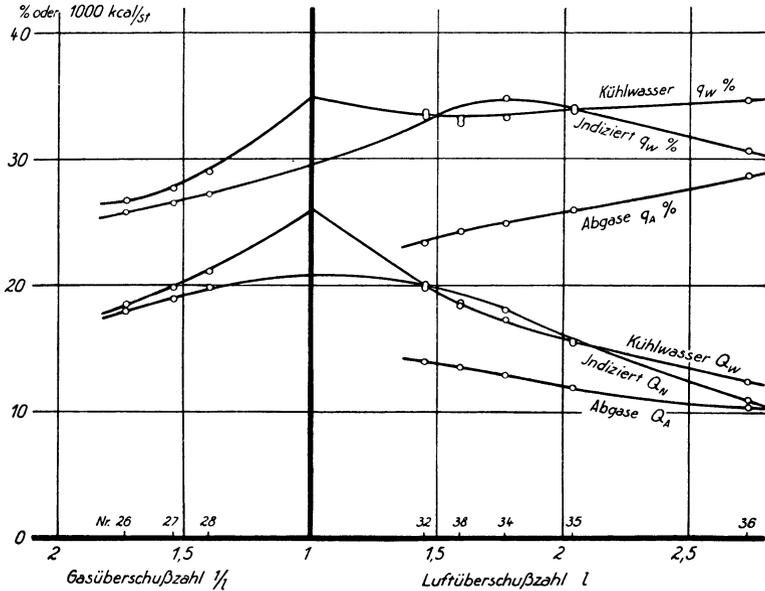


Fig. 157. Wärmeverbleib der Gasmaschine bei Veränderung des Mischungsverhältnisses und des Zündungszeitpunktes.

steigt. Dem entsprechen Mischungszahlen $\frac{1}{1+l}$ zwischen 0,266 und 0,643 oder Mischungsverhältnisse $L_0 : G_0$ zwischen 13,0 und 2,9.

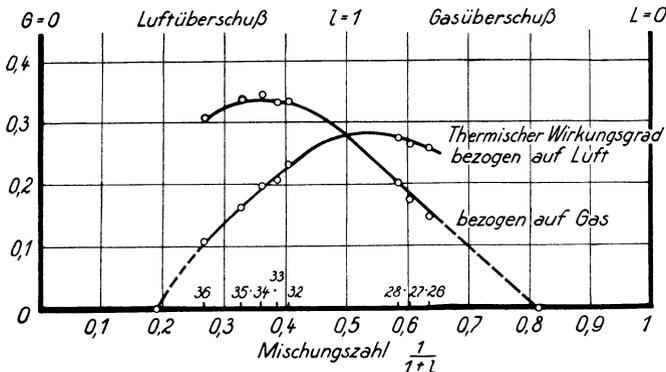


Fig. 158. Thermischer Wirkungsgrad der Gasmaschine, bezogen auf Gas oder bezogen auf Luft.

102. Einfluß der Drehzahl. Die Drehzahl der Verbrennungskraftmaschine wird, wenn sie einen Regler hat, durch diesen bestimmt, solange der Regler in seinem wirksamen Bereich spielt. Eine Änderung

der Drehzahl ist möglich, indem man die Reglerhülse im einen oder anderen Sinn durch angehängte Gewichte beschwert. Man kann die Gewichte, nötigenfalls durch Rolle und Schnur umgelenkt, an einen der Drehbolzen hängen. Passende Gewichtsgröße ermittelt man durch Proben.

Ein angehängtes Gewicht bewirkt, daß einer bestimmten Stellung des Reglers und daher des regelnden Drosselorganes eine andere Drehzahl zugeordnet wird als bisher. Zieht das Gewicht die Reglerhülse abwärts, so ist eine höhere Drehzahl zum Heben der Hülse nötig. — Bei Achsreglern und selbst bei den altmodischen Pendelreglern kann man entsprechend verfahren.

Belastung durch eine Feder statt durch ein Gewicht ist weniger gut, weil dadurch die Hülse nicht gleichmäßig, sondern mit steigender Kraft belastet wird; der Ungleichförmigkeitsgrad der Regelung steigt. Man verwende jedenfalls eine lange, schwache und relativ stark vorgespannte Feder, damit sich die Federkraft im verwendeten Bereich nur wenig ändert.

Tabelle 58, Fig. 159 und 160 geben zwei Versuchsreihen wieder mit steigender Drehzahl, bei denen einmal die elektrisch abgegebene Leistung konstant blieb, während ein zweites Mal der Regler auf den Zustand des Absinkens eingestellt wurde, entsprechend der Höchstleistung der Maschine. In diesem Bereich, $r = 27$ bis 30 mm Hülsenerhebung, machen bei dieser Maschine selbst erhebliche Bewegungen der Reglerhülse kaum mehr etwas aus (§ 152).

Die Diagramme der *Reihe mit konstanter Leistung* zeigt Fig. 161. Das Abreißen der Zündung war nicht verändert worden; von da zum Zünden verläuft stets die gleiche Zeit, rd. $\frac{1}{40}$ s (§ 98), die aber bei langsamem Gang einem kleineren Drehwinkel entspricht. Auch die Verbrennung verläuft zeitlich immer gleich, beansprucht also weniger Kurbelwinkel im langsamen Gang. Beides wirkt dahin, daß bei langsamem Gang, Versuch 13, das Diagramm spitzer wird als bei der höheren Drehzahl, Versuch 17; die Verbrennung sieht brisanter aus, ohne es zu sein. Im Schwachfederdiagramm sehen wir an der Zahl der Schwingungen, die die Gassäule der Auspuffleitung während eines Hubes macht, daß die Drehzahl gewechselt hatte: die sekundliche Schwingungszahl der Säule bleibt konstant, abgesehen von der Dichteänderung des Gases durch die andere Temperatur.

Mit der Drehzahl sinkt die Gasaufnahme auch bei konstanter elektrischer Leistung. Der Gasverbrauch, auf die elektrische Leistung bezogen, ist bei der um 27% geringeren Drehzahl um 16,5% günstiger. Nicht die Wirtschaftlichkeit des Betriebes berechtigt uns also zur Wahl der hohen Drehzahl, sondern nur die höhere Leistungsausbeute und daher die wirtschaftlichere Beschaffung: diese steigt von 13,5 auf 14,8 kW, um 10%, wenn die Drehzahl von 153 auf 186, um 17,5%, fällt. Die Arbeitsausbeute steigt also in etwa gleichem Maße, wie die Wirtschaftlichkeit sinkt.

Wenn man dauernd die volle Leistung nicht nötig hat, so ist es stets lohnend, zu prüfen, ob nicht durch Herabsetzung der Drehzahl

wesentliche Ersparnisse zu machen sind, zum Beispiel bei Wasserpumpenmaschinen, solange sie, kurz nach Erbauung des Werkes, sehr reichlich gewählt zu sein pflegen mit Rücksicht auf die späterhin zu erwartende Zunahme des Bedarfes. Dieser Zunahme wird man dann am wirtschaftlichsten durch gelegentliche Heraufsetzung der Drehzahl gerecht.

Die Ersparnisse sind, auf konstante Leistung bezogen, nur in den Getriebeverlusten begründet. Denn der Verbrauch G_0/N_i bleibt unverändert. Auf Höchstleistung bezogen, ist es nicht ganz so.

Bei wechselnder Drehzahl bietet neben der Leistung stets der Verlauf des Drehmomentes Interesse. Bei Höchstleistung tritt das hervor,

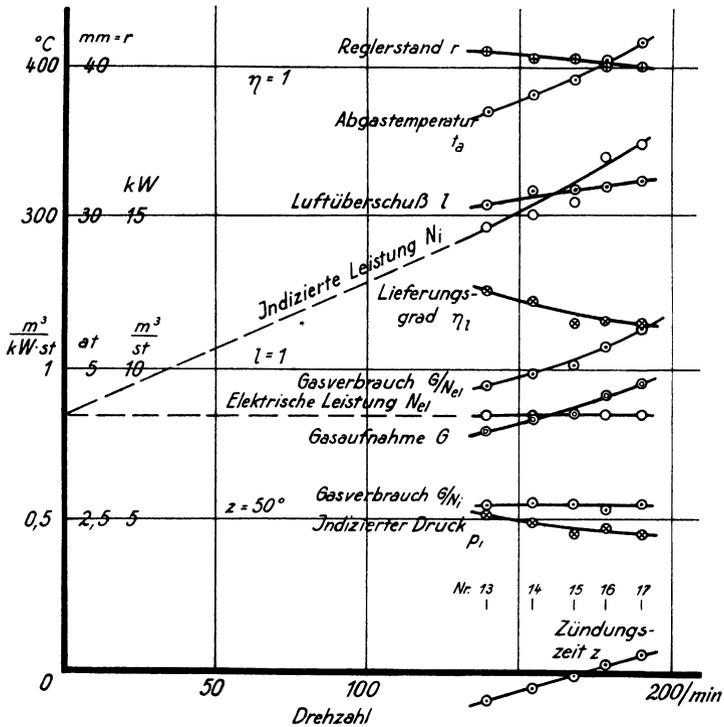


Fig. 159. Leistung konstant.

Fig. 159 und 160. Gasmaschine bei veränderlicher

was wir als Momentencharakteristik zu bezeichnen pflegen (§ 4); das Moment fällt mit steigender Drehzahl langsam ab, während natürlich die Leistung ansteigt. Die Leerlaufdrehzahl wäre etwa bei $n = 400/\text{min}$ zu erwarten.

Der *Getriebeverlust* an Drehmoment ist etwa konstant, der an Leistung steigt also an.

In der Wärmebilanz, Tabelle 58 und Fig. 162 und 163, steigt mit sinkender Drehzahl der ins Kühlwasser gehende Anteil prozentual stark

an: es steht mehr Zeit zum Übergang zur Verfügung. Entsprechend sinkt prozentual das, was in den Abgasen bleibt, entsprechend der sinkenden Abgastemperatur. Deren Verringerung darf jetzt nicht wie beim wechselnden Zündungszeitpunkt (§ 98) auf Erreichung wirtschaftlichster Verhältnisse — größte Wärmeentziehung zur Umwandlung in Arbeit — gedeutet werden, da eben die verschiedene, für den Hub verfügbare Zeit außerdem einen maßgebenden Einfluß übt.

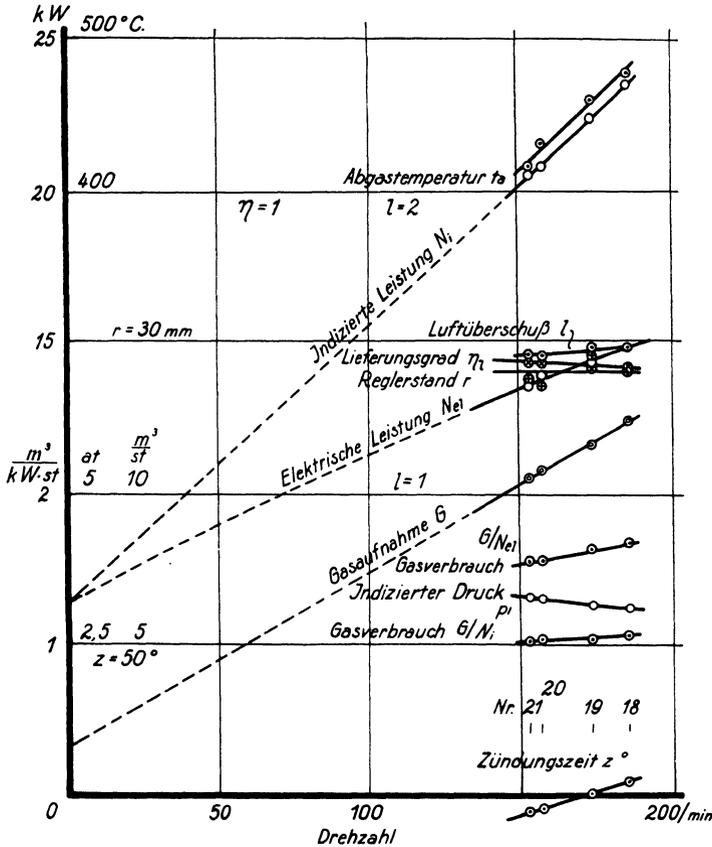


Fig. 160. Belastungsgrad konstant. Drehzahl, Abschneiden der Zündung unverändert.

Die vorstehenden Ergebnisse würden sich merklich ändern, wenn sich nicht der Zündungszeitpunkt automatisch in dem — allerdings sachlich ganz berechtigten — Sinne geändert hätte, den wir besprochen, wenn also entweder Kerzenzündung angewendet worden oder aber das Abreißen passend nachgestellt worden wäre.

Über den Einfluß sehr hoher Drehzahlen vergleiche § 112.

103. Einfluß der Kühlwassermenge. In den besprochenen Versuchsreihen blieb die den Mantel durchfließende Wassermenge unverändert;

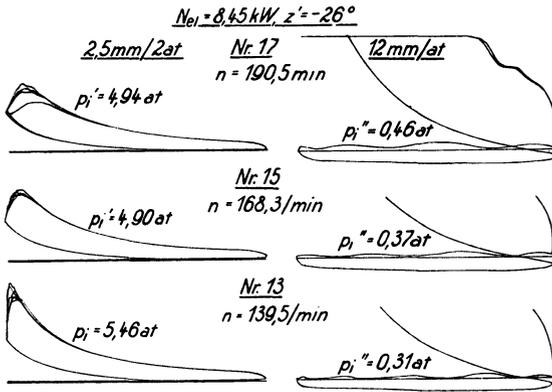


Fig. 161. Diagramme der Gasmachine bei wechselnder Drehzahl. $\frac{2}{5}$ nat. Gr.

nur bei den Versuchen Nr. 83 bis 87, Tabelle 60, ist auf konstante Ablauftemperatur (ohne besondere Absicht) geregelt worden. Es fragt sich, ob durch anderweitige Versuchsausführung die Ergebnisse wesentlich geändert worden wären. Diese Frage beantworten Fig. 164 und 165, sowie Tabelle 59.

Die Versuche sind nicht zahlreich genug, sind auch durch eine Unregelmäßigkeit gestört, die in allen Ablesungen des Versuches Nr. 24 zu stecken scheint (Regler zu hoch, entsprechend Gasmenge und indizierte Leistung zu klein, während allerdings auch N_{el} etwas zu klein gehalten wurde). Immerhin erkennt man: Wenn bei

Die Versuche sind nicht zahlreich genug, sind auch durch eine Unregelmäßigkeit gestört, die in allen Ablesungen des Versuches Nr. 24 zu stecken scheint (Regler zu hoch, entsprechend Gasmenge und indizierte Leistung zu klein, während allerdings auch N_{el} etwas zu klein gehalten wurde). Immerhin erkennt man: Wenn bei

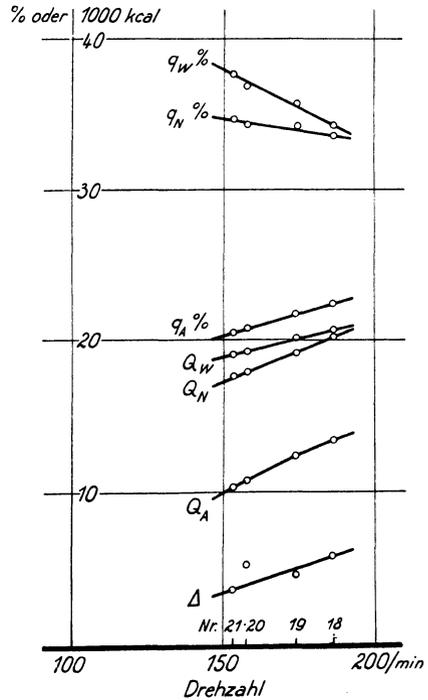
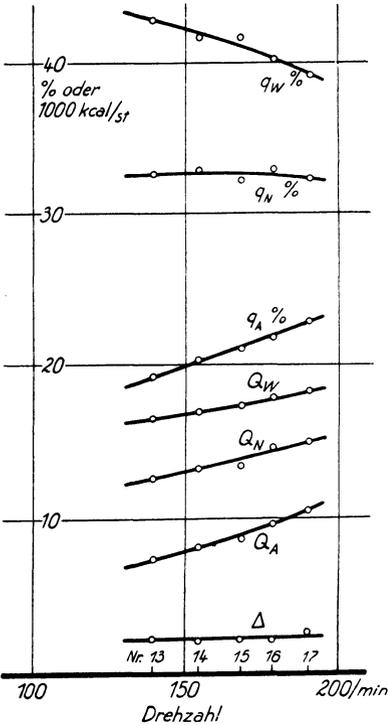


Fig. 162. Nutzleistung konstant.

Fig. 163. Belastung konstant.

Fig. 162 und 163. Wärmeverbleib der Gasmachine bei wechselnder Drehzahl, Abschneiden der Zündung unverändert.

Tabelle 58. Verhalten einer Gasmaschine bei wechselnder Drehzahl.

Abreißen der Zündung unverändert, Zündungszeit ändert sich.

Versuch Nr.		Nutzleistung konstant			Höchstleistung		
		13	15	17	21	19	18
1	Drehzahl n /min	139,5	168,3	190,5	153,1	173,8	185,9
2	Elektr. Leistung N_{el} . . . kW	8,42	8,48	8,44	13,5	14,3	14,8
3	Reglerstand r mm	41	40,5	40	27,5	29	28
4	Gasaufnahme G_0 . . . $m^3 \binom{0}{760} / h$	7,96	8,55	9,56	10,43	11,58	12,37
5	Gasverbrauch G_0/N_{el} $m^3/kW \cdot h$	0,945	1,01	1,13	0,772	0,810	0,836
6	Indizierte Leistung N_i . . . kW	14,65	15,5	17,45	20,5	22,4	23,5
7	Gasverbrauch G_0/N_i $m^3/kW \cdot h$	0,544	0,552	0,548	0,509	0,517	0,526
Indizierter Druck:							
8	Arbeitsfläche p'_i at	5,46	4,90	4,94	6,79	6,60	6,51
9	Verlustfläche p'' „	0,31	0,37	0,46	0,24	0,28	0,31
10	Wirksam p_i „	5,15	4,53	4,48	6,55	6,32	6,20
11	Moment der ind. Leistung M_i mkg	102	90	89	130	125	123
12	„ „ el. Leistung M_{el} „	59	49	43	86	80	77,5
Getriebeverlust:							
13	in Leistung $N_i - N_{el}$. . . kW	62,3	7,02	9,01	7,0	8,1	8,7
14	als Moment $M_i - M_{el}$. . . mkg	43	41	46	44	45	45,5
15	Abgastemperatur t_a °C	371	391	416	408	430	439
16	Luftüberschuß l —	1,54	1,59	1,62	1,46	1,48	1,48
17	Abreißen der Zündung z' . . . °	-26	-26	-26	-26	-26	-26
18	Zündung z °	-5	-1	+2,5	-3	0	+2
19	Lieferungsgrad η_l —	0,629	0,576	0,576	0,713	0,706	0,708
20	Im Brennstoff verfügbar 1000 kcal/h	38,6	41,5	46,4	50,6	56,2	60,0
Nachgewiesen:							
21	als indiziert Q_N „	12,6	13,4	15,0	17,6	19,2	20,2
22	im Kühlwasser Q_w „	16,5	17,3	18,2	19,0	20,1	20,6
23	im Abgas Q_A „	7,4	8,7	10,6	10,3	12,3	13,4
24	Fehlbetrag Δ „	2,1	2,1	2,6	3,7	4,6	5,8
Nachgewiesen:							
25	als indiziert q_N %	32,6	32,2	32,3	34,7	34,2	33,6
26	im Kühlwasser q_w %	42,8	41,7	39,2	37,6	35,7	34,2
27	im Abgas q_A %	19,2	21,0	22,8	20,5	21,8	22,4
28	Fehlbetrag δ %	5,4	5,1	5,7	7,2	8,3	9,8

unveränderter elektrischer Leistungsabnahme die Kühlwassermenge vermindert, also die Ablauftemperatur höher wird, so läuft so der Motor wärmer. Dabei wird der Getriebeverlust $N_i - N_{el}$ merklich kleiner; das kann nur eine Folge verringerter Kolbenreibung durch Dünnerwerden des Öles sein; der erhebliche Betrag der Änderung ist erstaunlich. Bei konstanter elektrischer Leistung sinkt also die indizierte Leistung, dementsprechend steigt der Regler

und verringert die Gasaufnahme; der Lieferungsgrad wird kleiner. Bei kleiner Kühlwassermenge ist man also weiter von der Höchstleistung entfernt, oder umgekehrt, die Maschine gibt mehr Leistung her; allerdings nur Nutzleistung, denn die Ursache der Erscheinung sind die verringerten Getriebeverluste. Das erklärt auch, daß sich die Wirtschaftlichkeit, auf die Nutzleistung bezogen, merklich bessert; G_0/N_{el} geht von 0,843 auf $0,791 \text{ m}^3 \left(\frac{0}{760} \right) / \text{kW} \cdot \text{h}$, also um 6% zurück.

In bezug auf Leistung wie auf Wirtschaftlichkeit ist also der heiße Betrieb erheblich günstiger.

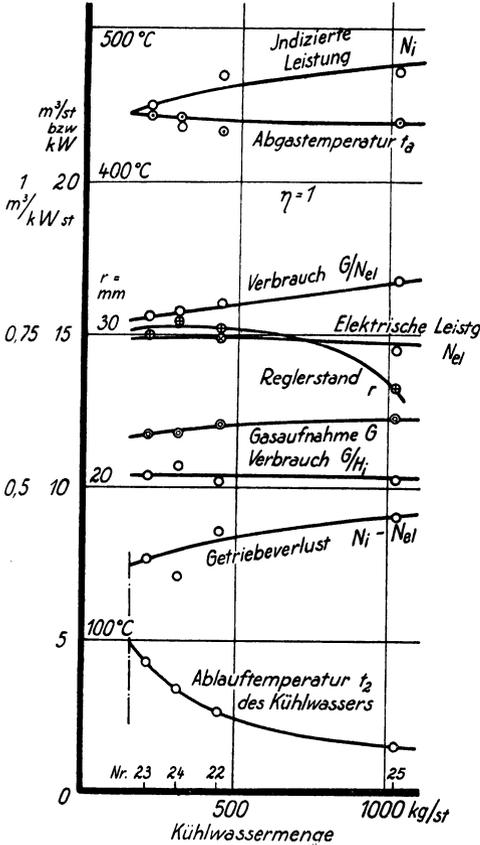


Fig. 164. Gasmachine bei wechselnder Kühlwassermenge.

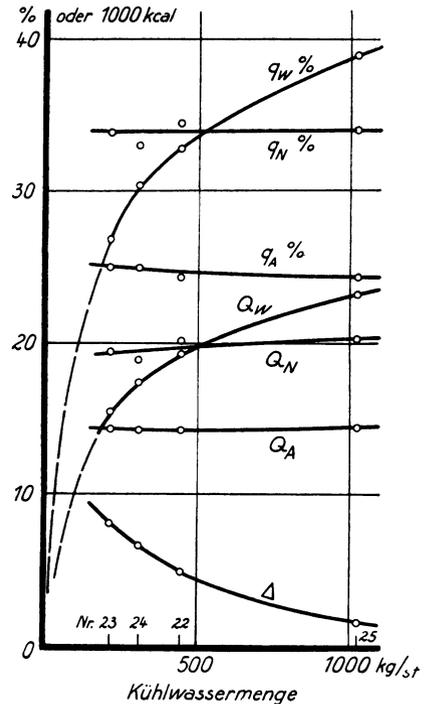


Fig. 165. Wärmeverbleib der Gasmachine bei wechselnder Kühlwassermenge.

Die Wärmebilanz (Fig. 165) zeigt das zunächst eigenartige Bild, daß der Anteil der Leistung und der Abgase unverändert bleibt, daß aber die vom Wasser genommene Wärme, nach Menge wie prozentual, bei hoher Temperatur schnell sinkt. Die Erklärung liegt im Verhalten des Fehlbetrages Δ ; der ist bei warmem Gang der Maschine viel größer. Als Ursache kann man vermuten, daß die Wärmeverluste der Maschinenoberfläche zunehmen. Wir berechneten schon in § 97,

wieviel die Maschinenoberfläche als Heizkörper an den Maschinenraum abgibt. Bei 1,3 m² Außenoberfläche, die innen von Wasser bespült sind, bei einer Wärmeabgabezahl 7 kcal/m² · h · °C und bei 20° Raumtemperatur ist die Wärmeabgabe an die Luft

$$\begin{aligned} \text{bei Versuch 23: } & 7 \cdot 1,3 \cdot 65,7 = 1250 \text{ kcal/h} \\ \text{,, ,, 25: } & 7 \cdot 1,3 \cdot 10,3 = 100 \text{ ,,} \end{aligned}$$

Zur Erklärung des in Fig. 163 nachgewiesenen Fehlbetrages reicht das bei weitem nicht.

Der Gang des Fehlbetrages bei mancher der früheren Versuchsreihen mag also in der wechselnden Ablauftemperatur des Kühlwassers seine Erklärung finden.

Tabelle 59. Einfluß der Kühlwassermenge auf den Gang der Gasmaschine.

Versuch Nr.		25	22	24	23
1	Kühlwassermenge W . . . kg/h	1026	444	308	211
2	Temperatur im Zufluß t_1 . . . °C	7,7	10,2	11,9	12,6
3	„ „ Abfluß t_2 . . . „	30,3	53,5	68,2	85,7
4	Elektrische Leistung N_{el} . . . kW	14,55	14,95	14,8	14,9
5	Indizierte Leistung N_i . . . kW	23,7	23,6	21,9	22,6
6	Getriebeverlust $N_i - N_{el}$. . . „	9,1	8,6	7,1	7,7
7	Reglerstand r mm	26,5	30,5	31	30
8	Gasaufnahme G_0 . . . m ³ ₍₇₆₀₎ /h	12,27	12,06	11,78	11,79
9	Gasverbrauch G_0/N_i . m ³ /kW · h	0,517	0,513	0,538	0,522
10	„ „ G_0/N_{el} . . . „	0,843	0,806	0,795	0,791
11	Lieferungsgrad η_i —	0,760	0,748	0,731	0,734
12	Abgastemperatur t_a °C	441	435	444	445
13	Drehzahl n /min	186,0	188,0	188,9	188,4
14	Luftüberschußzahl l —	1,63	1,64	1,66	1,66

104. Einfluß des Verdichtungsgrades. In der Verpuffungsmaschine wird das angesaugte brennbare Gemisch beim zweiten der vier Arbeitstakte verdichtet. Am Ende des Ansaugehubes steht den Gasen der sog. Kompressionsraum V_k und noch das dem Kolbenhub entsprechende Hubvolumen V_h zur Verfügung, im ganzen also $V_k + V_h$; am Ende des Verdichtungshubes sind sie auf das Volumen V_k beschränkt worden. Es hat also eine Verdichtung im Verhältnis

$$\varepsilon = \frac{V_k + V_h}{V_k} \dots \dots \dots (27)$$

stattgefunden, das heißt, dem Wortbegriff der Verdichtung entsprechend, die Moleküle sind in diesem Verhältnis dichter aneinander gerückt; die Temperatur ist für diesen Wortbegriff unwesentlich.

Bei dem Kompressionsvorgang steigt die Temperatur der Gase, und daher wächst der Druck schneller, als der Volumverminderung

entspricht. Das Druckverhältnis am Ende und Anfang des Kompressionshubes wäre bei adiabatischem Verdichtungs Vorgang bekanntlich

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_k + V_h}{V_k} \right)^\varkappa = \varepsilon^\varkappa \dots \dots \dots (28)$$

worin \varkappa das Verhältnis der spezifischen Wärmen für das brennbare Gemisch ist.

Das Hubvolumen V_h ist aus Zylinderdurchmesser und Kolbenhub ohne weiteres bekannt; es ist im allgemeinen unveränderlich. Der Kompressionsraum V_k kann dadurch ausgemessen werden, daß man die Maschine in den Totpunkt bringt, in dessen Nähe die Zündung erfolgt; in jeder Stellung sind nämlich beide Ventile geschlossen; darauf füllt man durch den Indikatorstutzen oder eine andere passend oben liegende Öffnung eine Flüssigkeit in den Kompressionsraum, am besten Öl von passender Konsistenz, um Leckverluste tunlichst zu mindern. Die Menge eingefüllten Öles wird gemessen. Auf gute Entlüftung ist natürlich zu achten. — Der Kompressionsraum ist oft veränderlich, zu dem Zweck, für verschiedene Brennstoffe jeweils das richtige Verdichtungsverhältnis herstellen zu können. Maßgebend für dessen Höhe ist nämlich einerseits, daß mit steigender Verdichtung die Wirtschaftlichkeit fortgesetzt steigt; andererseits kommt man bei der Steigerung der Verdichtung an die Grenze, wo die Endtemperatur derselben hoch genug steigt, um Selbstentzündung des Gemisches möglich und schließlich notwendig zu machen; damit kommen Stöße in das Getriebe (wie in Fig. 154, Nr. 29, 31), und man verliert die Herrschaft über den Verbrennungsvorgang. — Zur Veränderung des Verdichtungsgrades pflegen in die Schubstange Einlegestücke verschiedener Stärke gemacht zu sein, die die Länge der Stange zu ändern gestatten; sind alle Einlegestücke darin, so ist die Verdichtung am höchsten. Diese Einlegestücke sind, wie gesagt, oft planmäßig an Betriebsmaschinen vorgesehen; bei Laboratoriumsmaschinen sollte die Möglichkeit, sie anzubringen, niemals übersehen werden, die Schubstange sollte also stets geteilt sein.

Bei der Gasmaschine, auf die unsere Untersuchungen sich beziehen, galten folgende Zahlenverhältnisse:

$$\begin{aligned} & \text{Zylinderdurchmesser 260 mm, Kolbenhub 470 mm,} \\ & \qquad \qquad \qquad \text{also Hubvolumen } V_h = 24,95 \text{ l} \\ & \text{mit Öl ausgemessen: normaler Kompressionsraum } V_k = 4,20 \text{ l} \\ & \text{normales Verdichtungsverhältnis } \varepsilon = \frac{24,95 + 4,20}{4,20} = 6,94 . \end{aligned}$$

Es konnten nun zwei Paßstücke aus der Schubstange herausgenommen werden, deren Stärke wurde gemessen, und unter Beachtung des Zylinderdurchmessers ergab sich die Vergrößerung des Kompressionsraumes:

$$\begin{aligned} & \text{Paßstück 1 war 24,2 mm stark, entsprechend 1,28 l Hubraum,} \\ & \text{Paßstück 2 war 24,3 mm stark, entsprechend 1,29 l Hubraum.} \end{aligned}$$

Wenn also Paßstück 1 herausgenommen wird, so ist das Verdichtungsverhältnis

$$\epsilon' = \frac{24,95 + 4,20 + 1,28}{4,20 + 1,28} = 5,56 .$$

Nach Herausnahme beider Paßstücke ist es

$$\epsilon'' = \frac{24,95 + 4,20 + 1,28 + 1,29}{4,20 + 1,28 + 1,29} = 4,69 .$$

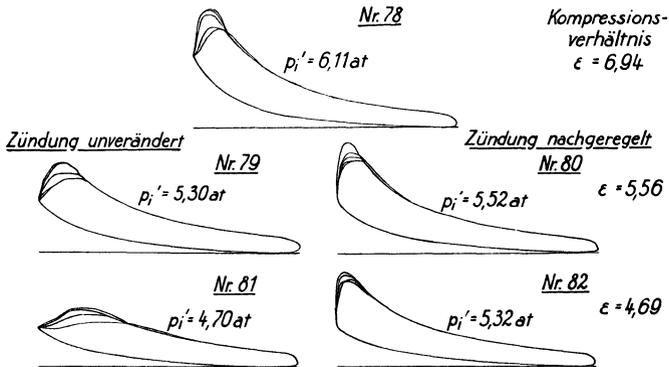


Fig. 166. Diagramme der Gasmachine bei verschiedenem Verdichtungsverhältnis, Belastungsgrad unverändert. 3,5 mm/2 at, $\frac{2}{3}$ nat. Gr.

Versuchsreihen, die hiernach mit diesen Beilagen immer nur drei Versuche umfassen können, lassen sich mannigfach variieren in den konstant zu haltenden Größen. Zunächst kann wieder entweder auf stets dieselbe Leistung, oder aber auf jeweils Höchstleistung eingeregelt werden. Außerdem aber zeigen die Indikatordiagramme der Reihe Nr. 78, 79, 81 in Fig. 166, daß bei unverändertem Zündungszeitpunkt die Entflammung des Gemisches um so träger verläuft, je schwächer die Kompression ist; das mag teils auf die höhere Anfangstemperatur, teils auf die dichtere Lagerung der Moleküle bei höherem Druck zurückzuführen sein, jedenfalls wirkt Erhöhung der Kompression ähnlich wie eine Verstärkung des Mischungsverhältnisses. Man kann daher mit Vorteil und ohne unruhigen Gang fürchten zu müssen, die Zündung so nachregeln, wie die Diagramme der Reihe Nr. 78, 80, 82 zeigen, nämlich auf ähnliche Gestaltung der Diagrammform — wie in Fig. 155 und 156, § 101 gekennzeichnet durch gleichen Abstand des Druckmaximums vom Diagrammanfang.

In Tabelle 60 sind also folgende Reihen gegeben:

Nr. 78, 79, 81: Höchstleistung, Zündung konstant.

Nr. 78, 80, 82: Höchstleistung, Zündung nachgeregelt.

Nr. 87, 85, 83: Leistung konstant, Zündung nachgeregelt.

Für konstante Leistung ist der Fall unveränderter Zündung nicht nochmals gegeben, weil er nicht praktischen Verhältnissen entspricht.

In Fig. 167 bis 169 werden die Ergebnisse der Tabelle 60 dargestellt.

Mit sinkender Kompression nimmt die erzielbare *Höchstleistung* ab, bei nachgeregelter Zündung weniger schnell als bei unveränderter. Da sich indessen die Gasaufnahme kaum verändert, so wird auch die Wirtschaftlichkeit um so schlechter, je mehr man die Kompression verringert.

Wird bei konstanter Leistung die Kompression verringert — wobei man von vornherein die Leistung nicht höher wählen darf, als daß sie bei kleinster Kompression noch hergegeben wird —, so geht die Gasaufnahme nur wenig herauf, und daher steigt die Wirtschaftlichkeit nicht erheblich mit zunehmender Kompression. Bei bestimmter verlangter Leistung ist also der Nutzen erhöhter Verdichtung nur gering.

Hiernach liegt der Vorteil hoher Verdichtung nicht so sehr direkt in der Steigerung der Wirtschaftlichkeit als vielmehr hauptsächlich in einer Steigerung der Höchstleistung, während doch (§ 92, Tabelle 48) eine Leistungssteigerung an der Gasmaschine eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit ergibt. Man kann auch sagen: bei einmal gegebener Maschine kommt der günstige Einfluß der Verdichtung nur dann erheblich zur Geltung, wenn man für die höhere freiwerdende Leistung auch Verwendung hat. — Diese Form der Darstellung stellt oft verkannte Verhältnisse richtig.

Die Wärmebilanzen Fig. 169 zeigen nichts Besonderes.

105. Gütegrad der Verpuffungsmaschine. Die von einem Wärmeträger zur Verfügung gestellte Wärmemenge kann theoretisch nur zu einem Bruchteil in Arbeit verwandelt werden; der Rest muß als Wärme die Maschine wieder verlassen.

Der Gesamtunterschied zwischen der im Brennstoff steckenden Wärme N_1 und dem wirklich in Arbeit umgesetzten Teil, der indizierten Leistung N_i , ist $N_1 - N_i$. Dieser Gesamtverlust wird durch Bestimmung der theoretisch größtmöglichen Arbeitsausbeute N' in zwei Teile unterteilt: es ist

Tabelle 60. Wirtschaftlichkeit
Zündung unverändert

Versuch Nr.	
1	Verdichtungsverhältnis $\frac{V_k + V_h}{V_k}$ —
2	Reglerstand r mm
3	Zündungszeit vor dem Totpunkt °
4	Gasaufnahme G_0 (reduziert) $\text{m}^3 \left(\frac{0}{760} \right) / \text{h}$
5	Luftüberschuß l —
6	Lieferungsgrad η_l —
7	Drehzahl n /min
8	Indizierte Leistung N_i kW
9	Elektrische Leistung N_{el} „
10	Getriebeverlust $N_i - N_{el}$ „
11	Gasverbrauch G_0/N_i $\text{m}^3/\text{kW} \cdot \text{h}$
12	„ G_0/N_{el} „
13	Temperatur der Abgase t_a °C
14	„ des Kühlwasserablaufs t_2 „
15	Verfügbare Wärme Q_1 1000 kcal/h
16	Nachgewiesen als Leistung Q_N „
17	„ im Kühlwasser Q_w „
18	„ in Abgasen Q_A „
19	Fehlbetrag Δ „
20	Nachgewiesen als indiziert q_N %
21	„ im Kühlwasser q_w %
22	„ in Abgasen q_A %
23	Fehlbetrag δ %

der Gasmaschine bei verschiedener Verdichtung.
bzw. nachgeregelt.

Höchstleistung, Reglerstand 20 mm					$N_{e1} \approx 10,7 \text{ kW}$ konstant		
78	79	80	81	82	87	85	88
6,94	5,56		4,69		6,94	5,56	4,69
20	20,5	20,5	21	20	40	41,2	20
-1,5	-1,5	-9,5	-1,5	-18	-3,5	-9,5	-16,5
11,55	11,45		11,42		10,1	10,8	11,1
1,74	1,78		1,79		1,68	1,63	1,78
0,773	0,785		0,786		0,658	0,684	0,767
183,3	182,3		182,7		182,0	181,6	181,3
21,7	18,6	19,4	16,4	18,8 ?	17,8	18,8	18,8
13,0	10,2	11,3	8,45	10,6	10,7	10,6	10,7
8,7	8,4	8,1	8,0	8,2	7,1	8,2	8,1
0,53	0,615	0,59	0,695	0,61	0,57	0,575	0,59
0,89	1,12	1,01	1,35	1,08	0,945	1,02	1,04
430	458	428	471	430	426	444	455
42	42	43	42	43	41	43,5	44
56,0	55,5		55,4		49,0	52,1	53,8
18,7	16,0	16,7	14,1	16,1	15,3	16,2	16,1
19,9	19,6	20,2	19,6	20,6	17,4	18,1	21,0
14,0	15,2	14,1	15,7	14,2	11,8	12,8	14,6
3,4	4,7	4,5	6,0	4,5	4,5	5,0	2,1
33,3	28,8	30,1	25,4	29,0	31,2	31,0	29,9
35,6	35,3	36,4	35,4	37,2	35,5	34,8	39,0
25,0	27,3	25,4	28,3	25,7	24,0	24,1	27,2
6,1	8,6	8,1	10,9	8,1	9,3	10,1	3,9

der nach der Natur des Kreisprozesses notwendige Verlust $N_1 - N'$
der durch unvollkommene Durchführung des Kreisprozesses bedingte Verlust $N' - N_i$

Dementsprechend wird der Wirkungsgrad zerlegt, den wir in bezug auf den ganzen Vorgang als (indizierten) thermischen Wirkungsgrad $\eta_{th} = \frac{N_i}{N_1}$ bezeichneten. Es gibt nämlich

$$\text{der theoretische (thermische) Wirkungsgrad } \eta_1 = \frac{N'}{N_1} \dots (29)$$

ein Maß für die Vollkommenheit des angestrebten Kreisprozesses; dagegen gibt

$$\text{der thermische Gütegrad } \eta_g = \frac{N_i}{N'} \dots (30)$$

ein Maß dafür, wie weit das Angestrebte erreicht worden ist. Vergleiche die Ausführungen in § 3, 46 und 47.

Für Verpuffungsmaschinen ist die Leistung N' des Idealprozesses durch ein Diagramm unveränderlich gegeben. Das angesaugte Gemisch

wird von einem Anfangsvolumen $V_h + V_k$ gleich Hubvolumen V_h plus Kompressionsraum V_k auf das Endvolumen V_k zusammengedrückt, die Verdichtung erfolgt im Verhältnis $\frac{V_h + V_k}{V_k}$; sie soll im Normalprozeß adiabatisch sein. Im Totpunkt erfolgt die Verbrennung unter einer Drucksteigerung, die nur von den Eigenschaften, nämlich Heiz-

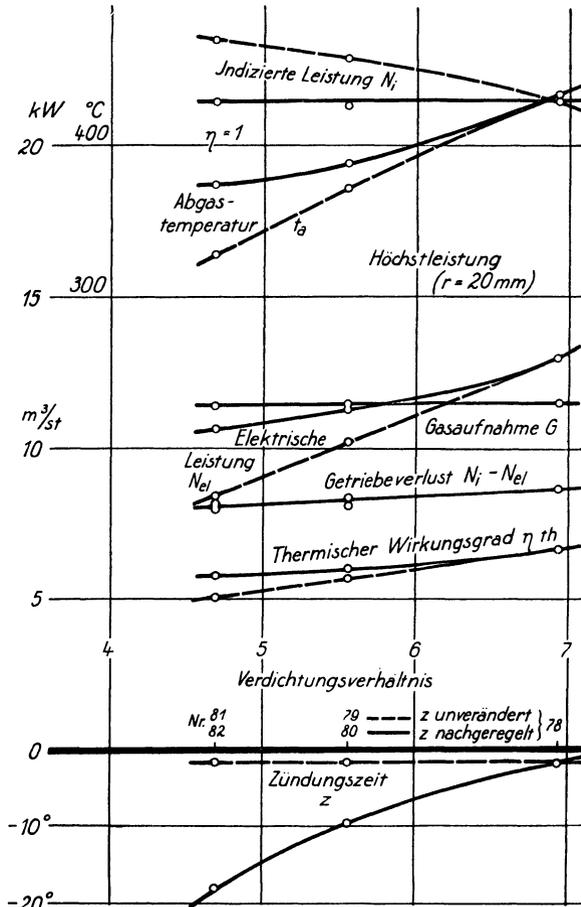


Fig. 167. Gasmaschine bei verschiedenem Verdichtungsverhältnis. Belastungsgrad konstant (Höchstleistung).

wert und spezifischer Wärme, der eingesaugten Mischung abhängt. Daran schließt sich die Expansion wieder adiabatisch, und wieder begrenzt durch dasselbe Verhältnis $\frac{V_h + V_k}{V_k}$; daher ist auch der Spannungssprung am Diagrammschluß eindeutig festgelegt: die ganze Diagrammgestalt hängt bei gegebenem Brennstoff nur vom Kompressionsverhältnis ab.

Beim theoretischen Vorgang geht nichts in die Zylinderwand. Sei Q_1 im Brennstoff zugeführt, und davon bleibe Q_A in den Abgasen, während Q_N indiziert sei, so ist $Q_1 = Q_A + Q_N$ und der Wirkungsgrad des theoretischen Prozesses

$$\eta_1 = \frac{Q_N}{Q_1} = 1 - \frac{Q_A}{Q_1} \dots \dots \dots (31)$$

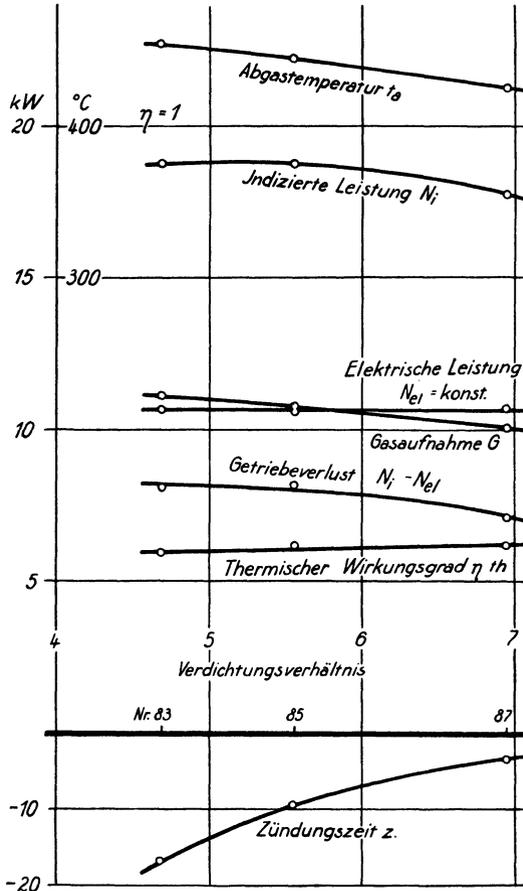


Fig. 168. Gasmaschine bei verschiedenem Verdichtungsverhältnis. Leistung konstant, Zündung auf gute Diagrammform nachgeregelt.

Aus allgemein wärmetheoretischen Betrachtungen (Hütte, 22. Aufl., 11, S. 246) läßt sich erweisen, daß identisch

$$\eta_1 = 1 - \left(\frac{V_k}{V_h + V_k} \right)^{\kappa-1} \dots \dots \dots (32)$$

worin k das Verhältnis der spezifischen Wärmen ist. Die Ableitung setzt allerdings voraus, daß κ für Kompression und Expansion denselben Wert hat — was sicher nicht zutrifft, da es verschiedene Gase sind, die arbeiten.

Zur Berechnung des Gütegrades sucht man zweckmäßig η_1 und η_{th} auf und hat dann

$$\eta_g = \frac{\eta_{th}}{\eta_1} \dots \dots \dots (33)$$

Ein *Beispiel* geben wir an den Zahlen des mit Nr. 78 bezeichneten Versuches. Für die Maschine, mit 260 mm Zylinderbohrung und 470 mm Hub, ist $V_h = 24,95$ l das Hubvolumen. Der Kompressionsraum wurde zu 4,20 l ermittelt, indem bei geschlossenen Ventilen dickes Öl durch den Indikatorstutzen hineingegossen wurde, unter sorgfältiger

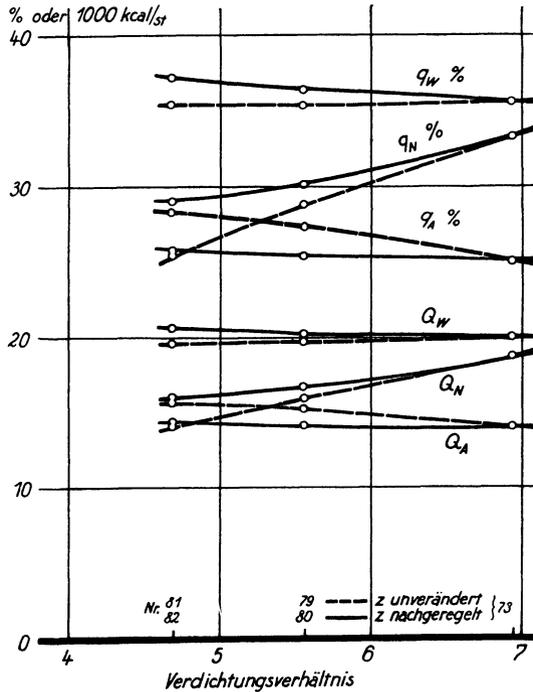


Fig. 169. Wärmeverbleib der Gasmaschine bei verschiedenem Verdichtungsverhältnis, Belastungsgrad konstant.

Auslassung aller Luft. Das Kompressionsverhältnis für unsere Maschine ist

$$\frac{V_h + V_k}{V_k} = 29,15 : 4,20 = 6,94 .$$

Es bleibt der Wert κ anzunehmen. Genau müßte man die Veränderlichkeit der spezifischen Wärmen und daher von k mit der Temperatur beachten und dieselbe überdies für Kompression und Expansion verschieden einsetzen, entsprechend den Werten einerseits für das Gasgemisch, andererseits für die Verbrennungsgase. Da hierzu die Unterlagen fehlen, so bleibt nur eine Näherungsrechnung einfachheitshalber

mit konstantem κ übrig. Man setzt wohl (Hütte, 22. Aufl., I, S. 398) für $N_2, O_2, CO : \kappa = 1,40$; für CO_2 und $H_2O : \kappa = 1,28$. Wenn nun in der Rauchgasanalyse die beiden Gruppen etwa im Verhältnis 94 zu 24 bis 19 gemischt sind, so kann man mit

$$\kappa = 1,38$$

die Berechnung so genau durchführen, wie sie nach den Unterlagen möglich ist.

Der theoretische Wirkungsgrad wird

$$\eta_1 = 1 - \left(\frac{1}{6,94}\right)^{0,38} = 1 - 0,478 = 0,522.$$

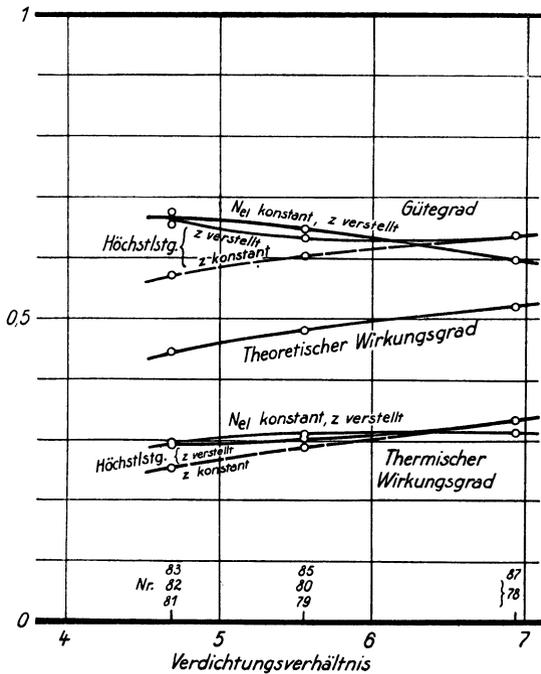


Fig. 170. Gütegrad und thermischer Wirkungsgrad der Gasmaschine.

Nun wird für Versuch Nr. 78 mit $\eta_{th} = 0,333$

$$\eta_g = \frac{0,333}{0,522} = 0,638$$

Die entsprechenden Werte der weiteren Versuche gibt die Tabelle 61 und Fig. 170.

Wenn es auffallend ist, daß die Zusammensetzung der Gase keinen Einfluß auf den theoretischen Wirkungsgrad hat — derselbe richtet sich nur nach den Maschinenabmessungen —, so ist zu sagen: die Gaszusammensetzung beeinflusst k , und da dies im Exponenten steht, relativ stark auch η_1 . Aber im übrigen ist in der Tat für Einflüsse, wie

sie das Expansionsverhältnis bei der Dampfturbine oder Kolbendampfmaschine geltend machen, bei der Verpuffungsmaschine kein Raum, da eben das Expansionsverhältnis stets gleich dem Kompressionsverhältnis ist. Da also der Gütegrad immer eindeutig mit dem thermischen Wirkungsgrad geht, so kommt ihm deshalb die gleiche Wichtigkeit wie bei der Dampfmaschine nicht zu. Anders bei der Gleichdruck-(Diesel-)maschine.

Bemerkenswert ist in Tabelle 61, daß für unveränderte Leistung der Gütegrad um so besser ist, je geringer die Verdichtung bleibt.

In Tabelle 62 wird für die aus § 89 bekannte Versuchsreihe mit wechselnder elektrischer Belastung der Gütegrad jeweils berechnet. Mit fallender Leistung nimmt wie der thermische Wirkungsgrad so natürlich auch der Gütegrad ab.

In Tabellen 61 und 62 ist noch die dem Indikator diagramm entnommene wirkliche *Drucksteigerung* mit der dem adiabatischen Vorgang entsprechenden verglichen. Es zeigt sich, daß die wirkliche Drucksteigerung nicht sehr merklich von der theoretisch zu erwartenden abweicht — ähnlich wie bei Kompressoren ist also auch hier die Verdichtung der adiabatischen ähnlich.

106. Ansaug- und Kompressions-Endtemperatur, Gewicht der Ladung. Aus den Drucken, die man dem Indikator diagramm entnimmt, in Verbindung mit den gemessenen Mengen angesaugten Gases und angesaugter Verbrennungsluft kann man die Temperaturen im wesentlichen an jedem Punkt des Kolbenweges bestimmen. Es dient dazu die Zustandsgleichung $p \cdot v = R \cdot T$, die sich auf 1 kg bezieht. Auf eine arbeitende Gemisch- bzw. Gasmenge G_L kg bezogen, gilt

$$p \cdot V = G_L \cdot R \cdot T;$$

daraus folgt

$$T = \frac{p \cdot V}{G_L \cdot R} \dots \dots \dots (34)$$

Wie in allen wärmemechanischen Rechnungen ist der Druck p in kg/m^2 , das Volumen V in m^3 , das Gewicht G_L der Ladung in kg anzugeben.

Tabelle 61. Gütegrad der

Tabelle 61. Gütegrad der	
Versuch Nr.	
1	Verdichtungsverhältnis $\frac{V_h + V_k}{V_k}$ —
2	Reglerstand r mm
3	Zündungszeit z s
4	Gasaufnahme (reduziert) G_0 m^3/h
5	Luftaufnahme (reduziert) L_0 „
6	Indizierte Leistung N_i kW
7	Thermischer Wirkungsgrad $\eta_{th} = \frac{850 \cdot N_i}{4000 \cdot G_0}$ —
8	Theoretischer Wirkungsgrad η_{theor} —
9	Gütegrad $\eta_g = \frac{\eta_{th}}{\eta_{theor}}$ —
10	Kompressions-Anfangsdruck p' s.
11	Kompressions-Enddruck p'' „
12	Verhältnis p''/p' —
13	Adiabatisches Druckverhältnis $\left(\frac{V_h + V_k}{V_k}\right)^{1,38}$ —

Gasmaschine bei verschiedener Verdichtung.

Bar. Std. 761 mm QS = 1,035 at Höchstleistung, Reglerstand ≈ 20 mm					757 mm QS = 1,03 at $N_{el} \approx 10,7$ kW konstant		
78	79	80	81	82	87	85	83
6,94	5,56		4,69		6,94	5,56	4,69
20	$\infty 20$		$\infty 20$		40	41,2	20
-1,5	-1,5	-9,5	-1,5	-18	-3,5	-9,5	-16,5
11,55	11,45		11,42		10,1	10,8	11,1
94,5	95,7		96,1		79,5	82,2	93,0
21,7	18,6	19,4	16,4	18,8	17,8 ?	18,8	18,8
0,333	0,288	0,301	0,254	0,290	0,312	0,310	0,299
0,522	0,479		0,444		0,522	0,479	0,444
0,638	0,602	0,629	0,572	0,653	0,598	0,647	0,674
1,035	1,035	1,035	1,035	1,035	—	—	—
14,65	10,8	10,95	8,65	8,9	—	—	—
14,2	10,4	10,6	8,35	8,6	—	—	—
14,5	10,7		8,45		—	—	—

Die Gaskonstante R pflegt auf diese Einheiten bezogen angegeben zu sein, sie hat dann die Benennung $m/^{\circ}C$. Dabei bezieht man V und G_L entweder auf einen (Doppel-)Umlauf oder auf die Stunde; wir ziehen letzteres vor, um — namentlich in den Rechnungen der folgenden Paragraphen — unbequeme Nullen hinter dem Komma tunlichst zu vermeiden.

Tabelle 62. Gütegrad der Gasmaschine bei verschiedener Belastung.

Verdichtungsverhältnis 6,94; theoretischer Wirkungsgrad $\eta_{theor} = 0,522$;
Bar.-St. 764 mm QS = 1,04 at.

Versuch Nr.		6	7	8	9	10
1	Elektrische Leistung N_{el} . . . kW	14,90	11,32	7,97	4,26	0
2	Indizierte Leistung N_i . . . „	23,4	19,8	16,0	12,4	8,2
3	Drehzahl n /min	186,2	189,8	190,3	191,1	192,6
4	Thermischer Wirkungsgrad η_{th} . —	0,324	0,317	0,297	0,280	0,247
5	Gütegrad $\eta_g = \frac{\eta_{th}}{0,522}$ —	0,620	0,607	0,569	0,536	0,473
6	Kompressions-Anfangsdruck p' at abs	1,04	0,97	0,865	0,79	0,595
7	Kompressions-Enddruck p'' . „	13,55	12,25	10,75	10,0	7,55
8	Verhältnis p''/p' —	13,0	12,6	12,4	12,6	12,7

$$\text{Adiabatisches Druckverhältnis } \left(\frac{V_h + V_k}{V_k} \right)^k = 6,94^{1,38} = 14,5 .$$

Der Druck p wird dem Diagramm als zugehörig zu einem Volumen V entnommen, in das der Kompressionsraum jeweils einzurechnen ist. Die Gaskonstante R muß man vor und nach der Verbrennung gleich annehmen, wenn man bei Leuchtgasverbrennung keine Veränderung des auf $\left(\frac{0}{760}\right)$ bezogenen Volumens angenommen hatte (§ 97); denn es gilt $R = \frac{37,9 \text{ m}}{\gamma_{0,760} \text{ } ^\circ\text{C}}$, wenn $\gamma_{0,760}$ das spezifische Gewicht im Normalzustand ist; wo man — bei Verwendung anderer Brennstoffe — über die Volumenveränderung bei der Verbrennung besser unterrichtet ist, kann man R für Verdichtung und Ausdehnung verschieden groß einführen. G_L soll das *Ladungsgewicht* sein, das an den Zustandsänderungen im Zylinder teilnimmt; es besteht aus den angesaugten Gewichten Brennstoff B und Luft L , dazu das Gewicht G_R der Rückstände, das sind die Abgase, die am Hubende im Kompressionsraum verbleiben.

Die Ermittlung von G_R ist zunächst zu besprechen. Sie erfolgt wieder nach der Zustandsgleichung, diesmal angewendet auf die Rückstände vom Gewicht G_R , die am Ende des Ausblasens — am Beginn des Ansaugens — den Kompressionsraum V_k bei einem dem Schwachfederdiagramm zu entnehmenden Druck p ausfüllen. Die Temperatur der Gase müssen wir schätzungsweise gleich der hinter dem Auslaßventil gemessenen Temperatur T_a der Abgase einsetzen. Unter dieser Annahme gilt am Beginn des Ansaugens $p \cdot V_k = G_R \cdot R \cdot T_a$, also

$$G_R = \frac{p \cdot V_k}{R \cdot T_a} \dots \dots \dots (35)$$

worin nun alle Größen gemessen werden können.

Hiermit also wird

$$G_L = B + L + G_R \dots \dots \dots (36)$$

Mit Hilfe von Formel (34) läßt sich dann die Temperatur an jeder Stelle des Indikatordiagrammes berechnen (§ 107). Wir berechnen zunächst die Endtemperatur des Ansaugvorganges und des Kompressionsvorganges am *Beispiel* des Versuches 78, Tabelle 60.

Zunächst das Ladungsgewicht, auf die Stunde bezogen. Es sind

$$94,5 \text{ m}^3 \left(\frac{0}{760}\right)/\text{h Luft} = 94,5 \cdot 1,293 = 122,3 \text{ kg/h,}$$

das Gas hatte ein Relativgewicht gegen Luft $\delta = 0,42$ (gemessen mit der Gaswaage, Techn. Mess. § 47), daher sind

$$11,55 \text{ m}^3 \left(\frac{0}{760}\right)/\text{h Gas} = 11,55 \cdot (1,293 \cdot 0,42) = 6,28 \text{ kg/h}$$

$$\text{im ganzen angesaugt} \dots \dots \dots B + L = 128,6 \text{ kg/h.}$$

Dazu die Rückstände. Das spezifische Gewicht der brennbaren Mischung

$$\text{und daher (s. o.) auch der Rückstände ist } \frac{128,6}{94,5 + 11,55} = 1,21 \text{ kg/m}^3 \left(\frac{0}{760}\right),$$

und damit die Gaskonstante $R = \frac{37,9}{1,21} = 31,4 \frac{\text{m}}{^\circ\text{C}}$; aus der Zusammensetzung der Abgase berechnet, hätte sie sich etwas abweichend ergeben. Es bleiben zueinandergehörige Werte von p und V dem Indi-

katordiagramm zu entnehmen. Am Ende des Ausstoßens der Abgase ist ihr Volumen $V_k = 0,00420 \text{ m}^3/\text{Hub} = 0,00420 \cdot 183,3 \cdot 30 = 23,1 \text{ m}^3/\text{h}$, 183,3/min ist die Drehzahl der Maschine, und 30, statt 60, trägt dem Viertakt Rechnung. Im inneren Totpunkt endet das Schwachfederdiagramm 2 mm über der Atmosphärenlinie, entsprechend 2 : 45 = 0,044 at Überdruck = 1,07 at abs = 10 700 kg/m². Abgastemperatur $T_a = 430 + 273 = 703^\circ$. Demnach ergibt sich das Gewicht der Rückstände

$$G_R = \frac{10\,700 \cdot 23,1}{31,4 \cdot 703} = 11,2 \text{ kg/h}.$$

Das Ladungsgewicht wird $128,6 + 11,2 = 139,8 \text{ kg/h}$.

Für das Ende des Ansaugens nun liegt im Schwachfederdiagramm der Berührungspunkt mit der Senkrechten des äußeren Totpunktes 0,5 mm = 0,01 at unter der Atmosphäre, entsprechend 1,02 at abs = 10 200 kg/m². Es ist $V_h + V_k = 160,3 \text{ m}^3/\text{h}$. Also ergibt sich

$$T = \frac{10\,200 \cdot 160,3}{139,8 \cdot 31,4} = 372^\circ \text{ abs} = 99^\circ \text{ C}$$

als *Ansaug-Endtemperatur*. Die fertig angesaugte Ladung entstand aus folgenden Teilen annähernd gleicher spezifischer Wärme

Rückstände	11,2 kg	Temperatur	430° C	Produkt	4820
Gas + Luft	128,6 „	„	∞ 20° C	„	2570
Zusammen	<u>139,8 kg</u>				<u>7390</u>

die also durch einfache Mischung eine Temperatur $7390 : 139,8 = 53^\circ$ ergeben hätten; demnach entstammt $53 - 20 = 33^\circ$ Temperaturerhöhung den Rückständen, und die weiteren $101 - 53 = 48^\circ$ sind den warmen Wandungen entnommen. Die Temperaturerhöhung ist nachteilig durch Verringerung des Lieferungsgrades und damit der Höchstleistung der Maschine.

Für das Ende der Kompression entnehmen wir dem Diagramm einen Druck entsprechend 23,8 mm = $23,8 : 1,75 = 13,6$ at Überdruck = 14,6 at abs = 146 000 kg/m². Es ist $V_k = 23,1 \text{ m}^3/\text{h}$. Also findet sich die *Kompressions-Endtemperatur*

$$T = \frac{146\,000 \cdot 23,1}{139,8 \cdot 31,4} = 768^\circ \text{ abs} = 495^\circ \text{ C}.$$

Die Höhe dieser Temperatur und damit das Kompressionsverhältnis ist durch die Rücksichtnahme begrenzt, daß Vorzündungen durch Selbstentzündung des Brenngemisches nicht auftreten sollen; denn bei steigender Kompression werden die Endtemperaturen der Kompression höher. Das experimentell zu zeigen, kann man mit den Zahlen der Versuche 78, 80 und 82 — also bei sinngemäß veränderter Zündung — die in Tabelle 63 gegebene Vergleichsrechnung anstellen:

Bei geringer Kompression ist das Gewicht der Rückstände größer; das wirkt ungünstig auf die Mischungstemperatur und auf die Ansaug-Endtemperatur; daß trotzdem der Lieferungsgrad steigend gemessen

Tabelle 63. Ansaug- und Kompressions-Endtemperatur bei verschiedenem Verdichtungsverhältnis. Maschinenabmessungen am Kopf von Tabelle 46 a, § 93.

Versuch Nr.		78	80	82
1	Verdichtungsverhältnis —	6,94	5,56	4,69
2	Reglerstand r mm	20	20,5	20
3	Zündungszeit vor dem Totpunkt °	—1,5	—9,5	—18
4	Indizierte Leistung N_i kW	21,7	19,4	18,8
5	Am Ende des Ausstoßens p kg/m ²	10 700	10 700	10 700
6	V_k m ³ /h	23,1	30,1	37,1
7	Im Auspuff T_a ° abs.	703	701	703
8	Rückstandsgewicht $G_R \approx \frac{p \cdot V_k}{31,4 \cdot T_a}$ kg/h	11,2	14,6	18,0
9	Gemischgewicht $B + L$ kg/h	128,6	130,2	130,5
10	Ladungsgewicht $G_L = B + L + G_R$ kg/h	139,8	144,5	148,2
11	Mischungstemperatur $\frac{20 \cdot (B + L) + t_a \cdot G_R}{G_L}$ ° C	53	60	69
12	Am Ende des Ansaugens p' kg/m ²	10 200	10 200	10 200
13	$V_k + V_h$ m ³ /h	160,3	166,5	173,7
14	Also $T \approx \frac{p' \cdot (V_k + V_h)}{G_L \cdot 31,4}$ ° abs.	372	374	381
15	t ° C	99	101	108
16	Lieferungsgrad $\eta_i = \frac{0,42 \cdot 1,293}{0,02495 \cdot 30 n} + \frac{L}{1,293}$ —	0,773	0,785	0,786
17	Am Ende der Kompression p'' kg/m ²	146 000	109 000	88 500
18	V_k m ³ /h	23,1	30,1	37,1
19	Also $T = \frac{p'' \cdot V_k}{G_L \cdot 31,4}$ ° abs.	768	723	706
20	t ° C	495	450	433

worden ist, ist ein Widerspruch. Bezüglich der Kompressions-Endtemperatur überwiegt aber doch weit der Einfluß der Verdichtung selbst.

107. Temperaturverlauf im Gasmaschinenzylinder. Man kann dieselbe Rechnung wie für die Endpunkte des Ansaugens und Verdichtens auch für jeden Zwischenpunkt des Indikatordiagramms durchführen und erhält dadurch die Temperatur an jeder Stelle des Kreisprozesses. Zeichnet man die Temperaturen an Stelle des Druckes über der Kolbenstellung auf, so ergibt sich das *Volumen-Temperatur-Diagramm*.

Nachdem das Ladungsgewicht G_L und die Gaskonstante R schon im vorigen Paragraphen berechnet sind, ist der Gang der Ermittlung sehr einfach, übrigens derselbe wie bei der Berechnung der beiden Endtemperaturen. Das Indikatordiagramm wird der Länge nach in etwa 10 Teile geteilt, zu jeder Kolbenstellung und daher jedem Werte V wird der zugehörige Druck entnommen, und dann ist wieder

$$T = \frac{p \cdot V}{G_L \cdot R}$$

Am Diagramm des Versuches 78, Fig. 166, ergibt sich beispielsweise für den Punkt $\frac{3}{10}$ der Hublänge:

Kompression: $p = 5,0 \text{ mm} = 2,86 \text{ at} = 38\,900 \text{ kg/m}^2$
 $V = 23,1 + 0,3 \cdot 137,2 = 64,2 \text{ m}^3/\text{h}$.

Bekannt ist $G_L = 139,8 \text{ m}^3/\text{h}$, $R = 31,4^1$). So ist
 $T = 570^\circ$, $t = 297^\circ \text{ C}$.

Expansion: $p = 18,1 \text{ mm} = 10,34 \text{ at} = 113\,700 \text{ kg/m}^2$
 $V = 64,2 \text{ m}^3/\text{h}$.

Also $T = 1663^\circ$, $t = 1390^\circ \text{ C}$.

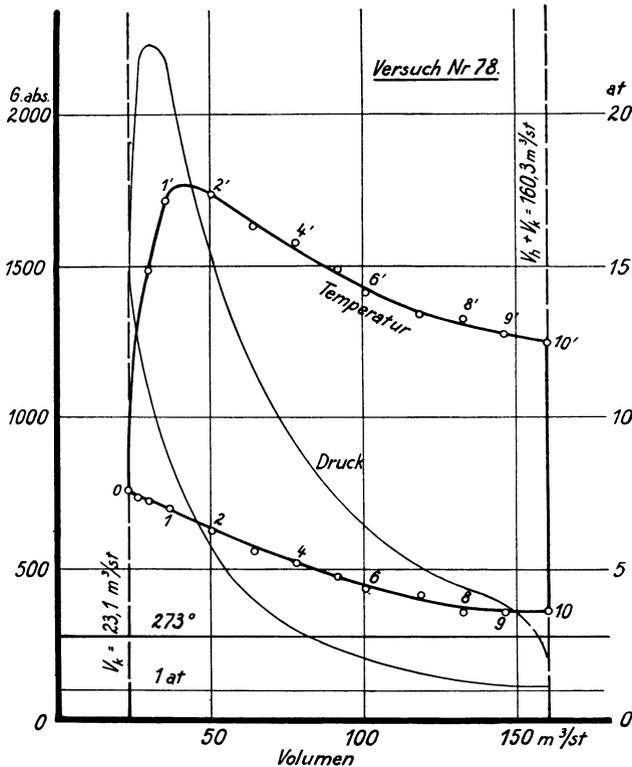


Fig. 171 bis 173¹⁾. Temperaturverlauf im Gasmaschinenzylinder bei verschiedenem Verdichtungsverhältnis, jeweils Höchstleistung (Vollfüllung).
 Fig. 171. Verdichtung 6,94 fach.

Für Versuch 78 ergibt sich in dieser Weise Tabelle 64, und für die drei mit verschiedener Kompression durchgeführten Versuche 78, 80, 82 kann man die V - T -Diagramme Fig. 171 bis 173 zeichnen.

Solche Umzeichnungen haben Wert, um Vergleiche anzustellen. Bezüglich des Einflusses der Kompression zeigen die drei Umzeichnungen,

¹⁾ Durch Versehen sind die Fig. 171 bis 176 mit $R = 32,0$ statt $R = 31,4 \text{ m}^3/\text{C}$ berechnet. Hieraus erklären sich kleine Unstimmigkeiten gegen Tabelle 64 und 66.

Tabelle 64. Temperaturverlauf im Gasmaschinenzylinder
 Versuch Nr. 78. Verdichtung 6,94fach; Kompressionsraum $V_k = 23,1 \text{ m}^3/\text{h}$;
 Hubraum $V_h = 137,2 \text{ m}^3/\text{h}$;

Abszisse Nr.	Kompression				
	10	8	5	3	1
1 Ordinate im Diagramm h . . . mm	—	0,3	2,25	5,0	13,0
2 Absoluter Druck $p = \left(\frac{h}{1,75} + 1,03\right) \cdot 10\,000$. . kg/m ²	10 200	12 000	23 200	38 900	84 700
3 Volumen V m ³ /h	160,3	132,8	91,7	64,2	36,8
4 Temperatur $T = \frac{p \cdot V}{139,8 \cdot 31,4}$. . ° abs	373	364	485	570	710

daß trotz verschiedener Höchstdrücke doch die Höchsttemperaturen sich kaum unterscheiden; sie liegen gegen 1800° abs oder 1500° C.

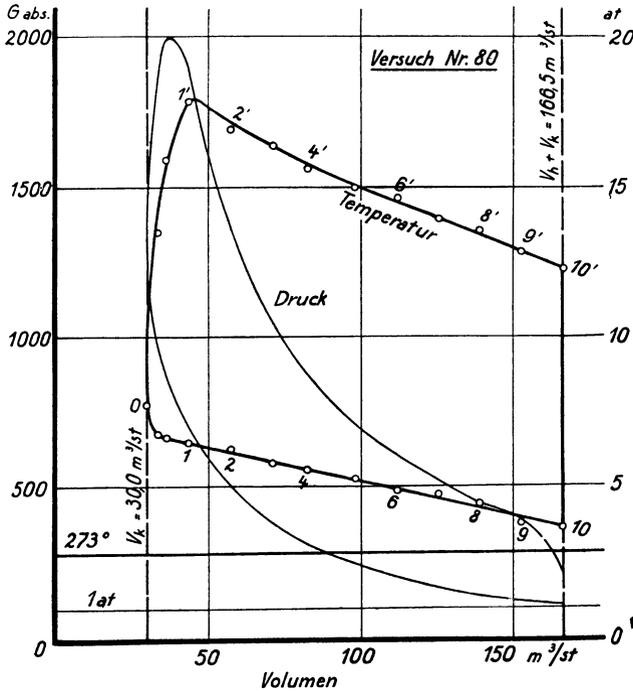


Fig. 171 bis 173. Temperaturverlauf im Gasmaschinenzylinder bei ver-
 Fig. 172. Verdichtung 5,56 fach.

108. Entropiediagramm der Gasmaschine. Die Entropieänderung eines vollkommenen Gases ist durch die Formel

$$s = c_p \cdot \ln T - A \cdot R \cdot \ln p \text{ EE/kg. (37)}$$

gegeben (EE = Entropieeinheit, mangels eines besonderen Namens dafür). Mit ihrer Hilfe läßt sich die Entropie punktweise für die gleichen

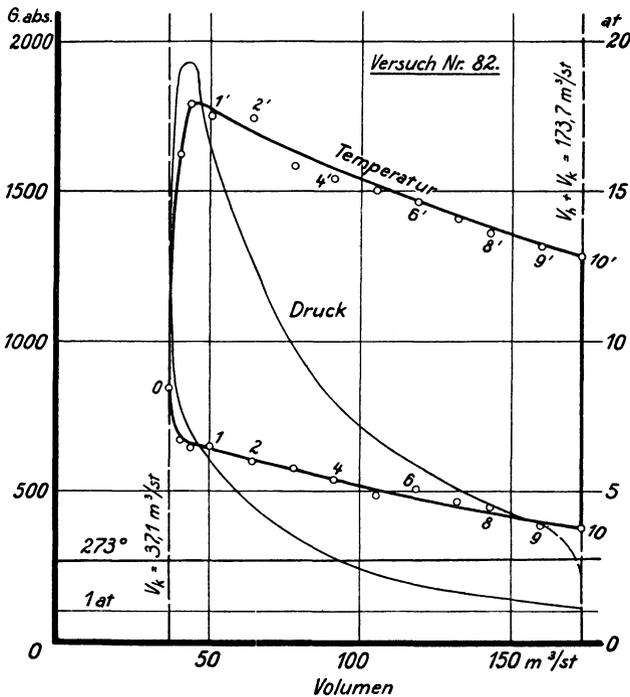
während eines Arbeitsspieles.

Ladungsgewicht $6,28 + 122,3 + 11,2 = 139,8$ kg/h;
 Gaskonstante $R = 31,4$ m/° C.

Punkte wie im vorigen Paragraphen berechnen. Meist wird dann die absolute Temperatur über der Entropie als Abszisse aufgetragen im sog. *Entropiediagramm*: $T = f(s)$. — Wir beziehen die Entropie auf 1 kg arbeitenden Gemisches, während wir im vorigen Paragraphen das Volumen auf die Stunde bezogen. Die Möglichkeit beider Rechnungsweisen soll gezeigt werden. Wird mit Hilfe der Rechnung ein Vergleich zwischen verschiedenen Maschinenzuständen gezogen, so bestimmt die Wahl nicht nur einen verschiedenen Maßstab; wenn die stündlich

Expansion					
0	1'	3'	5'	8'	10'
23,8	35,1	18,1	10,9	6,0	—
146 300	210 800	113 700	72 700	44 600	—
23,1	36,8	64,2	91,7	132,8	160,3
771	1770	1660	1520	1350	(1270)

gleich zwischen verschiedenen Maschinenzuständen gezogen, so bestimmt die Wahl nicht nur einen verschiedenen Maßstab; wenn die stündlich



schiedenem Verdichtungsverhältnis, jeweils Höchstleistung (Vollfüllung).
 Fig. 173. Verdichtung 4,69 fach.

aufgenommenen Gewichte verschieden sind, so müssen auch die relativen Ergebnisse für die Zeiteinheit und für die Mengeneinheit entsprechend — meist wenig — sich unterscheiden.

Nach den Rechnungen der beiden vorigen Paragraphen fehlt zur Berechnung der Entropie nur noch die spezifische Wärme c_p für kon-

stanten Druck. Sie ist von der Temperatur abhängig nach Fig. 17, § 32a; man ermittelt an Hand dieser Figur die spezifischen Wärmen der bekannten Abgasmischung von 0 bis etwa 200, 600 . . . °C, Tabelle 65, und interpoliert graphisch auf die vorkommenden Temperaturen. Für den Verdichtungsvorgang und für die Expansion wäre diese Ermittlung je einmal zu

Tabelle 65. Spezifische Wärme der

Annähernde Gaszusammensetzung in %		t =
1	k = 6,1	c_p $k \cdot c_p$
2	o + n = 93,9	c_p $(o + n) \cdot c_p$
3	w = 15,0	c_p $w \cdot c_p$
		$\sum x \cdot c_p$ $k + o + n + w = 115,0$
4	Spezifische Wärme $c_p = \frac{\sum x \cdot c_p}{115,0}$	
5	Aufs Gewicht bezogen, $\gamma = 1,21 \text{ kg/m}^3 \left(\frac{0}{760} \right)$	

machen, da es sich um verschiedene Stoffe handelt; für die Zeit der Verbrennung kann man sogar die jeweils verbrannte Gasmenge aus der bis dahin nachgewiesenen Wärmezeugung finden; diese Ermittlung, an Zeitdiagrammen ausgeführt, findet man von Borth in Forschungsarbeiten Heft 55 oder Z. d. V. D. I. 1908, S. 523 wiedergegeben.

Solche umständliche Rechnung hat aber nur Zweck, wenn man auch die Zusammensetzung des Leuchtgases wirklich kennt bzw. durch Analyse (Techn. Mess. § 121) ermittelt, und dann auch die Raumverminderung bei der Reaktion beachtet; der Rechnungsgang hierfür ist Hütte I, S. 475 gegeben. Nachdem wir bisher in dieser Hinsicht Vernachlässigungen gemacht haben, wollen wir auch jetzt kurzerhand die spezifische Wärme des brennbaren Gemisches gleich der der Abgase nach Tabelle 65 annehmen.

Wir berechnen wieder den Punkt $\frac{3}{10}$ des Versuches Nr. 78:

Kompression: $T = 570^\circ$; $t = 297^\circ$; $c_p = 0,269$

$p = 38\,900 \text{ kg/m}^2$

$c_p \cdot \ln T = 0,269 \cdot 6,346 = 1,710$

$\frac{31,4}{427} \cdot \ln p = \frac{31,4}{427} \cdot (5,964 + 4,605) = \frac{0,776}{0,934}$

Tabelle 66. Entropie und Temperatur im Gasmaschinen-Versuch Nr. 78. Daten am Kopf von Tabelle 64,

Versuch Nr.	Kompression					
	10	8	5	3	1	
1	Absoluter Druck p kg/m^2	10 200	12 000	23 200	38 900	84 700
2	$\ln p = \ln \left(\frac{p}{1000} \right) + \ln 1000$ —	9,230	9,392	9,952	10,569	11,347
3	$A \cdot R \cdot \ln p = 0,0735 \cdot \ln p = I$ —	0,678	0,690	0,731	0,777	0,834
4	Absolute Temperatur T (Tab. 64) ° abs	373	364	485	570	710
5	$\ln T$ —	5,922	5,897	6,184	6,346	6,565
6	c_p nach Tab. 65 $\text{kcal/}^\circ\text{C} \cdot \text{kg}$	0,263	0,263	0,267	0,269	0,271
7	$c_p \cdot \ln T = II$ —	1,557	1,550	1,652	1,707	1,779
8	Entropie $II - I$ EE/kg	0,879	0,860	0,921	0,930	0,945

Verbrennungsgase (mittlere zwischen 0° und t°) bei Versuch 78, 80, 82.

200°	600°	1000°	1400°	1800°	
0,421	0,472	0,506	0,528	0,543	
2,6	2,9	3,1	3,2	3,3	
0,311	0,317	0,326	0,334	0,341	
29,2	29,8	30,6	31,4	32,0	
0,361	0,375	0,394	0,417	0,443	
5,4	5,6	5,9	6,3	6,6	
37,2	38,3	39,6	40,9	41,9	
0,323	0,333	0,344	0,356	0,364	kcal/m ³ ₍₇₆₀₎ · °C
0,267	0,275	0,284	0,294	0,301	kcal/kg · °C

Expansion: $T = 1663^\circ; t = 1390^\circ; c_p = 0,294$
 $p = 113\,700 \text{ kg/m}^2,$
 $0,294 \cdot \ln T = 0,293 \cdot (5,114 + 2,303) = 2,175$
 $\frac{31,4}{427} \cdot \ln p = \frac{31,4}{427} \cdot (4,732 + 6,908) = \frac{0,856}{1,319}$

Die natürlichen Logarithmen der großen Zahlen muß man meist gemäß $\ln 38\,900 = \ln 389 + \ln 100$ finden.

Für eine Reihe von Punkten von Versuch 78 ist in Tabelle 66 das Ergebnis der gleichen Berechnung gegeben. Fig. 174 bis 176 geben die *s-T*-Diagramme für die drei Kompressionsgrade.

Bei der Auswertung bedarf es, soweit der Rechenschieber (tunlichst von 50 cm Länge) benutzt wird, peinlicher Sorgfalt. Denn jeweils erhält man die Entropie als Differenz zweier Zahlen, außerdem bewegen sich die erhaltenen Werte der Entropie in engen Grenzen, und es kommen nochmals die Differenzen gegen den Mindestwert in Frage; es handelt sich also um eine doppelte Differenzmethode (Techn. Mess. § 17).

Der einfache Rechnungsgang liefert keinen Abschluß für das *s-T*-Diagramm; vom Augenblick an, wo das Auslaßventil öffnet, ändert

zylinder während eines Arbeitsspieles. jedoch Bezugsmenge 1 kg Gasgemisch.

Expansion						Abkühlung
0	1'	3'	5'	8'	10'	
146 300	210 800	113 700	72 700	44 600	(34 800)	20 000
11,894	12,258	11,644	11,194	10,705	10,427	9,908
0,874	0,901	0,856	0,823	0,787	0,766	0,728
771	1770	1660	1520	1350	1270	732
6,648	7,482	7,418	7,330	7,211	7,150	6,596
0,272	0,294	0,294	0,290	0,285	0,283	0,800
1,808	2,199	2,180	2,125	2,055	2,022	1,273
0,934	1,298	1,324	1,302	1,268	1,256	1,072

sich das Ladungsge-
 wicht im Zylinder,
 und die Rechnung
 wird hinfällig. Der
 Abschluß wird ge-
 wonnen durch folgen-
 de Überlegung: Wär-
 metheoretisch nötig
 ist Abführung der
 nicht umgesetzten
 Wärme auf dem nied-
 rigeren Temperatur-
 niveau; das wird
 praktisch ausgeführt
 durch Ausstoßen der

warmen Gase und Ansaugen von kalten; gleichwertig wäre ein Vorgang, wo man die Ladung von Punkt 10 bis 10' im Zylinder ließe und durch Abkühlung auf den Anfangsdruck brächte. Es handelte sich um eine Abkühlung bei konstantem Volumen, im $s-T$ -Diagramm eine logarithmische Linie; zwei Punkte derselben bei 30 000 und 20 000 kg/m² Druck sind berechnet; das zugehörige Volumen nämlich ist $V_k + V_h$, daraus folgen Temperatur und Entropie nun im gewohnten Rechnungsgang.

Die Fläche des Entropiediagrammes stellt die in Arbeit verwandelte Wärme dar; die des Indikatordiagrammes gab die aus der Wärme gewonnene Arbeit; beide sind also einander äquivalent. So fanden sich aus den Diagrammen der Fig. 174 bis 176 (bei der Drucklegung auf $\frac{2}{5}$ verkleinert) die Werte der Tabelle 67, die die Flächenwerte des Entropiediagrammes mit denen des Indikatordiagrammes vergleicht.

Tabelle 67. Äquivalenz des Wärmeumsatzes im $s-T$ -Diagramm mit der Arbeitserzeugung im Indikatordiagramm.

Versuch Nr.		78	80	82
1	Flächeninhalt nach Fig. 174 bis 176 cm ² Maßstab der Abszissen: 1 cm = 0,02 EE/h „ „ Ordinaten: 1 cm = 100°, also der Flächen: 1 cm ² = 0,02 · 100 kcal/h 1 cm ² = 2 kcal/h	64,5	63,6	62,2
2	Flächenwert kcal/kg	129,0	127,2	124,4
Demgegenüber:				
3	Indizierte Leistung N_i (Fig. 166, Tab. 60) kW	21,7	19,4	18,8
4	Wärmewert $859 \cdot N_i$ kcal/h	18 640	16 660	16,150
5	Ladungsgewicht kg/h	139,5	144,5	148,2
6	Quotient kcal/kg	133,7	115,2	108,8

Die Übereinstimmung zwischen Zeile 2 und 6 ist nur mäßig.

Die Entropiediagramme haben je die Gestalt eines Parallelogrammes, dessen Seiten den vier Vorgängen: Komprimieren, Verbrennen, Expandieren und Wiederableiten der Wärme entsprechen. Beim Verbrennen steigt mit der Temperatur auch die Entropie, beim Wiederableiten ist es umgekehrt. Kompression und Expansion würden senkrecht laufen, wenn die Vorgänge adiabatisch verliefen. In Wahrheit gehen beide Parallelogrammseiten merklich schräg in dem Sinne, daß bei der Kompression eine Wärmeaufnahme, bei der Expansion Wärmeabgabe stattfindet; allerdings ist die Wärmeaufnahme am Ende der Kompression schon ins Gegenteil umgeschlagen, entsprechend der höher gewordenen Temperatur der Gase. Alles das läßt sich erwarten, wenn man an die Unterschiede zwischen der wesentlich unveränderten Temperatur der Wandung gegen die wechselnde Temperatur der Gase denkt.

In das Diagramm von Versuch 78 ist schwach gestrichelt noch ein anderes gezeichnet, das durch den gleichen Rechnungsgang unter Annahme konstanter spezifischer Wärme erhalten wurde. Diese Näherungsannahme hätte adiabatischen Verlauf der Kompression und Expansion

Fig. 174. Verdichtung 6,94 fach.
Versuch Nr. 78.

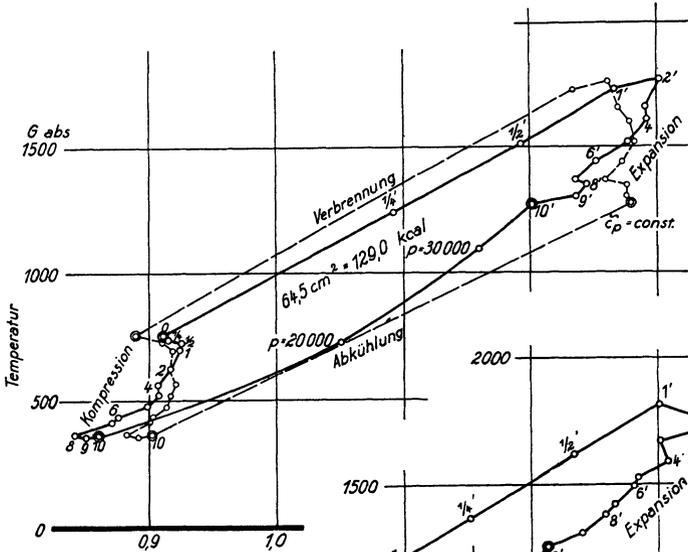


Fig. 175. Verdichtung 5,56 fach.
Versuch Nr. 80.

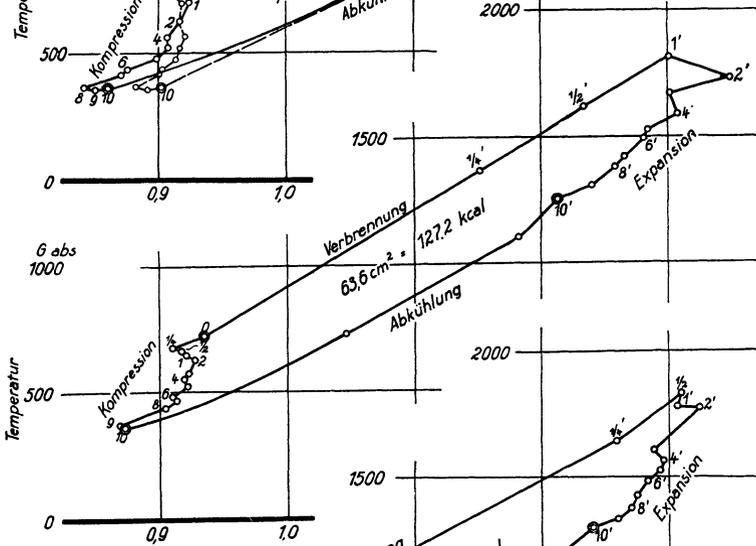


Fig. 176. Verdichtung 4,69 fach.
Versuch Nr. 82.

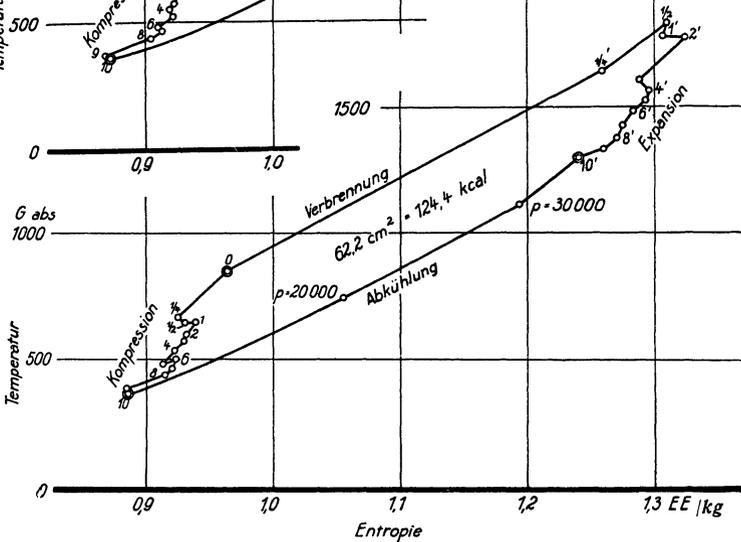


Fig. 174 bis 176. Entropiediagramme bei verschiedenem Verdichtungsverhältnis, jeweils bei Höchstleistung der Maschine, Zündung nachgeregelt. $\frac{1}{2}$ nat. Gr.

In Fig. 174 ist gestrichelt das Ergebnis einer Rechnung mit konstanter spezifischer Wärme eingetragen.

Vergleiche die Anmerkung auf S. 387. Das dort genannte Versehen hat die Entropiediagramme um etwa 0,02 EE nach links gerückt, in der Gestalt kaum geändert.

gezeigt und also irreführend: die Kompressions- und Expansionslinien im Indikatordiagramm folgen zwar dem Gesetz $p v^k = \text{konst}$, dies Gesetz aber stellt bei veränderlicher spezifischer Wärme keine Adiabate dar. Außerdem weicht der Flächeninhalt sehr von dem nach der genaueren Methode ab; bei dieser Empfindlichkeit gegen die Annahme der spezifischen Wärme ist die mangelhafte Übereinstimmung (Tabelle 67) der s - T -Fläche mit dem Arbeitsäquivalent des Indikatordiagrammes verständlich.

109. Verbrauch von Ölmotoren. Bei Öl und anderen flüssigen Brennstoffen tritt an die Stelle der Gasmessung die Messung der Brennstoffmenge — etwa indem man an die Zulaufleitung zum Vergaser oder zur Ölpumpe einen durch Dreiwegehahn absperrbaren Abzweig macht, aus dem während des eigentlichen Versuchs der Brennstoff entnommen wird. Man entnimmt ihn dabei einem offenen Gefäß, in das man nach Bedarf Brennstoff nachfüllt; in das Gefäß ragt eine Spitze herein; das Abreißen der Spitze vom Flüssigkeitsspiegel bedeutet zuerst den Beginn des Versuches, dann den Verbrauch einer inzwischen hinzugefügten abgewogenen passenden Brennstoffmenge. Die Nadel befindet sich an einem vom Gefäß abnehmbaren Balken, damit man sich durch Lüften des Balkens davon überzeugen kann, wie lange es noch zum Abreißen ist.

Bei Verwendung flüssiger Brennstoffe können merkliche Wärmemengen durch Rußbildung verloren gehen; auf Vermeidung der Rußbildung durch die betriebstechnisch möglichen Mittel ist also bei der Versuchsausführung zu achten; man beobachte den Auspuff. Über den Schmierölverbrauch gilt dasselbe wie für Gasmaschinen (§ 89).

Bei Teeröl-Dieselmotoren pflegt zur Entzündung des *Hauptbrennstoffes* ein *Zündöl* der Einspritzung vorgelagert zu werden; dasselbe ist teurer und pflegt auch für den Betrieb wertvoller zu sein. Beim Versuch ist dann durch Einstellen der Zündölpumpe anzustreben, daß die Aufnahme an Zündöl genau der in der Gewährleistung angenommenen entspricht; die Aufnahme an Treiböl wird gemessen. Immerhin kann man die Zündölaufnahme nicht ganz genau einstellen; den Unterschied pflegt man dann bei Garantieversuchen nicht nach dem Gewicht und Heizwert beider Ölarten, sondern nach dem Preise auszugleichen.

So lautete eine Gewährleistung: es solle bei 30 PS Leistung am Schwungrad der Maschine nicht mehr als 205 g Teeröl von 8800 kcal/kg und 24 g Zündöl von 10 000 kcal/kg bezogen auf die am Schwungrad gemessene Pferdekraftstunde verbraucht werden — mit einem Spielraum von 10%.

Bei der Nachprüfung wurde benutzt:

ein Teeröl zum Preise 5,0 M/100 kg; Elementaranalyse 87,7% C, 6,97% H; unterer Heizwert $0,877 \cdot 8100 + 0,0687 \cdot 29\ 000 = 9100$ kcal/kg (Verbandsformel, Techn. Mess. § 114),

ein Zündöl zum Preise 13,0 M/100 kg, Elementaranalyse 85,9% C, 12,6% H; unterer Heizwert $0,859 \cdot 8100 + 0,122 \cdot 29\ 000 = 10\ 480$ kcal/kg .

Beim Versuch wurde die Leistung tunlichst auf 30 PS eingeregelt, die Nachrechnung ergab indessen als wirkliche Leistung 31,0 PS; die wirkliche Belastung war daher um 3,3% zu hoch, das ist weniger als die in den „Regeln“, § 10 zugelassenen 5%; die Garantie muß also bei dieser Leistung erfüllt werden. Es wurden aufgenommen 6,56 kg/h Teeröl und 0,878 kg/h Zündöl. Ist die Gewährleistung erfüllt oder nicht?

Der Zündölverbrauch ist $0,878 : 31,0 = 28,3 \text{ g/PS} \cdot \text{h}$, der Teerölverbrauch ist $6,56 : 31,0 = 212 \text{ g/PS} \cdot \text{h}$; der Gesamtverbrauch ist $240,3 \text{ g/PS} \cdot \text{h}$, während 229 g zugelassen sind; *Mehrverbrauch 4,9% dem Gewicht nach.* — *Der Wärmemenge nach* ist der Verbrauch $0,0283 \cdot 10\,480 + 0,212 \cdot 9100$

$= 296 + 1930 = 2230 \text{ kcal/PS} \cdot \text{h}$, während $0,024 \cdot 10\,000 + 0,205 \cdot 8800 = 240 + 1800 = 2040 \text{ kcal}$ zugelassen sind; *Mehrverbrauch 9,3%.* — Aber weder nach dem Gewicht noch dem Heizwert nach soll

— wie ausdrücklich vereinbart wurde — gerechnet werden, sondern *dem Preise nach.* Nun werden die Kosten der Pferdekraftstunde $0,0283 \cdot 13,0 + 0,212 \cdot 5,0 = 0,37 + 1,06 = 1,43 \text{ Pf.}$, während $0,024 \cdot 13,0 + 0,205 \cdot 5,0 = 0,31 + 1,02 = 1,33 \text{ Pf.}$ zugelassen sind; *Mehrkosten 7,5%.*

Die verschiedenen Rechnungsweisen geben also recht verschiedene Resultate; während nach dem thermischen Wert berechnet die Gewährleistung kaum befriedigt ist, ist sie dem Geldwert nach — allerdings unter Zuhilfenahme des Spielraumes — bequem erfüllt.

Wegen der Verwendung zweier Brennstoffe macht die Angabe einer Verbrauchszahl einige Not; wenigstens läßt sich aus einer Zahl nicht auf die Wirtschaftlichkeit schließen, und auch die Begriffe des thermischen und des wirtschaftlichen Wirkungsgrades werden dadurch unklar. Zwar kann man addieren und, wie eben berechnet, den Brennstoffverbrauch zu $240,3 \text{ g/PS} \cdot \text{h}$ angeben; aber wenn die Einzelzahlen nicht festliegen, hat diese Angabe weniger Wert. Gelegentlich rechnet

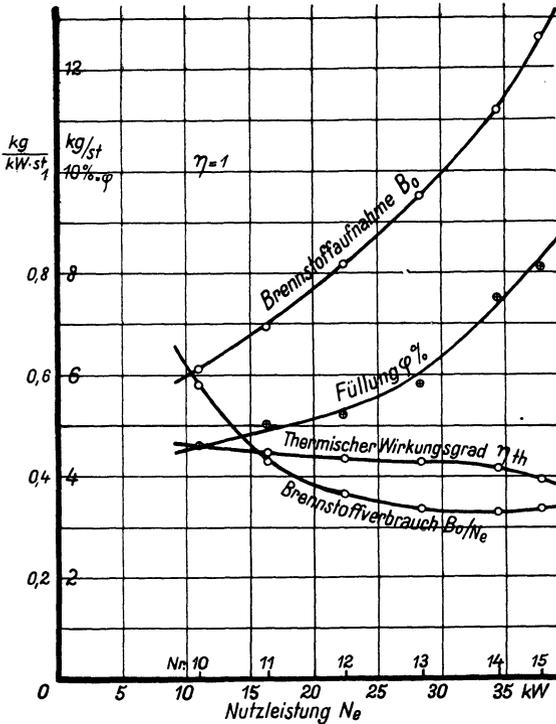


Fig. 177. Gleichdruck-Ölmaschine bei wechselnder Leistung.

man wohl beide Verbrauchszahlen auf einen Heizwert von 10 000 kcal/kg um; dem würde allerdings bei der oben angeführten Gewährleistung der Wortlaut widersprechen. Da der Heizwertverbrauch der beiden

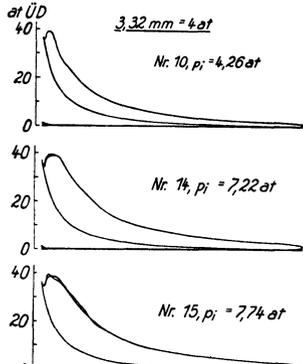


Fig. 178. Diagramme der Ölmaschine bei wechselnder Leistung. $\frac{2}{5}$ nat. Gr.

Brennstoffe zu 2230 kcal/PS · h berechnet worden ist, so wäre der auf 10 000 kcal bezogene Brennstoffverbrauch 223 g/PS · h. In Tabelle 68 und Fig. 77 sind die Ergebnisse einer Reihe mit steigender Leistung zusammengestellt. Fig. 78 gibt die zugehörigen Diagramme. Der wirtschaftliche wie der thermische Wirkungsgrad kann nur auf die Menge: Treiböl + Zündöl bezogen werden, wird deshalb nach dem vorher Gesagten wirtschaftlichen Anforderungen nicht ganz gerecht. Der Höchstwert des wirtschaftlichen Wirkungsgrades bleibt mit 26,2% weit unter dem heute erreichbaren. Der mechanische Wirkungsgrad ist auffallend schlecht, weil bei einer Zweizylindermaschine nur ein Zylinder betrieben, der andere Kolben herausgenommen war, so daß noch die schwerere mehrfach gelagerte Welle betrieben wurde. Es ist noch eingetragen der Kompressionsenddruck und der Höchstdruck bei der Verbrennung — beide etwa konstant bei allen Leistungen —, ferner die Füllung φ , wie sie in Prozenten des Hubes dem Indikatordiagramm zu entnehmen ist, ganz wie bei der Dampfmaschine, nur nicht immer sehr genau, wenn nämlich die Spitze schlecht ausgeprägt ist; trotz dieser Unsicherheit geht die Brennstoffaufnahme gut mit der Füllung des Diagrammes, Zeile 17 von Tabelle 68.

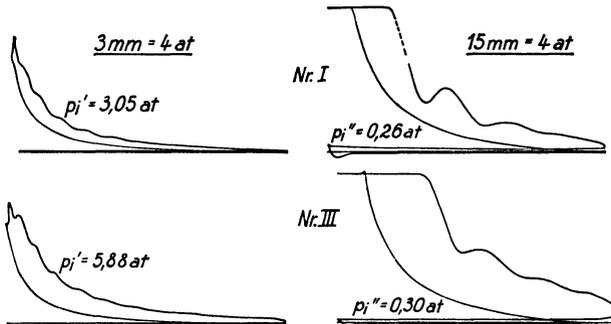


Fig. 179. Diagramme der Ölmaschine bei wechselnder Leistung. $\frac{2}{5}$ nat. Gr.

In Fig. 179 sind Diagramme einer anderen Maschine, ebenfalls bei verschiedener Leistung, deshalb noch gegeben, weil hier auch die Schwachfederdiagramme vorhanden sind, die in Fig. 178 fehlen und bei Ermittlung der indizierten Leistung Tabelle 68 deshalb unbeachtet blieben — fälschlicherweise, denn die Betrachtungen des § 94 gelten für die Ölmaschine wie für die Gasmaschine.

Beachtenswert ist gegenüber den Diagrammen der Gasmaschine Fig. 136, § 93, daß die Schwachfederdiagramme stets die gleichen sind; der volumetrische Wirkungsgrad ist stets der gleiche; denn die Regelung ist eine reine Gemischregelung.

Tabelle 68¹⁾. Verbrauch eines Ölmotors bei wechselnder Leistung.

Zylinderbohrung 300 mm; Hub 580 mm; $N_i = 0,0335 \cdot p_i \cdot n$ kW.

Einblasdruck 70 at;

Heizwerte des Treiböls (Teeröl) 9100 kcal/kg; des Zündöls 10 530 kcal/kg.

Versuch Nr.		10	12	14	15
1	Bremsleistung N_e kW	10,5	22,3	34,3	37,8
2	Drehzahl n /min	230	228	225	223
3	Indizierter Druck p_i at	4,26	5,45	7,22	7,74
4	Indizierte Leistung N_i kW	32,8	41,5	51,4	57,7
5	Leistungsverlust $N_i - N_e$ „	22,3	19,2	20,1	19,9
6	Mechanischer Wirkungsgrad $\eta_m = N_e/N_i$ —	0,321	0,536	0,630	0,655
7	Brennstoffaufnahme: Teeröl B_1 . . . kg/h	5,05	7,40	10,96	12,62
8	Zündöl B_2 . . . „	1,44	1,39	1,18	1,08
9	Zusammen, bez. auf 10 000 kcal, B_o „	6,11	8,19	11,21	12,62
10	Brennstoffverbrauch B_o/N_e . . . kg/kW · h	0,581	0,367	0,328	0,304
11	B_o/N_i . . . „	0,186	0,197	0,207	0,219
12	Thermischer Wirkungsgrad η_{th} . . . —	0,460	0,436	0,417	0,393
13	Wirtschaftlicher Wirkungsgrad η_w . . —	0,148	0,234	0,262	0,257
14	Kompressionsdruck at abs.	35,3	36,9	36,3	36,8
15	Höchstdruck bei der Verbrennung „	38,7	39,2	38,4	38,7
16	Füllung φ %	4,6	5,4	7,5	8,1
17	$B_o : \varphi$ —	1,33	1,52	1,50	1,56

110. Andere Versuchsreihen am Ölmotor. Betreffs anderer Versuchsreihen ist die Mannigfaltigkeit bei der Dieselmachine kleiner als bei der Verpuffungsmachine, weil weder der Zündungspunkt noch das Gemisch beliebig geändert werden kann. Verändern kann man den Beginn des Einblasens, und auch den Einblaseüberdruck.

Den *Zeitpunkt des Einblasens* kann man meist verändern, indem man die am Schwinghebel sitzende Druckschraube mehr oder weniger gegen das Einblaseventil vorstellt, also den toten Gang zwischen beiden und dadurch auch den Ventilhub verändert. Daß durch diese Maßnahme zugleich der Wiederabschluß der Einblasenadel verändert wird, ist normal belanglos, weil der Brennstoff rechtzeitig vorher schon gänzlich eingeblasen ist; also ändert sich dadurch nur die Menge überflüssig eingeblasener Einblaseluft. Verschiedenes Einblasen macht sich im Indikator diagramm kenntlich, wie Fig. 180 zeigt; man kann die Verspätung weiter treiben als in Nr. 4, bis wegen zu niedriger Temperatur — der Druck geht ja herab — die Zündung ausbleibt.

¹⁾ Versuche der Tabelle 68 und 69 nach einer Diplomarbeit des Dipl.-Ing. W. Beitz.

Tabelle 69. Einfluß des Einblasedruck

	Versuch Nr.	Leistung	
		4	7
1	Bremsleistung N_e kW	21,2	21,25
2	Einblasedruck p_e at	50	60
3	Drehzahl n /min	226	227
4	Indizierter Druck p_i at	5,68	5,71
5	Indizierte Leistung N_i kW	43,0	43,4
6	Leistungsverlust $N_i - N_e$ „	21,8	22,15
7	Brennstoffaufnahme Treiböl B_1 kg/h	9,20	7,70
8	Zündöl B_2 „	1,22	1,33
9	zusammen, bzw. auf 10 000 kcal = B_0 „	9,64	8,40
10	Brennstoffverbrauch B_0/N_e kg/kW · h	0,456	0,396
11	„ B_0/N_i „	0,224	0,193
12	Thermischer Wirkungsgrad $\eta_{th} = \frac{10000 \cdot N_i}{859 \cdot B_0}$ —	0,383	0,444
13	Mechanischer Wirkungsgrad η_m —	0,493	0,490
14	Wirtschaftlicher Wirkungsgrad η_w —	0,189	0,217
15	Kompressionsdruck p_k at abs.	36,0	36,8
16	Höchstdruck bei der Verbrennung p_m „	29,3	37,2
17	Einblaseüberdruck $p_e - p_m$ at	20,7	22,8

Die Wirkung wechselnden Einblaseüberdruckes wird durch die Versuchsreihen erläutert, die Tabelle 69 und Fig. 181 und 182 geben. Eine

Reihe ist mit unveränderter Leistung ausgeführt, die andere bei Höchstleistung der Maschine.

Bei unveränderter Leistung wird die Wirtschaftlichkeit bei 70 at am günstigsten. Der Einblasedruck 50 at bei Nr. 4 ist dadurch als zu gering gekennzeichnet, daß nun im Zylinder der Kompressionsenddruck bei weitem nicht mehr ausgenutzt wird; die schleppende Verbrennung und mangelhafte Zerstäubung war auch an rauchendem Auspuff kenntlich. Bei 80 at Einblasedruck, Nr. 18, geht der Verbrennungsdruck bis 44,5 at, weit über den Kompressionsenddruck hinaus. Der thermische Wirkungsgrad gewinnt auch hierdurch noch, aber der mechanische sinkt ab, indem nun der in der Düse vorhandene Brennstoff vorzeitig verbraucht ist und dann unnötige Luft einblase wird.

Die Leistung der Kompressionspumpe ist nämlich unter die Getriebeverluste gerechnet, sie verschlechtert also den mechanischen Wirkungsgrad. Diese Rechnungsweise ist notwendig, denn man kann meist den

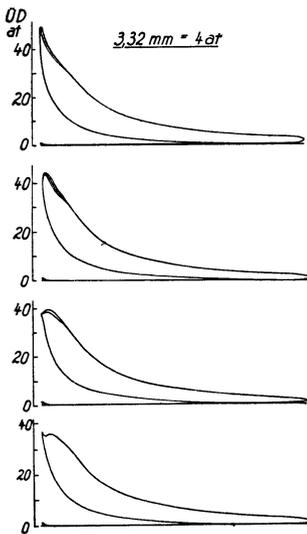


Fig. 180. Diagrammgestalten bei verschiedenem Beginn des Einblasens; Einblasedruck unverändert 70 at. Leistung konstant. $\frac{2}{3}$ nat. Gr.

auf den Gang des Ölmotors.

konstant		Höchstleistung		
12	18	9	15	21
22,3	21,8	33,6	37,8	40,5
70	80	60	70	80
228	227	223	223	222,5
5,45	5,95	7,19	7,74	8,38
41,6	45,1	53,6	57,7	62,4
19,3	23,3	20,0	19,9	21,9
7,40	7,81	12,35	12,62	12,91
1,39	1,34	1,12	1,08	1,05
8,19	8,52	12,41	12,62	12,86
0,367	0,392	0,370	0,334	0,318
0,197	0,189	0,231	0,219	0,206
0,436	0,455	0,372	0,393	0,416
0,536	0,483	0,627	0,655	0,650
0,234	0,219	0,233	0,257	0,270
36,9	34,8	36,2	36,8	36,0
39,2	44,5	34,7	38,7	45,8
30,8	35,5	25,3	31,3	34,2

Leistungsverbrauch der Pumpen nicht messen, also ihn nicht berücksichtigen; sie ist zulässig nach den Erwägungen des § 94, denn es handelt sich teilweise um die zum Zerstäuben nötige Arbeit, also um einen mechanischen Nebenzweck, der mit dem thermischen Kreisprozeß insoweit nichts zu tun hat; teilweise freilich doch, denn die eingeblasene Luft wird auch als Kompressionsluft verwendet.

Die bei Höchstleistung aufgenommene Reihe zeigt starkes Anwachsen der Leistungshergabe mit dem Einblasedruck, und zwar bis 80 at hin dauernd; dessen Steigerung ist also ein Mittel zur Leistungssteigerung.

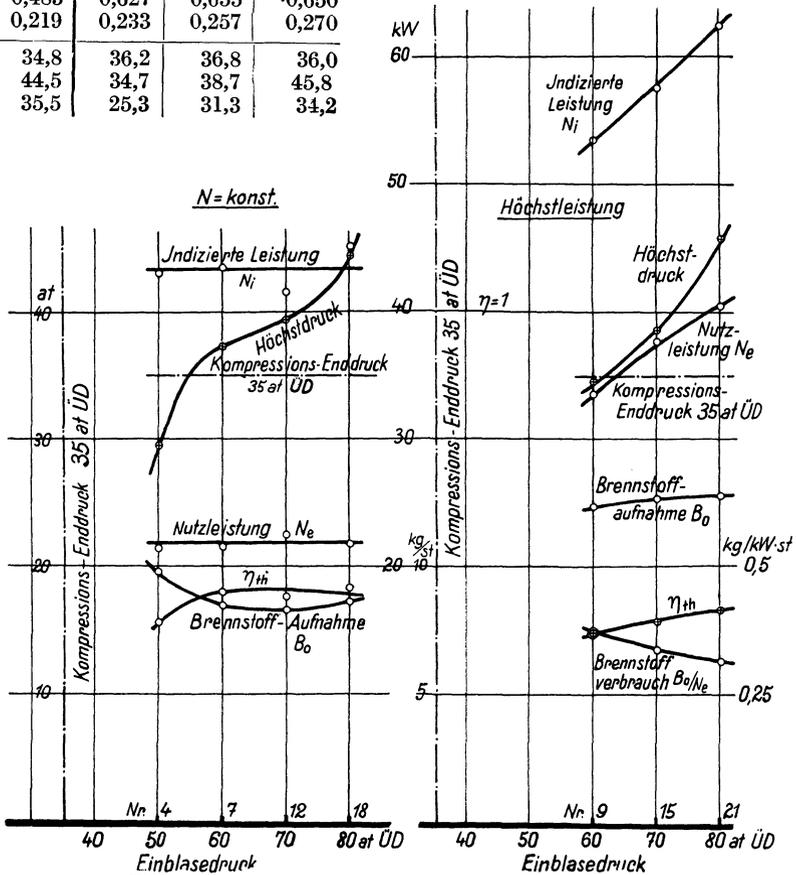


Fig. 181 a und b. Ölmotor bei wechselndem Einblasedruck.

Bezogen auf Höchstleistung ist die Wirtschaftlichkeit dauernd im Wachsen, denn der thermische Wirkungsgrad steigt und der mechanische wird diesmal nicht merklich geringer, da die höhere Leistung der Einblasedruckpumpe diesmal ausgenutzt wird.

Bei 50 at war ein als Höchstleistung anzusprechender Zustand nicht zu erzielen. Der Auspuff rußte stark, und der Zylinder setzte so schnell Ruß an, daß der Zustand betriebstechnisch unmöglich war. Auch bleibt

diesmal schon bei 60 at Einblasedruck, Nr. 9, der Höchstdruck der Verbrennung unter dem Kompressionsenddruck. Bei 50 at Einblasedruck war über die Leistung des Versuches 4 nicht wohl hinauszugehen.

Bei allen Versuchen am Ölmotor lassen sich dieselben *weiteren Auswertungen* machen wie bei der Gasmaschine. Hat man die Luftmenge oder die Abgaszusammensetzung gemessen, sowie die Abgastemperatur, und kennt man das Verdichtungs-volumen, so kann man Lieferungsgrad und Wärmebilanz, Temperatur- und Entropiedia-gramm in durchaus gleicher Weise berechnen.

111. Diagrammform, Einsteuerung der Viertaktmaschine. Die Abhängigkeit des Indikator-diagrammes vom Spiel der Ventile ist bei der Verbrennungskraftmaschine eine weniger innige als bei der Dampfmaschine. Wesentlich hängt die Diagrammform vom Verdichtungsverhältnis, dem Zündungspunkt und von Heizwert und Brisanz der Mischung ab. Diese Einflüsse sind durch die gegebenen Versuchsreihen hin-reichend klargestellt.

Die Einsteuerung der Viertaktmaschine ist deutlich nur im Schwachfederdiagramm zu beurteilen. In Fig. 183 ist ein solches in normaler Form und darunter dasselbe, mit versetzter Kurbel aufgenommen, gegeben, beide mit sehr schwacher Feder. Durch Auskurbeln der Maschine wurde für das Auslaßventil festgestellt:

Öffnen 44° vor dem äußeren Totpunkt.

Schließen 5° hinter dem inneren Totpunkt.

Trotz dieser großen *Voröffnung* zeigt das versetzte Diagramm, daß erst nahe dem Totpunkt der Druck im Zylinder der Atmosphäre nahekommt. Fig. 184, die volle versetzte Diagramme gibt, zeigt das-selbe.

Fig. 185 gibt das gewöhnliche und ein versetztes Diagramm einer Ölmaschine; das versetzte läßt die Verhältnisse des Einblasens deut-lich erkennen — und nötigenfalls auswerten.

In jedem Fall ist die Steuerung ähnlich zu behandeln wie die einer Dampfmaschine, und ebenso wie dort besprochen (§ 85, 86) kann man

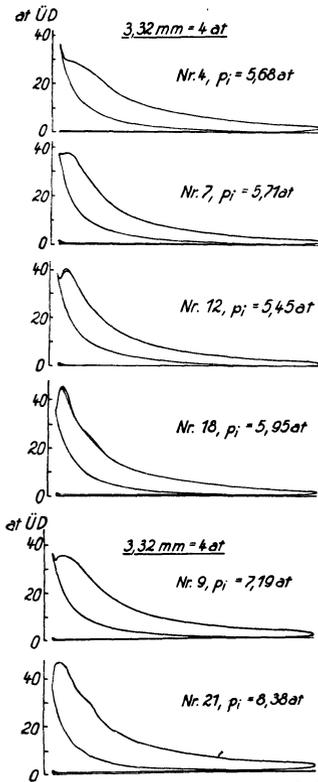


Fig. 182. Diagrammgestalten bei verschiedenem Einblase-Überdruck p_e . Beginn des Einblasens unverändert.

die Ventilerhebung bestimmen, sowie unter Benutzung der Druck- und Volumwerte des Indikatordiagrammes die Geschwindigkeit der angesaugten oder der auspuffenden Gase im Ventil mit dem Druckverlust in demselben in Beziehung bringen.

Das Auslaßventil hat eine merkliche Voröffnung; ohnedies bleibt die Ausblaselinie weiter über der Atmosphärenlinie. Es schließt etwas hinter dem Totpunkt. Fast gleichzeitig — wenig früher — öffnet das Einlaßventil, um im äußeren Totpunkt zu schließen. Grundsätzlich ist zu sagen, daß jeder zu frühe oder zu späte Schluß zu Verlusten führt, deren Größe man leicht unterschätzt. Besonders schädlich ist zu kurzes oder zu wenig hohes Anheben der Ventile bei höheren Drehzahlen, hierüber folgen in § 112 einige Belege. — In Fig. 179 öffnet das Einlaßventil zu spät, Folge: eine kleine verlorene Arbeitsfläche am Beginn. — In Fig. 178 scheint das Auslaßventil zu früh zu schließen, daher ein kurzer Druckanstieg auf fast 2 at abs um diese Zeit; zwar wird nur eine kleine Verlustfläche erzeugt, aber das Gewicht der Rückstände unnütz vergrößert; diese machen freilich beim Dieselmotor nicht so viel aus wie bei der gewöhnlichen Verbrennungskraftmaschine, weil bei ihm der Kompressionsraum, entsprechend der hohen Verdichtung, sehr klein ist: das Diagramm reagiert also bei ihm sehr scharf auf kleine Unstimmigkeiten der Steuerung am inneren Totpunkt, ohne daß doch die Folgen sehr schwerwiegend wären.

Einige *Besonderheiten von Diagrammen* seien noch kurz besprochen. In Fig. 184 sind Spiele 1 bis 5 versetzt indiziert. Unter 1 sind zwei normale Diagramme zu sehen, dann wurde die *Zündung ausgeschaltet*; Spiel 2 läßt daher die Expansion einfach symmetrisch zur Kompression abnehmen, Spiel 3 zeigt dasselbe, nur war infolge Verringerung der Drehzahl der Regler schon etwas gesunken, der volumetrische Wir-

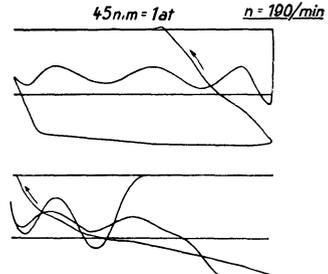


Fig. 183. Auspuff- und Ansaugvorgang bei der Gasmaschine im gewöhnlichen und im versetzten Schwachfederdiagramm. $\frac{2}{3}$ nat. Gr.

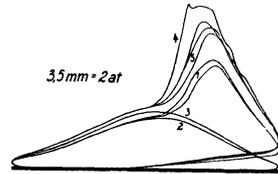


Fig. 184. Versetzte Diagramme einer Gasmaschine während und nach zwei Hüben ohne Zündung. $\frac{2}{3}$ nat. Gr.

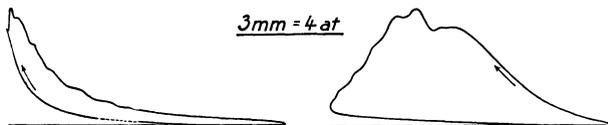


Fig. 185. Diagramm eines Ölmotors, gewöhnlich und versetzt. $\frac{2}{3}$ nat. Gr.

kungsgrad gestiegen und daher fiel der Kompressionsenddruck höher aus. Nun wurde nach den zwei toten Spielen die Zündung wieder eingeschaltet; es ergeben sich die normalen, jedoch noch bei tieferstehendem Regler erfolgenden Spiele 4 und 5, von denen das erste, Nr. 4, eine besonders brisante Verbrennung zeigt, auch ein dumpfes Puffen im

Getriebe hören lieb, weil vorher alle Rückstände durch Gemisch ausgewaschen waren, so daß also die Ladung in der Tat rund 20% reicher war als normal.

Fig. 186 gibt unter a) Diagramme, die im *Anlassen der Maschine* bei verringerter Kompression aufgenommen sind: das Einlaßventil

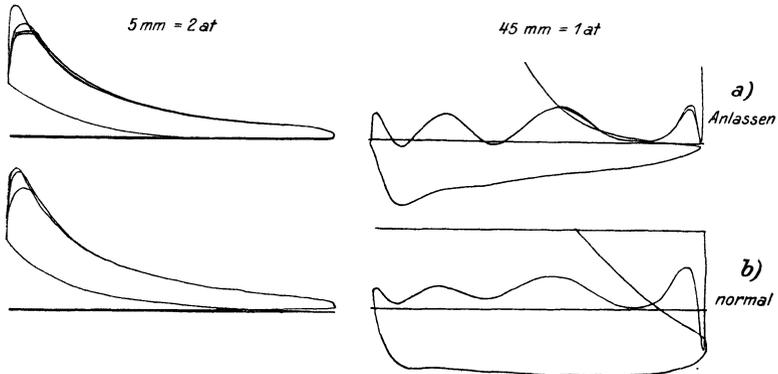


Fig. 186. Gewöhnliche und Schwachfederdiagramme der Gasmaschine im dekomprimierten Zustand verglichen mit normalem. $\frac{1}{2}$ nat. Gr.

wurde von einem besonderen Anlaßnocken bedient, der verspäteten Abschluß des Einlasses und dadurch Zurückdrücken eines Teiles der eingesaugten Gase bewirkt (*Dekompressionseinrichtung*); unter b wird das normale Diagramm zum Vergleich gegeben.

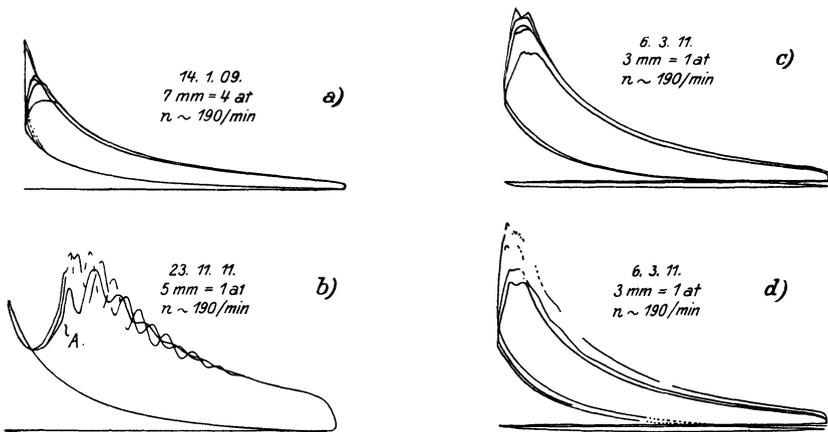


Fig. 187. Unregelmäßigkeiten in der Zündung der Gasmaschine. $\frac{1}{2}$ nat. Gr.

Fig. 187 gibt unter a) in einer normalen Diagrammserie zwei Vorzündungen, durch *Selbstentzündung* des Gemisches veranlaßt oder durch glimmenden Ruß eingeleitet. Solche Diagramme sind nicht selten. — Unter b) bis d) werden eigenartige, an der gleichen Maschine gelegentlich aus nicht ersichtlicher Ursache erhaltene Diagramme gegeben. Bei b) ist Spätzündung vorhanden, die erst langsam zu sein scheint, dann aber

von Punkt A an ohne Änderung in der mittleren Kurve von Schwingungen überlagert wird; ob die Schwingungen als Indikatorschwingungen (Techn. Mess. § 90) anzusprechen sind, ist sehr zweifelhaft; kein steiler Druckanstieg geht ihnen voran, und sie sind nicht von vornherein abklingend. Eigenartige Unstetigkeiten der Verbrennung zeigen auch die Diagramme c und d, namentlich während des Aufnehmens der letzteren schwankte der Regler ohne ersichtliche Ursache auf und nieder — was die verschiedenen Kompressionskurven, nicht aber den flackernden Verlauf der Verbrennung im Höchstpunkt erklärt.

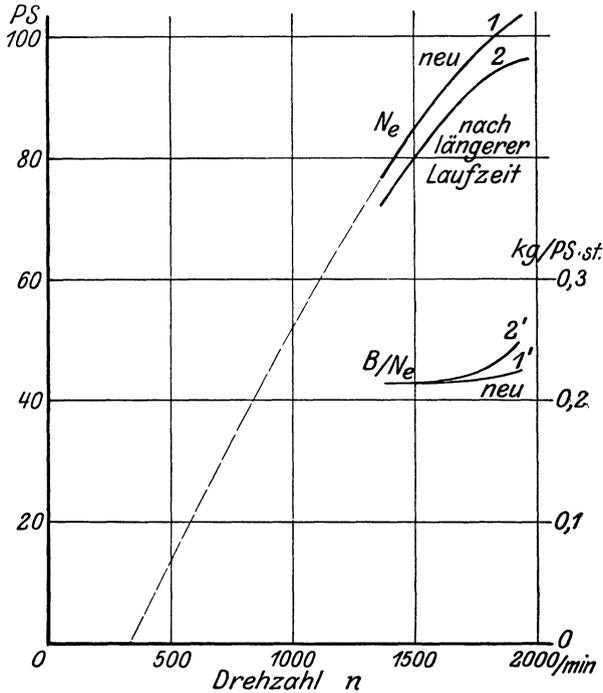


Fig. 188. Leistungsnachlaß eines schnelllaufenden Benzinmotors (Flugmotors) mit der Betriebsdauer.

112. Verbrennungskraftmaschinen hoher Drehzahl. Die Drehzahl wird bei Verbrennungskraftmaschinen viel weiter gesteigert als bei Kolbendampfmaschinen: man kommt auf Drehzahlen bis 2000 und noch höher. In verschärftem Maße treten dann die Erscheinungen auf, die bei niederen Drehzahlen merklich, aber belanglos sind: Abfallen des Drehmomentes in der Leistungscharakteristik, und Notwendigkeit hinreichender Ventilgröße und hinreichend verlängerter Öffnungsdauer, namentlich des Einlaßventils.

Fig. 188 und 189 geben die Abhängigkeit der Leistung von der Drehzahl des Motors, bei dauernd gänzlich geöffnetem Gasgemischregler. Man kann die Kurven aufnehmen, indem man den Motor mit Wasser- oder Luftbremse oder elektrisch belastet und die Belastung so verändert,

daß sich die Drehzahl nur hierdurch innerhalb der gewünschten Grenzen ändert. Das geleistete Drehmoment kann an der Bremse oder aber nach der Rückdruckmethode bestimmt werden; im letzteren Fall darf man die Reaktion der auspuffenden Verbrennungsgase wegen der sehr hohen Geschwindigkeit derselben nicht vernachlässigen, es sei denn, daß man die Auspuffrohre in axialer Richtung oder rein radial zur Maschinenachse enden läßt. Doch sollen die Umföhrungsrohre in diese Richtung auch keinen großen Widerstand haben, da sonst die Leistung herabgesetzt wird.

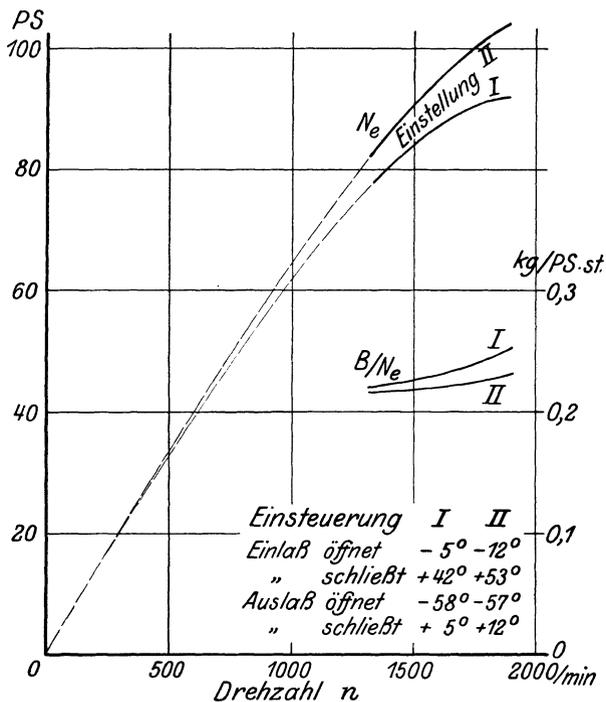


Fig. 189. Leistungsverlust eines schnelllaufenden Benzinmotors (Flugmotors) durch ungünstige Einstimmung der Ventile.

Die Höchstleistung ist bei den Drehzahlen der Figuren noch nicht erreicht.

Die Figuren deuten an, in welchem Maße die Leistung eines Motors, andererseits sein Verbrauch beeinflusst wird durch die nach längerer Laufdauer oder bei schlechter Arbeit eintretenden Undichtheiten des Kolbens und der Ventile (Fig. 188) oder durch ungünstige Einstimmung der Ventile (Fig. 189). In beiden Fällen wird die Leistung kleiner, der Verbrauch größer, besonders merklich von einer gewissen Drehzahl an. Bei der ungünstigen Einstimmung I waren z. B. die Einlaßventile mit 5° Voreinstromung und 42° Nacheilung in der Schlußbewegung eingeregelt, gegen - 12° bzw. 53° bei der besseren Einstimmung II. Der Ventilhub war beidemal gleich, es waren nämlich die Nocken aus-

gewechselt worden. Man kann ähnliche Wirkungen einfacher künstlich erzielen, indem man den toten Gang der Steuerhebel gegen die Nockenrollen vergrößert und dadurch auch den Ventilhub verkleinert.

Motoren so hoher Drehzahl werden stets mit flüssigem Brennstoff betrieben. In bezug auf die Verbrennung ist zu beachten, ob etwa die Verbrennung mit Luftmangel erfolgt; trotz geringerer Wirtschaftlichkeit sind Motoren doch deshalb nicht selten auf Luftmangel eingestellt, weil durch die latente Wärme des verdunstenden Brennstoffes dann die Temperatur für Kolben und Auslaßventile niedriger wird. Beim Arbeiten mit Luftmangel ist die übliche Abgasanalyse nicht ohne weiteres anwendbar.

IV. Arbeitsmaschinen.

a) Kolbenpumpe.

113. Leistung, Arbeitsaufnahme, Wirkungsgrade der Pumpe und der Pumpanlage. Die Nutzleistung der Pumpanlage besteht darin, ein gewisses Flüssigkeitsgewicht G kg/s auf eine bestimmte Förderhöhe H m zu heben; die *Nutzleistung* ist dann das Produkt beider:

$$N_e = G \cdot H \frac{\text{m kg}}{\text{s}} = \frac{G \cdot H}{75} \text{ PS} = \frac{G \cdot H}{102} \text{ kW} \dots \dots (1)$$

Man kann aber auch die Nutzleistung kennzeichnen und messen dadurch, daß ein gewisses Flüssigkeitsvolumen V m³/s gegen einen Druckunterschied p kg/m² zu beiden Seiten der Pumpe vorwärts gedrückt wird; die Nutzleistung ist wieder das Produkt beider

$$N_e = V \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot p \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = V \cdot p \frac{\text{m kg}}{\text{s}} = \frac{V \cdot p}{75} \text{ PS} = \frac{V \cdot p}{102} \text{ kW} \dots (2)$$

Ist γ kg/m³ das spezifische Gewicht der geförderten Flüssigkeit, so ist bekanntlich

$$\begin{aligned} \text{einerseits} \quad G \text{ kg} &= V \text{ m}^3 \cdot \gamma \text{ kg/m}^3, \\ \text{andererseits} \quad H \text{ m Flüssigkeitssäule} &= \frac{p \text{ kg/m}^2}{\gamma \text{ kg/m}^3}, \end{aligned}$$

woraus die Identität der Ansätze (1) und (2) folgt; übrigens ist bei kaltem Wasser, $\gamma = 1000$ kg/m³, die Rechnung selbst zahlenmäßig identisch bis auf die Stellung des Kommas.

Hat man nicht die zueinander passenden Größen gemessen, sondern entweder G und p oder V und H , so geht das spezifische Gewicht je in leicht ersichtlicher Weise in die Rechnung ein.

Zum Antrieb der Pumpe ist ein *Leistungsaufwand* nötig, der mit N_1 bezeichnet werden soll und der jedenfalls größer als N_e ist. Untersuchen wir eine *Pumpe* allein, so ist N_1 an der Stelle zu messen, wo die Leistung aus dem antreibenden Motor in die Pumpe selbst übertritt. Dazu ist

ein Riemen dynamometer erforderlich; man kann auch die Rückdruckmethode anwenden, indem man die ganze Pumpe pendelnd aufstellt (Techn. Mess. § 78). Untersucht man die *Pumpmaschine* als Ganzes, also den aus der Pumpe selbst und dem antreibenden Motor bestehenden Satz, dann ist N_1 die diesem zugeführte Energie.

Je nachdem, ob man in den Formeln (1) und (2) für H und p Werte einsetzt, die unmittelbar an der Pumpe gemessen sind, oder ob man als H die geodätische Förderhöhe zwischen Saug- und Druckwasserspiegel oder als p den auf gleiche Manometerhöhe bezogenen Druckunterschied zweier Behälter ansetzt, zwischen denen die Pumpe durch Vermittlung einer Rohrleitung fördert — je nachdem schließt man den Widerstand der Rohrleitung in N_e aus oder ein und erhält demnach entweder die *Nutzleistung der Pumpe bzw. Pumpmaschine* oder aber die *Nutzleistung der Pumpanlage*, bestehend aus Pumpe und Rohrleitung.

In jedem Fall ist der Unterschied

$$\mathfrak{B} = N_1 - N_e \dots \dots \dots (3)$$

der (gesamte) Verlust in der Maschine oder dem Satz und der Quotient

$$\eta_w = \frac{N_e}{N_1} \dots \dots \dots (4)$$

ist der gesamte Wirkungsgrad desselben. Wir können ihn als den wirtschaftlichen Wirkungsgrad bezeichnen, wenn wir die Bezeichnung dem Brauch bei Kraftmaschinen anpassen wollen.

Die geförderte Flüssigkeit nimmt dem arbeitenden Teil der Pumpe eine Leistung N_i ab, die wir als die indizierte Leistung der Pumpe bezeichnen. Sie kann bei Kolbenpumpen als die vom Kolben auf die Flüssigkeit übertragene Leistung mittels Indikators gemessen werden; bei Kreiselpumpen kann man N_i nicht messen, sie ist aber begrifflich ebenso als diejenige Leistung vorhanden, die die Schaufelung an die Flüssigkeit abgibt.

Der gesamte Verlust wird durch die indizierte Leistung unterteilt in den Teil, der der Leistungsübertragung vom arbeitenden Teil der Pumpe auf die Flüssigkeit vorangeht und den, der ihm folgt. Letzterer, in der geförderten Flüssigkeit statthabende Verlust ist hydraulischer Natur; Wirbelung des Wassers und Drosselung in den Ventilen und bei Richtungsänderungen verursachen ihn. Der hydraulische Verlust ist

$$\mathfrak{B}_h = N_i - N_e, \dots \dots \dots (5)$$

und wir haben dementsprechend einen *hydraulischen Wirkungsgrad*

$$\eta_h = \frac{N_e}{N_i} \dots \dots \dots (6)$$

als Maß für die Ausführung der Pumpe in hydraulischer Hinsicht — ob z. B. die Ventile weit genug öffnen.

Andererseits ist

$$\mathfrak{B}_m = N_1 - N_i \dots \dots \dots (7)$$

$$\eta_m = \frac{N_i}{N_1} \dots \dots \dots (8)$$

ein Maß für die Güte des mechanischen Teils. Der mechanische Wirkungsgrad η_m wird durch Lager- und Stopfbüchsenreibung und ähnliches beeinflusst. Untersuchen wir die Pumpmaschine, so ist der Verlust im Elektromotor, in der Dampfmaschine mit in η_m enthalten, wenn wir nicht etwa Mittel haben, \mathfrak{R}_m noch weiter zu unterteilen, worauf man dann den Teilen besondere Benennungen von Fall zu Fall zu erteilen wissen wird.

114. Messung der Flüssigkeitsmenge; volumetrischer Wirkungsgrad der Kolbenpumpen. Die von einer Pumpe geförderte Flüssigkeitsmenge wird nach irgendeinem der bekannten (Techn. Mess. Kap. VIII) Verfahren gemessen. Je nach der in Frage kommenden sekundlichen Menge und je nach der örtlichen Anordnung kann man also die Messung mit Wassermesser, mit Durchflußöffnung oder Überfall, durch Auffangen in einem Gefäß oder durch Leerpumpen eines Gefäßes vornehmen. Man hat nur stets zu beachten, ob die Messung das Volumen oder das Gewicht ergibt und danach die Rechnung richtig (§ 113) vorzunehmen; besonders bei Wasser muß man achtsam sein, weil die zahlenmäßigen Unterschiede zwischen Gewicht und Volumen zwar vorhanden, aber so gering sind, daß sie leicht übersehen werden (bei 50°: 1 kg = 1,012 l; bei 100°: 1 kg = 1,043 l).

Bei Pumpenuntersuchungen kommt auch besonders oft die Flüssigkeitsmessung durch Auffüllen des Druckbehälters in Frage, dessen Durchmesser an mehreren Stellen man ausmißt, und dessen Inhalt man danach berechnet. Für große Mengen sei an die chemisch-titrimetrische oder kolorimetrische Messung erinnert, Techn. Mess. § 49 der 4. Aufl.

Bei Kolbenpumpen kann man sich zur Ermittlung der geförderten Wassermenge auch — nicht befriedigend genau — des volumetrischen Wirkungsgrades bedienen, den man schätzt, oder den man für einen Fall bestimmt, um ihn dann dauernd konstant anzunehmen.

Der *volumetrische Wirkungsgrad einer Kolbenpumpe* ist der Quotient aus dem wirklich geförderten Flüssigkeitsvolumen V und dem vom Kolben (Plunger) freigelegten Volumen. Es ist, bei einer einzyindrigen einfach wirkenden (oder Stufenkolben-) Pumpe vom Hub s m und vom Durchmesser D m des (Haupt-) Plungers, und bei einer Drehzahl n /min

$$\eta_{vol} = \frac{V}{\frac{1}{4} D^2 \pi \cdot s \cdot \frac{1}{60} n} = \frac{V}{V_h \cdot \frac{1}{60} n}.$$

Mit $V_h = \frac{1}{4} D^2 \pi \cdot s$ haben wir das Hubvolumen in m³ bezeichnet. Ist η_{vol} einmal bekannt oder angenommen, so ist die Förderung

$$V = \eta_{vol} \cdot V_h \cdot \frac{n}{60} \dots \dots \dots (9)$$

stets durch eine einfache Messung der Drehzahl bestimmt.

Der volumetrische Wirkungsgrad ist kein eigentlicher Wirkungsgrad; er stellt nicht das Verhältnis zweier Energiemengen dar, sondern er vergleicht zwei Volumina miteinander. Es widerspricht daher nicht dem Energiesatz, wenn $\eta_{vol} > 1$ wird; das kommt auch in der Tat in Ausnahmefällen (Fig. 235, § 123) vor als Folge von Massenwirkungen

der Flüssigkeitssäule; der Energiesatz verlangt für solche Fälle nur, daß auch der Arbeitsaufwand entsprechend steigt, und das tritt meist sogar in solchem Maße ein, daß der Betrieb mit $\eta_{vol} > 1$ höchst unwirtschaftlich ist. — Auch in wirtschaftlicher Hinsicht ist der volumetrische Wirkungsgrad ganz anders zu beurteilen als die eigentlichen Wirkungsgrade. In erster Linie beeinflussen diese die Betriebskosten: man muß, ist der hydraulische Wirkungsgrad ungünstig, mehr Dampf aufwenden; die Abmessungen der Pumpe reichen ebenso aus wie bei gutem Wirkungsgrad — höchstens müßte als sekundäre Folge die Antriebsmaschine etwas verstärkt werden. Der volumetrische Wirkungsgrad beeinflußt in erster Linie nicht die Betriebskosten, sondern die Beschaffungskosten der Pumpe; deren Abmessungen müssen — wenn die Drehzahl durch irgendwelche Erwägungen begrenzt ist — umgekehrt proportional dem volumetrischen Wirkungsgrad vergrößert werden, um die verlangte Menge zu fördern; der Dampfverbrauch wird zunächst nicht verändert — vielleicht nimmt er sekundär etwas zu, weil eben die größere Maschine etwas mehr Dampf braucht.

Beispiel für Bestimmung des volumetrischen Wirkungsgrades. Mit einer Pumpe von $s = 0,3$ m, $D = 0,215$ m, also $V_h = 0,01089$ m³/Uml wurde ein Hochbehälter gespeist, dessen Durchmesser, in verschiedenen Höhen und Richtungen gemessen, war im Mittelwert 4,01 m, Querschnitt 12,63 m². Beobachtet wurde, wann ein am Behälter angebrachter Schwimmer die Marken passierte, die von 0,1 zu 0,1 m Höhe angebracht waren; auf Signal hin wurde alsdann die Zeit sowie der Stand des Zählwerks an der Pumpe abgelesen. Es ergab sich Tabelle 70.

Es zeigt sich, daß die Drehzahl der Maschine sehr befriedigend konstant war; sowohl die Zeitmessung als die Ablesung am Zählwerk ist also in Ordnung. Wenn daher die Wasserförderung wechselnde Werte liefert, so kann das nur an Ungleichmäßigkeiten der Schwimmerablesung liegen, die für Messungen von 10 zu 10 cm nicht genügt. Über 1 m hin wird ihre Angabe trotzdem ausreichen, und wir finden, indem wir die Zwischenablesungen und auch die ganze Zeitmessung nur für diese Kontrolle verwenden: Zum Fördern von 12,63 m³ Wasser waren 1188 Umläufe nötig; gefördert sind also 0,01063 m³/Uml, gegenüber dem Hubvolumen 0,01089 m³; der volumetrische Wirkungsgrad ist $0,01063 : 0,01089 = 0,977$. Dieser Wert gilt nur bei der Drehzahl $n = 1192 \cdot 60 : 993 = 71,7$ /min; wir können, wenn die Pumpe dauernd mit dieser Drehzahl läuft, das Zählwerk als zuverlässigen Wassermesser benutzen. Wenn wir auch bei anderen Drehzahlen den gleichen Wert der Berechnung der Wassermenge zugrunde legen, so ist das eine Schätzung.

Tabelle 70, Ermittlung
Hub 0,3 m, Dm 0,215 m,

	Schwimmerstand m
	Geförderte Menge m ³
1	Stand des Zählwerkes . . . —
2	Unterschied —
3	Stand der Stechuhr —
4	Unterschied s
5	Wasserförderung m ³ /s
6	Drehzahl /min
7	Quotient $\times 60\ 000$. . . 1/Uml

des volumetrischen Wirkungsgrades einer Kolbenpumpe,
 Hubvolumen 10,89 l, durch Auffüllen eines Behälters, Dm 4,01 m, Fläche 12,63 m².

2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5 je 1,263	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	Σ A 1,0 12,63
1350	1463	1583	1704	1819	1938	2061	2181	2300	2422	2538	1188
113	120	121	115	119	123	120	119	122	116		1188
0	1' 37"	3' 18"	5' 59"	6' 34"	8' 14"	9' 58"	11' 38"	13' 16"	14' 57"	16' 33"	993
97	101	101	95	100	104	100	98	101	96		
0,0130	0,0125	0,0125	0,0133	0,0126	0,0122	0,0126	0,0129	0,0125	0,0132		
69,9	71,4	71,9	72,6	71,4	71,0	72,0	72,9	72,5	72,5		
11,1	10,5	10,4	11,0	10,6	10,3	10,6	10,6	10,4	10,9		
Wasserrförderung					12,63 : 1188 = 10,63 l/Uml						
Volumetrischer Wirkungsgrad					10,63 : 10,89 = 0,977						
bei der Drehzahl					1188 × 60 : 993 = 71,7/min						

Der volumetrische Wirkungsgrad pflegt sich bei ordentlich gebauten Pumpen nicht weit von $\eta_{vol} = 1$ zu entfernen, pflegt daher auch nicht stark mit der Drehzahl zu schwanken; nur darf die Pumpe nicht Luft ansaugen (§ 124).

115. Beispiel für die Bestimmung der Wirkungsgrade. Die Versuchsanordnung kann nach Fig. 190 gemacht werden. Die Kolbenpumpe hebt das zu fördernde Wasser aus einem Saugbrunnen in einen Hochbehälter; die Saugleitung gibt das Wasser in den Saugwindkessel. Die Druckleitung beginnt an der Druckwindhaube, und es ist noch ein größerer Druckwindkessel in sie eingeschaltet.

Wir unterscheiden zwischen der Pumpe selbst, zwischen der Pumpmaschine einschließlich des antreibenden Motors (Elektromotor, Dampfmaschine, Ölmaschine) und der Pumpanlage einschließlich einer der betreffenden Pumpe allein dienenden Rohrleitung.

Das Hubvolumen der Pumpe ist 10,89 l = 0,01089 m³; bei der Drehzahl $n = 41,0$ /min und dem volumetrischen Wirkungsgrad $\eta_{vol} = 0,977$, angenommen gemäß Tabelle 70, ist das geförderte Flüssigkeitsvolumen

$$V = 0,977 \cdot 0,01089 \cdot 41,0 = 0,436 \text{ m}^3/\text{min} \\ = 0,00728 \text{ m}^3/\text{s} = 2,62 \text{ m}^3/\text{h} .$$

Wenn es sich um Förderung von kaltem Wasser handelt, so ist das spezifische Gewicht $\gamma = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$, und daher das geförderte Wassergewicht

$$G = 0,00728 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 7,28 \frac{\text{kg}}{\text{s}} .$$

Die nutzbare Förderhöhe ist der Höhenunterschied zwischen dem Wasserspiegel im Saugbrunnen und dem Ausguß der Druckleitung im Hochbehälter. Ersterer liegt 2,36 m unter, letzterer 34,67 m über dem wagerechten Fußboden des Maschinenhauses; daraus folgt als nutz-

bare geodätische Förderhöhe 37,03 m und als Nutzleistung der Pumpanlage, bestehend aus Pumpmaschine und Rohrleitung

$$N_e = \frac{7,28 \cdot 37,03}{75} = 3,59 \text{ PS.}$$

Die Pumpe selbst hat noch die Widerstände der Rohrleitung zu überwinden, die ihr bei dieser Rechnung nicht gutgebracht werden. Bei überwiegend wagerechtem Verlauf der Rohrleitung oder bei sehr enger Leitung kann dadurch die Leistung der Pumpe selbst viel zu klein erscheinen. Wo man daher die Pumpe allein untersucht (nicht

die Pumpanlage einschließlich der Rohrleitungen geliefert ist), da mißt man die Saug- und Druckhöhe unmittelbar an der Pumpe mit Manometern. Die Saughöhe wurde am Manometer des Saugwindkessels zu $p_1 = 0,19$ at angezeigt. Die Druckhöhe wäre entweder als p_2 am Manometer der Windhaube oder als p_2 am Manometer des großen Windkessels zu messen, letzteres z. B. dann, wenn der große Windkessel und die Rohrleitung zu ihm in die Lieferung einbegriffen war. An letzterem Manometer lasen wir

eine Druckhöhe $p_2 = 3,55$ at ab.

Nun bleibt jedoch noch zu beachten, daß

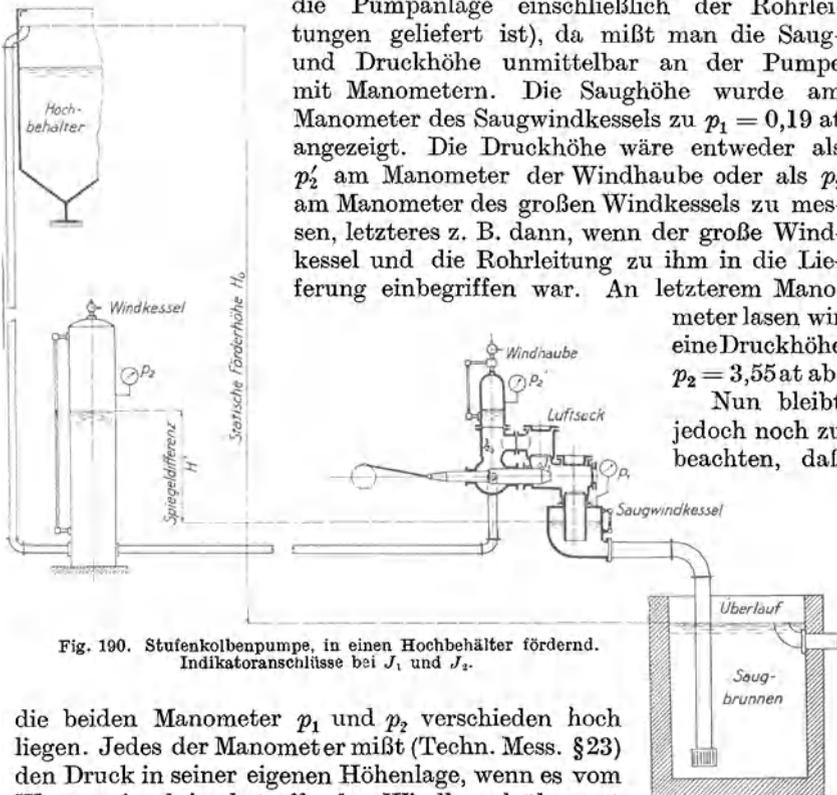


Fig. 190. Stufenkolbenpumpe, in einen Hochbehälter fördernd. Indikatoranschlüsse bei J_1 und J_2 .

die beiden Manometer p_1 und p_2 verschieden hoch liegen. Jedes der Manometer mißt (Techn. Mess. §23) den Druck in seiner eigenen Höhenlage, wenn es vom Wasserspiegel im betreffenden Windkessel überträgt wird; beim Saugmanometer der Fig. 190 kann das nicht vorkommen. Jedes der Manometer zeigt jedoch den Druck in Höhe des Wasserspiegels an, wenn es an den Luftraum eines Windkessels angeschlossen ist. Wir haben daher zur Angabe beider Manometer noch hinzuzuzählen den Unterschied H' in dem Wasserstand beider Windkessel, rechnen dabei aber am Druckwindkessel höchstens bis 1,9 m über Fußbodenhöhe, wo sich nämlich das Manometer befindet.

Bei unserem Versuch (Nr. 2) war der Höhenunterschied beider Wasserstände $H' = 1,0$ m.

Nur bei kaltem Wasser sind die Manometerangaben bis auf die Kommastellung mit den Höhenmessungen gleichwertig; bei anderen Flüssigkeiten hätte man das spezifische Gewicht beachten müssen. Bei Förderung kalten Wassers jedoch folgt aus den Messungen eine Förderhöhe für die Pumpe

$$H = 1,9 + 35,5 + 1,0 = 38,4 \text{ m}$$

oder der Förderdruck für die Pumpe

$$p = 0,19 + 3,55 + 0,10 = 3,84 \text{ at .}$$

Es sei empfohlen, immer die Angabe zu machen, die gemessen ist, in unserem Falle also den Förderdruck zu geben.

Die Nutzleistung der Pumpe zwischen den Windkesseln ist

$$N_e = \frac{0,00728 \cdot 3,84 \cdot 10000}{75} = 3,73 \text{ PS.}$$

Die 10 000 soll die Einheit at in kg/m^2 verwandeln.

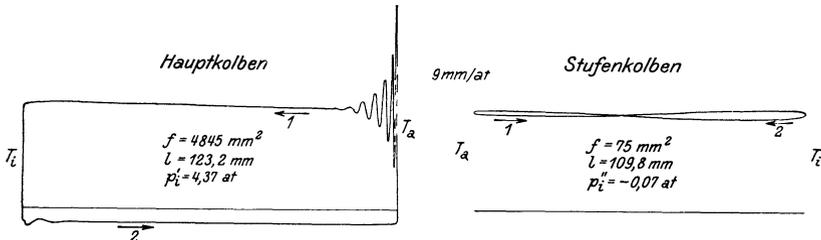


Fig. 191. Indikatorordigramme vom Pumpenraum und vom Druckraum einer Stufenkolbenpumpe $\frac{2}{3}$ nat. Gr.

Zur Bestimmung der indizierten Leistung wurden Indikatorordigramme am Pumpenraum bei J_1 und am Druckraum bei J_2 genommen; sie sind in Fig. 191 wiedergegeben. Das eigentliche Pumpendiagramm ist im wesentlichen ein Rechteck, das nur am Beginn jedes Hubes Schwingungen aufweist, die im wesentlichen Massenschwingungen des Indikatorschreibzeuges (Techn. Mess. § 90) sind, teilweise auf Massenwirkungen des Wassers und der Ventile beruhen. Es wird planimetriert wie immer, ergibt dabei 4845 mm^2 Fläche bei $123,2 \text{ mm}$ Länge, also $h_m = 39,3 \text{ mm}$, und bei einem Federmaßstab 9 mm/at ist der indizierte Druck $p'_i = 4,37 \text{ at}$. Dem entspricht eine Leistung (Abmessungen der Pumpe in Tabelle 70)

$$N'_i = \frac{363,0 \cdot 0,3 \cdot 4,37 \cdot 41,0}{60 \cdot 75} = 4,34 \text{ PS.}$$

Die Abstufung des Kolbens bei einer Stufenkolbenpumpe (Fig. 190) dient bekanntlich dem Zweck, diese vom Plunger geleistete Arbeit auf Hin- und Rückgang zu verteilen, indem die Ringfläche der Stufe in der Druckperiode des Hauptkolbens die Arbeit wieder hergibt, die sie in der Saugperiode aufgenommen hatte. Solche anderweite Verteilung des Leistungsbedarfs der ganzen Pumpe, die im Interesse gleichmäßigen

Ganges erfolgt, bedürfte an sich keiner Berücksichtigung bei der Leistungsberechnung. Voraussetzung wäre aber, daß der mittlere Druck auf den Stufenkolben bei beiden Hüben übereinstimmte. Das ist nie der Fall, da der Druck in der Windhaube stets etwas, oft (§ 123) recht bedeutend, schwankt. Dann aber können die Arbeitsaufnahmen und -hergaben verschieden sein, und deshalb ist stets auch der Druckraum einer Stufenkolbenpumpe zu indizieren. Als Diagramm ergibt sich eine mehr oder weniger flache, liegende Acht; die eine Fläche bedeutet Arbeitsaufnahme, die andere Arbeitsabgabe, und je nach der gegenseitigen Größe ergibt sich ein positiver oder negativer wirksamer indizierter Druck p_i'' , der auf die Ringfläche wirksam ist. In Fig. 191 ist der Flächenunterschied der beiden Acht-Schleifen unmittelbar durch Planimetrieren zu 75 mm^2 gefunden worden; Länge $109,8 \text{ mm}$, mittlere Höhe $0,67 \text{ mm}$, das ist nicht der mittlere Abstand der Acht von der Atmosphärenlinie, sondern der mittlere Höhenunterschied zwischen Hin- und Rückgang, wie stets beim Indizieren. Federmaßstab 9 mm/at , also $p_i'' = -0,07 \text{ at}$. — Der Plunger hat 215 mm , der Stufenkolben 152 mm Durchmesser, der Stufenkolben also $181,5 \text{ cm}^2$ Fläche. Die indizierte Leistung desselben wird

$$N_i'' = \frac{181,5 \cdot 0,3 \cdot -0,07 \cdot 41,0}{60 \cdot 75} = -0,035 \text{ PS}$$

und die indizierte Leistung der Maschine

$$N_i = N_i' + N_i'' = 4,34 - 0,035 = 4,30 \text{ PS}.$$

Um festzustellen, ob p_i'' und N_i'' positiv oder negativ einzusetzen sind, ist zunächst zuzusehen, ob in beiden aufgenommenen Diagrammen ein bestimmter Totpunkt an derselben oder an entgegengesetzter Seite liegt; das richtet sich nach dem Schnurantrieb der Trommel und ist im Stillstand ohne weiteres zu erkennen. In Fig. 191 sind entsprechende Totpunkte T_i und T_a an verschiedenen Enden. Nun hat man den Umfahrungssinn der Acht, Pfeil 1 und 2, Fig. 191, und zwar entweder aus leichten Schwingungen, die oft am Hubanfang des Druckdiagrammes auftreten (nicht in Fig. 191, wohl aber z. B. in Fig. 214 oder 229b und f), oder aus der Erwägung, daß die Drucke im Pumpenraum und im Druckraum sich um den etwa konstanten Ventilwiderstand (§ 122) unterscheiden und daher miteinander steigen und fallen; legt man daher die beiden zueinander gehörigen Diagramme mit den Atmosphärenlinien und mit den gleichen Totpunkten aufeinander und hält sie gegen scharfes Licht, so sieht man aus der Äquidistanz der Linien, welche derselben gleichzeitig beschrieben wurden. Nun bedeutet Pfeil 1 Arbeitsaufnahme, Pfeil 2 Arbeitsabgabe des Stufenkolbens. Da die durch Pfeil 1 gekennzeichnete Linie mehr überschießt als die andere, so nimmt der Stufenkolben Leistung auf, und p_i'' wie N_i'' sind negativ. — Nicht immer ist N_i'' so klein wie in unseren Diagrammen, und es darf daher nie ungemessen bleiben.

Die Pumpe wurde durch eine *Dampfmaschine* getrieben, und diese indizierte

$$N_{iD} = 6,85 \text{ PS}.$$

Demnach ist

der mechanische Verlust im Getriebe der Pumpmaschine $N_{iD} - N_i = 6,85 - 4,30 = 2,55$ PS,

der hydraulische Verlust in der Rohrleitung $N_e - N'_e = 3,73 - 3,59 = 0,14$ PS.

Ferner ist

der hydraulische Wirkungsgrad der Pumpe $\eta_h = \frac{3,73}{4,30} = 0,868$

der mechanische Wirkungsgrad der Pumpmaschine $\eta_m = \frac{4,30}{6,85} = 0,628$

der gesamte Wirkungsgrad der Pumpmaschine $\eta = \eta_h \cdot \eta_m = 0,544$

der gesamte Wirkungsgrad der Pumpanlage $\eta' = \frac{3,59}{6,85} = 0,524$.

Die Maschine nahm stündlich 63,0 kg Dampf von 8 at ÜD auf. Der Dampfverbrauch der Pumpmaschine war also $63,0 : 3,73 = 16,9$ kg/PS·h, bezogen auf gehobenes Wasser; und wenn der Sattdampf als trocken angenommen werden darf, so ist sein Wärmehalt 665 kcal/kg, also wird der wirtschaftliche Wirkungsgrad der ganzen Pumpmaschine, bezogen auf Speisewasser von 20°:

$$\eta_w = \frac{632 \cdot 3,73}{63,0 \cdot (665 - 20)} = 0,058 = 5,8\% .$$

Für praktische Zwecke wird aber nicht selten die Gewährleistung in kg Dampf für 1 m³ gehobenes Wasser gegeben — wobei dann natürlich die Förderhöhe bekannt sein muß und eine bedingende Angabe (§ 8, 14) ist. Im Beispiel ist dieser Dampfverbrauch

$$\frac{D}{V} = \frac{63,0 \text{ kg/h}}{2,62 \text{ m}^3/\text{h}} = 24,0 \frac{\text{kg Dampf}}{\text{m}^3 \text{ Wasser}} .$$

116. Kolbenpumpe bei veränderter Drehzahl. In der ersten durch Tabelle 71 wiedergegebenen Reihe wurde die Drehzahl verändert, während die Pumpe unverändert einen geodätischen Höhenunterschied vom Saugbrunnen zum Hochbehälter von 37,03 m zu überwinden hatte. Die Wassermenge nahm dann einfach proportional der Drehzahl zu, genau, da wir den volumetrischen Wirkungsgrad als konstant ansehen. Der Förderdruck steigt etwas an, entsprechend den Widerständen der Rohrleitung, und ebenso steigt der indizierte Druck an, in dem noch Wirbelungsverluste in der Pumpe und Durchgangsverluste in den Ventilen (§ 121, 122) eine Rolle spielen. Die Drucke sind in Fig. 192 dargestellt.

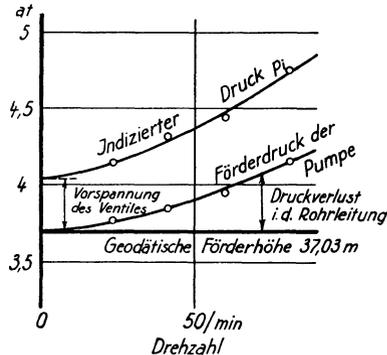


Fig. 192. Ansteigen des Förderdrucks bei wachsender Fördermenge (Drehzahl).

Die Leistungen wachsen einerseits mit der Drehzahl bzw. Wassermenge, andererseits nochmals mit dem Druck; sie steigen daher etwas schneller als proportional der Drehzahl; alle Leistungen (Fig. 193) konvergieren mit der Drehzahl

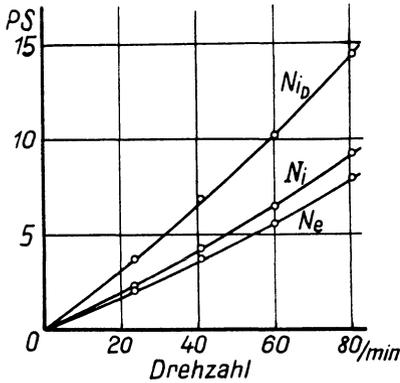


Fig. 193.

Fig. 193 bis 195. Verhalten der Kolbenpumpe bei wechselnder Fördermenge

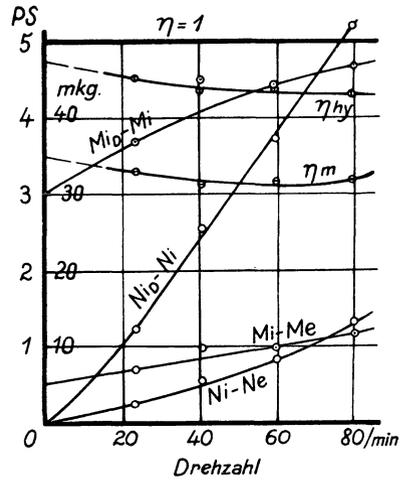


Fig. 194.

gegen Null, ebenso die Leistungsverluste (Fig. 194).

Die Wirkungsgrade halten sich im wesentlichen, auch bei veränderter Drehzahl, auf gleicher Höhe. Sie sinken auch dann nicht gegen Null ab, wenn die Drehzahl gegen Null geht und daher, aus der Leistung berechnet, $\eta = \frac{0}{0}$ wird; nach einem bekannten Satz der Differentialrechnung tritt dann an die Stelle der Leistungen in der Wirkungsgradformel je im Zähler und Nenner die Neigung der Leistungskurve im Nullpunkt ein, und das Verhältnis der beiden Neigungen ist auch im Nullpunkt endlich.

Man braucht aber den Wirkungsgrad nahe $n = 0$ nur aus den M -Werten statt aus N zu berechnen.

Stets bei veränderlicher Drehzahl beanspruchen die Drehmomente Interesse. Man kann nach der Formel $M = 716 \cdot \frac{N}{n}$ ein Drehmoment

für jede der Leistungen N_e , N_i und N_{iD} berechnen, von denen zwar keines reell in die Erscheinung tritt; das reell vom antreibenden Motor (der Dampfmaschine) durch die Kurbelwelle auf die Pumpe übertragene Moment ist selten der Messung zugänglich. Die nicht reellen, errechneten Werte geben an, welches Moment an der Kurbelwelle auftreten würde, wenn hydraulische bzw. mechanische Verluste an der Maschine ausblieben. Soweit die Momente für die Pumpe berechnet werden, sind sie übrigens den indizierten Drucken einfach proportional. Demnach (Fig. 195) sind die Momente grundsätzlich konstant und steigen nur, wie die Drucke, wenig mit der Drehzahl an. Die als Moment berechneten Verluste in der Maschine (Fig. 194) nehmen ebenfalls mäßig

mit der Drehzahl zu; für die hydraulischen ist das recht natürlich, da die Strömungsverluste von Flüssigkeiten mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zuzunehmen pflegen; für die mechanischen braucht die Zunahme nicht immer einzutreten.

117. Kolbenpumpe gegen wechselnden Druck. Um eine Pumpe willkürlich mit verschiedenen Gegendrücken laufen lassen zu können,

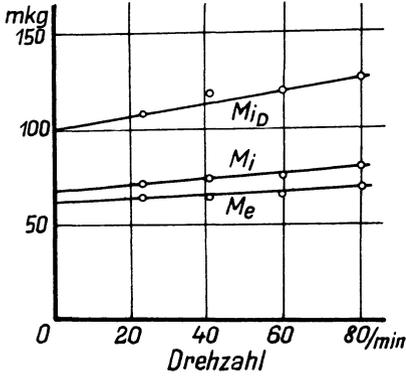


Fig. 195.
gegen konstante Förderhöhe.

bis herab zu recht kleinen, dient eine Anordnung nach Fig. 196: die Förderung des Wassers geschieht nicht in einen Hochbehälter, sondern das Wasser fließt durch ein einstellbares Drosselorgan D in den Saugbrunnen zurück. Diese Anordnung ist für Laboratoriumszwecke vielseitiger als die eines Hochbehälters, weil man mit ihrer Hilfe auch den konstanten Druck, wenn auch etwas unbequemer, verwirklichen kann; mit dem Hochbehälter ist man aber stets an einen bestimmten Druck als mindesten gebunden.

Als Drosselorgan kann ein Ventil dienen. Da jedoch der ganze zu erzeugende Druck dort abgedrosselt werden muß, so ergibt sich bei höheren Drücken leicht die Schwierig-

Als Drosselorgan kann ein Ventil

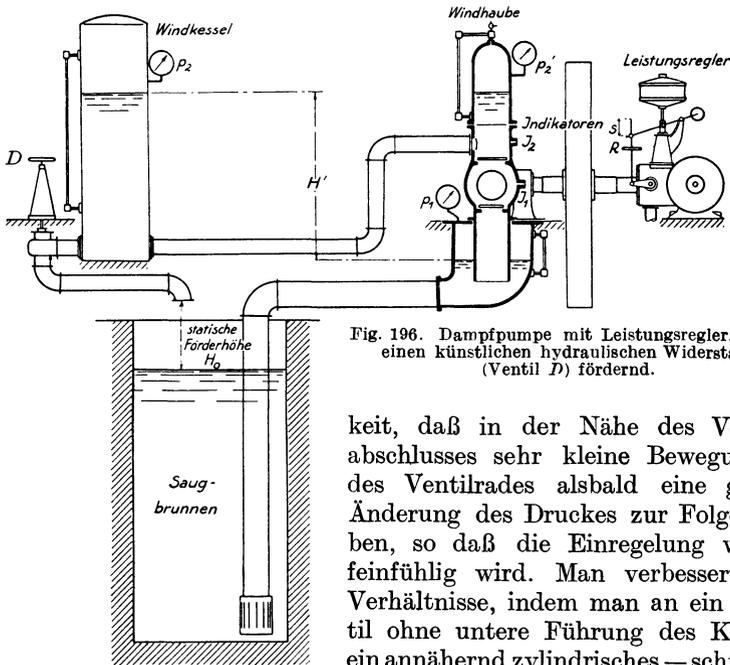


Fig. 196. Dampfpumpe mit Leistungsregler, gegen einen künstlichen hydraulischen Widerstand (Ventil D) fördernd.

keit, daß in der Nähe des Ventilabschlusses sehr kleine Bewegungen des Ventiltrades alsbald eine große Änderung des Druckes zur Folge haben, so daß die Einregelung wenig feinfühlig wird. Man verbessert die Verhältnisse, indem man an ein Ventil ohne untere Führung des Kegels ein annähernd zylindrisches — schwach

Tabelle 71. Verhalten einer
 beim Fördern gegen unveränderte Förderhöhe,
 Pumpenabmessungen: Hub 300 mm, Durchm. des Plungers 215 mm, des Stufenkolbens
 Volumetrischer Wirkungsgrad, geschätzt

Pumpe fördert		I. Gegen kon-	
		(Wasserturm, Ausguß	
Versuch Nr.		1	2
1	Drehzahl n /min	23,7	41,0
2	Wassermenge $V = 0,977 \cdot 0,01089 \cdot \frac{1}{60} n$ m ³ /s	0,00420	0,00728
3	Förderdruck bis Saugwindkessel p_1 at	0,16	0,19
4	„ ab Druckwindkessel p_2 „	3,52	3,55
5	Manometerdifferenz H' m	1,0	1,0
6	Gesamtförderdruck $p = p_1 + p_2 + 0,1 H'$ at	3,78	3,84
7	Nutzleistung der Pumpe $N_e = \frac{10^9 \cdot 0,001}{75} \cdot V \cdot p$ PS	2,12	3,73
8	„ „ Pumpanlage $N'_e = \frac{1}{75} \cdot 1000 V \cdot 37,03$ „	2,07	3,59
9	Indizierter Druck: Hauptplunger p'_i at	4,15	4,37
10	„ „ Stufenkolben p'_i' „	-0,04	-0,07
11	„ „ wirksamer $p_i = p'_i + \frac{1}{2} p'_i'$ „	4,13	4,33
12	Indizierte Leistung $N_i = 0,0242 \cdot p_i \cdot n$ PS	2,37	4,30
13	Indizierte Leistung der Dampfmaschine N_{iD} „	3,59	6,85
14	Hydraulischer Wirkungsgrad der Pumpe $\eta_h = N_i/N_e$ —	0,895	0,868
15	Mechanischer Wirkungsgrad des Satzes $\eta_m = N_i/N_{iD}$ —	0,660	0,628
16	Zusammen $\eta = N_e/N_{iD}$ —	0,591	0,544
17	Hydraulischer Verlust $N_i - N_e$ PS	0,25	0,57
18	Mechanischer Verlust $N_{iD} - N_i$ „	1,22	2,55
19	Drehmoment M_e entsprechend N_e mkg	64,1	65,2
20	„ M_i „ N_i „	71,6	75,2
21	„ M_{iD} „ N_{iD} „	108,5	119,8
22	Verlust an Moment, hydraulisch $M_i - M_e$ „	7,5	10,0
23	„ „ „ mechanisch $M_{iD} - M_i$ „	36,9	44,6

konisches — sauber gedrehtes Formstück ansetzt; so wird beim Hochschrauben des Sitzes ein nur allmählich breiter werdender Ringspalt frei. Man kann auch das Formstück ganz zylindrisch und sauber in den Sitz passend machen und es dann mit konischen Schlitzten oder Anfeilungen versehen.

Untersuchungen an Pumpen lassen sich relativ rasch erledigen, da ein Beharrungszustand schnell eintritt — schneller jedenfalls als bei Wärmemaschinen, wo Wärmespeicherungen auftreten. Speichervorgänge bei der Pumpe treten nur an den Windkesseln auf, namentlich an dem großen Windkessel nach Fig. 196, sofern der Druck wechselt. Um langes Warten zu vermeiden, empfiehlt es sich, nur wenig Luft im Windkessel zu haben

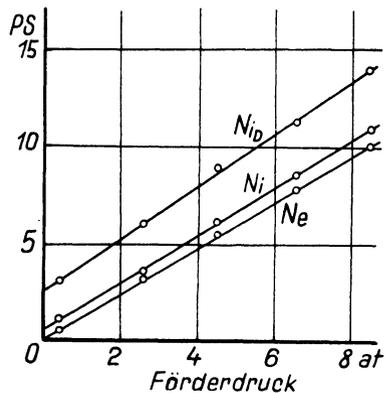


Fig. 197.
 Fig. 197 bis 199. Verhalten

Kolbenpumpe
 Drehzahl verändert, und umgekehrt.
 152 mm; Kolbenflächen 363,0 bzw. 181,5 = $\frac{1}{2} \cdot 363,0 \text{ cm}^2$.
 nach Tab. 70: $\eta_{\text{vol}} = 0,977$.

stante Förderhöhe 37,03 m über Saugspiegel)		II. Bei konstanter Drehzahl		
3	4	9	7	5
60,2	80,7	49,0	51,0	49,9
0,0107	0,0143	0,00868	0,00904	0,00884
0,22	0,25	0,20	0,20	0,20
3,63	3,81	0,17	4,13	8,09
1,05	1,1	1,0	1,9	1,9
3,95	4,17	0,47	4,52	8,48
5,64	7,96	0,55	5,46	10,0
5,28	7,06	—	—	—
4,40	4,73	0,88	4,93	9,02
+0,06	+0,03	—	+0,06	-0,02
4,43	4,75	0,88	4,96	9,01
6,46	9,27	1,04	6,12	10,87
10,19	14,50	3,02	8,88	13,94
0,873	0,860	0,529	0,892	0,920
0,633	0,639	0,344	0,690	0,780
0,553	0,549	0,182	0,615	0,717
0,82	1,31	0,49	0,66	0,87
3,73	5,23	1,98	2,76	3,07
67,1	70,6	8,0	76,7	143,5
76,8	82,2	15,2	85,8	156,0
121,2	128,7	44,1	124,7	200,0
9,7	11,6	7,2	9,1	12,5
44,4	46,5	28,9	38,9	44,0

— man muß dann freilich etwas vorsichtiger sein, sollen nicht beim Regeln durch auftretende Überspannungen Gefährdungen schnell auftreten.

Die Reihe II der Tab. 71 gibt Versuchsergebnisse, die bei konstanter Drehzahl gegen wechselnde Förderhöhe gewonnen wurden.

Konstante Drehzahl setzen wir, auch bei wechselndem Druck, gleichbedeutend mit konstanter Fördermenge, wenngleich man annehmen darf, daß selbst bei Abwesenheit von Luft im Pumpenraum durch das stärkere Atmen des Pumpengehäuses der volumetrische Wirkungsgrad mit steigendem Druck etwas zurückgeht. Abwesenheit von Luft ist immer Voraussetzung für die Annahme eines volumetrischen Wirkungsgrades nahe der Einheit, vgl. § 124.

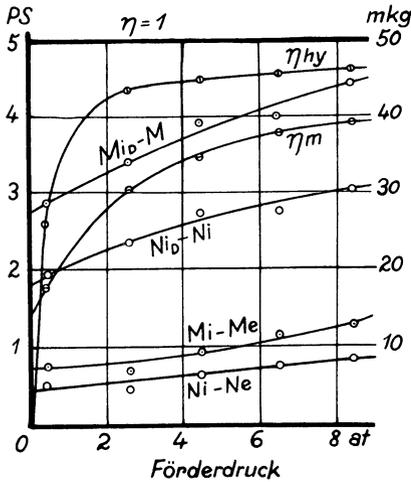


Fig. 198.

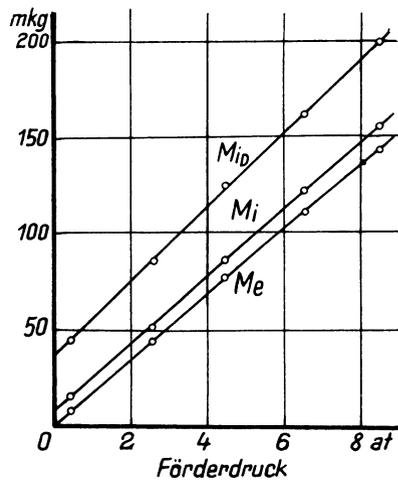


Fig. 199.

der Kolbenpumpe bei wechselndem Förderdruck, Wassermenge unverändert.

Die Leistungen (Fig. 197) steigen mit wachsendem Druck, die Drehmomente, Fig. 199, gehen bei unveränderter Drehzahl einfach mit dem Druck. Aber nur die N_e und M_e gehen naturgemäß auf den Nullpunkt zu; da jedoch die Leistungsverluste (Fig. 198) auch für $H = 0$ endliche Werte behalten, so ist es ebenso mit den beiden indizierten Leistungen. Die Leistungsverluste und daher ebenso die Verluste an Moment sind nicht unabhängig vom Förderdruck; namentlich von dem hydraulischen könnte man das erwarten; ein mäßiger Anstieg ist aber unzweideutig zu erkennen. Beim Getriebeverlust deutet das Steigen mit dem Druck auf die Zunahme der Lager- und Kreuzkopfdrucke mit dem Betriebsdruck.

Die Unterschiede im Gang der Verluste bei wechselnder Drehzahl einerseits, wechselnder Pressung andererseits sind für viele Betriebe

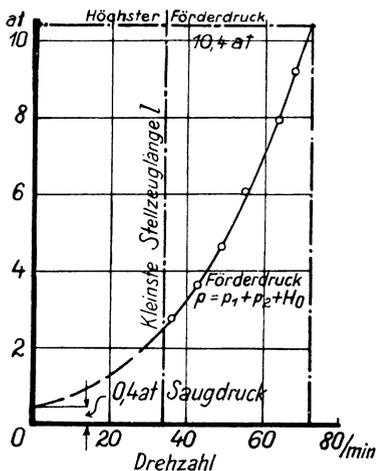


Fig. 200. Druckanstieg bei Versuchsreihe III.

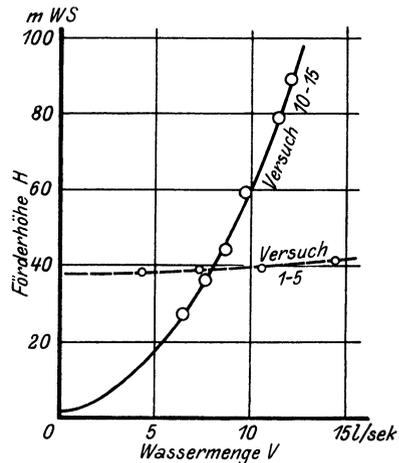


Fig. 201. Kennlinie des hydraulischen Widerstandes bei Versuchsreihe III; zum Vergleich: Kennlinie der Leitung zum Hochbehälter nach Fig. 192.

kennzeichnend und wohl zu beachten; doch muß man auch die ganz anderen Verhältnisse bei Kreisradmaschinen und die im folgenden Paragraphen zu besprechenden Vorgänge im Auge behalten.

118. Kolbenpumpe gegen konstanten hydraulischen Widerstand. Schon die Reihe von Versuchen (§ 116), wo die Pumpe gegen konstante geodätische Förderhöhe in den Hochbehälter arbeitet, zeigte die Wechselwirkung zwischen der Arbeitsleistung der Pumpe und der Arbeitsaufnahme des Rohrsystems, in das sie arbeitet. Nur bei künstlicher Nachregelung eines in die Druckleitung etwa eingeschalteten Drosselorganes hätte man wirklich konstanten Gegendruck halten können. Spontan aber steigt der Druck in einem von der Rohrleitung abhängigen Maße, und die Proportionalität zwischen Wassermenge und Leistung bleibt unvollkommen.

Gänzlich abhängig von dem äußeren Widerstande ist die Pumpe, wenn derselbe ein hydraulischer ist, das ist z. B. ganz rein der Fall bei

Druckwasserheizungen, bei denen das Wasser durch eine Pumpe lediglich umgewälzt wird. Da es sich dabei meist um Kreiselpumpen handelt, so kommt der Fall in § 126 zur Sprache.

Zur versuchsmäßigen Demonstration der bei hydraulischem Widerstand auftretenden Verhältnisse läßt man in einer Anordnung nach Fig. 195 die Stellung des Drosselorganes D unverändert; dadurch legt man eine — je nach der Stellung von D verschiedene — quadratische Beziehung zwischen dem Wasserdurchgang und dem Druckverlust im Ventil fest; zu ihm kommt im allgemeinen noch eine mäßige geodätische Förderhöhe — H_0 in Fig. 196 — hinzu.

Die Drehzahl ändern wir bei Dampftrieb, Fig. 195 rechts, durch Drehen des Regelrades R , wodurch das Stellzeug der Regelung in der Länge l

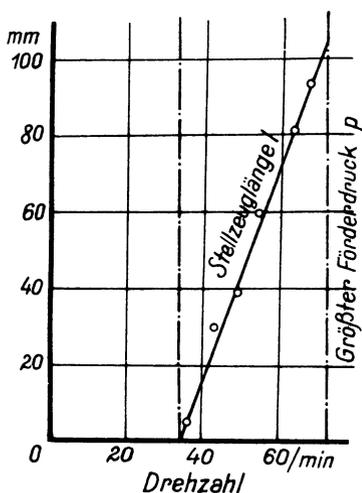


Fig. 202. Veränderung des Stellzeuges bei Versuchsreihe III.

verändert wird, für die das überragende Stück s , Fig. 196, ein Maß sein kann. Einer bestimmten Reglerstellung und daher Drehzahl wird dadurch eine andere Schieberstellung und daher Füllung zugeordnet und dadurch der Ausgleich beider Größen gegeneinander eingeleitet. Bei elektrischem Antrieb wäre der Regelwiderstand entsprechend zu betätigen, und jeder Zustand des Maschinensatzes ist dann durch eine gewisse Kontaktstellung k des Regelwiderstandes gekennzeichnet, statt hier durch l oder s .

Versuchsergebnisse gibt Tabelle 72 als Reihe III, sowie Fig. 199 bis 206.

Indem (Fig. 200) die Drehzahl von 36 bis 64/min geändert wird, geht die Wasserlieferung von 6,4 bis 11,3 l/s, der Druck aber von 2,76

bis 7,91 at. Die Beziehung zwischen Wassermenge und Druck (Fig. 201) ist eine Parabel, deren Scheitel wegen der (geringen) geodätischen Förderhöhe H_0 nicht ganz im Nullpunkt ist. Die Parabel ist die *Kennlinie der Rohrleitung*, die wir durch den Drosselwiderstand darstellen; sie ist eine Eigenschaft von dieser und nicht der Pumpe. Für die Pumpe ist sie eine äußere Betriebsbedingung. Zum Vergleich zeigt Fig. 201 noch gestrichelt die Kennlinie nach Fig. 192, die sich bei Reihe I für die Leitung zum Hochbehälter ergab; beide Fälle sind nicht grundsätzlich, sondern nur numerisch verschieden, beide gehorchen dem Gesetz $H = H_0 + a \cdot V^2$, nur haben die Konstanten H_0 und a im Verhältnis zueinander sehr verschiedene Werte.

Die *Versuchsreihe* wird *oben und unten begrenzt*. Einerseits durch Erreichung eines höchstzulässigen Druckes: ist die Pumpe mit ihren Windkesseln auf 10 at Betriebsdruck eingerichtet, so ist der höchste Förderdruck um den Saugdruck größer, rund 10,4 at. Andererseits wird die Grenze (etwas zufällig) dadurch erreicht, daß das Stellzeug

des Reglers ganz zusammenschraubt ist, $l = 0$, Fig. 202. Bei elektrischem Antrieb würde bei Einschaltung des gesamten Regelwiderstandes die untere Grenze erreicht sein, wenn nicht je nach dem

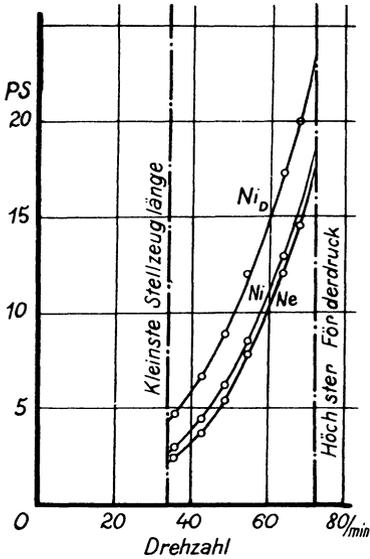


Fig. 203.

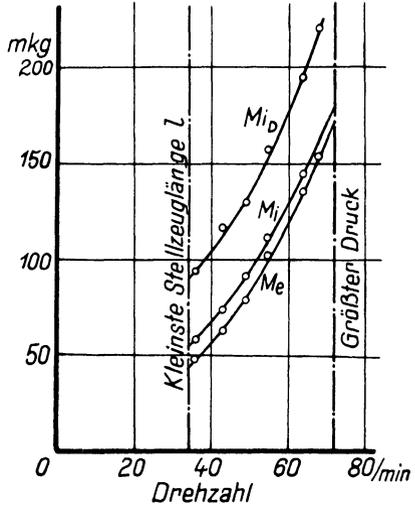


Fig. 204.

Fig. 203 bis 206. Verhalten einer Kolbenpumpe,

Schwungradgewicht schon etwas früher der Ungleichförmigkeitsgrad den Stillstand bewirkt.

Innerhalb dieser Grenzen steigen Drehmoment und Leistung mit der Drehzahl steil an, die hydraulische Leistung N_e , als das Produkt von Wassermenge und Förderhöhe, geht

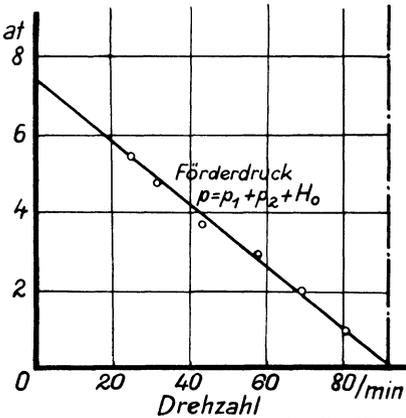


Fig. 207. Druckanstieg bei Versuchsreihe IV.

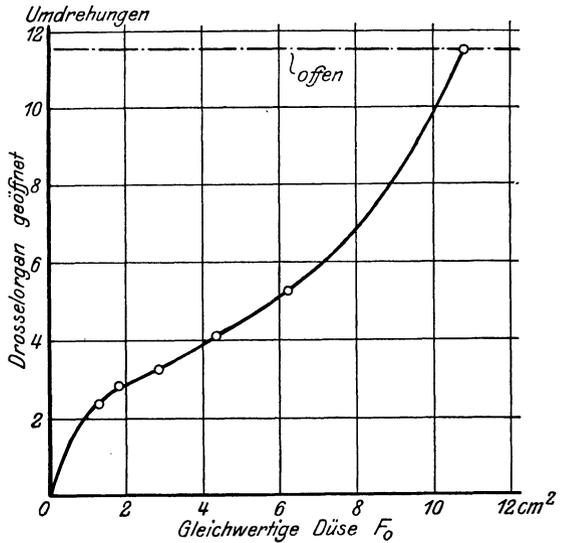


Fig. 208. Kennlinie für die Veränderung des Düsenwertes durch Verstellen des Ventils.

etwa mit der dritten Potenz der Drehzahl. Daß der hydraulische Verlust an Moment $M_i - M_e$ fast unabhängig von der Drehzahl erscheint, ist eine Unstimmigkeit, nachdem in Tabelle 71 dieser Verlust sowohl mit der Drehzahl als auch mit der Förderhöhe zunahm.

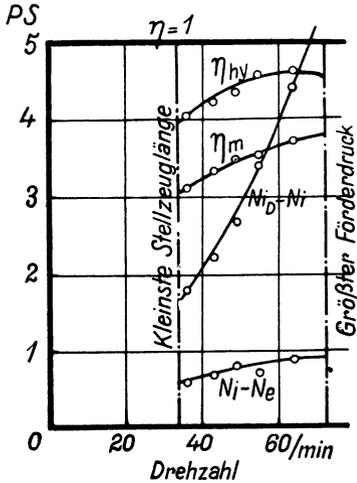


Fig. 205.

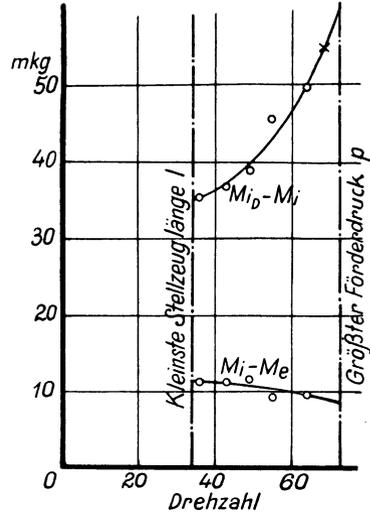


Fig. 206.

die in einem hydraulischen Widerstand arbeitet.

119. Leistungsregelung der Dampfkolbenpumpe. Der Beharrungszustand der Pumpmaschine stellt sich ein als Ausgleich zwischen der Leistungshergabe der Kraftmaschine und dem Leistungsbedarf zum

Herausdrücken der Wassermenge gegen den vorhandenen (geodätischen oder hydraulischen) Widerstand. Der Beharrungszustand hängt daher lediglich ab vom Kraftmaschinenregler einerseits, vom Widerstand andererseits.

Im vorigen Paragraphen sowie in § 116 war der Widerstand unverändert geblieben und der Regler verändert worden. Der umgekehrte Fall, wo bei unveränderter Stellung des Kraftmaschinenreglers der Förderdruck verändert wird, hat praktisches Interesse beim Aufwerfen der Frage, ob der Regler unter allen Umständen den Maschinensatz in der Gewalt hat. Es ist naheliegend, daß mit abnehmendem Förderdruck die Drehzahl der Maschine steigt, es fragt sich daher namentlich, ob

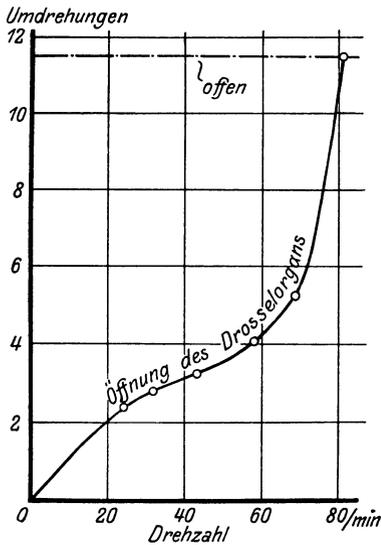


Fig. 209.

Veränderungen des Drosselventils.

Tabelle 72. Verhalten einer beim Fördern in eine bestimmte Rohrleitung, Maschinenabmessungen am

Pumpe fördert		III. Gegen konstanten hy- Widerstand, Ventil 3 1/4	
		10	12
Versuch Nr.			
1	Drehzahl n /min	36	49
2	Wassermenge $V = 0,000\ 1772\ n$ m ³ /s	0,00638	0,00868
3	Stellzeuglänge l mm	5	39
4	Ventil geöffnet Umdr	3,25	3,25
5	Düsenwert $F_0 = 714 \cdot \frac{V}{\sqrt{p}}$ cm ²	2,74	2,88
6	Förderdruck bis Saugwindkessel p_1 at	0,17	0,20
7	„ ab Druckwindkessel p_2 „	2,40	4,23
8	Manometerdifferenz H' m	1,9	1,9
9	Gesamter Förderdruck $p = p_1 + p_2 + \frac{H'}{10}$ at	2,76	4,62
10	Nutzleistung der Pumpe $N_e = \frac{10^9 \cdot 0 \cdot 0}{75} \cdot V \cdot p$ PS	2,34	5,35
11	Indizierter Druck, Hauptplunger p'_i at	3,45	5,38
12	„ „ Stufenkolben p''_i „	-0,05	-0,25
13	„ „ wirksamer $p_i = p'_i + \frac{1}{2} \cdot p''_i$ „	3,42	5,26
14	Indizierte Leistung $N_i = 0,0242 \cdot p_i \cdot n$ PS	2,98	6,23
15	Indizierte Leistung der Dampfmaschine N_{id} PS	4,76	8,90

etwa bei gänzlicher Entlastung die Maschine durchgeht, z. B. im Fall eines Rohrbruches, oder wenn von zwei parallel in eine Rohrleitung fördernden Pumpen eine stillgesetzt wird oder stehen bleibt, so daß für die andere der Druck abfällt.

Um die Frage durch einen Versuch zu beantworten, verändert man bei unveränderter Reglerstellung (Länge des Stellzeuges l oder Schwanzlänge s , Fig. 196, bei Dampfmaschinenantrieb, Kontaktstellung k bei elektrischem Antrieb) den Widerstand, gegen den die Pumpe arbeitet, am einfachsten bei einer Anordnung

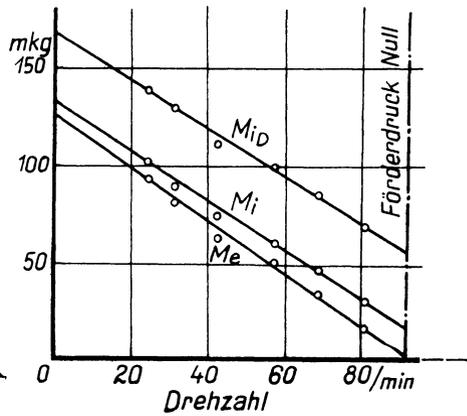
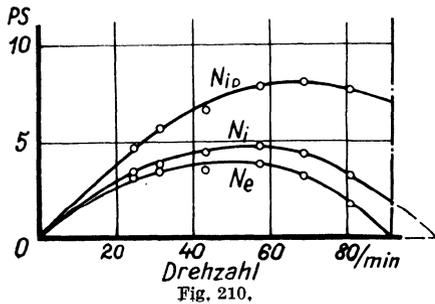


Fig. 210 bis 213. Verhalten einer Kolbenpumpe

Kolbenpumpe
Regelung verändert, und umgekehrt.
Kopf von Tabelle 71.

draulischen Umdr. offen	IV. Bei unveränderter Reglerstellung (Stellzeu_länge l)			
	14	16	18	19	21
64	24,5	43	57,5	81
0,0113	0,00434	0,00763	0,0102	0,0143
82	30	30	30	30
3,25	2,4	3,25	4,1	11,5
2,87	1,33	2,86	4,30	10,8
0,22	0,21	0,19	0,18	0,10
7,50	5,00	3,25	2,50	0,60
1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
7,91	5,40	3,63	2,87	0,89
11,91	3,12	3,69	3,90	1,70
8,52	5,92	4,38	3,45	1,71
-0,29	+0,003	-0,23	+0,07	0
8,38	5,92	4,27	3,48	1,71
12,92	3,50	4,44	4,83	3,35
17,42	4,73	6,65	7,92	7,72

nach Fig. 196 durch Bedienen des Ventiles D . Ergebnisse einer Versuchsreihe gibt Tabelle 72, Reihe IV und Fig. 207 bis 213.

Die Versuchspunkte, die man bei allmählichem Öffnen des Drosselventils der Fig. 196 erhält, ergeben einen abnehmenden und (in diesem Fall) linearen Verlauf zwischen Förderdruck und Wassermenge (Drehzahl), Fig. 207. Bei völligem Schließen des Ventils kommt die Maschine bei einem Druck von 7,4 at zum Stillstand.

Bei zunehmender Öffnung des Drosselorgans würde bei $n = 92$ min der Förderdruck Null werden. Durchgehen der Maschine ist also (bei dieser Maschine und bei dieser Stellzeugstellung l) ausgeschlossen.

Das von der Maschine auszuübende Moment geht einfach entsprechend dem Förderdruck, Fig. 211. Die Nutzleistung N_e hat hiernach den bekannten Verlauf der Leistungsparabel, Fig. 210, wie sie allen

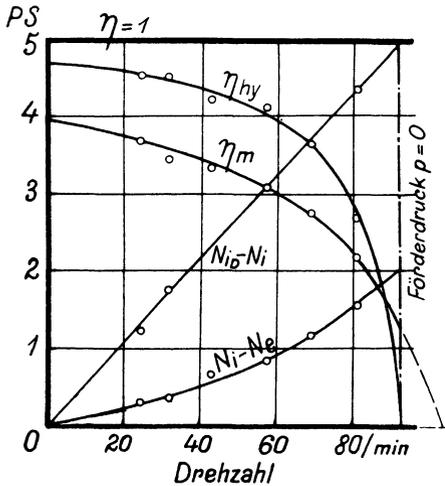


Fig. 212.

unter der Herrschaft des Leistungsreglers.

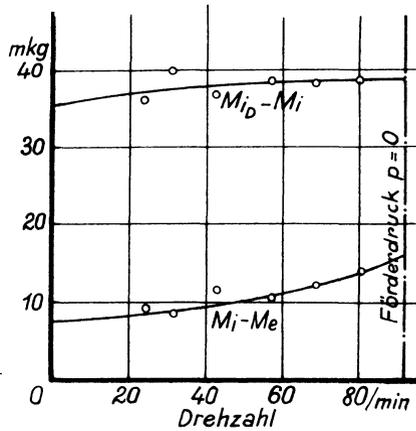


Fig. 213.

Maschinen unter passenden Betriebsverhältnissen eigen ist. Die Wirkungsgrade nehmen mit der Drehzahl ab, Fig. 212.

Bei elektrischem Antrieb durch Hauptstrommotor würden die Verhältnisse ganz ähnlich ausfallen. Beim Nebenschlußmotor ist die Änderung der Drehzahl mit wechselndem Drehmoment nur gering, so werden Verhältnisse erreicht, wie in § 117 beschrieben. Wenn jedoch der Nebenschlußmotor mit Vorschaltwiderstand läuft, so ändert sich die Drehzahl stärker, und es können Verhältnisse ähnlich den eben beschriebenen eintreten.

Während in der Versuchsreihe III, Tabelle 72, der hydraulische Widerstand in Gestalt des Drosselorganes D , Fig. 196, unverändert blieb, wurde bei der Reihe IV gerade dieser verändert. Als Kennzeichnung hierfür dient der Begriff der *gleichwertigen Mündung* oder der *gleichwertigen Düse*. Wir wollen dafür die Bezeichnung *Mündungswert* oder *Düsenwert der Rohrleitung* verwenden. Die Pumpe fördert nämlich eine gewisse Wassermenge V gegen einen Förderdruck $h = 10 p$ m WS; man kann nun fragen: wie groß müßte eine Ausflußöffnung sein, damit durch sie unter dem Einfluß der Wassersäule $10 p$ gerade die gleiche Wassermenge ausfließe; deren Querschnitt F_0 nennt man dann der Pumpenförderung äquivalent oder gleichwertig. Ist die Öffnung scharfkantig, so gelangt eine in gewissem Maße willkürliche Ausflußzahl k in die Rechnung. Man nimmt deshalb neuerdings meist auf eine mit gut gerundeten Kanten versehene „Düse“ Bezug¹⁾; für sie gilt mit $k = 1$

$$V = F_0 \cdot \sqrt{2 g h} = F_0 \sqrt{20 g p}.$$

Je nach den verwendeten Einheiten wird also für Wasser der Düsenwert eines beliebigen Widerstandes errechnet aus

$$F_0 \text{ m}^2 = 0,0714 \cdot \frac{V \text{ m}^3/\text{s}}{\sqrt{p^{\text{at}}}} = 0,226 \cdot \frac{V \text{ m}^3/\text{s}}{\sqrt{h^{\text{m}}}} \dots \dots (10)$$

oder

$$F_0 \text{ cm}^2 = 0,198 \frac{V \text{ m}^3/\text{h}}{\sqrt{p^{\text{at}}}} = 0,627 \frac{V \text{ m}^3/\text{h}}{\sqrt{h^{\text{m}}}} \dots \dots (10a)$$

Dieser Düsenwert ist nun in Zeile 5 von Tabelle 72 berechnet. Für Reihe III ist er fast konstant, nicht ganz wegen der kleinen statischen Förderhöhe, entsprechend dem freien Ausfluß, Fig. 196. Für Reihe IV ist die gleichwertige Düse um so größer, je weiter das Drosselorgan D der Fig. 196 geöffnet wird. Der gesamte hydraulische Widerstand ist außer vom Drosselorgan D noch von der Gestaltung der ganzen Rohrleitung abhängig, und diese Abhängigkeit ist in Fig. 208 zur Darstellung gebracht. Diese Kennlinie des Drosselorganes hat wieder (wie die Kennlinie der Rohrleitung, Fig. 201) mit der Pumpe selbst nichts zu tun, sondern ist eine äußere Betriebsbedingung für dieselbe.

¹⁾ Benennung nach den Regeln für Leistungsversuche an Ventilatoren und Kompressoren. Vgl. Technische Messungen, § 59, Anmerkung.

Die Versuchsreihen III und IV ergänzen einander, indem bei ersterer der Antrieb, bei letzterer die Entnahme gemäß Fig. 202 und 209 verändert wurde; alle übrigen Größen stellten sich dann auf die hierdurch bedingten Werte ein. Durch beide Änderungen zusammengenommen wird das ganze Koordinatenfeld bestrichen, und es lassen sich für eine Kolbenpumpe ähnliche Kurvenbilder aufstellen, wie dies später (§ 140, Fig. 260) für eine Kreisradmaschine gezeigt werden wird. Im tatsächlichen Verhalten sind hiernach Kolben- und Kreisradmaschinen einander ähnlich; nur haben solche Bilder für die Kolbenpumpe weniger Interesse, weil bei ihr Fördermenge und Drehzahl eindeutig voneinander abhängen; anders bei Kolbenkompressoren.

120. Ventilhub und Druckverlust. Die Bewegungsvorgänge an freigehenden Pumpenventilen kann man beobachten, indem man ihre Bewegung irgendwie aus dem Gehäuse nach außen überträgt und dort auf das Schreibzeug eines Indikators wirken läßt, auf dessen Trommel dann die *Ventilerhebungsdiagramme* vergrößert aufgeschrieben werden.

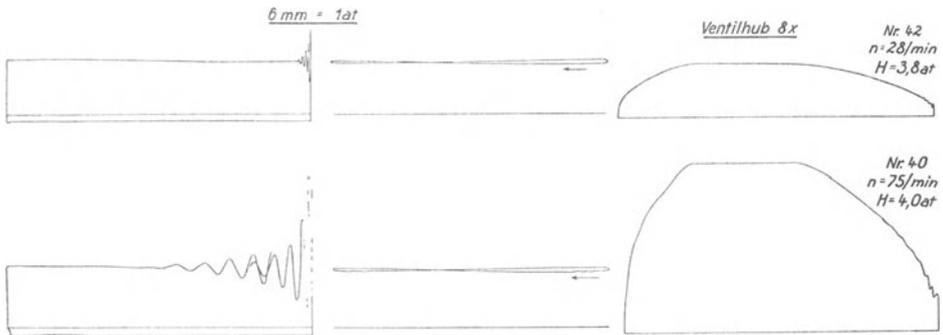


Fig. 214. Pumpen- und Ventilerhebungsdiagramme bei verschiedener Drehzahl, $H \approx 4$ at.
 $\frac{1}{3}$ nat. Gr.

In Fig. 214 und 215 sind Ventilerhebungsdiagramme als zu den gewöhnlichen gehörig dargestellt.

Bei der *konstruktiven Anordnung des Übertragungswerkes* von innen nach außen ist darauf Bedacht zu nehmen, daß die unvermeidliche Stopfbüchsenreibung wenig Einfluß erhält. Durchbohrt man den Deckel, durch den das Ventil herausgenommen werden kann, und stützt eine axial bewegliche Stange innen gegen das Ventil, außen gegen den Indikator Kolben, so wird die Reibung in der Führung erheblich; oder man müßte merkliche Wasserverluste zulassen und dann sauberkeits halber eine dränierte Kammer zum Aufnehmen des Leckwassers anbringen. Man kann aber auch eine Welle winkelrecht zur Achse der Ventilmovement, jedoch im Raume an ihr vorbeigehend, in der Gehäusewand drehbar anbringen und mit zwei Armen versehen, deren einer sich innen aufs Ventil stützt, während der äußere auf den Indikator wirkt. Zur Abdichtung der drehbaren Achse kann ein innerer selbstdichtender Konus dienen; ist dessen Reibung zu groß, so wird die Axialkraft durch eine äußere Druckschraube mit Spitze und Körner

nach Bedarf (je nach dem Innendruck) aufgenommen. In jedem Fall muß man darauf bedacht sein, die Ventilbewegung nahe der Ventilachse zu entnehmen, damit das Ventil wenig einseitig belastet wird.

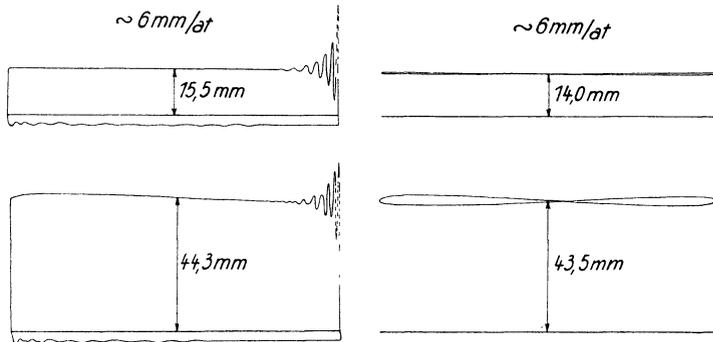


Fig. 215. Pumpen- und Ventilerhebungsdiagramme bei verschiedenem Druck.

Die Rückführung des Schreibzeuges erfolgt kraftschlüssig. Dazu wird eine Feder in den Indikator eingesetzt, die in diesem Fall keine Meßfeder ist. Die Feder soll möglichst schwach sein, um den Ventilgang wenig zu beeinflussen, nach Bedarf wird eine leichte Feder einfach aus Draht gewickelt.

Die Ventilerhebungsdiagramme haben nach Fig. 214 und 215 ellipthische Gestalt mit der Nulllinie als Achse. Hier interessiert das Maß der *größten Ventilerhebung* H_v in der *Abhängigkeit einerseits von der Drehzahl und Wassermenge andererseits vom Förderdruck*.

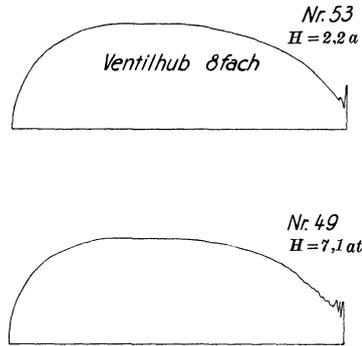
Fig. 214 zeigt, daß mit der Drehzahl die Ventilerhebung H_v größer wird. Über die Gesetzmäßigkeit gibt die Tabelle 74 und Fig. 216 Auskunft, beide Größen sind danach etwa einander proportional.

Gang analog zeigen Fig. 215 und Fig. 217 die Unabhängigkeit der Ventilerhebung vom Förderdruck.

Mit der Ventilerhebung steht der Druckverlust Δp im Ventil in engem Zusammenhang. Man findet ihn durch gleichzeitiges Nehmen von Indikator diagrammen einerseits am Pumpenraum, andererseits am Druck bzw. Saugraum. Wir messen die Diagramme so aus, wie die in der Hubmitte eingetragenen Pfeile mit Maßzahlen es andeuten. Wir beschränken uns dabei auf das Druckventil, da (bei einer Stufenkolbenpumpe) der Druckraum ohnehin indiziert werden muß.

Da es sich um Entnahme relativ kleiner Unterschiede in der Höhe zweier Diagramme handelt, so muß man bei Ermittlung des Druckverlustes auf guten Zustand der Indikatoren peinlichst bedacht sein (toter Gang, Reibung) und darf weder die Verschiedenheit der beiden Federmaßstäbe noch eventuell die verschiedene Höhenlage der beiden Indikatoren (J_1 und J_2 in Fig. 190 und 196, Höhenunterschied 0,24 m = 0,024 at) unbeachtet lassen. Trotzdem bleibt eine merkliche Unsicherheit, so daß man nur durch Aufnehmen und Auswerten genügend zahlreicher Diagrammpaare befriedigende Ergebnisse erhält.

Fig. 216 und 217 zeigen die Zunahme von Δp mit der Drehzahl und seine Unabhängigkeit vom Druck. Das ist die Erklärung dafür, daß in Fig. 198 der hydraulische Wirkungsgrad der Pumpe mit der Druckhöhe besser wurde, bei kleinen Druckhöhen aber sehr ungünstig ausfiel (Abhilfe: Zwangsschluß der Ventile).



Drehzahl $n = 40/\text{min}$. $\frac{1}{3}$ nat. Gr.

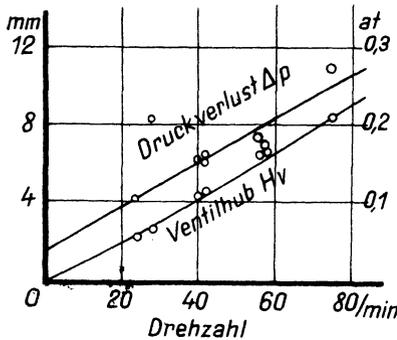
Der Gang der Auswertung sei an Versuch Nr. 40 gezeigt. Höhe des Ventilerhebungsdiagrammes 67,1 mm, Vergrößerung achtfach (vierfach im Indikator, zweifach im Übertragungswerk). Ventilerhebung $67,1 : 8 = 8,40$ mm. — In der Mitte der Diagrammlänge hat, von der Atmosphärenlinie an nach Ausgleich der Federschwingungen gemessen, das Pumpenraumdiagramm eine Höhe von 24,4 mm; das Druckraumdiagramm zeigt im entsprechenden Augenblick (Hin- und Rückgang nicht verwechseln!) 22,7 mm Höhe.

Höhenunterschied $24,4 - 22,7 = 1,7$ mm. Die Eichung der beiden Indikatorfedern hatte Tabelle 73 ergeben:

Tabelle 73. Ermittlung der gegenseitigen Korrektion für den Federmaßstab zweier Indikatoren.

1	Druck	at	2	4	6	8
2	Schreibstiftweg des Indikators:					
	am Pumpenraum	mm	11,75	23 6	35 3	46,9
	am Druckraum	„	11,8	23,75	35,5	47,3
3	Unterschied	„	+0,05	+0 15	+0,2	+0,4
4	Federmaßstab	mm/at	5,88	5,90	5,88	5,86

Daraus folgt für den Unterschied die Korrektion, Fig. 218. Für unseren Fall entnehmen wir der Kurve (genauer als der Tabelle) die Korrektion $+ 0,13$ mm, so daß wir einen Höhenunterschied von $1,7 + 0,13$



Größter Ventilhub H_v und Druckverlust im Ventil Δp .

Fig. 216 bei wechselnder Drehzahl, $p \approx 4$ at.

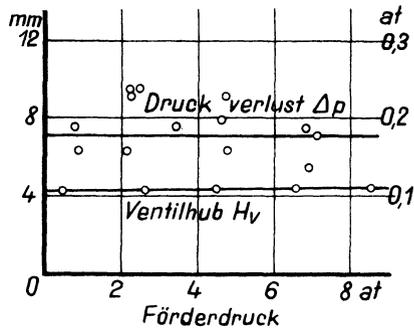


Fig. 217 bei wechselndem Förderdruck, $n \approx 40/\text{min}$.

= 1,8 mm in Rechnung stellen; bei einem Federmaßstab 5,90 mm/at ist der Druckunterschied an beiden Meßstellen 0,30 at. Um so viel

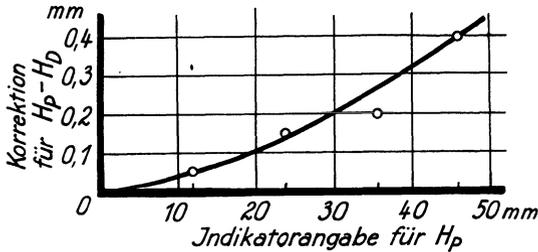


Fig. 218. Gegenseitige Korrektur der beiden Indikatoren.

ist der Druck im Pumpenraum höher gemessen; an ihm aber sitzt der Indikator 0,24 m tiefer, so daß 0,024 at einfach durch die verschiedene Höhenlage zu erklären sind; es bleibt $\Delta p = 0,30 - 0,024 = 0,275$ at bei $n = 75/\text{min}$.

— Der Sinn dieses Auswertungsganges ist der,

die Korrektur gleich für die Differenzen zur Anwendung zu bringen, um die erforderliche Genauigkeit des graphischen Ausgleiches in Fig. 218 zu gewährleisten.

121. Druckverlust, Ventilbelastung und Wassergeschwindigkeit. Der Druckverlust im Ventil ist nach der einen Seite hin bedingt durch die Belastung der Ventilfläche durch Feder und/oder Gewicht, nach der anderen Seite hin ist er bedingt durch die Geschwindigkeit, die das Wasser im Spalt annimmt. Die auf die Ventilfläche bezogene Belastung sollte dem Druckverlust mehr oder weniger gleich sein, die Wassergeschwindigkeit ist mit dem Druckverlust und daher mit der Ventil-

belastung durch die bekannte Beziehung $h = \frac{w^2}{2g}$ verbunden, worin h der Druckverlust in Metern Wassersäule ist. — Von Massenkräften des Ventilkörpers sehen wir ab, beschränken uns dadurch entweder auf kleine Ventilgeschwindigkeiten oder auf die Verhältnisse im Zustand größter Ventilerhebung, nahe der Hubmitte, wo der Ventilhub (sonst h_0) mit H_0 bezeichnet sei.

Wir kontrollieren die Zusammenhänge in Fig. 214 und geben als Rechnungsbeispiel wieder Versuch Nr. 40 mit der Drehzahl $n = 75/\text{min}$.

Zur Berechnung der Ventilbelastung bestimmen wir das Ventiltgewicht $G = 3,60$ kg in Luft. In Wasser ist dessen Gewicht dann, bei einem

Relativgewicht von Bronze $\gamma = 8$, zu setzen $3,60 \cdot \frac{8-1}{8} = 3,15$ kg;

das Gewicht der Feder ruht einfach auf dem Ventil, sie wiegt im getauchten Zustand 0,30 kg, so sind als Gewichtsbelastung des Ventiles konstant 3,45 kg in Rechnung zu setzen. Durch Versuch wird festgestellt, daß die Feder sich für je 2,56 kg Last um 1 mm zusammendrückt: Federkonstante 2,56 kg/mm. Endlich wird ausgemessen, daß die ungespannte Feder 12 mm länger ist als der Abstand der Widerlager am Gehäusedeckel einerseits, am Ventil andererseits, letzteres auf seinem Sitz ruhend; die Feder hat also eine Vorspannung $12 \cdot 2,56 = 30,7$ kg. Insgesamt ist eine Vorbelastung $30,7 + 3,45 = 34,1$ kg in Rechnung zu setzen, und die den Ventilschluß erstrebende Kraft ist daher jederzeit

$$P_1 = 34,1 + 2,56 \cdot h_0.$$

Diese Formel gälte für die Pumpe im normalen Betrieb; beim Versuch aber tritt noch die den Kraftschluß erzeugende Feder im Indikator hinzu: Federkonstante 0,14 kg/mm, Vorspannung 2 mm = 0,28 kg, beides bereits umgerechnet auf das Ventil, entsprechend dem Übersetzungsverhältnis der Übertragung. Der Ventilerhebungsapparat ergibt also eine zusätzliche Kraft, die durch die Gleichung

$$P' = 0,28 + 0,14 \cdot h_v$$

dargestellt wird. Insgesamt wirken auf das Ventil, den Schluß erstrebend

$$P = 34,4 + 2,70 \cdot h_v \text{ kg.}$$

Das Ventil hat (Fig. 219) wirksame Durchmesser von 158 und 236 mm. Dem entspricht einerseits eine untere Fläche, auf die der Druckverlust wirksam wird, von $f_v = 437 - 196 = 241 \text{ cm}^2$; der Druckverlust sollte der Flächenbelastung nach sein

$$p_0 = \frac{P}{f_v} = 0,143 + 0,0112 h_v \text{ at.}$$

Andererseits gibt das Ventil bei 1 mm Hub eine doppelte Ringspalte frei von der Größe $496 + 741 = 1237 \text{ mm}^2$, also bei h_v mm Hub ist der Durchströmquerschnitt

$$F_v = 0,001 237 \cdot h_v \text{ m}^2,$$

woraus sich die (mittlere) Wassergeschwindigkeit im Ventilspalt errechnet.

Für Versuch Nr. 40 war der Ventilhub in der Hubmitte $H_v = 8,40 \text{ mm}$, dem entspricht eine gesamte Schlußkraft $P = 34,4 + 22,7 = 57,1 \text{ kg}$, und ein *theoretischer Druckverlust* $p_0 = 57,1 : 241 = 0,237 \text{ at}$. Die entsprechenden Zahlen für die anderen Versuche finden sich in Tabelle 74 errechnet und können mit den wirklich beobachteten Druckverlusten Δp (Zeile 3) verglichen werden; die Übereinstimmung ist so gut, wie es nach der mangelhaften Ermittlung der Druckverluste als Differenz in den Indikator diagrammen möglich ist.

Die *Wassergeschwindigkeit im Ventilspalt* errechnet sich als Quotient aus Menge und Querschnitt. In der Hubmitte sind Kolben- und Kurbelgeschwindigkeit zwar nicht ganz gleich; aber da der Ventilhub in der Mitte längere Zeit die gleiche bleibt, so gilt also folgende Rechnung genau an der Stelle der Gleichheit beider Größen, bei senkrechter Kurbelstellung. Dort ist, bei 0,3 m Hub und $n = 75/\text{min}$, die Kolbengeschwindigkeit $c_{\max} = 0,3 \pi \cdot \frac{75}{60} = 1,18 \text{ m/s}$; die Plungerfläche ist $0,215^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 0,0363 \text{ m}^2$; so wird die momentane Wasserförderung $V_{\max} = 0,0363 \cdot 1,18 = 0,0428 \text{ m}^3/\text{s}$. Beim Ventilhub $H_v = 8,40 \text{ mm}$ ist der Durchtrittsquerschnitt $f_v = 0,001 237 \cdot 8,40$

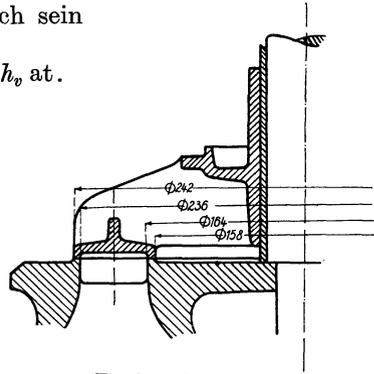


Fig. 219. Ringventil.

Tabelle 74. Bewegungsverhältnisse des Ventiles bei wechselnder in der Mitte des Kolbenhubes.

Versuch Nr.		34	42	41
1	Drehzahl n /min	24	28	40
2	Förderdruck p at	3,75	3,8	3,85
3	Druckverlust im Ventil n. d. Diagrammen Δp . . at	0,11	0,21	0,16
4	Ventilhub H_v in Diagrammitte mm	2,26	2,64	4,32
5	Ventilquerschnitt $f_v = 0,001237 \cdot H_v$ m ²	0,00280	0,00327	0,00535
6	Wasserförderung $V_{\max} = \frac{2,15^2 \pi}{4} \cdot \frac{3,0 \pi}{60} \cdot \frac{n}{1000} = \frac{0,570 n}{1000}$ m ³ /s	0,0137	0,0160	0,0228
7	Wassergeschwindigkeit $w = \frac{V_{\max}}{f_v}$ m/s	4,9	4,9	4,25
8	Entsprechende Geschwindigkeitshöhe Δp_1 mWS	1,22	1,22	0,92
9	Ventilbelastung $34,4 + 2,70 \cdot H_v = P$ kg	40,5	41,5	46,1
10	Flächenbelastung $p_0 = \frac{P}{241} = 0,143 + 0,0112 \cdot H_v$ kg/cm ²	0,168	0,172	0,191
11	Ausflußzahl $\mu = \sqrt{\frac{\Delta p_1}{10 \cdot p_0}}$ —	0,85	0,84	0,69

= 0,0104 m². Die Wassergeschwindigkeit im Spalt wird $w = 0,0428 : 0,0104 = 4,1$ m/s.

Dem entspricht als beschleunigender Druckunterschied eine Wassersäule $\frac{4,1^2}{2 \cdot 9,81} = 0,86$ m WS = 0,086 at. Die entsprechenden weiteren Werte sind in Fig. 220 dargestellt, so wie Tabelle 74 sie ergibt.

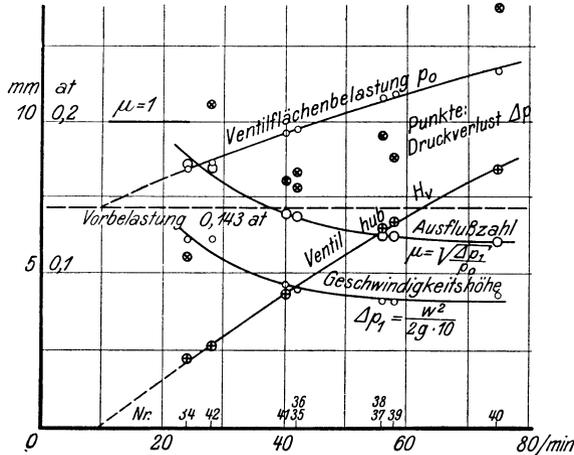


Fig. 220. Kraftverhältnisse am Pumpenventil in ganz geöffnetem Zustand (Hubmitte). Vorbelastung des geschlossenen Ventils 0,143 kg/cm².

Es ist eigenartig, daß die Wassergeschwindigkeit im Ventil mit zunehmender Drehzahl abnimmt, während doch der Druckverlust wie natürlich die Ventilbelastung zunimmt. Sind auch die einzelnen Mes-

Drehzahl der Kolbenpumpe jeweils
Vorspannung der Ventulfeder 34,4 kg.

35	36	37	38	39	40
42	42	56	56	58	75
3,85	3,85	3,95	3,95	3,95	4,0
0,155	0,165	0,19	0,19	1,175	0,275
4,57		6,45		6,62	8,40
0,00566		0,00798		0,00820	0,0104
0,0239		0,0319		0,0330	0,0428
4,2		4,0		4,0	4,1
0,90		0,82		0,82	0,86
46,7		51,8		52,3	57,1
0,194		0,215		0,217	0,237
0,68		0,62		0,62	0,60

sungen des Druckverlustes
unsicher, so doch nicht ihr
Mittelwert und nicht die der
Ventilbelastung. Die Folge ist,
daß die Weisbachsche Aus-

flußzahl $\mu = \sqrt{\frac{\Delta p_1}{p_0}}$ mit höhe-
rer Drehzahl — besser wohl
gesagt mit höherem Ventilhub
— abnimmt; Fig. 220 zeigt
auch das. Bei Versuch Nr. 40
ist $\mu = 0,60$, also fast genau
wie der einfachen Kontraktion
entspricht; für den unendlich
langen (hier ringförmigen)
Spalt gilt theoretisch

$$\mu = \frac{\pi}{\pi + 2} = 0,61^1).$$

Bei kleinen Drehzahlen kommt
 μ über 0,8 hinaus.

Wenn die Vorspannung der Feder und damit die *Vorbelastung der Ventilfläche verändert* wird, dann ergeben sich Werte wie in Tabelle 75

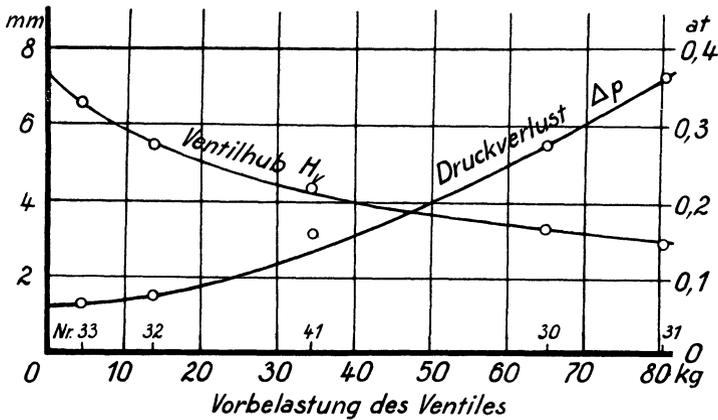


Fig. 221. Pumpenventil mit veränderlicher Vorbelastung. Drehzahl $n = 40/\text{min}$.

Tabelle 75. Verschiedene Vorbelastung des Ventiles.

Versuch Nr.		31	30	41	32	33
1	Drehzahl n /min	40	40	40	40	40
2	Vorspannung s_0 mm	30	24	12	4	0,3
3	Ventilvorbelastung $P_0 = 3,73 + 2,56 \cdot s_0$ kg	80,5	65,1	43,4	13,9	4,5
4	Größter Ventilhub H_v mm	2,83	3,25	4,32	5,45	6,58
5	Druckverlust Δp lt. Diagramm at	0,365	0,275	0,16	0,075	0,065

¹⁾ Lorenz, Technische Hydrodynamik, S. 295.

und Fig. 221: mit erhöhter Vorspannung sinkt die (größte) Ventil-
erhebung und wächst der Druckverlust.

122. Wassergeschwindigkeit und Ventilbewegung während eines Spieles. In den vorigen beiden Paragraphen war von dem Ventil-

hub H_v die Rede, das ist die größte Erhebung, die das Ventil jeweils erfährt. Das Folgende bezieht sich im Gegensatz dazu auf die Bewegung des Ventiles während eines einzelnen Arbeitsspieles, die jederzeit h_v sei.

Das Ventilerhebungsdiagramm des Versuches Nr. 40 in Fig. 214, auf das wir wieder Bezug nehmen, zeigt die Periode des Anhubes, an deren Beginn einige Schwingungen; dann steht das Ventil eine merkliche Zeit in der höchsten Stellung, um sich nun wieder zu senken. Im Gegensatz zu den bisherigen Betrachtungen können jetzt Wirkungen der Ventilmasse in Frage kommen.

Die mit den Zahlen der Fig. 223 zu machenden Berechnungen sind in Tabelle 76 durchgeführt und in Fig. 222 dargestellt. Die Berechnung sei wieder am Punkt 30° Kurbelstellung erläutert. Um formelmäßig bequem rechnen zu können, empfiehlt es sich, nicht etwa das Kolbenwegdiagramm gleichmäßig zu unterteilen, sondern vom Kurbelwinkel auszugehen. Zum Kurbelwinkel $\alpha = 30^\circ$ gehört die Neigung der Schubstange $\beta = 4^\circ 55'$, folgend aus $\sin \beta = \lambda \cdot \sin \alpha$, mit $\lambda = 0,1715$ bei der vorliegenden Maschine (Schubstangenverhältnis 1 : 5,83). Da die Druckperiode im äußeren Totpunkt beginnt, wird der relative Kolbenweg

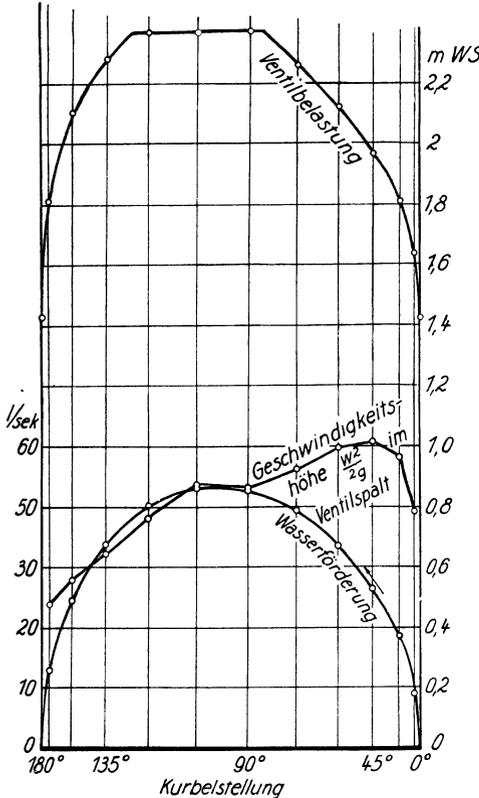


Fig. 222. Bewegungsverhältnisse des Pumpenventiles während eines Hubes.

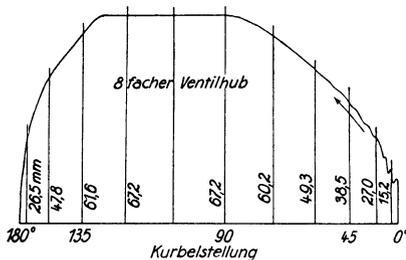


Fig. 223. Ventilerhebungsdiagramm einer Kolbenpumpe (Versuch 40), ausgemessen. $\frac{2}{3}$ nat. Gr.

$$x_1 = \frac{x}{r} = 1 - \cos \alpha - \frac{1}{\lambda} \cdot (1 - \cos \beta) = 1 - 0,866 - 5,83 \cdot (1 - 0,9963) = 0,111$$

Tabelle 76. Wassergeschwindigkeit im Ventilspalt während eines Spieles. Versuch 40.

	Punkt Nr.	3	5	7	9	11
1	Kurbelwinkel °	30	60	90	120	150
2	Für $r = 1$: Kolbenweg $x_1 = 1 - \cos \alpha - \frac{1}{\lambda} (1 - \cos \beta)$ —	0,112	0,436	0,913	1,436	1,843
3	Für $v = 1$: Kolbengeschwindigkeit $c_1 = \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta}$ —	0,425	0,790	1,0	0,944	0,571
4	Für Diagrammlänge $2r = 125,0$ mm: $x = \frac{1}{2} \cdot 125,0 \cdot x_1$ mm	7,0	27,2	57,0	89,8	115,2
5	Für Kurbelgeschwindigkeit 1,18 m/s: $c = 1,18 \cdot c_1$ m/s	0,501	0,932	1,180	1,113	0,674
6	Wasserförderung $\frac{dV}{dt} = c \cdot F = 0,0363 \cdot c$ m ³ /s	0,0182	0,0338	0,0428	0,0404	0,0245
7	Ventilerhebung lt. Diagramm h_v . . . mm	3,4	6,2	8,4	8,4	6,0
8	Ventilspalt $0,001237 \cdot h_v = f$ m ²	0,420	0,765	1,04	1,04	0,74
9	Wassergeschwindigkeit $w = \frac{c \cdot F}{f}$. . m/s	4,35	4,4	4,1	3,9	3,3
10	Entsprech. Geschwindigkeitshöhe Δp_1 m WS	0,96	1,00	0,86	0,76	0,56
11	Spannung der Ventillfeder $P = 34,4 + 2,70 \cdot h_v$ kg	43,6	51,1	57,1	57,1	50,6
12	Flächenbelastung des Ventiles $p_0 = P : 241$ kg/cm ²	0,181	0,212	0,237	0,237	0,210
13	Ausflußzahl $\mu = \sqrt{\frac{\Delta p_1}{10 \cdot p_0}}$ —	0,73	0,69	0,60	0,57	0,52

und die relative Kolbengeschwindigkeit (Hütte 22. Aufl., Bd. I, S. 882, Bd. II, S. 151)

$$c_1 = \frac{c}{v} = \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta} = \frac{0,424}{0,996} = 0,425,$$

r ist der Kurbelradius, v die Kurbelgeschwindigkeit. Im Erhebungsdiagramm wird der Hub der Maschine durch die Diagrammlänge dargestellt, also $2r = 125,0$ mm und daher der zum Kurbelwinkel 30° zugeordnete Kolbenweg $x = 0,5 \cdot 12,50 \cdot 0,112 = 7,0$ mm. Zu dieser Abszisse ist die Kolbengeschwindigkeit oder besser gleich die augenblickliche Wasserförderung aufzutragen: bei $\alpha = 90^\circ$ ist die Kolbengeschwindigkeit gleich der Kurbelgeschwindigkeit, diese aber ist, bei 300 mm Maschinenhub und bei der Drehzahl 75/min, 1,18 m/s. Demnach ist bei $\alpha = 30^\circ$ die Kolbengeschwindigkeit $c = 1,18 \cdot 0,425 = 0,501$ m/s. Für die Wasserförderung durch die Ventile ist auch bei der Stufenkolbenpumpe die ganze Plungerfläche $F = 0,0363$ m² maßgebend, somit ist die Wasserförderung für den Augenblick der Kurbelstellung 30° gegeben durch $0,0363 \cdot 0,501 = 0,0182$ m³/s.

Die so berechneten Wasserförderungen sind in Fig. 222 über dem Kolbenweg aufgetragen, wenn auch die Einteilung (ungleichmäßig)

nach Kurbelwegen erfolgt ist. Die Wasserförderung ist wie die Kolbengeschwindigkeit eine etwas gegen den inneren Totpunkt verschobene Ellipse.

Die ungleichmäßige Einteilung nach gleichen Kurbelwegen ist auch maßstabgerecht in das Ventilerhebungsdiagramm (Fig. 223) eingetragen, und die zugehörigen Ventilhübe sind ausgemessen worden. Wir finden für den Kurbelwinkel 30° bei $x = 7,0$ mm von rechts im Ventilerhebungsdiagramm die Ordinate $27,0$ mm; wegen der achtfachen Vergrößerung ist also die Ventilerhebung $h_v = 3,4$ mm. Die Größe des zu 1 mm Ventilerhebung zugeordneten Spaltquerschnittes ist der Werkzeichnung Fig. 219 zu entnehmen; danach ist das Ventil ein einfaches Ringventil, gibt also zwei Spalte frei, von denen jeweils die kleinsten Durchmesser, also 236 und 158 mm, maßgebend sind. Beide zusammen bedingen einen Umfang von 1237 mm, so daß also der Ventilerhebung 1 mm der Spaltquerschnitt $0,1237$ dm² entspricht. Bei 30° Kurbelwinkel ist der Ventilspalt $3,4 \cdot 0,1237 = 0,420$ dm². Das ergibt eine Wassergeschwindigkeit im Ventilspalt $18,2 : 0,420 = 43,5$ dm/s = 4,35 m/s. Dieser *Wassergeschwindigkeit im Ventilspalt* ist eine *Geschwindigkeitshöhe* $w^2/2g = 0,96$ m WS zugeordnet. — Weitere Punkte sind in Tab. 76 berechnet.

Die Geschwindigkeit und die Geschwindigkeitshöhe im Ventilspalt fällt von Anfang an etwa gleichmäßig gegen das Ende des Hubes hin ab (Fig. 222). Dieses Abfallen ist auffallend. Grundsätzlich müssen auch für jeden Punkt des Kolbenweges die Beziehungen zutreffen wie an der Stelle größten Ventilhübes. Der Druckverlust im Ventil gleicht sich einerseits gegen die Federspannung ab, andererseits stellt er die zur Wassergeschwindigkeit im Spalt zugeordnete Geschwindigkeitshöhe dar. Bei unveränderten Kontraktionsverhältnissen sollte also die Kurve der Geschwindigkeitshöhe der Ventilerhebungskurve ähneln.

Wir berechnen nun wie in § 120 noch folgendes: Bei 3,4 mm Erhebung ist die Federspannung $P = 34,4 + 2,70 \cdot 3,4 = 43,6$ kg; auf die Ventilfläche von 241 cm ergibt das eine *Flächenbelastung* $p_0 = 43,6 : 241 = 0,181$ kg/cm² = 1,81 m WS. Auch diese Werte der Ventilbelastung sind nach Maßgabe von Tabelle 76 in Fig. 222 eingetragen.

Die wirkliche Geschwindigkeit des Wassers im Spalt ist also merklich kleiner als der Ventilbelastung entspricht; die Weisbachsche

Ausflußzahl wird $\mu = \sqrt{\frac{0,96}{1,81}} = 0,73$. Über den Verlauf des Hubes sinkt sie allmählich bis auf $\mu = 0,52$ ab.

Dem Sinne nach entspricht das Absinken allerdings der Einwirkung einerseits der *Reibung*, andererseits der *Massenkraft* aus der Ventilerhebung. Zahlenmäßig lassen sich aber diese Größen zur Erklärung des Absinkens nur schlecht heranziehen, denn: betreffs der Reibung vermißt man einen Sprung gerade im Hubwechsel des Ventils, der vorhandene Sprung in der Kurve der Geschwindigkeitshöhe ist zu unerheblich; um die Massenwirkungen zu untersuchen, ist in Fig. 224 zunächst das Ventilerhebungsdiagramm über der Kurbelstellung auf-

getragen; dabei zeigte sich, daß das Ventil mit fast konstanter Geschwindigkeit aufsteigt, so daß also Beschleunigungskräfte außer im Augenblick des Anwerfens gar nicht in Frage kommen. Für den Abwärtsgang liegt die Sache ähnlich, da wieder die Hauptbeschleunigung momentan am Beginn des Sinkens geleistet wird. Die Frage nach der Ursache dafür, daß die Ausflußzahl so niedrig errechnet wird, läßt sich also hierdurch nicht erledigen.

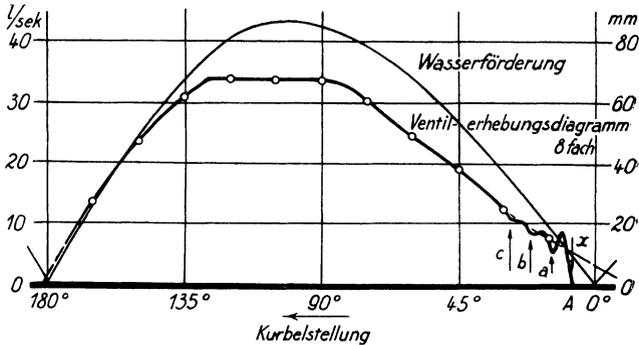


Fig. 224. Ventilerhebung und Wasserförderung, abhängig von der Zeit. Umgezeichnet aus Fig. 223.

Beim Umzeichnen des Zeitventilerhebungsdiagrammes (Fig. 224) macht es einige Schwierigkeit, daß die indizierte Erhebungskurve (Fig. 223), nach rechts verlängert, rechts vom Nullpunkt auf die Abszissenachse stoßen würde und daß der Anhub in der Gegend des Totpunktes einem Kolbenwegdiagramm nicht sauber zu entnehmen ist; in Wahrheit wird der Anhub erst merklich hinter dem Totpunkt einsetzen. Zum richtigen Zeichnen des Diagrammes helfen die Schwingungen, die das Ventil macht, nachdem es sich vom Sitz losgerissen hat: man kann sie befriedigend genau so einzeichnen, wie in Fig. 224 geschehen, findet die Stellen geringster Erhebung *a b c* in gleichem Abstand voneinander, und nun zeigt der Pfeil *x* im selben Abstand von *a*, auf den Anhub *A*.

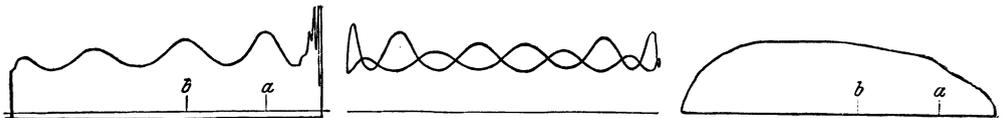


Fig. 225. Stufenkolbenpumpe; Pumpenraum, Druckraum und Ventilerhebung. Nr. XXXIV. Windhaube ohne Luft, $n = 40/n.in.$ 6 mm/at, $\frac{1}{3}$ nat. Gr.

123. Wirkung der Windkessel. Resonanzerscheinungen in den Rohrleitungen. In Fig. 190 und 196 findet sich eine Windhaube unmittelbar an der Pumpe und ein Windkessel in einigem Abstand davon. Der Zweck von beiden ist, die Wasserbewegung in der Druckleitung gleichmäßig zu halten und Massenwirkungen zu vermeiden, obwohl die Wasserförderung des Plungers intermittierend erfolgt.

Wenn die Windhaube ohne Luft ist, so muß jetzt die Wassersäule bis zum Windkessel die Bewegungen und Geschwindigkeitsänderungen entsprechend der wechselnden Wasserförderung des Plungers erleiden.

Über den vom Manometer angezeigten (mittleren) Gegendruck lagert sich der Beschleunigungsdruck, der im Kolbenwegdiagramm und bei unendlicher Schubstangenlänge und gleichförmiger Umlaufgeschwindigkeit eine gegen das Diagrammende abfallende gerade Linie darstellt. Indikatorgramme, bei wassergefüllter Windhaube aufgenommen

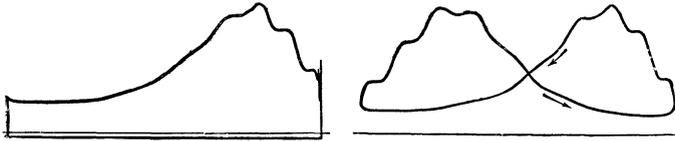


Fig. 226. Stufenkolbenpumpe, Pumpenraum und Druckraum.
Nr. XXI. Windhaube und Windkessel ohne Luft, $n = 20/\text{min}$. 6 mm/at, $\frac{1}{3}$ nat. Gr.

(Fig. 225), zeigen deutlich den Abfall des Druckes, die Gerade indessen überlagert von kräftigen Schwingungen der Wassersäule bis zum Windkessel, veranlaßt durch die Elastizität des Pumpengehäuses und des Indikatorraumes. Die schnellen Schwingungen am Anfang der Druck-

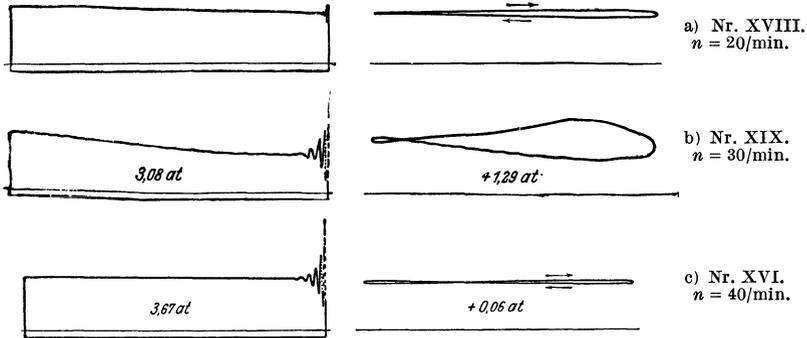


Fig. 227. Stufenkolbenpumpe, Pumpenraum und Druckraum.
In der Windhaube $V_0 = 301$ Luft, Windkessel ohne Luft. 6 mm/at, $\frac{1}{3}$ nat. Gr.

linie sind Eigenschwingungen des Indikators. — Bei Ausführung des Versuches ist vorsichtig vorzugehen, denn bei längerer Leitung werden die Massenwirkungen unzulässig groß werden und zur Zertrümmerung der Pumpe durch Wasserschläge führen können. Wenn man daher

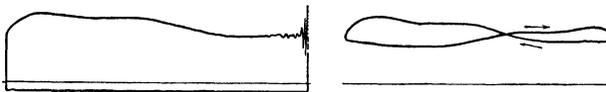


Fig. 228. Stufenkolbenpumpe, Pumpenraum und Druckraum.
Nr. XVII. In der Windhaube $V_0 = 41$ Luft, Windkessel ohne Luft. 6 mm/at, $\frac{1}{3}$ nat. Gr.

auch aus dem Windkessel die Luft ausläßt, so daß die Steigleitung (bei Fig. 190) die Beschleunigungen miterleidet, dann ergeben sich schon bei niederen Drehzahlen Diagramme wie in Fig. 226. Dieser Zustand ist also sehr gefährlich.

Dagegen kann man den Windkessel ohne Luft lassen und erhält gute Diagramme, wenn nur die Windhaube voll Luft ist (Fig. 227). Selbst

bei schwach gefüllter Windhaube pflegen gefährliche Zustände nicht aufzutreten, wengleich gelegentlich merkliche Arbeitsmengen auf die Stufenkolbenfläche entfallen (Fig. 228). Gerade in solchen Fällen würde es zu groben Fehlern führen, wollte man den Druckraum einer

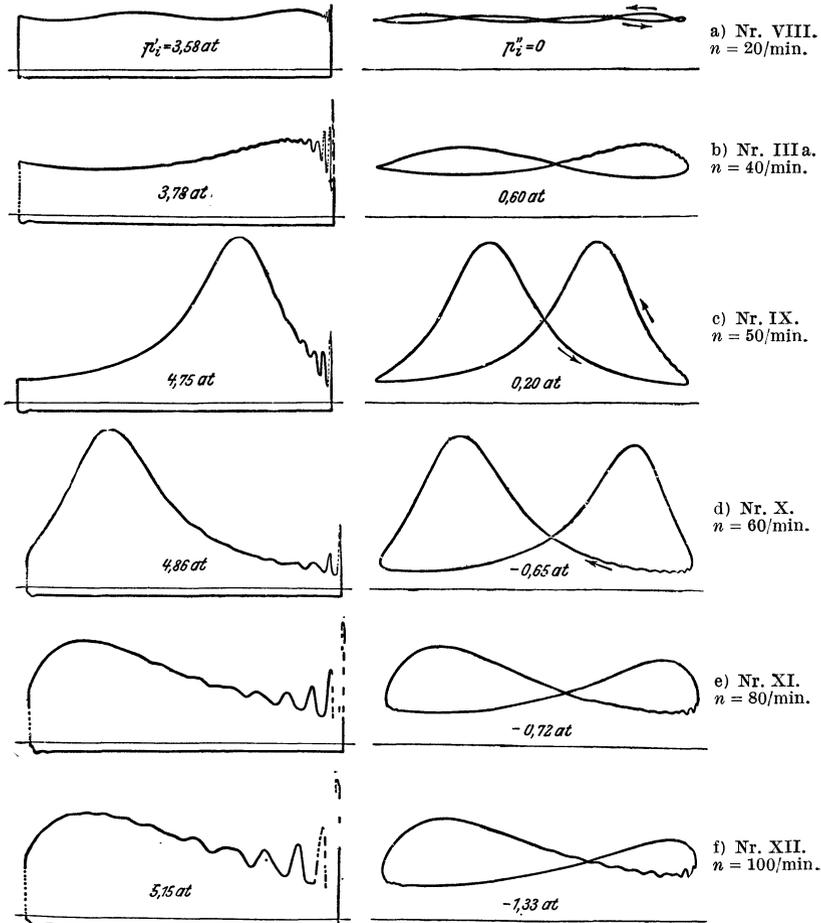


Fig. 229. Diagramme einer Stufenkolbenpumpe, Pumpenraum und Druckraum. In der Windhaube $V_0 = 4 \text{ l}$ Luft, Windkessel voll Luft. 6 mm/at , $1/3$ nat. Gr.

Stufenkolbenpumpe bei der Leistungsbestimmung nicht indizieren. Selbst wo das Diagramm des Pumpenraumes glatt verläuft, können doch die auf den Stufenkolben entfallenden Arbeitsflächen erheblich werden (Fig. 227 b).

Wenn die Windhaube und der Windkessel gleichzeitig voll Luft sind, so ist also die zwischen ihnen liegende Wassersäule beiderseits elastisch gehalten, und sie kann in *Schwingungen* geraten, die insbesondere gefährlich hohe Drucke und beträchtlichen Arbeitsverbrauch zur Folge haben *im Zustand der Resonanz*, das heißt wenn die Anzahl der vom

Kolbengänge ausgeübten Impulse mit der Eigenschwingungszahl der Wassersäule übereinstimmt. Die wichtigsten hierbei vorkommenden Diagrammformen sind in Fig. 229 abgebildet. In der Windhaube blieb eine bestimmte mäßige Luftmenge abgespermt, der gegenüber die im Windkessel vorhandene sehr groß war. Wenn die Drehzahl gesteigert wurde, so entwickelt sich aus der abfallenden Linie der Beschleunigung mit überlagerten Schwingungen (Nr. VIII) eine starke Druckerhebung, die vom Anfang der Drucklinie bei steigender Drehzahl gegen das Ende wandert. Dort werden die Drucke wieder geringer. Der Resonanz entspricht ein gerade in der Diagrammitte liegender Buckel (in Fig. 228 nicht gerade getroffen, etwa bei der Drehzahl 55/min). Der *Höchstdruck* steigt schon bei den aufgenommenen Diagrammen auf 11 at,

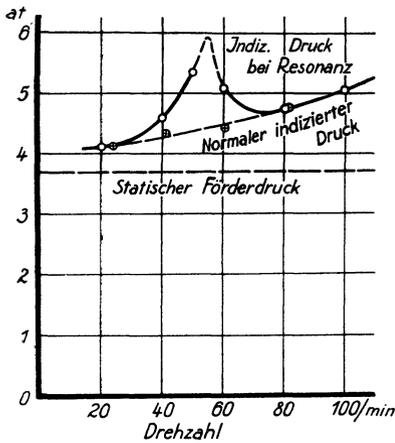


Fig. 230. Indizierte Drucke einer Pumpe beim Durchgang durch den Resonanzpunkt.

während doch nur gegen einen Förderdruck von rd. 3,5 at gearbeitet wird. Gelegenheit zu Zerstörungen durch Bruch ist also ohne weiteres gegeben.

Außerdem bedeuten die Schwingungen in der Leitung bis zum großen Windkessel einen erheblichen *Arbeitsverlust*. Die indizierten Drucke der Diagrammreihe Fig. 229 sind in Tabelle 77 unter a) berechnet; zum Vergleich sind dort und in Fig. 230 die Werte des Förderdruckes aufgetragen, die sich abhängig von der Drehzahl für die gleiche Leitung in Tabelle 71, § 116 und Fig. 192 ergaben. Der Unterschied beider Kurven zeigt ohne weiteres den Mehraufwand durch die Schwingungen, der in Tab. 76 auch noch prozentual angegeben ist. —

Es läßt sich zeigen¹⁾, daß die Amplituden im Zustand der Resonanz so groß sind, daß in der Leitung rückläufige Bewegungen vorkommen. Die Arbeitsverluste sind durch den höheren quadratischen Mittelwert der wechselnden Geschwindigkeit gegenüber dem Quadratwert der gleichmäßigen Geschwindigkeit bedingt, das heißt durch höhere Dämpfungsverluste. — Beim allmählichen Steigern der Drehzahl beobachtet man, daß die Maschine vor dem Resonanzpunkt zögert, den Zustand höchsten Arbeitsaufwandes zu erreichen, daß sie aber nach Überschreiten des Resonanzpunktes, wo der Leistungsbedarf oder genauer gesagt der Bedarf an Drehmoment mit steigender Drehzahl sinkt, durchgeht und sprunghaft auf eine merklich höhere Drehzahl geht. Sie geht in Fig. 230 von $n = 55$ bis etwa auf $n = 75$ /min — nicht ganz, weil die Getriebeverluste etwas bei dem Übergang anwachsen.

Tabelle 77 zeigt unter b) und c), wie eine bestimmte Luftmenge in der Windhaube Vorbedingung für Entstehung größerer Schwingungen

¹⁾ Gramberg, Wirkungsweise und Berechnung der Windkessel von Kolbenpumpen. Forschungsarbeiten Heft 129 oder Z. d. V. D. I. 1911, S. 842. Die Figuren dieses Paragraphen sind diesen Arbeiten entlehnt.

Tabelle 77. Steigerung der indizierten Drucke beim Auftreten von Resonanzschwingungen.

a) In der Windhaube $V_0 = 4$ l Luft.

Versuch Nr.		VIII	IIIa	IX	X	XI	XII
1	Drehzahl n /min	20	40	50	60	80	100
2	Indizierter Druck: Hauptkolben p'_i . . at	4,08	4,29	5,26	5,38	5,09	5,70
3	Stufenkolben p''_i „	0	+0,60	+0,20	-0,65	-0,72	-1,33
4	wirksamer $p_i = p'_i + \frac{1}{2} \cdot p''_i$. . . „	4,08	4,59	5,36	5,06	4,73	5,04
5	Normaler indizierter Druck nach Fig. 192 . .	4,12	4,28	4,37	4,47	4,71	5,03
6	Mehraufwand %	$\infty 0$	7,2	21,6	13,2	≈ 0	$\infty 0$

b) Drehzahl 40/min.

Versuch Nr.		XIII	IIIa	IVa	XIV	XV
1	Luftmenge V_0 in der Windhaube. . . l	30	4	2	0,5	$\infty 0$
2	Indizierter Druck: Hauptkolben p'_i . . at	4,37	4,29	4,29	4,30	4,26
3	Stufenkolben p''_i „	-0,17	+0,60	+0,02	0	+0,02
4	wirksamer $p_i = p'_i + \frac{1}{2} \cdot p''_i$. . . „	4,29	4,59	4,30	4,30	4,27

gegen 4,28 at normal (Fig. 192).

c) Drehzahl 50/min.

Versuch Nr.		—	IX	IVa	XIV	XV
1	Luftmenge V_0 in der Windhaube. . . l	30	4	2	0,5	$\infty 0$
2	Indizierter Druck: Hauptkolben p'_i . . at	—	5,26	4,29	4,30	4,26
3	Stufenkolben p''_i „	—	+0,20	+0,02	0	+0,02
4	wirksamer $p_i = p'_i + \frac{1}{2} \cdot p''_i$. . . „	$\approx 4,5$	5,36	4,30	4,38	4,44

gegen 4,37 at normal (Fig. 192).

(wie in Fig. 229c) bei gegebener Drehzahl ist; bei größerer und bei kleinerer Luftmenge werden die Verhältnisse günstiger. Es handelt sich also um eine typische Resonanzerscheinung.

Wann die Resonanz eintreten muß, läßt sich rechnerisch verfolgen, solange die Ausschläge klein sind. Wir berechnen dazu die *Eigenschwingungszahl der schwingenden Wassersäule*. Die Ruhelage der Wassersäule ist durch passende Spannung beider Luftpolster unter Berücksichtigung von Spiegeldifferenzen bedingt.

Eine Auslenkung um die Strecke ds m gemessen im Rohr vom Querschnitt f m² bedeutet eine Volumenänderung $dV = f \cdot ds$ m³ — Zunahme des Volumens im einen, Abnahme im anderen Luftpolster. Beide mögen im Ruhezustande V_{01} und V_{02} und allgemein V_1 und V_2 m³ sein, so gilt für beide

$$ds = \frac{dV}{f}; dV = f \cdot ds.$$

Unter Annahme isothermer Zustandsänderung gilt ferner

$$d(V_{01} \cdot p_{01}) = 0; d(V_{02} \cdot p_{02}) = 0,$$

woraus folgt

$$\begin{aligned} dV \cdot p_{01} &= V_{01} \cdot dp_1 & dV \cdot p_{02} &= V_{02} \cdot dp_2 \\ dp_1 &= \frac{p_{01}}{V_{01}} \cdot dV & dp_2 &= \frac{p_{02}}{V_{02}} \cdot dV. \end{aligned}$$

Durch Einführen von $dV = f \cdot ds$ entsteht

$$dp_1 = \frac{p_{01}}{V_{01}} \cdot f \cdot ds \quad dp_2 = \frac{p_{02}}{V_{02}} \cdot f \cdot ds.$$

Bei Vernachlässigung von Spiegeldifferenzen gegenüber den Drucken und Druckdifferenzen ist $p_{01} = p_{02} = p_0$; durch Multiplizieren mit f ergeben sich als

$$f \cdot dp_1 = \frac{p_0}{V_{01}} \cdot f^2 \cdot ds \quad f \cdot dp_2 = \frac{p_0}{V_{02}} \cdot f^2 \cdot ds$$

die beiden Kräfte, die einerseits saugend, andererseits drückend den Ausschlägen der Wassersäule in der Verbindungsleitung (z. B. Fig. 190) widerstreben und die Rückführung in die Ruhelage erstreben. Es ist also

$$dP = f \cdot (dp_1 + dp_2) = \left(\frac{p_0}{V_{01}} + \frac{p_0}{V_{02}} \right) \cdot f^2 \cdot ds \text{ kg}$$

die Kraft, die insgesamt die Rückführung der um einen kleinen Betrag ds aus ihrer Ruhelage gelenkten Masse erstrebt. Oder es ist

$$\frac{dP}{ds} = \left(\frac{p_0}{V_{01}} + \frac{p_0}{V_{02}} \right) \cdot f^2 = p_0 \cdot \left(\frac{V_{01} + V_{02}}{V_{01} \cdot V_{02}} \right) \cdot f^2 = c \text{ kg/m} \quad (11)$$

eine der Federkonstanten entsprechende, für größere Ausschläge allerdings hier nicht konstante Größe. Die schwingende Masse ist bei einer Länge l der in Frage kommenden Leitung

$$m = \frac{l \cdot f \cdot \gamma}{g} \text{ ME} \quad \dots \quad (12)$$

worin $\gamma \text{ kg/m}^3$ das spezifische Gewicht der Flüssigkeit und $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ die Schwerkbeschleunigung.

Die Eigenschwingungszeit einer Masse $m \text{ ME}$ unter dem Einfluß der Federkonstanten $c \text{ kg/m}^2$ ist

$$t_s = 2\pi \sqrt{\frac{m}{c}} \text{ s} \quad \dots \quad (13)$$

in unserem Fall also

$$\begin{aligned} t_s &= 2\pi \sqrt{\frac{l \cdot f \cdot \gamma \cdot V_{01} \cdot V_{02}}{g \cdot p_0 \cdot f^2 \cdot (V_{01} + V_{02})}} \\ t_s &= 2\pi \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{g}} \cdot \sqrt{\frac{l}{f} \cdot \frac{V_{01} \cdot V_{02}}{p \cdot (V_{01} + V_{02})}} \quad \dots \quad (13a) \end{aligned}$$

Praktisch interessieren selten andere Fälle als die folgenden beiden:

Für gleiche Größe beider Luftpolster — 2 Windhauben einer Zwillingspumpe — ist $V_{01} = V_{02} = V_0$, und es wird

$$t_s = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{g}} \cdot \sqrt{\frac{l}{f}} \cdot \sqrt{\frac{V_0}{2p_0}} \text{ s} \dots \dots \dots (13b)$$

Wenn dagegen eines der Luftpolster sehr groß ist — Windkessel gegen Windhaube —, so wird $V_{02} = \infty$, und $\frac{V_{01} + V_{02}}{V_{01} \cdot V_{02}} = \frac{1}{V_{01}} + \frac{1}{V_{02}}$ wird einfach $\frac{1}{V_0}$; dann wird die Eigenschwingungsdauer

$$t_s = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{g}} \cdot \sqrt{\frac{l}{f}} \cdot \sqrt{\frac{V_0}{p_0}} \text{ s} \dots \dots \dots (13c)$$

Letzterer Fall liegt in Tab. 77 vor; wir nehmen an, daß bei unseren Versuchen Schwingungen in der „Zwischenleitung“ zwischen Windhaube und Windkessel der Fig. 190 und 196 im Spiele sind. Die Leitung hatte $l = 7,5$ m Länge und bei 100 mm lichter Weite den Querschnitt $f = 0,0078$ m². p_0 ist gemäß Fig. 192, § 116 von der Drehzahl abhängig; es kommt nicht der Förderdruck, sondern der absolute Luftdruck in den Windpolstern in Frage; die statische Förderhöhe von etwa 33,0 m, vom Spiegel in den Windkesseln ab gerechnet, war nach Fig. 192 bei $n = 55$ /min (wo die Resonanz erfahrungsmäßig auftrat) um 0,23 at zu vermehren; so ist der Überdruck der Luftpolster zu $3,3 + 0,23$ at und der absolute Druck zu $p_0 = 3,3 + 0,23 + 1,03 = 4,6$ at = 46 000 kg/m² anzusetzen. Es ist $\gamma = 1000$ kg/m³, und bei der Versuchsreihe a Tabelle 77 ist $V_0 = 4l = 0,004$ m³. Alles dies eingesetzt wird die Eigenschwingungszeit der Wassersäule

$$t_s = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{1000}{9,81}} \cdot \sqrt{\frac{7,5}{0,0078} \cdot \frac{0,004}{46000}} = 0,58 \text{ s.}$$

Die Pumpe Fig. 190 liefert 2 Impulse auf den Umlauf, denn im Hingang fördert der Hauptkolben die Hälfte seiner Volumverdrängung in die Leitung, die andere Hälfte wird vom Stufenkolben gespeichert; beim Rückgang gibt der Stufenkolben das vorher gespeicherte in die Leitung. Bei der Drehzahl n /min haben wir also $n/30$ Impulse sekundlich. Resonanz war zu erwarten bei

$$\frac{n}{30} = 0,58,$$

$$n = \frac{30}{0,58} = 52/\text{min.}$$

Nach Fig. 229 beobachtet man Resonanz bei $n = 55$ /min. Die Übereinstimmung mit der Wirklichkeit ist in Anbetracht der Vernachlässigungen (Annahme isothermer Änderungen, Dämpfung, Einfluß der mitschwingenden senkrechten Säulen in Windkessel und Windhaube) befriedigend. Es handelt sich also um Schwingungen in der Zwischenleitung.

Resonanz zweiter Ordnung würde bei (wegen des Druckabfalles etwa) halber Drehzahl zu erwarten sein, oder aber beispielsweise auch bei $V_0 = 2\text{ l}$ für $n = 36/\text{min}$, denn nach demselben Rechnungsgang findet sich

$$t_s = 2\pi \sqrt{\frac{1000}{9,81} \cdot \sqrt{\frac{7,5}{0,0078} \cdot \frac{0,002}{44500}}} = 0,42 \text{ s,}$$

und da für zweite Resonanz vier Schwingungen auf den Umlauf kommen, so ist dieselbe zu erwarten bei

$$n = \frac{15}{0,42} = 36/\text{min.}$$

In Fig. 231 sind aufgenommene Indikatordiagramme wiedergegeben,



Fig. 231. Stufenkolbenpumpe, Pumpenraum und Druckraum.
Nr. IV a. Zustand der Resonanz zweiter Ordnung, in der Windhaube $V_0 = 2\text{ l}$ Luft, $n = 40/\text{min}$.
6 mm/at, $\frac{1}{3}$ nat. Gr.

die zeigen, daß man bei $V_0 = 2\text{ l}$ und $n = 40/\text{min}$ der zweiten Resonanz nahe ist. In Fig. 232 sind für denselben Fall *Zeitdiagramme* gegeben, gleichzeitig aufgenommen mit zwei Wagenerischen Bandindikatoren (Techn. Mess. § 88). An dem Druckraumdiagramm ist besonders gut die gleichmäßige Aufeinanderfolge der Schwingungen zu erkennen, von denen immer die auf den Impuls folgende die stärkere, die nächste etwas gedämpft ist. Daraus, daß das Minimum des Druckes immer etwas hinter den Totpunkt fällt, sehen wir, daß die Drehzahl etwas über den Resonanzpunkt hinaus ist — so wie die Rechnung es auch ergibt ($n = 40$, statt $n = 36/\text{min}$). — Außerdem zeigt sich noch, daß der Druckanstieg im Pumpenraumdiagramm merklich hinter dem äußeren Totpunkt einsetzt, was das Kolbenwegdiagramm natürlich verdeckt.

Manches Weitere über diese Resonanzerscheinung möge man in einer größeren Arbeit des Verfassers¹⁾ nachlesen. Dort ist z. B. auch gezeigt, daß die Gestalt der Schwingungen im Zeitdiagramm durch eine Fouriersche Reihe von einfachster Gesetzmäßigkeit dargestellt werden kann; deren Vorzahlen ließen sich mit dem harmonischen Analysator von Mader auffinden. Es handelt sich um ein schönes Beispiel von dessen Anwendung, wenn auch die Bedeutung mehr theoretisch ist.

Die *Ventilbewegung* wird durch die Schwingungen kaum beeinflusst, selbst wenn in der Windhaube keine Luft ist, Fig. 225 bei § 123; denn obwohl gerade dann heftige Druckänderungen durch das Ventil pendeln, sind doch die hin und her gehenden Volumina nicht größer, als dem Atmen des Pumpenkörpers und dem Arbeiten des Indikatorkolbens entspricht. Immerhin erkennt man in Fig. 225 die übereinstimmende

¹⁾ Siehe die Anmerkung S. 438.

Lage der Marken *a* und *b* in beiden Diagrammen: Jede Schwingung macht sich in der Ventilerhebung als leichter Knick kenntlich.

Ist jedoch Luft im Pumpenraum (§ 124), so werden die Schwingungen des Ventils größer, entsprechend der größeren Elastizität des Pumpenraums und dem größeren hin und her gehenden Volumen, ebenso Fig. 239.

Resonanzschwingungen in der Saugleitung können genau so zustande kommen wie in der Druckleitung, auch die Nachprüfung durch Rech-

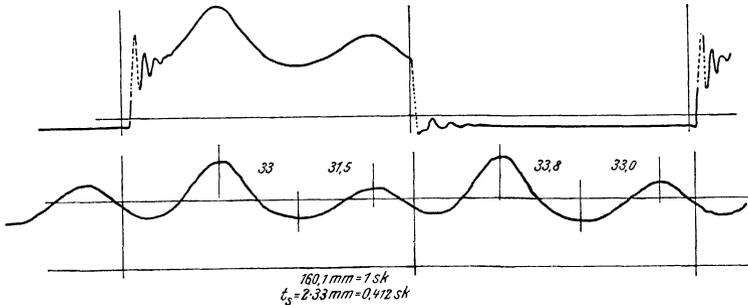


Fig. 232. Stufenkolbenpumpe, Pumpenraum und Druckraum.
Nr. IV. Zustand wie bei Fig. 231, im Zeitdiagramm. 8 mm/at, $\frac{1}{3}$ nat. Gr.

nung bleibt sinngemäß die gleiche. Nicht leicht jedoch nehmen die Schwingungen große Amplituden an, wegen der geringen zur Beschleunigung verfügbaren Drucke. Beispiele von Diagrammen gibt Fig. 233, wo der Saugwindkessel ohne Luft ist und daher der Massendruck der Wassermasse in der Saugleitung deutlich erkennbar wird, sowie Fig. 234, wo starke Schwingungen in der Sauglinie sich zeigen, die sich von den Indikatorfederschwingungen in der

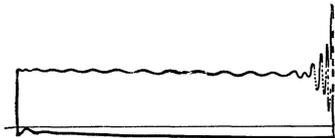


Fig. 233. Stufenkolbenpumpe.
Nr. XXII. Saugwindkessel ohne Luft,
 $n = 40/\text{min}$. 6 mm/at, $\frac{1}{3}$ nat. Gr.

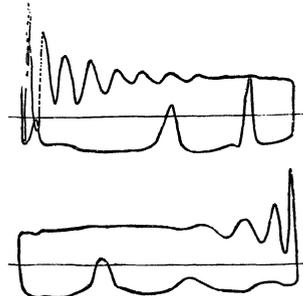


Fig. 234. Zwillingspumpe. Resonanzschwingungen in der Saugleitung,
 $n = 67/\text{min}$. 15 mm/at, $\frac{1}{3}$ nat. Gr.

Drucklinie durch die Schwingungszahl deutlich als verschiedenartig unterscheiden. Ein besonders eigenartiges Beispiel ist endlich in Fig. 235 dargestellt: Die Diagramme des Pumpen- und des Saugraumes sind ineinander gezeichnet; denkt man letzteres in ein Zeitdiagramm umgezeichnet, so erkennt man einen Schwingungszustand von der Periode gleich der Drehzahl der Maschine. Im Zustande fast vollkommener Resonanz geriet die Saugsäule in so starke Schwingungen, daß der höchste Druck nicht nur die Atmosphäre überschreitet, sondern auch noch den Druck im Druckraum übertrifft (kreuzschraffiert). In diesem Augenblick werden daher beide Ventile geöffnet,

und es findet Wasserförderung durch Massenkraft, also wie beim hydraulischen Widder statt. Der volumetrische Wirkungsgrad wird in diesem Fall über Eins hinausgehen, der Leistungsmehrbedarf für die Überförderung natürlich nicht ausbleiben. — Man erhält das Diagramm

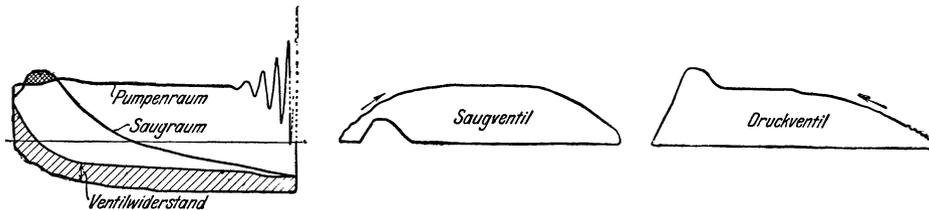


Fig. 235. Stufenkolbenpumpe. Resonanzschwingungen erster Ordnung in der Saugleitung mit Überförderung durch Massenkraft. 25 mm/at, $\frac{1}{2}$ nat. Gr.

bei niedrigem Förderdruck, während die Drehzahl der Trägheit der Säule angepaßt, meist also auch sehr niedrig ist.

Markante Schwingungen, allerdings nicht eigentlich von Resonanz herrührend, erhält man meist beim Indizieren schwungradloser Pumpen,

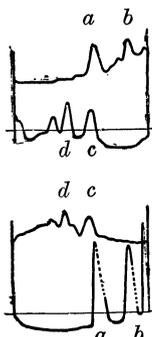


Fig. 236. Schwingradlose Duplexpumpe, beide Seiten eines Zylinders. 18 Doppelhübe/min.

Fig. 236. Wegen ihrer geringen Masse pflegen der Kolben und die Kolbenstange durch Schwingungen des Wassers zu sprungweisem Gang veranlaßt zu werden, was man dann mit dem Auge ohne weiteres bemerkt; dadurch werden aber die Schwingungen einer Seite auf die andere übertragen, die Schwingungen *a b c d* der Sauglinie treten also in der Drucklinie verkleinert auf.

Resonanzerscheinungen dieser Art müssen unter allen Umständen vermieden werden, der

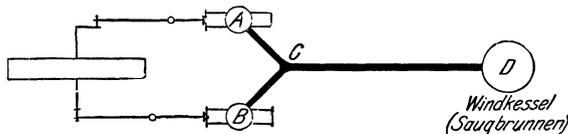


Fig. 237. Schema der Saugleitung einer Zwillingspumpe.

Bruchgefahr und des Leistungsaufwandes wegen. Wo sie vorhanden sind, hat man zunächst rechnerisch festzustellen, welche Leitung schwingt und welche Luftpolster die Federung geben.

In der durch Fig. 237 angedeuteten Anordnung einer Saugleitung können Längsschwingungen von *ABC* nach *D* oder Querschwingungen zwischen *A* und *B* eintreten. Zu beachten ist auch, daß eine doppeltwirkende Pumpe der Saugsäule zwei Impulse bei jedem Umlauf erteilt, eine Stufenkolbenpumpe aber nur einen, und daß sich die Impulse für beide Hälften einer Zwillingspumpe in verschiedenartiger Weise addieren, je nachdem ob die Kurbeln um 90° versetzt oder wie sonst sie angeordnet sind.

Danach ist dann in jedem Fall die Beseitigung der Schwingungen möglich. Das geschieht, indem man eine der in den Formeln 13a bis c vorkommenden Größen ändert. Am einfachsten ändert man das in

den Windkesseln abgeschnittene Luftvolumen durch Einlassen (An-schnüffeln) von Luft; wo das nicht ausreicht, wird sich stets die Beschaffung einer neuen Windhaube lohnen. So wie eine Vergrößerung von V_0 wirkt eine Verkleinerung von f — man ersetzt die schwingende Leitung durch eine engere — oder eine Vergrößerung von l — man gibt ihr einen Umweg, oder versetzt den Windkessel; beides erspart die großen Arbeitsverluste durch Schwingungen, nimmt dafür die kleineren durch vermehrten Widerstand der Leitung in den Kauf.

Auch eine Drosselscheibe hat man zur Dämpfung der Schwingungen mit gutem Erfolg in die Rohrleitung gesetzt. Nach den Erfahrungen bei *Luftleitungen*¹⁾ braucht die Drosselscheibe nicht stark zu drosseln, um doch die gewünschte Wirkung zu geben; immerhin eignet sich dieses Mittel, wegen der quadratischen Zunahme des Drosselverlustes, mehr dazu, eine Anlage bei der Resonanzdrehzahl zum Laufen zu bringen, als dazu, sie mit wechselnden Drehzahlen auch oberhalb des Resonanzpunktes zu betreiben. Als besonders wirksames und einfaches, immerhin vorsichtig zu benutzendes Mittel sei endlich noch die Außerbetriebsetzung eines der schwingenden Luftpolster durch Auslassen der Luft genannt; nach Fig. 227 kann der große Windkessel der Fig. 190 und 196 ohne weiteres entbehrt werden.

Besonders lästig ist die Resonanz bei *Gasmaschinenantrieb*; Gasmaschinen pflegen (§ 5, 92) nahe ihrer Höchstleistung zu arbeiten und können eventuell den Resonanzpunkt nicht überwinden, während sie nachher ausreichen würden. Man kann durch Verstellen der Zündung und durch Eingeben reicheren Gemisches über den Resonanzpunkt hinweghelfen.

124. Fehler im Pumpengang. Schon die unvollkommene Starrheit des Pumpengehäuses wie auch die Nachgiebigkeit des Plungergestänges durch Elastizität und Spiel bewirken, daß der Druckanstieg am Beginn der Druckperiode zwar im Kolbenwegdiagramm im Totpunkt zu liegen scheint, daß aber ein Kurbelweg- oder Zeitdiagramm zeigt, er hebe erst merklich hinter dem Totpunkt an (Fig. 232). Um beim Umzeichnen des Kolbenweg- in ein Zeitdiagramm den Anstieg einigermaßen richtig zu erhalten, kann man die Indikatorschwingungen auszählen, so wie es in Fig. 223, 224 mit den Ventilschwingungen geschehen ist.

Wenn aber *Luft im Pumpenraum* ist, dann wird sein Inhalt so elastisch, daß der Druckanstieg nur allmählich nach Maßgabe der Volumenverkleinerung erfolgen kann. Das Pumpenraum-Diagramm erhält die Form Fig. 238 oder 239 mit einer Kompressionslinie am Beginn des Drückens und einer Expansionslinie am Beginn des Ansaugens.

Durch die Luft wird der *volumetrische Wirkungsgrad* herabgesetzt. Wenn die Luft im Pumpenraum stagniert, so daß also die gleiche Luftmenge beim Einwärtsgang des Plungers komprimiert, beim Rückgang expandiert wird, dann stellt die Strecke 88,0 mm des Diagrammes die aus dem Pumpenraum herausgedrückte Wassermenge dar; dem ist dann gleich die Strecke 88,0 mm, die das angesaugte Wasservolumen bedeutet.

¹⁾ Borth, Schwingungs- und Resonanzerscheinungen in den Rohrleitungen von Kolbengebläsen. Z. d. V. D. I. 1916, S. 565, 611.

Wenn indessen, wie zu erwarten wäre, die Luft beim Drücken zunächst durch das Druckventil entweicht, und beim Saugen neue Luft aus dem Saugrohr eintritt, dann wäre die Wasserförderung nach der in Fig. 238 angedeuteten Konstruktion zu ermitteln: die Lage des Punktes *O* ist so zu bestimmen, daß bei isothermischer Kompression

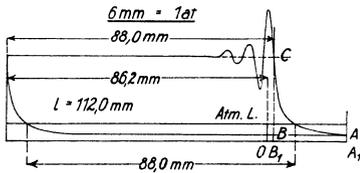


Fig. 238. Ermittlung des volumetrischen Wirkungsgrades bei Anwesenheit von Luft. $\frac{1}{5}$ nat. Gr.

$$OA_1 : OB_1 = CB_1 : BB_1$$

wird. Durch Differenzbildern entspricht dem bekanntlich

$$OB_1 : BB_1 = AB : CB,$$

woraus also

$$OB_1 = BB_1 \cdot \frac{AB}{CB}$$

folgt. Damit ist die Strecke OB_1 im Diagramm anzutragen, nachdem man zur Atmosphärenlinie parallel die absolute Nulllinie A_1B_1 im Abstand des Federmaßstabes angetragen hatte. Nun bedeutet OB_1 im komprimierten Zustande die geförderte Luftmenge, die zuerst durchs Ventil geht, und die Strecke 86,2 mm bedeutet die geförderte Wassermenge.



Fig. 239. Stufenkolbenpumpe. Nr. XXVIII. Luft im Pumpenraum, $n = 50/\text{min}$. 6 mm/at , $\frac{1}{5}$ nat. Gr.

Die *Ventilbewegung* wird durch die Luft verändert; das Ventil öffnet sich erst zur Zeit, wo der Gegendruck überschritten ist, dann aber hat der Kolben bereits endliche Geschwindigkeit, so daß das Ventil aufgeworfen wird. Beispiel eines Ventilerhebungsdiagrammes gibt Fig. 239 rechts. Das Pumpenraumdiagramm indessen zeigt in diesem Fall eine lange Folge kleiner Schwingungen, die für Resonanzschwin-

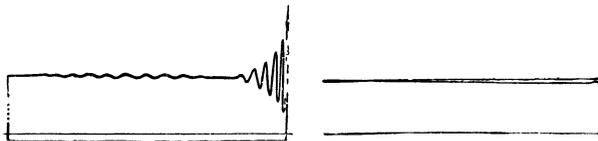


Fig. 240. Stufenkolbenpumpe. Resonanzerscheinung zwischen einem Luftsack und der Indikatorfeder.

gungen der Leitung zwischen Windhaube und Windkessel viel zu schnell sind. Sie rühren (Fig. 190, § 115) von dem kleinen Luftsack über dem Druckventil her, der die kurze wagerechte Säule gegen den Luftinhalt der Windhaube schwingen läßt; der größere Luftinhalt der Windhaube macht dabei kaum Druckschwankungen durch, wie das Druckraumdiagramm zeigt. — In der zweiten dieser Schwingungen interferiert eine solche Schwingung mit der Federschwingung des In-

diktors; eine ähnliche Interferenzwirkung läßt in Fig. 240 die Schwingungen scheinbar zunächst verschwinden, dann doch wieder entstehen. — Die Pfeile *a* bis *f*, Fig. 239, legen einander entsprechende Punkte im Pumpenraum- und im Ventilerhebungsdiagramm fest, um zu zeigen, daß beide synchron schwingen, daß also das Ventil vom Wasser hin und her geworfen wird.

Experimentell bringt man Luft in die Pumpe, indem man am Pumpenraum das Schnüffelventil öffnet, oder besser indem man durch einen am Saugwindkessel angebrachten Hahn Luft einsaugt; Vorsicht ist geboten, weil plötzlich eine große Luftblase in die Pumpe treten und sie zum Durchgehen bringen kann.

Ein anderer Fehler, der sich im Diagramm bemerkbar machen kann, ist *Undichtigkeit der Ventile*. Experimentell verwirklicht man sie am einfachsten durch Öffnen einer Umgehungsleitung um Druck- und Saugventil herum, wie solche oft schon zum Ingangsetzen an der Pumpe vorhanden ist.

Im Diagramm gibt sich die Undichtigkeit zu erkennen durch weniger schroffes Ansteigen und Abfallen des Druckes an den Diagrammmenden. Der Druckausgleich durch die Undichtigkeit läßt die Übergänge sanfter werden. Die Ecken runden sich ab. Aber nur bei großer Undichtigkeit gelangt man zu merklicher Beeinflussung des Diagramms, und Fig. 241 entspricht mehr dem Fall, wo das Ventil durch ein Holzstück offen gehalten wird, als seiner Undichtigkeit im engeren Sinn.

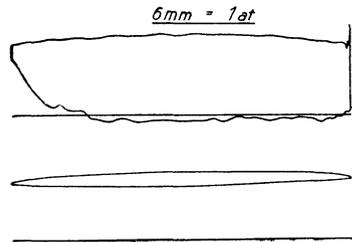


Fig. 241. Stufenkolbenpumpe, Druckventil undicht. $n \approx 20/\text{min}$. $\frac{2}{3}$ nat. Gr.

b) Kreiselpumpe.

125. Kreiselpumpe gegen überwiegend statischen Förderdruck. Kreiselpumpen zeigen in ihrem Verhalten wesentliche Unterschiede gegenüber dem Verhalten der Kolbenpumpe. Ähnlich wie bei der Kolbenpumpe wird es auch hier einen Unterschied machen, ob der Förderdruck ein statischer ist und daher bei jeder Wasserförderung der gleiche bleibt, oder ein teilweise hydraulischer, der mit steigender Wassermenge zunimmt.

Es sei zunächst ein Versuch wiedergegeben, wo der wesentliche Teil des Förderdruckes statisch, ein Teil jedoch hydraulisch ist. Der Fall liegt vor bei der Förderung in einen Hochbehälter, bei der doch auch eine erhebliche Rohrlänge oder andere Widerstände zu überwinden sind. Das *Schema einer Versuchsanordnung* gibt Fig. 242. Das Wasser wird einem Saugbrunnen entnommen und wird in einen Hochbehälter gefördert; der Ausguß liegt H_0 m über dem Saugwasserspiegel. Zur Messung des Förderdruckes p_2 ist ein Manometer angebracht; als Förderdruck p wird die Summe $p = p_2 + 0,1 \cdot h$ at anzusetzen sein, wobei dann freilich schon die Widerstände des Saugkorbes, zweier Krümmen und der Leitung bis zum Schlamm-sieb zu Lasten der Pumpe

Tabelle 78. Kreiselpumpe im Anlaufen und bei wechselnder Dreh-
Wider-

Versuch Nr.		33	35
1	Drehzahl n /min	570	760
2	Wasserförderung V m ³ /h	0	0
3	Förderdruck p Saugen und Drücken at	0,44	0,66
4	Nutzleistung $N_e = \frac{10\,000\,p \cdot V}{102 \cdot 3600}$ kW	0	0
5	Elektrische Leistungsaufnahme N_{el} kW	1,72	2,34
6	Wirkungsgrad des Satzes η_w —	0	0
7	Leistungsaufnahme des Motors selbst N'_{el} kW	0,79	1,33
8	Leistung an der Kupplung N_k „	0,12	0,48
9	Wirkungsgrad der Pumpe $\eta_P = N_e/N_k$ —	0	0
10	Leistungsverlust in der Pumpe $N_k - N_e$ kW	0,12	0,48
11	„ im Satz $N_{el} - N_e$ „	1,72	2,34
12	„ im Vorschaltwiderstand $N_{el} - N'_{el}$ „	0,93	1,01
13	Moment an der Kupplung M_k m · kg	0,20	0,61
14	Theoretisches Moment $M_e = 973 \cdot \frac{N_e}{n}$ „	0	0
15	Verlust an Moment in der Pumpe $M_k - M_e$ „	0,20	0,61
16	Spannung am Anker E_A V	88,5	118,5
17	Ankerstrom J_A A	7,0	9,8
18	Vorschaltwiderstand $W_o = \frac{221,5 - E_A}{J_A}$ Ω	19,0	10,5

fallen. Die Wassermessung soll in Fig. 242 durch den Wassermesser erfolgen. Ist es ein Woltmann-Wassermesser, so ist wegen des davorliegenden Krümmers ein Strahlregler statt des Schlammtopfes mit Sieb vorzuschalten.

Wird die Pumpe durch Nebenschlußelektromotor getrieben, so ist die Verminderung der Drehzahl innerhalb gewisser Grenzen durch den üblichen Regelwiderstand zu erreichen, es muß aber, um so weit mit der Drehzahl herunterzukommen, wie bei dem folgenden Versuch, im allgemeinen ein besonderer Vorschaltwiderstand zur Hilfe genommen werden; die Anlaßkontakte des normalen Widerstandes pflegen den Stromstärken dauernd nicht gewachsen zu sein.

Auf eine solche Anlage nach Fig. 242 bezieht sich die Versuchsreihe, deren Ergebnisse in Tabelle 78 und in Fig. 243 mitgeteilt sind.

Der Versuch wurde in der Weise geleitet, daß zunächst mit der höchsten für die betreffende Pumpe zulässigen Drehzahl, 1400/min, begonnen und die Drehzahl allmählich vermindert wurde. Bei der Drehzahl 1100/min wird die Wassermenge Null. Bereits bei einer endlichen und sogar recht erheblichen Drehzahl hört also die Wasserförderung ganz auf. Offenbar reicht hier der von der Pumpe erzeugte Druck eben, um der statischen Wassersäule das Gleichgewicht zu halten, jedoch noch nicht, um Wasser zu fördern. Diese Auffassung bestätigt sich, wenn man die Drehzahl weiter vermindert. Es findet dann, wäh-

zahl, gegen überwiegend statischen stand.

37	39	31	29	27
980	1098	1110	1250	1405
0	0	8,25	58,0	82,2
0,98	1,17	1,17	1,35	1,56
0	0	0,26	2,13	3,50
3,23	3,82	3,94	6,66	8,85
0	0	0,066	0,320	0,396
2,25	2,97	3,10	5,99	8,85
1,13	1,70	1,96	4,53	6,97
0	0	0,133	0,47	0,50
1,13	1,70	1,70	2,40	3,47
3,23	3,82	3,68	4,53	5,35
0,97	0,85	0,84	0,67	0
1,12	1,51	1,72	3,53	4,82
0	0	0,23	1,66	2,42
1,12	1,51	1,47	1,87	2,40
151,5	170	174	198,5	221,5
13,8	16,5	17,8	29,3	39,8
5,05	3,1	2,65	0,78	0

rend die Wasserförderung dauernd ausbleibt, ein weiteres Abfallen des vom Manometer angezeigten Druckes statt, indem die Wassersäule im Steigerrohr allmählich der Drehzahlabnahme entsprechend zurückfällt. Besser nimmt man diese Kurve der Druckhöhe bei der Fördermenge Null so auf, daß man mit langsamem Lauf beginnt und die Drehzahl steigert, bis man wieder an den Bereich der Wasserförderung herankommt; es pflegt nämlich in der Saugleitung ein Fußventil, oft auch

in der Druckleitung eine Rückschlagklappe vorhanden zu sein.

Man erhält auf diese Weise in dem Kurvenzug *OA* des Pumpenanlaufs diejenigen statischen Druckhöhen, bei denen

die Wasserförderung eben einsetzt; sie sind der betreffenden Drehzahl eindeutig zugeordnet; zur Förderung ist, wenn der Ausguß in der betreffenden Höhe liegt, eine Überdrehzahl erforderlich — doch schon mäßige Steigerungen der Drehzahl haben dann erhebliche Förderungen zur Folge, und bald wird daher die zulässige höchste Leistungsaufnahme des Motors erreicht.

Denn während im Gebiet des Nichtförderns nur Reibungs- und Wirbelungsverluste zu decken sind, ist im Gebiet des Förderns die Nutzleistung durch entsprechende Leistungsaufnahme zu belegen. Die Kurve der Leistungsaufnahme N_k hat daher bei der Drehzahl 100 min einen scharfen Knick.

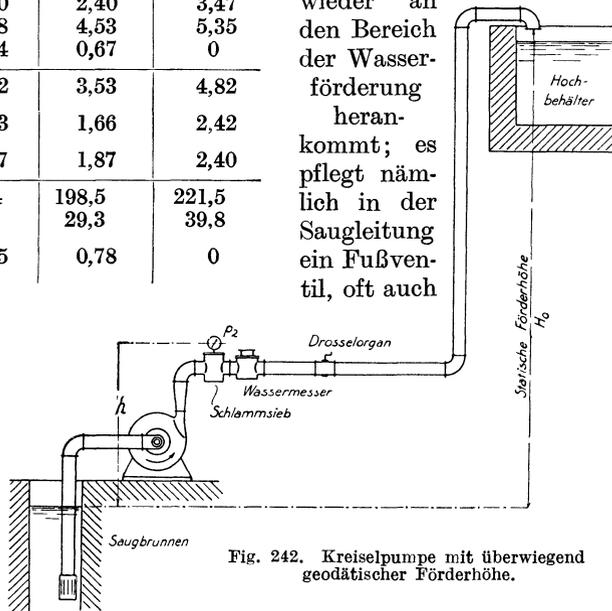


Fig. 242. Kreiselpumpe mit überwiegend geodätischer Förderhöhe.

Mit der Wasserförderung steigt der Wirkungsgrad dauernd, entsprechend dem Umstande, daß die Wasserförderung viel schneller zunimmt als die Drehzahl, während doch auch der Druck zunimmt, die Verluste aber in der Pumpe wachsen nur mit der ersten Potenz der Geschwindigkeit.

Es werde noch der *Gang der Rechnung* an Hand des Versuches Nr. 29 erläutert. In $2 \times 2 = 4$ min Beobachtungszeit zeigte der Wassermesser 1920 und 1950 l/2 min Wasserdurchgang, also bei befriedigender Meßgenauigkeit einen Durchgang von $3,87 \times 15 = 58,0 \text{ m}^3/\text{h}$. Das Manometer zeigte 1,10 at; es hatte $-0,01$ at Korrektur und befand

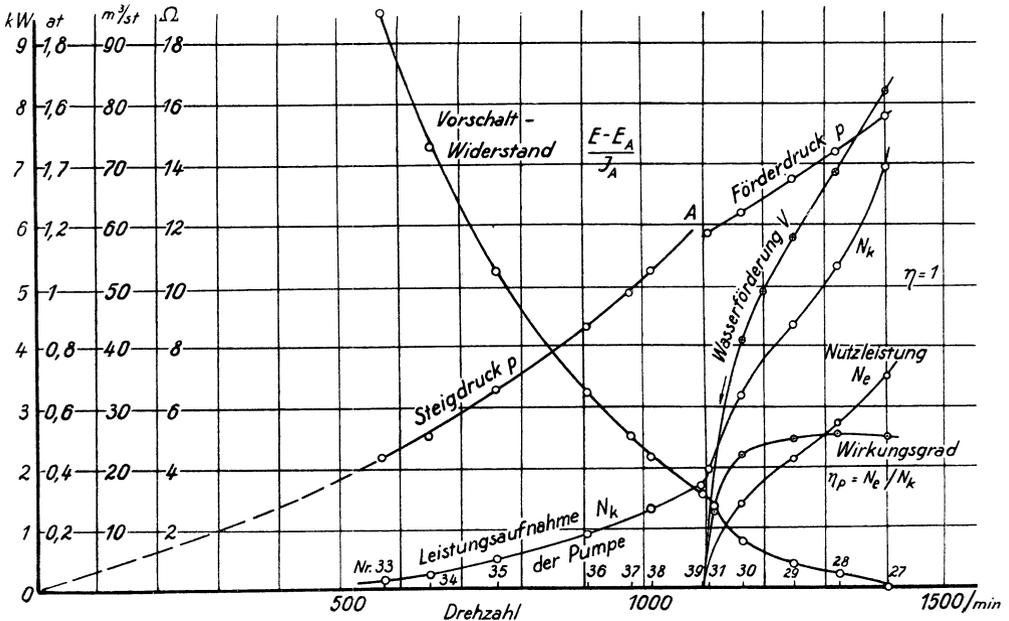


Fig. 243. Kreiselpumpe im Anlaufen und im Fördern gegen geodätische Förderhöhe.

sich $2,6 \text{ m} \equiv 0,26 \text{ at}$ über dem Saugspiegel; die Förderhöhe ist $1,10 - 0,01 + 0,26 = 1,35 \text{ at}$. Die Nutzleistung wird daher $\frac{58,0 \cdot 13\,500}{3600 \cdot 102} = 2,13 \text{ kW}$.

Gemessen war die Spannung am Anker $198,5 \text{ V}$, die insgesamt aufgenommene Stromstärke $30,1 \text{ A}$, die Netzspannung $221,5 \text{ V}$ und der Erregerstrom $0,77 \text{ A}$. An elektrischer Leistung wurden also aufgenommen $\frac{1}{1000} \cdot 221,5 \cdot 30,1 = 6,66 \text{ kW}$. Davon wurden im Vorschaltwiderstand — durch den nur der Ankerstrom geht — $\frac{1}{1000} \cdot (221,5 - 198,5) \cdot (30,1 - 0,77) = 0,67 \text{ kW}$ aufgezehrt; der vorgeschaltete Widerstand betrug also $\frac{221,5 - 198,5}{30,1 - 0,77} = 0,78 \Omega$. Der Motor selbst

nahm $N'_{el} = 6,66 - 0,67 = 5,99$ kW auf. Für den Wirkungsgrad des Maschinensatzes, bestehend aus Motor und Pumpe, kommt die insgesamt aufgenommene Leistung in Betracht; denn was der Vorschaltwiderstand bei gegebener Netzspannung und verlangter Drehzahl verzehrt, ist nicht willkürlich, sondern nur eine Funktion der Motoreigenschaften¹⁾. Der Wirkungsgrad des Satzes ist also $\eta = \frac{2,13}{6,66} = 0,320$.

Um den Wirkungsgrad der Pumpe allein zu haben, muß die an der Kupplung vom Motor auf die Pumpe übertragene Leistung N_k berechnet werden; sie ist um die Verluste im Motor kleiner als die Leistungsaufnahme $N_{el} = 6,66$ kW. Diese Verluste sind folgende:

im Vorschaltwiderstand wie oben 0,67 kW
 für Felderregung $\frac{1}{1000} \cdot 221,5 \cdot 0,77$ = 0,17 „
 Ankerwärme bei $W_A = 0,25$ Ohm: $\frac{1}{1000} \cdot 0,25 \cdot (30,1 - 0,77)^2 = 0,22$ „
 Hysteresis usw. bei $n = 1250$ und $i = 0,77$ A bekannt 1,07 „
zusammen 2,13 kW,

so daß $N_k = 6,66 - 2,13 = 4,53$ kW an der Kupplung abgegeben werden. Der Wirkungsgrad der Pumpe allein wird $\eta_P = 2,13 : 4,53 = 0,47$, der Leistungsverlust in der Pumpe 2,40 kW.

Das an der Kupplung übertragene Moment ist $M_k = 973 \cdot \frac{4,53}{1250} = 3,53$ mkg; der Nutzleistung entspricht ein Moment $M_e = 973 \cdot \frac{2,13}{1250} = 1,66$ mkg. Demnach gehen 1,87 mkg Moment in der Pumpe verloren. — 1250/min war die Drehzahl des Satzes.

In Fig. 244 sind die Ergebnisse über der Wasserförderung statt über der Drehzahl aufgetragen. Bei der Kolbenpumpe wären beide Auftragungen identisch. Hier sieht das Bild wesentlich anders aus.

Die Leistungsverluste in der Pumpe gehen zum wesentlichen als *Erwärmung* in das geförderte Wasser über. Der Leistungsverlust von 2,40 kW bedeutet eine Wärmemenge von $2,40 \cdot 859 = 2060$ kcal/h; diese auf 58,0 m³/h, also bei kaltem Wasser auf 58 000 kg/h verteilt, ergibt eine Erwärmung um 0,036°. Die Erwärmung wird stets belanglos sein außer bei sehr großen Förderdrucken; man vergleiche aber die Ergebnisse am Ventilator, § 136.

In Fig. 244 läßt sich der jeweilige gesamte Förderdruck ohne weiteres zerlegen in den statischen, der Höhe des Ausgusses über dem Saugwasserspiegel entsprechenden, $\frac{1}{10} H_0 = 1,17$ at und den hydraulischen, der von 1,17 at aus rechnet. Letzterer gehorcht dem quadratischen Gesetz. Die Kurve des Förderdruckes in Fig. 244 bedeutet die *Kennlinie der Rohrleitung* Fig. 242, in die die Pumpe fördert.

¹⁾ Entsprechend: Normalien für Bewertung und Prüfung von elektrischen Maschinen, § 34, Abs. 6. u. 7.

Die Pumpe der Fig. 242 hat außer der Überwindung des Förderdruckes noch die Beschleunigung des Wassers zu leisten. In bezug auf diese ist die Versuchsanordnung der Fig. 242 nicht sauber, vergleiche hierüber § 130. Die Unsauberkeit ist aber bei den beträchtlichen Förderhöhen der Tabelle 78 belanglos. Die Pumpe hat Anschlüsse von 150 mm Dm, also $0,0177 \text{ m}^2$ Fläche. Selbst bei Versuch 27 wird die Wassergeschwindigkeit in den Rohren nur $\frac{82,2}{3600 \cdot 0,0177} = 1,29 \text{ m/s}$, und daher die Geschwindigkeitshöhe nur $\frac{1,29^2}{2 \cdot 9,81} = 0,085 \text{ mWS} = 0,0085 \text{ at}$; gegenüber dem Förderdruck von 1,56 at tritt das ganz zurück.

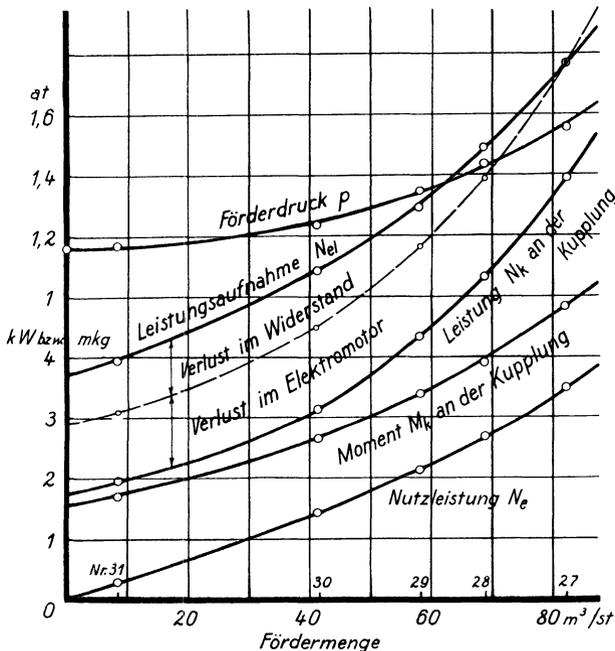


Fig. 244. Kreiselpumpe in der Förderung gegen überwiegend statische Förderhöhe.

126. Kreiselpumpe gegen rein hydraulischen Widerstand. Die Versuchsanordnung kann nach Fig. 245a getroffen werden; die Pumpe saugt aus einem Behälter und entläßt das Wasser in den gleichen Behälter, jedoch nachdem durch eine Drossleinrichtung der gewünschte Gegendruck p_2 eingestellt ist. Der Druckunterschied wird an zwei Manometern abgelesen. Es ist durchaus gleichgültig — für den vorliegenden Versuch, nicht aber für das Anlaufen der Pumpe, § 125 — ob der Förderdruck durch Drosselung erzeugt wird, also einen hydraulischen Widerstand bildet, oder ob die Förderung auf eine statische Förderhöhe in einen Druckbehälter erfolgt. Ein verschiedenes Verhalten in beiden Fällen tritt erst dann ein, wenn die Drehzahl der Pumpe sich verändert.

Zum feinfühligem Einregeln insbesondere auch kleiner Wassermengen wird das Drosselorgan zweckmäßig so ausgestaltet, wie in § 117 besprochen.

Eine andere Versuchsanordnung gibt Fig. 245 b. Hier läuft das Wasser nur im Kreise um, die Drucke p_1 und p_2 können wieder abgelesen werden. Der Kreis muß durch den Einfülltrichter mit der Atmosphäre in Verbindung gebracht werden, teils um ihn füllen zu können, dann aber auch, um die Drucke im Wasserkreislauf festzulegen: am Anschluß des Trichterrohres bleibt der Druck auch in beliebigem Gange der Pumpe unverändert. Die Pumpe legt nämlich im Laufen nur Druckunterschiede fest, nicht aber die Höhenlage des Druckes (Fig. 248). Der Einfülltrichter muß deshalb stets offen bleiben. Der geringe Wassergehalt erwärmt sich merklich. — Wenn man in Fig. 245 a und b die Pumpe samt der ganzen Rohrleitung in Kugellagern beweglich aufhängt, so kann man die Leistungsaufnahme der Pumpe nach der Rückdruckmethode bestimmen (Techn. Mess. § 78); für passende Höhenlage des Schwerpunktes ist zu sorgen.

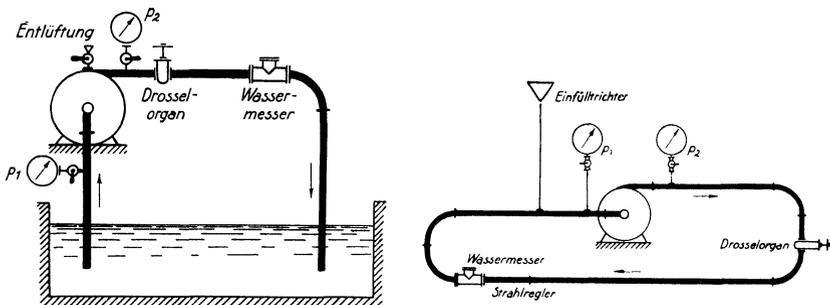


Fig. 245 a und b. Versuchsanordnungen für Kreiselpumpen.

Die folgenden Versuchsreihen sind jedoch nicht an solcher Laboratoriumseinrichtung ausgeführt, sondern an einer Druckwasserheizung nach Maßgabe von Fig. 246. Das Wasser wird von mehreren Pumpen, die miteinander parallel arbeiten können, in eine Fernleitung gedrückt und aus deren anderem Ast zurückgesaugt; zwischen die beiden Äste der Fernleitung sind die Zweigleitungen mit den Heizkörpern geschaltet. Das Einfüll- und Ausdehnungsgefäß, dessen Anschluß die Stelle unveränderten Druckes, den Übergang von der Druck- zur Saugwirkung festlegt, ist an passender Stelle angeschlossen. Das Wasser war bei den Versuchen kalt, doch hätte seine Erwärmung am Ergebnis wenig geändert. Die Anwärmeinrichtungen sind in Fig. 246 als für uns unwesentlich fortgelassen. — Die in Gestalt von Drehstrom aufgenommene Leistung wurde aus der Umlaufgeschwindigkeit der Treibscheibe eines vorhandenen Wattstundenzählers bestimmt; der Umlauf der Scheibe ist bei diesen Geräten meist ohne weiteres zu beobachten, auch pflegt der Wert eines Umlaufes aufgestempelt zu sein.

Wenn man in Fig. 246 zunächst den Schieber der Pumpe II geschlossen läßt, so hat man für Pumpe I die Anordnung wie Fig. 245 b.

Tabelle 79. Kreiselpumpe gegen rein hydraulischen Laufraddurchmesser 275 mm

Versuch Nr.		53
1	Drehzahl n /min	1415
2	Wasserförderung V m ³ /h	111,5
3	Druck im Druckstutzen p_2 } bezogen auf 0,7 m Höhe . . { at ÜD	3,265
4	„ „ Saugstutzen p_1 } „ „ „ „ { „	1,39
5	Förderdruck $p = p_2 - p_1$ at	1,875
6	Nutzleistung $N_e = \frac{V \cdot (p_2 - p_1)}{36,7}$ kW	5,70
7	Elektrische Leistungsaufnahme N_{e1} kW	12,1
8	Wirkungsgrad des Satzes $\eta = N_e/N_{e1}$ —	0,471
9	Düsenwert der Gesamtleitung $F_0 = 0,198 \frac{V}{\sqrt{p}}$ cm ²	16,1
10	Verhältniswert V/n —	0,079
11	„ „ n/\sqrt{p} —	1030
12	Stromaufnahme J A	67,4
13	Spannung E V	120
14	Scheinbare Leistung $E \cdot J \cdot \sqrt{3} = 1,73 \cdot E \cdot J$ kVA	14,0
15	Leistungsfaktor $\cos \varphi = \frac{N_{e1}}{1,73 \cdot E \cdot J}$ cos φ	0,865
16	Reglerkontakt (0 = Bürsten abgehoben) Nr.	0

Mit diesen Versuchsanordnungen lassen sich nun zwei charakteristische Versuchsreihen vornehmen; einmal läßt man das Drosselorgan unverändert stehen und ändert die Drehzahl der Pumpe, das zweitemal läßt man umgekehrt die Drehzahl unverändert und ändert die Stellung des Drosselorganes von „offen“ bis „zu“. Die beiden Reihen entsprechen den in § 118 und 117 für die Kolbenpumpe gegebenen.

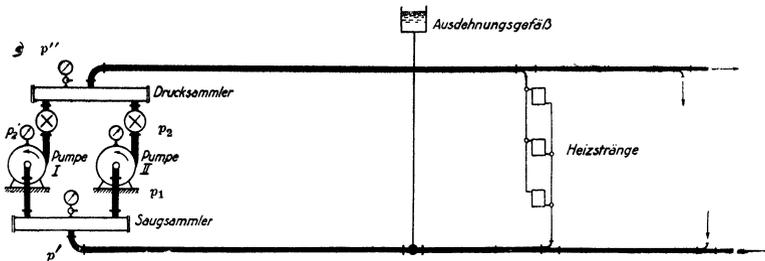


Fig. 246. Kreiselpumpe mit rein hydraulischem Widerstand (Druckwasserheizung). Schematisch, verzerrt.

Ein *Beispiel* für die erstere Art (veränderte Drehzahl gegen unveränderten hydraulischen Widerstand) geben wir in Tabelle 79 und Fig. 247. Wir sehen, daß im Arbeiten gegen unveränderten hydraulischen Widerstand, das heißt unveränderte Öffnung (siehe unten), die erforderliche Drehzahl der verlangten Fördermenge proportional ist. Die Kreiselpumpe verhält sich also hier wie eine Kolbenpumpe. Der

Widerstand, Drehzahl verändert.
Kanalbreite außen 18,5 mm.

54	55	56	57	58
1400 104,7	1300 100,7	1215 93,3	1125 88,0	1055 80,0
3,23 1,47 1,76	3,15 1,555 1,595	3,09 1,68 1,41	3,00 1,82 1,18	2,95 1,89 1,06
5,01	4,36	3,58	2,83	2,31
11,4 0,439	10,2 0,428	8,95 0,400	7,6 0,372	6,85 0,337
15,6 0,075 1050	15,8 0,077 1030	15,5 0,077 1020	16,0 0,078 1040	15,4 0,076 1020
64,8 118,4 13,3 0,86	57,8 120,3 12,05 0,845	50,9 120,6 10,6 0,845	45,05 120,3 9,4 0,81	43,4 120 9,0 0,76
1	4	7	—	10

Förderdruck ändert sich mit dem Quadrat der Fördermenge, die *Kennlinie des Widerstandes* ist also diesmal eine ganz reine Parabel, da (im Gegensatz auch noch zu Fig. 201, § 118) eine statische Förderhöhe gar nicht vorhanden ist. Die Nutzleistung N_e ändert sich hier nach mit der Drehzahl bzw. Fördermenge nach einer kubischen Parabel, der Wirkungsgrad wächst kräftig mit steigender Drehzahl.

Um zu prüfen, wie genau für die Kennlinie des Widerstandes das quadratische Gesetz gilt, berechnen wir, wie bei der Kolbenpumpe geschehen (§ 119), den *Düsenwert des Widerstandes*

$$F_0 \text{ cm}^2 = 0,198 \frac{\sqrt{V \text{ m}^3/\text{h}}}{\sqrt{p \text{ at}}}, \text{ das}$$

ist der Querschnitt einer Düse, die bei gleichem Druck die gleiche Menge durchfließen läßt wie der Widerstand. In Tabelle 79 scheint der Düsenwert der Rohrleitung mit der Menge schwach, aber merklich zuzunehmen; es steht dahin, ob diese Erscheinung etwa darin begründet ist, daß der Wassermesser einen Gang hat, oder auch in der Angabe der Manometer, die zwar geeicht worden waren, von denen aber immerhin der Unterschied in die Rechnung geht. Um das vielleicht zu entscheiden, ist in Zeile 10 und 11 noch das Verhältnis V/n und n/\sqrt{p} gebildet worden; wenn eines derselben merklich konstant war, so durfte man annehmen, daß beide in ihm vorkommenden Größen richtig gemessen und die dritte ungenau gemessen war. Es ist jedoch kaum eine Entscheidung zu treffen möglich, es scheinen also mehrere Meßungenauigkeiten im Spiel zu sein.

Man kann auch statt V/n einen Lieferungsgrad berechnen, wie in § 138 für den Ventilator gezeigt, überhaupt ganz nach Maßgabe der beim Ventilator gegebenen Auswertungsmethoden verfahren.

In Fig. 248 ist die Angabe des Druck- und des Saugmanometers je für sich aufgetragen. Es ergeben sich zwei Parabeln, im statischen Druck als Scheitel einander bei der Wasserförderung 0 berührend; die eine gibt den Druckverlust von der Pumpe zur Anschlußstelle des Einfüllgefäßes (Fig. 245 b, Fig. 246 eine Pumpe abgesperrt zu denken), die andere gibt den Druckverlust von derselben Anschlußstelle bis wieder zurück zur Pumpe; Widerstand der saugenden und drückenden

Hälfte des Rohrringes sind also getrennt. Der statische Druck aber wurde aus Fig. 248 (oder durch Ablesen der Manometer im Ruhezustand) zu 2,55 at ermittelt; danach handelt es sich also nicht nur um einen Versuchskreislauf nach Fig. 245 b, sondern um eine Druckwasserheizung nach Fig. 246, bei der aber natürlich eine Pumpe abgesperrt war. — Da in Fig. 247 die beiden Druckmessungen immer paarweise symmetrisch von den Parabeln abweichen, so erkennt man hieraus, daß nicht die Druckmessung ungenau ist, sondern die Wassermessung.

Über die *Druckmessung* ist noch folgendes zu sagen: Sind die beiden, die Drucke messenden Manometer ungleich hoch gelegen, so müssen

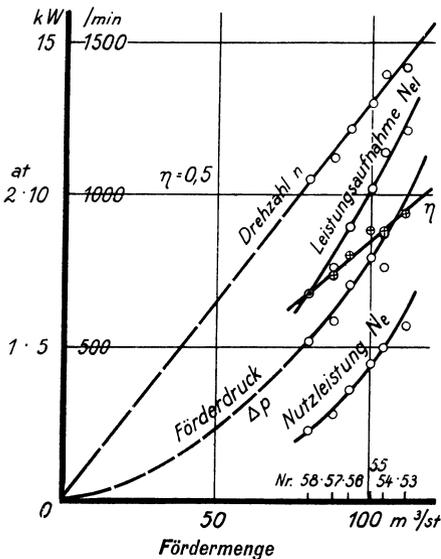


Fig. 247. Kreiselpumpe gegen rein hydraulischen Widerstand.

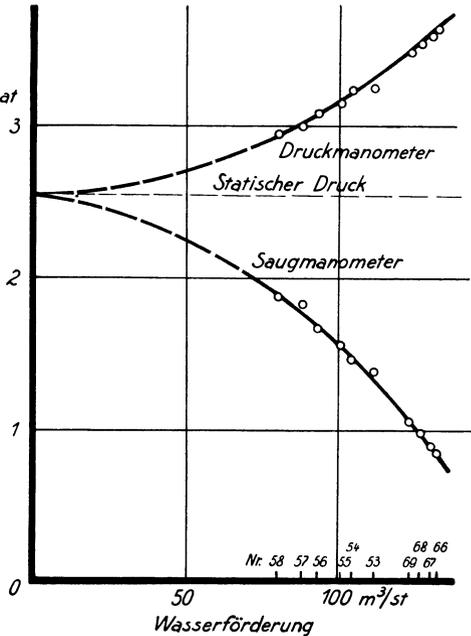


Fig. 248. Änderung der beiden Drucke mit der Wasserförderung bei einer Druckwasserheizung (Fig. 246).

die Einzeldrucke auf einen bestimmten, übrigens beliebigen Horizont bezogen werden, und aus diesen einheitlich bezogenen Druckangaben erst darf der Druckunterschied als Förderdruck genommen werden. Diese Richtigstellung ist z. B. in § 115 als besonderer Anteil der Förderhöhe angesehen und dadurch berücksichtigt worden. Im gegenwärtigen Fall war sie als eine Berichtigung (Korrektur) der Druckablesungen betrachtet worden, sie ist daher in Tabelle 79 nicht besonders gegeben, sondern in den gegebenen Zahlen (Zeile 3 und 4) ist die Korrektur bereits enthalten, genau wie es mit anderen Korrekturen zu geschehen pflegt. Es ist also z. B. bei Versuch Nr. 53 wie folgt verfahren: die Ablesungen waren $p'_1 = 3,215$ at und $p'_2 = 1,38$ at gewesen; die Manometer waren 0,7 und 0,6 m über dem Fußboden gelegen, nach einer Eichung der Instrumente selbst waren deren Berichtigungen $+ 0,05$ at

und + 0,02 at. Wir beziehen nun beide Angaben willkürlich auf 0,7 m Höhe und haben

	Manometer Nr.:	Druckstutzen 2 925 521	Saugstutzen 3 035 173
Ablesung		3,215	1,38 at
Instrumentenberichtigung		+ 0,05	+ 0,02 at
Wahrer Überdruck in Höhe des Instruments		3,265	1,40 at
Höhe des Instruments über dem Fußboden		0,7	0,6 m
Überdruck bezogen auf 0,7 m Höhe . . .		3,265	1,39 at
Förderdruck			1,875 at

Statt dessen kann man einfacher, wie folgt, verfahren. Im Stillstand der Pumpe zeigten die beiden Manometer auf 1,50 und 1,54 at; Unterschied 0,04 at. Dieser Unterschied der Anzeige im Stillstand rührt teils von den Fehlern der Instrumente, teils von der verschiedenen Höhenlage der Instrumente her. Beide Ursachen brauchen wir nicht zu trennen und haben daher bei Versuch Nr. 53:

	Druckstutzen	Saugstutzen
Ablesung	3,215	1,38 at
Scheinbarer Druckunterschied		1,835 at
Gangunterschied der angebauten Instrumente .	+ 0,04 at	
Förderdruck		1,875 at

wie oben. Die letztere einfachere Verfahrungsweise setzt aber voraus, daß die Manometerkorrektion bei allen Drucken die gleiche ist; für die verwendeten Manometer traf das leidlich zu.

127. Kreiselpumpe bei unveränderter Drehzahl. Die Wirkung wechselnden Gegendruckes bei unveränderter Drehzahl der Kreiselpumpe zeigt folgende Versuchsreihe, bei der wieder für Laboratoriumszwecke eine Anordnung nach Fig. 245a oder b, sonst z. B. eine Druckwasserheizung, eine Brauchwasseranlage mit Umlaufpumpe oder manche andere dienen kann, bei der die Druckhöhe durch Drosseln verändert werden kann. Die Drehzahl bleibt in den Grenzen unverändert, in denen ein Drehstrommotor bei wechselnder Belastung die Drehzahl festhält; das ist bekanntlich ziemlich vollkommen der Fall.

Man überzeugt sich zunächst durch einen *Demonstrationsversuch* in einfacher Weise davon, daß das Verhalten der Kreiselpumpe in folgenden Punkten grundsätzlich verschieden ist von dem der Kolbenpumpe. Wenn wir das Drosselorgan allmählich schließen, so beobachten wir am Amperemeter ein Abfallen der Stromstärke. Vergrößerung des Widerstandes verringert also, bei unveränderter Drehzahl, die Energieaufnahme der Pumpe. Das wäre anders bei einer Kolbenpumpe, bei der in dem Maß, wie wir den Austrittsquerschnitt verengen, durch Drosselung eine Steigerung des Druckes eintritt und daher eine Mehraufnahme an Leistung. Besonders auffällig wird der Unterschied, wenn wir das Drosselorgan ganz schließen: die Kreiselpumpe läuft unter stark verminderter Leistungsaufnahme dauernd um, das wäre bei der Kolbenpumpe gar nicht möglich.

Der Grund dieses verschiedenen Verhaltens ist folgender: Die Kolbenpumpe ist *gezwungen*, bei jedem Hub eine ihrem Hubvolumen

Tabelle 80. Kreiselpumpe mit konstanter Drehzahl gegen ver-

Versuch Nr.		70	71
1	Drehzahl n /min	1430	1440
2	Wasserförderung V m ³ /h	111,2	97,2
3	Druck im Druckstutzen p_2 } bezogen auf 0,07 m Höhe { at ÜD	3,05	3,47
4	„ „ Saugstutzen p_1 } „ „	1,21	1,52
5	Förderdruck $p = p_2 - p_1$ at	1,84	1,95
6	Nutzleistung $N_c = \frac{V \cdot (p_2 - p_1)}{36,7}$ kW	5,58	5,17
7	Elektrische Leistungsaufnahme N_{ei} kW	11,40	11,18
8	Wirkungsgrad des Satzes $\eta = \frac{N_c}{N_{ei}}$ —	0,490	0,462
9	Stromstärke J A	66,7	64,2
10	Spannung E V	117,8	116,2
11	Scheinbare Leistung $E \cdot J \cdot \sqrt{3} = 1,73 \cdot E \cdot J$ kVA	13,6	12,9
12	Leistungsfaktor $\cos \varphi = \frac{N_{ei}}{1,73 \cdot E \cdot J}$ —	0,838	0,865
13	Druck im Druckverteiler p'' Ablesung at ÜD	3,07	2,98
14	„ „ Saugsammler p' „ „	1,77	1,975
15	Unterschied $p'' - p'$ at	1,30	1,005
16	berichtigt $p'' - p' + 0,02 = \text{Umtriebsdruck } \Delta p'$ „	1,32	1,025
17	Düsenwert der Gesamtleitung $F_0 = 0,198 \cdot \frac{V}{\sqrt{p_2 - p_1}}$ cm ²	16,3	13,8
18	Düsenwert des äußeren Stromkreises $F_1 = 0,198 \cdot \frac{V}{\sqrt{\Delta p'}}$ cm ²	19,2	19,0
19	Schieber geöffnet Umdr.	17 ³ / ₄	G

entsprechende Wassermenge anzusaugen und eine ebenso große Menge in die Druckleitung zu entlassen. Dieselbe Wassermenge muß das Drosselorgan passieren, es sei offen oder gedrosselt. Je weiter man es schließt, ein desto größerer Energieaufwand ist zum Hindurchdrücken der Wassermenge erforderlich. Völliges Schließen des Ventils kann bei der Kolbenpumpe zum Bruch führen: steigt der Druck zu hoch, so bricht ein Gestängeteil, im günstigsten Fall bleibt die Pumpe stehen und es brennt, bei elektrischem Antrieb, die Sicherung durch. Im Gegensatz dazu ist die Kreiselpumpe nicht gezwungen, eine bestimmte Wassermenge zu fördern, sondern sie regelt, wie die folgende Versuchsreihe genauer erkennen läßt, die Wasserförderung nach dem Widerstand ein. Wird insbesondere der Auslaß ganz geschlossen, so hört die Wasserförderung einfach auf, und es wird nur noch das in der Pumpe eingeschlossene Wasser im Gehäuse herum genommen. Dazu ist dann ein geringerer Leistungsaufwand nötig als zum Fördern.

Zur genaueren Durchführung des Versuches bringt man das Drosselorgan in verschiedene beliebige Stellungen und beobachtet in jedem Fall einestils die geförderte Wassermenge, andererseits den Druck, der sich in der Leitung vor dem Drosselorgan einstellt. Ferner wird gemessen die Leistungsaufnahme, bei Gleichstromantrieb aus Spannung

schiedenen Widerstand.

72	73	74	75	76
1445	1455	1470	1475	1480
88,6	66,6	45,4	33,5	0
3,69	4,10	4,55	4,69	4,74
1,69	1,93	2,23	2,32	2,42
2,00	2,17	2,32	2,37	2,32
4,82	3,94	2,87	2,16	0
10,72	9,12	7,39	5,97	4,00
0,450	0,432	0,388	0,362	0
60,5	52,8	45,0	41,7	33,5
116,4	119,2	118,7	119,6	121,3
12,2	10,9	9,25	8,65	7,05
0,887	0,837	0,801	0,690	0,568
2,91	2,775	2,63	2,59	2,53
2,08	2,245	2,41	2,475	2,55
0,83	0,53	0,22	0,115	-0,02
0,85	0,55	0,24	0,135	0
12,4	8,9	5,9	4,3	0
19,0	17,8	18,4	17,9	—
4 ³ / ₄	3 ³ / ₄	2 ³ / ₄	2 ¹ / ₄	0

und Stromstärke, sowie die Drehzahl der Maschine zur Prüfung ihrer Konstanz. Die Ergebnisse solchen Versuches finden sich in Fig. 249 und Tabelle 80 verzeichnet.

Die Kurve der Δp ist hierin die sog. *Charakteristik* oder *Kennlinie der Pumpe* für die betreffende Drehzahl, genauer gesagt die *Kennlinie des Elektro-Pumpensatzes*, dessen Drehzahl gemäß den Eigenschaften des Drehstrommotors (ebenso bei einem Nebenschluß-Gleichstrommotor) mit steigender Leistung schwach abfällt. Die Kennlinien sind also die Beziehung zwischen Druck und Wasserförderung. Bei steigender Fördermenge steigt der Druck zunächst mäßig an, und erst bei Überschreiten einer gewissen, im vorliegenden Fall etwa zu 22 m³/s anzunehmenden Fördermenge be-

ginnt er energisch abzufallen. Bei etwa 200 m³/h Förderung würde $\Delta p = 0$ werden — die Pumpe allein betrachtet. Doch läßt die Rohranordnung so große Fördermengen bei kleinen Drucken nicht zu. Die Leistungsaufnahme der Pumpe steigt mit der Vermehrung der Wassermenge dauernd, obwohl der Druck gegen das Ende hin abfällt. Der Wirkungsgrad der Pumpe erreicht daher unter mittleren Verhältnissen ein Maximum, er muß Null werden, sowohl wenn die Wassermenge, als auch wenn der Druck auf dem Wert Null angekommen ist. In Fig. 249 erreicht jedoch die Wirkungsgradkurve ihren Bestwert noch nicht. — Die letzten drei Zeilen der Tabelle 80 ergeben eine *Kennlinie für die Wirkung des Schieberabschlusses* (vgl. Fig. 208 bei § 119).

128. Allgemeines Verhalten der Kreiselpumpe. In Fig. 244 und 247 wurden Kennlinien von Rohrleitungen bzw. -netzen, in Fig. 249 wurde die Kennlinie eines Kreiselpumpensatzes gegeben. In ersteren steigt der Druck mit der Förderung an, in letzterem fällt er, bei unveränderter Drehzahl bzw. unveränderter Stellung des Kontakthebels, ab. Der Schnitt beider Kurven, wenn man dieselben in gleichem Maßstab in ein Koordinatennetz einträgt, gibt denjenigen Zustand, bei dem sich Pumpensatz und Leitung gegeneinander *abgleichen* und der sich als Beharrungszustand einstellt, wenn beide miteinander mit der gerade

in Rede stehenden Kontaktstellung (Drehzahl) und dem gerade in Rede stehenden Düsenwert der Leitung arbeiten.

Indem man von den beiden Kennlinienarten planmäßig mehrere aufnimmt, ergibt sich für jede Kreiselpumpe ein Bild, wie es in § 140, Fig. 260, für ein Kreisegelbläse entwickelt wird. Voraussetzung für die praktische Aufnahme ist jedoch, daß der Motor die großen Leistungen ohne Schaden hergeben kann, die beim Arbeiten mit hoher Drehzahl gegen große Öffnungen nötig sind; auch müssen die Rohrweiten genügend große Düsenweite ergeben.

Aus der grundsätzlichen Übereinstimmung zwischen Zeile 9 bis 11

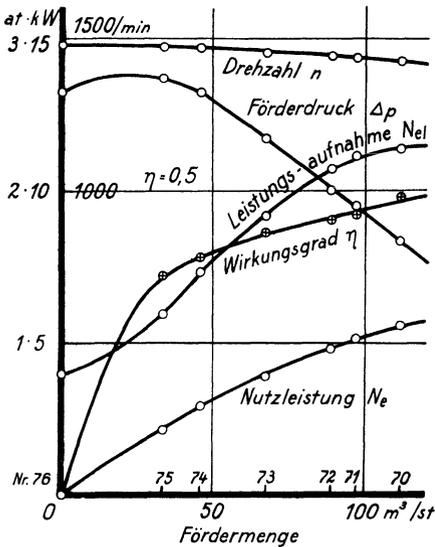


Fig. 249. Kreiselpumpe bei unveränderter Drehzahl gegen wechselnden Widerstand.

der Tabelle 79 oder Zeile 17 der Tabelle 80 mit den entsprechenden Zeilen der Tabellen 83 und 87 ergibt sich, daß man auch das Verhalten der Kreiselpumpe, wie auch des Ventilators, durch Kennzahlen nach Maßgabe von § 141 und Fig. 267 darstellen kann.

129. Parallelarbeiten von Kreiselpumpen. Wenn man zwei Kreiselpumpen nach Maßgabe von Fig. 245 parallel geschaltet auf denselben hydraulischen Widerstand laufen läßt, so beeinflussen sich dieselben bei Änderung der einen Drehzahl sehr stark infolge der Veränderungen, die der Gegendruck abhängig von der Wassermenge erleidet. Am deutlichsten treten die Verhältnisse zutage, wenn die beiden Pumpen etwa gleiche Größe haben. In der Versuchsreihe Tabelle 81 waren zwei Pumpen von

gleicher Größe und — innerhalb der Grenzen, wie die Herstellung es ergibt — gleicher Kennlinie auf das unveränderte Rohrnetz geschaltet; an Pumpe I wurde nichts geändert, während bei Pumpe II die Drehzahl vermindert wurde. Die Wasserförderung der Pumpe II (derselben, die schon in § 126 bis 128 untersucht war) wurde mit einem Woltmann-Wassermesser bestimmt. Die gesamte Wasserförderung läßt sich aus dem Förderdruck $p'' - p'$ berechnen, unter der Annahme, daß das äußere Rohrnetz zwischen dem Druck- und Saugsammler, Fig. 246, in seinem Düsenwert gegen den Zustand in Tabelle 80 nicht geändert worden ist; es dürfen also bei der Druckwasserheizung keine Heizkörper oder gar ganze Stränge oder Gebäude abgestellt worden sein. Wir glauben annehmen zu dürfen, daß die ersten drei vorzüglich übereinstimmenden Werte für den Düsenwert auf Zeile 18 der Tabelle 80 richtig sind, während die anderen darunter leiden, daß bei kleinen Druckunterschieden deren Messung ungenau wird: Wir setzen also den Düsenwert des äußeren Stromkreises mit $F_1 = 19,0 \text{ cm}^2$

Tabelle 81. Parallelarbeiten von Kreiselpumpen.

Versuch Nr.		66	67	68	69
1	Drehzahl: Pumpe I n_1 /min	1440	1430	1425	1420
2	Pumpe II n_2 „	1415	1365	1305	1260
3	Druck im Druckverteiler p'' Ablesung . at ÜD	3,405	3,38	3,33	3,29
4	„ „ Saugsammler p' „ „ „	1,48	1,51	1,57	1,615
5	Unterschied $p'' - p'$ at	1,925	1,87	1,76	1,675
6	berichtigt $p'' - p' + 0,02 =$ Umtriebdruk $\Delta p'$ „	1,945	1,89	1,78	1,695
Förderung:					
7	Pumpe I + II: $V_1 + V_2 = 96 \cdot \sqrt{\Delta p'}$. m ³ /h	134	132	128	125
8	„ II: gemessen V_2 „	58,7	41,3	30,0	17,2
9	„ I als Rest „	75	91	98	108
10	Gesamtnutzleistung $N_e = \frac{1}{36,7} \cdot (V_1 + V_2) \cdot \Delta p'$ kW	7,1	6,8	6,2	5,75
11	Gesamtstromaufnahme N_{e1} „	17,7	17,1	16,6	16,0
12	Gesamtwirkungsgrad $\eta = N_e/N_{e1}$ —	0,40	0,40	0,375	0,36
13	Stromstärke: Pumpe I A	55	59	61,5	65
14	Pumpe II „	47	42	38	33
15	Spannung V	118	118	119	117

ein. Unter dieser Annahme berechnet sich die gesamte Wasserförderung aus der Formel

$$V_1 + V_2 = \frac{19,0}{0,198} \cdot \sqrt{\Delta p'} = 96 \cdot \sqrt{\Delta p'} \text{ m}^3/\text{h}.$$

Die Förderung der Pumpe I ergibt sich dann als Unterschied der gesamten gegen die Förderung der Pumpe II.

Es zeigt sich, daß die *Wasserförderung der geregelten Pumpe* schnell abnimmt, so daß die Pumpe etwa bei der Drehzahl 1170/min überhaupt nicht mehr fördern würde. Die Förderung jedoch geht fast vollständig auf die nicht geregelte Pumpe über, so daß sich die *gesamte Förderung fast unverändert* hält. In Verbindung damit bleibt auch der Förderdruck beim Abschalten einer Pumpe fast unverändert.

Die geregelte Pumpe arbeitet also unter ähnlichen Bedingungen, wie wenn sie gegen einen statischen Förderdruck zu fördern hätte.

Die Leistungsaufnahme ist nur für beide Pumpen zusammen gemessen worden; sie erlitt so wie Druck und Förderung nur kleine Veränderungen. Der Wirkungsgrad (der nur auf den Druckunterschied in den Sammlern, Fig. 246, bezogen werden kann) wird am günstigsten, wenn beide Pumpen fördern. Die Stromstärken — aus denen sich bei Drehstrom die Leistung nicht berechnen läßt — ändern sich im Sinne wie die Wassermenge.

Wollte man bei Pumpe II die Drehzahl unter 1170/min verringern, so würde Wasser im umgekehrten Sinn durch sie hindurchgedrückt, ihre Förderung also negativ werden — wenn nicht eine Rückschlagklappe das verhindert. Wie beim Arbeiten gegen eine statische Förderhöhe ist eine feinstufige, besser eine kontinuierliche Regelung der Drehzahl nötig, wenn eine Kreiselpumpe mit einer anderen parallel arbeiten soll.

Im Gegensatz zu vorstehenden Ergebnissen würden bei *rein statischer Förderhöhe* die beiden Pumpen einander gar nicht beeinflussen; das Maß der Beeinflussung und wie weit die Gesamtförderung etwa konstant bleibt, hängt also von der Kennlinie des Widerstandes und übrigens von der Kennlinie der beiden Pumpen ab. Aus beiden läßt sich die einmal beobachtete Beeinflussung jederzeit belegen.

130. Auspumpversuch mit einer Heberkreiselpumpe für kleine Förderhöhe. Geodätische und manometrische Förderhöhe. Bei Meliorationsentwässerungen und auch bei Kanalisationen kommen Pumpen für kleine Förderhöhen, aber sehr große Wassermengen und daher erhebliche Leistungen vor. Die Verhältnisse werden nicht grundsätzlich andere, aber die Größenordnung wird erheblich anders als bisher.

In der Anlage Fig. 250 entwässert die auf dem Deich stehende Pumpe das links liegende Gelände in den rechts liegenden Vorfluter. Die Pumpe ist also in eine heberartige Leitung eingefügt, daher zeigen beide Manometer p_1 und p_2 Unterdruck an.

Für die Berechnung der Leistung kommt entweder der manometrische Förderdruck $p_2 - p_1 = p$ in Betracht, der ein Maß für die

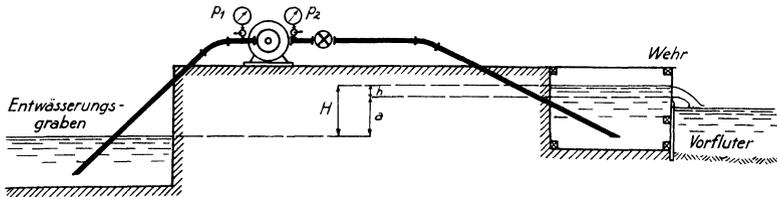


Fig. 250. Entwässerungspumpe in Heberanordnung.

Leistung der Pumpe allein ist. Oder ist es die Förderhöhe H in Rechnung zu setzen, wodurch dann in den Wirkungsgrad die Verluste der Leitung mit eingehen. Es entspricht oft den praktischen Anforderungen bei Abnahmeversuchen, wenn man das Oberwasser durch Einbauen eines Überfalls vor der Druckleitung anstaut, dadurch also die Förderhöhe vergrößert; denn bei Entwässerungsanlagen pflegt sich erst nach längerer — jahrelanger — Wirksamkeit die volle Förderhöhe einzustellen, indem sich das entwässerte Gelände setzt; es ist wichtig, daß die Pumpe dann in späteren Jahren nicht versagt. Der Überfall dient dann zugleich zur Messung der Wassermenge (Techn. Mess. § 58) und ist deshalb in passender Breite auszuschneiden, um eine bequeme ablesbare Standhöhe h des Wassers über der Wehrkante zu erhalten.

Die Ablesungen und die Berechnungen Tabelle 82 und Fig 252 und 253 bedürfen keiner Erläuterung. Nur über die Wassermessung bleibt zu erwähnen: Gemessen wurde die Tiefe a des Unterwassers unter der Wehrkante und die Höhe h des Oberwassers über derselben. Dazu war mit der Schlauchwaage über den Deich herübergewogen worden, und es waren hüben und drüben Marken gleicher Höhe als Nullpunkt der Messung gemacht worden. Beide Messungen ergeben die

Förderhöhe $H = a + h$. Aus h berechnet sich außerdem die Wassermenge nach der Formel

$$V = \frac{2}{3} kb \sqrt{2g h^3} = 2,95 kb \sqrt{h^3} \text{ m}^3/\text{s},$$

hierin für das Wehr mit Seitenkontraktion nach Fresc (Techn. Mess. § 58)

$$k = 0,576 + \frac{0,017}{h + 0,18} - \frac{0,075}{b + 1,2},$$

alles bezogen auf Meter und Sekunde. Das Wehr war bei den folgenden Versuchen 679 mm breit ausgeschnitten. Hiermit berechnet man die Beziehung zwischen Wassermenge und Schauhöhe und zeichnet sie als Kurve auf Millimeterpapier, Fig. 251, um dann die erforderlichen Werte abzugreifen.

Ist die aus dem Gelände zulaufende Wassermenge der abgepumpten gleich, so erfolgt der Versuch im Dauerzustand. Nur zur Zeit größten Wasserzuflusses wird das erreichbar sein, und selbst dann nur bei knapp bemessener Pumpe. Die Regel ist daher ein Auspumpversuch, bei dem der Unterwasserspiegel allmählich absinkt und die Fördermenge entsprechend abnimmt. Diese Art des Versuches ist unbedenklich, wenn das Absenken nicht zu schnell stattfindet. Da

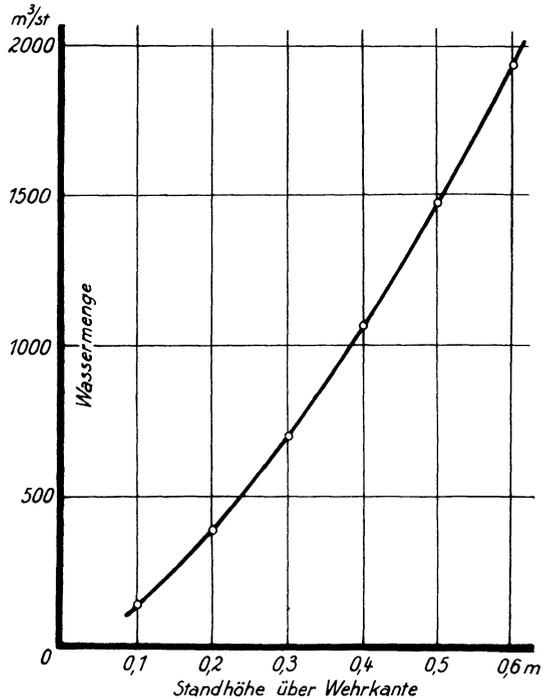


Fig. 251. Wasserlieferung eines Wehres mit Seitenkontraktion, Breite 679 mm.

bei elektrischem Antrieb thermische Nachwirkungen und bei der Kreiselpumpe volumetrische nicht in Frage kommen, so darf das Auspumpen ruhig so schnell erfolgen, daß man gerade noch sicher und oft genug ablesen kann. Bei Dampftrieb wäre die Geschwindigkeit entsprechend zu vermindern. Allgemein ist die Versuchsdauer durch die nachfließende Wassermenge begrenzt, die insgesamt durch die anschraffierte Fläche unter der Kurve der Wassermenge, Fig. 252, gegeben ist.—Der Versuch ist zu Ende, entweder wenn die Pumpe durch das Saugrohr Luft nimmt — Trichterbildung tritt ein, wenn das Wasser den Einlauf noch einige Zentimeter bedeckt — oder wenn die Förderhöhe so weit gestiegen ist, daß die Wassersäule hängt und die Förderung aufhört.

Tabelle 82. Abspumpversuch mit einer Kreiselpumpe
Antrieb: Drehstrommotor, $\eta_m = 0,86$ (geschätzt). Weite des Saug-

Ablesung Nr.		2
Zeit		10·29
1	Drehzahl n /min	748
2	Oberwasser über Wehrkante h mm	358
3	Wassermenge $V = 3600 \cdot 2,95 k \cdot b \cdot \sqrt{h^3}$ m ³ /h	900
4	Unterwasser unter Wehrkante a mm	632
5	Förderhöhe $H = a + h$ m	0,990
6	Nutzleistung d. Pumpanlage (einschl. Rohrleitung) $N'_e = \frac{1000 \cdot V \cdot H}{3600 \cdot 10^2}$ kW	2,43
7	Saugmanometer p_1 mWS	-1,9
8	Druckmanometer p_2 „	-0,3
9	Förderdruck $p = p_2 - p_1$ „	1,6
10	Nutzleistung der Pumpe $N_e = \frac{1000 \cdot V \cdot p}{3600 \cdot 10^2}$ kW	3,95
11	Leistungsaufnahme des Motors N'_1 kW	11,2
12	Wirkungsgrad der elektr. getriebenen Pumpanlage $\eta' = N'_e/N'_1$ —	0,22
13	Leistungsaufnahme der Pumpe $N_1 = 0,86 \cdot N'_1$ kW	9,6
14	Wirkungsgrad der Pumpe $\eta = N_e/N_1$ —	0,41
15	Wassergeschwindigkeit im Rohr $w = \frac{V}{3600 \cdot 0,1256}$ m/s	1,99
16	Geschwindigkeitshöhe dazu $\frac{w^2}{2g}$ mWS	0,202
17	Höhenunterschied $p - H =$ Druckverlust in der Rohrleitung „	0,61
18	Widerstandszahl $\zeta = \frac{p - H}{w^2/2g}$ —	3,0

Mittlerer Druckverlust

Die Ergebnisse eines Abspumpversuches kann man zunächst als Funktion der Zeit darstellen, schon um die insgesamt geförderte Wassermenge zu erhalten, Fig. 252. Dann aber bildet man die Kennlinie der Pumpe, indem man Förderhöhe und Leistung über der Wassermenge aufträgt, Fig. 253.

Auffallend ist der große Unterschied zwischen dem manometrischen Förderdruck p und der geodätischen Förderhöhe H . Der Unterschied beider stellt den *Verlust in der Rohrleitung* dar. Um zu zeigen, daß diese Erklärung befriedigt, ermitteln wir zunächst die Geschwindigkeit des Wassers in dem 400 mm weiten Rohr, haben daraus die Geschwindigkeitshöhe $w^2/2g$ und berechnen die Weisbachsche Widerstandszahl $\zeta = \frac{p - H}{w^2/2g}$. Diese ergibt sich in Tabelle 82 im Mittel zu $\zeta = 5$. Die mit $\zeta = 5$ berechnete Kurve der Druckhöhenverluste im Rohr (Fig. 253) gibt gut den Unterschied zwischen der manometrischen und der geodätischen Förderhöhe — der hohe Wert von ζ ist auffallend. Bei 14,5 m Länge ergibt sich rechnermäßig der Reibungsverlust nach Weisbach bei Ablesung Nr. 9 nicht größer als 0,092 m WS,

für kleine Förderhöhe.
und Druckrohres 400 mm.

4	7	9	10	12
11·2	11·42	12·2	12·12	12·21
760	758	761	752	762
345	312	295	272	180
860	740	680	610	340
752	922	1067	1192	1247
1,097	1,234	1,362	1,464	1,427
2,57	2,49	2,52	2,44	1,32
-2,25	-2,4	-2,5	-2,55	-2,55
-0,3	-0,55	-0,55	-0,65	-0,85
1,95	1,85	1,95	1,9	1,7
4,55	3,75	3,6	3,15	1,57
10,9	10,1	9,7	8,65	7,05
0,235	0,245	0,26	0,28	0,185
9,35	8,7	8,35	7,45	6,05
0,485	0,43	0,43	0,425	0,26
1,90	1,64	1,50	1,35	0,75
0,184	0,137	0,115	0,093	0,029
0,86	0,72	0,59	0,44	0,27
4,7	5,2	5,1	4,7	9,3

rd. 5 Geschwindigkeitshöhen.

Gewährleistung auch auf die geodätische Förderhöhe beziehen, die für den Abnehmer allein Interesse hat. Nur dann ist der Lieferer in billiger Weise an der Rohrleitung interessiert und mag sie genügend weit halten, schlanke Krümmer verwenden und erweiterten Ein- und Auslauf anwenden.

Es folgt daraus, daß man für eine Pumpe von kleiner geodätischer Förderhöhe die hydraulischen Widerstände selbst bei so einfacher Rohrführung wie in Fig. 250 nicht vernachlässigen darf.

Der Einfluß der Belastungsart einer Pumpe — geodätisch oder hydraulisch — auf das betriebstechnische Verhalten wird nach den für Kolben- wie Kreiselpumpen gegebenen Beispielen klar sein. Auf einen wichtigen Unterschied aber sei zum Schluß noch aufmerksam gemacht. Es handelt sich um *wirtschaftlichste Förderung einer insgesamt festliegenden Wassermenge*. Um den Tagesbedarf einer Stadt an Brauchwasser oder die Tageslieferung derselben an Abwasser zu fördern, hat man in vielen Fällen die Wahl zwischen einer langen Betriebsdauer mit einer Pumpe und einer Abkürzung der Betriebsdauer durch Verwendung einer größeren oder durch Zuschalten einer zweiten Pumpe.

demnach machen die einmaligen Verluste — Eintritt und Krümmer —

0,59 — 0,092 = 0,5 m WS aus, das heißt das Mehrfache der Verluste im glatten Rohr.

Nur dem Einfluß der Rohrleitung ist es zuzuschreiben, daß bei der Wasserförderung 500 m³/h der Druck abzufallen beginnt; die Pumpe selbst ist noch nicht in das Stadium abfallenden Druckes gelangt.

Die Pumpenlieferer pflegen ihre Gewährleistungen auf manometrische Förderhöhe zu beziehen, die auch für die Pumpe allein maßgebend ist. Aber bei Anordnungen, wie wir sie eben besprechen, ist meist die Rohrleitung ein integrierender Bestandteil der Anlage, wird dann wohl auch vom Pumpenlieferer mit geliefert. Bei dem großen Einfluß der Rohrleitung sollte man in solchen Fällen die

Wo ein hydraulischer Gegendruck zu überwinden ist, da wächst derselbe, und zwar quadratisch, mit der stündlich geförderten Menge. Jede Abkürzung der Betriebsdauer vergrößert also die insgesamt zu leistende Arbeit und ist in der Regel unwirtschaftlich; rein technisch ist der 24stündige Betrieb dann der wirtschaftlichste. Ein geodätischer Widerstand dagegen ist unabhängig von der Geschwindigkeit der Förderung; grundsätzlich ist es daher gleichgültig, welche Betriebsart man wählt, praktisch werden Personalkosten und allgemeine Betriebsverluste oft dann am kleinsten werden, wenn man den Betrieb kurz und

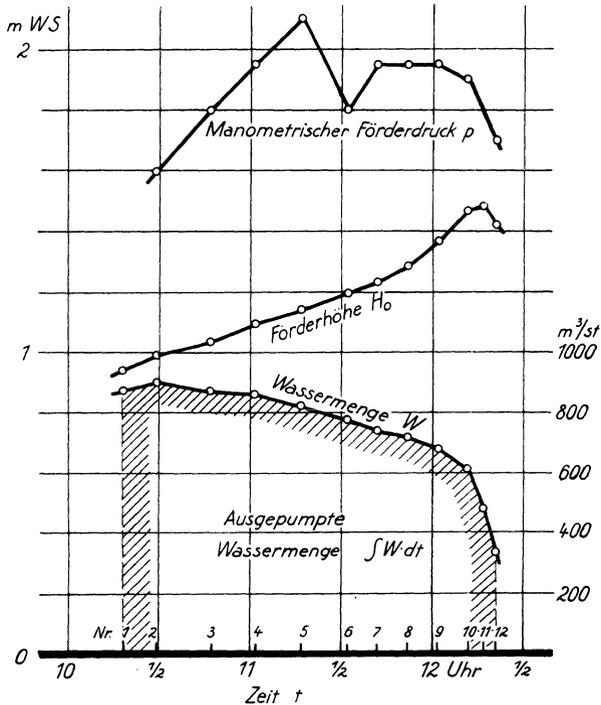


Fig. 252. Entwässerung eines bestimmten Geländes mit der Pumpe Fig. 250.

intensiv gestaltet. — Bei gemischten Widerständen werden sorgfältige versuchsmäßige und rechnerische Ermittlungen sich wohl verlohnen, wenn es sich um eine größere Anlage handelt.

Ganz ähnlich als Druckhöhenvermehrung durch intensive Betriebsweise wirkt übrigens bei Entwässerungsanlagen nach Fig. 251 die *Verzögerung im Wasserzu- und ablauf*. Hebt man aus einem großen See über in einen anderen, so darf man die Spiegelhöhen beiderseits als unbeeinflussbar ansehen. Wo aber Zu- und Ablauf des Wassers durch Gräben erfolgt, da wird durch intensiven Betrieb (Kürzung der Betriebszeit) die insgesamt zu leistende Arbeit wesentlich erhöht. Gewissermaßen bilden nun die Widerstände der beiderseitigen Gräben zusätz-

liche hydraulische Widerstände. Ähnlich beim Absinken des Grundwasserstandes durch starke Pumpen.

Diese Betrachtung kann sinngemäß auf zahlreiche Maschinengattungen übertragen werden. Vgl. § 73.

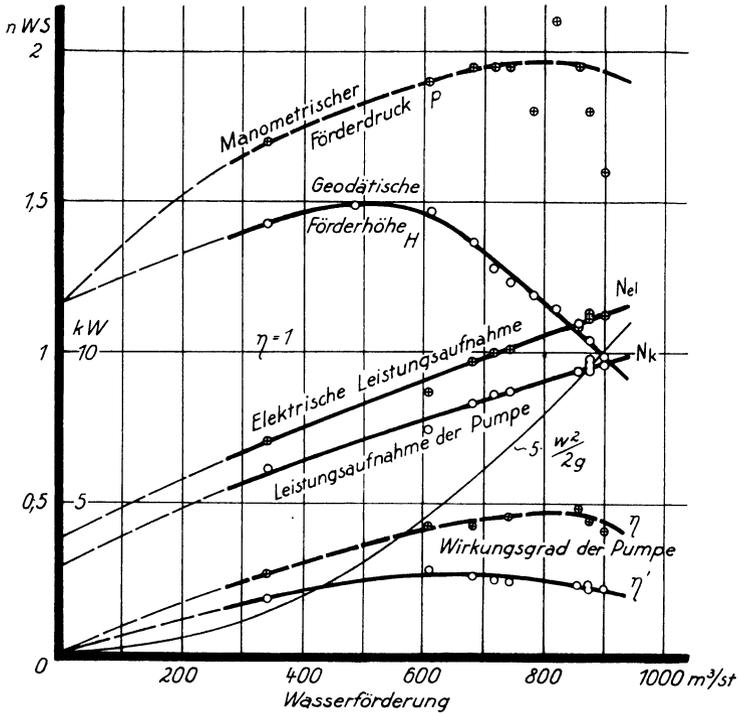


Fig. 253. Eigenschaften der Kreiselpumpe für kleine Förderhöhe, ermittelt aus Fig. 252.

131. Betriebszustand der Kreiselpumpe. Großen Einfluß auf die Versuchsergebnisse an einer Kreiselpumpe hat die *Einstellung des Ringspaltes*, der rund um das Schaufelrad die Saug- und Druckspannung voneinander scheidet. Ist der Spalt zu weit, so ist übermäßige *Lässigkeit* der Pumpe die Folge, das Rad fördert gegen eine scheinbar größere Düsenweite als wirklich; ist man noch nicht im abfallenden Ast der Pumpenkennlinie, so bleibt der Förderdruck und damit die äußere Wasserförderung erhalten, aber die Leistungsaufnahme steigt; ist man im abfallenden Ast der Kennlinie, so fällt der Druck und damit die Förderung der Pumpe infolge der Lässigkeit, die Förderung des Pumpenrades wird gleichwohl größer und daher die Leistungsaufnahme. In jedem Fall sinkt der Wirkungsgrad. Ist andererseits der Spalt zu eng eingestellt, so daß das Laufrad schleift, so ist durch den Reibungsverlust eine Verschlechterung des Wirkungsgrades gegeben. Vgl. § 143.

Versuchsmäßig kann man den Einfluß zu großer Lässigkeit durch eine Umlaufleitung nachahmen.

132. Andere Flüssigkeiten als kaltes Wasser, die von einer Pumpe zu fördern sind, können sich durch ihr *spezifisches Gewicht* und durch ihre *Zähigkeit* von ihm unterscheiden. Ersteres ist stets etwas, letztere meist beträchtlich von der Temperatur abhängig.

Sofern man die der Förderung entgegenstehende Druckstufe manometrisch unmittelbar an der Pumpe mißt, braucht bei der Leistungsbestimmung weder das spezifische Gewicht noch die Zähigkeit beachtet zu werden; beide werden automatisch bei der Messung berücksichtigt, wenn man nur die Flüssigkeitsmenge als *Volumen* einführt. Die Meßergebnisse werden allerdings durch die Anwesenheit eines anderen Mittels wesentlich verändert, und zwar wird ein geodätischer Widerstand durch das spezifische Gewicht, ein hydraulischer Widerstand durch die Zähigkeit vergrößert; erstere Zunahme geht genau, letztere annähernd proportional.

Für Kreiselpumpen ist außerdem noch der Einfluß auf den Lässigkeitsverlust zu beachten, der, bei gegebener Förderhöhe, um so größer ist, je leichter die Flüssigkeit ist; große Zähigkeit ist für den Lässigkeitsverlust der Kreiselpumpe günstig, ergibt jedoch größere Reibungsverluste des Schaufelrades, so daß ihr Einfluß auf die Fördermenge jedenfalls günstig, auf den Wirkungsgrad aber zweifelhaft ist.

c) Ventilator.

133. Leistung, Aufwand. Die *Nutzleistung beim Komprimieren* besteht darin, daß Luft — oder allgemeiner gesagt: ein Gas — bei niederem Druck p_1 angesaugt und gegen höheren Druck p_2 gefördert wird. Dazu ist zunächst das Verdichten und weiterhin das Herausschieben des verdichteten Gases nötig. Dem Verdichtungs Vorgang entspricht eine annähernd dreieckige, dem Herausschieben eine rechteckige Arbeitsfläche, Fig. 254 obere Hälfte.

Beim Saugen ist der Vorgang der gleiche, doch liegen die Drucke unterhalb der Atmosphärenlinie, so daß das Ansaugen beim Druck p_0 und das Herausdrücken gegen den Atmosphärendruck p_1 erfolgt, Fig. 254 untere Hälfte.

Der Arbeitsaufwand für die Kompression hängt davon ab, ob die *Kompressionslinie* eine Isotherme $p \cdot V = \text{konst.}$, oder eine Adiabate ist, $pV^\kappa = \text{konst.}$ Bei adiabatischer Kompression steigt die Temperatur erheblich, z. B. von 20°C auf 128° , wenn das Kompressionsverhältnis $\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_1}{p_0} = 3$ ist, wie in den beiden Diagrammen der Fig. 254. Die Temperaturerhöhung wird bestritten aus einem Mehraufwand an Arbeit bei der adiabatischen Kompression, den die größere Diagrammfläche erkennen läßt; der Mehraufwand ist schraffiert. Da praktisch die erhaltenen Temperaturen der Adiabate nahekommen, so fragt es sich, ob die größere, von der Adiabate bzw. der wirklichen Expansionslinie abgeteilte Fläche die Nutzleistung sein soll, oder ob nur die links der Isotherme liegende Fläche als nützlich geleistet anzusehen ist.

Nun ist die *Erwärmung des Gases* praktisch nicht ausnutzbar. Selbst wo man die Luft späterhin im erwärmten Zustand brauchen sollte, wird meist die Wärme bis dahin bei der Fortleitung verschwunden sein, oder mindestens könnte man die Erwärmung auf andere Weise wirtschaftlicher erzeugen als aus Arbeit, die gegenüber der Wärme die wertvollere Energieform ist. — Als Nutzleistung ist daher stets nur diejenige Fläche anzusehen, die von der Isotherme umschlossen wird, die also in Fig. 254 links von den schraffierten Flächen bleibt.

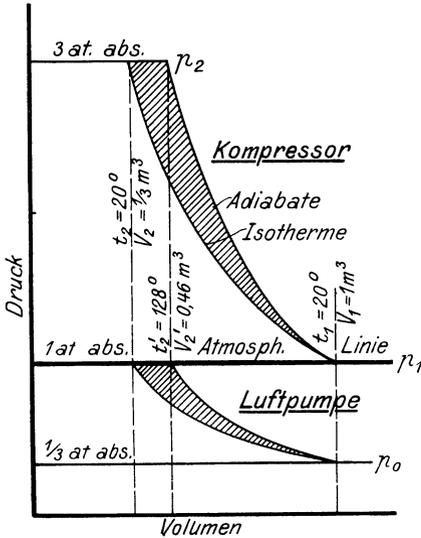


Fig. 254. Arbeitssatz beim Drücken und beim Saugen, vergleichsweise.

Nach bekannten Gesetzen der Thermodynamik ist also die Nutzarbeit bei der Kompression eines Anfangsvolumens V_1 von einem Anfangsdruck p_1 auf einen Enddruck p_2 gegeben durch den Ausdruck

$$N_e = V_1 p_1 \cdot \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (1)$$

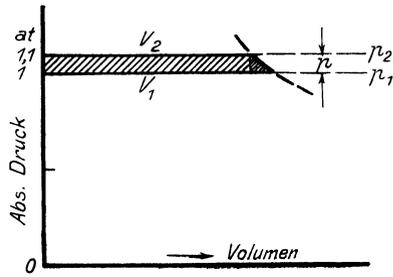


Fig. 255. Nutzleistung des Ventilators.

Man erhält die Arbeit in mkg/s, wenn man alle Größen der rechten Seite in den Einheiten des technischen Maßsystems, den Druck insbesondere in kg/m² oder in mmWS mißt (1 kg/m² = 1 mmWS).

Ventilatoren sind gegenüber den bisher genannten Maschinen dadurch gekennzeichnet, daß die von ihnen zu überwindende Druckstufe $p_2 - p_1 = p$ klein ist im Verhältnis zum absoluten Druck, Fig. 255. Die schraffierte Fläche läßt sich annähernd ersetzen durch ein Rechteck

$$N_e = V_m \cdot p \quad (2)$$

Hierin ist V_m ein mittleres Volumen, aber nicht etwa das Mittel aus dem wahren Eintritts- und Austrittsvolumen — welches letzteres von erwärmter Luft eingenommen wird, also nicht isothermischer Kompression entspricht —; sondern unter V_m ist das dem mittleren Druck $p_m = \frac{1}{2} \cdot (p_1 + p_2) = p_1 + \frac{1}{2} \cdot p$ bei der Temperatur t_1 des angesaugten Gases zugeordnete Volumen zu verstehen.

134. Anrechnung der Geschwindigkeitshöhen. Beim Fördern wird dem geförderten Gas eine Geschwindigkeit erteilt, über deren Anrechnung auf den Förderdruck nun zu sprechen ist. Der Geschwindig-

keit w eines Gases vom spezifischen Gewicht γ entspricht stets eine Geschwindigkeitshöhe $\frac{w^2}{2g}$ und ein *Geschwindigkeits- oder dynamischer Druck*

$$p_w = \frac{w^2}{2g} \cdot \gamma \text{ mmWS} \dots \dots \dots (3)$$

Die vorkommenden Geschwindigkeitshöhen oder Geschwindigkeitsdrucke sind bei Kompressoren und Luftpumpen meist klein gegenüber dem Förderdruck, nicht so bei Ventilatoren.

Ist p_w an einer Stelle gemessen, wo der absolute *statische Druck* p_{st} ist, so bezeichnet man die Summe

$$p_g = p_{st} + p_w \dots \dots \dots (4)$$

als den *Gesamtdruck* an jener Stelle (Techn. Mess. § 30).

Das Gas kann nun mit einer Vorgeschwindigkeit w_e vor dem Ventilator ankommen, und es wird jedenfalls mit einer Austrittsgeschwindigkeit w_a aus ihm austreten. Es fragt sich, wie die eine oder andere billig in Anrechnung zu bringen ist¹⁾.

An sich ist es die Aufgabe des Ventilators, ruhende Luft aus dem Saugraum zu entnehmen und in dem Druckraum wieder ruhend abzuliefern. Hiernach sollten Geschwindigkeitsdrucke überhaupt nicht als nutzbar gelten. Aber es gibt Fälle, wo solche Rechnungsweise der wirklichen Sachlage nicht gerecht wird. So würde ein Ventilator mit dem Wirkungsgrad Null erscheinen, wenn er die Luft in einen Raum gleichen Druckes entläßt, ähnliches gilt vom Rührwerk, wo die Bewegung alles ist.

Wenn ein Ventilator die Luft dem Saugraum entnimmt, während sie einem anderen aus einer Saugleitung mit merklicher *Vorgeschwindigkeit* zuströmt, so ist der letzte im Vorteil gegenüber dem ersten, und sein Wirkungsgrad erscheint besser, wenn an sich der Ventilator der gleiche ist. Es ist also billig zu sagen: bei Ventilatoren ohne Saugleitung ist unter p_1 der statische Druck im Saugraum zu verstehen; die Druckmessung findet dann auch einfach im Saugraum statt. Bei Ventilatoren mit Saugleitung ist unter p_1 die Summe aus dem im Saugrohr gemessenen statischen Druck und dem an der gleichen Stelle vorhandenen dynamischen Druck zu verstehen, das ist also der Gesamtdruck. Dadurch wird es dem erstgedachten Ventilator zugute gerechnet, daß er die gesamte Beschleunigung zu bewirken hat, während der mit Saugleitung ausgestattete — bei gleicher Druckablesung — weniger nutzbar geleistet hat.

Bezüglich der Druckleitung bleibt wieder die Möglichkeit, den Geschwindigkeitsdruck im Querschnitt der Druckmessung als nutzbar dem statischen Druck zuzuzählen — man erhält dann die *obere Nutzleistung*; oder dies nicht zu tun — man erhält dann die *untere Nutzleistung*; welche von beiden maßgebend ist, hängt von folgenden Umständen ab. Zwar pflegt eine vorhandene *Endgeschwindigkeit* an sich nicht zu nützen; aber durch einen *Diffusor* (d. i. ein sich schlank er-

¹⁾ Regeln für Leistungsversuche an Ventilatoren und Kompressoren. Vgl. § 7.

weiterndes Rohrstück) kann das Gas allmählich verzögert und dadurch ein merklicher oder großer Teil der Geschwindigkeit in Druck umgesetzt werden. Diese Möglichkeit sollte einem Ventilator stets zugute gerechnet werden; fehlt der Diffusor, nutzt man die Möglichkeit daher nicht aus, so ist das nicht die Schuld des Ventilators. Wo indessen ein Ventilator mit Diffusor zusammen untersucht wird, weil zum Beispiel derselbe direkt angebaut ist, da hat man den Grad der Umsetzung in statischen Druck mit zu beurteilen, es ist aber bereits auf weitere Ausnutzung des am Diffusoraustritt noch verbliebenen Geschwindigkeitsdruckes verzichtet. Dieses Urteil kann nur nach dem statischen Druck am Diffusoraustritt gewonnen werden, für Ventilator mit Diffusor ist also die untere Nutzleistung einzusetzen. Mit Recht erscheint nun der Wirkungsgrad eines mit schlechtem Diffusor ausgestatteten Ventilators kleiner als der des einfachen Ventilators, weil eben der Diffusor einen schlechten Wirkungsgrad hat.

Es ergibt sich die Regel: Bei Untersuchung eines Ventilators allein — ohne Diffusor — wird der statische Druck, der unmittelbar hinter dem Ventilator gemessen ist, um den Geschwindigkeitsdruck im Meßquerschnitt vermehrt, dem Ventilator wird also der im Gas steckende Gesamtdruck in Anrechnung gebracht. Wenn aber ein Ventilator zusammen mit einem Diffusor untersucht wird, so wird nur der am Diffusorende festgestellte statische Druck angerechnet, denn der noch vorhandene dynamische Druck ist nach der Bauart des Diffusors bereits verloren gegeben.

Nach diesen Gesichtspunkten sind p_1 und p_2 in Formel (1) und (2) entweder so einzusetzen, wie sie statisch gemessen sind, oder sie sind um den Geschwindigkeitsdruck an derselben Stelle zu vermehren. Ist also bei einem Ventilator mit Diffusor der Austrittsquerschnitt des letzteren gleich dem Querschnitt der Saugleitung, so wird die Vorgeschwindigkeit in der Saugleitung dem Ventilator voll zur Last geschrieben, die (gleich große) Austrittsgeschwindigkeit aus dem Diffusor wird ihm aber nicht wieder als geleistet angerechnet. Ist aber bei einem Ventilator Saugrohr und Druckstutzen von gleichem Durchmesser und ein Diffusor nicht vorhanden, so ist der Unterschied der Gesamtdrucke in Rechnung zu setzen, er ist aber fast gleich dem Unterschied der statischen Drucke.

Nicht genau, denn in letzterem Fall ist die Austrittsgeschwindigkeit etwas größer als die Eintrittsgeschwindigkeit wegen der Erwärmung der Luft beim Komprimieren. Deshalb ist auch die Differenz der dynamischen Drucke etwas größer als die der statischen. Nun haben wir als durch Kompression geleistet nur die innerhalb der Isotherme geleistete Arbeit betrachtet, und es fragt sich, ob die der Erwärmung entsprechende Geschwindigkeitshöhe voll in Anrechnung gebracht oder ob sie etwa auf Ansaugtemperatur umgerechnet werden soll. Solche Umrechnung wäre nicht gut, denn es steht nichts im Wege, die volle Geschwindigkeitshöhe der erwärmten Luft in einem vollkommenen Diffusor vollständig in Druck umzusetzen. —

Rein *meßtechnisch* ist nun noch folgendes zu beachten: In Formel (1) ist V_1 das zu p_1 zugeordnete Volumen; wenn also p_1 als Gesamtdruck

angegeben ist, so ist V_1 , als vom statischen Druck abhängig, nirgends wirklich vorhanden. Wir haben den Vorgang so zu denken: Vor dem Ventilator messen wir V' und (aus statischem Druck und Temperatur) das spezifische Gewicht γ' ; im Ventilator kommt das Gas zunächst zur Ruhe unter voller Umsetzung der Geschwindigkeit in Druck — dabei sinkt V' auf V_1 und es steigt γ' auf γ_1 ; vom Volumen V_1 an beginnt nun die Wirksamkeit des Ventilators. Meßtechnisch aber erhalten wir V_1 durch Messung von V' , γ' und γ_1 nach der Formel

$$V_1 = \frac{V' \gamma'}{\gamma_1}, \dots \dots \dots (5)$$

und demnach folgt für die Nutzleistung allgemein

$$N_e = \frac{V' \gamma'}{\gamma_1} \cdot p_1 \cdot \ln \frac{p_2}{p_1} \dots \dots \dots (6)$$

Ganz entsprechend finden wir in Formel (2) V_m meßtechnisch durch Messung eines Volumens V' an irgendeiner Meßstelle, wo wir zugleich den Druck p' und die Temperatur t' messen, und haben

$$V_m = V' \cdot \frac{p'}{\frac{1}{2} \cdot (p_1 + p_2)} \cdot \frac{t_1 + 273}{t' + 273} \dots \dots \dots (7)$$

Wenn hier alles von Ventilatoren gesagt wurde, so gilt es doch von Kompressoren ganz ebenso; nur pflegt für sie die Unterscheidung zwischen statischem und Gesamtdruck nicht wesentlich zu sein wegen der Höhe der insgesamt zu überwindenden Druckstufe (§ 144).

135. Ausführung der Messungen; Beispiel. Bei der Durchführung der nach dem vorigen Paragraphen nötigen Messungen bereitet nur die Messung der Luftmenge und des statischen Druckes Schwierigkeiten. Die Messung der Leistungsaufnahme und der Drehzahl bietet nichts Besonderes.

Die *Luftmenge* ist tunlichst vor dem Ventilator zu messen, da dort die Luft frei von Wirbeln ist. Wenn aber ein Ventilator die Luft ohne Rohrleitung dem Raume entnimmt, so gibt die Messung der Luftmenge in dem meist durch Gestänge oder Lager unterteilten Querschnitt wenig gute Aussichten, zumal Kontraktion nicht gut berücksichtigt werden kann. Man muß dann in der Druckleitung, aber möglichst fern dem Ventilator messen, wo man darauf rechnen kann, daß die Wirbelungen einigermaßen wieder aufgelöst sind, und natürlich tunlichst am Ende einer geraden Rohrstrecke, an deren Anfang ein eingebautes Blechkreuz von der Länge des doppelten Rohrdurchmessers die meist vorhandene Drehbewegung beseitigt. — Die Messung selbst kann durch Abtasten des Querschnittes — eines oder besser zweier Durchmesser — mittels des Staurohres von Prandtl oder durch Einbau eines Staurandes erfolgen (Techn. Mess. § 42, 131).

Bei Verwendung des Staurohres ergibt sich zugleich an der Ringöffnung desselben der statische Druck als Mittelwert über den Querschnitt hin. Sonst sollte der statische Druck nicht nur an einer Stelle des Rohrumfanges gemessen werden.

Bei der *Druckmessung* hat man stets den doppelten Zweck derselben zu beachten. Man braucht den statischen Druck an der Stelle der Luftmessung, um die Luftmenge dem Gewicht nach bzw. auf den Normalzustand $\left(\frac{0}{760}\right)$ bezogen anzugeben. Man braucht aber außerdem den statischen Druck unmittelbar vor und hinter dem Ventilator, um die vom Ventilator überwundene Druckstufe zu berechnen. Mißt man die Menge nahe am Ventilator, so hat man also nur zwei Druckmessungen auszuführen; mißt man die Luftmenge an einer entfernteren Stelle — vorbehaltlich der Dichtigkeit der zwischenliegenden Rohrleitung —, so sind im ganzen drei Messungen des stati-

schischen Druckes nötig. Dagegen braucht man den dynamischen Druck oder die Geschwindigkeit stets nur einmal zu messen; die Geschwindigkeit an beliebiger anderer Stelle folgt aus der Kontinuitätsgleichung, wonach das durchgehende Gewicht $G = F \cdot w \cdot \gamma$ überall den gleichen Wert hat.

Eine *Laboratoriumsanordnung zur Untersuchung*

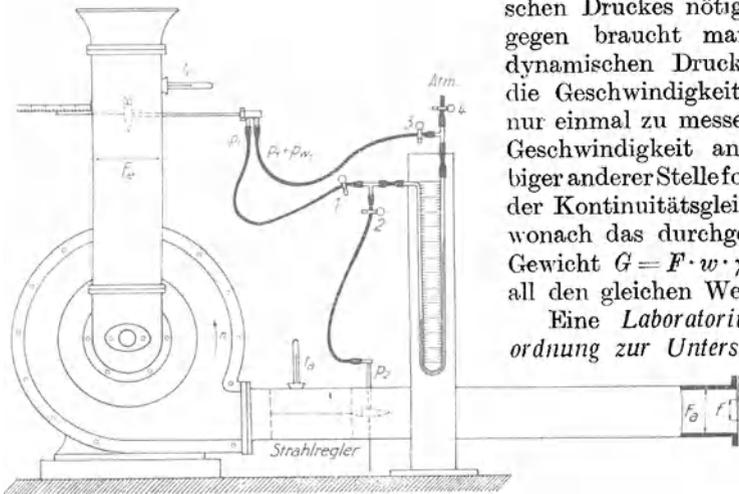


Fig. 256. Anordnung zum Untersuchen eines Ventilators.

von Ventilatoren ist etwa nach Maßgabe von Fig. 256 zu erstellen. Der Ventilator nimmt die Luft durch den Saugstutzen ein, der am Anfang zur Vermeidung der Kontraktion trichterförmig erweitert ist. Unweit des Ventilators, nur eben weit genug ab, um hoffen zu können, daß der Krümmer keinen Einfluß mehr übt, findet sich ein Prandtl'sches Staurohr, über den Durchmesser verschiebbar und die Stellung jeweils an einem Maßstab ablesbar. Die Temperatur wird bei t_e gemessen. Am Auslaßrohr findet sich zunächst ein Strahlregler und ein Thermometer t_a , sodann ein dem Staurohr ähnlich geformter, jedoch nur zur Entnahme des statischen Druckes bestimmter Druckentnahmekörper, ebenfalls über den Durchmesser verschiebbar. Am Ende des Druckrohres können Scheiben wechselnder Durchtrittsöffnung f vorgesetzt werden, die beispielsweise in glattem Verhältnis zum Querschnitt F_a der Auslaßleitung stehen. Um nur ein Manometer zu verwenden, kann man Schlauchleitungen so anschließen wie angedeutet ist. Durch gleichzeitiges Öffnen einerseits der Schlauchklemme 4, andererseits von 1 oder 2, bestimmt man den statischen Druck im Saug- und Druckrohr; durch gleichzeitiges Öffnen von 1 und 3 erhält man die Geschwindigkeitshöhe im Saugrohr.

Da allerdings die abzulesende Geschwindigkeitshöhe mit dem Quadrat der Geschwindigkeit geht, so beherrscht man mit einem Manometer nur mäßige Geschwindigkeitsbereiche; werden namentlich nach unten zu die Ablesungen zu ungenau, weil die Ausschläge des Manometers klein werden, so muß man ein Mikromanometer anwenden.

Deshalb kann man mit Staugeräten nicht leicht die sehr verschiedenen Luftmengen messen, die vorkommen, wenn man einerseits die Öffnung f , andererseits die Drehzahl n kleiner werden läßt. Eine befriedigende Messung kann man machen, indem man den Ventilator aus einem luftdichten Kasten saugen läßt, in den die Luft durch eine Anzahl verschließbarer und geeichter Öffnungen strömt. Dann aber saugt der Ventilator bei etwas wechselndem Unterdruck an. — Oder endlich bei den im folgenden zu besprechenden Versuchsreihen wurde in einfachster Weise ein Schalenkreuz-Anemometer (Techn. Mess. § 41) vor die Öffnung des Einlaßrohres gebracht und in etwa vier Punkten des Umfanges und noch in der Mitte je eine halbe oder ganze Minute belassen, mit oder ohne Zwischenablesungen bei den einzelnen Verschiebungen; der Trichter muß dann natürlich fehlen. Die Ergebnisse der folgenden Versuche werden zeigen, daß die so einfach zu gewinnenden Ergebnisse relativ sehr befriedigen, während die Absolutwerte natürlich beanstandet werden können.

Grundsätzlich sei nochmals (vgl. § 134) darauf hingewiesen, daß man entweder den (Unter-) Druck im Saugrohr und dazu den Geschwindigkeitsdruck, im ganzen also den Gesamtdruck im Saugrohr als Ansaugedruck einsetzen muß, oder einfach den Atmosphärendruck, dem der erstgenannte Gesamtdruck theoretisch gleich sein sollte; im letzten Fall würde die Messung des statischen Druckes im Saugrohr nur zur Bestimmung des Luftzustandes bei der Luftmessung dienen.

Ein *Beispiel einer Wirkungsgradbestimmung an einem Hochdruckventilator* sei nun gegeben. Der betreffende Versuch ist weiterhin mit Nr. 104 bezeichnet.

Bei einer Drehzahl $n = 2440/\text{min}$ nahm der Ventilator an der Kupplung, die ihn mit seinem Elektromotor verband, $N_k = 5,29 \text{ kW}$ auf — die Aufnahme des Motors vermindert um die Verluste in ihm und gegebenenfalls im Vorschaltwiderstand. Am Eintritt in das Saugrohr maß ein Flügelrad-Anemometer $w_e = 9,98 \text{ m/s}$ Luftgeschwindigkeit; das Saugrohr hatte 250 mm Durchmesser, also $0,0491 \text{ m}^2$ Querschnitt, so ist das angesaugte Volumen $9,98 \cdot 0,0491 = 0,490 \text{ m}^3/\text{s}$ — die Kubikmeter natürlich nicht auf einen Normalzustand bezogen. Der Luftzustand war einerseits durch die Temperatur $t_e = 21,5^\circ \text{C}$, andererseits durch den Barometerstand $b = 766 \text{ mm QS} = 10\,410 \text{ mmW} = 10\,410 \text{ kg/m}^2$ gegeben. Daß sich dieser absolute Druck durch Entstehen der Geschwindigkeit etwas vermindert hatte, darf unbeachtet bleiben, denn der Geschwindigkeit $9,98 \text{ m/s}$ entspricht immerhin erst eine Geschwindigkeitshöhe $\frac{9,98^2}{2 \cdot 9,81} = 5,1 \text{ m}$ Luftsäule, also bei einem vorläufig angenommenen spezifischen Gewicht der Luft von $1,25 \text{ kg/m}^3$ erst ein Geschwindigkeitsdruck $5,1 \cdot 1,25 = 6,4 \text{ mm WS}$, was gegen-

über 10 410 mm nichts ausmacht. — Das spezifische Gewicht der angesaugten Luft und auch bei der Messung ist also $1,293 \cdot \frac{273}{10\,333} \cdot \frac{b}{273 + t_e}$
 $= 0,0342 \cdot \frac{10\,410}{294,5} = 1,210 \text{ kg/m}^3$, und die Luftmenge dem Gewicht nach ist $G = 0,490 \cdot 1,21 = 0,592 \text{ kg/s}$; auf das Luftgewicht Bezug zu nehmen hat insofern einen Vorteil, als das Luftgewicht beim Ansaugen und Ausdrücken das gleiche ist; man könnte statt dessen das auf Normalzustand bezogene Volumen $0,592 : 1,293 = 0,457 \text{ m}^3 \left(\frac{0}{760} \right) / \text{s}$ errechnen.

Im Druckrohr messen wir einen Überdruck von 564 mm WS; zu ihm ist nach den Grundsätzen des § 134 der Geschwindigkeitsdruck hinzuzufügen; dazu ist die Geschwindigkeit im Druckrohr zu berechnen. Im Druckrohr ist die Temperatur $t_a = 28,8^\circ \text{C}$ gemessen; der absolute Druck darin ist $10\,410 + 564 = 10\,974 \text{ mm WS}$; das spezifische Gewicht ist also $0,0342 \cdot \frac{10\,410 + 564}{273 + 28,8} = 1,242 \text{ kg/m}^3$, es ist durch die Drucksteigerung — trotz der Temperaturerhöhung — gestiegen. Das ausblasende Volumen ist $0,592 : 1,242 = 0,476 \text{ m}^3/\text{s}$, also gegen das angesaugte entsprechend verringert. Das Druckrohr hat 200 mm lichten Durchmesser, entsprechend $0,0314 \text{ m}^2$ Fläche. So wird die Luftgeschwindigkeit im Druckrohr $0,476 : 0,0314 = 15,15 \text{ m/s}$, entsprechend einer Geschwindigkeitshöhe von $\frac{15,15^2}{2 \cdot 9,81} = 11,7 \text{ m}$ Luftsäule, die Luft durchweg vom Zustande $\left(\frac{28,8}{10\,974} \right)$ gedacht, oder entsprechend einem Geschwindigkeitsdruck $11,7 \cdot 1,242 = 14,5 \text{ mm WS}$.

Nun ist der gesamte Förderdruck $564 + 14,5 = 578 \text{ kg/m}^2$, und die nutzbar werdende Leistung berechnet sich als Produkt aus Luftvolumen und Förderdruck; als Luftvolumen aber ist das dem mittleren Druck $10\,410 + \frac{1}{2} \cdot 578 = 10\,699 \text{ kg/m}^2$ bei der Eintrittstemperatur $21,5^\circ \text{C}$ entsprechende Volumen anzusetzen. In diesem fingierten Zustand ist das spezifische Gewicht $\gamma_m = 0,0342 \cdot \frac{10\,699}{294,5} = 1,242 \text{ kg/m}^3$, das Volumen ist $V_m = 0,592 : 1,242 = 0,476 \text{ m}^3/\text{s}$ zu setzen.

Nach allem wird die Nutzleistung $N_e = 0,476 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 578 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 276 \frac{\text{mkg}}{\text{s}}$
 $= 276 : 102 = 2,70 \text{ kW}$.

Da die Leistungsaufnahme an der Kupplung 5,29 kW war, so hat der Ventilator den Wirkungsgrad $\eta = 2,70 : 5,29 = 0,510$.

Die eben berechnete, auf den gesamten Förderdruck Bezug nehmende Nutzleistung bezeichnet man als die *obere Nutzleistung*, den Wirkungsgrad ebenfalls als den oberen. Die *untere Nutzleistung* zieht die in der austretenden Luft enthaltene kinetische Energie nicht in Betracht, sondern läßt nur den Druck von 564 kg/m^2 als nutzbar erscheinen; die untere Nutzleistung wäre $\frac{1}{102} \cdot 0,476 \cdot 564 = 2,63 \text{ kW}$, der untere Wirkungsgrad $2,63 : 5,29 = 0,500$. Die unteren und oberen Werte

unterscheiden sich also voneinander um etwa 5% — bei größeren Öffnungen um viel mehr. Der Unterschied ist genau gleich dem wirklichen Inhalt der austretenden Luft an kinetischer Energie; ein Gewicht von 0,592 kg/s, entsprechend $\frac{0,592}{9,81} = 0,0604$ ME (Masseneinheiten) / s bewegter Masse, enthält bei der wirklich vorhandenen Geschwindigkeit 15,15 m/s die kinetische Energie $\frac{1}{2} \cdot 0,0604 \cdot 15,15^2 = 6,93$ mkg/s = 0,068 kW; andererseits ist 2,70 — 2,63 = 0,07 kW.

136. Ventilator bei wechselnder Drehzahl. Wenn man den Versuch des vorigen Paragraphen bei wechselnder Drehzahl wiederholt, wobei die vor den Auslaß gesetzte Öffnung (Fig. 256) unverändert bleibt, so erhält man

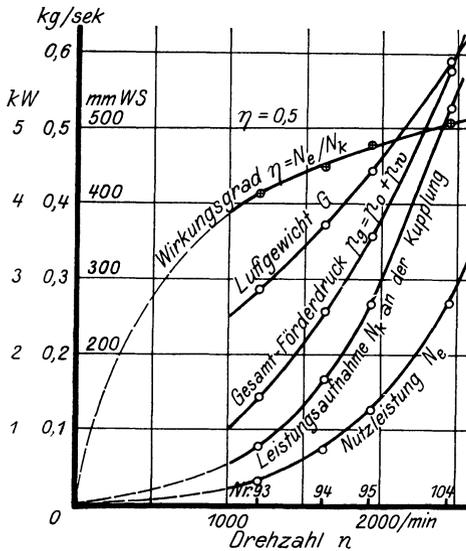


Fig. 257. Ventilator bei wechselnder Drehzahl gegen konstanten Düsenwert.

Ergebnisse wie in Tabelle 83 und Fig. 257 dargestellt.

Es versteht sich, daß die geförderte *Luftmenge* mit der Drehzahl zunimmt. Es zeigt sich, daß die Zunahme annähernd proportional der Drehzahl geht. Der *Gegendruck* steigt bei konstanter Öffnung quadratisch mit der Luftmenge, also auch quadratisch mit der Drehzahl. Die Nutzleistung N_e steigt also mit der dritten Potenz von n , die betreffende Kurve in Fig. 257 ist eine kubische Parabel. — Der Wirkungsgrad des Ventilators steigt in mäßigen Grenzen mit der Drehzahl, von $\eta = 0,415$ bei 1200/min bis zu $\eta = 0,51$ bei 2440/min.

Mit der Kompression ist eine *Erhöhung der Lufttemperatur* verbunden. Bei der geringsten Drehzahl steigt die Temperatur von 20,3 auf 21,8, also um 1,5°; bei der höchsten steigt sie von 21,5 auf 28,8, also um 7,3°. Zu einem Teil beruht die Temperatursteigerung einfach auf der Kompressionswärme. Bekanntlich sind für rein adiabatische Kompression die Temperatursteigerung und die Drucksteigerung durch die Beziehung verbunden:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \dots \dots \dots (8)$$

Für Luft als zweiatomiges Gas ist $\kappa = 1,4$ und daher $\frac{\kappa-1}{\kappa} = 0,286$. Man kann, jederseits 1 zu- und abzählend, schreiben

$$1 + \frac{T_2 - T_1}{T_1} = \left(1 + \frac{p_2 - p_1}{p_1}\right)^{0,286} \dots \dots \dots (8a)$$

Tabelle 83. Ventilator bei wechselnder Drehzahl.

Barometerstand b		kg/m ²		10 450			10 410
		Versuch Nr.		93	94	95	104
Kontakt		Nr.		a	e	h	p
1	Drehzahl n /min	1200	1625	1925	2440		
2	Luftgeschwindigkeit im Saugstutzen w_e m/s	4,80	6,30	7,50	9,98		
3	Angesaugtes Volumen $V_e = 0,0491 \cdot w_e$ m ³ /s	0,236	0,310	0,368	0,490		
4	Temperatur der angesaugten Luft t_e °C	20,3	20,2	19,6	21,5		
5	Spezifisches Gewicht der angesaugten Luft $\gamma_e = 0,0342 \cdot \frac{b}{273 + t_e}$ kg/m ³	1,219	1,219	1,221	1,210		
6	Fördergewicht $G = V_e \cdot \gamma_e$ kg/s	0,288	0,378	0,449	0,592		
7	Statischer Förderdruck p_0 mm WS	139	252	351	564		
8	Temperatur im Druckrohr t_a °C	21,8	22,9	24,0	28,8		
9	Spezifisches Gewicht im Druckrohr $\gamma_a = 0,0342 \cdot \frac{b + p_0}{273 + t_a}$ kg/m ³	1,228	1,239	1,243	1,242		
10	Herausgedrücktes Volumen $V_a = G/\gamma_a$ m ³ /s	0,234	0,304	0,360	0,476		
11	Luftgeschwindigkeit im Druckrohr $w_a = \frac{V_a}{0,0314}$ m/s	7,45	9,7	11,5	15,15		
12	Geschwindigkeitsdruck dazu $p_w = \frac{w_a^2}{2g} \cdot \gamma_a$ kg/m ²	3,5	5,9	8,3	14,5		
13	Gesamt-Förderdruck $p = p_0 + p_w$ kg/m ²	142	258	359	578		
14	Mittlerer absoluter Druck $p_m = b + \frac{p}{2}$ kg/m ²	10 521	10 579	10 630	10 699		
15	Mittleres Fördervolumen $V_m = V_e \cdot \frac{b}{p_m}$ m ³ /s	0,234	0,306	0,362	0,476		
16	Nutzleistung $N_e = \frac{1}{102} \cdot V_m \cdot p$ kW	0,326	0,774	1,275	2,70		
17	Leistungsaufnahme N_k an der Kupplung „	0,785	1,685	2,66	5,29		
18	Wirkungsgrad $\eta = N_e : N_k$ —	0,415	0,460	0,480	0,510		
19	Verhältniswert $1000 \cdot V_m/n$ —	0,195	0,188	0,188	0,195		
20	n/\sqrt{p} —	100,7	101,1	101,5	101,5		

und hat dann, da für Ventilatoren der Bruch klein ist gegen die Eins, in bekannter Annäherung und mit $p_2 - p_1 = p$, dem Förderdruck:

$$1 + \frac{T_2 - T_1}{T_1} = 1 + 0,286 \cdot \frac{p}{p_1}$$

$$\frac{T_2 - T_1}{T_1} = 0,286 \cdot \frac{p}{p_1} \dots \dots \dots (8b)$$

Die relative Drucksteigerung bei Versuch 104 ist: $\frac{p}{p_1} = \frac{10\,410}{578} = 0,0555$, also hiernach berechnet die relative Temperatursteigerung theoretisch $0,0555 \cdot 0,286 = 0,016$. Bei 294,5° Anfangstemperatur ist die theoretische Temperaturzunahme $0,016 \cdot 294,5 = 4,7^\circ$. Die beobachtete Temperaturzunahme war 7,3°, also 1,55 mal so groß.

Tabelle 84. Wärmeeentwicklung beim Betriebe des Ventilators.

Versuch Nr.		93	94	95	104
1	Ansaugdruck p_1 kg/m ²	10 450	10 450	10 450	10 410
2	Gesamt-Förderdruck p „	142	248	359	578
3	Kompressionsverhältnis $p : p_1 = x$ —	0,0136	0,0247	0,0343	0,0553
4	Theor. relat. Temperatursteigerung $\Delta T: T_1 = 0,286 x$ —	0,0039	0,0071	0,0098	0,016
5	Anfangstemperatur T_1 ° abs.	293,2	293,2	292,6	294,5
6	Endtemperatur T_2 „	294,8	295,9	297,0	301,8
7	Wirkliche relat. Temperatursteigerung $T_2 - T_1 : T_1$ —	0,0051	0,0092	0,0150	0,0248
8	Theoretische Temperaturzunahme $T_1 \cdot 0,286 x$. . . °	1,15	2,1	2,85	4,7
9	Wirkliche Temperaturzunahme $T_2 - T_1$ °	1,5	2,7	4,4	7,3
10	Verhältnis —	1,3	1,3	1,55	1,55

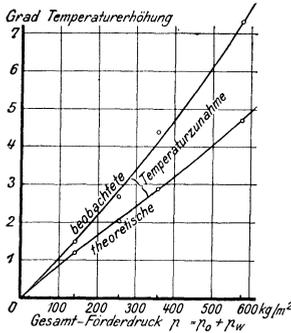


Fig. 258. Erwärmung der Luft im Ventilator.

Diese Rechnung ist für alle Versuche der Reihe in Tabelle 84 durchgeführt; die beobachtete ist stets größer als die zu erwartende Temperaturzunahme, und zwar größer in einem mit der Drehzahl schwach steigenden Verhältnis. Die Ergebnisse zeigt Fig. 258. — Ob es richtiger wäre, die Rechnung mit dem statischen Förderdruck p_0 statt mit dem gesamten p auszuführen, bleibe dahingestellt.

Der Ventilator als nicht zwangläufige Maschine — im Gegensatz zu Kolbenmaschinen — setzt also mehr Arbeit in Wärme um als nötig wäre: er erzeugt Wirbelungen, die eine Verlustquelle bilden.

Die Größe dieser Verluste kann auch berechnet werden. Bei Versuch 104 wurden 0,592 kg/s Luft, spezifische Wärme $c_p = 0,24$, um 4,7° theoretisch und im ganzen um 7,3° erwärmt. Dem entsprechen Wärmemengen

theoretisch $0,592 \cdot 0,24 \cdot 4,7 = 0,67$ kcal/s
 wirklich $0,592 \cdot 0,24 \cdot 7,3 = 1,04$ „
 also für Wirbelungen 0,37 „

Da der Leistungsaufwand $5,29 \text{ kW} = 1,26 \text{ kcal/s}$ darstellt, so ist der in Wärme umgesetzte Bruchteil erheblich. Es wurden in Wärme umgesetzt

theoretisch bei adiabatischer Kompression. $0,67 \text{ kcal/s} = 53,2\%$
 darüber hinaus als Verlust $0,37$ „ = $29,4\%$
 die Nutzleistung stellt dar $2,70 \text{ kW} \cdot 0,24 = 0,65$ „ = $51,6\%$
 nicht nachgewiesen bleiben minus $0,43$ „ = $-34,2\%$

 $1,26 \text{ kcal/s} = 100,0\%$

Dies ist zugleich die *Energiebilanz des Ventilatorbetriebes*, in der also die Vereinzelnung der Leistungen auf wesentlich mehr führt als die Gesamtleistung. Dazu wird man sagen dürfen: Die Luftmessung mit

Anemometer oder selbst mit Pitotrohr ist namentlich wegen der Randeinflüsse stark unsicher. Unsicherheit von etwa 10% muß man geradezu erwarten. Demgegenüber sind die anderen Messungen weniger unsicher, nämlich die elektrische Leistungsmessung, die Messung der Druckzunahme und selbst die Messung der Temperaturerhöhung. Für die Temperaturmessungen zeigt die Kurve Fig. 258 eine Unsicherheit von etwa 0,2°, das ist bei 7,3° Temperaturerhöhung nur 2,7% — abgesehen allerdings von systematischen Fehlern, wie Ungleichheit der zu beiden Ablesungen verwendeten Thermometer oder Einfluß der Luftwirbelung.

Danach kommt es wohl in Frage, umgekehrt *aus der Temperaturerhöhung die Luftmenge zu berechnen*. Man verwendet dann gewissermaßen den Ventilator als Thomas-Gasmesser (Techn. Mess. § 71) mit mechanischer Erwärmung der Luft. Der Ansatz für unseren Versuch wäre:

$$0,24 \cdot \Delta t \cdot G + \frac{1}{427} \cdot \frac{G}{\gamma_m} \cdot (p_0 + p_w) + W = 0,24 \cdot N_k \dots (9)$$

Dabei ist 0,24 das erstemal die spezifische Wärme der Luft, das zweitemal dagegen das kalorische Arbeitsäquivalent: 1 kW = 0,24 kcal/s. Links finden wir der Reihe nach die Erwärmung der Luft, die der Luft zugeteilte Arbeit, dann als Korrektionsglied den Verlust W der Ventilatorteile durch Wärmestrahlung; rechts steht die aufgewendete Arbeit. Alle Größen sind direkt meßbar außer p_w , für das man

$$p_w = \frac{w_a^2}{2g} \cdot \gamma_a = \frac{V_a^2 \cdot \gamma_a}{0,0314^2 \cdot 2g} = \frac{G^2}{0,0314^2 \cdot 2g \cdot \gamma_a} \dots (9a)$$

einsetzen kann, worauf man für G eine einfach zu lösende kubische Gleichung hat. Da indessen p_w nur von der Größenordnung 14 mm gegenüber $p = 564$ mm ist, so könnten wir auch vereinfachend setzen $p + p_w = 1,025 \cdot p$, vielleicht selbst p_w ganz fortlassen; der Einfluß der Luftströmung auf das Thermometer ist ohnehin unsicher. Als Wärmeverlust können wir, die besonderen Verhältnisse am Lager und an der Stopfbüchse nicht beachtend, etwa 5,5 kcal/h für 1 m² Oberfläche und 1° Temperaturunterschied ansetzen (Rietschel, Leitfaden, Band II,

5. Aufl., S. 40), das macht bei rund 2 m² Oberfläche nur $\frac{2 \cdot 5,5 \cdot 7,3}{3600}$

= 0,022 kcal/s, tritt also gegen den Umsatz zurück. Wir schreiben

$$0,24 \cdot 7,3 \cdot G + \frac{1}{427} \cdot \frac{G}{1,242} \cdot \left(564 + \frac{G^2}{0,0314^2 \cdot 19,6 \cdot 1,242} \right) + 0,022 = 0,24 \cdot 5,29,$$

in trigonometrischer Auflösung folgt $G = 0,435$ kg/s, statt 0,592, also merklich abweichend. — Vernachlässigt man p_w gegen p_0 , so ergibt eine Gleichung ersten Grades $G = 0,445$ kg/s. — Wir halten diese Methode der Bestimmung von G für genauer, bleiben gleichwohl bei den mechanisch bestimmten Werten.

137. Düsenwert des Widerstandes (gleichwertige Düse). Wenn ein Ventilator gegen den Widerstand eines irgendwie gestalteten Rohr- oder Kanalnetzes oder gegen den Widerstand von Nutzwiderständen Luft fördert — saugt oder drückt — so kann man wie bei der Pumpe fragen:

durch eine runde Öffnung welchen Querschnittes läßt sich der Widerstand ersetzen, das heißt durch welche Öffnung würde bei gleichem Druckgefälle gerade die Luftmenge abfließen, die der Ventilator fördert?

Der Ausfluß durch eine Öffnung erfolgt nach der Gleichung

$$V = F \cdot w = F \sqrt{2g \frac{p}{\gamma}}, \dots \dots \dots (10)$$

worin V das durch die Öffnung F mit der Geschwindigkeit w unter der Einwirkung des Druckunterschiedes p ausfließende Volumen vom spezifischen Gewicht γ ist — alle Größen nach dem technischen Maßsystem gemessen. Wenn also der Ventilator gegen den Druck p ein Volumen V fördert, so ist die Öffnung

$$F = V \sqrt{\frac{\gamma}{2g p}} = \sqrt{\frac{G \cdot V}{2g \cdot p}} \dots \dots \dots (10a)$$

diejenige, die für den Ventilator die gleichen Verhältnisse geschaffen hätte wie der gerade vorhandene Widerstand. Voraussetzung ist noch, daß keine Kontraktion auftritt, daß also die Kanten der Öffnung gut gerundet seien. Wir bezeichnen F deshalb (Techn. Mess. § 59) als die dem wirklich vorhandenen Widerstand *gleichwertige Düse* oder als den *Düsenwert des Widerstandes*.

Im Bergbau wird eine analog, jedoch mit der Ausflußzahl $k = 0,65$ berechnete Öffnung als *äquivalente Öffnung* bezeichnet. Die Willkürlichkeit in der Wahl von k ist durch Einführung der Düse mit $k = 1$ (Regeln für Leistungsversuche S. 63) beseitigt.

Für größere Druckunterschiede müßten die entsprechenden komplizierteren Ausflußgesetze genommen werden; doch wird es genügen, im folgenden für V das Anfangsvolumen V_1 der Kompression und für γ das dem mittleren Druck $p_m = b + \frac{1}{2} \cdot p$ bei der Temperatur t_1 zugeordnete mittlere spezifische Gewicht γ_m einzusetzen. Man folgt dabei, namentlich durch Einführung der Isotherme statt der für Ausflußvorgänge geltenden Adiabate, mehr dem Streben nach Einfachheit und nach Analogie zu dem Vorgehen bei der Leistungsberechnung beim Ventilator (§ 134) als theoretischen Erwägungen.

Für Versuch 104 berechnet sich die gleichwertige Öffnung wie folgt: Es war (§ 135) $V_m = 0,476 \text{ m}^3/\text{s}$ und $p = 578 \text{ kg/m}^2$; mit dem bekannten Fördergewicht $G = 0,592 \text{ kg/s}$ errechnet sich $\gamma_m = 0,592 : 0,476 = 1,242 \text{ kg/m}^3$; also wird

$$F = 0,476 \sqrt{\frac{1,242}{2 \cdot 9,81 \cdot 578}} = 0,00499 \text{ m}^2$$

der Düsenwert, gegen den der Ventilator fördert.

In Tabelle 85 ist die Berechnung des Düsenwertes für die anderen Versuche gegeben. Der Mittelwert ist $0,00488 \text{ m}^2$. Die wirkliche Öffnung vor dem Druckrohr hatte 100 mm Durchmesser, also $0,00785 \text{ m}^2$ freie Fläche; der Düsenwert ist kleiner, einmal wegen der Kontraktion an der Öffnung, dann auch wegen der Druckverluste, die vom Ventilator aus gerechnet jenseits der Stellen der Druckmessung noch in Rohren

Tabelle 85. Berechnung der gleichwertigen Düse.
 Mittelwert $F = 0,00488 \text{ m}^2 = 0,155 \cdot F_a$.

Versuch Nr.	93	94	95	104
1 Drehzahl n /min	1200	1625	1925	2440
2 Fördermenge V_m m ³ /s	0,234	0,306	0,362	0,476
3 Gesamt-Förderdruck p . . . kg/m ²	142	258	359	578
4 Mittlerer absoluter Druck p_m kg/m ²	10 521	10 579	10 630	10 699
5 Anfangstemperatur T_1 . . . ° abs	293,3	293,2	292,6	294,5
6 Spez. Gewicht $\gamma_m = 0,342 \cdot \frac{p_m}{T_1}$ kg/m ²	1,228	1,232	1,243	1,242
7 Düsenwert $F = V_m \cdot \sqrt{\frac{\gamma_m}{2g \cdot p}}$. . m ²	0,00491	0,00478	0,00480	0,00498

oder Krümmern auftreten; in Fig. 256 kommt dafür allerdings nur das kurze Rohrstück vor der Öffnung selbst in Betracht, nicht aber das Saugrohr, wenn der Raumdruck als Saugdruck angesetzt ist. Diesen kleinen Verlust vernachlässigt, wäre die Kontraktion der geschärften Öffnung $0,00488 : 0,00785 = 0,622$. Ins Verhältnis gesetzt zu dem wirklichen Querschnitt des Druckstutzens — 200 mm Durchmesser entsprechend $0,0314 \text{ m}^2$ Fläche — ist der *relative Düsenwert* $0,00488 : 0,0314 = 0,155$. Wegen der Reibungs- und Kontraktionswiderstände ist also der relative Düsenwert, gegen den der Ventilator arbeitet, nur 0,155, obgleich die vor das Druckrohr von 200 mm Durchmesser gesetzte Mündung von 100 mm Durchmesser grade $\frac{1}{4} = 0,25$ relative Öffnung hat.

138. Dimensionslose Kennzahlen¹⁾. Es war schon erwähnt, daß die gelieferte Luftmenge der Drehzahl des Ventilators proportional bleibt, wenn er gegen einen Widerstand bestimmten Düsenwertes fördert. Darnach würde also das Verhältnis $V_m : n$ konstant bleiben und wäre als Kennzahl geeignet.

Es hat nun aber stets (§ 12) Vorteile, solche Kennzahlen dimensionslos zu machen, indem durch anderweite Wahl der Größen oder durch Multiplikation mit Konstanten passender Dimension die Dimensionen von Zähler und Nenner gleichgemacht werden. In unserem Fall ist der Zähler ein sekundliches Fördervolumen, also das Produkt aus einem Querschnitt und einer Geschwindigkeit. Größen dieser Art sind also auch im Nenner einzuführen, und dazu bietet sich einerseits zwanglos die Umfangsgeschwindigkeit u des Schaufelrades dar, andererseits wird als den Ventilator am besten kennzeichnend der engste Querschnitt genommen, den die Luft zu passieren hat, der Querschnitt also, der gewissermaßen die Lieferung begrenzt; regelmäßig wird das der Austrittsstutzen sein, dessen Querschnitt wir mit F_a bezeichnen. Nach den Ergebnissen der Tabelle 83 und 85 wird also die dimensionslose

$$\text{Lieferzahl } \varphi = \frac{V_m}{u \cdot F_a} \dots \dots \dots (11)$$

konstant sein, solange nur die Drehzahl, nicht aber die Düse sich ändert.

¹⁾ Regeln für Leistungsversuche an Ventilatoren und Kompressoren. Vgl. § 7.

Der Sinn der *Lieferzahl* ist dieser: Nimmt man an, der Ventilator könne keinesfalls eine größere Luftgeschwindigkeit erzeugen als die Umfangsgeschwindigkeit des Rades, und zwar diese natürlich im engsten vorkommenden Querschnitt, dann ist $u \cdot F_a$ die größtmögliche Lieferung des Ventilators, und zu ihr wird die wirkliche in Vergleich gestellt.

Es ist aber klar, daß die größtmögliche Geschwindigkeit nur erzeugt werden kann, wenn nicht zugleich Druck verlangt wird, also bei freiem Ausblasequerschnitt, bei Rührwerken oder dergleichen. Im anderen Falle sollte — ähnlich wie der volumetrische Wirkungsgrad der Kolbenmaschine — die Lieferzahl unter der Einheit bleiben, wie es auch in Tabelle 86 der Fall ist.

Tabelle 86. Kennzahlen des Ventilators.

Laufraddurchmesser 650 mm; Durchmesser des Ansaugrohres 250 mm, des Ausblaserohres 200 mm. — Vgl. Tab. 83.

	Versuch Nr.	93	94	95	104	Mittel
1	Drehzahl n /min	1200	1625	1925	2440	—
2	Fördermenge V_m m ³ /s	0,234	0,306	0,362	0,476	—
3	Umfangsgeschw. $u = \frac{2,04}{60} \cdot n$ m/s	40,8	55,2	65,4	83,0	—
4	Lieferzahl $\varphi = \frac{V_m}{0,0314 \cdot u}$. . . —	0,183	0,176	0,176	0,183	0,180
5	Gesamt-Förderdruck p . . . kg/m ²	142	258	359	578	—
6	Spezif. Gewicht kg/m ³	1,228	1,232	1,243	1,242	—
7	Druckzahl $\psi = p : \frac{u^2}{2g} \cdot \gamma_m$. . . —	1,363	1,349	1,332	1,325	1,342
8	Umsatzzahl $v = \varphi \cdot \psi$ —	0,250	0,238	0,235	0,241	0,241
9	Wirkungsgrad nach Tab. 83 η . . . —	0,415	0,460	0,480	0,510	—
10	Leistungszahl $\lambda' = \frac{v}{\eta}$ —	0,603	0,517	0,490	0,473	—
11	Gütezahl $\varepsilon = v \cdot \eta$ —	0,104	0,109	0,113	0,123	—

Für Versuch 104 ist der Durchmesser des Laufrades 650 mm, also sein Umfang 2,04 m. Bei der Drehzahl 2440/min = 40,7/s ist die Umfangsgeschwindigkeit $u = 2,04 \cdot 40,7 = 83,0$ m/s. Der Durchmesser des Druckstutzens ist 200 mm, also $F_a = 0,0314$ m². Das theoretische Fördervolumen ist also bei $n = 2440$ /min: $83,0 \cdot 0,0314 = 2,61$ m³/s. Das gemessene „mittlere“ Fördervolumen war (Tabelle 83, 85) $V_m = 0,476$ m³/s; so wird die Lieferzahl $\varphi = 0,476 : 2,61 = 0,183$.

Es kann sich empfehlen, die Lieferzahl auf Normalzustand der Luft (0°C und 760 mm QS) zu beziehen; diese *reduzierte Lieferzahl* entspricht dann dem Lieferungsgrad der Kolbenmaschinen, der neben den Eigenschaften der Maschine auch die Aufstellung und die Witterung berücksichtigt; der bisher berechnete dagegen entspricht dem volumetrischen Wirkungsgrad der Kolbenmaschine (Techn. Mess. § 55). Für Versuch 104 war das Volumen V_m bei $p_m = 10\,699$ kg/m²

und bei $t_1 = 21,5^\circ$ berechnet; das reduzierte Volumen läßt sich hieraus, oder einfacher berechnen aus dem bekannten Fördergewicht $G = 0,592$ kg/s, dem ein reduziertes Volumen, $592 : 1,293 = 0,457 \text{ m}^3 \left(\frac{0}{760} \right) / \text{s}$ entspricht; damit wird die reduzierte Lieferzahl $\varphi_0 = 0,457 : 2,61 = 0,175$.

Man kann ferner eine *Druckzahl* berechnen, indem man dem Ventilator die Eigenschaft zuschreibt, er könne höchstens den der Umfangsgeschwindigkeit entsprechenden Druck erzeugen, und zu diesem den wirklich erzeugten Druck ins Verhältnis setzt. — Der Umfangsgeschwindigkeit u entspricht eine (Fall- oder) Förderhöhe $\frac{u^2}{2g}$ Meter Luftsäule, und diesem beim spezifischen Gewicht γ der geförderten Luft ein Förderdruck $\frac{u^2}{2g} \cdot \gamma$. Wir setzen demnach die Druckzahl

$$\psi = \frac{p}{\frac{u^2}{2g} \cdot \gamma_m}, \quad \dots \dots \dots (12)$$

indem wir den erzeugten Druck nach den Gesichtspunkten des § 134 einschließlich des Geschwindigkeitsdruckes rechnen, solange nicht ein Diffusor wirksam geworden und mit zu beurteilen ist; als spezifisches Gewicht führen wir das dem Volumen V_m zugeordnete γ_m ein, wie schon in § 134 berechnet.

Für Versuch 104 war $\gamma_m = 1,242 \text{ kg/m}^2$ und $u = 83,0 \text{ m/s}$; dem entspricht eine Geschwindigkeitshöhe $83,0^2 : 19,62 = 351 \text{ m LS}$ — die Förderhöhe des Ventilators — oder ein Förderdruck $351 \cdot 1,242 = 436 \text{ mm WS} = 436 \text{ kg/m}^2$. Gemessen wurde ein Förderdruck von 578 kg/m^2 . Die Druckzahl wird also $\psi = 578 : 436 = 1,325$. Die Druckzahl liegt also merklich über der Einheit.

Indem wir nun aus der so bestimmten theoretischen Luftmenge $u \cdot F_a \text{ m}^3/\text{s}$ und dem theoretischen Förderdruck $\frac{u^2}{2g} \cdot \gamma_m \text{ kg/m}^2$ das Produkt bilden, erhalten wir einen Wert für den theoretisch möglichen Leistungsumsatz, also das Produkt aus Menge und Druck: der theoretisch mögliche Leistungsumsatz ist hiernach in mkg/s

$$N_{\text{theor}} = u F_a \cdot \frac{u^2}{2g} \gamma_m = \frac{F_a \cdot u^3 \cdot \gamma_m}{2g}.$$

Für Versuch 104 ist $N_{\text{theor}} = 2,61 \cdot 436 = 1140 \text{ mkg/s} = 1140 : 102 = 11,2 \text{ kW}$. Der wirklich erzielte Umsatz ist indessen nur $V_m \cdot p = 0,476 \cdot 578 = 275 \text{ mkg/s} = 2,70 \text{ kW}$. Wir können hieraus eine Umsatzzahl $2,70 : 11,2 = 0,241$ errechnen. Die *Umsatzzahl*

$$v = \frac{V_m \cdot p}{\frac{1}{2g} \cdot F_a \cdot u^3 \cdot \gamma_m} = \psi \cdot \varphi \quad \dots \dots \dots (13)$$

ist ein Maß für die Güte des Ventilators rücksichtlich der aus ihm unter den vorgeschriebenen Verhältnissen zu ziehenden Leistung, nicht aber für seine Wirtschaftlichkeit.

Statt dessen kann man den erzielbaren Umsatz vergleichen mit dem Leistungsbedarf des Ventilators, der an der Kupplung gemessen $N_k = 5,29 \text{ kW}$ war; eine *Leistungszahl*

$$\lambda' = \frac{N_k}{\frac{1}{2g} \cdot F_a \cdot u^3 \cdot \gamma_m} \dots \dots \dots (14)$$

würde für unser Beispiel also $\lambda' = 5,29 : 11,2 = 0,473$ werden. Es gilt die Beziehung

$$\lambda' = \frac{\varphi \cdot \psi}{\eta}, \dots \dots \dots (14a)$$

worin $\eta = 0,510$ der Wirkungsgrad des Ventilators nach Tabelle 83.

Die Leistungszahl setzt also die Umsatzzahl und den Wirkungsgrad miteinander ins Verhältnis; das Vorgehen ist nicht ganz sachlich, da sowohl $\varphi \cdot \psi$ als auch η möglichst hoch sein sollte, und da bei Erhöhung beider die geschehene Verbesserung nicht erkennbar wird. Die Leistungszahl wird hier nur deshalb angeführt, weil sie in den Regeln S. 65 genannt wird. Die dortige Leistungsziffer λ nimmt allerdings auf die in die Luft übergeführte Leistung, das ist N_k minus Lagerreibung usw. Bezug und hat überdies den Nachteil, experimentell nicht direkt bestimmbar zu sein.

Es mag deshalb empfohlen werden, an Stelle der Leistungszahl lieber eine Gütezah ε einzuführen, die Umsatz und Wirtschaftlichkeit im Zähler führt. Indem man beide Faktoren in erster Potenz einsetzt, schreibt man beiden gleiche Bedeutung zu; wir setzen die *Gütezah*

$$\varepsilon = v \cdot \eta = \varphi \cdot \psi \cdot \eta \dots \dots \dots (15)$$

oder ausführlicher

$$\varepsilon = \frac{V_m}{u F_a} \cdot \frac{p}{\frac{1}{2g} \cdot \gamma_m} \cdot \frac{V_m \cdot p}{N_k} = \frac{N_c^2}{\frac{1}{2g} \cdot F_a \cdot u^3 \cdot \gamma_m \cdot N_k} \dots (15a)$$

und haben damit natürlich wiederum eine dimensionslose Zahl erhalten. — Für Versuch 104 ist die Gütezah $\varepsilon = 0,183 \cdot 1,325 \cdot 0,510 = 0,123$.

Es bedarf kaum der Erwähnung, daß dieser Gütezah nicht eine derartige theoretische Bedeutung zukommt wie dem Gütegrad der thermischen Maschinen; sie gibt eine überwiegend praktische Bewertung der Maschine. — Man kann die Gütezah statt auf die Leistungsaufnahme an der Kupplung auch auf die der Antriebsmaschine (im Nenner) beziehen; in Analogie mit den Gütegraden und Wirkungsgraden der Kraftmaschinen erhält man dann die *gesamte Gütezah*:

$$\varepsilon_{\text{ges}} = \frac{N_c^2}{\frac{1}{2g} \cdot u^3 \cdot F_a \cdot \gamma_m \cdot N_1} \dots \dots \dots (15b)$$

Bei Antrieb des Maschinensatzes durch eine Wärmekraftmaschine ist dabei als N_1 entweder das verbrauchte Wärmegefälle oder ausnahmsweise die Wärmefangaufnahme einzuführen.

In Tabelle 86 sind die eben entwickelten kennzeichnenden Zahlen für die Versuche wechselnder Drehzahl (Tabelle 83) berechnet. Es zeigt sich merkliche Konstanz der Lieferzahl φ und der Druckzahl ψ , daher der Umsatzzahl $v = \varphi \cdot \psi$ bei unverändertem Düsenwert des äußeren Widerstandes.

139. Ventilator gegen wechselnden Düsenwert. Ein mit unveränderter Drehzahl laufender Ventilator kann gegen verschiedene Öffnung laufen. Dazu kann man im Prüffeld ein Drosselorgan in das Druckrohr setzen und es betätigen, oder man kann den vor das Druckrohr der Fig. 256 gesetzten Drosselflansch gegen einen solchen anderer Öffnung auswechseln. Letzteres hat den Vorteil, daß man die bestimmte Öffnung bequem immer wieder herstellen kann. Grenzwerte der anzuwendenden Öffnung sind einerseits die Öffnung Null — Druckrohr blind verflanscht —, andererseits „freier Ausblas“ — das Druckrohr ist einfach frei.

Wenn man die Drehzahl nicht künstlich nachregelt, so wird sie nicht genau konstant bleiben, sondern je nach der Art des Antriebes etwas abfallen, wenn mit steigender Öffnung der Leistungsumsatz größer wird. Am besten kann ein genügend starker Riementrieb — von einer größeren Transmission her betrieben — die Drehzahl halten. Ein Nebenschluß-Elektromotor fällt um so mehr ab, je mehr Widerstand zur Herabsetzung der Drehzahl vor den Anker geschaltet ist. Man hat daher immer wohl zu unterscheiden zwischen dem *Verhalten des Ventilators* bei einer bestimmten Drehzahl und andererseits dem *Verhalten der Ventilationsmaschine* — wobei die Rückwirkung des Ventilators auf die Drehzahl des Maschinensatzes mit beachtet ist.

In Tabelle 87 und Fig. 259 sind Versuchsergebnisse wiedergegeben. Der Antrieb geschieht durch Nebenschlußmotor, das Feld ist dauernd voll erregt. Die Drehzahl geht von 2590 auf 2350/min zurück, wenn die Öffnung von Null bis auf halben Durchmesser des Ausblasrohres gesteigert wird. Weiter bei voller Drehzahl zu öffnen ist nicht angängig, da dann die Stromaufnahme über das zulässige Maß zu weit hinausgegangen wäre.

Denn mit zunehmender Öffnung steigt dauernd die Leistungsaufnahme, einfach darum, weil die Luftmenge und daher auch die Nutzleistung anwächst; der Unterschied aber zwischen Leistungsaufnahme N_k und Nutzleistung N_e , das ist also der Verlust \mathfrak{S} im Ventilator, ist grundsätzlich konstant — für drei der Versuche sogar zufällig genau der gleiche. Der Wirkungsgrad wird daher mit zunehmender Öffnung immer besser.

Im letzten Teil der Tabelle 87 sind die Kennzahlen des Ventilators für diese Versuchsreihe ausgerechnet. Zunächst der Düsenwert, von dem in Abhängigkeit dann alle anderen Größen in Fig. 259 aufgetragen sind. Das Luftgewicht ist der Düse fast genau proportional; die mäßige Abwärtskrümmung der Kurve erklärt sich aus dem Abfall der Dreh-

zahl. Der erzeugte Druck fällt mit dem Öffnen des Ausblases mäßig ab, jedoch nur infolge des Abfalls der Drehzahl (*Kennlinie der Ventilationsmaschine*); bezieht man den Druck auf $n = 2500/\text{min}$ (eine *Kennlinie des Ventilators*), von dem Wurzelgesetz § 136 Gebrauch machend, so wird der erzeugte Druck etwa unabhängig von der Öffnung und fällt nur bei ganz geschlossenem Ausblas in jedem Fall merklich ab, wegen der Stoßverluste in der nur für mittlere Luftgeschwindigkeiten passenden Schaufelung.

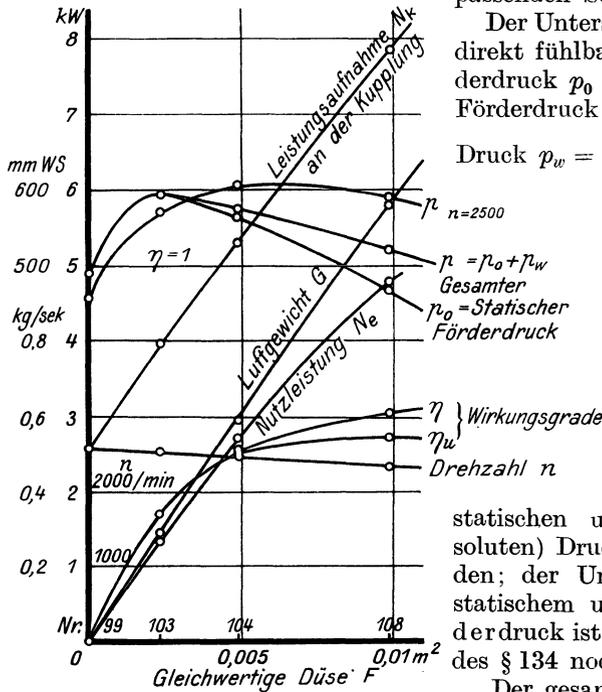


Fig. 259. Elektroventilator bei unveränderter Kontaktstellung, also annähernd konstanter Drehzahl, gegen wechselnden Düsenwert.

Der Unterschied zwischen dem direkt fühlbaren statischen Förderdruck p_0 und dem gesamten Förderdruck p ist der dynamische

$$\text{Druck } p_w = \frac{w_a^2}{2g} \cdot \gamma_a \cdot \text{Er geht also}$$

mit dem Quadrat der Luftmenge und wird daher Null für $F = 0$, nimmt dagegen mit steigender Düse recht merkliche Werte an. —

Es darf natürlich der statische und gesamte Förderdruck nicht mit dem statischen und gesamten (absoluten) Druck verwechselt werden; der Unterschied zwischen statischem und gesamtem Förderdruck ist in den Darlegungen des § 134 noch nicht gemeint.

Der gesamte Förderdruck ist der Unterschied zwischen den am Aus- und Eintrittanzurechnenden Drücke $p_2 - p_1$, für die eben

nach den Darlegungen des § 134 bald der statische, bald der gesamte Druck zu setzen ist. Nicht immer ist daher der gesamte Förderdruck und der statische Förderdruck gerade um den Geschwindigkeitsdruck am Auslaß verschieden.

140. Allgemeine Darstellung des Verhaltens eines Ventilators durch Kurvenscharen. Die Veränderung einerseits der Drehzahl (§ 136), andererseits des Düsenwertes (§ 139) gibt zusammen alle Möglichkeiten, wie ein Ventilator von außen beeinflusst werden kann: Man kann den Antrieb oder die Entnahme verschieden gestalten. (Über die spezifische Dichte des geförderten Gases, § 142, kann man nicht frei verfügen.) Den Einfluß zweier Veränderlicher kann man in jedem Fall in einem Netz von Kurvenscharen sehr übersichtlich zur Darstellung bringen, so wie Fig. 260 es als Beispiel zeigt.

Tabelle 87. Ventilator gegen wechselnden Düsenwert.
Vorschaltwiderstand des Elektromotors ausgeschaltet, Kontakt p.

Versuch Nr.		99	103	104	108	Ergänzt, Fig. 261 bis 264
1	Vorgeschaltete Öffnung in Bruchteilen . . . —	0	1/8	1/4	1/2	1/1
2	Durchmesser in Millimetern mm	0	70,7	100	141,4	200
3	Barometerstand <i>b</i> kg/m ²	10 300	10 300	10 410	10 410	—
4	Drehzahl <i>n</i> /min	2590	2560	2440	2350	(2250)
5	Luftgeschwindigkeit im Saugstutzen <i>w_e</i> . . . m/s	0	4,88	9,98	19,63	—
6	Angesaugtes Volumen <i>V_e</i> = 0,0491 · <i>w_e</i> . . . m ³ /s	0	2,39	4,90	9,64	—
7	Temperatur der angesaugten Luft <i>t_e</i> . . . °C	21,5	21,1	21,5	22,7	—
8	Spez. Gewicht der angesaugten Luft $\gamma_e = 0,0342 \cdot \frac{b}{273 + t_e}$ kg/m ³	—	1,195	1,210	1,20	—
9	Fördergewicht <i>G</i> = <i>V_e</i> · γ_e kg/s	0	0,286	0,592	1,160	2,05
10	Statischer Förderdruck <i>p₀</i> mm WS	492	594	564	464	—
11	Temperatur im Druckrohr <i>t_a</i> °C	∞32	30,2	28,8	28,7	—
12	Spezifisches Gewicht im Druckrohr $\gamma_a = 0,0342 \cdot \frac{b + p_0}{273 + t_a}$ kg/m ³	—	1,229	1,242	1,235	—
13	Herausgedrücktes Volumen <i>V_a</i> = $\frac{G}{\gamma_a}$. . . m ³ /s	0	0,233	0,476	0,940	—
14	Luftgeschwindigkeit im Druckrohr $w_a = \frac{V_a}{0,0314}$ m/s	0	7,42	15,15	29,9	—
15	Geschwindigkeitsdruck dazu <i>p_w</i> = $\frac{w_a^2}{2g} \cdot \gamma_a$ kg/m ²	0	3,5	14,5	56,3	—
16	Gesamt-Förderdruck <i>p</i> = <i>p₀</i> + <i>p_w</i> . . . kg/m ²	492	597	578	520	210
17	Reduziert auf <i>n</i> = 2500 : <i>p₂₅₀₀</i> = <i>p</i> · 2500 ² : <i>n</i> ² „	459	570	606	589	—
18	Mittlerer absoluter Druck <i>p_m</i> = $b + \frac{p}{2}$ kg/m ²	—	10 598	10 699	10 670	—
19	Mittleres Fördervolumen <i>V_m</i> = <i>V_e</i> · $\frac{b}{p_m}$. . . m ³ /s	0	0,232	0,476	0,940	1,65
20	Nutzleistung <i>N_e</i> = $\frac{1}{102} \cdot V_m \cdot p = N_0 + N_w$ kW	0	1,36	2,70	4,79	3,5
21	Leistungsaufnahme <i>N_k</i> „	2,59	3,95	5,29	7,84	11,7
22	Wirkungsgrad des Ventilators $\eta = \frac{N_e}{N_k}$ —	0	0,344	0,510	0,611	—
23	Verlust im Ventilator $\mathfrak{L} = N_k - N_e$. . . kW	2,59	2,59	2,59	3,05	—
24	Förderleistung <i>N₀</i> = $\frac{1}{102} \cdot V_m \cdot p_0$ kW	0	1,35	2,63	4,27	—
25	Beschleunigungsleistung <i>N_w</i> = $\frac{1}{102} \cdot \frac{G}{2g} \cdot w_a^2$ „	0	0,01	0,07	0,52	—
26	Unterer Wirkungsgrad $\eta_u = N_0 : N_k$. . . —	0	0,342	0,500	0,545	—
27	Düsenwert $F = V_m \cdot \sqrt{\frac{\gamma_m}{2g \cdot p}} = \sqrt{\frac{G \cdot V_m}{2g \cdot p}}$ m ² in Bruchteilen <i>F</i> : <i>F_a</i> —	0	0,00238	0,00497	0,00988	0,029
28	Lieferzahl $\varphi = V_m : \frac{u \cdot F_a}{u^2}$ —	0	0,076	0,158	0,315	—
29	Druckzahl $\psi = p : \frac{u^2}{2g} \cdot \gamma_m$ —	∞1	1,255	1,34	1,295	—
30	Umsatzzahl <i>v</i> = $\varphi \cdot \psi$ —	0	0,107	0,245	0,486	—
31	Druckzahl $\psi_0 = p_0 : \frac{u^2}{2g} \cdot \gamma_m$ —	∞1	1,245	1,305	1,155	—
32	Umsatzzahl <i>v₀</i> = $\varphi \cdot \psi_0$ —	0	0,106	0,239	0,433	—
33	Leistungszahl $\lambda = v : \eta$ —	—	0,311	0,480	0,796	—
34	Gütezahl $\varepsilon = v \cdot \eta$ —	0	0,0368	0,128	0,298	—

Dieser Figur entnehmen wir beispielsweise, daß der bisher untersuchte Ventilator, wenn er eine Luftmenge (im Zustande $\approx 10\ 400\ \text{kg/m}^2$

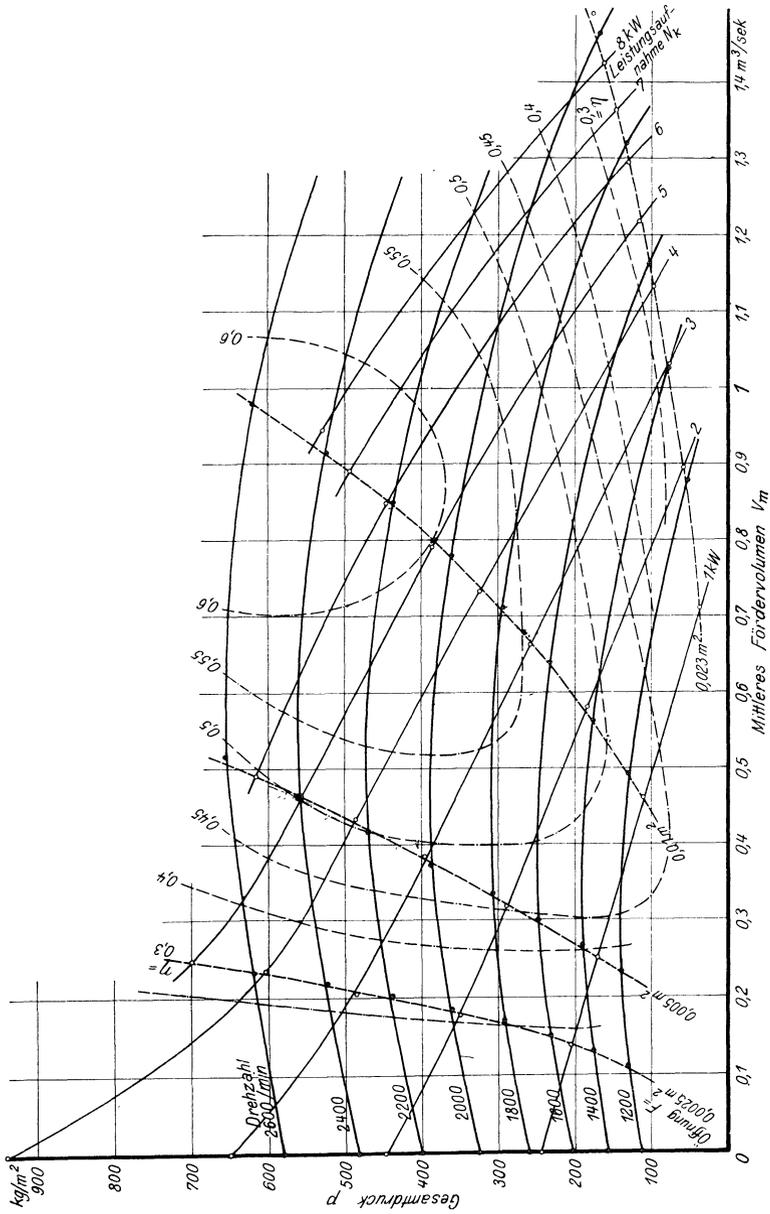


Fig. 260. Verhalten eines Ventilators.

und $\approx 21^\circ\text{C}$) $V_m = 0,8\ \text{m}^3/\text{s}$ gegen einen Düsenwert von $0,01\ \text{m}^2$ fördern soll, mit der Drehzahl 2030/min betrieben werden muß; es wird ein Druck von 380 mm WS entstehen, und es werden 5,0 kW Antriebs-

leistung dem antreibenden Elektro- od. dgl. Motor entnommen werden; der Wirkungsgrad des Ventilators wird $\eta = 0,60$ sein. Das sind alle Angaben, deren man bedarf, um ein Angebot oder Projekt sachgemäß zu entwerfen. Hat ein Werk für jeden seiner Ventilortypen ein Schaubild nach Fig. 260 aufgestellt, so kann das Offertbüro auf jede Anfrage die passendste Type auffinden und die Bedingungen nennen, unter denen der Ventilator arbeiten wird. Wäre beispielsweise nach der Luftmenge $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ gegen 650 mm WS zu fördern gefragt, so würde unser Ventilator nicht geeignet sein, da er diese Verhältnisse zwar mit einer Drehzahl $2620/\text{min}$ beherrscht, aber nur mit schlechtem Wirkungsgrad, $\eta < 0,45$.

Um das Schaubild Fig. 260 zu erhalten, wurde wie folgt vorgegangen: Es wurden Versuchsreihen unter systematischer Veränderung der äußeren Bedingungen gemacht, so zwar, daß bei jeder der in § 139 verwendeten Öffnungen nochmals die Drehzahl verändert wurde. Die Ablösungen und die wichtigsten Rechnungsergebnisse zeigt Tabelle 88.

Aus diesem Rechnungsergebnis sind indessen die Kurven konstanter Leistungsaufnahme, konstanter Drehzahl und konstanten Wirkungsgrades nicht sofort aufzuzeichnen, weil die Werte dieser Größen jeweils zufällige sind und nicht gerade glatte Zahlen. Man muß daher die glatten Werte durch Interpolation finden. Das soll für die gesuchten Kurvenscharen in zweifach verschiedener Art gemacht werden.

Zunächst die Kurvenscharen gleicher Drehzahl und gleicher Leistung finden wir mittels der Hilfsfiguren Fig. 261 bis 264. Hier sind jedesmal als abhängig von der gesuchten Größe n und N_k die Koordinaten des zu ermittelnden Bildes, also p und V_m , aufgetragen. In jedem der Bilder ergeben sich Kurven gleicher Öffnung und Kurven gleicher Kontaktstellung — dies waren die willkürlich veränderten Werte. Bei der Auftragung von p über n ergäben sich Parabeln, die unbequem zu zeichnen wären und genaues Interpolieren nicht gestatteten; deshalb wurde p über n^2 aufgetragen, die fast gradlinigen Kurven gestatten genauestes Interpolieren.

In Fig. 261 bis 264 erweist sich das Aufzeichnen sich kreuzender Kurvenscharen als empfindliches Mittel zum Auffinden von Versuchsungenauigkeiten und Rechenfehlern und zum Ergänzen fehlender Versuchspunkte. So fällt der Kreuzungspunkt $f = 1/1$ mit Kontakt a in Fig. 261 eindeutig zu hoch, in Fig. 262 ist eine tiefere Lage kein Widerspruch; in Fig. 263 und 264 liegen die Punkte gut. Also muß V_m bei diesem Versuch (Nr. 90) schlecht bestimmt sein; es wurde die Rechnung bis ins Originalprotokoll zurückverfolgt, sie erwies sich als richtig. Demnach liegt eine Versuchsungenauigkeit vor, die man zuverlässig dadurch unschädlich machen kann, daß man den gekreuzten Punkt (schwer zu erkennen), natürlich in Fig. 261 und 262 übereinstimmend, an Stelle des Originalpunktes gelten läßt. — Ebenso kann man mit großer Sicherheit den Punkt $f = 1/1$, Kontakt p ergänzen, der sich wegen des großen Leistungsbedarfes ($N_k \approx 12 \text{ kW}$, Fig. 262 und 264) nicht ohne Schädigung des Elektromotors hätte finden lassen.

In den Hilfsfiguren kann man nun der Reihe nach für $n = 1200, 1400, 1600 \dots /\text{min}$, andererseits für $N_k = 1, 2, 3 \dots \text{kW}$ die zu-

Tabelle 88. Verhalten eines Ventilators bei wechselnder Durchmesser des Saugrohres 250 mm, des Druckrohres 200 mm.

Versuch Nr.	96	97	98	99	100	101	102	103
1 Barometerstand b mm QS	758 mm QS = 10 300 kg/m ²							
2 Öffnung f	0	0	0	0	1/8	1/8	1/8	1/8
3 Kontaktstellung k . . Nr.	a	e	h	p	a	e	h	p
4 Drehzahl n /min	1575	1990	2220	2590	1440	1800	2100	2560
5 Stat.Förderdruck p_0 mmWS	200	323	404	492	171	295	395	594
6 Luftgeschwindigkeit im Saugrohr w_s . . . m/s	0	0	0	0	2,78	3,55	3,90	4,88
7 Leistungsaufnahme N_k an der Kupplung . kW	0,75	1,44	1,85	2,59	0,92	1,63	2,35	3,95
8 Temper. im Saugrohr t_s °C	—	—	—	—	21,5	21,3	21,1	21,1
9 „ im Druckrohr t_d „	—	—	—	—	27,0	27,3	27,9	30,2
10 Steigerung $t_d - t_s$. . „	—	—	—	—	5,5	6,0	6,8	9,1
11 $V_a = G/\gamma_a$ m ³ /s	0	0	0	0	0,1363	0,1725	0,1890	0,233
12 $p_w = \frac{1}{2} \cdot w_s^2 \cdot \gamma_a$. mm WS	0	0	0	0	1,15	1,86	2,26	3,47
13 $p = p_0 + p_w$. . . „	200	323	404	492	172	297	397	597
14 $V_m = V_e \cdot b/p_m$. . m ³ /s	0	0	0	0	0,131	0,171	0,188	0,232
15 $N_e = \frac{1}{10^3} \cdot V_m \cdot p$. . kW	0	0	0	0	0,221	0,497	0,732	1,357
16 $N_0 = \frac{1}{10^3} \cdot V_m \cdot p_0$. . „	0	0	0	0	0,219	0,495	0,728	1,350
17 $N_w = \frac{1}{10^3} \cdot V_a \cdot p_w$. . „	0	0	0	0	0,00154	0,00318	0,00416	0,00766
18 $\eta = N_e : N_k$	0	0	0	0	0,241	0,305	0,312	0,344
19 $\eta_0 = N_0 : N_k$	0	0	0	0	0,238	0,302	0,310	0,342

einandergehörigen Werte von V und p entnehmen, nämlich diejenigen, die zu gleicher Öffnung gehören; die entnommenen Werte bestimmen die in Fig. 260 als Kreise und als gekreuzte Kreise angeordneten Punkte, die je unter sich eine Kurve gleicher Öffnung ergeben. Daher sollten auch für die Öffnung $1/2$ die Punkte aus den N -Werten und aus den n -Werten dieselbe Kurve ergeben — die mäßige Abweichung deutet auf Unstimmigkeiten beim Aufzeichnen der grundlegenden Kurven.

In dieser Weise sind die Kurven gleicher Drehzahl und gleicher Leistung entstanden und zugleich die Kurven gleicher Öffnung erhalten worden. Die wichtigsten Wirkungsgradkurven

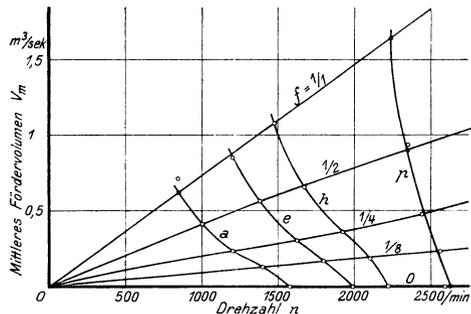


Fig. 261.

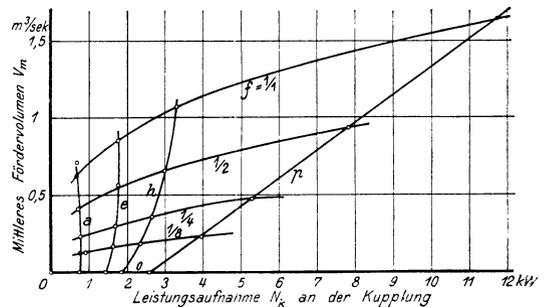


Fig. 262.

Fig. 261 bis 264. Zur Ermittlung der N_k - und n -Kurven

Drehzahl und gegen wechselnden Düsenwert.
 Durchmesser des Laufrades 650 mm, Breite außen 68 mm.

93	94	95	104	105	106	107	108	90	91	92
769 mm QS = 10 450 kg/m ²				766 mm QS = 10 410 kg/m ²				769 mm QS = 10450 kg/m ²		
1/4 a	1/4 e	1/4 h	1/4 p	1/2 a	1/2 e	1/2 h	1/2 p	1 a	1 e	1 h
1200 139	1625 252	1925 351	2440 564	1000 80	1380 154	1670 230	2350 464	845 -2	1200 +5	1475 11
4,80	6,30	7,50	9,98	8,40	11,62	13,58	19,6	14,55	17,45	22,1
0,785	1,685	2,66	5,29	0,72	1,77	2,99	7,84	0,69	1,77	3,21
20,3	20,2	19,6	21,5	22,0	22,2	22,7	22,7	19,9	20,4	20,1
21,8	22,9	24,0	23,8	23,3	24,2	25,7	28,7	20,5	21,5	21,8
1,5	2,7	4,4	7,3	1,3	2,0	3,0	6,0	0,6	1,1	1,7
0,234	0,304	0,360	0,476	0,410	0,565	0,658	0,940	0,716	0,856	1,091
3,14	5,90	8,31	14,5	10,5	20,0	27,2	56,3	32,2	45,9	74,8
142	258	359	578	90	174	257	520	30	50	86
0,234	0,301	0,362	0,476	0,411	0,566	0,657	0,940	0,713	0,852	1,075
0,326	0,762	1,272	2,700	0,363	0,966	1,655	4,790	0,210	0,426	0,902
0,319	0,743	1,248	2,630	0,322	0,844	1,480	4,270	-0,0137	0,0418	0,116
0,00720	0,0174	0,0295	0,0676	0,0423	0,111	0,175	0,514	0,225	0,383	0,785
0,415	0,452	0,480	0,510	0,503	0,546	0,555	0,611	0,304	0,241	0,272
0,406	0,442	0,470	500	0,448	0,476	0,495	0,545	-0,0199	0,0236	0,0351

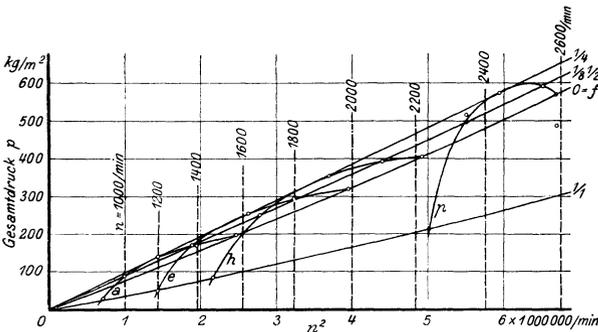


Fig. 263.

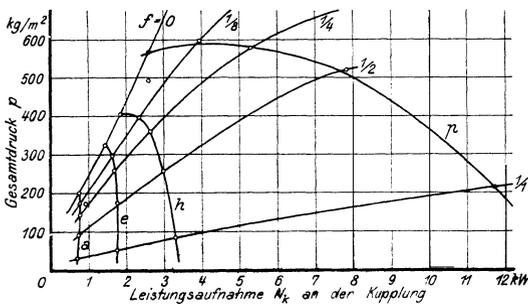


Fig. 264.

in Fig. 260; Ausgleichen von Versuchsfehlern.

lassen sich zwar in gleicher Weise zeichnen, schneller und bequemer jedoch wie folgt: Nachdem die bisherigen Kurven eingetragen sind, hat man für jeden beliebigen Punkt des Feldes die Werte von V_m , p und N_k und findet daraus für den Punkt

$$\eta = \frac{V_m \cdot p}{102 \cdot N_k}$$

Diese Ermittlung ist in Fig. 265 für die gekennzeichneten Punkte glatten Wertes von N_k und p geschehen, und die η -Werte sind an die Punkte geschrieben. Man kann nun die η -Kurven ohne weiteres durch die Punkte hindurchlegen.

141. Allgemeine Darstellung des Verhaltens eines Ventilators durch Kennzahlen. In Tabelle 86 ergab sich, daß die Lieferzahl λ , die Druck-

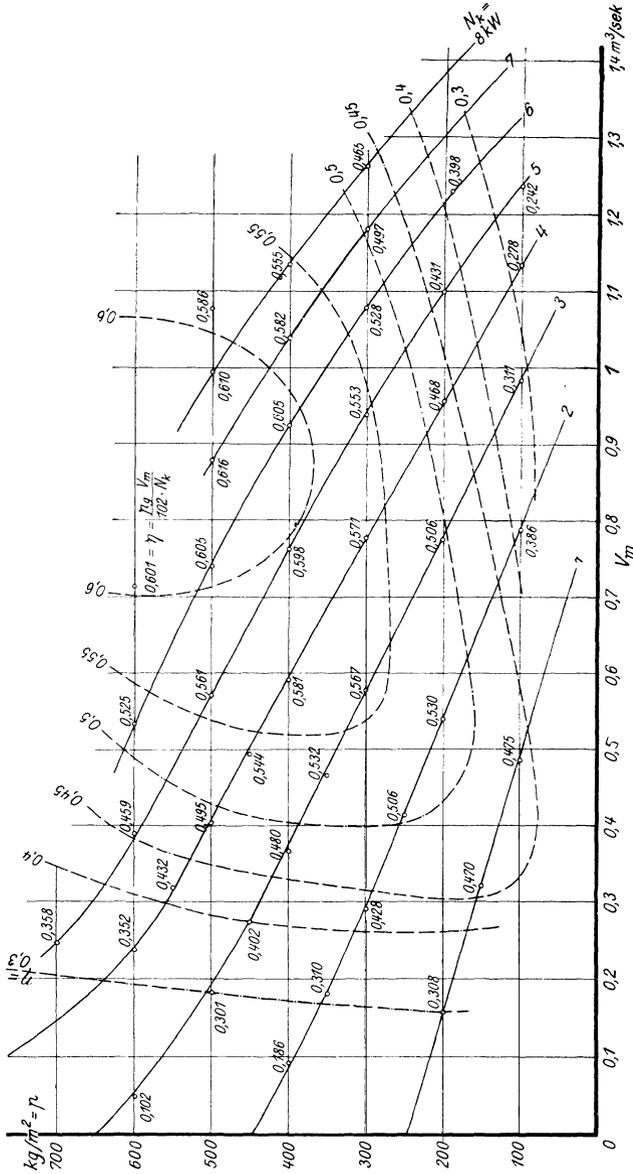


Fig. 265. Aufinden der Wirkungsgradkurven in Fig. 260.

zahl ψ und die Umsatzzahl v von der Drehzahl fast unabhängig ist.

Wir tragen diese Größen abhängig vom Düsenwert $V_m \cdot \sqrt{\frac{\gamma_m}{2 g p}}$ auf, gegen den der Ventilator fördert und der (quadratisch umgekehrt pro-

portional) ein Maß für den Widerstand ist, den das Rohrnetz od. dgl. dem Luftdurchgang bietet, so haben wir Kurven Fig. 266, die das Verhalten des Ventilators nicht nur bei wechselnder Öffnung, sondern auch bei jeder Drehzahl, das heißt also für alle nur möglichen äußeren Verhältnisse annähernd darstellt.

Statt die dimensionslosen Werte φ , ψ und ψ_0 , v und v_0 abhängig vom Düsenwert F_0 in Quadratmeter und daher für die besondere Ventilatorgröße gültig zu geben, kann man noch weiter gehend die übrigen Werte abhängig von φ auftragen. Man erhält dann in Fig. 267 eine gänzlich dimensionslose Darstellung.

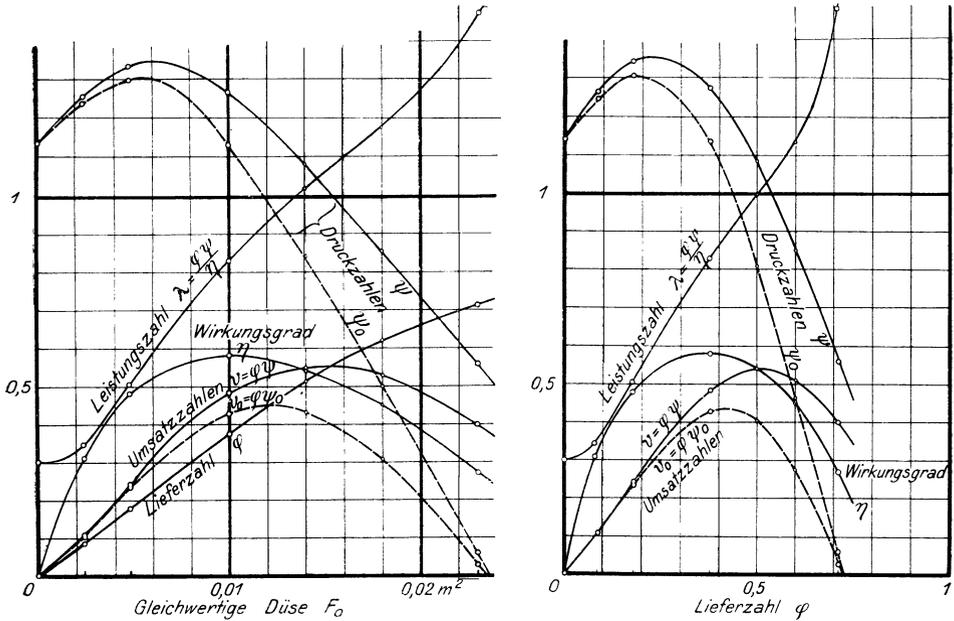


Fig. 266 und 267. Kennzahlen eines Ventilators.

Zu der Aufstellung dieses Diagrammes genügt eine einfache Versuchsreihe bei wechselnder Öffnung. In Tabelle 87 fehlt allerdings ein Versuch mit offenem Ausblas, weil dabei die Leistungsaufnahme zu hoch geworden wäre. Da indessen die Drehzahl für Ermittlung der dimensionslosen Kennzahlen ganz herausfällt, so kann man den letzten Punkt der Fig. 266 und 267 aus einem Versuch bei geringerer Drehzahl aber ganz freiem Ausblas finden, und man kann hieraus sogar rückwärts die Werte berechnen, die dem freien Ausblas bei voller Drehzahl zugeordnet sind. Für freien Ausblas ist nämlich nach Fig. 266:

$$\begin{aligned}
 F_0 &= 0,023 \text{ m}^2 \\
 \varphi &= 0,715 \\
 \psi &= 0,56 \\
 \psi_0 &= 0,07
 \end{aligned}$$

Also ist bei voller Drehzahl, die wir für Tabelle 87 etwa auf $n = 2250/\text{min}$ schätzen können:

die Umfangsgeschwindigkeit $u = \frac{2,04 \cdot 2250}{60} = 76,5 \text{ m/s}$,

das mittlere Fördervolumen $V_m = \varphi \cdot u \cdot F_a = 0,715 \cdot 76,5 \cdot 0,0314 = 1,172 \text{ m}^3/\text{s}$,

das Fördergewicht $G = V_m \cdot \gamma_m = 1,72 \cdot 1,24 = 2,13 \text{ kg/s}$,

der statische Förderdruck $p_0 = \psi_0 \cdot \frac{u^2}{2g} \cdot \gamma_m = 26 \text{ kg/m}^2$,

der Gesamtförderdruck $p = \psi \cdot \frac{u^2}{2g} \cdot \gamma_m = 207 \text{ kg/m}^2$.

Daher wird weiterhin

$$\text{die Nutzleistung } N_e = \frac{1}{102} \cdot V_m \cdot p = 3,50 \text{ kW},$$

und wenn wir den Verlust im Ventilator, der schon beim letzten Versuch 108 der Tabelle 87, Zeile 23 steigende Tendenz hat, zu 3,5 kW schätzen, so ist

die Leistungsaufnahme 7,0 kW,

der Wirkungsgrad $\eta = 3,50 : 7,0 = 0,50$,

alles für freien Ausblas bei höchster Drehzahl, Kontaktstellung p .

Die so erhaltenen Ergänzungen weichen merklich von den in Tabelle 87 eingetragenen, nach Fig. 261 bis 264 ergänzten ab. Man braucht, um diese Werte versuchsmäßig zu finden, einen ganz besonders vergrößerten Antriebsmotor. Für Laboratoriumszwecke empfiehlt sich die Beschaffung eines solchen in jedem Fall.

In Fig. 260 laufen in dem praktisch wichtigen Bereich — bei den höheren Drehzahlen — die Kurven des Wirkungsgrades mit denen gleicher Öffnung etwa in derselben Richtung. Einer bestimmten Öffnung kann man daher näherungsweise einen bestimmten Wirkungsgrad zuordnen. Für die Öffnung $1/2$ insbesondere schneiden sich freilich beide Kurvenscharen, aber hier durchläuft der Wirkungsgrad einen Höchstwert, in dessen Nähe er sich auch nur allmählich ändert. So kommt es, daß man etwa folgende Tabelle als im wesentlichen unabhängig von der Drehzahl aufstellen kann:

$$\begin{array}{cccccc} F = 0 & 1/8 & 1/4 & 1/2 & 1/1 \\ \eta = 0 & 0,31 & 0,48 & 0,58 & 0,27 \end{array}$$

Diese Kurve, wenn auch nur näherungsweise gültig, vervollständigt Fig. 266 in ihrer Allgemeinheit. Kennen wir hiernach η , so können wir auch die aus § 138 bekannte Leistungszahl

$$\lambda = \frac{\varphi \psi}{\eta} \dots \dots \dots (16)$$

finden, die ein Maß für die vom Ventilator verbrauchte Leistung gibt, während $v = \varphi \psi$ ein solches für die Nutzleistung desselben lieferte. Fig. 266 und 267 geben auch diese Kurve.

142. Einfluß der Gasdichte. Mit verschiedener Dichte des vom Ventilator zu fördernden Gases hat man aus mehrfachen Gründen zu rechnen. Es kann sich um Förderung anderer Gase als Luft handeln; es kann der Gaszustand — Temperatur und Druck — sich ändern; ein Sonderfall des letzteren ist noch der Unterschied zwischen Verwendung des sonst unter gleichen Verhältnissen arbeitenden Ventilators einmal zum Drücken, einmal zum Saugen.

Regelmäßig ist mit den *Änderungen des Luftzustandes* zu rechnen. Der Einfluß derselben geht aus der Versuchsreihe Tabelle 89 hervor, in der der Ventilator, jeweils gegen dieselbe Öffnung von 100 mm Durchmesser arbeitend, mit wechselnder Drehzahl betrieben wurde — je eine

Tabelle 89. Ventilator bei verschiedenem Barometerstand.

12. Jan. 1912. B. Std. 785 mm		24	25	26	27	28	
24. „ 1912. „ 764 „ Vers. Nr. {		31	32	33	34 · 36	35 · 37	
2. Febr. 1912. „ 744 „		39	40	41	42	43 · 44	
Kontakt	Nr.	f	h	k	m	p	
1	Drehzahl n /min	1768	1935	2085	2245	2440	
		1779	1955	2100	2265	2450	
		1785	1970	2115	2273	2478	
2	Statischer Förderdruck p_0 mm WS	303	363	416	494	578	
		298	357	410	486	568	
		292	353	406	481	567	
3	Mittleres Fördervolumen V_m m ³ /s	0,343	0,376	0,402	0,438	0,474	
		0,346	0,378	0,406	0,442	0,478	
		0,346	0,381	0,409	0,444	0,483	
4	Spezifisches Gewicht der eingesaugten Luft γ_e kg/m ³	1,254					
		1,216					
		1,188					
5	Mittleres spezifisches Gewicht $\frac{\gamma_e + \gamma_a}{2}$ kg/m ³	1,267	1,266	1,267	1,270	1,270	
		1,228	1,229	1,230	1,232	1,235	
		1,199	1,198	1,201	1,203	1,206	
6	Förderhöhe $H = \frac{p_0}{\gamma_m}$ m LS	239	287	328	389	455	
		243	290	333	394	460	
		244	295	338	400	470	
7	Temperatursteigerung $t_2 - t_1$. . °C	2,7	3,9	5,2	6,0	7,5	
		2,7	3,9	4,7	6,0	7,3	
		2,9	3,6	5,0	5,8	7,2	
8	Leistungsaufnahme N_{el} kW	2,65	3,28	4,00	5,04	6,20	
		2,56	3,14	3,75	4,72	5,90	
		2,60	3,15	3,57	4,75	6,04	
9	Verhältniszahlen $\frac{n^2}{p_0}$ —	10 320	10 320	10 030	10 200	10 290	10 230
		10 610	10 410	10 750	10 550	10 560	10 580
		10 910	10 990	11 010	10 740	10 830	10 900
10	„ • $\frac{n^2 \cdot \gamma_m}{p_0} = \frac{n^2}{H}$ —	13 090	13 070	13 050	12 950	13 060	13 040
		13 030	12 800	13 220	13 000	13 040	13 020
		13 080	13 160	13 220	12 920	13 060	13 090
11	„ $V_m \cdot p_0$ —	104	136	167	216	274	
		103	135	166	215	271	
		101	134	166	214	274	

Reihe aufgenommen an Tagen tunlichst verschiedenen Barometerstandes. Die Lufttemperatur war in allen Fällen fast genau die gleiche, was durch Temperieren erreicht worden war. Die Änderung des Luftdruckes um $785 - 744 = 41$ mm bedeutet immerhin 5,4% des mittleren Barometerstandes von 760 mm.

Die zerstreute Versuchszeit läßt kleinere Unregelmäßigkeiten durch Änderungen im Ventilatorzustand erklären; im großen zeigt sich deutlich eine *Abgleichung aller Größen gegeneinander*. Obwohl die Netzspannung für den Elektromotor sauber gleich gehalten worden war, nahm mit sinkendem Barometerstand die Drehzahl schwach zu, trotzdem nahm der Förderdruck p ab. Die in Metern Luftsäule gerechnete Förderhöhe $H = \frac{p}{\gamma_m}$ indessen nimmt zu, nicht mehr jedoch als der Zunahme der Drehzahl entspricht; um das zu zeigen, sind die Verhältniszahlen $\frac{n^2}{H}$ gebildet, die merklich konstant sind. Einer bestimmten Dichte ist also eine gewisse Förderhöhe, nicht aber ein bestimmter Druck zugeordnet.

Die mittlere Fördermenge V_m , als Volumen gemessen, ist bei gleicher Öffnung einfach durch die Förderhöhe gegeben; sie geht daher nur entsprechend der Drehzahländerung entgegen der Dichte; das geförderte Luftgewicht dagegen wäre mit der Dichte gewachsen. Das Produkt $V_m \cdot p$, ein Maß für die Nutzleistung, sinkt mit der Dichte, daher tut dasselbe die Leistungsaufnahme N_{el} , und hieraus erklärt sich die eingangs erwähnte mäßige Erhöhung der Drehzahl mit abnehmender Luftdichte. Es handelt sich also um eine gegenseitige Einwirkung der verschiedenen Größen aufeinander. — Änderung der Lufttemperatur hätte ganz ebenso gewirkt.

Wenn der Ventilator einmal drückend, einmal saugend zur Anwendung kommt, wenn also die Öffnung von wieder 100 mm Durchmesser einmal im Druck-, einmal im Saugstutzen liegt und der jeweils andere frei ist, dann bedeutet der Übergang von der einen zur anderen Betriebsart — bei gegebener Kontaktstellung des Reglers — ebenfalls eine Änderung in der mittleren Dichte der Luft, und zwar in wechselndem Betrage je nach dem gerade erzeugten Druckanstieg. Sehr deutlich zeigen sich daher ganz ähnliche Erscheinungen, Tabelle 90.

Verwendung *verschiedener Gasarten* endlich würde nochmals die gleichen Erscheinungen zeitigen, am krassesten bei der Förderung von Wasserstoff statt Luft.

143. Einfluß des Ventilatorzustandes. Von wesentlichem Einfluß auf die Wirtschaftlichkeit ist die Einstellung des Ringspaltes des Ventilators.

Einerseits darf er nicht so gestellt sein, daß durch Reibung der Arbeitsverbrauch ungebührlich wächst. Andererseits kommt zu weite Einstellung hinaus auf eine Vergrößerung des Düsenwertes, gegen den das Rad arbeitet, wobei die durch den Spalt gehende Menge zwar Arbeit verbraucht, aber nicht nutzbar gefördert wird. Man kann auch wie folgt

Tabelle 90. Ventilator drückend und saugend.

	Drückend Saugend Kontakt	Versuch Nr. { Nr.	45	46	47	48	49
			f	h	k	m	p
1	Drehzahl n /min {		1770 1775	1930 1935	2082 2088	2225 2238	2432 2448
2	Druck p_0 mm WS { $\Delta =$		301 299 -2	354 352 -2	412 407 -5	483 477 -6	572 563 -9
3	Mittl. Fördervolumen V_m . m ³ /s {		0,343 0,363	0,372 0,394	0,401 0,426	0,434 0,463	0,474 0,511
4	Spez. Gewicht der eingesaugten Luft γ_e kg/m ³ {		1,250 1,214	1,250 1,207	1,250 1,202	1,250 1,192	1,250 1,182
5	Mittl. spez. Gewicht γ_m . „ {		1,260 1,223	1,263 1,219	1,265 1,215	1,267 1,208	1,269 1,201
6	Förderhöhe $H = \frac{p_0}{\gamma_m}$ m LS {		239 245	280 289	326 335	365 395	451 469
7	Temperatursteigerung $t_2 - t_1$ °C { $\Delta =$		3,7 4,2 +0,5	4,3 4,55 +0,25	4,9 5,15 +0,25	6,05 6,0 -0,05	7,05 7,15 +0,10
8	Leistungsaufnahme N_{el} . . kW {		3,58 3,70	4,12 4,18	4,62 4,66	5,32 5,41	6,42 6,46
9	Verhältniszahlen $\frac{n^2}{H}$ — {		13 110 12 880	13 300 12 970	13 290 13 000	13 580 12 660	13 200 12 780

sagen: Da ein Teil der vom Rad geförderten Luft durch den Ringspalt wieder verloren geht, so muß man unterscheiden zwischen dem Düsenwert, gegen den das Rad arbeitet, und dem Düsenwert, gegen den der Ventilator arbeitet. Ersterer ist für die Leistungsaufnahme, letzterer für die geförderte Menge und für die Nutzleistung maßgebend. Beide Düsenwerte sollten möglichst einander gleich werden. Wenn also in Fig. 260 ein gewisser Zustand der inneren und äußeren Betriebsverhältnisse des Ventilators durch folgende Zahlen gekennzeichnet ist:

$$V_m = 0,8 \text{ m}^3/\text{s}, \quad F = 0,01 \text{ m}^2, \quad n = 2030/\text{min}, \quad p = 380 \text{ mm WS}, \\ N_k = 5,0 \text{ kW}, \quad \eta = 0,60,$$

so möge durch Erweiterung des Spaltes der Düsenwert gleichsam (nicht nutzbar) auf $F = 0,012 \text{ m}^2$ vergrößert sein. Die Drehzahl wird dabei etwas abfallen, wieviel, hängt von den Eigenschaften des Elektromotors ab, wir schätzen, auf 2020/min. Dann gehören zu $F = 0,012$, $n = 2020$ folgende Werte der Förderung des Rades (Fig. 260):

$$V_m = 0,91 \text{ m}^3/\text{s}, \quad p = 350 \text{ mm WS}, \quad N_k = 5,3 \text{ kW}.$$

Nun sind aber nicht diese 0,91 m³/s als nutzbar anzusetzen; denn ein Teil der Förderung des Rades strömt eben durch den Spalt zurück. Die nutzbar bei 350 mm statt 380 mm Druck geförderte Menge findet sich aus der gleichwertigen Öffnung des äußeren Kreises, der 0,01 m²

geblieben ist, oder einfach aus der Beziehung $V_m = 0,8 \cdot \sqrt{\frac{350}{380}} = 0,77$.

So gilt also für den Ventilator im lässigen Zustande bezogen auf die nutzbare Luftförderung

$$V_m = 0,77 \text{ m}^3/\text{s}, \quad F = 0,01 \text{ m}^2, \quad n = 2020/\text{min}, \quad p = 350 \text{ mm WS}, \\ N_k = 5,3 \text{ kW}, \quad \text{also } \eta = 0,50.$$

Danach ist durch die Vergrößerung des Spaltes die Fördermenge und der Druck je etwas herabgegangen, trotzdem ist die Leistungsaufnahme gestiegen; der Wirkungsgrad ist also erheblich verschlechtert.

So liegen die Verhältnisse, weil der Ausgangszustand sich bereits im absteigenden Ast der Kennlinien (gleicher Drehzahl) befindet. Für einen Punkt im Scheitel der Kennlinien, etwa

$$V_m = 0,37 \text{ m}^3/\text{s}, \quad p = 390 \text{ mm WS} \text{ entsprechend } F = 0,005 \text{ m}^2, \\ n = 2000/\text{min}, \quad N_k = 3,0 \text{ kW}, \quad \eta = 0,47$$

würde der Druck kaum merklich, nämlich nur entsprechend der Verringerung der Drehzahl bei wachsender Leistung, absinken, und die ins äußere Netz gehende Luftmenge würde daher auch fast unverändert bleiben. Mag $n = 1980/\text{min}$ geworden sein — je nach den Eigenschaften des antreibenden Motors —, so möge die Vergrößerung der Öffnung durch Lässigkeit wieder $0,002 \text{ m}^2$ betragen. Dann wird für das Rad $F = 0,007 \text{ m}^2$, und dazu gehört nach Fig. 260:

$$V_m = 0,54 \text{ m}^3, \quad p = 380 \text{ mm WS}, \quad N_k = 3,6 \text{ kW}.$$

Für die nutzbare Lieferung aber ist $V_m = 0,37 \cdot \sqrt{\frac{380}{390}} \approx 0,37$, und daher gilt für den Ventilator im lässigen Zustand

$$V_m \approx 0,37 \text{ m}^3/\text{s}, \quad F = 0,005 \text{ m}^2, \quad n = 1980/\text{min}, \quad p = 380 \text{ mm WS}, \\ N_k = 3,6 \text{ kW}, \quad \eta = 0,38.$$

Diesmal ist also die Luftförderung fast unverändert, und die Verschlechterung des Wirkungsgrades hat nur in der Vermehrung der Leistungsaufnahme ihren Grund.

Solange wir uns gar im linken, ansteigenden Ast der Kennlinie bewegen, kann eine Vergrößerung der Lässigkeit sogar zu einer Vermehrung des Druckes und damit der nutzbaren Luftförderung führen, natürlich ist auch dann eine Verschlechterung des Wirkungsgrades damit verknüpft.

Die ganzen Verhältnisse sind denen bei der Kreiselpumpe durchaus gleich. Wie dort (§ 131), so kann man auch hier die wechselnde Lässigkeit versuchsmäßig durch eine abstellbare Umlaufleitung nachahmen.

d) Kompressor und Luftpumpe.

144. Leistung, Aufwand. Es kann hier zunächst auf das in § 133 Gesagte Bezug genommen werden.

Danach unterscheiden sich *Kompressoren* und *Luftpumpen* von den Ventilatoren dadurch, daß sie größere Druckstufen überwinden, so daß die thermodynamischen Wirkungen der Kompression erheblich werden; Kompressoren haben das Diagramm oberhalb, Luftpumpen unterhalb

der Atmosphärenlinie, ohne daß indessen diese Unterscheidung streng und allgemein durchgeführt würde; auch haben manche Kompressoren einen Teil des Diagrammes unterhalb, einen Teil desselben oberhalb der Atmosphärenlinie. Da das Kompressordiagramm im Grunde die Umkehrung des Dampfmaschinenendiagrammes ist, so kommt es, wenigstens für die Beurteilung der Arbeitsumsätze, auf die Lage der Atmosphärenlinie zum Diagramm überhaupt nicht an, so wenig wie beim Dampfmaschinenendiagramm.

Als *Gebälse* bezeichnet man Kompressoren für höchstens 0,5 at Gegendruck.

Als *Nutzarbeit* des Kompressors gilt der theoretische Arbeitsaufwand bei isothermischer Verdichtung des Gases, der durch die Gleichung des § 133

$$N_e = V_1 p_1 \cdot \ln \frac{p_2}{p_1} \text{ mkg} \dots \dots \dots (1)$$

gegeben ist. Für Annahme der isothermischen Zustandsänderung als normal spricht neben den in § 133 angeführten noch der praktische Grund, daß man für andere Gase als Luft die spezifischen Wärmen c_p und c_v oder deren Verhältnis $\kappa = c_p/c_v$ nicht zu kennen braucht, um den theoretischen Arbeitsbedarf zu berechnen; für die bei Kühlanlagen verwendeten Stoffe sind diese Konstanten, zumal für verschiedene Drucke, nur unvollkommen bekannt. Nur bei isothermischer Änderung spielt aber dies Verhältnis keine Rolle.

Die in § 134 gegebenen Betrachtungen über die *Anrechnung der Geschwindigkeitshöhen* gelten theoretisch für Kompressoren wie für Ventilatoren; praktisch treten sie bei Kompressoren ganz zurück. Denn wenn in einem solchen die Luft die Geschwindigkeit 30 m/s annimmt, so ist das gleichwertig mit $\frac{30^2}{19,6} = 46$ m Luftsäule, das sind also je nach dem an der betrachteten Stelle herrschenden Luftzustand der Größenordnung nach jedenfalls auch etwa 46 mm WS = 0,0046 at; diese Zahl hat keine Bedeutung im Vergleich zu Drucken von beispielsweise 0,5 at.

Der Wirkungsgrad aller jetzt zu betrachtenden Maschinen nimmt daher unter Vernachlässigung der Geschwindigkeitshöhen einfach auf die wirklich indizierte Leistung oder auf die Nutzarbeit der isothermischen Kompression Bezug, und der nutzbare Druck ist einfach der statische.

145. Volumetrischer Wirkungsgrad, Lieferungsgrad. Unter dem *volumetrischen Wirkungsgrad* eines Kolbenkompressors versteht man das im Indikator diagramm auf der Atmosphärenlinie abgeschnittene Volumen im Vergleich zu dem Hubvolumen des Kolbens, das durch die Diagrammlänge dargestellt wird. Der volumetrische Wirkungsgrad ist also in dem Diagramm Fig. 268, bei dem der Kompressor aus der Atmosphäre saugt, durch das Verhältnis

$$\eta_{\text{vol}} = \frac{b c}{a b}$$

dargestellt; in Fig. 268 ist $\eta_{\text{vol}} = 85,9 : 98,3 = 0,874$.

Diese Angabe gilt im Regelfall, wo der Kompressor aus der Atmosphäre ansaugt. In anderen Fällen, z. B. wenn die Luftpumpe aus

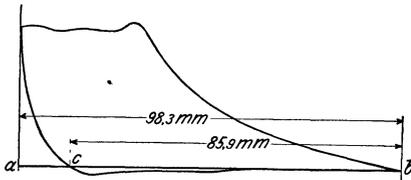


Fig. 268. Bestimmung des volumetrischen Wirkungsgrades aus dem Diagramm.
1/2 n. Gr.

einem Raum unter Vakuum oder wenn der Kühlkompressor aus einem Raum unter Druck ansaugt, muß der volumetrische Wirkungsgrad auf den Druck im Ansaugeraum bezogen werden. Die Atmosphärenlinie wird beim Aufnehmen des Indikator-diagrammes nur gezogen, um unter Beachtung des Federmaßstabes die Linie des Saugdruckes parallel zu

ihr einzeichnen zu können. So zeigt Fig. 269 zwei Diagrammpaare eines Schwefligsäure-Kompressors für Kühlzwecke; gleichzeitig mit ihrer Entnahme war der Druck p_s im Saugraum abgelesen worden wie folgt:

um 10^h 50^m: $p_s = + 0,37$ at entsprechend $+ 5,5$ mm,
um 6^h 05^m: $p_s = - 0,38$ at „ $- 5,7$ mm.

Parallel zu der Atmosphärenlinie AL ist die Linie SL des Saugdruckes einmal 5,5 mm darüber, einmal 5,7 mm darunter angetragen; es ergibt sich der volumetrische Wirkungsgrad

um 10^h 50^m: $KS: \eta_v = 88,0 : 107,3 = 0,820$,
 $DS: \quad \quad 91,0 : 107,0 = 0,850$,
um 6^h 05^m: $KS: \quad \quad 75,5 : 107,8 = 0,700$,
 $DS: \quad \quad 80,5 : 107,2 = 0,750$.

Ob der so ermittelte volumetrische Wirkungsgrad die gerade interessierende Größe ist, hängt vom Zweck der Untersuchung ab; an sich kann man in Fig. 269 b ohne weiteres auch den auf AL bezogenen abgreifen, in Fig. 269 a allerdings nur unter Verlängerung der Expansions- und Kompressionslinie, also sehr unsicher.

Da der volumetrische Wirkungsgrad die Ansaugverhältnisse kennzeichnen soll, so empfiehlt es sich, ihn, wie an Fig. 269 erläutert, verallgemeinernd dadurch zu ermitteln, daß man die Linie des Saugdruckes in das Diagramm einträgt und das vom Diagramm auf ihr abgeschnittene Stück zur Diagrammlänge in Beziehung setzt. Wo man aus der Atmosphäre saugt, ergibt sich dann als Sonderfall die frühere Ermittlung.

Wo eine Saugleitung den Druck vor dem aus der Atmosphäre saugenden Kompressor abfallen läßt, kann man zwischen dem *volumetrischen Wirkungsgrad des Kompressors* unterscheiden, der sich auf den Druck vor den Saugventilen bezieht, und andererseits einen *volumetrischen Wirkungsgrad der Kompressoranlage* (einschließlich Saugleitung) definieren. Letzterer ist es, den man aus der vom Indikator geschriebenen Atmosphärenlinie ohne weiteres abnimmt, während man den volumetrischen Wirkungsgrad des Kompressors selbst findet, indem man die Linie des vor dem Kompressor herrschenden Druckes parallel zur Atmosphärenlinie zieht und auf ihr die vom Diagramm abgeschnittene Länge ermittelt. Man würde dann sagen können, daß der

volumetrische Wirkungsgrad, bezogen auf die Atmosphärenlinie, durch eine Saugleitung verringert wird.

Als *Lieferungsgrad* bezeichnet man das Verhältnis des wirklich vom Kompressor angesaugten reduzierten Volumens V_0 zu dem vom Kompressor freigelegten Hubraum V_h . Ein Kompressor habe $V_0 = 0,0483 \text{ m}^3 \left(\frac{0}{760} \right) / \text{s}$ angesaugt, wie nach irgendeiner bekannten (Techn. Mess. Kap. VIII, insbesondere § 55) Meßmethode festgestellt wurde. Er hat 250 mm Zylinderdurchmesser bei 300 mm Hub; aus beiden berechnet sich der Hubraum der Deckelseite zu $0,01473 \text{ m}^3$; der Kompressor war doppeltwirkend und hatte eine Kolbenstange von 35 mm Durchmesser, die an der Kurbelseite vom Hubraum $0,00029 \text{ m}^3$ fortnimmt und denselben dort auf $0,01473 - 0,00029 = 0,01444 \text{ m}^3$ verringert. Bei einem Umlauf (Hin- und Rückgang des Kolbens) werden

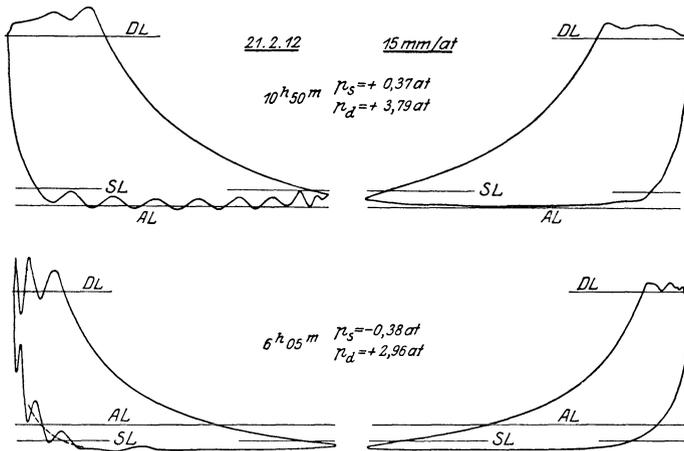


Fig. 269. Indikator diagramme eines SO_2 -Kühlkompressors mit eingezeichneter Sauglinie SL und Gegendrucklinie DL . Kompressionsverhältnis bei a: 3,44; bei b: 6,15. $\frac{2}{5}$ n. Gr.

also $0,01473 + 0,01444 = 0,02917 \text{ m}^3$ freigelegt; da der Kompressor die Drehzahl 125/min machte, so wird ein sekundlicher Hubraum $V_h = \frac{0,02917 \cdot 125}{60} = 0,0609 \text{ m}^3 / \text{s}$ freigelegt; der Lieferungsgrad ist $\eta_l = 0,0483 : 0,0609 = 0,794$.

Der Lieferungsgrad soll (§ 95; Techn. Mess. § 53) dem Konstrukteur ein Maß dafür sein, welches Luftgewicht der Kompressor in Berücksichtigung aller in ihm und außer ihm liegenden Verhältnisse mit der Einheit freigelegten Hubraumes fördert; für das Luftgewicht ist das reduzierte Luftvolumen ein direktes Maß: $1 \text{ m}^3 \left(\frac{0}{760} \right) = 1,293 \text{ kg}$. Man will also die Bauart des Kompressors selbst, wie namentlich die Größe des schädlichen Raumes und die Erwärmung der Luft beim Ansaugen, durch ihn erfassen, außerdem aber auch seine äußeren Betriebsbedingungen, wie namentlich das spezifische Gewicht der angesaugten Luft, folgend aus Luftdruck und -temperatur. Der Lieferungsgrad $\eta_l = 0,8$

besagt, daß man zur Förderung von $1 \text{ kg} = 0,774 \text{ m}^3 \left(\frac{0}{760} \right)$ einen Hubraum $0,774 : 0,8 = 0,97 \text{ m}^3$ nötig hat, woraus sich, wenn das in der Zeiteinheit verlangte Gewicht festliegt, bei gegebenen Zylinderabmessungen eine bestimmte Drehzahl oder umgekehrt ermitteln läßt. Kann man jedoch für eine andere Kompressorbauart oder wegen tropischer Temperatur oder wegen niedrigen Barometerstandes (Wetter oder Höhenlage) nur auf $\eta_l = 0,75$ rechnen, so muß man zur Förderung von 1 kg Luft den Hubraum $0,774 : 0,75 = 1,03 \text{ m}^3$ bereitstellen, also Zylinderabmessungen oder Drehzahl größer wählen. Da für chemische Prozesse, also im Bessemerprozeß, im Kupolofen das geförderte Luftgewicht maßgebend ist, so erkennt man die Brauchbarkeit des Begriffs des Lieferungsgrades für die Beurteilung solcher Verhältnisse, während andere Verhältnisse durch den Lieferungsgrad weniger gut charakterisiert sind, nämlich diejenigen, für die das Volumen maßgebend ist, wie bei der Arbeitsübertragung durch Druckluft.

Bei solchen Überlegungen hat es keinen Sinn, den Lieferungsgrad auf einen anderen Druck als stets 760 mm QS zu beziehen.

In anderen Fällen kann aber ein Bedürfnis dafür vorliegen, eine Größe zu berechnen, die dem Lieferungsgrad gleicht, aber auf den Ansaugedruck Bezug nimmt, also bei der Luftpumpe auf den Druck im Saugraum. Dadurch ergeben sich dann gewisse Vergleiche, wie in Fig. 276 bei § 147. Wenn man aber hierfür den Namen Lieferungsgrad wählt, so darf es nicht ohne kennzeichnenden Zusatz geschehen.

Inwieweit der volumetrische Wirkungsgrad, inwieweit der Lieferungsgrad für die Beurteilung in Betracht kommt, ist in § 95 für die Gasmaschine besprochen, die in zwei Takten des Arbeitsspieles (einer Viertaktmaschine) als Kompressor wirkt. In Betracht kommen auch die Überlegungen Techn. Mess. § 45, wann man bei Mengenangaben das Gewicht, wann das Volumen zu geben habe.

Vorbehaltlich sekundärer Einflüsse wird in erster Linie beeinflusst: der volumetrische Wirkungsgrad vom Gegendruck; außerdem von der Bauart und den Steuerungsverhältnissen der Maschine; bei gegebenem Gegendruck ist er wesentlich eine Funktion der Maschineneigenschaften; der Lieferungsgrad erfaßt außer den genannten Einflüssen noch die äußeren Betriebsbedingungen, nämlich den Einfluß des Luftdruckes und der äußeren Lufttemperatur, aber auch die Erwärmung der Luft während der Periode des Ansaugens. Der Lieferungsgrad beachtet also dieselben Umstände wie der volumetrische Wirkungsgrad, dazu aber noch einige weitere. Diese weiteren Einflüsse, durch die sich der Lieferungsgrad vom volumetrischen Wirkungsgrad unterscheidet, werden gemessen durch den Quotienten

$$\eta_l / \eta_{\text{vol}} < 1.$$

Dieser gibt auch den Einfluß des Barometerstandes; wenn aber der bei einer Versuchsreihe an einem bestimmten Tage unverändert bleibt, so hat namentlich die Temperatur am Ende der Füllung Einfluß auf den Quotienten $\eta_l / \eta_{\text{vol}}$, den man deshalb den *thermometrischen Füllungsgrad* nennen kann.

Der thermometrische Füllungsgrad ist daher ein Maß für den Zustand des angesaugten Gases am Ende der Ansaugperiode, also für den Druck und die Temperatur in jenem Zeitpunkt; er ist wesentlich abhängig von äußeren Betriebsbedingungen, nämlich vom Barometerstand, also der Höhenlage des Betriebsortes und vom Wetter, sowie von der Temperatur, also nochmal vom Wetter, allerdings auch von der Kühlung.

146. Das Indikatordiagramm des Kompressors. Die Wirkung des Kompressors ist die *Umkehrung der Wirkung einer Dampfmaschine*; seine allgemeine Gestalt ist daher bei umgekehrtem Umlaufungssinn dieselbe wie beim Dampfmaschinendiagramm, immerhin mit einigen grundsätzlichen Abweichungen insofern, als sich die irreversibeln Bestandteile desselben eben nicht umkehren lassen.

Beim Auswärtsgang des Kolbens öffnet sich das Saugorgan, es entsteht ein Unterdruck im Zylinder entsprechend dem Widerstand desselben, und es wird Luft in den Kompressor eingesaugt, bis das äußere Hubende erreicht ist, Punkt *A* der Fig. 270. Mit der Umkehr hat sich das Saugorgan geschlossen, die im Zylinder abgeschlossene Luft wird komprimiert, Kurve *AB*. Nachdem in *B* der Gegendruck erreicht ist, öffnet sich das Auslaßsteuerorgan, und nach der Linie *BC* erfolgt das Herausdrücken der komprimierten Luft in den Druckraum, bis zum inneren Totpunkt. Nach Wiedenumkehr des Kolbens kann (oder bei gesteuertem Organ: soll) sich das Saugorgan erst wieder öffnen im Punkte *D*, nachdem die Expansionslinie *CD* des im schädlichen Raum verbliebenen Luftrestes den Ansaugdruck unterschritten hat.

Die vorhin erwähnten grundsätzlichen Unterschiede gegen das Dampfmaschinendiagramm beziehen sich auf die Irreversibilität einiger Nebenvorgänge. Die in Fig. 270 schraffierten *Verlustflächen* unterhalb der Saug- und oberhalb der Gegendrucklinie liegen innerhalb des Kompressordiagramms und bedeuten einen Mehraufwand an Arbeit; beim Dampfmaschinendiagramm finden sich entsprechende Verlustflächen oberhalb der Linie des Kondensatordruckes und unterhalb der Frischdampfdrucklinie, in Fig. 109 bei § 80 mit 3 und 4 bezeichnet, sie liegen außerhalb des Diagramms und bedeuten einen Minder-

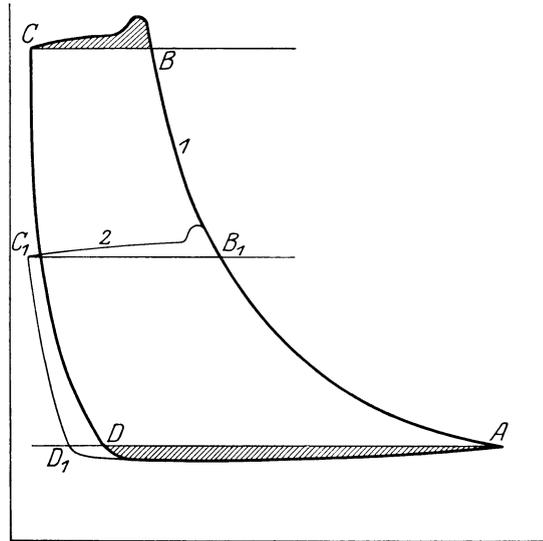


Fig. 270. Gestaltung des Kompressordiagrammes und Verlustflächen an demselben. Vgl. Fig. 109 bei § 80.

ertrag an Arbeit. Weiterhin treten im Dampfmaschinen-Indikator- und Kompressor-Indikator-Diagramm irreversible Spannungsausgleichsflächen beim Öffnen der Steuerorgane auf und ergeben Verlustflächen, die in Fig. 109 bei § 80 mit 1 und 2 bezeichnet sind; solche Verlustflächen können im Kompressor-Indikator-Diagramm nicht vorkommen; das Diagramm setzt sowohl bei *A*, Fig. 270, als auch bei *C* spitz ein. — An Fig. 282 bei § 147 werden jedoch besondere Diagrammgestaltungen besprochen.

Auf die Auswertung des Indikator-Diagrammes zur Leistungsbestimmung haben diese Unterschiede gegenüber dem Dampfmaschinen-Indikator-Diagramm keinen Einfluß; für sie ist in jedem Fall einfach die vom Schreibstift des Indikators umfahrene Fläche maßgebend.

Nachdem in *B* die Linie des Gegendrucks *DL* erreicht war, muß zunächst zum Aufwerfen des Ventiles ein höherer Überdruck entstehen als weiterhin nötig ist. Gegen das Hubende nimmt der Überdruck überdies zugleich mit der Kolbengeschwindigkeit ab. Auch der Unterdruck unter der Linie des Saugdrucks *SL* (im allgemeinen die

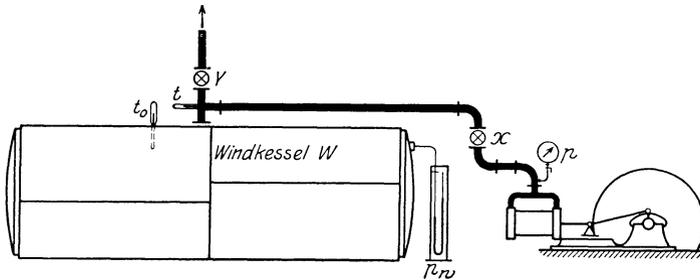


Fig. 271. Versuchsanordnung zur Bestimmung der Luftlieferung eines Kompressors nach dem Auffüllverfahren.

Atmosphärenlinie *AL*) nimmt gegen das Hubende ab, so daß die Spitze *A* mehr oder weniger genau auf der Linie *SL* liegt.

Für ein geringeres Druckverhältnis nimmt das Diagramm vergleichsweise die Gestalt an, die in Fig. 270 schwächer gezeichnet und mit den Buchstaben *B₁C₁D₁* bezeichnet ist. Die Verlustfläche oberhalb *B₁C₁* ist größer als die oberhalb *BC*, der volumetrische Wirkungsgrad ist für das zweite Diagramm größer, wie der Vergleich der Längen *AD* und *AD₁* ergibt. Beispiele für diese Erscheinungen geben § 145 und 148.

147. Einfluß des Gegendrucks auf das Indikator-Diagramm und den Gang von Kompressoren und Luftpumpen. In Fig. 272 sind 3 Indikator-Diagramme wiedergegeben, die an einem Kompressor bei verschiedenem Gegendruck aufgenommen sind. Nr. I zeigt die soeben besprochene Gestalt. Im Zusammenhang damit wurden folgende Ablesungen gemacht (Versuch I der Tabelle 91).

Die geförderte Luftmenge wurde gemessen, indem sie nach Maßgabe von Fig. 271 durch das Ventil *X* abgedrosselt und weiterhin ins Freie, während der Versuchsdauer aber durch Schließen des Ventils *Y* in den Windkessel *W* von 20,5 m³ Inhalt geleitet wurde; an ihm befand sich ein Quecksilbermanometer, das die Drucksteigerung zu verfolgen

gestattet. Beobachtet wurde die Zeit, die das Manometer p_w zum Steigen um je 100 mm brauchte, entsprechend (bei 20° Quecksilbertemperatur) einer Drucksteigerung um 0,135 at; durch ein langes, am Windkessel W angebrachtes Quecksilberthermometer t_0 wurde die Temperatur des Luftinhaltes bestimmt; vor Versuchsbeginn war das befriedigend möglich, wenn es auch mit Rücksicht auf mögliche Temperaturungleichheiten des Inhaltes fraglich bleibt, ob die gemessene Temperatur die örtlich mittlere ist; den Temperaturänderungen des Behälters während der Messung folgt das Thermometer nicht schnell genug, und es geht daher bei Anwendung dieses *Auffüllverfahrens* (Techn. Mess. § 53) ohne die Annahme nicht ab, daß während der kurzen Versuchsdauer ein Wärmeaustausch mit der Umgebung in merklichem Maß nicht stattfindet.

Unter dieser Annahme kann man aus dem Anstieg des Druckes in einem aufzufüllenden Windkessel auf die eingefüllte Menge schließen¹⁾.

Wird in einem Zeitelement das (zu bestimmende) Luftgewicht dG kg in den Behälter vom Inhalt V m³ eingeführt, in einem Zustand, der durch den jeweiligen Behälterdruck p_w kg/m² und durch die am Thermometer t abzulesende Kelvin temperatur T gegeben ist, dann gilt

$$dG = \frac{V}{\kappa} \cdot \frac{1}{R T} \cdot d p_w$$

mit $\kappa = c_p/c_v$ und mit der Gaskonstanten R . Durch Integrieren erhält man für den Zeitraum, während dessen der Druck p_w von p_1 auf p_2 steigt, die Zunahme an Gewicht im Behälter

$$G_2 - G_1 = G = \frac{V}{R \cdot \kappa} \cdot \int_{p_1}^{p_2} \frac{d p_w}{T}.$$

T ist die Temperatur der eintretenden Luft, nicht die des Behälterinhalts, die vielmehr gleichgültig und nur, abgesehen vom Einfluß der Mischung mit der eintretenden Luft, als unverändert vorausgesetzt ist.

Man muß nun die wechselnden Werte von $1 : T$ über dem jeweiligen

Druck p_w auftragen und kann dann den Wert $\int_{p_1}^{p_2} \frac{d p_w}{T}$ durch Planimetrieren

der Fläche zwischen den Ordinaten p_1 und p_2 finden. Liest man aber die Temperaturen T nicht in gleichen Zeitabständen, sondern bei Erreichung gleicher Druckintervalle, etwa nach Erreichung von je 50 mm QS Druck, ab, so kann man einfach den Mittelwert der reziproken Werte nehmen. Ist endlich T konstant oder wenig verändert, so genügt es einen Mittelwert T einzusetzen und zu rechnen

$$G_2 - G_1 = G = \frac{V}{\kappa \cdot R \cdot T} (p_2 - p_1).$$

¹⁾ Die folgende Ableitung ist Techn. Mess. § 53 zuerst in der 5. Aufl. gegeben, sie sei hier rekapituliert, weil sich in früheren Auflagen der Techn. Mess. eine Ableitung findet, die ebenso wie die in der 2. Aufl. dieses Buches der Verbesserung bedürftig war.

Für Luft ist $\kappa \cdot R = 1,41 \cdot 29,27 = 41,3$,
 also
$$G = \frac{V}{41,3} \cdot \frac{(p_2 - p_1)}{T}.$$

Die Beobachtungen waren nun folgende: Barometerstand $b = 760$ mm QS, die Anfangstemperatur im Behälter $t_0 = +20^\circ$.

Zeit an der Stechuhr	$z = 0$	37	65	91	116 ^s
Überdruck	$p_w = \sim 0$	100	200	300	400 mm QS
Temperatur am Luft- eintritt	$t = -$	35	37	40	42° C

Während der Zeiträume war also die mittlere Temperatur am Luft-
eintritt $T = \sim 307 \quad 309 \quad 312 \quad 314^\circ \text{C}$

Der Behälterinhalt war $V = 20,5 \text{ m}^3$, für Luft ist $\kappa = 1,41$ und $R = 29,27$;
die Druckstufe war jeweils 100 mm QS = 1360 kg/m³. Somit ist

$$\frac{V \cdot \Delta p}{\kappa \cdot R} = 676. \quad \text{In den Zeiträumen}$$

$$\Delta z = \quad 37 \quad 28 \quad 26 \quad 25 \text{ s}$$

ist also ein Luftgewicht eingefüllt

$$G = 676 : T = \quad 2,20 \quad 2,185 \quad 2,165 \quad 2,155 \text{ kg}$$

oder in der Zeiteinheit wurde

$$G : \Delta z = \quad 0,0595 \quad 0,0781 \quad 0,0833 \quad 0,0862 \text{ kg/s,}$$

als reduziertes Volumen $0,0460 \quad 0,0604 \quad 0,0643 \quad 0,066 \text{ m}^3 \left(\frac{0}{760}\right)/\text{s}$

gefördert. Der erste hohe Zeit- und daher niedrige Mengenwert rührt von der Unsicherheit her, die bezüglich des Zeitpunktes des Umschaltens vom Ausblas auf den Windkessel besteht; der erste Wert bleibt unbeachtet und sollte immer unbeachtet bleiben. Aus den drei anderen, an denen man natürlich beanstanden kann, daß sie einen „Gang“ aufweisen, ergibt sich im Mittel: bei der Drucksteigerung von 100 auf 400 mm QS Überdruck wurde die Luftmenge $2,185 + 2,165 + 2,155 = 6,50 \text{ kg} = 5,02 \text{ m}^3 \left(\frac{0}{760}\right)$ in den Behälter in $116 - 37 = 79 \text{ s}$ eingefüllt; die Förderung des Kompressors ist $5,02 : 79 = 0,036 \text{ m}^3 \left(\frac{0}{760}\right)/\text{s}$.

Der Kompressor von 400 mm Hub und 360 mm Zylinderdurchmesser war einfachwirkend, gab also bei einem Umlauf das Hubvolumen $40,7 \text{ ltr} = 0,0407 \text{ m}^3$ frei; er machte beim Versuch die Drehzahl $n = 144/\text{min}$, so daß ein Hubraum $0,0978 \text{ m}^3/\text{s}$ freigelegt wurde; der Lieferungsgrad des Kompressors ist $\eta_l = 0,0636 : 0,0975 = 0,650$.

Aus dem Indikatordiagramm ergibt sich der volumetrische Wirkungsgrad, auf der Atmosphärenlinie abgemessen, zu $\eta_v = 0,815$.

Der Quotient aus Lieferungs- und volumetrischem Wirkungsgrad ist nach § 145 als thermometrischer Füllungsgrad ein Maß für die Temperatur am Ende des Ansaugens. Für Versuch I ist $\eta_l : \eta_v = 0,650 : 0,815 = 0,798$.

Die *Leistungsumsätze* bei Versuch I sind folgende: Im Ansaugzustand, nämlich bei 20° Temperatur und bei 760 mm QS Druck, hat die angesaugte Menge von $0,0636 \text{ m}^3 \left(\frac{0}{760}\right)/\text{s}$ das Volumen $0,0682 \text{ m}^3$; diese werden von 760 mm QS abs = 1,03 at auf 5,4 at ÜD = 6,43 at abs,

also im Verhältnis $6,43 : 1,03 = 6,25$ komprimiert. Das theoretische Diagramm der Fig. 254 (bei § 133), das isothermische Kompression der gemessenen Luftmenge vom gemessenen Anfangszustand (20° , 760 mm QS) bis auf den Enddruck in einem Zylinder ohne schädlichen Raum zugrunde legt, verlangt für diese Kompression den Arbeitsaufwand $N_1 = p_1 V_1 \cdot \ln p_2/p_1$ in unserem Fall also $N_1 = 10330 \cdot 0,0682 \cdot \ln 6,25 = 10330 \cdot 0,0682 \cdot (6,43775 - 4,60517) = 1290$ mkg/s oder $1290 : 102 = 12,65$ kW. Das Diagramm des Kompressors ergab dagegen die Leistung $N_i = 21,5$ kW; der Unterschied $21,5 - 12,65 = 8,85$ kW wird durch Verluste hydraulischer Natur belegt, die vom Widerstand der Ventile und von anderen Wirbelverlusten herrühren, wie sie bei der Kolbenpumpe ganz ebenso auftreten (§ 113); daneben stecken noch die Verluste in dem Unterschied $N_1 - N_i$, die der Erwärmung der Luft entsprechen, wie in § 148 besprochen wird. Zusammenfassend sei dieser Verlust immerhin als *hydraulischer Verlust* bezeichnet, ihm entspricht der *hydraulische Wirkungsgrad* des Kompressors $\eta_h = 12,65 : 21,5 = 0,588$. — Am Dampfzylinder wurde die Leistung $N_{iD} = 25,9$ kW festgestellt, so daß also der *mechanische Wirkungsgrad der Kompressionsmaschine* $21,5 : 25,9 = 0,83$ ist. Es handelt sich hierbei um einen Dampfkompresseur, bei dem im selben Zylinder einerseits der Dampf wirkte, auf der anderen Seite des Kolbens die Luft verdichtet wurde (Vorschlag Riedler). Hiernach sind wegen der unmittelbaren Energieübertragung, wobei das Schwungrad und der Kurbeltrieb nur zum Ausgleich dienen, gute mechanische Verhältnisse zu erwarten, während die thermischen unter der Wärmeübertragung von der Dampfseite her leiden könnten; es handelt sich jedenfalls um keine normale Bauart, und Ergebnisse sind mit Vorsicht zu verallgemeinern. —

In Tabelle 91 wird nun neben den Zahlen dieses eben besprochenen Versuches I das Ergebnis von drei weiteren gegeben, die bei verschiedenem Gegendruck und (annähernd) unveränderter Drehzahl ausgeführt sind. Fig. 272 gab die zugehörigen Indikatordiagramme. Die *Versuchsreihe* zeigt, daß der *volumetrische Wirkungsgrad* mit steigendem Druck — besser gesagt mit steigendem Druckverhältnis — abnimmt, ebenso die Fördermenge bei einem Umlauf und daher der *Lieferungsgrad*. Der Quotient beider, der *thermometrische Füllungsgrad* nimmt mit steigendem Druckverhältnis ab, d. h. die Luft ist am Ende des Ansaugens um so wärmer, je stärker komprimiert wird. Die Temperaturverhältnisse werden noch besprochen.

Es versteht sich, daß alle Leistungswerte mit steigendem Druck steigen, zumal auch die Drehzahl etwas in die Höhe geht; ebenso ist es mit den Verlustwerten. Der hydraulische sowohl wie der mechanische Wirkungsgrad scheinen in der Gegend von 3 at ÜD einen flachen Best-

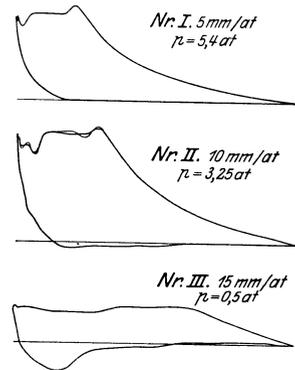


Fig. 272. Kompressor-diagramme bei verschiedenem Gegendruck. $\frac{2}{3}$ n. Gr.

wert zu haben; doch reichen drei Versuche zum sicheren Urteil über den Verlauf der Kurven nicht aus.

Dem Kompressionsverhältnis $6,25 = p_2 : p_1$ entspricht bei einer umkehrbaren Kompression ohne Wärmeverlust, d. h. bei adiabatischer Kompression ein Anstieg der absoluten Temperatur im Verhältnis

$T_2 : T_1 = (p_2 : p_1)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$. Mit $\kappa = 1,4$ ist am einfachsten der Tabelle Hütte, 23. Aufl. I, S. 407 zu entnehmen, daß zu $p_2 : p_1 = 6,25$ gehört $T_2 : T_1 = 1,688$; mit der Anfangstemperatur $t_1 = 20^\circ$ und $T_1 = 293^\circ$ ergibt sich $T_2 = 495^\circ$, also $t_2 = 222^\circ$.

Viel höhere *Kompressionsendtemperaturen* sind zu erwarten, wenn man die Erwärmung der Luft schon während des Ansaugens an den warmen Zylinderwänden berücksichtigt. Der höheren Kompressionsanfangstemperatur entspricht eine höhere Endtemperatur. Hiernach ist also zunächst die *Temperatur am Ende des Ansaugens* zu berechnen, wie in § 106 für die Gasmaschine.

Am Ende des Ansaugens ist der Hubraum plus dem schädlichen Raum, also der Gesamtraum von $0,0407 + 0,0013 = 0,0420 \text{ m}^3 = V$, angefüllt mit Luft vom Druck gleich dem Barometerstand, also vom Druck $p_1 = 10330 \text{ kg/m}^2$. Der Luftinhalt besteht aus der Fördermenge eines Hubes, vermehrt um den Rückstand im schädlichen Raum am Ende des Ausblasens; dieser Rückstand läßt sich wie in § 106 aus der Zustandsgleichung berechnen, wobei seine Temperatur am Ende des Ausblasens zu schätzen ist; einfacher und der Unsicherheit des Verfahrens entsprechend kann man auf der Ausblaselinie das im schädlichen Raum verbliebene Volumen zum ausgeblasenen ins Verhältnis setzen wie folgt: in Fig. 284 I (umgezeichnet aus Fig. 272 I, wie in § 148 erläutert wird) war der schädliche Raum 6,4 mm lang, auf der Gegendrucklinie schnitt die Ausblasemenge, vom Punkt *D* bis zum Hubende, 51,0 mm ab; also macht der Rückstand 12,5% der Fördermenge aus. Diese Rechnung nimmt an, es gelte für den Rückstand und die ausgeblasene Menge die gleiche, übrigens beliebige Temperatur; diese Annahme könnte man auch dem gleichen Gedankengang für das Ansaugen zugrunde legen, indem man den ohne Ansaugen zurückgelegten Hub vom schädlichen Raum an bis Punkt *E* zur Ansaugemenge von *A* bis zum Hubende *G* ins Verhältnis setzt, was 25,1% ergibt, also ein wesentlich abweichendes Ergebnis liefert. Offenbar ist die Wahrscheinlichkeit auf seiten der ersten Rechnungsweise, weil bei der zweiten der Rückstand in wärmerem Zustand als die angesaugte Menge gemessen und daher die höhere Verhältniszahl entstanden sein dürfte.

Hiernach ist das Fördergewicht $0,0636 \cdot \frac{144}{60} \cdot 1,293 = 0,0344 \text{ kg/Hub}$

um 12,5% auf $0,0387 \text{ kg/Hub} = G$ zu vermehren, um das arbeitende Luftgewicht zu erhalten, mit dem sich nun aus der Zustandsgleichung

$$T = \frac{p \cdot V}{R \cdot G} = \frac{10330 \cdot 0,0420}{29,27 \cdot 0,0387} = 384^\circ \text{ abs} \quad \text{oder} \quad t = 111^\circ \text{ C}$$

die Temperatur am Ansaugende errechnet. Zu ihr muß wie oben die

Kompressionsendtemperatur im Verhältnis 1,688 stehen, woraus diese sich zu $384 \cdot 1,688 = 646^\circ$ abs oder 373° C ergibt. Es mag dahingestellt bleiben, ob dieses Resultat wahrscheinlich ist, es kann sogar gesagt

Tabelle 91. Vereinzelnung der Kompressorverluste nach dem Indikatordiagramm.

Zylinderdurchmesser 360 mm, Hub 400 mm, einfache Wirkung.
 Hubvolumen 0,0407 m³/Uml, schäd. Raum 0,0013 m³.
 Barometerstand 760 mm QS, Raumtemperatur 20° C.

Versuch Nr.		I	II	IV	III
1	Drehzahl n /min	144	140	130	132
2	Gegendruck p at ÜD	5,4	3,25	2	0,5
3	Luftförderung V_1 m ³ ($\frac{20}{760}$)/s	0,0682	0,0728	0,0746	0,0850
4	V_0 m ³ ($\frac{0}{760}$)/s	0,0636	0,0678	0,0695	0,0791
5	bei 1 Umlauf m ³ ($\frac{0}{760}$)	0,0264	0,0230	0,0321	0,0360
6	Lieferungsgrad —	0,650	0,712	0,788	0,885
7	Volumetrischer Wirkungsgrad —	0,815	0,86	0,915	0,975
8	Thermometrischer Füllungsgrad —	0,798	0,830	0,862	0,908
9	Druckverhältnis $\Pi = p_2/p_1$ —	6,25	4,15	2,95	1,49
10	Theoret. isotherm. Leistg. $\left\{ \begin{array}{l} \text{mkg/s} \\ \text{kW} \end{array} \right.$	1295	1070	780	332
11	$N_{ih} = p_1 \cdot V_1 \cdot \ln p_2/p_1$ kW	12,7	10,6	7,65	3,26
12	Indizierte Kompressorleistung N_i kW	21,5	17,0		6,45
13	Effektiv. Wirkungsgr. $\eta_e = N_{ih} : N_i$ —	0,591	0,624		0,505
14	Hydraulischer Verlust $N_{ih} - N_i$ kW	10,5	7,9		3,47
15	Indiz. Dampfmaschinenlsg. N_D kW	25,9	19,9		8,7
16	Mech. Wirkungsgrad $\eta_m = N_i : N_D$ —	0,83	0,855		0,74
17	Mechanischer Verlust $N_D - N_i$ kW	4,4	2,9		2,25
18	Theoret. Temp. verh. $\Pi^{0,286} = \Theta$ —	1,688	1,499	1,362	1,120
19	Theoret. Kompressionsendtemp. $\left\{ \begin{array}{l} ^\circ \text{ abs} \\ ^\circ \text{ C} \end{array} \right.$	495	439	399	328
20	$293 \cdot \Theta$	222	166	126	55
21	Beobacht. Temp. im Druckraum „	190	140	105	45
22	Luftförderung bei 1 Uml. kg	0,0342	0,0376	0,0415	0,0466
23	Relat. Rückst. i schäd. Raum —	0,125	0,101		0,0535
24	Luftmenge im Gesamtraum G' kg	0,0384	0,0414		0,0491
25	Temperatur am Ende des Ansaugens				
26	$T' = p_1 \cdot V \frac{10333 \cdot (0,0407 + 0,0013)}{R \cdot G'} \left\{ \begin{array}{l} ^\circ \text{ abs} \\ ^\circ \text{ C} \end{array} \right.$	387	359		302
27	Hieraus: Kompressionsendtemp. $\left\{ \begin{array}{l} ^\circ \text{ abs} \\ ^\circ \text{ C} \end{array} \right.$	114	86		29
28	$T' \cdot \Theta$	653	538		338
29	Belastende Düsenweite . . . mm ²	380	265		65
29	Belastende Düsenweite . . . mm ²	54,8	88,1	127	302
Zerlegung der indizierten Fläche (§ 148, Fig. 284).					
30	Ganze Fläche (Summe d. einzeln.) kW	23,0	17,1		6,31
31	%	100,0	100,0		100,0
32	Fläche über der Gegendrucklinie kW	0,72	0,81		1,48
33	%	3,1	4,8		23,5
34	„ unter der Saugdrucklinie kW	0	0,44		0,98
35	%	0	2,6		15,4
36	Rest kW	22,28	15,85		3,85
37	%	96,9	92,6		61,1
38	Fläche über der Isotherme . . kW	7,60	3,86		0,22
39	%	33,0	22,7		3,5
40	Fläche unter der Isotherme . . kW	14,7	11,90		3,63
41	%	63,9	69,6		57,6

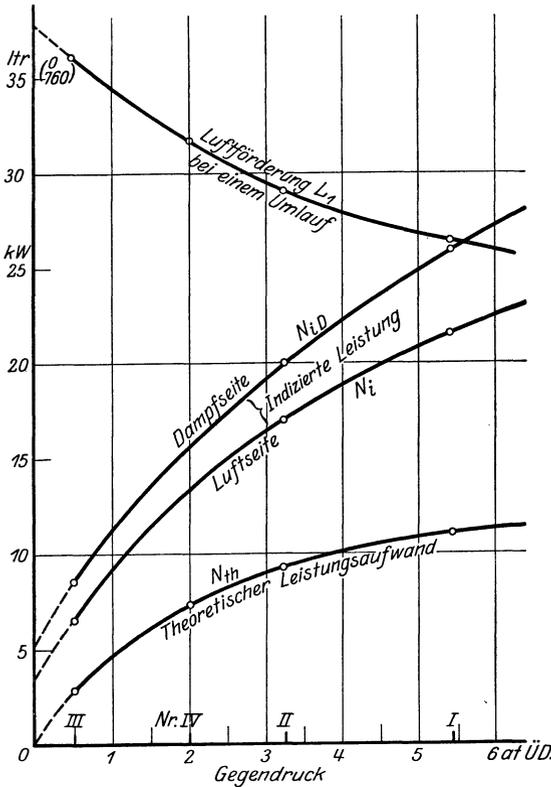


Fig. 273. Umsatzzahlen.

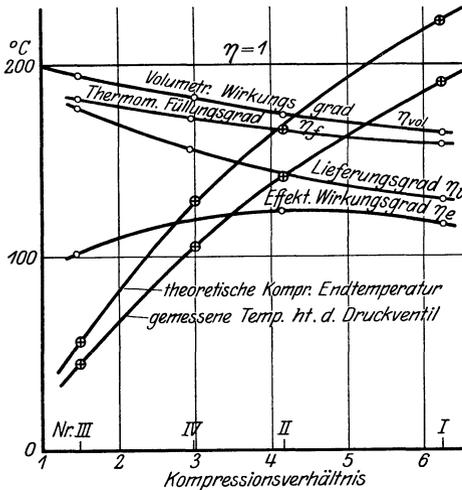


Fig. 274. Wirkungsgrade.

Fig. 273 und 274. Verhalten eines Kompressors bei verschiedenem Gegendruck.

werden, daß die Genauigkeit der Beobachtungen in diesem Fall zu seiner Sicherstellung keinesfalls ausreichend ist. Fehler möchten bei der Messung des schädlichen Raumes und namentlich bei der Luftmengenmessung vorliegen. Ein gleich hinter dem Druckventil eingebautes Thermometer zeigt nur 190°C an. Der Rechnungsgang sollte jedenfalls gegeben werden, auch um zu zeigen, daß erhebliche Temperaturen und Temperaturerhöhungen im Kompressor zu erwarten sind, wenn so hohe Kompressionsverhältnisse wie hier in einer Stufe überwunden werden. Die hieraus für die Schmierung sich ergebenden Schwierigkeiten sind bekannt: ein Schmiermittel von nicht genügend hohem Flammpunkt kann zu gefährlichen Explosionen durch Selbstentzündung Anlaß geben.

Die Ergebnisse der Tabelle 91 sind in Fig. 273 und 274 bildlich dargestellt. In Fig. 273 ist die Abszisse als Überdruck gegeben; die Atmosphärenspannung als Ausgang des Kompressionsvorganges hat immerhin einige sachliche Bedeutung, was die Bezugnahme auf die „Druckstufe“ rechtfertigt. Fig. 274 ist eine dimensionslose Darstellung.

Gleich wie bei der Pumpe (§ 119 und 126) oder dem Ventilator (§ 137) entspricht jedem Zustand des Kompressors, weil dem Gegendruck eindeutig eine Fördermenge zugeordnet ist, eine

gleichwertige Düse, das ist diejenige kontraktionslos arbeitende Öffnung, durch die bei gleichem Druck die gleiche Luftmenge gerade abströmt. Für die Berechnung dieses *Düsenwertes der Leitung*, gegen die der Kompressor arbeitet, sind bei den von Kompressoren bewältigten Druckstufen die thermodynamischen Ausflußgesetze maßgebend, wonach (Hütte 22., 23. Aufl. I, 446) für Luft und für $\frac{p_2}{p_1} < 0,53$ das ausfließende Volumen

$$V_1 = 11,6 \cdot F \cdot \frac{p_2}{p_1} \cdot \sqrt{T} \text{ m}^3 \left(\frac{p_1}{T}\right)/s$$

ist; dabei soll $F \text{ m}^2$ der Querschnitt der abgerundeten Düse, $\frac{p_2}{p_1}$ das Druckverhältnis als unechter Bruch gegeben und T die Temperatur sein. Durch Umkehren erhält man den Düsenwert

$$F = \frac{V_1}{11,6 \cdot \sqrt{T}} \cdot \frac{p_1}{p_2} \quad \text{bei } \frac{p_1}{p_2} < 0,53 \text{ oder } \frac{p_2}{p_1} > 1,89 \dots (2)$$

V_1 soll in $\text{m}^3 \left(\frac{p_1}{T}\right)/s$ gegeben, in unserem Fall also auf den Ansaugedruck p_1 des Kompressors bezogen sein. Für Versuch I ist der Düsenwert $F = \frac{0,0682}{11,6 \cdot \sqrt{293}} \cdot \frac{1}{6,25} = 0,0000548 \text{ m}^2$ oder $54,8 \text{ mm}^2$, entsprechend

$8,35 \text{ mm}$ Durchmesser. Für Versuch II und IV gibt derselbe Rechnungsgang größere Werte, für Versuch III gibt er 286 mm^2 als Düsenwert des durch Drosseln hergestellten Widerstandes; doch ist der Rechnungsgang für $\frac{p_2}{p_1} = 1,49$ oder $\frac{p_1}{p_2} = 0,67$ nicht mehr richtig; für Druckverhältnisse näher der Eins als das kritische ist vielmehr mit der Formel von de Saint-Venant zu rechnen: es ist

$$V_1 = 45,35 \cdot F \cdot \sqrt{T \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{0,286} \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{0,286} - 1 \right]} \dots (3)$$

Aus ihr folgt für Versuch III $0,0850 = 45,35 \cdot F \cdot \sqrt{293 \cdot 1,120 \cdot (1,120 - 1)} = 284 \cdot F$, also $F = 0,000302 \text{ m}^2 = 302 \text{ mm}^2$; der einfachere Rechnungsgang liefert also wenig abweichende Ergebnisse; man befindet sich für das Druckverhältnis $0,67$ bei einer Kurve ähnlich der in Fig. 75 bei § 201 gegebenen nur wenig unterhalb des Höchstwertes des Ausflußverhältnisses.

Die Luftlieferung in Fig. 273, der Lieferungsgrad in Fig. 274 nehmen mit zunehmendem Druckverhältnis ab, weil die Expansionslinie in den Diagrammen der Fig. 270 eine immer kleinere Strecke auf der Atmosphärenlinie abschneidet, weil also der volumetrische Wirkungsgrad kleiner wird. Das geht mit weiterhin steigendem Druckverhältnis, mit abnehmendem Düsenwert, so lange weiter, bis die Expansionslinie praktisch mit der Kompressionslinie zusammenfällt; dann ist der volumetrische Wirkungsgrad, also der Lieferungsgrad und die Luftlieferung Null, was nach Formel (2) oder (3) den Düsenwert Null bedingt. Beim völligen Abschluß des den Luftabgang drosselnden Ventiles steigt

daher der Druck und das Druckverhältnis auf den der Kompressorbauart zugeordneten Höchstwert, die Luftlieferung (oder die Luftabnahme) ist Null.

Dieser Zustand des ganz abgesperrten Auslasses würde bei dem eben untersuchten Kompressor auf einen Druck von etwa 25 at führen; er wäre kaum erreichbar, aus Sicherheitsgründen, weil der Zylinder, der Ventilkopf und das Gestänge den Druck nicht aushalten dürften, aus Betriebsgründen, weil vermutlich der antreibende Teil das Drehmoment wenigstens für gewisse Zwischenzustände nicht hergeben könnte. Die Verhältnisse liegen wie bei wachsendem Vakuum, siehe 7 Seiten später.

Die Größe des maximalen Druckes hängt aber von der relativen Größe des schädlichen Raumes ab; der maximale Druck wird daher geringer und ist daher eher erreichbar bei schlecht gebauten und im allgemeinen auch bei kleinen Kompressoren.

Von einem kleinen schnelllaufenden Kompressor (Bauart J o s s e) stammt die in Tabelle 92 gegebene Versuchsreihe, bei der je 5,00 m³ Luft durch eine Gasuhr gesaugt und die dazu erforderliche Zeit beobachtet wurde. In der ersten Reihe lief der Kompressor wieder gegen wechselnden Gegendruck; in der zweiten Reihe lief der Kompressor als Luftpumpe (Vakuumpumpe) bei wechselndem Ansaugedruck, während er in die Atmosphäre drückt; die gleichen

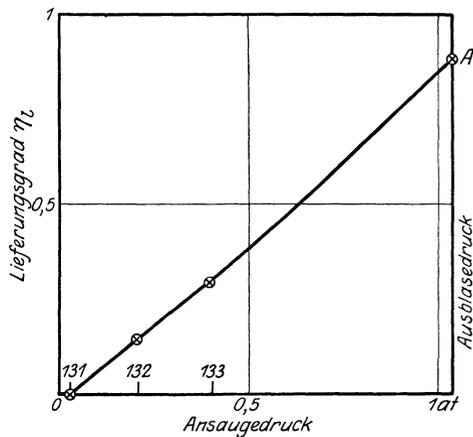


Fig. 275. Abhängig vom Ansaugedruck.

Fig. 275 und 276. Lieferung eines Kompressors.

Druckverhältnisse werden dadurch erzeugt. Der Unterschied zwischen beiden Teilreihen ist der, daß einmal die Saug-, das andere Mal die Druckspannung unverändert bleibt, was auf verschiedenen Charakter der Kurven der Lieferung oder des Lieferungsgrades führt, wie Fig. 275 und Fig. 276 erkennen lassen. Fig. 275 eignet sich wegen des gradlinigen Verlaufes zum Gewinnen von Zwischenpunkten der hyperbelähnlichen Kurve in Fig. 276. Andererseits läßt sich der Punkt A der Fig. 276, der dem Atmosphärendruck oder dem Druckverhältnis 1 entspricht, ebenfalls als Punkt A aus Fig. 275 entnehmen; er ist in Fig. 276 den beiden Kurven der η_l und η_l' gemeinsam. Daß übrigens auch diese Versuchsreihe hinsichtlich der Genauigkeit nicht den Anforderungen entspricht, die man stellen möchte, geht aus der unregelmäßigen Lage der Versuchspunkte hervor.

Die Temperatur der abgehenden Druckluft wird, wenn der Gegendruck wechselt, um so kleiner, je kleiner der Gegendruck. Da die Kompressionstemperatur theoretisch nicht von dem zu bewältigenden Druckunterschied abhängt, der bei Vakuumpumpen stets klein ist,

sondern vom Druckverhältnis, das bei Versuchen mit Vakuum sogar sehr große Werte annimmt, so sollte die Abgangstemperatur bei Versuch Nr. 132 größer sein als bei Nr. 133. Daß das Umgekehrte der Fall ist, mag darin begründet sein, daß bei Versuch 132 ein kleineres Luftgewicht arbeitet, dem der kleinere Wärmehalt entsprechend leichter durch die Kühlwirkung der wasserberührten Wandungen entzogen wird. Zwar nimmt andererseits die Wärmeleitfähigkeit der Luft mit sinkendem Druck stark ab, doch spielt diese nur eine untergeordnete Rolle gegenüber der Konvektion — bei Gasen im allgemeinen, hier besonders, weil beim Durchströmen durch das Druckventil eine starke Durchwirbelung des Luftstromes erfolgt.

Eine weitere Versuchsreihe mit Vakuum zeigt Tabelle 93; es handelt

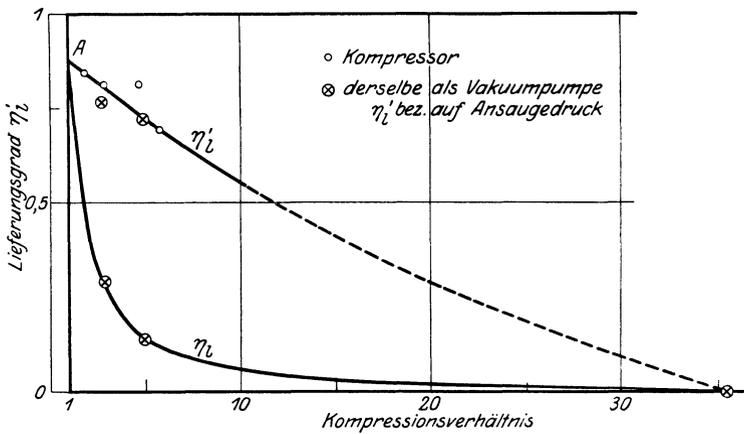


Fig. 276. Abhängig vom Abgangsdruck.

bei verschiedenen Druckverhältnissen.

Tabelle 92. Schnellaufender Kompressor als solcher und als Vakuumpumpe.

Hubvolumen der Zylinder $V_h = 2,614$ l/Uml.

Kühlwassermenge 360 l/h.

Versuch Nr.	103	104	105	106	—	133	132	131
1 Drehzahl /min	816	814	822	808	—	830	845	842
2 Saugdruck p_1 . . at abs	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	0,40	0,207	0,029
3 Förderdruck p_2 . . „	6,03	5,03	3,03	2,03	1,03	1,03	1,03	1,03
4 Druckverhältnis p_2/p_1	5,84	4,87	2,94	1,97	1	2,58	4,99	35,6
5 Zeit für 5 m ³ . . . s	190	183	161	157	—	428	886	—
6 Fördermenge . . m ³ ₍₇₆₀₎ /s	0,0247	0,0256	0,0291	0,0299	—	0,0107	0,0053	0
7 (b. Ansaugedr.) m ³ _(p_1) /s	0,0247	0,0256	0,0291	0,0299	—	0,0276	0,0265	0
Lieferungsgrad								
8 bez. a. Luftdruck η_l —	0,695	0,822	0,811	0,848	(0,88)	0,296	0,144	0
9 bez. a. Ansaugedr. η'_l —	0,695	0,822	0,811	0,848	(0,88)	0,762	0,719	—
10 Ansaugetemperatur ° C	18,5	18,5	18	18	—	17	17,5	—
11 Abgangstemperatur „	114	113	99	75	—	65	44	—
12 Kühlwasserablauftp. „	25,2	24,4	22,0	10,8	—	24	—	—

Tabelle 93. Luftpumpe bei veränder-

Durchmesser des Zylinders
der Kolbenstange

Hub

Lufttempe-
Barometerstand b
Spez. Gewicht der

Versuch Nr.		6	5
1	Drehzahl n /min	192	Hahn- 159
2	Druck in der Meßöffnung Δp mm WS	161	161
3	Luftmenge $L = 0,000760 \cdot \sqrt{\Delta p}$ m ³ /s	0,00964	0,00964
4	„ L_0 m ³ ($\frac{0}{760}$)/s	0,00880	0,00880
5	Lieferungsgrad $\eta_i = \frac{60 L_0}{n} : V_h$ —	0,142	0,171
6	$\eta'_i = \frac{60 L_0}{n} \cdot \frac{1,033}{p} : V_h$ —	0,76	0,785
7	Unterdruck $b - p$ gemessen mm QS	611	588
8	Absoluter Druck im Behälter p at	0,193	0,224
9	Kompressionsverhältnis b/p —	5,31	4,58
10	„ p/b —	0,188	0,218
11	Indizierter Druck p_i at	0,452	0,478
12	Indizierte Leistung $N_i = 0,0317 \cdot p_i \cdot n$ kW	2,75	2,40
13	Theoretische Leistung $N_{th} = \frac{10\,000}{102} \cdot b L \cdot \ln \frac{b}{p}$ kW	1,62	1,48
14	Effektiver Wirkungsgrad $\eta = \frac{N_{th}}{N_i}$ —	0,590	0,617
15	Theoretisches Drehmoment $M_{th} = 973 \frac{N_{th}}{n}$ mkg	8,21	9,05

sich um eine *Vakuumpumpe mit Schiebersteuerung, mit Überströmkanal* zum Ausgleich des Druckes im schädlichen Raum und mit Rückschlagklappe, nach Weiß. Diese Anordnung darf als bekannt vorausgesetzt werden. Die in Fig. 282 dargestellten Indikatordiagramme haben infolge dieser Anordnung eine etwas veränderte Gestalt, über die später gesprochen wird, sie ist für die folgenden Betrachtungen belanglos; nur kann man aus den Diagrammen nicht mehr den volumetrischen Wirkungsgrad bestimmen wollen.

Bei den Versuchen wurde die Luft aus dem Innenraum eines Röhrenkondensators gepumpt, der gegen die von ihm bediente Dampfturbine dicht abgeschlossen war (Fig. 277). Nur durch einen Ansatzstutzen hindurch konnte Luft eingesaugt werden, deren Menge nun im Beharrungszustand der von der Luftpumpe geförderten gleich war. Die Luftmenge konnte verändert werden, indem einerseits die Drehzahl der Luftpumpe, andererseits die Stellung des Hahnkükens verändert wurde; jede Hahnstellung stellt einen bestimmten Zustand der Undichtheit des Behälters (Kondensators) dar; durch Stellen des Hahnes ahmt man Undichtheitszustände nach, deren jeder zahlenmäßig durch einen bestimmten *Düsenwert der Undichtheit* gekennzeichnet ist.

licher Drehzahl, Luftförderung unverändert.

250 mm }
40 mm } Hubvolumen $V_h = 0,0194 \text{ m}^3/\text{Uml.}$
200 mm }

ratur 23° .

= 753 mm QS = 1,025 at.

Luft $\gamma_l = 1,181 \text{ kg/m}^3$.

4	8	9	10	11	12	15	14	13
stellung unverändert						verändert		
135	96	.	.	.	.	63	51,5	44
161	159	150	140	116	95	159	161	159
0,00964	0,00960	0,00931	0,00900	0,00818	0,00739	0,00960	0,00964	0,00960
0,00880	0,00876	.	.	.	.	0,00876	0,00880	0,00876
0,202	0,282	.	.	.	.	0,430	0,53	0,615
0,795	0,74	.	.	.	.	0,865	0,885	0,83
560	463	404	345	254	200	375	298	188
0,263	0,394	0,475	0,555	0,679	0,752	0,514	0,618	0,769
3,90	2,60	.	.	.	.	1,99	1,66	1,33
0,256	0,385	0,463	0,541	0,663	0,735	.	.	.
0,478	0,454	.	.	.	.	0,412	0,353	0,252
2,04	1,38	.	.	.	.	0,822	0,575	0,351
1,32	0,922	.	.	.	.	0,664	0,491	0,275
0,647	0,669	.	.	.	.	0,807	0,855	0,783
9,51	9,35	.	.	.	.	10,28	9,29	6,09

Die eingesaugte Luftmenge wurde gemessen durch eine vor den Einsaughahn gesetzte scharfkantige Öffnung von 19,9 mm Lochdurchmesser, also $0,000311 \text{ m}^2$ Durchtrittsquerschnitt, die die Luft erst in ein kurzes Rohrstück solcher Weite, daß man den entstehenden Raum, in den die Luft einströmt, als „groß“ ansehen konnte, treten und dann durch den Hahn gehen ließ. Fig. 277 zeigt diese Versuchsanordnung. Die Anzeige Δp des Wasser-Vakuummeters ist ein Maß für die einströmende Luftmenge L , die daraus nach der Beziehung $L = 0,60 \cdot 0,000311 \cdot \sqrt{19,6 \cdot \Delta p / \gamma_l} = 0,000826 \sqrt{\Delta p / \gamma_l}$ errechnet wurde. γ_l ist das spezifische Gewicht der eingesaugten Luft, 0,60 die Einströmzahl.

In der Versuchsreihe der Tabelle 93 wurde nun eine konstante eingesaugte Luftmenge, also ein unveränderter Dichtheitszustand (siehe jedoch unten) des Behälters erstrebt; es zeigte sich dabei, daß für die Versuche Nr. 4 bis 8 eine unveränderte Hahnstellung zugleich unveränderte Luftmenge ergab, die durch den Druckverlust in der Meßöffnung von rd. 160 mm W. S. = 160 kg/m^2 gekennzeichnet war — obwohl der Druckunterschied für die Einsaugung durch den Hahn von 611 bis 463 mm QS abnahm, der absolute Druck im Behälter von 0,193 bis $0,394 \text{ kg/m}^2$ stieg.

Weiterhin gabelt sich die Versuchsreihe in zwei Richtungen. Die Versuche 9 bis 12 beziehen sich nur auf die *Einströmung der Luft*

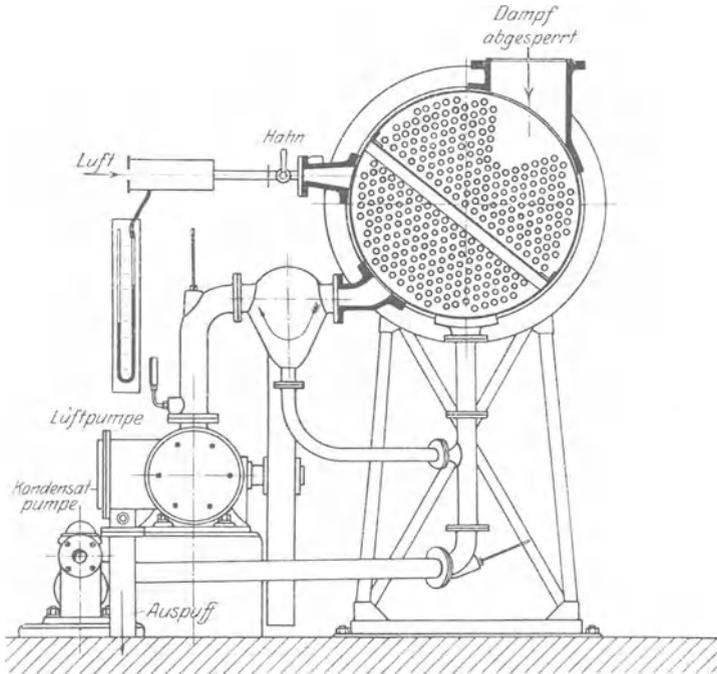


Fig. 277. Versuchsanordnung zur Untersuchung einer Dampfvakuumpumpe.

durch das Hahnküken: bei weiter unveränderter Hahnstellung nimmt die eingesaugte Luftmenge nun ab, da der Gegendruck steigt und das kritische Druckverhältnis überschritten wird, das hier bei etwa $p/b = 0,32$ zu liegen scheint.

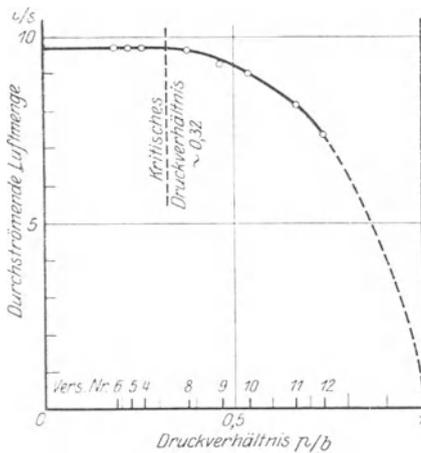


Fig. 278. Ausflußmenge durch das Hahnküken bei unveränderter Stellung desselben.

Bei wechselndem Gegendruck ergibt sich also insgesamt die durch den Hahn bei bestimmter Stellung gehende Luftmenge in Gestalt einer Kurve Fig. 278. Dieselbe entspricht der in Fig. 75 für den Ausfluß von Dampf gegebenen, nur ist das kritische Druckverhältnis diesmal kleiner, nämlich etwa $0,32$. Das liegt daran, daß der Durchgang durch den Hahn nicht widerstandslos und nicht hinter dem engsten Querschnitt ungeführt ist; vielmehr führt die Gestaltung des Kanales im Hahnkörper

den Strahl und vermindert dadurch das kritische Druckverhältnis, ähnlich wie es bei Turbinendüsen unter dem Normalwert 0,57 liegt. Bei jedem Ausfluß, der nicht aus einer scharfkantigen Mündung oder aus einer einfach abgerundeten Düse (ohne sich erweiternden Ansatz nach de Laval) stattfindet, gilt die Unabhängigkeit der Ausflußmenge nur in um so engeren Grenzen, je weniger die Verhältnisse dem „einfachen“ Ausfluß ähneln. Hieraus ziehen wir später noch eine Folgerung.

Der andere Zweig der Versuchsreihe bezieht sich auf die Luftpumpe; da dieselbe bei bestimmter Luftmenge untersucht werden sollte, so

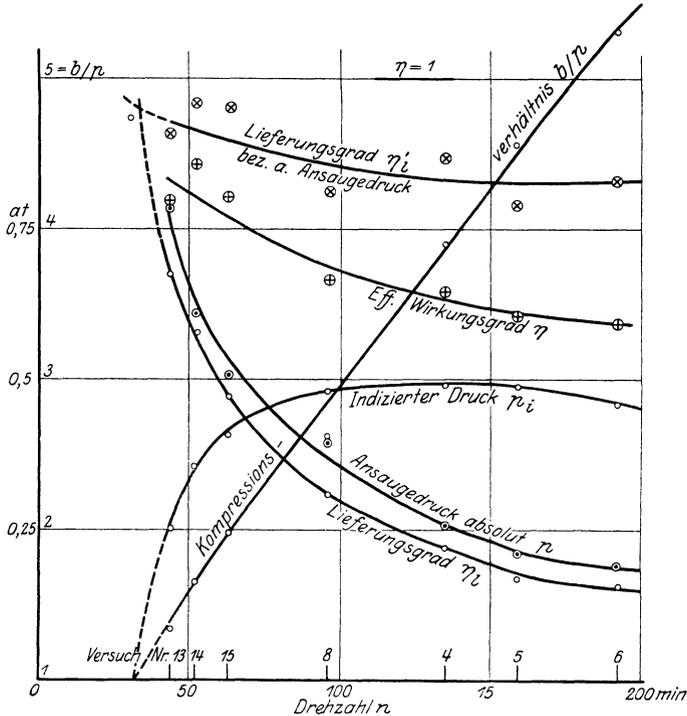


Fig. 279.¹⁾ Luftpumpe bei veränderlicher Drehzahl, gegen unveränderte Undichtigkeit laufend.

wurde in den Versuchen 13 bis 15 die Stellung des Regelhahnes empirisch so geändert, daß der Druckabfall in der Meßöffnung wieder 160 mm WS betrug; diese Versuche bilden daher in bezug auf die Luftpumpe die Fortsetzung der Reihe 4 bis 8. Bei ganz offen stehendem Hahnküken durfte die Drehzahl der Pumpe nicht unter $n = 44/\text{min}$ gehen, wenn die Luftmenge gefördert werden soll.

Die aus den Versuchen Nr. 4 bis 8 und 13 bis 15 bestehende Reihe, die ein gewisses Luftgewicht aus verschieden tiefem Vakuum heraus fördert und dazu der Luftpumpe verschiedene Drehzahl erteilt, zeigt das Folgende (Fig. 279).

Der Liefergrad η_l nimmt, wegen der Konstanz der Luftmenge, bei zunehmender Drehzahl ab, sofern man ihn (L_0) auf den Normal-

¹⁾ Punkte und Kurve η'_l ungenau, vgl. Tab. 93.

zustand der Luft (0°, 760 mm Q.-S.) bezieht; das pro Hub geförderte Luftgewicht nimmt also ab. Wenn man aber η'_i auf den Druck des Ansaugens bezieht, so daß er ein Maß für das angesaugte Luftvolumen ist, so ist er grundsätzlich konstant und zeigt nur die schwache Abnahme von etwa 0,95 bis 0,8 bei Steigerung der Drehzahl von 44 auf 192/min. Diese mäßige Abnahme hat in der höheren Temperatur ihren Grund, die im Zylinder bei dem höheren Kompressionsverhältnis entsteht. Denn die Endtemperatur des Kompressionsvorganges hängt nicht von dem Druckunterschied ab, der bei der Luftpumpe stets nur klein ist, sondern vom Verhältnis des absoluten Anfangsdruckes zum absoluten Enddruck, der bei Versuch Nr. 6 den Wert 5,31 erreicht; die Endtemperatur der Kompression ist daher theoretisch durch die Beziehung $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$ zu $T_2 = 1,610 \cdot T_1 = 1,610 \cdot 296$

= 476° abs. oder $t_2 = 203^\circ \text{C}$ bestimmt, d. h. genau so hoch wie bei der Kompression von 1 at abs. auf 5,31 at abs. im Kompressor. Praktisch ist die Temperatur der aus der Luftpumpe kommenden Luft niedriger als die der aus dem Vergleich stehenden Kompressor kommenden, weil die Wärmekapazität des kleineren Luftgewichtes kleiner ist und daher die Wärme leichter abgeführt wird — wenigstens wird das beim Vergleich zweier Zustände gleicher Drehzahl in die Erscheinung treten.

Der indizierte Druck p_i und damit das am Schwungrad ausgeübte Drehmoment geht, beginnend mit einem sehr kleinen Wert beim Druckunterschied Null, hindurch durch einen Höchstwert, der zwischen 0,224 und 0,263 at abs. Ansaugedruck liegt; bei noch kleinerem Gegen- druck nimmt das Drehmoment wieder ab, Versuch 6 zeigt hierzu freilich nur den ersten Ansatz, und eine weitere Verfolgung der Kurve der p_i oder M_i war bei der einmal gewählten Luftmenge unmöglich, weil die Drehzahl 192/min nicht überschritten werden durfte. Die Werte des theoretischen Drehmomentes in Zeile 15 liegen nicht in einer glatten Kurve, weil sie unter Verwendung des empirischen Zusammenhanges zwischen n und p gewonnen werden. Man kann das theoretische Drehmoment auch aus dem Inhalt des theoretischen Diagramms allein aus dem Druck herleiten, und erhält dann einen glatten Linienzug.

Die Erklärung für die auffällige Erscheinung, daß nach Durchschreitung eines *Maximums* bei besser werdendem Vakuum das zum Antrieb einer Luftpumpe nötige Drehmoment wieder abnimmt, liegt in der wechselnden Gestalt der Indikatordiagramme, die in der Gegend des Maximums völlig sind, bei gutem Vakuum aber an Breite, bei schlechtem an Höhe verlieren. An Fig. 282 wird das sogleich gezeigt werden.

Diese an sich auffällige Erscheinung ist altbekannt: bei Luftpumpen darf man die Antriebseinrichtung nicht nur nach dem Bedarf bei bestem Vakuum bemessen, sondern muß beispielsweise einen Drehstrommotor so wählen, daß er *im Anlaufen* das zwischendurch auftretende größte *Drehmoment* überwinden kann.

Die Erscheinung wird indessen gelegentlich ganz falsch gedeutet. Es wird aus ihr geschlossen, man könne ein sehr gutes Vakuum mit

geringerem Leistungsaufwand aufrecht erhalten als ein mäßiges. Das ist durchaus mißverständlich, denn zum Herausfordern einer gegebenen, durch Undichtheiten eindringenden Luftmenge ist zwar bei bestem Vakuum ein minderes Drehmoment, aber eine größere Drehzahl und jedenfalls eine *größere Leistung* nötig, auf die allein es für die Wirtschaftlichkeit ankommt. Bei unveränderter Drehzahl freilich würde auch die Leistung durch ein Maximum gehen, aber dieser Fall ist wohl niemals maßgebend, auch dann nicht, wenn eine Luftpumpe tatsächlich mit bestimmter Drehzahl läuft, etwa weil sie von einem Drehstrommotor angetrieben wird; denn eine solche Pumpe fördert je nach dem Vakuum ein verschiedenes Luftgewicht, und wenn sie daher, einen Behälter oder ein Rohrnetz bestimmter Undichtheit bedienend, bei einem sehr guten Vakuum an der Grenze ihrer Leistungsfähigkeit ist, so fördert sie bei mäßigerem Vakuum ein größeres Luftgewicht; das mäßigere Vakuum stellt sich daher nur ein, wenn man die Luftpumpe langsamer laufen läßt oder wenn der Düsenwert der Undichtheiten oder sonstiger Luftquellen (z. B. aus lufthaltigem Kühlwasser) größer wird, was durch Erweiterung des Rohrnetzes geschehen kann. Bei gegebenem Rohrnetz ist die hier widerlegte Anschauung also irrig, indem bei der betrachteten Variationsmöglichkeit nicht über die konstant gehaltenen Größen Klarheit herrscht.

In diesen Überlegungen läuft hie und da noch ein weiterer Fehlschluß unter, der sich auf die *durch Undichtheiten eindringende Luftmenge bei verschiedenem Vakuum*, insbesondere bei sehr gutem gegenüber mäßig gutem, bezieht. Theorie und Erfahrung lehrt, daß jenseits eines kritischen Druckverhältnisses eine Verringerung des Gegendruckes keine Steigerung des aus einer Öffnung strömenden Luftgewichtes zur Folge hat; hieraus folgert man wohl, das durch Undichtheiten eindringende Luftgewicht sei vom Vakuum unabhängig, sofern nur zur Wahrung des kritischen Druckverhältnisses der absolute Druck im Vakuumraum unter etwa 0,55 at liegt, also bei fast jedem in Betracht kommenden Vakuum. Es wurde schon oben (Fig. 278) gezeigt, daß für den Durchfluß durch einen Hahn das kritische Druckverhältnis kleiner als 0,55, nämlich etwa 0,32 ist; es wird um so niedriger, je mehr sich die einlassende Öffnung vom Charakter der „einfachen“ Öffnung entfernt; für kapillare Öffnungen besteht ein kritisches Druckverhältnis wohl überhaupt nicht mehr, man pflegt die durchströmende Menge dem Druckunterschied beiderseits der Kapillaren proportional zu setzen. — Undichtheiten an einer Flanschdichtung werden meist kapillaren Charakter haben; eine Durchrostung der Rohrwand wird freilich oft einer „einfachen“ Öffnung im Charakter gleichen. Die gesamte Undichtheit einer Rohrleitung wird also allgemein um so mehr Luft einlassen, je besser das Vakuum ist. Die oben schon widerlegte Annahme, ein sehr gutes Vakuum sei mit geringerem Energieaufwand zu erzielen als mäßiges, ist also um so weniger haltbar, als die meist gleichzeitig gemachte Annahme konstanter Luftzufuhr bei verschiedenem Vakuum nicht zutrifft: bei gutem Vakuum ist ein größeres Luftgewicht aus dem Vakuumraum zu schaffen als bei mäßigem.

Tabelle 94. Luftpumpe bei konstanter Drehzahl.

Maschinenabmessungen wie bei Tab. 93.

Hubvolumen $V_h = 0,0194 \text{ m}^3/\text{Uml}$ bei $n = 120/\text{min}$, also $V_s = 0,0388 \text{ m}^3/\text{s}$.
 Barometerstand $756 \text{ mm QS} = 1,028 \text{ at}$; Lufttemperatur 20° C ; $\gamma_l = 1,200 \text{ kg/m}^3$.

Nr.	Versuch	24	23	25	26	27	28
1	Drehzahl n /min	120	120	120	120	120	120
2	Vakuum $b - p$ gemessen . mm QS	~ 0	248	503	603	650	733
3	abs. Druck p kg/cm ²	$\sim 1,03$	0,691	0,344	0,208	0,144	0,032
4	Kompressionsverhältnis $b/p = \Pi$ —	~ 1	1,49	2,98	4,95	7,15	31
5	Unterdruck a. d. Meßöffnung Δp kg/m ²	—	850	219	67	24	0
6	Luftmenge $L = 0,000754 \cdot \sqrt{\Delta p}$ m ³ /s	—	0,0220	0,01116	0,00618	0,00369	0
7	Luftmenge reduziert L_o . . m ³ ($\frac{0}{760}$)/s	(0,031)	0,0204	0,0104	0,00573	0,00342	0
8	Lieferungsgrad η_l —	—	0,527	0,269	0,148	0,087	0
9	bez. a. Saugdruck η'_l —	—	0,79	0,81	0,735	0,625	0
10	Indizierter Druck p_i at	0,168	0,407	0,467	0,452	0,426	0,284
11	Indiz. Leistung $N_i = 3,80 \cdot p_i$ kW	0,638	1,55	1,78	1,72	1,62	1,08
12	relativ $N_i/L_o : 3600$. . kWh/m ³	(0,0057)	0,0195	0,0445	0,077	0,122	∞
13	Lufteinlaß durch 1 m^2 Düsenwert, Formel (2) und (3), = α m ³ /s	—	192	199	199	199	199
14	Düsenwert der Undichtheit $F = L : \alpha$ cm ²	~ 20	1,15	0,56	0,31	0,185	0

Diese Tatsache tritt noch klarer hervor bei der in Tabelle 94 gegebenen Versuchsreihe, bei der die Drehzahl unverändert blieb und durch Bedienen des Hahns der Fig. 277 die Düsenweite verändert wurde, gegen deren Wirkung ein Vakuum aufrecht zu halten war; das Vakuum änderte sich nun. Die Luftmenge konnte von Null (Hahn geschlossen, keine Undichtheit) bis zu einem Höchstwert gesteigert werden, der erreicht wurde, indem außer dem Hahn noch ein Blindflansch geöffnet wurde; diese größte Luftmenge bei Versuch Nr. 24 konnte freilich nicht mehr gemessen werden. Der Düsenwert der Undichtheit wurde wieder nach den Formeln (2) und (3) berechnet. Übrigens war noch, als bei den Versuchen mit kleinem Düsenwert der künstlich geschaffenen Undichtheit nicht unwesentlich, die Probe gemacht worden, ob sich ein am Behälter eingestelltes Vakuum befriedigend hielt. Das war so gut der Fall, daß man den Behälter als dicht ansprechen konnte: Düsenwert der natürlichen Undichtheit etwa Null.

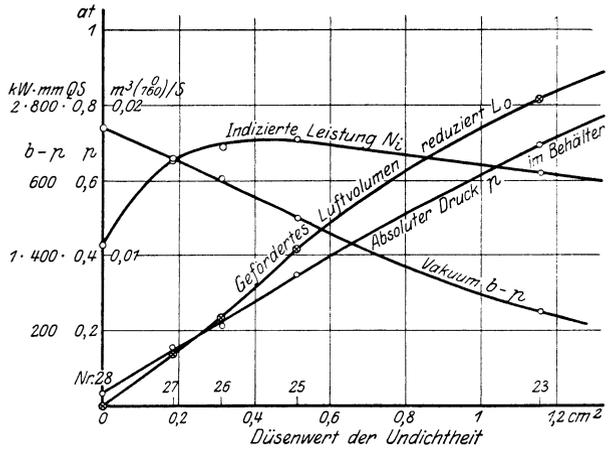


Fig. 280. Fig. 280 und 281. Luftpumpe mit unveränderter Drehzahl

Fig. 280 gibt das Ergebnis so, daß man sieht, wie sich Vakuum und Luftmenge je nach der Düsenweite ändern, gegen die die Luftpumpe arbeitet und die wieder durch Undichtheit des Behälters oder aber durch Lufthaltigkeit des Wasserinhaltes oder dergleichen gegeben sein kann. Die indizierte Leistung N_i geht durch einen Höchstwert, der flach erscheint, der aber in der Darstellung der Fig. 281, über dem Druck im Behälter aufgetragen, schärfer ausgeprägt ist. Die Kurve der relativen indizierten Leistung N_i/L_0 kWh/m³ zeigt deutlich die Irrigkeit der soeben besprochenen Anschauung: es ist zur Entfernung einer bestimmten Luftmenge ein um so größerer Leistungsaufwand nötig, je besser das Vakuum ist, und der Leistungsaufwand zur Erzielung der letzten Stufen des Vakuums ist sogar besonders groß.

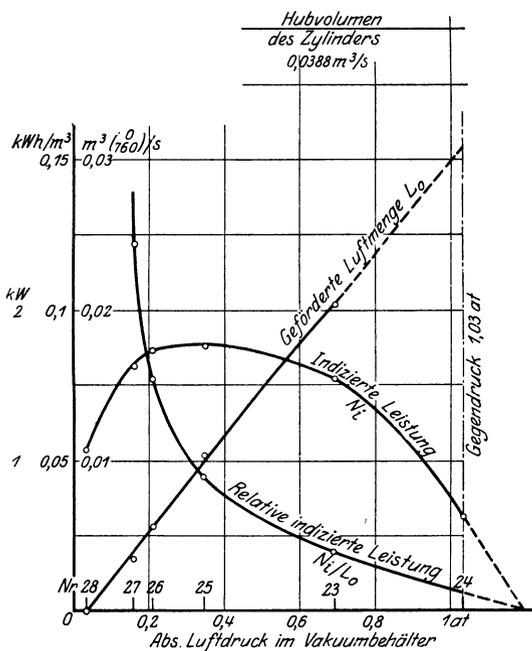


Fig. 281.¹⁾

gegen wechselnde Düsenweite der Undichtheit laufend.

Druckabfall einerseits, Druckanstieg andererseits werden durch dasselbe Luftgewicht dargestellt; daher sollen bei Ausschluß von Wärmeaufnahme die beiden senkrechten Strecken im Verhältnis des schädlichen Raumes einerseits zu dem Hubvolumen zuzüglich schädlichem Raum auf der anderen Seite stehen. Daß diese auf Herabdrückung des tiefst erreichbaren absoluten Druckes gerichtete Einrichtung der Überströmung eine Erhöhung des Arbeitsaufwandes ergibt, folgt aus dem irreversiblen Charakter des Überströmvorganges. In den Diagrammen einer mit Überströmung arbeitenden Luftpumpe darf man nicht den volu-

Die zu der Reihe gehörigen Indikatordiagramme gibt Fig. 282; die mittleren haben die größte Fläche.

Aus den Diagrammen sieht man, daß die Luftpumpe einen Überströmkanal nach Weiß hat, der im Augenblick, wo die Maschinenkurbel den Totpunkt durchschreitet, beide Zylinderseiten miteinander verbindet. Dadurch gibt der schädliche Raum der Seite, deren Ausblas gerade beendet ist, seinen Inhalt an die andere Seite ab. Daher fällt der Druck im schädlichen Raum fast senkrecht, ohne Expansionslinie, während auf der anderen Seite im Totpunkt der Kompressionsbeginn nicht durch eine Spitze, sondern durch einen senkrechten Druckanstieg dargestellt wird.

¹⁾ In Fig. 281 ist statt N_i/L_0 versehentlich N_i/L eingetragen.

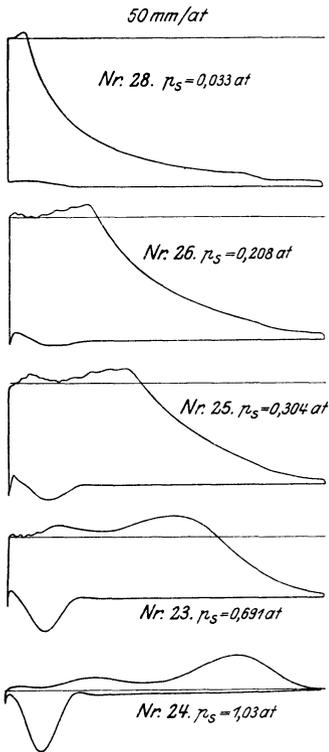


Fig. 282. Indikatordiagramme einer Luftpumpe mit Weißscher Überströmung bei verschiedenem Ansaugdruck. $\frac{2}{5}$ n. Gr.

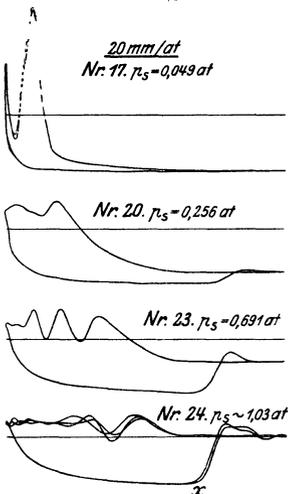


Fig. 283. Indikatordiagramme der Kondensatpumpe einer Kondensation, mit Schlitzsteuerung. $\frac{2}{5}$ n. Gr.

metrischen Wirkungsgrad nach Maßgabe von Fig. 268 aus der auf der Linie des Saugdrucks abgeschnittenen Länge entnehmen, denn die übergeströmte Menge, die nicht gefördert worden ist, ist in ihr enthalten. Man vergleiche hierüber § 148.

Es handelt sich um vorstehenden um die trockene Luftpumpe einer Kondensationsanlage. Fig. 283 gibt bei wechselndem Druck im Kondensator die Diagramme der zugehörigen *Kondensatpumpe*, die in Fig. 277 auch zu erkennen ist. Diese Pumpe hat kein Saugventil, sondern das Wasser läuft ihr von selbst zu durch einen Schlitz, den der Kolben freigibt, wenn er durch seinen oberen (äußeren) Totpunkt geht. Das Diagramm Nr. 17 bei gutem Vakuum ist einwandfrei. Bei geringerem Vakuum paßt die Einsteuerung nicht, es entsteht ein besseres Vakuum im Zylinder als im Saugraum, und erst beim Öffnen des Schlitzes findet im Punkte x (Nr. 24) der Ausgleich statt. Ein erheblicher Mehraufwand an Arbeit ist die Folge; eine zwangsläufige Steuerung kann eben nur für ein Druckverhältnis richtig sein, und ist bei jedem anderen Druckverhältnis ungünstiger als eine selbsttätige Steuerung, die aber ihrerseits bei richtiger Einstellung den im Vakuum wesentlichen Vorteil geringen Druckverlustes hat.

148. Einzelheiten über das Kompressor-diagramm. Die Diagramme aus Fig. 272 sind in Fig. 384 in größerem und einheitlichem Maßstab wiederholt. Im Original wurde dazu an den durch Kreise kenntlichen Stellen der Druck ermittelt und übertragen. Der schädliche Raum des Kompressors in Größe von 1,3 ltr. = 3,2% des Hubvolumens wurde nach links, der Barometerstand 760 mm Q-S. = 1,03 at nach unten angetragen und so der Punkt 0 erhalten. Er ist der Mittelpunkt der gleichseitigen Hyperbel, die durch den Anfangspunkt A der Kompressionslinie gelegt und als Isotherme bezeichnet ist. Bei konstanter Temperatur würde die Kompression nach der Kurve AB

erfolgen und einen merklich geringeren Arbeitsaufwand erfordern. Die wahre Kompressionslinie ist also eine Linie steigender Temperatur.

In bezug auf 0 als Koordinatenanfang ist die *Isotherme* durch die

Beziehung $p \cdot V = \text{konst.}$ gekennzeichnet; zu ihrer Verwirklichung ist Abführung der Kompressionswärme nötig, die durch den wassergekühlten Mantel des Zylinders erstrebt wird.

Ohne jede Abführung oder Zuführung von Wärme

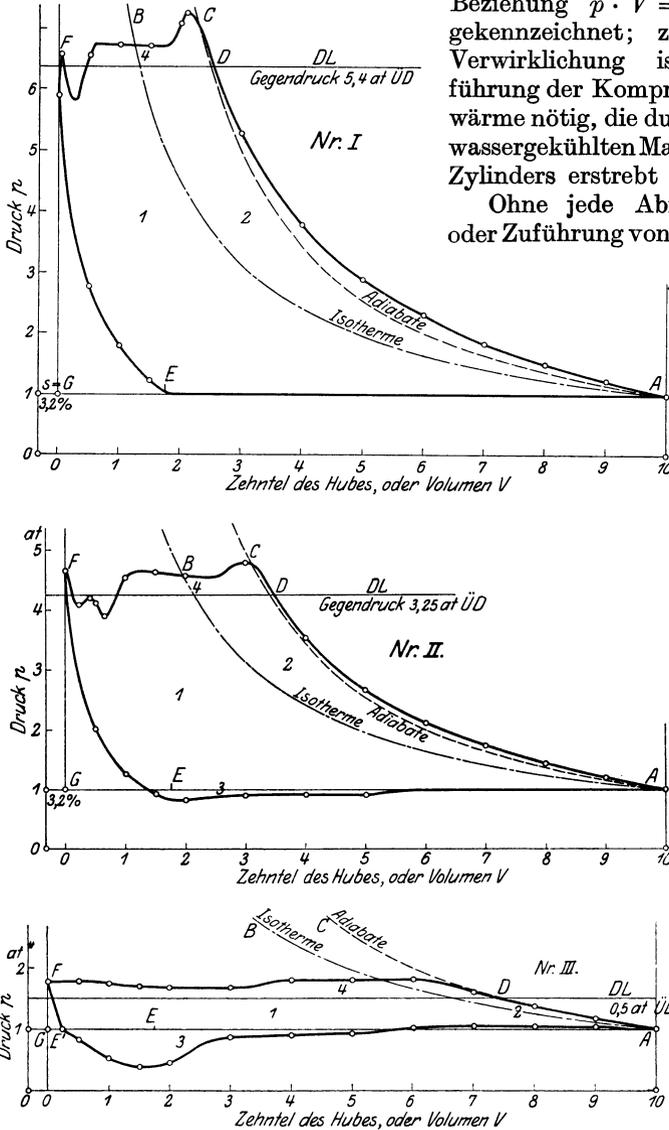


Fig. 284. Indikator diagramme eines Kompressors (Fig. 272), einheitlich umgezeichnet. $\frac{2}{3}$ n. Gr.

würde die Kompression unter Anstieg der Temperatur nach der Beziehung $p \cdot V^{1,41} = \text{konst.}$ erfolgen, die als *Adiabate AC* in Fig. 284 ebenfalls eingezeichnet ist. Die *wirkliche Kompressionslinie* liegt über der

Adiabate; in der Richtung der Kompression entfernt sie sich (bei Nr. I und II) zunächst von ihr, um sich ihr dann wieder zu nähern. In der ersten Zeit der Kompression nimmt also die Luft von der Wandung Wärme auf, die demnach wärmer ist als sie; im ferneren Verlauf der Kompression steigt die Temperatur der Luft über die der Wandung, die Luft gibt dann Wärme an die Wandung ab; die Wandung hält sich also ihrerseits auf einer mittleren, vermöge des gegenüber der Luft höheren Wasserwerts der in Frage kommenden Massen nur wenig schwankenden Temperatur; genauer gesagt trifft das nur auf die innersten Schichten zu, während nach außen hin die Temperatur abnimmt, sich der des Kühlwassers nähert und zeitlich keinen wesentlichen Schwankungen unterliegen dürfte. Die Erklärung für die Lage der wirklichen Kompressionslinie zur Adiabaten ist so glaublich, daß man sie als richtig unterstellen darf, auch wenn man das gute Einfallen der Kurven mehr dem Zufall zuzuschreiben geneigt ist angesichts der Unsicherheit, die über den Verlauf der wirklichen Expansionslinie wegen der Undichtheiten der Ventile, der unsicheren Kenntnis des schädlichen Raumes und der Druckentnahme aus dem kleinen Originaldiagramm herrscht.

Daß diese Unsicherheiten in erträglichen Grenzen bleiben, folgt auch aus Betrachtung der Diagramme Nr. I und III im Vergleich zu II. Bei höherem Kompressionsenddruck, 5,4 at in Nr. I, tritt das Verhalten im Verhältnis zur Adiabaten deutlicher zutage als bei Nr. II, während bei kleinem Gegendruck, 0,5 at in Nr. III, die Kühlung über die Kompressionswärme das Übergewicht erlangt.

In Nr. II der Fig. 284 ist ebenso wie in Nr. I und III die Linie des Gegendruckes eingetragen. Das Diagramm des Indikators geht über dieselbe entsprechend dem Widerstand des Druckventiles hinaus, zunächst um einen größeren Betrag, der der Beschleunigung der Ventilmasse beim Öffnen entspricht; im weiteren Verlauf der Ausblaseperiode liegt die Drucklinie im Zylinderinneren um den reinen Druckverlust bei geöffnetem Ventil höher als der Gegendruck; der Druckverlust sollte mit der abnehmenden Kolbengeschwindigkeit gegen das Hubende allmählich abnehmen, zu erkennen ist das nicht; über die plötzliche Einsenkung der Drucklinie kurz vor dem Ende des Ausblasens können wir eine Erklärung nicht geben.

Ein Vergleich der Diagramme Nr. I, II und III läßt erkennen, daß der Kompressor mit *zwangsläufig gesteuertem Saugorgan* arbeitet. Dafür spricht schon der sehr geringe Druckverlust beim Einströmen in den Zylinder im Diagramm Nr. I; bei selbsttätig arbeitendem Einlaßorgan (z. B. Ventil) würde ein der Federbelastung entsprechender Druckverlust eintreten, der während des Ansaugens einen Unterdruck im Zylinder bewirkte, wie in Fig. 269; ein solcher ist aber in Nr. I nicht erkennbar. Deutlicher weisen die Diagramme Nr. II und Nr. III auf ein gesteuertes Einlaßorgan hin, dessen Einstellung unverändert gelassen war. Die Öffnung desselben, eines Drehschiebers nach Corliß, erfolgte im Punkte *E*, der in allen drei Diagrammen gleichmäßig gekennzeichnet ist. Diese Einstellung paßt für Nr. I, also für 5,4 at

Gegendruck; sie erfolgt dann gerade, wenn die Expansionslinie die Atmosphärenlinie (genauer: die Linie des Ansaugdruckes vor dem Kompressor, die z. B. bei längerer Saugleitung unter der atmosphärischen liegen kann) schneidet. In Nr. II und III, wo dieser Schnitt früher in den Punkten E' eintritt, erfolgt die Öffnung des Drehschiebers zu spät, daher unterschreitet die Expansionslinie zunächst die atmosphärische, um erst unterhalb des Punktes E umzubiegen und sich ihr, jedoch nur allmählich, zu nähern.

Die innere Fläche des Indikator diagramms, abgeteilt von der Isothermen und der Expansionslinie sowie den Linien des Saug- und des Gegendruckes ist in gewissem Sinne ein Maß für den Arbeitsaufwand, den man nur zu leisten hätte, wenn man die Kompressionswärme während der Kompression, also in statu nascendi abführte und wenn man Druckverluste wegen des Arbeitens der Steuerorgane vermied. Neben dieser nutzbaren Fläche 1 findet sich rechts die Fläche 2, die die Mehrarbeit infolge der Temperaturerhöhung darstellt, während oben durch Fläche 4 der Aufwand für das Herausdrücken und unten durch Fläche 3 der Aufwand für das Ansaugen dargestellt ist. In Tabelle 91 sind diese *Verlustflächen* einmal in ihrem Wert in kW, ferner in Prozenten von der Gesamtfläche (genauer: von der Summe der gemessenen Einzelwerte) angegeben. Dabei gehören gewisse Teile merklicher Größe sowohl zu 2 als auch zu 3, und es fragt sich, welchem Verlust man sie anrechnen will. Es erscheint uns richtiger, das eigentliche, zwischen dem Saug- und Gegendruck liegende Diagramm einmal bis zur Isotherme, ein zweites Mal bis zur wirklichen Kompressionslinie gehend zu denken, die Steuerungsverluste aber über und unter diesem Diagramm liegend zu denken, woraus dann folgt, daß jene zweifelhaften Flächen-teile zu der Fläche 3 (und evtl. 4) zu rechnen waren.

Die Verluste durch nichtisothermische Kompression nehmen absolut und erst recht prozentual schnell zu mit zunehmendem Kompressionsverhältnis; da gleichzeitig der Lieferungsgrad abnimmt, so kommt man bald in das Gebiet, wo sich mehrstufige Kompression mit Zwischenkühlung empfiehlt. Umgekehrt nehmen die Verluste durch Steuerung absolut und erst recht prozentual zu mit abnehmendem Druckverhältnis. Für das Druckventil hängt das, bei etwa unverändertem Druckverhältnis in Atmosphären gemessen, mit der zunehmenden Länge der Ausblaseperiode bei abnehmender Gesamtfläche zusammen. Für das Saugorgan ändert sich die Dauer der Ansaugperiode nur in engen Grenzen; dagegen hat auf das Anwachsen der Steuerverluste bei geringerem Druckverhältnis die dann falsche Einstellung des Saugorgans ungünstigen Einfluß; beim gesteuerten Organ kann man die Verlustfläche durch Berichtigung der Einstellung fast zum Verschwinden bringen.

Es ist ein Nachteil des gesteuerten Saugorganes, daß es nur für ein Kompressionsverhältnis richtig eingesteuert sein kann und bei unrichtiger Einsteuerung merklichen Mehraufwand an Arbeit ergibt. Dieser Mehraufwand tritt ebenso ein, wenn das Saugorgan zu früh öffnet, wie wenn das zu spät geschieht. Im letzteren Fall entsteht ein Mehraufwand an Arbeit, indem schon vor dem Schnittpunkt E' der Expan-

sionslinie mit der Linie des Saugdrucks der Druck im Expansionsraum plötzlich auf den Saugdruck absinkt. Wenn das Öffnen z. B. schon im Totpunkt des Kolbens erfolgt, so fällt der Druck alsbald nach der Senkrechten FG ab, und es muß statt der Verlustfläche 3 ein Mehraufwand entsprechend der Fläche FGE' geleistet werden.

Wesentlich ist es zu beachten, daß der Lieferungsgrad und der volumetrische Wirkungsgrad keinen (wesentlichen) Einfluß durch die falsche (zu frühe oder zu späte) Einstellung der Saugsteuerung erleidet; die Mehrarbeit ist also bei unveränderter Nutzwirkung aufzuwenden. Im Fall zu später Öffnung des Saugorgans (Nr. II oder III der Fig. 284) wird zwar von E' bis E nicht angesaugt, aber durch Druckanstieg jenseits E wird das gleiche Luftgewicht nachträglich hereingeholt, nur in ungünstigerer, weil irreversibler Form. Der Schnitt E' legt also wie beim normalen Diagramm die eingesaugte Menge fest, und es gilt $\eta_{vol} = AE' : AG$. Im umgekehrten Fall zu früher Eröffnung wird zwar die Linie des Saugdruckes vom Indikatordiagramm eher erreicht, eine vermehrte Luftförderung ergibt sich aber hieraus nicht, indem bei der Eröffnung Luft aus dem Zylinder zurückgeht, die nun erst wieder hereingeholt wird; diese wird dann nicht nutzbar gefördert. Der volumetrische Wirkungsgrad wird daher auch hier durch den Schnittpunkt der Expansionslinie mit der des Saugdrucks festgelegt, ist aber nicht aus dem Diagramm zu entnehmen, weil die Expansionslinie zu früh abbricht. Es wäre dann falsch, aus dem früherliegenden Schnittpunkt des Indikatordiagrammes mit der Linie des Saugdruckes auf größere Fördermenge zu schließen; man übersähe dabei die allgemeine Regel, daß Einführung irreversibler Vorgänge grundsätzlich niemals eine Verbesserung bedeuten kann.

Die Luftpumpe, an der die Diagramme der Fig. 282 entnommen sind, hat ebenfalls zwangläufige Saugsteuerung, wie die nach unten gerichteten Ausbauchungen der Sauglinie (ähnlich denen in Fig. 284) andeuten, nämlich einen Weißschen Flachschieber mit Überströmkanal. Letzterer bewirkt wieder, daß die Expansionslinie aus dem schädlichen Raum heraus nicht in die Erscheinung tritt, man kann daher den volumetrischen Wirkungsgrad nicht im Diagramm abgreifen.

Diese letztere Wirkung hat übrigens auch jede Undichtheit des Saugorgans, die durch Rücktreten von Luft den Druck im schädlichen Raum schneller abfallen läßt. Wie beim frühen Öffnen eines gesteuerten Organes wird dann die scheinbare Expansionslinie steiler, der Arbeitsaufwand wird größer, aber die Luftförderung bleibt gleich groß; der irreversible Vorgang hat also keine Verbesserung zur Folge, den volumetrischen Wirkungsgrad darf man nicht abgreifen. Da man der Dichtigkeit des Saugorgans und übrigens auch des Druckorgans niemals sicher ist und da geringe Undichtheiten bei der geringen Größe des schädlichen Raumes die Expansionslinie stark beeinflussen, so ist die Entnahme des volumetrischen Wirkungsgrades aus dem Diagramm stets von zweifelhafter Zuverlässigkeit.

Indem wir hiermit bereits zu den *Fehlern im Kompressordiagramm* gekommen sind, so mögen noch die Diagramme Fig. 285a bis d gezeigt

werden. Sie rühren von einem einfach wirkenden Kompressor alter Bauart, der mit schweren Tellerventilen ausgerüstet war und entsprechend langsam lief ($n = 50/\text{min}$).

Die Diagrammpaare a und b sind im normalen Gang aufgenommen, bei 2 und bei 2,8 at Gegendruck; sie werden gegeben, weil die zugehörigen Druckraumdiagramme gezeigt werden sollen; die Druckraumdiagramme zeigen übrigens nichts Bemerkenswertes; der Druck ist fast konstant, erleidet nur durch die Ventileröffnung einige mäßige Schwingungen,

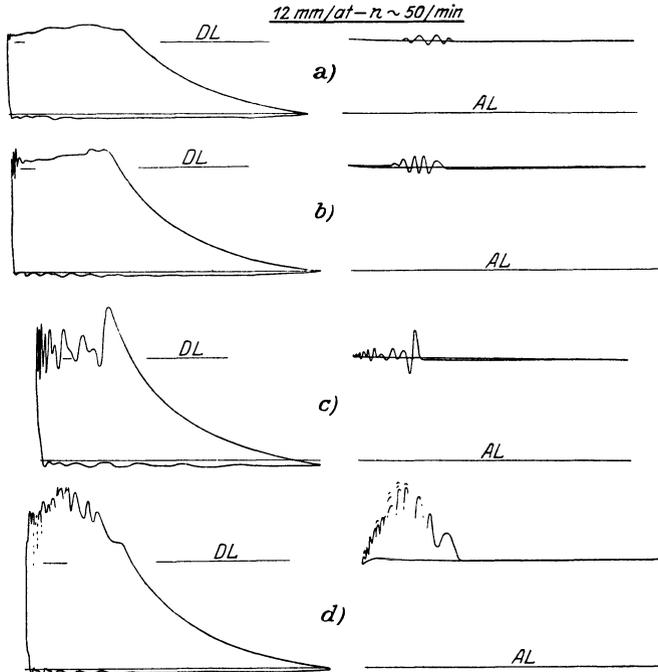


Fig. 285. Diagramme eines Kompressors, Zylinder und Druckraum. a) und b) normal; c) Druckventil schlecht abgefangen, flattert; d) ohne Windkessel. $\frac{2}{5}$ n. Gr.

die wohl einen Schwingungsvorgang in der Druckleitung darstellen mögen, der durch die Ventileröffnung und den Luftstoß ausgelöst wird.

Das Diagrammpaar Fig. 285c war aufgenommen worden zu einer Zeit, als das schwere, durch eine Feder belastete Tellerventil keine Hubbegrenzung hatte, infolge dessen nur durch die Federspannung abgefangen wurde und unter deren Einwirkung in Schwingungen geriet, die es stark flattern ließen, so daß es mehrfach schnatternd auf seinen Sitz trieb; zur Beseitigung des Schnattergeräusches wurde dann eine stramm federnde Begrenzung für den Ventilhub angebracht, mit dem Ergebnis, daß das Geräusch fortfiel, also Sitz und Ventil geschont wurden, und daß das Diagramm b erhalten wurde. Das Diagrammpaar c zeigt stärkere Schwingungen, übrigens auch eine durch Auf-

und Abflackern der Amplitude kenntliche Resonanzerscheinung (zwischen zwei Luftsäulen, oder zwischen Luftsäule und Indikatorfeder), sonst aber nichts Bemerkenswertes.

Als das Diagrammpaar *d* aufgenommen wurde, war der Windkessel mäßiger Größe abgeschaltet, der gleich hinter dem Druckventil in der Druckleitung war. Die geförderte Luftmenge mußte nun in etwa $\frac{1}{8}$ der Gesamtzeit, nämlich während der Ventileröffnung, durch die Druckleitung gehen, was diese nun als durchaus unzureichend erscheinen läßt; im Augenblick des Ventilhubes wird eine Druckwelle in die Leitung entsandt, die eine erhebliche örtliche (am Beginn der Druckleitung)

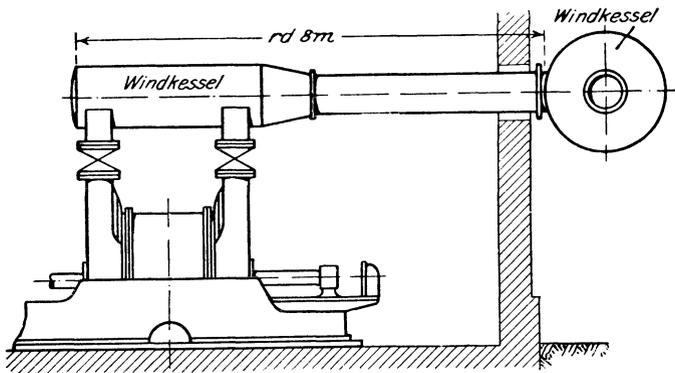


Fig. 286 a. Kompressor mit Leitung.

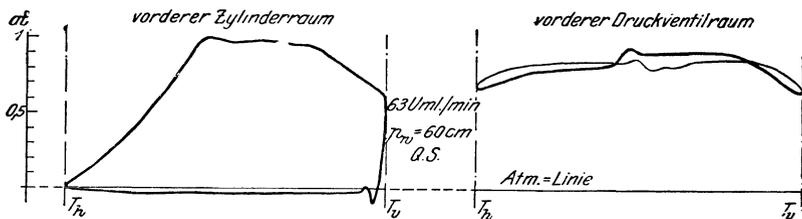


Fig. 286 b. Indikator diagramme an dem Kompressor Fig. 286 a mit stehenden Schwingungen in der Verbindungsleitung zwischen den beiden Windkesseln. Nach Borth.

und zeitliche (während der Ventileröffnung) Drucksteigerung ergibt. Bemerkenswert ist auch die Massenschwingung, die in der Druckleitung nach Ventilschluß in dem rückkehrenden Zuge des Druckraumdiagrammes abklingt.

Massenschwingungen in der Druckleitung von Kompressoren können so auftreten wie in der Druckleitung von Pumpen; sie können als stehende Schwingung zwischen zwei Windkesseln erhebliche Größe annehmen und auch erheblichen Leistungsverbrauch im Gefolge haben, wenn Resonanz zwischen der Eigenschwingungszahl einer Leitung und der dem Kompressor- oder Gebläsegang entsprechenden Impulszahl eintritt. Die Erscheinungen sind analog den in § 123 für die Kolbenpumpe besprochenen. Sie sind erwähnt schon von Köster, Z. d. V.

D. I. 1904, und ausführlich untersucht von Borth, Z. d. V. D. I. 1916. Fig. 286 b gibt einige Diagramme wieder, die an dem Gebläse Fig. 286 a nahe dem Resonanzzustand erhalten wurden. Es ist bekannt, daß der Mehrverbrauch durch Resonanz besonders lästig ist bei Gebläsen mit Gasmaschinenantrieb, weil die Gasmaschine wegen des Verlaufs der Verbrauchskurve (Fig. 134 bei § 92) im normalen Zustande nahe der Höchstlast laufen soll, so daß sie das vermehrte Drehmoment im Resonanzpunkt (ähnlich Fig. 230 bei § 123) nicht überwinden kann. Abhilfe ist dann durch Änderung der Rohr-abmessungen zu schaffen.

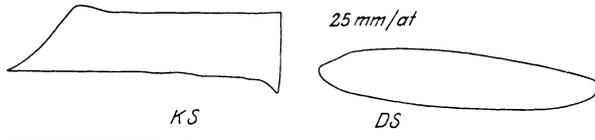


Fig. 287. Diagramme eines NH_3 -Kompressors; an der Deckelseite hat sich das Saugventil in geöffnetem Zustande festgeklemmt. $\frac{2}{5}$ n. Gr.

Fig. 287 zeigt das Diagrammpaar eines Ammoniakkompressors. Das

Saugventil der Deckelseite hing in geöffnetem Zustande fest, so daß der Druck in dieser Zylinderhälfte um den Saugdruck herum nach dem Spiel des Kolbens hin- und herschwankt.

e) Kühlanlagen.

149. Kompressions- und Absorptionsverfahren. Die Kompressionskühlanlage ist eine der wichtigsten und wärmetechnisch die interessanteste Anwendung des Kompressors. Ihr Schema ist durch Fig. 288 gegeben. Bei der Absorptionskühlanlage ist der Kompressor durch eine umständlichere Vorrichtung zur Unterdrucksetzung ersetzt.

Die *Kühlwirkung* erfolgt durch Verdampfen des flüssigen Kälte-trägers in der Verdampferschlange; die Verdampfungswärme wird dabei durch die Schlangenoberfläche hindurch dem zu kühlenden Raum oder Gut entzogen, wodurch dasselbe gekühlt wird. Die Verdampfungstemperatur im Verdampfer muß dazu entsprechend dem Übergangswiderstand niedriger sein als die tiefste Temperatur des Kühlgutes, hiernach richtet sich gemäß der Spannungskurve des Kälte-trägers der Druck, der in der Schlange herrschen muß.

Als Kälte-träger kommt hauptsächlich Ammoniak NH_3 , daneben schweflige Säure SO_2 und Kohlensäure CO_2 in Betracht.

Man kann dem Verdampfer den flüssigen Kälte-träger aus einer stählernen Vorratsflasche zuführen; der Zufluß erfolgt dann unter dem Einfluß des Überdrucks, der infolge höherer Temperatur in der Flasche gegenüber dem Verdampfer herrscht; der Zufluß muß durch ein Regelventil geregelt und der Druckunterschied aufrecht erhalten werden; die Flasche muß liegen, damit Flüssigkeit austritt.

Die Stahlflasche als Quelle würde bald versiegen; sie wird für kontinuierlichen Betrieb ersetzt durch eine Vorrichtung zur kontinuierlichen Wiederverflüssigung des verdampften Kälte-trägers, der dann dem Verdampfer durch das Regelventil hindurch kontinuierlich wieder zuströmt. Zur Verflüssigung muß die Verdampfungswärme dem Kälte-

träger entzogen werden; zu diesem Zweck steht Kühlwasser natürlich von höherer Temperatur zur Verfügung als der im Kühlgut zu erzielen, und die Verflüssigungstemperatur in den Kondensatorschlangen muß wegen des Wärmeüberganges durch die Schlangenoberfläche etwas höher sein als die höchste Temperatur des (ablaufenden) Kühlwassers. Der höheren Temperatur im Kondensator entspricht ein höherer Druck in demselben als im Verdampfer, und hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, das Kältemittel vor der Verflüssigung vom Druck des Verdampfers auf den Druck des Kondensators zu bringen.

Die Unterdrucksetzung erfolgt bei der Kompressions- und Absorptionskühlmaschine in verschiedener Weise, in beiden Fällen zwar mechanisch, bei der Kompressionsmaschine in Dampfform durch einfaches Komprimieren (Fig. 288), bei der Absorptionsmaschine in Gestalt von wässriger Ammoniaklösung durch eine Flüssigkeitspumpe; dazu wird der vom Verdampfer kommende Ammoniakdampf von Wasser (unter Abführung der Bindungswärme durch Kühlwasser) absorbiert, und nach erfolgter Unterdrucksetzung wird das Ammoniak in einem Austreiber durch Erwärmung wieder aus dem Wasser ausgetrieben. Das wieder gasförmige, unter Druck stehende Ammoniak gelangt zum Kondensator in etwa demselben Zustand wie in Fig. 288 aus dem Kompressor.

Die drei Teile: Kondensator, Regelventil, Verdampfer, sind bei beiden Formen die gleichen. Die äußerlich viel umständlichere Absorptionsanlage hat vor der Kompressionsanlage den Vorteil geringen Arbeitsverbrauches; denn die Ammoniaklösung hat nur einen Bruchteil des Volumens, den das in ihr enthaltene gasförmige Ammoniak einnimmt, und die Druckstufe ist für beide Maschinenarten die gleiche. (Der Vergleich ist natürlich mit der NH_3 -Kompressionsmaschine zu ziehen.) An die Stelle des Arbeitsverbrauches tritt bei der Absorptionsmaschine der Dampfverbrauch im Austreiber. Energetisch sind beide Verbrauchsmengen — Arbeit und Dampf — einander äquivalent, so daß nicht eigentlich ein grundsätzlicher Unterschied zwischen beiden besteht. Praktisch ist es nicht immer gleichgültig, ob man Arbeit oder Dampf verwendet, welcher letzterer nämlich Niederdruckdampf und daher Abdampf sein kann. In Anlagen mit Abdampfverwendung im Gegen- druckbetrieb kommt es nach § 87 c darauf an, die Abnahme von Arbeit N (im allgemeinen in Gestalt elektrischen Stromes) und von Dampf D in das dem Dampfverbrauch bzw. der Dampfabgabe d_2 der Maschinentype bei dem verlangten Gegendruck entsprechende Verhältnis zu bringen: es ist zu erstreben

$$\frac{D}{N} = d_2 \cdot \dots \dots \dots (1)$$

Steht nun d_2 in einer vorhandenen Anlage etwa fest, so muß man D oder N zu vergrößern suchen, je nachdem, durch welche Maßnahme man sich der Gleichung (1) nähert. Bei Beschaffung einer Kühlanlage vergrößert man D durch Beschaffung einer Absorptionsmaschine, die demnach bei Anlagen mit Zwischendampfentnahme am Platze ist; eine Kompressionsmaschine dagegen vergrößert N , für deren Beschaf-

fung nur der geringfügige eigentliche Wärmeverbrauch $d_1 - d_2$ in Rechnung kommt, solange man für den Abdampf Verwendung hat, d. h. solange man dadurch die Inanspruchnahme der in Fig. 131 b (bei § 87 a) vorhandenen Niederdruckkessel herabsetzt, was eben der Fall ist, solange $N \cdot d_2 > D$ ist.

Wo keine Abdampfausnutzung in Betracht kommt, sind beide Formen gleichwertig. *Energetisch verglichen* liegt bei der Absorptionsmaschine der gesamte Verbrauch (abgesehen von der geringfügigen Pumpenleistung) an der Stelle der Kälteerzeugung. Bei der Kompressionsmaschine wird dieselbe (nicht notwendig genau die gleiche) Dampfmenge in der Kondensationsmaschine der elektrischen Zentrale verbraucht, und auch der erhebliche Kühlwasserverbrauch des Absorbers entspricht energetisch dem Kühlwasserbedarf für die Dampfmaschinenkondensation in der Zentrale. Praktisch ist es meist angenehmer, wenn man diese Verbräuche zentralisiert in der Zentrale hat, die z. B. bezüglich der Kühlwasserbeschaffung günstig (an einen Fluß) gelegt zu werden pflegt. Der dezentralisierte Betrieb mit der

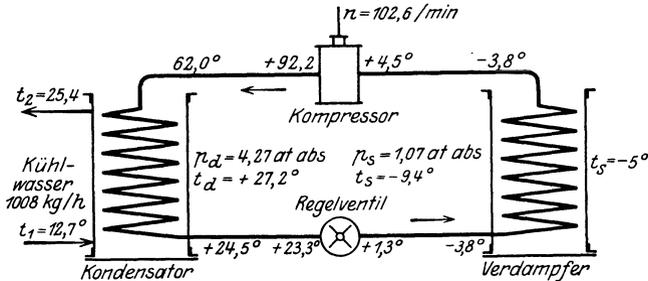


Fig. 288. Schema einer Kompressionskühlanlage, mit den Zahlenwerten für SO_2 nach Beispiel.

Absorptionsmaschine ist daher im allgemeinen nur in dem Falle am Platze, wo man Abdampf verwenden kann, d. h. in Anlagen mit Gegen- druckbetrieb mit $N \cdot d_2 > D$, in Anlagen mit Zwischendampfentnahme (Fig. 131 e oder f bei § 87 b).

Beiläufig sei noch bemerkt, daß die Wasserdampf-Strahlkühlmaschine im Sinn dieser Überlegungen zu den Kompressionsverfahren gehört, obwohl sie Dampf verbraucht; denn der Betriebsdampf dient zur Kompression des aus dem Verdampfer angesaugten Dampfes, nicht seine Wärme, sondern seine Arbeitsfähigkeit wird in einem Strahlgebläse ausgenutzt, die Verwendung von niedergespanntem Abdampf ist daher nicht im Sinne des Verfahrens und bedingt einen Mehrverbrauch gegenüber Hochdruckdampf.

150. Energieumsatz. Die Wirkung einer Kühlanlage ist gekennzeichnet durch die *Kühlleistung*, das ist die dem Kühlraum oder Kühlgut entzogene Wärmemenge in kcal/h, sowie durch die Kühltemperatur. Mehr als auf letztere kommt es auf den *Temperaturunterschied zwischen Kondensator und Verdampfer* an.

Die Kühlleistung wird nach Maßgabe der Verdampfungswärme im wesentlichen durch die umlaufende Menge des Kälteträgers bestimmt.

Der Temperaturunterschied zwischen Kondensator und Verdampfer bedingt das Verhältnis der Drucke in diesen beiden und damit den Arbeitsaufwand zur Kompression von 1 kg Kälteträger; er ist äußere Betriebsbedingung.

Der Wirtschaftlichkeitsversuch an der Kühlanlage hat demnach festzustellen:

die Kühlleistung, zu erhalten als Produkt aus dem Wasserwert des Kühlgutes und der ihm erteilten Temperaturerniedrigung;
den Leistungsaufwand, das ist bei der Kompressionsmaschine die indizierte Leistung oder die Antriebsleistung des Kompressors; bei der Absorptionsmaschine der Dampfaufwand am Austreiber und der Leistungsverbrauch an der Ammoniakpumpe.

die Temperaturverhältnisse am Verdampfer und Kondensator, also die Drucke im Innern der beiderseitigen Heizflächen, aus denen die Verdampfungs- und Kondensationstemperatur nach der Sättigungsdruckkurve folgt, sowie die Temperaturverhältnisse in den die Kühlflächen umspülenden Flüssigkeiten;

die Kühlwassermenge als eine Größe, die den Leistungsaufwand maßgebend beeinflusst; auch ist das Kühlwasser nicht stets umsonst und nicht stets unbeschränkt zu haben.

Regelmäßig wird man noch festzustellen suchen, ob die Dämpfe überhitzt in den Kondensator kommen und ob die Flüssigkeit denselben unterkühlt verläßt. Bei der Absorptionsmaschine bietet überdies der Absorptionsteil Gelegenheit zu Messungen aller Art bezüglich des Verlaufes der Vorgänge im Absorber, im Austreiber und im Austauscher; diese Messungen sind zwar für die Feststellung der Wirtschaftlichkeit ohne Belang, können aber Anhalt für ihre Verbesserung geben.

Das Folgende bezieht sich zunächst auf Kompressionsanlagen.

Die *Wärmebilanz* einer solchen wird nach folgendem Schema aufgestellt:

Hinein:	Heraus:
a) Kühlleistung, Wärme aus dem Kühlgut. 80%	c) Kondensatorleistung, Wärme ins Kühlwasser. 100%
b) Indizierte Leistung des Kompressors. 20%	d) (Regelventil, verloren.) 0%

Die Bezeichnungen Hinein und Heraus beziehen sich auf den Kreislauf des Kälteträgers (z. B. Ammoniak) und bedeuten Wärmemengen; sollten sie sich auf Kälte beziehen, so müßte man die Überschriften vertauschen.

Die Kühlanlage ist hiernach eine *Umkehrung der Dampfkraftanlage*, wie das eine Wärmebilanz erkennen läßt, wenn man sie für die Dampfkraftanlage wie folgt anordnet, bezogen auf den bei einer rückspeisenden Anlage geschlossenen Kreislauf des Kälteträgers:

Hinein:	Heraus:
c) Wärme aus den Feuergasen 100%	b) Indizierte Leistung der Kraftmaschine. 20%
d) Indizierte Leistung der Speisepumpe $\sim 0\%$	a) Wärme ins Kühlwasser des Kondensators. 80%

Auf die geringe Energie, die man bei der Kühlmaschine gewinnen könnte, indem man an Stelle des Regelventils eine der Speisepumpe entsprechende kleine Flüssigkeitskraftmaschine setzte, verzichtet man regelmäßig.

Den beiden Bilanzen sind Zahlen angefügt, die nur des Vergleichs wegen gegeben werden und die die Übereinstimmung der beiden Kreisprozesse, abgesehen vom Vorzeichen, belegen. Für die Kühlanlage folgt daraus: Die indizierte Leistung des Kompressors ist erheblich kleiner als die Kühlleistung; man kann also einen Wirkungsgrad aus diesen beiden Größen nicht bilden; dem widerspricht es auch, daß beide Größen auf derselben Seite der Bilanz stehen und also nicht gegeneinander wirken. Kompressorleistung und Kühlleistung stehen also energetisch nicht zu einander wie Erzeuger und Erzeugtes; die vom Kühlgut her zugeführte Wärme wird vom Kondensator abgeführt, und der Kompressor bildet nur das äußere Mittel, den ganzen Vorgang zum Ablaufen zu bringen.

Der Eigenart, daß bei der Dampfkraftmaschine der Wirkungsgrad nicht bis Eins kommen kann und daher kein Maß für die Güte des ausgeführten Kreisprozesses bildet (§ 47), entspricht die andere, daß der bei der Kühlanlage etwa als Wirkungsgrad zu errechnende Quotient $\frac{\text{Kühlleistung}}{\text{Kompressorleistung}} = \lambda$ über die Einheit hinaus gehen kann und auch regelmäßig darüber hinaus geht. Beider scheinbaren Unstimmigkeiten, die aus dem zweiten Hauptsatz folgen, wird man Herr durch Einführung eines Gütegrades (vgl. §§ 47, 57 und 71), dessen Bildung für die Kühlanlage sinngemäß umgekehrt die gleiche ist wie für die Dampfkraftanlage.

Durch die der Maschine auferlegten äußeren Bedingungen (Drucke und Temperaturen des Kälteträgers im Verdampfer und Kondensator, auch Art des Kälteträgers) wird der verlangten Kühlleistung N_2 ein bestimmter Arbeitsaufwand N' für die Kompression als erforderlich zugeordnet; die Zuordnung ist umkehrbar. Aus dem Vergleich der Wärmebilanzen geht hervor, daß für die Arbeitserzeugung aus der Wärmemenge $N' + N_2$ maximal die Arbeitsausbeute N' zu ziehen ist, so daß

$$\eta_{\text{opt}} = \frac{N'}{N' + N_2} \dots \dots \dots (2)$$

der theoretische Wirkungsgrad des der Maschinenwirkung zugrunde liegenden arbeitleistenden Prozesses ist (§ 47). Dieser günstigste erreichbare Wirkungsgrad ließ sich dem *i s*-Diagramm entnehmen (§ 57), was wegen der Umkehrbarkeit der günstigsten, bei unveränderter Entropie verlaufenden Prozesse auch wieder möglich ist.

Das für die Wirtschaftlichkeit der Kühlanlage in Betracht kommende Verhältnis N_2/N' bezeichnen wir als Leistungszahl λ . Die günstigst mögliche Leistungszahl λ_{opt} ist durch Umstellen der Formel (2) zu finden:

$$\lambda_{\text{opt}} = \frac{N_2}{N'} = \frac{1}{\eta_{\text{opt}}} - 1 \dots \dots \dots (2a)$$

Da wegen der kleinen zu überwindenden Temperaturstufen regelmäßig $\eta_{\text{opt}} < 0,5$ sein wird, so ist regelmäßig $\frac{N_2}{N'} > 1$.

In der wirklich ausgeführten Kühlanlage wird statt der theoretisch erforderlichen Leistung N' eine größere Leistung aufgewendet; schon die indizierte Leistung N_i des Kompressors ist größer, erst recht aber die Antriebsleistung N_{el} , unter der nach Befund auch die indizierte Leistung einer antreibenden Dampfmaschine verstanden werden mag. Dann ist nur der Leistungsverbrauch N_i oder N_{el} , allgemein N_1 bekannt, sowie die Kühlleistung N_2 ; die praktisch erzielte Wirtschaftlichkeit wird dann durch die Leistungszahl

$$\lambda = \frac{N_2}{N_1} \dots \dots \dots (3)$$

gegeben, die formell einem Wirkungsgrad entspricht; nur kann sie grundsätzlich größer oder kleiner als die Einheit (oder, wenn man N_2 in kcal/h und N_1 in kW ausdrückt, größer oder kleiner als der Äquivalenzwert 859) sein und hat daher weder den Charakter eines Wirkungsgrades, noch den einer Verbrauchsangabe im Sinne des § 3. Zähler und Nenner stehen eben stets auf derselben Seite der Energiebilanz, nicht der Kompressor, sondern der Kondensator liefert die Kühlung.

Das Verhältnis des theoretisch erforderlichen zum wirklichen Arbeitsaufwand ist der Gütegrad der Anlage

$$\eta_g = \frac{\lambda}{\lambda_{\text{opt}}} = \frac{N_2/N_1}{N_2/N'} \dots \dots \dots (4)$$

und zwar ist

$$\eta_{gth} = \frac{N'}{N_i} \dots \dots \dots (4a)$$

der *thermische Gütegrad* der Anlage, während wir unter

$$\eta_{gw} = \frac{N'}{N_{el}} \dots \dots \dots (4b)$$

ihren *wirtschaftlichen Gütegrad* verstehen können.

Praktisch wird N' nicht ermittelt. Hat man N_1 und N_2 gemessen und λ_{opt} aus gemessenen Zustandsgrößen bestimmt, so berechnet sich der Gütegrad zu

$$\eta_g = \frac{N_2}{\lambda_{\text{opt}} \cdot N_1} \dots \dots \dots (5)$$

Man verwendet auch den reziproken Wert, insbesondere unter Bezugnahme auf N_i , indem man die mit 1 PS oder 1 kW Kompressorleistung erzielte Kühlleistung berechnet.

Der best erreichbare Wirkungsgrad η_{opt} errechnet sich nach den Regeln des zweiten Hauptsatzes. Im einzelnen kann, ähnlich wie in § 71 für die Kraftmaschine dargelegt, der Carnotsche Kreisprozeß zur Berechnung aus den Endtemperaturen dienen, oder es kann adiabatische Kompression des Dampfes angenommen werden, wobei man sich am bequemsten des Mollierschen *i-s*-Diagrammes bedient, sofern

ein solches für den arbeitenden Stoff vorhanden ist. Für Kühlanlagen insbesondere ist ferner von Lorenz ein Vergleichsprozeß angegeben, der den Carnotschen Gedankengang an die vorhandene, stets begrenzte Kühlwassermenge anpaßt.

151. Messung der Kühlleistung¹⁾. Wegen der Kostbarkeit der Kälte wird meist eine sehr gute Isolation aller Teile (durch Korkschalen) angewendet; deswegen, und weil die Temperaturunterschiede gegen die Umgebung geringer zu sein pflegen als z. B. bei Dampf, bei dem auch Dampfverluste durch Undichtheiten mitsprechen, spielen die Wärmeverluste eine geringere Rolle. Die Wärmebilanz pflegt daher bei sauberer Versuchsdurchführung bis auf wenige Prozente zu stimmen, und wo das nicht der Fall ist, darf man eher als bei Dampfanlagen auf Ungenauigkeiten der Messung statt auf wirkliche „Restverluste“ schließen.

Daher kann man die Kühlleistung sowohl direkt, wie auch als Unterschied: *Kondensatorleistung minus Kompressorleistung* finden. Letztere indirekte Ermittlung hat häufig den Vorteil größerer Bequemlichkeit und dabei nicht immer den Nachteil der Ungenauigkeit; die Ungenauigkeit durch direkte Messung der Kühlleistung an einem Luftkühler dürfte meist größer sein, wenn man andererseits einen Tauchkondensator hat.

Wie die *direkte Messung der Kühlleistung* zu erfolgen hat, richtet sich danach, auf welche Teile oder Stoffe die durch Verdampfen des eigentlichen Kälteträgers entstandene Kälte übertragen, anders gesagt, welchen die Verdampfungswärme entzogen wird. Bei Übertragung auf Salzsole oder (bei Temperaturen über 0° auf Wasser) kann man Menge und Temperaturunterschied im Beharrungs- oder im Abkühlungsverfahren messen. Bei Übertragung der Kälte auf Luft mißt man deren Wärmehalt vor und nach der Abkühlung, unter Beachtung der Feuchtigkeit. Die Messung der Luftmenge und die der meist kleinen Temperatur- und Psychrometerdifferenzen ist hierbei schwer mit befriedigender Genauigkeit zu machen.

Eine wichtige Form der Messung ist die der *Eiserzeugung*, wobei in den Solebehälter einerseits die Verdampferschlangen, andererseits wassergefüllte Zellen eingehängt sind, deren Inhalt gefrieren soll; da die Wasserfüllung zunächst bis 0° abgekühlt wird, dann zu frieren beginnt, die Erstarrung aber allmählich wegen des dicker werdenden Eisansatzes immer langsamer vonstatten geht, während die äußeren Schichten schon unter 0° herunterkommen, so ist von einem Beharrungszustand keine Rede, auch wenn die Sole ihre Temperatur nicht wesentlich verändert (was wegen der wechselnden Kälteabnahme stets etwas geschehen wird). Man erhält einen (von einer schwachen Periode überlagerten) Beharrungszustand, wenn in einer größeren Anlage regel-

¹⁾ Man vergleiche zu diesem Paragraphen wie zu dem ganzen Kapitel den Entwurf von Regeln für Leistungsversuche an Kältemaschinen und Kühlanlagen, veröffentlicht in Z. f. d. ges. Kälte-Industrie April 1921 und vorläufig angenommen auf der Versammlung des Deutschen Kälte-Vereins Hamburg 1921, mit lehrreichen Darlegungen in den Erläuterungen. — Ferner: Plank, Umrechnung von Leistungszahlen von Versuchs- auf Garantiebedingungen, Z. f. d. ges. Kälte-Industrie, Nov. 1920 nebst Entgegnung von Hirsch, ebenda Jan. 1921.

mäßig eine Reihe Zellen gezogen, der Rest vorgeschoben und dafür am Anfang neue wassergefüllte Zellen eingebracht werden. Die Versuchszeit muß eine entsprechend lange sein. Eine Unsicherheit bleibt bestehen wegen der Unterkühlung des gebildeten Eises unter 0° sowie wegen des Restes ungefrorenen Wassers, dessen Menge sich nur stichprobenweise feststellen läßt. Auch die in jede Zelle eingefüllte Wassermenge ist schwer sauber gleichmäßig zu halten.

Ist die direkte Messung betriebstechnisch nicht zu ermöglichen, so kann man sich, wie schon erwähnt, mit der Messung der Kondensatorleistung helfen, die übrigens stets der Kontrolle halber erfolgen sollte, sofern ein Tauchkondensator diese Messung genau genug zuläßt. Beim Rieselkondensator freilich kann man die vom Wasser aufgenommene Wärme nicht gut messen.

Wo also z. B. Wassermangel zur Anwendung eines Rieselkondensators zwingt und andererseits die Kanäle der Luftumwälzung aus Raumgründen nicht so geführt werden können, daß eine einigermaßen brauchbare Meßstrecke für Anemometereinführung entsteht, da läßt sich keine Möglichkeit für eine Messung der Kühlleistung in einer der besprochenen Arten schaffen, selbst wenn man auf deren Schaffung Wert legt, wie es beim Entwerfen und namentlich beim Vergeben stets geschehen sollte. Eine ganz allgemeine Meßmethode ist dann aber die *Bestimmung der Kühlleistung aus der umlaufenden Menge des arbeitenden Kälteträgers*. Zwischen dem Kompressor und dem Kondensator ist man des Dampfzustandes sicher, da der Dampf regelmäßig überhitzt ist. Mißt man demnach den Druckabfall an einer Öffnung bekannten Durchmessers, so kann man daraus die Dampfmenge ermitteln (Techn. Mess. § 61). Der Druck und die Temperatur an der Meßstelle sind zu messen um das spezifische Gewicht des Dampfes zu ermitteln. Die Messung des Druckabfalles, den man nicht zu groß wird halten wollen wegen der Energieersparnis, stößt auf ähnliche Schwierigkeiten wie beim Dampfmesser, indem sich der Betriebsstoff in den Verbindungsleitungen zum Differentialmanometer kondensiert und nun die Flüssigkeitssäulen Einfluß haben, sofern sie nicht in beiden Leitungen gleich hoch stehen. Man kann Abhilfe schaffen, indem man die Rohre auf einer Temperatur über der des Innern der Kondensatorschlangen hält, z. B. durch eine elektrische Beheizung; dadurch wird ein Flüssigkeitsniederschlag vermieden.

Aus der hiernach bekannten Menge des Arbeitsmittels kann man nun die Verdampferleistung bestimmen, sofern man den Zustand desselben vor und hinter dem Verdampfer kennt. Hinter dem Verdampfer, der doch ein Rohrdampfkessel ist, ist der Dampf jedoch nicht sicher trocken, zumal bei nassem Kompressororgan. Zuverlässiger läßt sich die Kondensatorleistung bestimmen, da der Dampf beim Eintritt noch überhitzt ist, sofern nicht etwa die Leitungen vom Kompressor her sehr lang sind oder der Betrieb stark naß erfolgt, was vermieden werden sollte, und da die den Kondensator verlassende Flüssigkeit, unten abfließend, jedenfalls frei von Dampf ist, es sei denn, daß die Kondensatorschlange nach Art eines Heizkörpers (dem sie in der Wirkung

gleich) durchschlägt; das würde aber bedeuten, der Kondensator ist zu klein, denn die Wirtschaftlichkeit des Betriebes verlangt im Gegenteil Unterkühlung der Flüssigkeit. Man hat also den Druck und die Temperatur vor dem Kondensator, sowie die Temperatur hinter dem Verdampfer zu messen, um den Unterschied der Wärmeinhalte berechnen zu können. — In § 153 wird der umgekehrte Rechnungsgang benutzt, um aus der Energiebilanz des Kondensators die umlaufende Menge zu berechnen.

Als *bedingende Angabe* (§ 8) wird die im Verdampfer außerhalb der Schlange herrschende nutzbare Kühltemperatur genannt, ferner Menge und Temperatur des verfügbaren Kühlwassers.

Die *Temperatur außerhalb der Verdampferschlangen* wird oft in der Form gegeben, es sollten 30 000 kcal/h zwischen -2 und -5° C geleistet werden; d. h. dann, das die Schlangen umspülende Kühlgut (Luft, Sole) solle mit -2° zufließen und mit -5° abfließen, woraus dann übrigens bei 3° Temperaturunterschied aus der Kühlleistung der Wasserwert der umlaufenden Kühlgutmenge zu $30\,000 : 3 = 10\,000$ kg/h folgt. Diese Form der Temperaturangabe ist im allgemeinen unsachlich. Die Schlange liegt nämlich meist in einer Verdampferkufe, in die die auf -2° angewärmte Sole oben hineinläuft, um durch ein Rührwerk mit dem Inhalt alsbald vermischt zu werden; die Entnahme der auf -5° abgekühlten Sole erfolgt unten. Bei dieser Anordnung ist die Temperatur in der ganzen Kufe -5° , und nur diese Temperatur ist maßgebend für den Wärmeübergang aus dem verdampfenden Kälte-träger heraus und damit auch für die Verdampfungstemperatur, die dem Übergangswiderstand entsprechend niedriger ist als -5° . Im Doppelröhrenkühler freilich strömt das Wasser an der Übertragungsfläche so entlang, daß es sich von -2 auf -5° allmählich abkühlt, und wenn wieder die Verdampfung bei -8° erfolgte, so hat man jetzt eine größere Temperaturdifferenz im Mittel annähernd $4,5^{\circ}$ als verfügbar. Ähnlich würden die Verhältnisse bei einer Verdampferkufe ohne Rührwerk liegen, indem die sich abkühlende Sole allmählich absinkt; die größere Temperaturdifferenz würde aber, wegen der schlechten Konvektion ohne Rührung, schwerlich zu erhöhtem Wärmeübergang führen. In jedem Fall ist übrigens die tiefere Temperatur, im Beispiel also -5° , eine ausgezeichnete insofern als bei Vergrößerung der Übergangsfläche die Verdampfungstemperatur sich ihr und nicht etwa dem Mittelwert asymptotisch nähert. — Die Benennung des Temperaturbereichs -2 bis -5° sollte also vermieden werden; ist er benannt, so ist gleichwohl nur -5° für die Beurteilung maßgebend.

Bei Kühlanlagen mit Rieselkondensator tritt der *Wasserumlauf* in der Gewährleistung an die Stelle des Wasserverbrauchs; gehört jedoch die Umlaufpumpe mit zur Lieferung, so ist deren *Leistungsbedarf* anzugeben oder beim Fehlen einer Angabe als in dem angegebenen Leistungsbedarf eingeschlossen zu betrachten, so daß der Kompressor entsprechend weniger verbrauchen darf; außerdem muß das im Rieselkondensator verdunstende Wasser durch *Zusatzwasser* ersetzt werden; dessen Menge ist in der Gewährleistung zu benennen; sie liegt keineswegs aus der

Theorie der Verdunstungserscheinungen fest, sondern kann bei unzweckmäßiger Bauweise durch Verspritzen sehr erheblich vermehrt werden. Für das Zusatzwasser kann auch eine Temperatur ausbedungen werden; für das Umlaufwasser kann die Angabe von Temperaturen unterbleiben, da deren Höhe durch den Leistungsaufwand bedingt wird und demnach durch dessen Gewährleistung mit erfaßt ist.

Bei *Kühlhallenanlagen* kann die Gewährleistung auf andere Grundlage gestellt werden, sofern zur Lieferung auch die Beschaffung der Kühlhallen selbst gehört, sei es, daß dieselben vom Ersteller der Maschinenanlage als Generalunternehmer mit angeboten werden, sei es, daß der Ersteller doch die Pläne für den Bau einschließlich Bauvorschriften liefert und der Besitzer den Bau nach diesen Angaben ausführen läßt. Im ersten Fall kommt es nur darauf an, daß in den Kühlhallen die erforderliche Temperatur und evtl. noch ein gewisser Feuchtigkeitsgrad eingehalten wird, und wie groß der gesamte Aufwand zur Erzielung dieser Wirkung ist; selbst die Angabe der Kühlleistung ist an sich unnötig; ein starkwandiges oder doch gut isoliertes Kühlhaus erzielt die gleichen Temperaturverhältnisse mit kleinerer Kühlleistung als ein schlechter gebautes, und da der Verbrauch und die Gleichmäßigkeit der Temperatur, auch die Vermeidung warmer Luftströme durch gute Bauweise verbessert werden, so ist die Anlage mit geringer Kühlleistung sogar die wertvollere. Liefert der Ersteller zum Hallenbau nur die Pläne, so fallen allerdings die verschiedenen der Güte des Baues entsprechenden Kosten ins Gewicht. Trotzdem wird regelmäßig die Kühlleistung mindestens angegeben, und auch einige Zwischentemperaturen werden benannt und sind für die Beurteilung nicht unwichtig, wenn auch nicht für die rein technische Wirtschaftlichkeit. Der Betrieb ist nur bei sehr großen Kühlhallen ein kontinuierlicher; sonst pflegt man wegen der Personalsparnis die Maschinen nur über Tag laufen zu lassen, und dann hängt die *Betriebsdauer* von der Kühlleistung der Maschinenanlage ab. Kurze Betriebsdauer verringert die Personalkosten, verlangt aber einen größeren Maschinensatz und ergibt größere Temperaturschwankungen in den Kühlräumen, die wegen der Feuchtigkeitsverhältnisse unerwünscht sind. Auch die Vergrößerungsfähigkeit, z. B. unter Ausdehnung der Betriebsdauer ist natürlich durch die Leistung der Maschinenanlage bei 24stündigem Betrieb begrenzt und hängt demnach von der Maschinengröße ab. Hinsichtlich der Temperaturangaben ist es nicht gleichgültig, ob bei Kältezufuhr durch Luftumlauf ein geringer Luftumlauf in der Maschine stark herabgekühlt oder ein größerer Luftumlauf nur wenig herabgekühlt wird; letzteres gibt bessere Möglichkeiten, die Temperatur in den Räumen örtlich gleichmäßig zu verteilen. Insofern haben die bei einer Gewährleistung angegebenen Zwischenzahlen bei der Kühlanlage mehr als rein informatorische Bedeutung.

In Kühlhäusern spielt die Innehaltung gewisser Feuchtigkeitsverhältnisse eine Rolle, meist in dem Sinn, daß der Feuchtigkeitsgrad trotz dauernder Verdunstung aus dem Kühlgut, z. B. aus eingebrachtem Fleisch heraus, und obwohl die von außen hie und da eindringende

Luft wärmer und daher, wenn auch ungesättigt, doch feuchtigkeithaltiger ist als der Sättigung im Kühlraum entspricht, nicht über ein gewisses Maß hinausgeht. Oft wird 85% relative Feuchtigkeit, also ein Feuchtigkeitsgrad $\varphi = 0,85$ zugesagt. Das ist dann, wie gesagt, ein Höchstwert, und zwar nach unserer Auffassung auch bei den mit den nächtlichen Unterbrechungen des Maschinenbetriebes zusammenhängenden Temperaturschwankungen. Bleibt bei diesen die in 1 m^3 Luft enthaltene Feuchtigkeitsmenge unverändert, so steigt der Feuchtigkeitsgrad mit abnehmender Temperatur; auch am Ende der Betriebszeit soll dann, trotz herabgegangener Temperatur, die Feuchtigkeit nicht über 85% betragen. Reichert sich jedoch wegen des Ausbleibens der Feuchtigkeitsentziehung die Feuchtigkeitsmenge während der Betriebspause an, so kann, je nach dem Maß des Temperaturanstieges, die größte Feuchtigkeit auch am Ende der Pause eintreten, die dann wieder nicht über 85% betragen soll; letztere Bedingung wird man allerdings bei reiner Maschinenlieferung nicht machen können, da es sich um Abhängigkeiten von der Bauweise der Halle handelt.

Das Herausziehen der Feuchtigkeit aus der zu kühlenden Luft ist mit einem Kältebedarf verbunden; bei Messung der Kühlleistung darf man daher die Änderungen im Feuchtigkeitsgehalt, gemessen in Kilogramm Feuchtigkeit für 1 kg trockener eigentlicher Luft, nicht vernachlässigen, wie das ein Beispiel sogleich zeigen wird. Für die Feuchtigkeitsmessung bedient man sich des Psychrometers, dessen feuchtes Thermometer nach den in Techn. Mess. § 106 gemachten Darlegungen unmittelbar auf den Wärmeinhalt schließen läßt. In Kanälen mit genügender Luftgeschwindigkeit bedarf es keiner Aspiration für das Psychrometer; wenn Unterdruck in den Kanälen herrscht, hat man darauf zu achten, daß nicht ein an der Einbringbohrung in den Kanal eingehender Luftstrom die Messung fälscht (Techn. Mess. § 101 a. E.).

Zum Herausziehen der Feuchtigkeit wendet man partielle (örtliche) Unterkühlung der Luft unter ihren Taupunkt an oder man bringt sie mit starker Salzsole in Berührung, die geringeren Sättigungsdruck hat als Wasser und die demnach die Feuchtigkeit bis zur Sättigung ihr (der Sole) gegenüber herausnimmt. Im letzteren Fall verdünnt sich die Sole allmählich, wird unwirksam und muß durch Zufügung weiteren Salzes oder durch Eindampfen der Lösung verstärkt werden. Die zuzufügende Salzmenge bedarf, wenn vertraglich angegeben, keiner Nachprüfung durch Versuch, da sie rein theoretisch aus der niedergeschlagenen Wassermenge folgt.

152. Versuchseinrichtungen, Versuchsdauer. Versuchstechnisch ist bei der Kühlanlage mehr noch als bei manchen anderen Maschinenarten die Herstellung der Belastung eine der schwierigsten Fragen. In der Regel dient die Kühlanlage nämlich der Kühlung von Räumen, und dann tritt der größte Kältebedarf entsprechend der größten Wärmezufuhr von außen her nur an den heißesten Tagen auf; diese lassen sich überdies nicht vorhersehen, um die meist erforderlichen größeren Vorbereitungen für die Versuche rechtzeitig treffen zu können.

Es ist also oft schwierig, einen *Versuch im Beharrungszustand* aus-

zuführen, so also, daß zwischen der durch äußere Umstände zugeführten Wärme, deren dauernde Beseitigung Zweck der Kühlanlage ist, einerseits und der Kühlleistung andererseits dauernder Ausgleich besteht und keiner der in Betracht kommenden Teile Temperaturänderungen erleidet, sondern nur ein vorhandener Temperaturunterschied zwischen außen und innen aufrecht erhalten bleibt. Beim Beharrungsversuch wird regelmäßig einer umlaufenden Flüssigkeitsmenge — Salzsole, Wasser, Luft — eine Temperaturerniedrigung erteilt, die andererseits durch die äußere Wärmezufuhr wieder entzogen wird. Ist G_w kg/h der Wasserwert der umlaufenden Menge, und ist die in regelmäßigem Wechsel durchlaufene Temperaturstufe $\Delta t^\circ \text{C}$, dann ist

$$Q = G_w \cdot \Delta t \dots \dots \dots (7)$$

die Kühlleistung der Anlage. Soweit jedoch das gekühlte Mittel Luft ist, spielt Kondensation der in ihr enthaltenen Feuchtigkeit eine unter Umständen bedeutende Rolle. Man hat dann an Stelle des Temperaturunterschiedes den Unterschied Δi des Wärmehaltes von 1 kg Luft zuzüglich der ihm zugeordneten Wasserdampfmenge zu bestimmen, wofür das Psychrometer einen unmittelbaren Maßstab bildet (Techn. Mess. § 106), und hat dann, wenn G_l kg/h das umgewälzte Gewicht trocken gedachter Luft ist, die Kühlleistung

$$Q = G_l \cdot \Delta i \dots \dots \dots (7a)$$

Wenn man einen Beharrungszustand nicht abwarten kann, dann kann man versuchen ihn herbeizuführen durch eine *Anwärmungsvorrichtung*. Man kann die umlaufende Flüssigkeit mit Dampf künstlich anwärmen, man kann die Temperatur in einem Kühlraum trotz der Wirkung der Kühlanlage nicht unter den Sollwert kommen lassen, indem man ihm mit Dampfschlange, durch Verbrennung oder einfach im Sommer durch Öffnen der Türen Wärme zuführt.

Zum Anwärmen kann man unter Umständen einen Koksöfen oder Kokskörbe in den Kühlraum setzen und regulieren; man kann aber auch durch Verbrennen von Spiritus dieselbe Wärmewirkung erreichen. In bezug auf die Wärmewirkung sind beide Brennstoffe gleich, aber Spiritus feuchtet die Luft zugleich an und gibt dadurch die Möglichkeit, die Innehaltung eines vorgeschriebenen Feuchtigkeitsgrades trotz Zuführung von Feuchtigkeit nachzuprüfen, wie sie bei Kühlanlagen von Schlachthöfen namentlich durch Soleberieselung erstrebt wird. Durch Verwendung von Koks und Spiritus kann man Erwärmung und Anfeuchtung der Luft unabhängig voneinander bemessen. Die Menge Wasserdampf, die durch die Kühlanlage beseitigt werden soll, ist meist im Vertrag nicht festgelegt; es ist dann die dem Fleischeinbringen entsprechende normale Menge anzusetzen.

Bei der Zuführung von Wärme und Feuchtigkeit im Innern des Kühlraumes ist die Stelle der Erzeugung nicht gleichgültig; wenn die Verbrennungsgase unmittelbar in den Abluftkanal gehen, können eigenartige Verhältnisse auftreten.

Kann man Beharrung nicht abwarten oder herbeiführen, so muß man zu einem *Abkühlungsversuch* schreiten, bei dem die Kühlleistung zum

Senken der Temperatur irgendwelcher Teile dient, um aus der Geschwindigkeit des Temperaturabfalles auf die ihn verursachende Kühlleistung zu schließen. Ist $\frac{dt}{dz}^{\circ}\text{C/h}$ der Temperaturabfall in der Zeiteinheit und G_w kg der Wasserwert (Techn. Mess. § 103) der Teile, die ihn erleiden, so ist die Kühlleistung

$$Q = G_w \cdot \frac{dt}{dz} \text{ kcal/h} \quad (7b)$$

unter der Voraussetzung, daß überhaupt kein Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet. Der Wasserwert der an den Änderungen teilnehmenden Teile und die Größe der Temperaturänderungen müssen aber festgestellt werden können.

Die Voraussetzung im ersten Fall, daß beim Beharrungsversuch Temperaturänderungen der in Beharrung befindlichen Teile ganz vermieden bleiben, trifft niemals zu; stets ist also ein mäßiger Abkühlungsversuch mit positiver oder negativer Abkühlung über den Beharrungsversuch gelagert.

Die Voraussetzung im zweiten Fall, daß beim Abkühlungsversuch alle erzeugte Kälte in den betrachteten Bauteilen gespeichert wird, trifft ebenfalls niemals zu; stets ist ein gewisser Wärmeverlust nach außen vorhanden, dessen Wirkungen den beim Beharrungsversuch gemessenen gleichen und sich über den Abkühlungsversuch lagern.

Allgemein hat man es also mit einer Mischung aus Beharrungs- und Abkühlungsversuch zu tun; sind dabei nicht beide Teile von gleicher Größenordnung, so benennt man den Versuch nach dem überwiegenden Bestandteil. Die Kühlleistung ist die Summe der Einzelleistungen.

Der Abkühlungsversuch hat gegen sich, daß die an der Abkühlung teilnehmenden Bauteile in ihrem Wasserwert nicht sicher festzulegen sind; insbesondere Isolierstoffe folgen der Abkühlung von Eisen und Sole so schleppend, daß man von einem Abkühlungsversuch absehen muß, wenn ihr Einfluß nicht genügend gering ist. Bei Luftumlauf verbietet sich daher ein Abkühlungsversuch. — Jeder Abkühlungsversuch sollte möglichst langsam die zu kühlenden Teile herunterkühlen.

Beharrungsversuch wie Abkühlungsversuch sind an sich Momentanversuche: aus einer Ablesungsserie läßt sich theoretisch die Kühlleistung finden. In Wahrheit muß die Versuchsdauer und die Anzahl der Ablesungen erheblich sein; beim Beharrungsversuch deshalb, weil der Einfluß einer übergelagerten positiven oder negativen Abkühlung erst nach längerer Zeit genau genug in die Erscheinung tritt, es bedarf einer ausreichenden Versuchszeit, um die Annäherung an den Beharrungszustand zu prüfen; auch ist die Temperaturdifferenz Δt meist so klein, daß sie durch eine Beobachtung nur ungenügend genau bestimmt wird, und das trifft noch mehr, wegen der Unsicherheit der Feuchtigkeitsmessung, für Δi zu. Beim Abkühlungsversuch muß die Versuchsdauer lang genug, die Anzahl der Ablesungen zahlreich genug sein, um den Differentialquotienten $\frac{dt}{dz}$ genau genug als Mittelwert bzw. durch Interpolation finden zu können.

Bei Schlachthofkühlanlagen pflegt noch die Innehaltung eines Feuchtigkeitsgrades zugesagt zu werden.

153. Abkühlungsversuch und Einfluß der Verdampfertemperatur. Tabelle 95 und Fig. 289 bis 292 zeigen die Ergebnisse eines an einer Laboratoriumskühlmaschine vorgenommenen Versuches, bei dem im Verdampfer jede Wärmezufuhr außer der wegen unvollkommener Isolierung unvermeidlichen Einstrahlung fortblieb, so daß dessen Inhalt sich von $+4,4^\circ\text{C}$ im Lauf des $8\frac{1}{2}$ stündigen Versuches auf $-16,7^\circ\text{C}$ abkühlte. Wegen der Zahl der Ablesungen ergibt sich eine merkliche zeitliche Verschiebung der letztgemachten gegen die erstgemachte; so ist die Indizierung stets 6 min und die Ablesung der Soletemperatur 10 min nach der Ablesungszeit vorgenommen werden. Deshalb sind die beobachteten Werte

Tabelle 95. Abkühlungsversuch

Äußere Verhältnisse für den SO_2 -Kreis;
Hubvolumen des Kompressors
Äußere Oberfläche der Verdampfer-
der Kondensator-
Wasserwert des Soleinhalts 2590 kg,
Barometerstand

	9.10	9.40	10.10	10.40
1. Zeit z (8. Juli 1912)	—			
2. Drehzahl n /min	101,8	102,0	102,6	
3. Soletemperatur t_s $^\circ\text{C}$	-0,7	-2,65	-4,35	
4. letztere um die Zeit $z + 10$ min	9,20	9,50	10,20	
5. Soletemperatur t_s , interpol. n. Fig. 289 $^\circ\text{C}$	+0,1	-2,0	-3,8	-5,4
6. Temperaturabnahme Δt_s $^\circ\text{C}/30$ m	2,1	1,8	1,6	
7. Verdampfungsdruck p_v at	1,36	1,27	1,17	1,14
8. Verdampfungstemperatur t_v $^\circ\text{C}$	-3,8	-5,4	-7,3	-7,9
9. Kondensationsdruck p_d at	4,94	4,72	4,54	4,37
10. Druckverhältnis $p_d : p_v$ —	3,63	3,72	3,88	3,84
11. Kondensationstemperatur t_d $^\circ\text{C}$	31,9	30,3	29,1	28,0
12. Temperaturstufe $t_d - t_s$ „	35,7	35,7	36,4	35,9
13. Kühlwasserablauftemperatur t_2 „	29,9	28,3	27,2	26,1
14. Kühlwasserzulauftemperatur t_1 „		12,8		12,7
15. Temperaturzunahme $t_2 - t_1$ „	17,1	15,5	14,4	13,4
16. Mantelkühlung-Ablauf t_m „	31,8	32,5	31,3	31,2
17. Mittlerer indizierter Druck p_i at	1,94	1,86	1,725	
18. Indiz. Kompressorleist. $N_i = 0,0211 \cdot p_i \cdot n$ kW	4,16	4,00	3,735	
19. letztere zur Zeit $z + 6$ min —	9,16	9,46	10,16	
20. Dieselbe, interpoliert nach Fig. 289 kW	4,23	4,01	3,82	3,66
21. Wärmewert derselben $859 \cdot N_i$ kcal/h	3630	3440	3280	3140
22. Elektr. Leistungsaufnahme N_{el} kW	7,95	7,51	7,40	7,35
23. Kühlleistung $Q' = 2696 \cdot 2 \Delta t_s$ kcal/h	510	11300	9690	8620
24. Einstrahlg. i. d. Verd. $Q'' = 22,1 \cdot (23 - t_s)$ „		550	590	630
25. Verdampfungsleistung $Q_1 = Q' + Q''$ „		11830	10260	9230
26. Wassermenge durch d. Kondensator W kg/h		986		982
27. Wärmeleistg. d. Kondensat. $W \cdot (t_2 - t_1)$ kcal/h	16900	15300		13150
28. letztere gilt zur Zeit $z - \frac{1}{2}$ h —	8,40	9,10		10,10
29. Wassermenge durch den Mantel W' kg/h		94		104
30. Wärmeabfuhr d. Mantels $W' \cdot (t_m - t_1)$ kcal/h		1850		1920

(Zeile 3 und 18) zunächst in Fig. 289 über der Zeit aufgetragen, und daraus sind für die Ablesungszeit die Werte der Zeilen 5 und 20 interpoliert. Dadurch ist zugleich ein Ausgleich für die errechneten Werte der Kühlleistung erreicht; die Temperaturabnahmen Δt_s für $1/2$ h errechnen sich in Zeile 23 sehr stetig, weil sie mittels der Kurve der $\Delta t_s/\Delta z$ der Fig. 289 ausgeglichen sind, während die direkt aus den Ablesungen gefundenen Punkte der Fig. 289 so unregelmäßig fallen, wie eine Differenzmethode es erwarten läßt. Die Zeile 6 gibt die Abkühlungsgeschwindigkeit, und mit Hilfe des Wasserwertes $W = 2696$ kg der gesamten heruntergekühlten Teile ergibt sich in Zeile 23 die nutzbare Kühlleistung bei der betreffenden Temperatur. Die gesamte Kühlleistung ist noch um die Einstrahlung größer, deren Wert durch einen Einstrahlungsversuch bestimmt worden war.

an einer SO_2 -Kühlanlage.

das Regelventil war 1,7 Umgänge offen.

$$V_a = 6,62 + 6,29 = 12,91 \text{ ltr.}$$

schlange 12,5 m² } Kupferrohr 42/45 mm Dm.
 schlange 12,5 m² }

der Verdampferteile 106 kg, zusammen 2696 kg.

763 mm QS = 1,04 at.

	11.10	11.40	12.10	12.40	1.10	1.40
103,4	102,8	102,1	102,7	102,9	104,2	
-5,9	-7,3	-8,55	-9,7	-10,8	11,8	
10,50	11,20	11,50	12,20	12,50	1,20	
-6,9	-8,2	-9,4	-10,5	-11,5	-12,4	
1,5	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	
1,04	0,98	0,94	0,91	0,88	0,85	
-10,0	-11,4	-12,3	-13,0	-13,8	-14,6	
4,24	4,09	3,97	3,88	3,80	3,71	
4,07	4,17	4,22	4,26	4,31	4,36	
27,0	26,0	25,0	24,4	23,8	23,0	
37,0	37,4	37,3	37,4	37,6	37,6	
25,0	24,2	23,3	22,6	21,9	21,3	
	12,7	12,7		12,5		
12,3	11,5	10,6	10,0	9,4	8,8	
31,2	30,7	29,8	28,6	29,8	29,8	
1,685	1,595	1,57	1,485	1,45	1,41	
3,68	3,46	3,38	3,22	3,14	3,10	
10,46	11,16	11,46	12,16	12,46	1,16	
	3,50	3,37	3,26	3,16	3,08	3,01
	3020	2890	2800	2720	2640	2590
8070	6,86	6,97	6,38	6,08	5,86	5,64
	7000	6460	5930	5390	4850	
8720	660	690	720	740	760	780
	7680	7160	6660	6140	5620	
	975		1007		1000	
	11200		10070		8800	
	11,10		12,10		1,10	
	105		107		90	
	1890		1710		1560	

Weiterhin wird in den Zeilen 21 und 22 der Leistungsaufwand am Kompressor auch im Wärmemaß gegeben, und in den Zeilen 27 und 29 werden die abgeführten Wärmemengen ermittelt, die einerseits ins Kondensatorkühlwasser, andererseits ins Mantelkühlwasser gehen. Aus der Zusammenzählung der hinein- und der herausgegangenen Energiemengen und Gegenüberstellung beider Summen ergibt sich die Energiebilanz, am übersichtlichsten für alle Temperaturen in Fig. 290. Eine zeitliche Verschiebung tritt

dabei noch bei der Feststellung der Kondensatorleistung ein. Dessen Kühlwasserdurchfluß war rund $1 \text{ m}^3/\text{h}$, der Inhalt des runden Kondensatorgefäßes war $1,07 \text{ m}^3$, d. h. die Auswechslung des Inhaltes erfolgt in $\sim 1 \text{ h}$. Wenn nun zu einer gewissen Zeit eine Temperatur-

zunahme Δt des ablaufenden Wassers gegen das zulaufende festgestellt wird, so ist diese Temperaturzunahme das Ergebnis der vorhergehenden Stunde, und kann demnach, indem man für die Zunahme einen zeitlich linearen Verlauf an Stelle des tatsächlich logarithmischen setzt, als wirksamer Wert der Zunahme

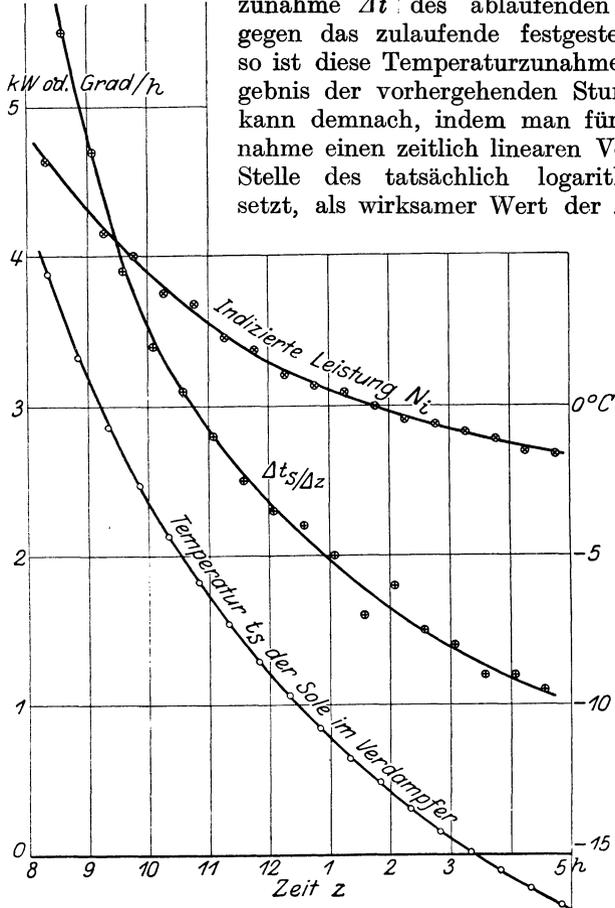


Fig. 289.
Abnahme der Temperatur und der Leistungsaufnahme abhängig von der Zeit.

für $\frac{1}{2} \text{ h}$ vor der Ablesungszeit angesetzt werden (Zeile 27). In Fig. 290 ist die betreffende Kurve um diesen Betrag verschoben.

In Tabelle 96 und Fig. 291 werden die zugehörigen, auf den SO_2 -Kreislauf bezüglichen Zahlen gegeben.

Bei dem Versuch wurden von $8^{\text{h}} 10^{\text{m}}$ bis $4^{\text{h}} 40^{\text{m}}$ halbstündliche Ablesungen und Indizierungen (Fig. 292) gemacht, die der Raumpersparnis halber in den Tabellen nicht alle gegeben sind.

Gang und Bedeutung der Rechnung sollen an den Zahlen erläutert werden, die durch Interpolieren und durch Benutzung der abgegliehenen

Kurven für -5°C Soletemperatur erhalten werden. Insbesondere die Kurve der Abkühlungsleistung, aus einer Differenzbildung hervorgegangen, bedarf stark der Abgleichung, weil Einzelwerte weit von der mittleren Kurve abweichen und in der Auswertung auf Ungereimtheiten führen können.

Die Soletemperatur ging um $10^{\text{h}} 31^{\text{m}}$ durch $t_s = -5^{\circ}$ (Fig. 289).

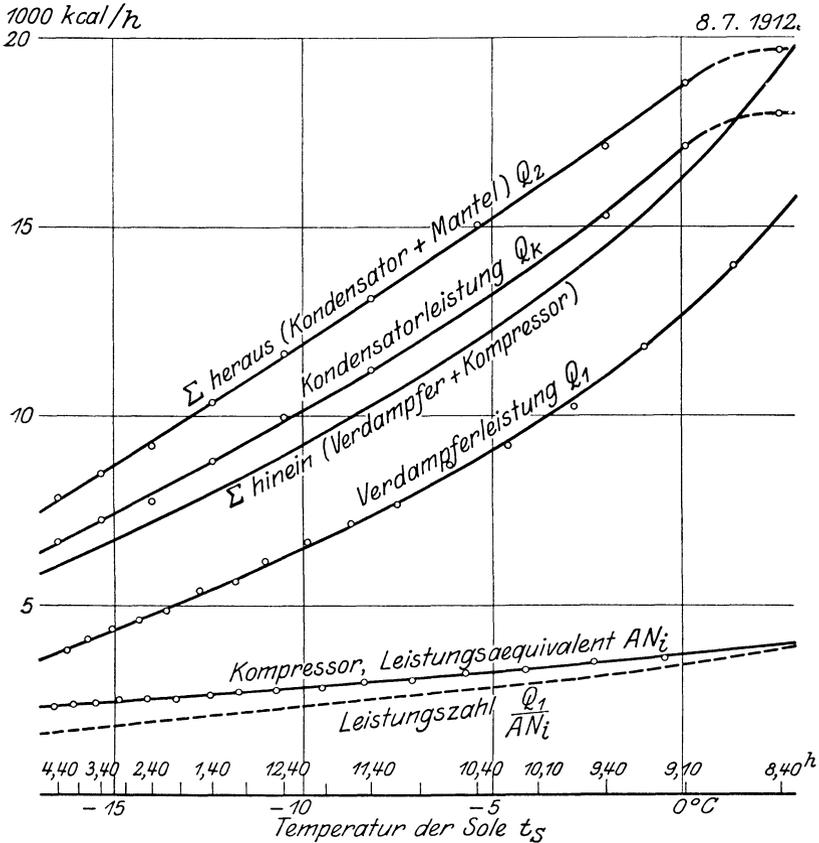


Fig. 290.
Energiebilanz der Kühlmaschine abhängig von der Verdampfertemperatur.

Um diese Zeit fällt die Temperatur um $\frac{\Delta t_s}{\Delta z} = 3,12^{\circ}\text{C/h}$. Um hieraus die Kühlleistung zu finden, ist der Wasserwert der gekühlten Teile nötig. Das Verdampfergefäß ist $3,0 \times 1,0\text{ m}$ im Rechteck, die Ecken sind mit 150 mm abgerundet, eine senkrechte Längs-Mittelwand, um die herum der Soleumlauf stattfindet, ist auch noch von der Grundfläche abzuziehen, so daß $2,965\text{ m}^2$ Grundfläche mit Sole bedeckt sind. Die Sole stand bei $+7,5^{\circ}\text{C}$ Temperatur 1052 mm hoch, demnach sind $3,12\text{ m}^3$ Sole, die sich wegen Rührwerk, einigen Winkeleisen und

vor allen Dingen wegen des Schlangenvolumens auf $2,97 \text{ m}^3$ verringern. Es handelt sich um eine Chlormagnesiumlösung, über die man aus Landolt & Börnstein die Angaben findet, die durch Fig. 293 und 294 wiedergegeben werden. Das spezifische Gewicht der Sole wurde bestimmt: bei 20° hatten 100 ccm das Gewicht $116,1 \text{ g}$, also $\gamma_{20} = 1161 \text{ kg/m}^3$. Nun ist das Volumenverhältnis bei 20 und bei $7,5^\circ$

$$\frac{V_{20}}{V_{7,5}} = \frac{1,0043}{1,0013} = 1,0030,$$

also ist das spezifische Gewicht der Sole im Zustand der Messung $\gamma_{7,5} = 1161 \cdot 1,0030 = 1164 \text{ kg/m}^3$, und demnach der Inhalt an Sole

$G = 2,97 \cdot 1164 = 3460 \text{ kg}$. Für die Bestimmung der spezifischen Wärme ist folgende Rechnung nötig, die sich ohne merklichen Fehler vereinfachen läßt: Es ist

$$\frac{V_{15}}{V_{15}} = \frac{1,0044}{1,0030} = 1,0014,$$

also bei 15° C ist $\gamma_{15} = 1162 \text{ kg/m}^3$, demnach enthält gemäß Fig. 293 die Lösung $18,4\% \text{ MgCl}_2$ und hat die spezifische

$$\text{Wärme } c = 0,749 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ \text{C}}.$$

Der Wasserwert des Soleinhalts ist $W = 3460 \cdot 0,749 = 2590 \text{ kg}$. Hinzu tritt der Wasserwert der mit heruntergekühlten Metallteile, der für den eisernen Behälter $800 \cdot 0,114 = 91 \text{ kg}$ und für die kupfernen Schlangen $160 \cdot 0,093 = 15 \text{ kg}$ ausmacht. Die gekühlten Teile haben also $W = 2590 + 91 + 15 = 2696 \text{ kg}$ Wasserwert.

Die genaue Auswertung und die Figuren werden gegeben, um die Benutzung der Tabellen von Landolt & Börnstein in einem Fall zu zeigen, wo die einfacheren Tabellenwerke im Stich lassen. Zu be-

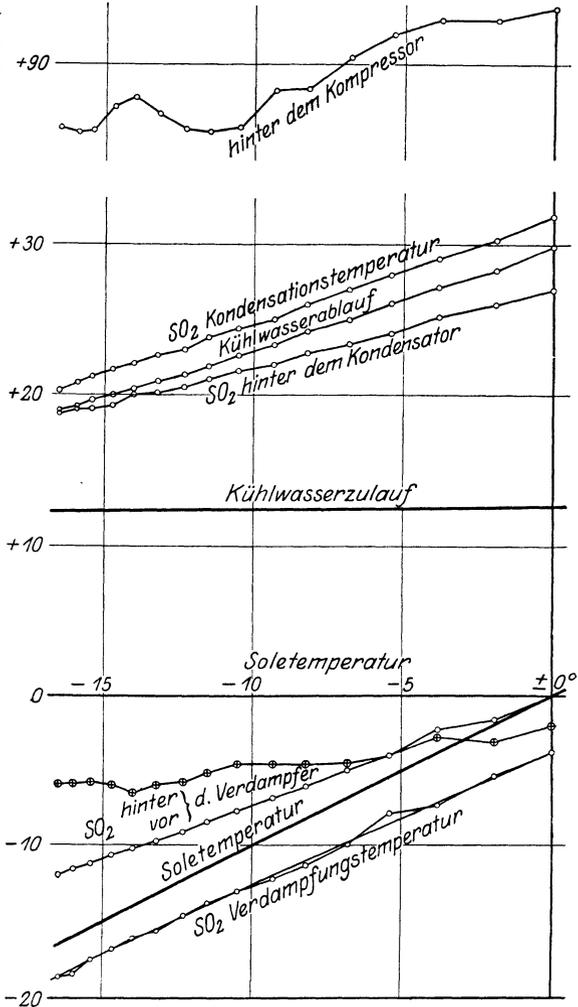


Fig. 291.
Innere und äußere Temperaturverhältnisse für den SO_2 -Kreis.

achten bleibt, daß in den Tabellen die Gewichtsprocente $MgCl_2$ teilweise auf die beigefügte Wassermenge als 100% bezogen sind; wir haben einheitlich die Menge der Lösung als 100% genommen.

Nun ist die Kühlleistung unter Beachtung der Abkühlungsgeschwindigkeit $Q_s = 2696 \cdot 3,12 = 8400$ kcal/h. Es ist das die Kühlleistung der Kühlanlage, von der der Verdampfer mit seiner gegebenen Gefäßgröße und gegebenem Isolierungszustand einen Bestandteil bildet. Die Kühlleistung des SO_2 -Kreislaufs allein, man kann sagen der Kühlmachine im engeren Sinne, ist um die Kälteverluste größer, die das Verdampfergefäß erleidet. Diese wurden durch einen Einstrahlungsversuch ermittelt, der nach Abschluß der vorliegenden Abkühlungsversuche

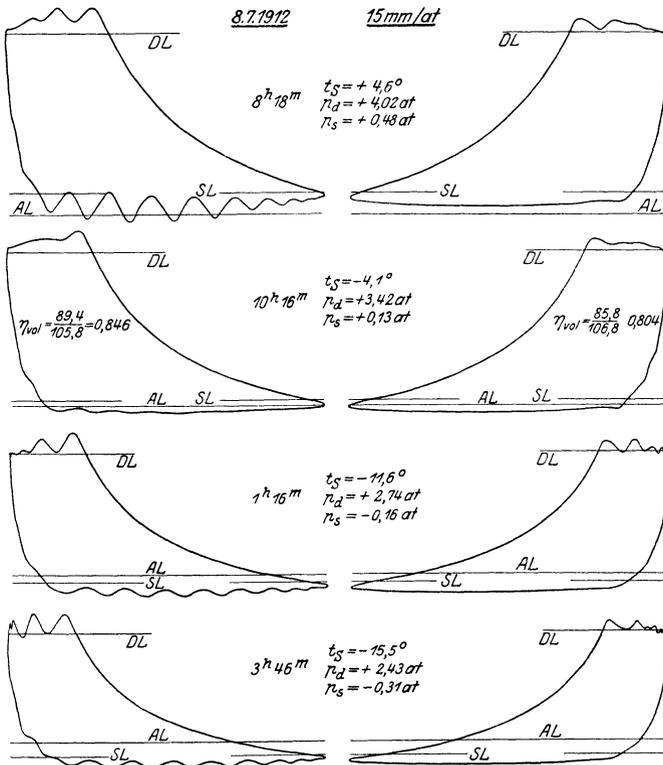
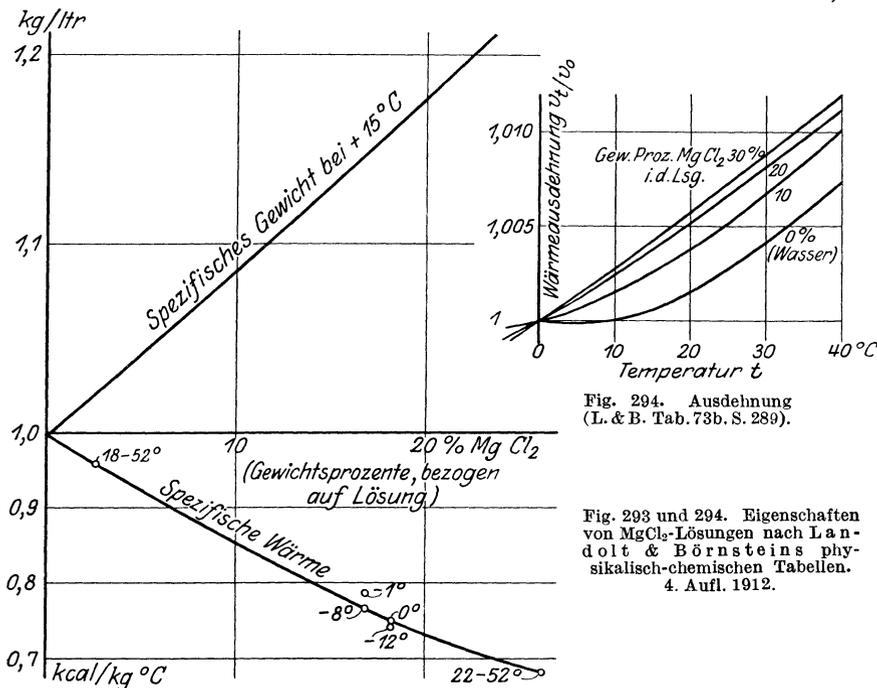


Fig. 292.
Abhängigkeit der Diagramme von der Verdampfertemperatur t_s .

vorgenommen wurde und der eigentlich nur in folgenden Feststellungen besteht: Am 8. Juli um 5^h nachm., als die Kühlmachine abgestellt wurde, hatte die Sole $-17,5^\circ C$ Temperatur; der Verdampfer blieb sich selbst überlassen, auch das Rührwerk stand still; am 9. Juli um 7^h vorm. hatte die Sole nach kurzem Rühren $-14,3^\circ C$ Temperatur; die Temperatur des umgebenden Kellerraumes war während des Abkühlungs-

versuches wenig verändert um $+ 23^{\circ}\text{C}$ herum. Unter Beachtung des eben berechneten Wasserwertes ist also in 10 h die Wärmemenge $2696 \cdot (17,5 - 14,3) = 8600$ kcal oder es sind $8600 : 10 = 860$ kcal/h durchschnittlich eingeführt worden. Dabei war der Temperaturüberschuß für die Einstrahlung (es handelt sich eigentlich um Leitung der Wärme durch die Korkisolierung und die Holzabdeckung hindurch und sicher nur in verschwindendem Maße um Strahlung) anfangs $23 + 17,5 = 40,5^{\circ}$ und schließlich $23 + 14,3 = 37,3^{\circ}$, im Mittel $38,9^{\circ}$, woraus sich die *Einstrahlungszahl des Verdampfers* zu $860 : 38,9 = 22,1$ kcal/h $\cdot^{\circ}\text{C}$ errechnet. — Man kann freilich mit Recht daran zweifeln, ob



man unmittelbar nach einem Abkühlungsversuch richtige Einstrahlungsverhältnisse bekommt. Die Korkhülle des Verdampfers als schlechter Wärmeleiter nimmt an den Temperaturänderungen zunächst nur in den innersten Schichten teil, die äußeren Schichten folgen nur langsam nach und sind daher nach einem Abkühlungsversuch noch zu warm. Die als eingestrahlt gemessene Wärme hat daher nicht die ganze Isolierschicht durchlaufen, und die Einstrahlung dürfte zu hoch erschienen sein. Umgekehrt würde sie nach einem Beharrungsversuch zu klein gemessen.

Bei -5° Soletemperatur kommt also eine Einstrahlung von $(23 + 5) \cdot 22,1 = 620$ kcal/h in Betracht, die von der schwefligen Säure auch noch geleistet sind, und die Kühlleistung des SO_2 -Systems ist $8400 + 620 = 9020$ kcal/h.

Diese Kühlleistung ist erreicht worden mit einem Aufwand an indizierter Leistung im Betrage von 3,68 kW; der antreibende, mit dem Kompressor durch Riementrieb verbundene Elektromotor nahm 7,7 kW auf; der Leistungsbedarf der Rührwerke für Kondensator und Verdampfer ist hierin nicht enthalten, da sie einen eignen Elektromotor hatten. Es wurden also 2450 kcal mit 1 kWh des Kompressors oder 1800 kcal mit 1 PS · h erzielt. Diese Zahlen sind nicht hoch. — Der Wärmewert der indizierten Leistung ist $859 \cdot 3,68 = 3160$ kcal/h.

Die im Verdampfer und im Kompressor zugeführte Energie wird, erstere auf höherem Temperaturniveau, vom Kondensator und teilweise auch vom Kompressormantel abgeführt.

Im Kondensator liefen 982 kg/h Wasser hindurch, wie festgestellt wurde, indem man das ablaufende Wasser stichprobenweise stündlich auf eine Wage leitete. Das zulaufende Wasser hatte $12,7^\circ\text{C}$, die Temperatur des ablaufenden sank von Beginn bis zum Ende der Ablesungen von $30,9$ auf $19,0^\circ\text{C}$ und hatte um $10^{\text{h}} 31^{\text{m}}$ den Wert $26,4^\circ$. Diese Temperaturerhöhung von $26,4 - 12,7 = 13,7^\circ$ ist aber nicht der Zeit $10^{\text{h}} 31^{\text{m}}$ und damit der Temperatur -5° der Sole zugeordnet, sondern ist das Ergebnis der Wärmezufuhr aus der kondensierenden SO_2 während der Zeit von $9^{\text{h}} 31^{\text{m}}$ bis $10^{\text{h}} 31^{\text{m}}$; die oben berechnete einstündige Durchsatzzeit kommt hier in Betracht. Es wird genügen, den Temperaturanstieg im Kondensator (zeitlich, oder örtlich von unten nach oben) als linear anzusehen und bei einstündiger Durchsatzzeit die Endtemperatur um $11^{\text{h}} 01^{\text{m}}$ als zur Soletemperatur -5° gehörig anzusehen; sie ist $25,4^\circ\text{C}$. Die Wärmefaufnahme des Kondensators ist $Q_3 = 982 \cdot (25,4 - 12,7) = 12500$ kcal/h.

Auch das Mantelkühlwasser wurde stichprobenweise gemessen, es waren $103,8$ kg/h, die von $12,7$ auf $31,2^\circ$ erwärmt wurden, wobei von Anwendung des gleichen Gedankenganges, daß der Endwert das mittlere Ergebnis einer gewissen Erwärmungsperiode ist, wegen Unerheblichkeit abgesehen wird. Mit dem Mantelkühlwasser gehen also 1920 kcal/h ab.

Die *Energiebilanz* lautet:

Hinein:		Heraus:	
Kühlleistung	9 020 kcal = 62,6%	Kondensator-	
Kompressor-		leistung	12 500 „ = 87,7%
leistung	3 160 „ = 21,9%	Mantelkühlung	1 920 „ = 13,3%
Unterschied	2 240 „ = 15,5%		
	14 420 kcal = 100,0%		14 420 kcal = 100,0%

Die beiden Seiten weisen einen Unterschied von $15,5\%$ des Gesamtumsatzes auf, der viel höher ist als er in der Regel bei sorgsamer Messung verbleibt, der aber dem Sinne nach jedenfalls richtig ist. Er findet zum Teil in der Reibung des Kolbens im Zylinder und der Kolbenstange in der langen Stopfbüchse seine Erklärung, deren Äquivalent ins Kühlwasser gegangen ist; denn der Betrag der Mantelkühlung ist im Vergleich zur Kompressorleistung sehr hoch, er ist $\frac{2}{3}$ so groß wie diese, während sie doch nach Maßgabe von Fig. 254 bei § 133 nur den schraffierten Bruchteil des Diagramms ausmachen sollte. Da-

neben kommen noch Ein- und Ausstrahlungen an den teils kalten, teils warmen Rohren des SO_2 -Kreislaufes in Betracht, die sich aber teilweise aufheben werden.

Allgemein ist zu beachten, daß Energieverluste bei der Kühlmaschine vielfach *doppelt ungünstig* wirken, so auch die *Kolbenreibung*. Zu ihrer Überwindung wird Arbeit verbraucht, außerdem muß die erzeugte Wärme, soweit sie nicht direkt durch Mantelkühlung beseitigt wird, sondern in die SO_2 übergeht, durch die Kühlwirkung beseitigt werden, sie verringert daher die nutzbare Kühlwirkung der Anlage. Alle irreversibeln Verluste bedeuten also bei der Kühlmaschine Mehraufwand plus entgangenem Gewinn, während z. B. in der Dampfkraftanlage derartige irreversible Verluste, die zur Wärmebildung führen, im weiteren Prozeß, z. B. in den späteren Expansionsstufen der Maschine oder Turbine, mitarbeiten, so daß also nur Mindererzeugung minus späterer Nutzen als verloren in die Erscheinung tritt. Deshalb ist die Kühlung ein viel empfindlicherer Prozeß.

Über die *Zustände im SO_2 -Kreislauf* wurden eine Reihe von Temperatur- und Druckmessungen gemacht (Tab. 96). Für $10^h 31^m$ gilt Folgendes.

Der Druck im Saugrohr des Kompressors war 0,11 at $\ddot{U}D = 1,15$ at abs., im Druckrohr war er 3,39 at $\ddot{U}D = 4,43$ at abs. Das Kompressionsverhältnis ist also $\frac{4,43}{1,15} = 3,85$. Die Linien des Drucks im Saug-

raum und im Druckraum sind als *SL* und *DL* in die Indikatordiagramme eingetragen und zeigen eine zu dessen Verlauf gut passende Lage.

Zu den beiden absoluten Drucken gehören nach der Spannungskurve der SO_2 die Sättigungstemperaturen $-7,7^\circ \text{C}$ im Saugraum und $28,4^\circ \text{C}$ im Druckraum. Wenn man von den vermutlich geringfügigen Spannungsverlusten der strömenden Dämpfe in den Rohrleitungen absehen kann, so sind diese beiden Temperaturen zugleich die Verdampfungstemperatur in der Verdampferschlange und die Kondensationstemperatur in der Kondensatorschlange. Da um die Verdampferschlange herum die Sole mit -5°C zirkuliert, so steht für den Wärmeübergang von der Sole an die siedende SO_2 ein treibendes Gefälle von $7,7 - 5,0 = 2,7^\circ$ zur Verfügung. Da die Verdampferleistung 9020 kcal/h durch die Kühlfläche $12,5 \text{ m}^2$ geht, so ist die

Wärmeübergangszahl $\frac{9020}{12,5 \cdot 2,7} = 268 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ \text{C} \cdot \text{h}}$. Da um die Kondensatorschlange herum das Kühlwasser unten $+12,7^\circ \text{C}$ und oben $+26,4^\circ \text{C}$

hat (hier kommt es auf den Wert um $10^h 31^m$ und nicht wieder um $11^h 01^m$ an), so nimmt das für den Wärmeübergang von der kondensierenden SO_2 an das Kühlwasser maßgebende Temperaturgefälle von $15,7^\circ$ anfangs bis auf $2,0^\circ$ schließlich ab. Für die Berechnung der Heizflächenwirkung darf man diesmal keinesfalls unterstellen, daß der Durchgang der 12500 kcal/h Kondensatorleistung durch die $12,5 \text{ m}^2$ äußerer Schlangenfläche, daß also $12500 : 12,5 = 1000 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ dem mittleren Temperaturunterschied $\frac{1}{2} \cdot (15,7 + 2,0) = 8,8^\circ$ zugeordnet ist. Bei einem Verhältnis des anfänglichen zum endlichen Temperaturunterschied wie $15,7 : 2,0 = 7,9$ ist vielmehr der logarithmische Ver-

lauf der Unterschiedskurve über die Höhe hin wohl beachtlich. Nach einer Tabelle Hütte I, 388 wird bei diesem Verhältnis der Wärmeübergang im Verhältnis 1,33:1 kleiner als nach der linearen Berechnung. Demnach ist nach linearer Rechnung dem Temperaturunterschied $8,8^\circ$ ein Wärmeübergang $1000 \cdot 1,33 = 1330 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ zugeordnet, und die Wärmeübergangszahl ist $1330 : 8,8 = 151 \text{ kcal/}^\circ\text{C} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^2$. Man erkennt aber, wie die beiden sich am Kompressor einstellenden Drucke

Tabelle 96. Abkühlungsversuch an einer SO_2 -Kühlanlage.
Innere Verhältnisse im SO_2 -Kreis.

Fortsetzung von Tab. 95. Hauptmaße am Kopf von Tab. 95.

	9-10	10-10	11-10	12-10	1-10
1. Zeit z (8. Juli 1912)	9-10	10-10	11-10	12-10	1-10
Temperaturen der Flüssigkeit:					
2. hinter dem Kondensator t_k' $^\circ\text{C}$	27,0	25,2	23,4	22,0	21,0
3. vor dem Regelventil t_r „	25,6	24,0	22,1	20,4	18,8
4. hinter dem Regelventil t_r' „	+5,0	+2,2	-0,1	-2,1	-3,8
5. vor dem Verdampfer t_v „	-0,1	-2,25	-5,0	-6,9	8,5
Temperaturen des Dampfes:					
6. hinter dem Verdampfer t_v' „	-2,0	-2,8	-4,5	-4,55	-5,25
7. vor dem Kompressor t_c „	+5,3	+4,4	+4,8	+3,2	+2,7
8. hinter dem Kompressor t_c' „	93,8	93,0	90,5	88,3	85,5
9. vor dem Kondensator t_k „	64,8	63,0	59,3	56,8	54,0
10. Wärmehalt des Dampfes vor dem Kondens. $i_1 = \lambda + 0,154(t_k - t_d)$ kcal/kg	94,65	95,05	94,95	95,05	94,9
11. Wärmehalt der Flüssigkeit hinter dem Kondensator $i_2 = 0,34 \cdot t_k'$ „	9,2	8,5	7,9	7,5	7,1
12. Kondensationswärme $i_1 - i_2$ „	85,45	86,55	87,05	87,55	87,8
13. SO_2 -Umlauf $G = \frac{W \cdot (t_2 - t_1)}{i_1 - i_2}$ (Zähler zur Zeit $z + 30$ min genommen) kg/h	179	152	128,5	115	100
14. SO_2 -Umlauf für einen Doppelhub $G_1 = \frac{G}{60 \cdot n}$ kg	0,0294	0,0247	0,0208	0,0187	0,0160
15. Spez. Gewicht des angesaugten Dampfes $\gamma = \gamma_s \cdot \frac{T_c}{T_c'}$ kg/m ³	3,78	3,26	2,86	2,57	2,40
16. Volumen SO_2 f. 1 Doppelhub $V_1 = G_1 : \gamma$ m ³	0,00778	0,00757	0,00727	0,00727	0,00670
17. Volumetr. Wirkungsgrad ber. $\eta'_{\text{vol}} =$ —	0,598	0,590	0,563	0,554	0,516
18. a. Diagramm $\eta_{\text{vol}} =$ —	0,826	0,830 0,825	0,807 0,814	0,812 —	0,805 0,808
19. Leistungszahl $\frac{Q_1}{859 \cdot N_i} = \lambda$ —	3,58	2,98	2,68	2,45	2,21
20. Leistungszahl nach Carnot $\frac{T_s}{T_1 - T_s} = \lambda_c$ —	21,4	16,2	13,6	11,9	9,2
21. Gütegrad —	0,168	0,184	0,197	0,206	0,240
22. Leistungszahl nach Lorenz $\frac{T_s}{\frac{1}{2}(T_1 + T_2) - T_s} = \lambda_L$ —	12,8	11,3	10,3	9,6	9,1
23. Gütegrad —	0,280	0,262	0,260	0,255	0,243
24. Leistungszahl nach Carnot $\frac{T_s}{T_a - T_s} = \lambda_c$ —	7,55	7,31	7,11	7,00	6,90
25. Gütegrad —	0,475	0,405	0,377	0,350	0,320

durch die Temperaturen im Verdampfer und im Kondensator, bei letzterem übrigens durch die höchste Temperatur festgelegt werden.

Einige weitere Temperaturwerte sind:

flüssige SO_2 vor dem Verdampfer $-3,4^\circ$,
 dampffg. SO_2 ht. dem Verdampfer $-3,6^\circ$; diese Ablesung oder auch
 die Temperatur selbst mag durch Strahlung u. dgl. beeinflusst sein,
 dampffg. SO_2 vor dem Kompressor $+4,5^\circ$, also um $13,4^\circ$ überhitzt,
 „ „ ht. „ „ $+92,2^\circ$, „ „ $63,8^\circ$ „ „
 „ „ vor „ Kondensator $62,0^\circ$, noch um $33,6^\circ$ überhitzt,
 flüssige „ ht. „ „ $24,5^\circ$, also um $3,9^\circ$ unterkühlt,
 „ „ vor dem Regelventil $23,3$, also kaum verändert,
 „ „ ht. „ „ $+1,3$; da der Wärmeinhalt sich
 im Regelventil nicht ändern kann, so müssen Dampfblasen infolge
 der Druckverringering entstanden sein, die sich dann bis zum
 Verdampfer (siehe oben) noch etwas vermehren, obwohl bis dahin
 Kälteverlust eintritt.

Man kann die stündlich *umlaufende Menge an* SO_2 berechnen, indem man für den als Kalorimeter betrachteten Kondensator die Energiegleichung aufstellt. Die Wärmeabfuhr ist oben schon zu 12500 kcal/h festgestellt worden. Es handelt sich um einen Tauchkondensator, dessen Gefäß ein stehender Zylinder von 900 mm Dmr. und 1800 mm Höhe, eine Außenfläche von $5,1 \text{ m}^2$ hat. Der Wasserinhalt hat $12,7$ bis $26,4^\circ$, im Mittel $19,5^\circ$ Temperatur, während die umgebende Luft wie beim Verdampfer etwa 23° C hatte. Wenn man den Wärmeaustausch mit der Umgebung zu $10 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ \text{C}$ annimmt, so macht derselbe $5,1 \cdot 3,5 \cdot 10 = 180 \text{ kcal/h}$ aus, oder $1,4\%$ vom Wärmeumsatz. Dieser Wärmeaustausch ist also geringfügig, er kann nach Befund in der errechneten Größe berücksichtigt werden, was jedoch im folgenden unterbleiben soll.

Der SO_2 -Dampf am Eintritt in den Kondensator hat den Zustand: $t = 62,0^\circ \text{ C}$, $p = 4,43 \text{ at abs.}$, letzteres entspricht der Sättigungstemperatur $t_s = 28,4^\circ \text{ C}$. Zu $p = 4,43$ gehört im Sättigungszustand die Gesamtwärme $\lambda = 89,9 \text{ kcal/kg}^1$; die spezifische Wärme des Dampfes nahe der Sättigungslinie ist $c = 0,154 \text{ kcal/}^\circ \text{C} \cdot \text{kg}$ (jedoch wird auch $c = 0,32$ angegeben, siehe Plank in Z. ges. Kältet. 1921, S. 39). Bei $33,6^\circ$ Überhitzung wird der Wärmeinhalt des eintretenden Dampfes $i_1 = 89,9 + 33,6 \cdot 0,154 = 95,1 \text{ kcal/kg}$. Die abgehende Flüssigkeit hat die Temperatur $t = 24,5^\circ$, bei einer spezifischen Wärme $c = 0,34$ ergibt das den Wärmeinhalt $i_2 = 8,3 \text{ kcal/kg}$. Demnach hat 1 kg SO_2 den Unterschied $i_1 - i_2 = 95,1 - 8,3 = 86,8 \text{ kcal}$ abgegeben, und bei 12500 kcal/h Umsatz sind also $12500 : 86,8 = 144 \text{ kg/h}$ kondensiert worden.

Der Kompressor hatte die Drehzahl $n = 102,6/\text{min}$, er förderte demnach $\frac{144}{60 \cdot 102,6} = 0,0234 \text{ kg/Umlauf}$. SO_2 -Dampf vom Ansaugzustand ($p = 1,15 \text{ at}$; $t = +4,5^\circ \text{ C}$) hat das spezifische Gewicht $3,19 \text{ kg/m}^3$, es sind $51,5 \text{ m}^3/\text{h}$ oder $0,00734 \text{ m}^3/\text{Uml.}$ angesaugt.

¹⁾ Benutzt ist die Tabelle Hütte I, S. 435, doch muß man die dortigen Zahlen in großem Maßstab graphisch auftragen.

Man kann nun folgende auf den Kompressor bezügliche Ermittlungen machen. Das Hubvolumen der beiden Zylinderseiten ist $6,62 + 6,29 = 12,91$ ltr. = $0,0129$ m³. Man kann hieraus einen volumetrischen Wirkungsgrad $\eta_{vol} = 0,00734 : 0,0129 = 0,57$ errechnen. Ein so *errechneter volumetrischer Wirkungsgrad* verdient besser diesen Namen als der („sichtbare“) *volumetrische Wirkungsgrad aus dem Indikator-diagramm*, der sich aus Fig. 292 ohne weiteres entnehmen läßt, nachdem die Linie des Saugdruckes *SL* eingetragen ist; auf ihr ist (§ 145) die innerhalb des Diagrammes liegende Strecke zur Diagrammlänge ins Verhältnis zu setzen. Für diesen volumetrischen Wirkungsgrad wurden folgende Werte den Diagrammen (Mittel aus vorn und hinten) entnommen:

Zeit	9 ^h 16 ^m	9 ^h 46 ^m	10 ^h 16 ^m	10 ^h 46 ^m	11 ^h 16 ^m
η_{vol}	0,826	0,830	0,825	0,807	0,814

Aus diesen Werten kann man etwa $\eta_{vol} = 0,82$ für 10^h 31^m entnehmen, jedenfalls also einen erheblich höheren Wert. Man kann den Unterschied beider Ergebnisse aus der verschiedenen Temperatur erklären; im errechneten η'_{vol} steckt die Temperatur + 4,5° C in der Saugleitung, der am Ende der Ansaugperiode dem Diagramm entnommene volumetrische Wirkungsgrad entspricht einer um so viel höheren Temperatur, wie der Dampf während des Ansaugens durch Wandungseinflüsse Erwärmung erfährt. Für diese Einflüsse ist dann eine Steigerung der absoluten Temperatur im Verhältnis der angefüllten Volumina

anzunehmen, d. h. am Ende des Ansaugens war $T = 277,5 \cdot \frac{0,82}{0,57} = 399^\circ$ oder $t = 126^\circ$ C, was auffallend hoch ist.

Es handelt sich nun noch um den mit der Kühlanlage erreichten *Gütegrad der Umsetzung*. Zu seiner Ermittlung ist die praktisch erreichte Ausbeute mit der in einem idealen Prozeß möglichen ins Verhältnis zu setzen. Als ideale Vergleichsprozesse sind ähnlich wie bei Dampfkraftmaschinen (§ 47) mehrere denkbar.

Die Verdampfung der SO₂ einerseits und andererseits ihre Kondensation spielen sich bei konstanter Temperatur ab; fast der ganze Wärmeumsatz der SO₂ wird also bei diesen beiden Temperaturen zu- und abgeführt, nämlich nur der kleine Betrag nicht, der der Überhitzung und Unterkühlung entspricht. Diese Isothermen, durch zwischengelegte Adiabaten für Kompression und Expansion miteinander verbunden, ergeben einen Carnot-Prozeß für das wirksame Mittel SO₂. Wenn dann der Prozeß zwischen den Temperaturen T_1 und $T_2 > T_1$ vor sich geht, so ist

$$\lambda'_c = \frac{T_1/T_2}{1 - T_1/T_2} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} \dots \dots \dots (8)$$

die erreichbare Umsatzzahl; wenn Q_1 die Kühlleistung ist, die mit dem indizierten Leistungsaufwand N_i kW erzeugt wurde, so ist

$$\lambda = \frac{Q_1}{859 \cdot N_i} \dots \dots \dots (8a)$$

die erreichte Umsatzzahl. Der erreichte thermische Gütegrad ist

$$\eta_{gt\hbar} = \frac{\lambda}{\lambda'_c} \dots \dots \dots (8b)$$

Die Temperaturen waren $-7,7^\circ \text{C}$ und $+28,4^\circ \text{C}$, entsprechend $T = 265,3$ und $301,4^\circ \text{abs.}$ Das Temperaturverhältnis $\frac{265,3}{301,4} = 0,881$ legt unmittelbar die erzielbaren Umsatzverhältnisse fest, für die folgende Wärmebilanz gilt:

Hinein:		Heraus:
Verdampfungsleistung 0,881		Kondensatorleistung 1,00
Kompressorleistung 0,119		

Die Richtigkeit erhellt aus dem Vergleich mit dem Dampfmaschinenprozeß als dem umgekehrten. Theoretisch kann man also eine Leistungszahl $\lambda = \frac{0,881}{0,119} = 7,40$ erreichen, oder: bei genannten Temperaturverhältnissen kann man das 7,40fache Äquivalent der für Kompression aufgewendeten Arbeit als Kälteleistung erhalten. 1 kWh = 859 kcal sollte also $859 \cdot 7,40 = 6360$ kcal Kälte liefern. In Wahrheit wurden mit 1 kWh nur 2450 kcal erzeugt, die Umsatzzahl ist $\frac{2450}{859} = 2,85$; der Gütegrad der Umsetzung ist $\eta_g = \frac{2450}{6360} = \frac{2,85}{7,40} = 0,396$. Dieser Gütegrad nimmt auf die Zustandsänderungen der SO_2 Bezug.

Den Verwender einer Kühlanlage interessiert es nicht, was in der SO_2 vor sich geht, sondern nur die äußere Wirkung. Um Sole von $-5,0^\circ$ Temperatur zu erzielen, steht Kühlwasser von $+12,7^\circ$ zur Verfügung. Man kann also einen zwischen den absoluten Temperaturen $T_s = 268$ und $T_1 = 285,7^\circ$, durch eine Temperaturstufe von $17,7^\circ$ spielenden Carnot-Prozeß zum Vergleich heranziehen, dessen Leistungsverhältnis dann $\lambda_c = \frac{T_s}{T_1 - T_s}$, in unserm Fall also $\lambda_c = \frac{268}{17,7} = 15,2$ ist; auf ihn bezogen ist der Gütegrad $\frac{2,85}{15,2} = 0,188$.

Dieser niedrige Wert ist freilich zum Teil die Folge eines Überlegungsfehlers; wenn das Wasser mit $+12,7^\circ$ zufließt, könnte doch nur dann alle Wärme theoretisch bei dieser Temperatur abgeführt werden, wenn eine unendlich große Wassermenge verfügbar wäre, die sich nicht merklich erwärmt. In Wahrheit spielt die Wassermenge eine ausschlaggebende Rolle auf die wirklich erzielten Ergebnisse, indem von ihr die Ablauftemperatur und damit, wie aus Fig. 291 deutlich erkennbar, der Druck und die Temperatur der Kondensation abhängt: je weniger Wasser, desto höher beide. Deshalb sollte die Wassermenge, die doch eine nicht in der Maschine liegende, sondern eine äußere Betriebsbedingung ist, ebenso wie die Wassertemperatur auf den Vergleichsprozeß Einfluß haben. Diese Überlegung rührt von Lorenz her. Um dessen Vergleichsprozeß hier anzuwenden, bedenke man, daß die einzelnen in gewissem Zeitpunkt von der Sole ins Kühlwasser gehobenen Wärmeelemente (diesen bildlichen Ausdruck mit allem Vorbehalt in theoretischer Hinsicht gebraucht) auf jede der verschiedenen zwischen Zu- und Ablauftemperatur liegenden Temperaturen zu heben sind, weil das Wasser der Wärmezufuhr proportional höhere Temperaturen annimmt; man kann

demnach zum Vergleich eine Reihe von Elementarkreisprozessen heranziehen, deren jeder, bei gleicher unterer Temperatur, oben die unendlich wenig, um dT , höhere Temperatur hat als der vorhergehende. Im Mittel kann man daher — bei konstanter spezifizischer Wärme des Wassers — die Temperatur $\frac{1}{2}(T_1 + T_2)$ als obere ansetzen und erhält das Leistungsverhältnis eines Lorenz'schen Vergleichsprozesses zu

$$\lambda_L = \frac{T_s}{\frac{1}{2}(T_1 + T_2) - T_s}, \text{ in unserem Fall } \lambda_L = \frac{268}{\frac{1}{2}(285,7 + 299,4) - 268} = 10,9, \text{ womit der Gütegrad bezogen auf einen Lorenz prozeß } \eta_g = \frac{2,85}{10,9} = 0,262 \text{ wird. —}$$

Die Versuchsreihe und namentlich Fig. 291 zeigt im übrigen die Einflüsse, die einerseits eine Veränderung der Soletemperatur, andererseits eine Veränderung der Ablauftemperatur des Kühlwassers auf den ganzen Prozeß der Kühlmaschine ausüben. Sie beide beeinflussen nämlich die Temperatur und damit den Druck, bei dem die Änderung des Aggregatzustandes im Verdampfer und andererseits im Kondensator vonstatten geht; sie legen insbesondere das Druckverhältnis für die Kompression und damit die Gestalt des Kompressor diagramms fest.

Die Temperatur der Sole bzw die Verdampfungstemperatur bestimmt außerdem noch, nach Maßgabe der Darlegungen des § 153, die umlaufende Menge des Kälte tr ägers und damit die Kühlleistung, die in erster Annäherung dem jeweiligen spezifischen Gewicht gesättigten Dampfes vom Verdampferdruck proportional ist; dabei ist dann von Unterkühlungs- und Überhitzungserscheinungen sowie von Änderungen des sichtbaren volumetrischen Wirkungsgrades abgesehen, welche letztere mit dem Kompressionsverhältnis einhergehen (§ 146).

In erster Annäherung läßt sich sagen, daß eine Änderung der Verdampfungstemperatur hauptsächlich den Umsatz, eine Änderung der Kondensationstemperatur hauptsächlich die Wirtschaftlichkeit beeinflusst.

Die Verdampfungs- und Kondensationstemperatur werden ihrerseits rückwirkend von der Kühlleistung beeinflusst; der Temperatur sprung in den Oberflächen beider Schlangen ist der durchgehenden Wärmemenge direkt proportional, und dessen Vergrößerung mit zunehmender Kühlleistung wirkt auf Vergrößerung der Temperatur- und damit der Druckstufe im Kälte tr äger. Viel größer ist aber im allgemeinen nämlich bei nicht sehr großen Kühlwassermengen, der Einfluß, den die größere Leistung auf die Kühlwasserabflußtemperatur und damit auf die zu überwindende Temperaturstufe hat. In Tabelle 95 Zeile 15 nimmt die Temperaturstufe vom Druck- zum Saugraum langsam zu mit abnehmender Soletemperatur und daher abnehmender Kühlleistung. Bei anderer Kühlwassermenge würde diese Temperaturstufe abnehmen oder konstant bleiben können.

154. Beispiel eines Garantiever suches nebst Umrechnung auf Sollbedingungen. Der folgende Versuch wurde an einer Schlachthofkühlanlage mit Dampfmaschinenantrieb gemacht. Die Kälte wurde teils durch einen soleberieselten Luftkühler abgenommen, wobei ein Ventilator die Luft aus den Kühlräumen ansaugte und durch den Luftkühler

in sie zurückdrückte; den Kühlräumen wurde durch Öffnen der Türen nach Bedarf Außenluft zugeführt, um die Temperatur auf $+3^\circ$ zu halten; zum anderen Teil wurde die Kälte in einem Eisgenerator auf Sole übertragen, doch waren keine Eiszellen in der Sole, so daß es sich also in bezug auf diesen Teil um einen Abkühlungsversuch handelt. Diese doppelte Verwendungsart der Kälte war nötig, um trotz der Jahreszeit — Oktober — noch die Kühlleistung zu erzielen oder genauer gesagt, sie zu vernichten. Der Versuch wurde über 3 h erstreckt. Der wirksame Kälte Träger war schweflige Säure.

Die Kühlleistung setzt sich nun aus vier Teilen zusammen:

a) *Kühlleistung aus Luftkühlung*. Durch Anemometermessungen vor dem Ventilator wurde die vom Ventilator umgewälzte Luftmenge zu $16900 \text{ m}^3/\text{h}$ festgestellt; die Temperatur bei der Messung war $+3^\circ \text{ C}$, der Barometerstand $\approx 760 \text{ mm QS}$, so daß also die stündliche Luftmenge im Normalzustand $16700 \text{ m}^3 \left(\frac{0}{760}\right)/\text{h}$ oder das Luftgewicht $16700 \cdot 1,293 = 21600 \text{ kg/h}$ ist.

Diese Luftmenge wurde aus den Kühlräumen vom Ventilator angesaugt und hatte hinter dem Ventilator, vor dem Eintritt in den Luftkühler Temperaturen, die während des dreistündigen Versuchs von $+6,3^\circ$ bis $+2,4^\circ$ sanken; im Mittel war sie $4,25^\circ$; hinter dem Luftkühler dagegen ging die Temperatur während der Versuchsdauer von $+1,8$ bis auf $-3,2^\circ$ herab; im Mittel war sie $-1,38^\circ$; demnach kühlte der Luftkühler die Luftmenge anfangs um $4,5^\circ$, am Ende um $5,6^\circ$, in der Mitte der Versuchsdauer kamen aber auch Abkühlungen um $6,0$ und $6,1^\circ$ vor, die Abkühlung schien also durch ein wegen der Unsicherheit solcher Differenzmessung nur undeutlich ausgeprägtes Maximum zu gehen. Die viertelstündlich genommenen Differenzwerte ergaben eine mittlere Temperaturerniedrigung im Luftkühler um $5,62^\circ$, woraus mit der spezifischen Wärme der Luft $c = 0,31 \text{ kcal/m}^3 \left(\frac{0}{760}\right) \cdot ^\circ \text{ C}$ eine Kühlleistung des Luftkühlers durch Luftkühlung von $16700 \cdot 5,62 \cdot 0,31 = 29100 \text{ kcal/h}$ folgt. Der Wasserdampfgehalt der Luft, der mit heruntergekühlt wird, ist hierbei einfach als Luft behandelt.

Die Kühlleistung der Anlage ist jedoch geringer; weil sich die Luft im Ventilator um etwa $0,3^\circ$ erwärmt hatte, so wird für die Kühlräume nur eine Abkühlung der Luft um $5,32^\circ$ wirksam, entsprechend einer Kühlleistung $16700 \cdot 5,32 \cdot 0,31 = 27600 \text{ kcal/h}$. Nur diese Kühlleistung ist in Rechnung zu setzen, da der Ventilator ein integrierender Bestandteil der Anlage ist; daß sein Wirkungsgrad gut sei, liegt im Interesse des Abnehmers, einmal um den Leistungsbedarf zum Antrieb gering zu halten, zweitens weil der im Ventilator auftretende Verlust als Wärme in die Luft geht (§ 136) und die Kühlleistung verringert.

b) *Kühlleistung aus Kondensation von Feuchtigkeit*. Zwischen Ventilator und Luftkühler wurde von Zeit zu Zeit ein Psychrometer eingeführt und die psychrometrische Differenz ziemlich gleichmäßig zu $1,6^\circ$ bestimmt; diese Differenz ist also hinter dem Ventilator bestimmt worden, wo die vom trockenen Thermometer bestimmte Temperatur im Mittel $+4,25$ war; dem feuchten Thermometer entspricht also $t_f = +2,65^\circ$. Diese Temperatur t_f war nämlich nicht direkt bestimmt worden, weil die Ermittlung der kleinen psychrometrischen

Differenz wie überhaupt die Bedienung des Psychrometers besondere Aufmerksamkeit erfordert und deshalb für sich geschah, wobei natürlich die Temperatur am trockenen Thermometer, die dauernd kleinen Schwankungen unterlag, nicht gerade $+4,25^\circ$ war, welcher Wert ja überdies ein Mittelwert ist. Man fand daher t_f als $t - (t - t_f)$.

Den Werten $t = +4,25^\circ$, $t - t_f = 1,6^\circ$ entspricht nach der Sprungschen Formel (Techn. Mess. § 106) ein Dampfteildruck $p_d = 5,6 - 0,5 \cdot 1,6 = 4,8$ mm QS, worin 5,6 mm QS der Sättigungsdruck des Dampfes bei $2,65^\circ$ C ist. Der Sättigungsdruck bei $4,25^\circ$ ist 6,21 mm QS, also findet sich der relative Feuchtigkeitsgehalt zu 77%. Der Sättigungsgehalt bei $+4,25^\circ$ C ist $6,48 \text{ g/m}^3$, der Gehalt der untersuchten Luft also $0,77 \cdot 6,48 = 4,99 \text{ g/m}^3$. (Tabelle Hütte 22. Aufl., I, S. 403).

Um den Wasserdampfgehalt der gesamten Luftmenge zu ermitteln, hat man zunächst noch ihr Volumen bei $4,25^\circ$ C aus demjenigen bei 0° zu $16\,950 \text{ m}^3$ zu errechnen. Der Wasserdampfgehalt in der gesamten Luftmenge beim Eintritt in den Luftkühler (oder beim Eintritt in den Ventilator, indem sich mit der Temperatur wohl der relative Feuchtigkeitsgehalt, nicht aber der absolute verändert hat), ist also $16\,950 \cdot 0,004\,99 = 84,5 \text{ kg/h}$.

Dieser in den Luftkühler eintretenden Feuchtigkeitsmenge ist die aus ihm austretende gegenüberzustellen. Am Austritt wurden $-1,38^\circ$ C gemessen; eine psychrometrische Differenz war nicht zu konstatieren; obwohl an sich nicht unbedingt Sättigung hinter dem Luftkühler herrschen muß, da nämlich der Luftkühler mit Soleberieselung arbeitet, so war dies also doch hier der Fall. Das Luftvolumen bei $-1,38^\circ$ C ist $16\,550 \text{ m}^3/\text{h}$, die Sättigungsmenge bei der gleichen Temperatur ist $4,35 \text{ g/m}^3$. Der gesamte Wasserdampfgehalt beim Austritt ist also $16\,550 \cdot 0,004\,35 = 72,0 \text{ kg/h}$.

Wenn in den Luftkühler $84,5 \text{ kg/h}$ Dampf eintreten und $72,0 \text{ kg/h}$ aus ihm austreten, so sind $12,5 \text{ kg}$ Feuchtigkeit niedergeschlagen worden. Die Kondensationswärme des Kilogramms pflegt man zu 600 kcal anzunehmen. Diese Zahl trifft auch insofern leidlich zu, als der Wärmeinhalt des Dampfes bei 0° (verglichen mit Wasser von 0°) 595 kcal beträgt. Es werden dann geleistet für die Kondensation von Feuchtigkeit $12,5 \cdot 600 = 7500 \text{ kcal/h}$.

Zum Abkühlen der Luft sind insgesamt $27\,600 + 7500 = 35\,100 \text{ kcal/h}$ im Luftkühler einschl. Ventilator geleistet worden. Dabei ist der Anteil der Kondensation in der Leistung 21% und darf keinesfalls übersehen werden.

Viel schneller kommt man unter Benutzung der Wärmeinhalte nach den Angaben in Techn. Mess. 4. Aufl., § 106, insbesondere unter Benutzung der dortigen Fig. 298 zum Ziel. Der erste Punkt ist darin angekreuzt. Wir entnehmen:

für Luft von $t = +4,25^\circ$, $t - t_f = 1,6^\circ$ ist $i = 3,40$	
,, ,, ,, $t = -1,38^\circ$, $t - t_f = 0$ ist $i = 1,63$	
Die Kühlleistung des Kühlers beträgt also	<u>1,77 kcal</u>
Davon vernichtet der Ventilator $0,3^\circ \cdot 0,24$	<u>= 0,07</u>
Demnach bleiben als nutzbar	<u>$\Delta i = 1,70 \text{ kcal}$</u>

bezogen auf 1 kg umgewälzter Luft. Da $16\,700 \times 1,293 = 21\,600$ kg/h umgewälzt wurden, so ist die Kühlleistung $21\,600 \cdot 1,70 = 36\,700$ kcal/h. Die Zahl ist etwas größer als eben berechnet; die Tatsache, daß durch Einsetzen der Zahl $1,293$ kg/m³ als spezifisches Gewicht der Luft bei 0° und 760 mm QS der Dampfteildruck vernachlässigt wurde, könnte die Ursache davon sein. Genauer wäre nämlich wie folgt zu rechnen gewesen. Da bei + 4,25° der Feuchtigkeitsgrad 0,77% war (Techn. Mess. Fig. 298), so ist der Dampfteildruck $0,77 \cdot 6,21 = 4,8$ mm QS, der Luftdruck also nur 755 mm QS. Das Luftgewicht ist also im Verhältnis $\frac{755}{760}$ kleiner als oben angenommen, es ist $21\,600 \cdot \frac{755}{760} = 21\,450$ kg/h, und damit ist die Kühlleistung $21\,450 \cdot 1,70 = 36\,500$ kcal/h aus Luftkühlung und aus Kondensation zusammen, während der andere Rechnungsgang $27\,600 + 7500 = 35\,100$ kcal/h ergab.

c) *Kühlleistung aus Abkühlung des Luftkühlers.* Wie schon zahlenmäßig belegt, war die Temperatur der Luft, abgesehen von der jeweiligen Abkühlung im Luftkühler, im Laufe der Versuchszeit heruntergegangen; es lag also kein guter Beharrungszustand vor. Die Herabkühlung der Luft selbst, die jeweils im Kühler ist, beansprucht keine merkliche Wärme. Die Luft empfängt aber die Kälte von einem Schlangensystem, das vom verdampfenden Kälte Träger SO₂ durchflossen und von Salzsole überrieselt wird, letzteres behufs Herabsetzung der Feuchtigkeit durch die Dampfdruckerniedrigung über einer Salzlösung gegenüber reinem Wasser.

Der Luftkühler enthielt in Gestalt von Schlangenwindungen, Traggestell und Becken zum Auffangen der Sole 3790 kg Eisen, entsprechend $3790 \cdot 0,115 = 435$ kg Wasserwert. Die umlaufende berieselnde Sole, 2,9 m³ von 21° Bé entsprechend $\gamma = 1169$ kg/m³ und $c = 0,83$ kcal/kg · °C hat $2,9 \cdot 1,169 \cdot 0,83 = 2820$ kg Wasserwert. Der gesamte Wasserwert von $2820 + 435 = 3255$ kg wurde nun in dem dreistündigen Versuch von - 0,9° auf - 7,6°, um 6,7° herabgekühlt, entsprechend $3255 \cdot 6,7 = 21800$ kcal/3 h = 7300 kcal/h. Die Herabkühlung der Umfassungswände des Luftkühlers ist hierbei unbeachtet geblieben, weil die Kälte in die schlecht leitenden Holzteile nicht tief eindringt.

d) *Kühlleistung aus Abkühlung eines Generators.* Die Anlage hatte zwei Regelventile, mittels dessen einem ein Teil der im Kondensator niedergeschlagenen SO₂ der eben erwähnten berieselten Schlange des Luftkühlers zugeführt wurde, während der Rest der flüssigen SO₂ durch das andere Regelventil der Kühltischlange eines Eisgenerators zufließt und in dieser verdampfte.

Eiszellen waren in dem Generator nicht vorhanden. Die Wärmebindung durch ihr Gefrieren hätte nur durch einen längeren Dauerversuch festgestellt werden können. Für diesen Teil der Anlage ergab sich daher ein reiner Abkühlungsversuch.

Der Soleinhalt hatte 4290 kg Wasserwert, die Eisenteile des Gefäßes und der Schlange hatten 150 kg Wasserwert; die im ganzen $4290 + 150 = 4440$ kg Wasserwert wurden in den 3 h Versuchsdauer von - 1,8° auf - 10,0° heruntergekühlt, also um 8,2°, entsprechend $4440 \cdot 8,2 = 36\,400$ kcal/3 h = 12 100 kcal/h.

Die Kühlleistung der ganzen Anlage im Durchschnitt des dreistündigen Versuches war also

Kühlleistung aus Luftkühlung im Umlauf	27 600 kcal/h
„ aus Kondensation von Feuchtigkeit	7 500 „
„ aus Abkühlung des Luftkühlers	7 300 „
„ im Kreislauf I	42 400 kcal/h
„ aus Abkühlung des Eisgenerators im Kreislauf II	12 100 „
Gesamte Kühlleistung	54 500 kcal/h

Dabei hatte der Kompressor 15,0 PS und die ihn direkt antreibende Dampfmaschine 31,7 PS indiziert. Der Unterschied $31,7 - 15,0 = 16,7$ PS entspricht jedoch nicht nur den Getriebeverlusten, sondern es ist darin der Antrieb für die Kühlwasserpumpen und für den Ventilator enthalten, Einrichtungen, die integrierende Bestandteile der einheitlichen Kühlanlage sind und unter die für diese gegebene Garantie fallen.

Die *Garantie* lautete nämlich: die gesamte Kühlanlage solle 45000 kcal/h leisten können, und es solle dann bei -10° Verdampfungstemperatur der SO_2 und $+20^\circ$ Ablauftemperatur des Kühlwassers ein effektiver Verbrauch von 20 PS eintreten.

Man erkennt also, daß die Leistungsgarantie sehr reichlich erfüllt wird (54 500 statt 45 000 kcal/h). Die Verbrauchsgarantie jedoch scheint zunächst nicht innegehalten zu sein. Bei einem mechanischen Wirkungsgrad der Dampfmaschine, wie er in der Garantie auch noch gegeben war, von 0,88 ist der wirkliche Verbrauch $31,7 \cdot 0,88 = 27,9$ PS an der Antriebswelle der gesamten Kühlanlage (von der der Kompressor direkt, die Hilfsmaschinen durch Riemen angetrieben werden); es sind also $54\,500 : 27,9 = 1950$ kcal mit der effektiven Pferdekraftstunde erzeugt worden, während die Garantie $45\,000 : 20 = 2250$ kcal Ausbeute verlangt; der Garantiewert ist also um 15,4% überschritten, während es doch sogar zweifelhaft ist, ob eine Lizenz von 5% bei Kühlanlagen zuzubilligen ist (§ 7). Meist geschieht das.

Die Frage ist jedoch, ob die bedingenden Angaben (§ 8) der Garantie innegehalten sind; sonst ist eine Umrechnung auf Sollbedingungen nötig (§ 10).

In Wahrheit war am Saugmanometer, das in üblicher Weise außer der Druckskala noch eine solche für die Temperatur hatte, die Verdampfungstemperatur zu $-13,2^\circ$ im Mittel der Zeit abgelesen, während die Garantie -10° benennt. Hierdurch wird die Temperaturstufe größer. Andererseits wirkt der Saugdruck auch stark auf den SO_2 -Umlauf und daher auf die Leistung, die bei richtiger Einstellung noch größer geworden wäre; die Anlage ist also ersichtlich sehr reichlich. Das Kühlwasser dagegen lief im Mittel mit $18,0^\circ \text{C}$ ab gegen 20° in der Garantie, das Kühlwasser war also $2,0^\circ$ kälter als verlangt. Es ist nun unlogisch, wenngleich nicht unpraktisch, daß in der Garantie für die untere Temperatur auf SO_2 , für die obere aber auf das Wasser Bezug genommen ist. Man könnte wohl für eine Umrechnung ruhig mit diesen Zahlen rechnen. Richtiger ist es aber, auch die untere Grenze auf SO_2 zu beziehen: Nach Ausweis des Druckmanometers war die Konden-

sationstemperatur im Mittel $+ 21,5^\circ \text{C}$; sie hätte bei richtiger Kühlwassermenge um eben jene $2,0^\circ$ höher sein und daher $+ 23,5^\circ$ betragen sollen. In der Schlange des Kondensators findet also ein Temperatursprung von $3,5^\circ$ statt, der dem Wärmeübergang dient; seine Größe ist mitbedingt durch die übergehende Wärmemenge, die wegen der Mehrleistung der Maschine größer ist als sie bei der Garantieleistung betrüge. Es ist ausreichend anzunehmen, daß dieser Temperatursprung der gesamten Kühlleistung proportional ist, er würde also bei $45\,000 \text{ kcal/h}$

(statt $54\,500 \text{ kcal/h}$) nur $3,5 \cdot \frac{45\,000 + 9200}{54\,500 + 9500} = 2,9^\circ$. Hierin ist 9500 kcal/h

der Wärmewert von $15,0 \text{ PS}$ Kompressorleistung, die sich bei der richtigen Temperaturstufe (gemäß der gleich zu gebenden Tabelle $32,8$ statt $34,0^\circ$) auf 9200 kcal ermäßigen würde. — Für den Temperatursprung auf der anderen Seite, von der SO_2 in die Luft oder Sole, die gleiche Umrechnung vorzunehmen erübrigt sich, weil hier die Garantie die SO_2 -Temperatur benennt.

Für die Temperaturstufe gilt nun folgende Zusammenstellung:

	Sollwert	Istwert
Verdampfungstemperatur	-10°	$-13,2^\circ$
Kühlwassertemperatur (Ablauf)	$+20^\circ$	$+18^\circ$
Kondensationstemperatur		
bei $54\,500 \text{ kcal/h}$	$+23,5^\circ$	$+21,5^\circ$
bei $45\,000 \text{ kcal/h}$	$+22,9^\circ$	$+20,9^\circ$
Temperaturstufe für die SO_2	$32,9^\circ$	$34,1^\circ$
Leistungszahl nach Carnot	$\frac{263}{32,9} = 8,00$	$\frac{260}{34,1} = 7,63$

Man darf also erwarten, daß sich die Leistungszahl der Kühlanlage im Verhältnis $8,00:7,63 = 1,049$ besser ergeben hätte, wenn die Versuchsbedingungen die verlangten gewesen wären. Dann hätte man eine Ausbeute $1950 \cdot 1,049 = 2040 \text{ kcal/PS}$ gehabt, und wäre gegenüber den garantierten 2250 kcal/PS nur noch um $10,7\%$ zurückgeblieben.

In Wahrheit ergab aber eine Beobachtung anderer Betriebswerte, daß betriebsmäßige Verbesserungen so zu machen waren, daß man auf Erfüllung der Garantie mindestens unter Inanspruchnahme der Toleranz rechnen konnte.

Die Drehzahl der Dampfmaschine war nämlich $n = 126,5/\text{min}$ gewesen, während in dem Vertrag $n = 120/\text{min}$ namhaft gemacht war. Eine Richtigstellung dieses wichtigen Betriebsdatums ist nach Maßgabe von Kap. V, insbesondere § 147, leicht durch anderweitige Belastung des Dampfmaschinenreglers zu machen. Das hat dann günstigen Einfluß auf den Verlust im Maschinengetriebe und auf den Leistungsaufwand der Kühlwasserpumpe und des Ventilators. Mit einer Änderung der Drehzahl ändert sich der Leistungsbedarf

der Transmission und des Getriebes etwa einfach proportional, vermutlich etwas schneller,

des Ventilators, der gegen unveränderten Düsenwert arbeitet, und des Rührwerks im Eisgenerator mit der dritten Potenz (§ 136),

der Pumpen für das Kühlwasser und für den Soleumlauf zur Luftkühlerberieselung, die gegen überwiegend konstante Förderhöhe arbeiten, sehr stark (§ 125).

Man kann hiernach darauf rechnen, daß der gesamte Nebenbedarf, also der Unterschied zwischen indizierter Dampfmaschinen- und Kompressorleistung, sich mindestens etwa quadratisch mit der Drehzahl ändern wird. Um das nachzuprüfen, wurde übrigens noch die Pleuelstange des Kompressors ausgehängt und der indizierte Leistungsbedarf aller anderen Teile, allerdings einschließlich der Eigenwiderstände der Dampfmaschine

bei $n = 128,5/\text{min}$ zu $N = 16,5$ PS,
 bei $n = 116,5/\text{min}$ zu $N = 13,0$ PS bestimmt.

Nun ist $116,5 : 128,5 = 0,906$,
 andererseits $13,0 : 16,5 = 0,788$, } $0,906^2 = 0,82 > 0,788$,

so daß also die quadratische Beziehung noch übertroffen wird.

Die Herabsetzung der Drehzahl von 126,5 auf 120/min im Verhältnis 1 : 0,948 wird also die Nebenverluste mindestens im Verhältnis 1 : 0,900 verringern, während sich freilich auch die Leistung im einfachen Verhältnis der Drehzahl verringert, indem der volumetrische Wirkungsgrad konstant bleibt.

Nun ist		bei $n = 126,5$, also bei 120/min
die Kühlleistung	54 500	51 600 kcal
der Verbrauch des Kompressors	15,0	14,2 PS
der Verbrauch des Getriebes	12,9	11,6
der Gesamtverbrauch	27,9	25,8
die Ausbeutezahl	1950	2000
letztere also vergrößert im Verhältnis	1	1,025

Von den 10,7% Mehrverbrauch waren also nochmals 2,5% durch Einregeln der Dampfmaschine zu gewinnen. Dann blieben noch 8,2% zu viel, zu deren Beseitigung man den Kraftverbrauch um $25,8 \cdot \frac{8,2}{108,2} = 1,9$ PS verringern mußte; bei Verringerung um $25,8 \cdot \frac{3,2}{108,2} = 0,76$ PS

blieb man innerhalb der Toleranz von 5%. Da eine Nachprüfung der Drehzahlen der Pumpen, des Ventilators, und der Transmission ergab, daß sie alle, auch abgesehen von der höheren Drehzahl der Dampfmaschine, schneller liefen als angenommen, so waren die Scheiben zu verändern.

Nach Ausführung der genannten Änderungen kann die Anlage unbedenklich zum Garantievorschuss gestellt werden.

V. Regelungsvorgänge.

155. Allgemeine Zusammenhänge. Regelungen (Regeleinrichtungen) sollen eine für den Betrieb wichtige Größe konstant halten, auch wenn der Umsatz (§ 3) wechselt. Sie sind dazu so eingerichtet, daß Abweichungen der konstant zu haltenden Größe von ihrem Sollwert Kräfte in einem *aktiven Regelorgan* wachrufen; dessen Kraftäußerung verstellt durch Vermittlung eines *Stellzeuges* ein *passives Regelorgan* in dem Sinne, daß durch die Verstellung die konstant zu haltende Größe auf den Sollwert zurückgeführt wird.

Bei Kraftmaschinen pflegt ein Fliehkraftregler das aktive Regelorgan darzustellen, das passive Regelorgan kann eine einfache Drosselklappe (Fig. 311, § 162) oder ein komplizierterer Mechanismus sein, der in jedem Fall die Füllung (Zylinderfüllung, Düsenbeaufschlagung) beeinflusst. Konstant zu halten ist meist die Drehzahl trotz wechselnder Leistungsabnahme. — Bei Wärmereglern soll meist die Temperatur, bei Dampfkesseln auch der Druck konstant gehalten werden trotz wechselnder Wärmeentnahme. Das aktive Regelorgan pflegt durch Ausdehnung irgendwelcher Teile unter dem Einfluß von Temperatur oder Druck zu wirken; es verstellt dann ein Drosselorgan für Verbrennungsluft, Feuergase oder Heißdampf, dieses bildet das passive Regelorgan.

Einem bestimmten Wert des Umsatzes ist ein bestimmter Wert der konstant zu haltenden Größe zugeordnet. Wechselt der Umsatz von Null (Leerlauf) bis auf seinen Höchstwert, so pflegt eine mäßige Änderung der geregelten Größe einzutreten; hierdurch ergibt sich die *Ungleichförmigkeit* der Regelung.

Unter dem Einfluß dieser mäßigen Änderungen der geregelten Größe führen Teile des aktiven Regelorgans Bewegungen aus, die, auf das passive Regelorgan übertragen, den Regelvorgang ergeben. Diese Bewegungen bedeuten einen *Energieumsatz* im Innern des aktiven Regelorgans: meist wird eine Federspannung, oder die Schwerkraft wird überwunden. Der Energieumsatz heißt das *Arbeitsvermögen* der Regelung. Je größer das Arbeitsvermögen, desto besser werden Widerstände überwunden, die das Stellzeug oder passive Regelorgan der Verstellung entgegensetzt; doch ist stets sorgsam zu unterscheiden zwischen den Kräften, die beim Hin- und Rückgang hindernd wirken, also Arbeitsvermögen aufbrauchen, und jenen, die die Arbeit nur aufspeichern und die gespeicherte beim Rückgang wieder hergeben (Spannen einer Feder, Heben eines Gewichts); von ersteren bedingt die Reibung die Unempfindlichkeit der Regelung, letztere aber beeinflussen den Wert der geregelten Größe und meist auch die Ungleichförmigkeit. Daraus ergibt sich, daß die Eigenschaften der ganzen zusammengebauten Regelung andere sind als die des verwendeten (aktiven) Reglers, und daß Fehler in der Wirksamkeit der Regelung nicht nur im (aktiven) Regler, sondern auch in der Art des Zusammenbaus der Regelung, in der Anordnung des Stellzeugs oder auch im passiven Regelorgan ihre Ursache haben können.

Neben den vorstehend aufgezählten *statischen Eigenschaften* der Regelung spielen noch die in Bewegung zu setzenden Massen sowie die Dämpfung des Reglers eine Rolle; sie bedingen die *dynamischen Eigenschaften* der Regelung.

Im folgenden sollen die Zusammenhänge am Beispiel einiger Kraftmaschinen versuchsmäßig erörtert werden. Vorstehende Zusammenfassung soll durch die Allgemeinheit ihrer Fassung darauf hinweisen, daß andere selbsttätige Regelungen wie Druckminderventile oder Kondenswasserableiter sinngemäß denselben Gesetzen unterliegen.

156. Kraftmaschinenregelung. Die nachzuweisenden Abhängigkeiten sind die folgenden. Es wird ein bestimmtes *Drehmoment* M gefordert, zu seiner Erzeugung bedarf es einer bestimmten „Füllung“ q der treibenden

Teile — des (Hochdruck-)Zylinders der Kolbenmaschine, des Leitsatzes der Turbine — und daher eines bestimmten indizierten Drehmomentes M_i . Jeder Füllung φ ist nach der Anordnung des Stellzeuges eine gewisse Reglerstellung r zugeordnet; der Reglerstellung entspricht nach den Gesetzen des Reglers selbst eine bestimmte Drehzahl n' des Reglers, die wegen des konstanten Übersetzungsverhältnisses zwischen Regler- und Maschinenwelle eine bestimmte Drehzahl n der Maschine bedingt. Es ist also jeweils eindeutig

$$\text{für die Maschine } M_i = f_1(\varphi) \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{für das Stellzeug } \varphi = f_2(r) \dots \dots \dots (2)$$

$$\text{für den Regler } r = f_3(n) \text{ (Kennlinie des Reglers bzw. der Regulng)} \dots \dots \dots (3)$$

und diese drei Abhängigkeiten in ihrer Gesamtheit bedingen für die geregelte Maschine

$$n = F_1(M_i) \dots \dots \dots (4)$$

oder, wegen der Beziehung $N_i = c \cdot M_i \cdot n$ für die indizierte Leistung N_i , ist auch

$$n = F_2(N_i) \dots \dots \dots (5)$$

Da endlich die Nutzleistung der Kraftmaschine durch $N_e = f_4(N_i)$, oft sogar einfach durch $N_i - N_e = \text{konst.}$ festgelegt ist, so können wir auch

$$N_e = F_3(n) \text{ (Reglungskennlinie der Maschine)} \dots \dots (5a)$$

anschreiben.

Die Beziehungen (1) bis (5a) geben reine Eigenschaften der geregelten Maschine. Ihnen treten gegenüber die Beziehungen für die Belastung.

Für die Belastung ist im allgemeinen

$$M = F'(n) \dots \dots \dots (6)$$

miteinander zunehmend, während in (4) M und n gegeneinander zu gehen pflegen, und daraus folgt auch

$$N_e = F''(n) \text{ (Kennlinie der Belastung)} \dots \dots \dots (7)$$

Aus (4) und (6) oder aber aus (5a) und (7) ergibt sich die wirklich eintretende Belastung und Drehzahl als Schnitt der beiden entgegengesetzt geneigten Kennlinien. Vergleiche § 157 am Ende, Fig. 298.

157. Normale statische Eigenschaften des Reglers und der Regulng. Ein von der Maschine losgelöster Regler werde allmählich auf immer höhere Drehzahlen gebracht. Dazu braucht z. B. bei einer Dampfmaschinenreglung nur das Stellzeug gelöst zu werden, die Füllungsbeeinflussung wird gegen freiwillige Verstellung gesichert, und dann wird sehr vorsichtig das Dampfventil geöffnet. Bei einer gewissen Drehzahl n'_1 löst sich die Reglermuffe oder das belastende Gewicht von seinem unteren (innern) Anschlag; weiterhin nimmt mit steigender Drehzahl auch der Hub der Muffe mehr und mehr zu, bis die Muffe endlich bei einer Drehzahl n'_2 die andere Hubbegrenzung erreicht. Während dieses Vorganges kann man zueinandergehörige Werte der Umlaufzahl n und des vom Ruheanschlag gerechneten Muffenhubes r durch Beobachtung feststellen und in ein Koordinatennetz eintragen, Fig. 295 a.

Man läßt nun die Drehzahl des Reglers vorsichtig wieder sinken. Das Wiederablösen des Reglers von der oberen Hubbegrenzung tritt erst bei einer Drehzahl n''_1 ein, die tiefer liegt als n'_2 . Wieder werden zueinandergehörige Werte des Hubes und der Drehzahl abgelesen, bis bei einer Drehzahl n''_1 der Regler die Ruhe-Hubbegrenzung erreicht.

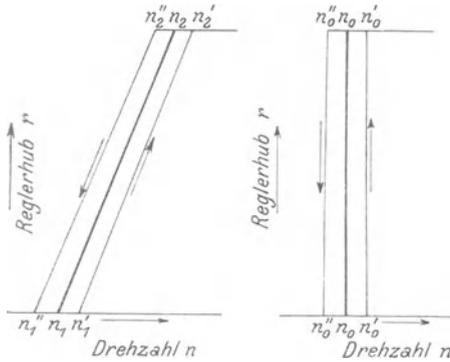


Fig. 295. Kennlinie eines Reglers, schematisch
 a) eines statischen, b) eines astatichen.

Daß die im Aufwärts- und im Abwärtsgang erhaltenen Kurven voneinander abweichen, dürfen wir der Reibung des Reglers zuschreiben. Wenn wir zwischen beide Kurven die mittlere Kurve $n_1 n_2$ zeichnen, so nehmen wir an, daß diese Kurve das Verhalten des reibungsfrei gedachten Reglers zum Ausdruck bringt.

In Fig. 296 sind für den Regler der aus Kap. IIIc bekannten Dampfmaschine die drei Kurven eingetragen; die beiden äußeren sind durch

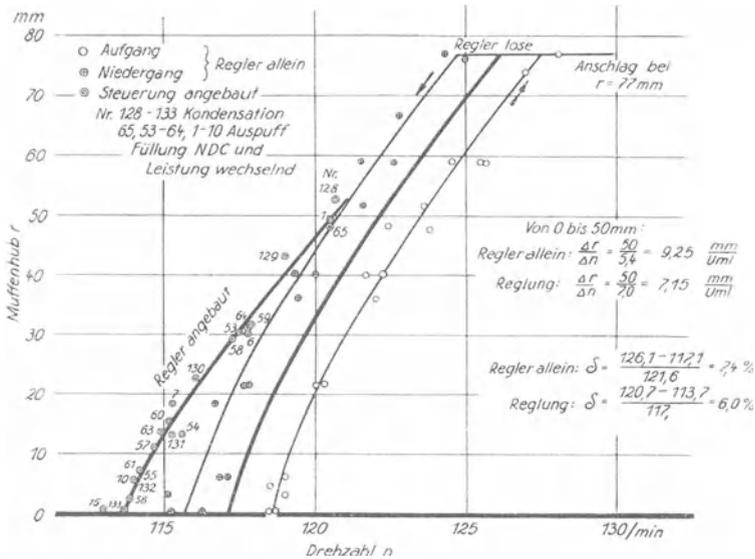


Fig. 296. Kennlinie eines Reglers und einer Regelung.

Pfeile gekennzeichnet, die mittlere ist stärker hervorgehoben. Die Kurven sind durch die Worte: *Regler lose* zusammengefaßt.

Der Unterschied $n_2 - n_1$ der Drehzahl des reibungsfrei gedachten Reglers in der höchsten gegenüber der tiefsten Muffenstellung ist die

Ungleichförmigkeit des Reglers. Der Fig. 296 entnehmen wir die Ungleichförmigkeit zu $126,1 - 117,2 = 8,9$ Uml./min. Für das Verhalten des Reglers wichtiger ist die relative Ungleichförmigkeit oder der *Ungleichförmigkeitsgrad* ε , der der Tourenabfall ins Verhältnis zur mittleren Drehzahl setzt:

$$\varepsilon = \frac{n_2 - n_1}{\frac{1}{2} \cdot (n_1 + n_2)} \cdot \dots \dots \dots (8)$$

In Fig. 296 ist $\varepsilon = \frac{8,9}{121,65} = 0,073 = 7,3\%$.

Der Ungleichförmigkeitsgrad ist ein Maß für die statischen Verhältnisse des Reglers. Je flacher die Beziehung $r = f_3(n)$ verläuft, desto statischer ist der Regler, je steiler sie verläuft, desto weniger statisch ist er. Verläuft die Beziehung senkrecht (Fig. 295 b), so ist der Regler astatisch. Es sind dann nicht mehr die Drehzahlen und die Hübe eindeutig einander zugeordnet; die Reglermuffe steigt bei Anstellung des beschriebenen Versuches nicht mehr allmählich, sondern geht bei Überschreiten einer Drehzahl n'_0 sofort in die oberste Endlage, bei Unterschreiten einer Drehzahl n''_0 gleich bis in die untere Endlage zurück. Noch mehr wäre das der Fall, wenn die Linie nach links übergeneigt wäre, der Regler also überastatisch wäre.

Man bezeichnet die Beziehung $r = f_3(n)$ zwischen Drehzahl und Muffenstellung als *Kennlinie des Reglers*.

Der Abstand der beiden im Aufwärts- und im Abwärtsgang erhaltenen Linienzüge voneinander ist ein Maß für die Reibung des Reglers in Gelenken und Muffe. Der Abstand gibt den doppelten Betrag der Reibung an. Man nennt ihn die *Unempfindlichkeit des Reglers*. In Fig. 296 beträgt nahe dem unteren Anschlag die Unempfindlichkeit 2,9 Uml./min, nahe dem oberen Anschlag beträgt sie 2,7 Uml./min; wegen der wechselnden Reibung streuen die Punkte etwas, und die Werte sind nicht sicher zu entnehmen. Auch hier rechnet man häufiger mit dem *Unempfindlichkeitsgrad*, indem man die Unempfindlichkeit in Beziehung setzt zur Drehzahl des Reglers. In Fig. 296 ändert sich der Unempfindlichkeitsgrad von 0,025 bis herauf auf 0,021 von der untersten bis zur obersten Hülsenstellung. Die Unempfindlichkeit soll bekanntlich erheblich geringer sein als die Ungleichförmigkeit des Reglers.

Wenn man nun den Regler durch das Stellzeug mit dem Regelgestänge und daher mit der Steuerung der Maschine in Verbindung bringt und die gleichen Versuche über das statische Verhalten nochmals anstellt, so kommt man zu mehr oder weniger abweichenden Ergebnissen.

Man braucht diese *Untersuchung der Regelung* (statt bisher: des Reglers) nicht durch vorsichtiges Bedienen des Dampfventils oder auf dem Probierstand zu machen, sondern kann die Reglermuffe in die verschiedensten Stellungen r mm über der Ruhelage bringen, indem man die Maschine verschieden stark belastet, dabei stets allmählich vorgehend, um zu vermeiden, daß der Regler in Schwingungen kommt;

so kann man wieder erreichen, daß die Regelung bei einer ersten Versuchsreihe von unten her, bei einer zweiten Versuchsreihe von oben her in jede ihrer Stellungen kommt. Man mißt zweckmäßig diesmal außer der Hülsenstellung r und der Drehzahl n auch noch die Leistung der Maschine, bei Kolbenmaschinen am besten durch Indizieren, da die indizierte Leistung die durch die Regelung bestimmte ist, sonst durch Feststellen der Bremslast.

Solche Untersuchung der Regelung liefert, wie erwähnt, abweichende Ergebnisse gegenüber der Untersuchung des Reglers.

In Fig. 296 sind unter *Regler angebaut* zahlreiche Versuchspunkte eingetragen, für die man mit Hilfe der Nummern die äußeren Be-

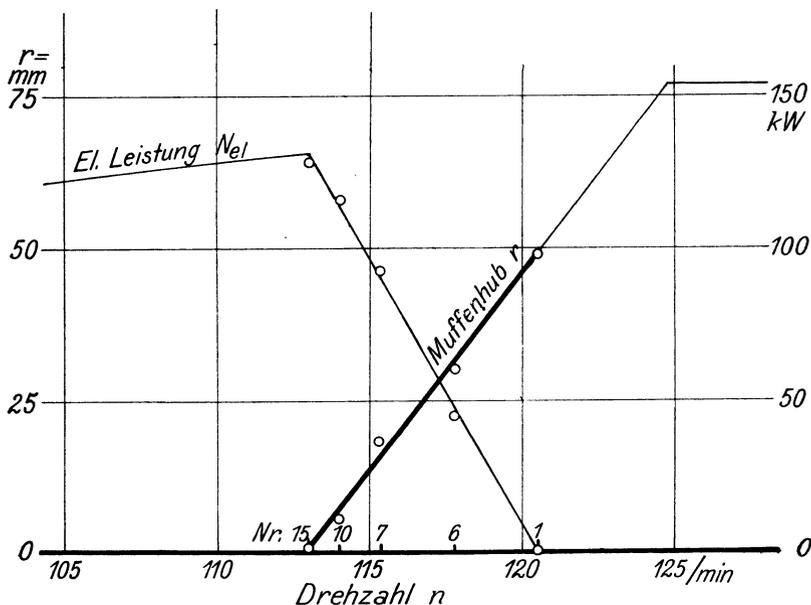


Fig. 297. Kennlinie des Reglers und zugehörige Reglungskennlinie des Maschinensatzes. (Für eine Dampfdynamo.)

dingungen aus Kap. IIIc finden kann. Die Kennlinie der Regelung brauchte in diesem besonderen Fall nicht als Mittel aus Auf- und Niedergang gefunden zu werden, weil sich in beiden Fällen das Gleiche ergibt. Das kommt daher, daß die betreffende Steuerung einen starken und stark wechselnden Rückdruck hatte, der den Regler zum Tanzen bringt und durch dieses ständige Auf- und Niedergehen den Einfluß der Reibung beseitigt. Es zeigt sich, daß vorbehaltlich einer mäßigen Streuung der Punkte die äußeren Bedingungen: Belastung, Gegendruck und Füllung des Niederdruckzylinders — keinen Einfluß auf die Beziehung zwischen Muffenhub und Drehzahl haben. Alle Punkte zusammen ergeben eine Kurve, die gegenüber der für losen Regler geltenden nach links gerückt ist und auch flacher verläuft als jene. Sie ist die *Kennlinie der Regelung*. Sie zeigt, daß in diesem Fall die zusammen-

gebaute Regelung bei geringeren Drehzahlen arbeitet als der Regler, und daß ihr Ungleichförmigkeitsgrad größer ist; die Unempfindlichkeit jedoch ist infolge des Tanzens Null geworden.

Über die Ungleichförmigkeit jedoch ist noch folgendes zu sagen: Die höchste Reglerstellung im Betriebe ist durch den Leerlauf der Maschine oder des Maschinensatzes gegeben; beim Leerlauf befindet sich der Regler aber noch wesentlich unter seinem oberen Anschlag. Das soll stets der Fall sein, denn immer muß man, um sich gegen Durchgehen der Maschine zu sichern, ein Stück des Reglerhubes unausgenutzt lassen, damit der Regler noch kleinere Füllungen geben kann, als dem Leerlauf entspricht. Wegen dieser Verkleinerung des Hubes r wird aber zugleich der Unterschied zwischen der im Betriebe vorkom-

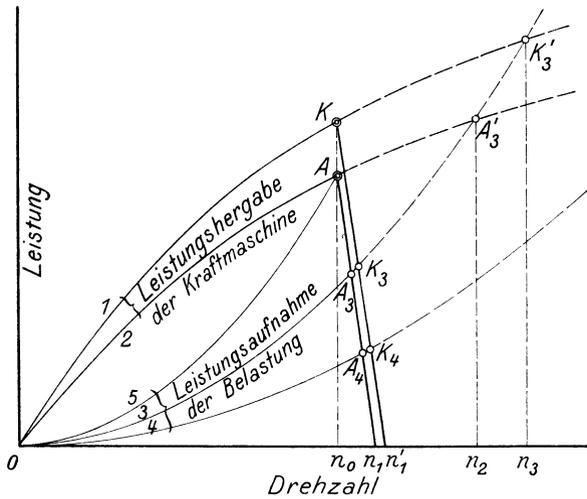


Fig. 298. Abgleich zwischen Kraft- und Arbeitsmaschine auf Grund der beiderseitigen Leistungskennlinie, schematisch.

menden größten und kleinsten Drehzahl, also der Ungleichförmigkeitsgrad verkleinert.

Da andererseits die im Leerlauf erforderliche Füllung φ_0 und daher die nach Gleichung (2) zugeordnete Reglerstellung r verschieden ist, je nachdem die Maschine mit Kondensation oder mit Auspuff läuft und je nachdem wie sie eingesteuert ist, so ergeben sich aus Fig. 296 verschiedene Werte für die Ungleichförmigkeit der Maschinenregelung, im Mittel etwa $120,5 - 113,7 = 6,8$ Uml./min, entsprechend einem Ungleichförmigkeitsgrad $6,8 : 117,1 = 0,058 = 5,8\%$.

Den gesamten Vorgang beim Regeln kann man auch nach Fig. 297 zur Darstellung bringen. Neben der Kennlinie der Regulung ist noch die Leistung der Maschine als abhängig von der Drehzahl gegeben, umgekehrt wie es in Kap. III mehrfach geschah. Wir bezeichnen die Beziehung $N_e = f(n)$ im geregelten Bereich als die *Reglungskennlinie des Maschinensatzes*. Kommt die Maschine in Gang, so sitzt der Regler

unten auf, $r = 0$. Das Drehmoment ist — bei einer Kolbendampfmaschine, d. i. einem Langsamläufer, § 4 — annähernd konstant, die Leistung nimmt also, solange der Regler aufsitzt, mit der Drehzahl zu. Bei $n = 113,7/\text{min}$ beginnt der Regler sich zu heben, die umgesetzte Leistung senkt sich so lange, bis sie der abgenommenen gleich ist und damit die Beschleunigung zu Ende ist; ist der Maschinensatz bei Auspuff unbelastet, so steigt die Drehzahl bis auf $120,5/\text{min}$, der Muffenhub bis auf 48 mm . Nur der starke Teil der Muffenhubkurve wird ausgenutzt. Die Werte $r > 48 \text{ mm}$ bleiben unbenutzt als Sicherheitshub; sie würden zur Geltung kommen, wenn man die Maschine mit negativem N_{ei} laufen ließe, der Dynamo als einem Motor Strom zuführte; im

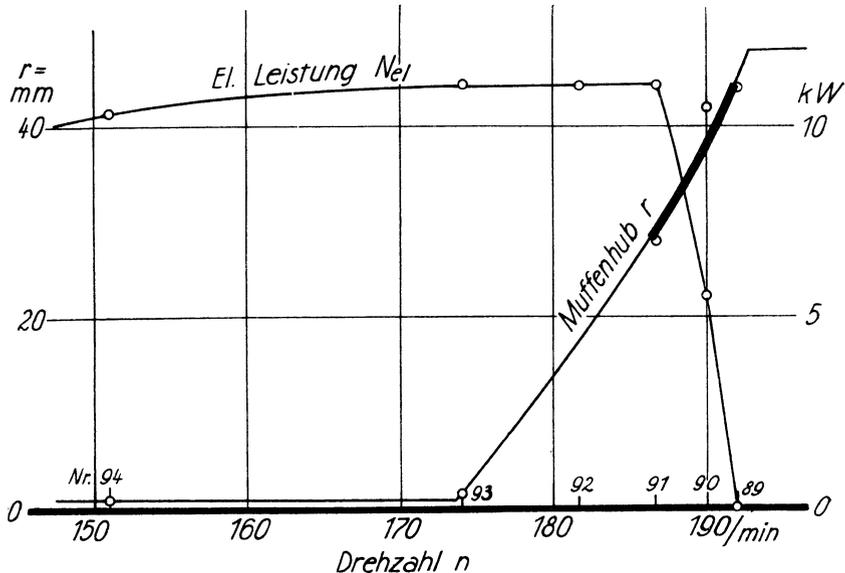


Fig. 299. Kennlinie des Reglers und zugehörige Reglungskennlinie des Maschinensatzes. (Für eine Gasdynamo nach Fig. 311.)

Parallelarbeiten mit anderen Stromquellen ist dieser Zustand durch einfache Verminderung der Erregung zu erzielen.

In dieser Darstellungsart gibt Fig. 298 schematisch die Abgleichung des treibenden und des belastenden Drehmomentes gegeneinander, von der in § 156 am Schluß die Rede war. Die Kurven 1 und 2 sind Leistungsparabeln (§ 4) der noch nicht unter der Herrschaft des Reglers stehenden Maschine, und zwar bei Kondensations- und bei Auspuffbetrieb. Sind verschiedene Belastungen durch die Parabeln 3, 4 und 5 gekennzeichnet, so kommen wir auf die Schnittpunkte A , A'_3 , K'_3 und andere, die die Drehzahl der Abgleichung festlegen. Nun kommt aber bei der Drehzahl n_0 der Regler ins Spielen; daher geht die Leistung nicht über A (bei Auspuff-) oder K (bei Kondensationsbetrieb) hinaus, sondern senkt sich nach den beiden rechts abfallenden Geraden, und für die Widerstände 3 und 4 findet die Abgleichung bei den Dreh-

zahlen statt, die durch A_3, A_4, K_3, K_4 festgelegt sind. Bei Leerlauf werden die Drehzahlen n_1 und n'_1 erreicht. Die Höchstleistung der Maschine aber ist stets durch diejenige Drehzahl n_0 gegeben, bei der der Regler anspielt, und die Belastung nach Kurve 5 ist für Auspuffbetrieb nach Kurve 2 die höchste für die Maschine zulässige.

Fig. 299 gibt dieselbe Darstellung für eine Gasmaschine, deren eigenartige Regelverhältnisse noch in § 164 besprochen werden. Hier bleibt sowohl oben als auch unten ein Stück des Muffenhubes r unbenutzt.

158. Beeinflussung von Drehzahl und Ungleichförmigkeit. Wir bedienen uns folgender *Versuchseinrichtung*: An einem durch die Muffenbewegung in hin oder her gehende Drehung versetzten Teil sind verschiebbare oder nach der Größe wechselnde Belastungen in verschiedener Lage zur Drehachse angebracht, und zwar einmal rechts und links von der Drehachse, ein zweites Mal über oder unter derselben.

In Fig. 300 dient dem ersteren Zweck das Laufgewicht, das auf der Regelwelle zur Veränderung der Drehzahl schon konstruktiv vorgesehen ist; es kann durch Drehung eines Handrades mit Schraubenspindel auf einer Gleitbahn verstellbar werden, die bei mittlerer Reglerstellung wagerecht liegt; man kann also das Gewicht nach rechts oder links bringen und übt damit ein positives oder negatives Moment auf die Regelwelle, also einen aufwärts oder abwärts gehenden Druck auf die Reglermuffe aus; diese Momente bzw. diese

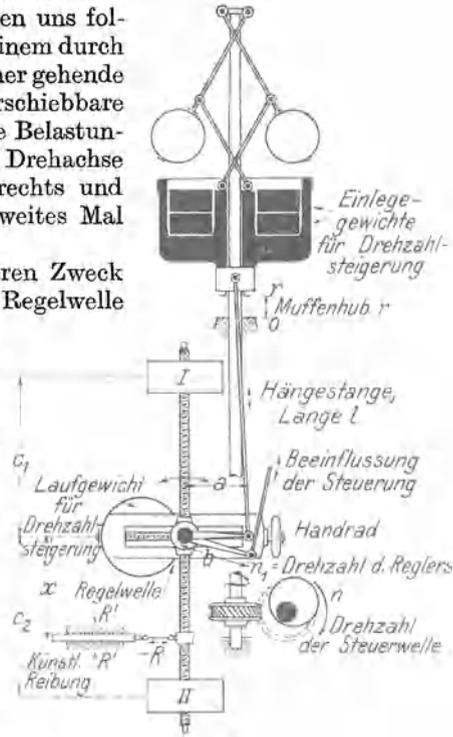


Fig. 300. Fliehkraftregler mit Verstellbarkeit der Drehzahl, der Trägheit, der Ungleichförmigkeit und der Dämpfung.

Kräfte lassen sich durch Verstellen des Gewichtes auf wechselnde Werte bringen, sie ändern aber den Wert kaum, wenn der Regler beim Steigen und Sinken die Regelwelle um einen gewissen (mäßigen) Winkel verdreht.

Außer diesem Gewicht ist in Fig. 300 noch besonders für Versuchszwecke mit der Regelwelle eine Spindel verbunden, auf der sich Gewichte I und II in bestimmtem Abstand über oder unter der Regelwelle anbringen lassen. Diese Gewichte üben dann gar keine Wirkung auf die Regelwelle und den Regler aus, wenn die Spindel genau senkrecht steht; das sei der Fall bei einer mittleren Stellung der Reglermuffe und der Regelwelle. Bewegt sich aber die Regelwelle, so üben die Gewichte schnell zunehmende Momente auf die Regelwelle und schnell zu-

nehmende Kräfte auf die Reglermuffe aus; die Kräfte nehmen von negativen Werten über Null zu positiven, algebraisch gerechnet dauernd zu, und zwar annähernd proportional den Wegen der Reglermuffe, um so schneller, je weiter die Gewichte nach oben oder unten von der Regelwelle entfernt sind.

Die Wirkung der zusätzlichen Gewichte, die einerseits im wagerechten, andererseits im senkrechten Sinne verschoben werden, auf die Regelung untersucht man, indem man durch Auflegen verschiedener Belastungen N_i auf die Maschine den Regler in verschiedene Stellungen r gehen läßt und die zugehörigen Drehzahlen n beobachtet.

Zunächst ist das *wagerechte Laufgewicht* *verstellt* worden; es war 18,15 kg schwer, wurde von seiner Normalstellung links um 0,1 m und dann um 0,2 m (ganz nach rechts) *verstellt*; der Arm der Regel-

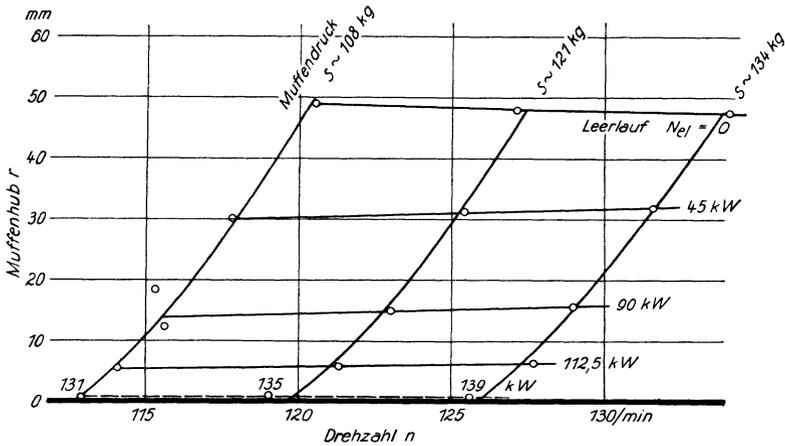


Fig. 301. Verstellung des wagerecht laufenden Gewichtes der Fig. 300: Änderung der Maschinendrehzahl.

welle, an dem die Muffenkraft anfaßte, war im Mittel 0,141 m. Daher übte die Verschiebung des Gewichtes zusätzliche Kräfte von $18,15 \cdot \frac{0,1}{0,141} = 12,9$ kg bzw. $18,15 \cdot \frac{0,2}{0,141} = 25,8$ kg auf die Muffe aus. Wurde nun die Leistung verändert, so ergaben sich Ablesungen nach Maßgabe von Fig. 301. In den beiden Endstellungen und in der Mittelstellung ergeben sich die drei ansteigenden, einander parallelen Kennlinien. Tabelle 97 gibt die zugehörigen Ablesungswerte.

Die wagerechte Verschiebung des Laufgewichtes läßt also die Kennlinie der Regelung eine Wanderung nach rechts machen, ohne sie zu drehen; sie beeinflusst die Drehzahl, nicht aber die Ungleichförmigkeit der Regelung. — Beachtenswert ist der Verlauf der Kurven gleicher Nutzleistung N_{el} des Dampfdynamosatzes. Gleicher Leistung entspricht bei höherer Drehzahl ein kleineres Drehmoment, also ist eine höhere Reglerstellung zu erwarten. Das ist auch bei allen Belastungen der Fall, jedoch nicht bei Leerlauf. Bei Leerlauf sind die Eigenwider-

Tabelle 97. Regelung der Dampfmaschine bei wechselnder Drehzahl.

	Eingeregelt auf		Das Laufgewicht von 18,15 kg ist verschoben um			mm
			0	100	200	
1	$N_{e,t} = 0 \text{ kW}$	Versuch Nr.	1	2	3	
		N_i	33,1	33,0	35,5	kW
		n	120,5	127,3	134,1	/min
		M_i	266	252	257	m kg
		r	49,0	48,1	47,4	mm
2	$N_{e,t} = 45,0 \text{ kW}$	Versuch Nr.	6	5	4	
		N_i	79,1	81,8	81,4	kW
		n	117,8	125,4	131,6	/min
		M_i	654	636	602	m kg
		r	30,1	31,2	32,0	mm
3	$N_{e,t} = 92,7 \text{ kW}$	Versuch Nr.	7	8	9	
		N_i	130,0	128,5	128,9	kW
		n	115,3	123,0	127,9	/min
		M_i	1098 (?)	1016	980	m kg
		r	18,3 (?)	15,1	15,4	mm
4	$N_{e,t} = 116,0 \text{ kW}$	Versuch Nr.	10	11	12	
		N_i	151,0	155,0	153,4	kW
		n	114,1	121,2	127,6	/min
		M_i	1286	1237	1172	m kg
		r	5,4	5,7	6,5	mm
5	$r = 0,5 \text{ mm}$ (Höchstleistung)	Versuch Nr.	15	13	14	
		N_i	161,8	169,6	172,6	kW
		n	113,0	119,0	125,7	/min
		M_i	1390	1389	1338	m kg
		$N_{e,t}$	127,8	132,6	134,9	kW

stände des Satzes maßgebend, die bei höheren Belastungen verdeckt werden. Das Moment der Eigenwiderstände nimmt mit der Drehzahl zu, daher sinkt der Regler im Leerlauf bei wachsender Drehzahl: mehr Dampf ist beim Leerlauf Voraussetzung für schnelleren Lauf der Maschine.

Werden weiterhin die *senkrecht anzubringenden Gewichte* verändert, so ergibt sich ein Bild nach Fig. 302. Einmal war der Regler im normalen Zustand; ein zweites Mal war ein Gewicht I von 20 kg im Abstand 0,3 m unter der Regelwelle angebracht, entsprechend einem zusätzlichen Produkt Kraft \times Arm (letzteren wagerecht gedacht) von $M_z = -6 \text{ m kg}$; ein drittes Mal war ein Gewicht II von 10 kg 0,3 m über der Regelwelle angebracht, $M_z = +3 \text{ m kg}$. Unter dem Einfluß dieser Gewichte erfährt die Kennlinie der Regelung eine Drehung ohne Verschiebung. Sie wird steiler, wenn das Gewicht oberhalb der Regelachse ist, die Regelung nähert sich dann der Astasie; die Kennlinie wird flacher, die Regelung wird stark statisch durch das unter der Regelachse befindliche Gewicht. Die mittlere Drehzahl der Maschine

bleibt, die Ungleichförmigkeit ändert sich. Das untenliegende Gewicht nämlich zieht die Regelwelle stets in die Mittelstellung, es sind daher größere Änderungen der Drehzahl nötig, um sie gleichwohl in die Endstellungen gelangen zu lassen. Das obenliegende Gewicht zieht die Regelung in die Endstellungen, so daß umgekehrt nur kleinere Änderungen der Drehzahl nötig sind, um den Übergang bis in die Endstellungen zu veranlassen. — Über weitere Versuchspunkte der in Fig. 302 dargestellten Versuche wird noch in § 161 berichtet werden. Nur so viel sei schon hier erwähnt: Bringt man beide Gewichte I und II von 10 kg je 0,32 m unter und über der Regelwelle an, so wird weder die Drehzahl noch der Ungleichförmigkeitsgrad der Regelung beeinflusst.

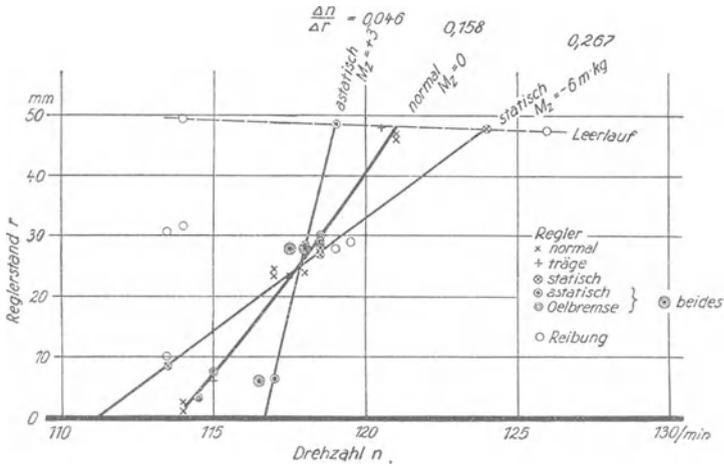


Fig. 302. Verstellung des senkrecht laufenden Gewichtes der Fig. 300: Änderung der Trägheit und Ungleichförmigkeit.

Die Masse des Reglers ist dadurch größer, der *Regler träger* geworden. Die Punkte „träge“ und „normal“ liegen in Fig. 302 dicht beieinander, obwohl die Reglermasse, auf die Reglerhülse bezogen, um $20 \cdot \left(\frac{0,32}{0,141}\right)^2 = 103$ kg Gewicht vermehrt war, während der Regler selbst, ebenso bezogen, eine Masse entsprechend 130 kg Gewicht hat; die Masse als solche (d. h. wenn sie nicht als Gewicht zur Geltung kommt, sondern ausgeglichen ist), hat keinen Einfluß auf das statische Verhalten der Regelung.

159. Wechselwirkung zwischen Steuerung und Regler. Nach den Erfahrungen des vorigen Paragraphen läßt sich ohne weiteres sagen, worin die Abweichungen im Verhalten der Regelung gegenüber dem des Reglers ihre Ursache haben, die in Fig. 296 besprochen wurden. Wir bedienen uns der Fig. 303. Der Regler treibt durch die Hängestange hindurch auf die Regelwelle, als welche die Achse eines Rieder-schiebers gezeichnet ist. Es fragt sich dann, ob die gesamten an der Regelwelle befestigten Gewichte, die vom Regler mitbewegt werden

müssen, vollkommen ausgeglichen sind, so daß also ihr Gesamtschwerpunkt in die Wellenmitte fällt; wenn das nicht der Fall ist, so kommt es darauf an, ob ihr Schwerpunkt rechts oder links, oben oder unten von der Drehachse liegt.

Wären zunächst die Teile der Steuerung hinsichtlich der Einflüsse der Schwerkraft vollkommen ausgeglichen, so kann die Steuerung die Wirksamkeit des Reglers nur insofern beeinflussen, als zu ihrer Verstellung Reibungskräfte zu überwinden sind; das vergrößert also die Unempfindlichkeit der Regelung, sofern nicht der Regler tanzt: die Regelung wird im allgemeinen unempfindlicher sein als der Regler. Eine Verschiebung der Kennlinie wird durch solche in sich völlig ausgeglichene Steuerung nicht eintreten. Über Massenwirkungen (§ 158, 162) brauchen wir hier, wo es sich nur um die Gleichgewichtszustände der Regelung handelt, noch nicht zu sprechen.

Ist die Steuerung nicht ganz in sich ausgeglichen, so übt sie Kräfte auf die Reglermuffe aus, sobald der Regler mit ihr verbunden ist.

Man denke nun ein erstes Mal den Schwerpunkt S aller Steuerungsteile in gleicher Höhe mit der Achse der Regelwelle. Dann ergeben sie, da die Regelwelle nur kleine Ausschläge zu beiden Seiten ihrer Mittellage macht, ein im wesentlichen konstantes Moment an der Regelwelle und eine im wesentlichen konstante Kraft an der Reglermuffe. Je nachdem, ob der Schwerpunkt rechts oder links von der Regelwelle liegt, übt die Steuerung eine konstante Kraft auf die Reglermuffe im Sinne des Anhebens oder im Sinne des Herabsinkens aus, und dementsprechend ist die Fliehkraft der Reglerschwingmassen leichter oder schwerer in der Lage, die Reglermuffe anzuheben. Die Drehzahl, die zu einer bestimmten Muffenstellung gehört, wird also erhöht oder erniedrigt; die Kennlinie wird sich nach rechts oder nach links verschieben, ohne daß sich ihre Neigung (wesentlich) verändert.

Wenn dagegen ein zweites Mal der Schwerpunkt S der Steuerungsteile senkrecht über oder senkrecht unter der Regelwelle liegt, so zwar, daß beim mittleren Hülsenhub gerade die Lage genau oberhalb oder unterhalb der Wellenachse durchgemessen wird, während beim Spiel des Reglers kleine Ausschläge nach beiden Seiten erfolgen, so können in der Mittelstellung die im Schwerpunkt vereinigt gedachten Steuerungsteile eine Einwirkung auf den Regler nicht ausüben, da sie kein Moment in bezug auf die Regelwelle liefern. Aber bei Ausschlägen nach beiden

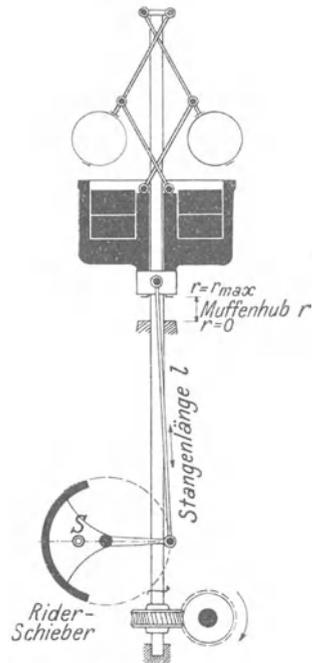


Fig. 303. Statische Rückwirkung der Steuerung auf die Regelung.

Seiten werden Momente auftreten, die (bei kleinen Ausschlägen) etwa den Ausschlägen proportional, positiv oder negativ sind; und zwar wird die Regelwelle stets in die Mittellage zurückgezogen, wenn sich der Schwerpunkt unterhalb der Regelwelle befindet. Es werden dann, während die mittlere Drehzahl unverändert blieb, größere Änderungen der Drehzahl nötig, um einen bestimmten Reglerweg zu erzielen, die Kennlinie der Regelung wird also flacher verlaufen, dabei aber die des Reglers bei halbem Hülsenhub schneiden: die Regelung ist statischer als der Regler. — Umgekehrt nähert sich die Regelung mehr der Astasie als der Regler, die Kennlinie verläuft steiler, wenn sich der Schwerpunkt der Steuerungsteile oberhalb der Reglerachse befindet. Denn dann wollen die beim Ausschlagen aus der Mittellage freiwerdenden Momente den Regler in die eine oder andere seiner Endstellungen ziehen. Die Regelung wird schwächer statisch, als der Regler es ist, oder gar sie wird überastatisch, wenn die Wirkung dieser Kräfte stärker ist als das an sich statische Verhalten des Reglers.

Wir fassen zusammen, daß also eine Erhöhung oder Erniedrigung der Drehzahl unter Aufrechterhaltung der Ungleichförmigkeit dann eintritt, wenn der Schwerpunkt der Steuertriebeteile rechts oder links in gleicher Höhe mit der Regelwelle sich befindet. Es tritt eine Vergrößerung oder Verkleinerung der Ungleichförmigkeit ein, unter Aufrechterhaltung der mittleren Drehzahl, wenn der genannte Schwerpunkt unter oder über der Regelwelle liegt.

Wenn der Schwerpunkt in der Diagonale liegt, so braucht man nur an Stelle dieses Schwerpunkts zwei Teilschwerpunkte in der senkrechten und wagerechten Achse anzunehmen und sieht, daß nun die Kennlinie sowohl in der Neigung als auch in der Drehzahl im einen oder anderen Sinne und in jeder Kombination beeinflußt werden kann.

Außer der auf die Steuerungsteile wirkenden Schwerkraft kann bei Kolbenmaschinen noch der *Rückdruck des Steuerungsgetriebes* das Verhalten des Reglers wesentlich beeinflussen. Manche Steuergetriebe üben bei jedem Umlauf der Welle wechselnde Kräfte auf die Regelwelle aus, die einen ihrer Punkte festhalten oder ihn verstellen soll, um die Füllung zu ändern. Der Rückdruck wechselt in jedem Fall über den ganzen Umlauf der Maschine hin periodisch und bewirkt, wenn die auftretenden Kräfte groß genug sind, um die Unempfindlichkeit der Regelung (nicht: des Reglers) zu überwinden, das *Tanzen des Reglers*, von dem vorher schon die Rede war. Das Tanzen beseitigt die Unempfindlichkeit und ist daher, sofern es sich nicht um zu große Beträge handelt, als vorteilhaft anzusprechen. Aber außerdem ergibt der Rückdruck auch eine Veränderung in der Mittellage des Reglers, denn im allgemeinen ist der über den ganzen Umlauf genommene Integralwert der rückdrückenden Kräfte nicht gerade Null. Je nachdem, ob der Rückdruck den Regler aufwärts oder abwärts zu ziehen sich bestrebt, je nachdem wird die Drehzahl der Maschine erhöht oder erniedrigt. Überdies entsprechen verschiedenen Muffenstellungen, denen ja verschiedene Füllungen, also auch verschiedene Bewegungen des Steuertriebtes zugeordnet sind, im allgemeinen nicht die gleichen

Integralwerte des Rückdruckes: der Rückdruck kann etwa bei hoher Hülsenstellung, im Leerlauf der Maschine, Null sein, beim Herabsinken des Reglers mit wachsender Leistung aber allmählich beträchtliche Werte annehmen. Je nach dem Sinn, in dem der Integralwert des Rückdrucks sich mit der Hülsenstellung verändert, kann auch die Neigung der Kennlinie sich in verschiedenartigster Weise verändern. Auch der Rückdruck kann also die Kennlinie sowohl verschieben als auch sie drehen.

Endlich kommt noch der Einfluß wechselnder Übertragungsarme in dem Stellzeug in Frage, also in der Verbindung zwischen Regler und Steuerung. Wir meinen hier nicht die Möglichkeit einer willkürlichen Längenänderung der Stellzeugorgane, von der § 163, Fig. 320, die Rede sein wird, sondern den Fall, wo die wirksamen (auf die Bewegungsrichtung des Gestänges projizierten) Hebellängen sich während der Hebeldrehungen ändern, denken also an den Einfluß einer *Verschränkung im Getriebe des Stellzeuges*. Solche Verschränkung führt ebenfalls regelmäßig zu einer Veränderung in der Neigung der Kennlinie.

Es ergibt sich aus diesen Überlegungen und aus Fig. 296 die Notwendigkeit, das Verhalten der Regelung im Betriebe wohl zu unterscheiden vom Verhalten des freien Reglers. Es ergeben sich aber auch die Mittel, mit deren Hilfe man auf alle Fälle die Kennlinie nach Lage und Neigung in eine gewünschte Lage zurückbringen kann, wenn sie durch irgendwelche Einflüsse, sei es durch das Gewicht des Steuerstäbchens, sei es durch den Rückdruck oder durch Verschränkung aus der gewünschten Lage gebracht worden ist. Es ist das durch Anbringung passender Gewichte ober- oder unterhalb, rechts oder links von der Steuerwelle möglich — auch wohl durch Federn.

160. Arbeitsvermögen des Reglers und der Regelung. Um das Arbeitsvermögen des Reglers zu bestimmen, wird die Kraft S , die an der Muffe aufzuwenden ist, um den Regler anzuheben, in ihrer Abhängigkeit vom Hub r der Muffe gemessen; letzterer kann zweckmäßig von der Ruhelage an gemessen werden, die durch einen Anschlag der Muffe bestimmt zu sein pflegt.

Wir fassen die Reglermuffe mittels eines Umführungsgestänges mit dem Kranhaken unter Zwischenschaltung einer passenden Federwage und können durch vorsichtiges Anziehen des Hakens die Reglermuffe allmählich heben und zueinandergehörige Werte des Hubes und des Muffendruckes ermitteln. Meist wird es genauer sein, die Reglermuffe gegen eine Brückenwage abzuklotzen und wieder die zum Heben der Muffe erforderlichen Kräfte durch Auswiegen festzustellen. In beiden Fällen bringt die Reibung einen Fehler in die Messung, den man am einfachsten unschädlich macht, indem man zueinandergehörige Werte von oben und von unten kommend nimmt und deren Mittel für den reibungsfrei gedachten Regler gelten läßt.

Das Ergebnis einer solchen *Auswiegung des Muffendruckes* des Reglers allein zeigt Fig. 304 unter dem Kennwort: Stillstand, $n = 0$. Die Punkte für Aufwärts- und Abwärtsgang sind eingetragen, die Mittelwerte graphisch gebildet, sie zeigen den Verlauf des Muffen-

druckes S als abhängig vom Muffenhub r . Der Muffendruck ist nicht bei jedem Regler so annähernd konstant wie in Fig. 304.

Das Diagramm Fig. 304 stellt die Wege der Muffe als abhängig von den zum Bewegen erforderlichen Kräften dar; so bedeutet also die unter der Muffendruckkurve liegende Fläche die Arbeit, die aufzuwenden ist, um die Muffe zu verstellen. Diese Arbeit, die wir beim Versuch von außen zuführen, um das belastende Gewicht zu heben (bei Gewichtsreglern) oder die Feder zu spannen (bei Federreglern), wird im Betriebe durch die Fliehkraft der Schwungmassen hergegeben, er gibt also ein Maß für den im Regler stattfindenden Energieumsatz. Die durch

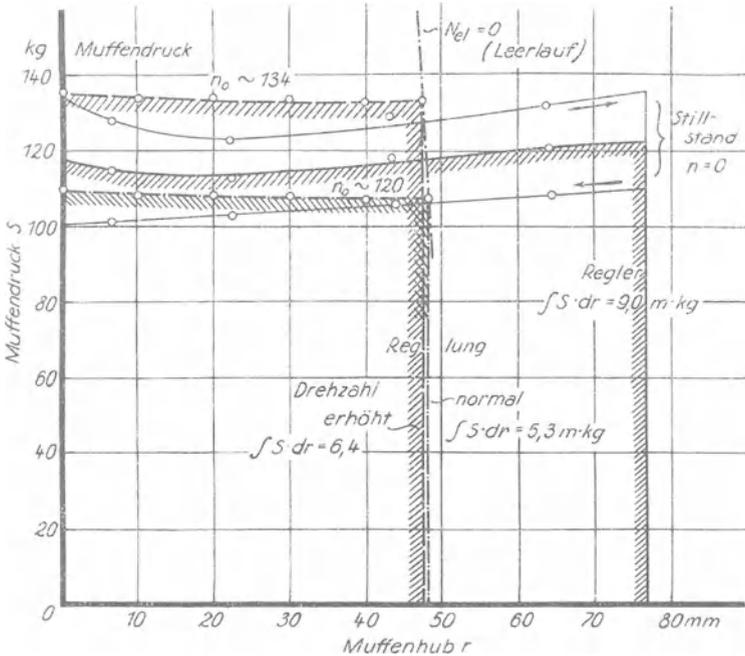


Fig. 304. Arbeitsvermögen des Reglers und der Regelung.

Planimetrieren zu findende Fläche ist das *Arbeitsvermögen* (besser: der *Arbeitsumsatz*) des Reglers. In Fig. 304 findet sich das Arbeitsvermögen

$$\mathcal{A} = \int S \cdot dr = 9,0 \text{ m} \cdot \text{kg} \dots \dots \dots (9)$$

Das Arbeitsvermögen ist der Maßstab für die Größe des Reglers. Im Betriebe muß der Regler die der Verstellung der Steuerungsteile widerstehenden Reibungskräfte überwinden. Er wird sich trotz dieser zu leistenden äußeren Arbeit — zu der übrigens noch immer die durch die Unempfindlichkeit gegebene Reibung im Regler selbst tritt — um so genauer in die durch seine Kennlinie bestimmte Sollstellung begeben, je größer der Arbeitsumsatz im Innern des Reglers ist, je weniger also die außen zu leistenden Arbeiten ihn zu stören vermögen. Dabei ist es

für das saubere Arbeiten grundsätzlich belanglos, ob kleine Muffendrucke auf großen Wegen oder große Drucke auf kleinen Wegen übertragen werden, da man die Wege durch passende Anordnung des Hebelwerkes zur Steuerung entsprechend ändern kann.

Die Regelung nutzt nach Maßgabe von Fig. 297 den oberen Teil des Muffenhubes nicht aus. Dazu kommt, daß durch den Anbau der Maschinensteuerung an den Regler dessen Drehzahl verringert wird, das heißt auch die Arbeitshergabe der Fliehkraft beim Ausschlagen der Pendel und daher das Arbeitsvermögen. Aus beiden Gründen ist das *Arbeitsvermögen der Regelung* kleiner als das des Reglers. Es wird für die Regelung durch die links schraffierte Fläche gegeben, die die Anschrift $n \sim 120$ trägt, und beträgt 5,3 m kg. — Wenn man jedoch durch Verschieben des wagerecht laufenden Gewichts (Fig. 300) in seine andere Endstellung die Drehzahl auf $n \sim 134/\text{min}$ vergrößert, vergleiche Fig. 301, so steigt der Muffendruck, weil das Gewicht die Muffe zusätzlich belastet; der ausgenutzte Hub wird (unwesentlich) kleiner. Das Arbeitsvermögen ist nun durch Planimetrieren zu 6,4 mkg zu finden.

Die Muffendrucke der Fig. 304 sind sämtlich durch Auswiegen der ruhenden Regelung gefunden. Man kann sie auch *im Gang der Maschine durch Ändern der Drehzahl* finden. Einerseits müssen sich die umgesetzten Arbeiten der Fliehkraft wie die Quadrate der Drehzahlen verhalten, andererseits ist der Unterschied der Arbeitsvermögen in zwei Zuständen des Reglers einfach durch die Arbeit des verschobenen oder hinzugefügten Gewichtes gegeben. Die hiernach nötigen Zahlen sind sämtlich bekannt oder meßbar. Es ist in den beiden mit 1 und 2 zu bezeichnenden Zuständen:

$$A_1 : A_2 = 120^2 : 134^2 \quad (10)$$

Andererseits ist das Laufgewicht 18,15 kg bei der Drehzahlerhöhung um 0,2 m verschoben worden und hat beim ausgenutzten Reglerhub eine Bewegung vollführt, die dadurch festliegt, daß die Muffenbewegung von $\sim 0,047$ m am Arm 0,141 m die Regelwelle erfaßt, auf der doch auch das Laufgewicht sitzt. Unter Vernachlässigung der Bogenform ändert das Laufgewicht seinen Weg also um $0,047 \cdot \frac{0,2}{0,141} = 0,067$ m, und nun ist

$$A_2 - A_1 = 18,15 \cdot 0,067 = 1,22 \text{ m kg} \quad (11)$$

Aus (10) und (11) ist zu errechnen:

$$A_1 = 4,9 \text{ m kg bei } n = 120/\text{min}$$

$$A_2 = 6,1 \text{ m kg bei } n = 134/\text{min},$$

beides etwas kleiner als die Ergebnisse der Wägung; die Einführung der Drehzahl ist offenbar zu ungenau, zumal in der Differenz.

161. Dynamisches Verhalten der Regelung. Alles bisher Gesagte bezog sich auf die Frage, wie sich die verschiedenen auf die Regelung bezüglichen Größen gegeneinander unter dem Einfluß des Reglers einstellen. Wir wenden uns nun der Frage zu, in welcher Weise der Regler den Übergang von einer Einstellung auf eine andere vollzieht, und halten

uns dabei sogleich an das konkrete Beispiel, nämlich eine weitere Versuchsreihe an der gleichen Maschine.

An die Maschine wird angebaut ein Tachograph (Techn. Mess. § 39), der die Drehzahl der Maschine als abhängig von der Zeit auf einen Papierstreifen verschieden einstellbarer Geschwindigkeit aufschreibt. Der Tachograph hat noch einen zweiten Schreiber, der die Aufzeichnung des Hülsenhubes übernimmt. In irgendwelcher Weise wird dazu die Reglermuffe durch Draht oder Schnurtrieb möglichst starr mit jenem zweiten Schreiber verbunden. So werden die Werte r und n als abhängig von der Zeit — genauer: abhängig vom Weg der Maschinenkurbel — aufgetragen. Man erhält *Tachogrammstreifen*, von denen ein normaler in Fig. 305 (auf Tafel I) dargestellt ist. Die Kurve der Muffenhube und die der Drehzahlen waren in Wahrheit durcheinanderlaufend (auf einem Streifen) aufgenommen und sind nachher auseinandergezeichnet.

Bei diesem und den späteren Streifen wurde die Belastung der Maschine von halber Last auf volle gesteigert, dann wurde auf halbe Last und weiterhin auf Leerlauf zurückgegangen, zum Schluß wieder auf halbe Last übergegangen. Die Maschine lief so zwischen den einzelnen Versuchen gleichmäßig mit halber Last. Dadurch wurde für gleichmäßige Erwärmung der Zylinder unter Vermeidung übermäßigen Dampfverbrauchs gesorgt, auch blieb der Kessel gut konstant belastet — Maßnahmen, die bei Ausführung solcher Versuche sehr wesentlich sind. Ebenso konstant belastet bleibt der Wasserwiderstand, auf den die Dynamo arbeitet; er bestand aus zwei Teilen, die so abgeglichen wurden, daß jeder halbe Last darstellt; da aber jeder durch Einlegen oder Herausreißen eines Schalters an- und abgeschaltet werden kann, so ist sprunghaft der Übergang auf die schon genannten Lasten $1/2 - 1 - 1/2 - 0 - 1/2$ möglich.

Zunächst war die *Reglung* vollständig *normal*, Fig. 305. Jeder Übergang von einer Belastung auf die nächste veranlaßt n und r , die ihr gemäß Fig. 297 und 301 zukommenden neuen Werte anzunehmen; die Plötzlichkeit des Übergangs löst Schwingungen aus, die genug gedämpft und gering genug sind, um zu Bedenken keinen Anlaß zu geben.

Im einzelnen läßt sich folgendes bemerken: Besonders beim Übergang auf den Leerlauf sieht man, wie die Drehzahl mit der Belastungsänderung augenblicklich und in scharfem Winkel zu steigen beginnt; der Regler hingegen beginnt seine Bewegung nur allmählich und im Bogen. Für den Regler nämlich ist die treibende Kraft die Abweichung der wirklichen Drehzahl n von der seiner augenblicklichen Stellung r zugeordneten n_r ; es gilt

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{A_1 (n - n_r)}{m_r} \dots \dots \dots (12)$$

wenn m_r die Masse aller an der Bewegung der Reglermuffe teilnehmenden Teile bezogen auf die Muffenbewegung ist und A_1 diejenige Richtkraft, die an der Muffe wachgerufen wird, wenn der Regler eine Um-

drehung mehr macht, als seiner augenblicklichen Stellung entspricht. Proportionales Anwachsen der Richtkraft ist vorausgesetzt und in engen Grenzen vorhanden.

Das Wandern des Reglers hat also vorgängiges Entstehen der Richtkraft zur Voraussetzung, und daher eilt die Kurve der Reglerstellung derjenigen der Drehzahl von Anfang an und dauernd weiter um $\frac{1}{4}$ Periode nach. Die Drehzahl ihrerseits gehorcht dem Beschleunigungsgesetz

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_1 \cdot (r - r_n)}{J} \dots \dots \dots (13)$$

worin $\omega = \frac{n}{9,55}$ die Winkelgeschwindigkeit, J das Trägheitsmoment der umlaufenden Maschinenteile ist, r die wirkliche und r_n die der augenblicklichen Drehzahl zugeordnete Reglerstellung, endlich M_1 derjenige Zuwachs an treibendem Moment, der dem Steigen des Reglers um die Einheit entspricht; vorausgesetzt ist hierbei freilich, daß das belastende Moment von der Drehzahl unabhängig ist, daß also der Maschinensatz keine Selbstregelung (§ 165) besitzt.

.Die Kurven der n und der r sind also einander zugeordnete, um $\frac{1}{4}$ Periode gegeneinander verschobene gedämpfte sinusartige Kurven. Dabei ist bei beiden die Sinusform unrein; bei der n -Kurve ist sie ins Spitze verzerrt, bei der r -Kurve umgekehrt sind die größten Ausschläge breitgedrückt. Wir werden das später (§ 162) als eine Folge der Reglerreibung erkennen.

Die Schwingungen sind nach Amplitude und Anzahl am stärksten beim Übergang auf Leerlauf; kaum vorhanden sind sie beim Übergang auf Vollast. Zum Teil mag bei voller Last die Reglerbewegung durch Anstoßen an die Hubbegrenzungen zum Vorteil des Vorganges abgefangen worden sein. Vor allem aber kommt bei hoher Belastung die *Selbstregelung* des Maschinensatzes der Wirksamkeit der Regelung zu Hilfe. Unter der Selbstregelung versteht man die Eigenschaft des belasteten Maschinensatzes, daß mit wachsender Drehzahl die Leistungsaufnahme der Belastung (Kurve 3, 4, 5 in Fig. 298) schneller zunimmt als die Leistungshergabe der Maschine (Kurve 1, 2). Je mehr sich also die Tangenten der beiden in Fig. 298 zur Abgleichung kommenden Kurven in der Richtungskonstanten unterscheiden, desto größer ist die Selbstregelung. Ist ein Dynamosatz mit Ohmschen Widerständen — z. B. Glühlampen — belastet, so wächst mit der Maschinendrehzahl proportional die Spannung, damit zugleich und proportional die Stromstärke; die in den äußeren Widerstand gehende Leistung nimmt also quadratisch mit der Drehzahl zu, und wenn die Leistung der Kraftmaschine durch eine Leistungsparabel nach § 4 festgelegt ist, so hat der Maschinensatz Selbstregelung. Viel stärker ist die Selbstregelung, wenn die Dynamo mit einer starken Batterie oder mit anderen starken Dynamos parallel läuft. —

Ein bemerkenswertes Ergebnis hat noch folgende Konstruktion in Fig. 305. Wir verlängern durch die Schwingungen hindurch die neuen Sollwerte von n und r nach vorn und erhalten dadurch die Punkte A

und B . A projizieren wir senkrecht herab in die r -Kurve, B senkrecht herauf in die n -Kurve. In A hatte die Drehzahl ihren neuen Sollwert erreicht; dort hätte also der ganze Regelvorgang beendet sein können, wenn nur der Regler in seiner neuen Sollstellung und in Ruhe sich befunden hätte: A_1 ist die *notwendige Änderung der Drehzahl*. Nun ist aber zur Zeit von A der Regler noch kaum aus seiner alten Stellung verschoben; seine Trägheit also bewirkt, daß noch fast die frühere Aufnahme statthat und daher die Drehzahl sich weiter verändert: die *Trägheit des Reglers* bewirkt sein Nachhinken und daher ein Überregeln. In B aber ist die neu zu erwartende Reglerstellung und daher die neu zu erwartende Aufnahme erreicht und damit der äußere Anlaß zum weiteren Steigen der Drehzahl benommen. Trotzdem sehen wir die Drehzahl noch ein wenig über B hinaus sich verändern. Das ist nur möglich, weil der Aufnehmer der Maschine einen Energiespeicher bildet, dessen Druck sich erst nach Maßgabe der Abnahme durch den NDZ auf den neuen Druck einstellt. Zur Zeit B erhält also wohl der HDZ die dem neuen Zustand entsprechende Energie, der NDZ aber noch nicht ganz; letzterer also veranlaßt die Drehzahl, sich auch hinter B noch etwas im gleichen Sinne zu verändern. Wir erkennen also in A_2 die Überreglung infolge der Reglerträgheit, und in A_3 diejenige infolge der *Speicherwirkung des Aufnehmers*.

Da solche Speicherwirkung in einer Gasmaschine nicht vorhanden ist, so zeigen deren Regelungsdiagramme das Überregeln A_3 nicht, siehe später Fig. 312.

162. Einfluß der Reglereigenschaften auf den Regelvorgang. Das Regeldiagramm Fig. 305 soll als normal den folgenden Vergleichen zugrunde gelegt werden, weil es gute Regelungsverhältnisse zeigt, und weil die Regelung der in Frage kommenden Maschine nun einmal so abgestimmt war. Es ist in Fig. 306 zunächst noch einmal, und zwar auf langsamer ablaufendem Papierband dargestellt, um für den Vergleich mit den folgenden Diagrammen denselben Maßstab zu haben.

Dem sind entgegengestellt zunächst in Fig. 307 bis 309, Tafel I, einige Diagramme mit *abweichenden statischen und dynamischen Eigenschaften des Reglers*, und in Fig. 313 bis 317, Tafel II, einige mit verschiedenen Dämpfungsverhältnissen.

In Fig. 307 sind zunächst je 0,32 m über und unter der Regelwelle je ein Gewicht von 10 kg angebracht, die nach § 158, auf die Reglermuffe bezogen, einen Zuwachs der Reglermasse um 103 kg bedeuten, während die eigentliche Reglermasse mit 130 kg Gewicht anzusetzen war; die Vermehrung ist also bedeutend. Diese *Vermehrung der Masse* hatte z. B. die Wirkung, daß das Tanzen des Reglers erheblich eingeschränkt wird, Fig. 310, b gegen a . Die statischen Verhältnisse aber werden nicht beeinflusst, Fig. 302. Auch für den Regelvorgang ist die bedeutende Vermehrung der Masse fast belanglos, wie Fig. 307 im Vergleich zu Fig. 306 zeigt: die Schwingungen von r und n verlaufen zwar etwas langsamer, aber doch charakteristisch ähnlich wie in Fig. 306. — Hieraus ziehen wir vor allem den Schluß, wenn im folgenden hier und da durch Anbauten auch die Masse der Regelung beeinflusst wird, doch

diese Veränderung für die zu beobachtenden Erscheinungen belanglos sei.

Die Regelung, gleich, ob mit normaler oder mit vergrößerter Trägheit arbeitend, hat einen Ungleichförmigkeitsgrad von 5,7%, wie aus § 158, Fig. 302 ersichtlich. Es wurde nun der *Ungleichförmigkeitsgrad* einmal *vergrößert*, ein zweites Mal *verkleinert*. Das wurde, wie auch aus § 158 bekannt, durch Anbringen eines Gewichtes unterhalb bzw. oberhalb der Reglerwelle erreicht. Fig. 308 zeigt das Tachogramm des stärker statischen Reglers bei den vier Belastungssprüngen, Fig. 309

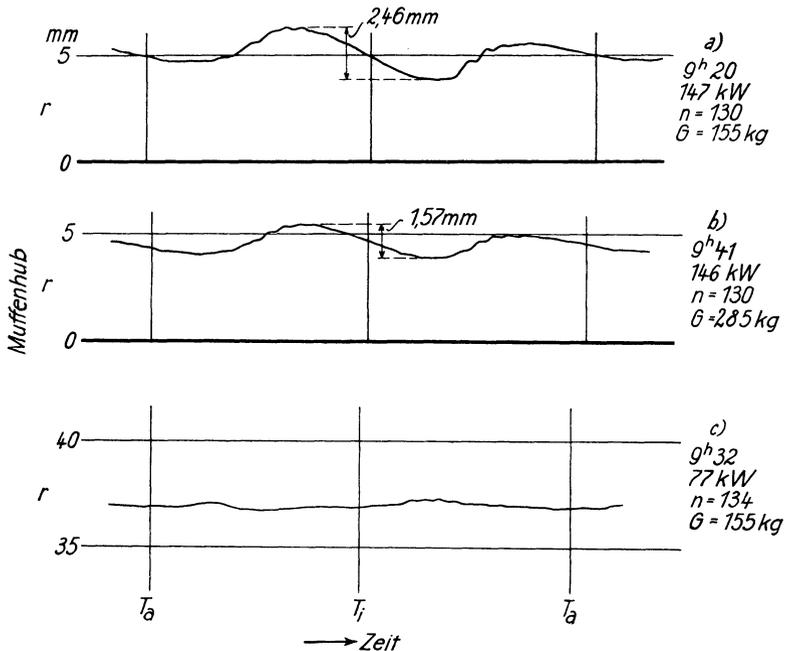


Fig. 310. Dynamische Rückwirkung der Steuerung auf den Regler (Kurven des Reglertanzes durch Rückdruck). a) und b) Verschiedene Reglermasse, entsprechend dem Gewicht G . c) Kleinere Belastung der Maschine.

dasselbe für den weniger statischen Regler. Die Endwerte von Drehzahl und Hülsenhub sind schon in Fig. 302 benutzt.

Was das Verhalten bei Belastungssprüngen anbelangt so bewirkt der stärker statische Regler zwar auch die Einregelung gut, sogar besser als der normale insofern, als die auftretenden Schwingungen noch schneller abklingen.

Unzuträglichkeiten hingegen ergeben sich, wenn der Regler ganz wenig statisch gemacht ist. Obwohl die Astasie auch bei dem letzten Diagramm Fig. 309 durchaus nicht ganz erreicht ist, so zeigen sich doch bei den Belastungssprüngen stärkere Schwingungen; beim Übergang auf halbe oder volle Last sind sie zwar immerhin noch gedämpft; beim Übergang auf Leerlauf aber kommen die Schwingungen nicht nur nicht

mehr zur Ruhe, sondern die Amplituden vergrößern sich sogar langsam; kurzes Anhalten der Hand läßt sie dann an der gekennzeichneten Stelle zur Ruhe kommen. Das schlechte Regeln im Leerlauf hat im Fehlen der Selbstreglung der Dynamomaschine seine Ursache.

An sich aber wäre es das Ideal einer Regelung, daß die Maschine bei allen Belastungen die gleiche Drehzahl machte, daß also die Regelung mit dem Ungleichförmigkeitsgrad Null arbeiten, astatisch sein könnte. Die Diagramme lassen jedoch erkennen, daß ein Regler bei Belastungssprüngen unbrauchbar ist, sofern er sich der Astatic zu sehr nähert. Dagegen ist es zwecklos, den Ungleichförmigkeitsgrad allzu weit zu steigern, da dann eine wesentliche Verminderung der Schwingungen doch nicht mehr erreicht wird, andererseits aber die Abhängigkeit der Drehzahl von der Belastung unnütz stark wird.

Stehen die beiden Gesichtspunkte: möglichst geringer Abfall der Drehzahl von Leerlauf bis Vollast, andererseits Vermeidung allzu großer Schwingungen bei Belastungssprüngen, einander gegenüber, so wird man die Folgerung aus den besprochenen Versuchen ziehen dürfen, man soll den Ungleichförmigkeitsgrad der Regelung so stark verkleinern, daß die Schwingungen bei Belastungssprüngen, insbesondere bei Übergang auf Leerlauf noch gerade zu ertragen sind. Man sieht, daß bei der untersuchten Regelung im normalen Zustand beide Gesichtspunkte gut gegeneinander abgeglichen sind. Eine Ungleichförmigkeit von 5,7% erweist sich in diesem Fall als geeignet.

Daß man unter anderen Verhältnissen mit viel kleinerem Ungleichförmigkeitsgrad auskommt, zeigt die Regelung einer Gasmaschine, die in Fig. 311 schematisch dargestellt ist und deren Reglungskennlinie schon in Fig. 299 gegeben war. Da dort nur ein Ungleichförmigkeitsgrad von 2,7% ausgenutzt wurde, so könnte man erwarten, daß bei Belastungssprüngen unzuträgliche Schwingungen auftreten. In Fig. 312 sind die Regeldiagramme gegeben. Obwohl der Belastungssprung diesmal immer zwischen Voll und Leer ging und die halbe Last ausgelassen worden war, sind die Schwingungen doch durchaus erträglich; der veränderte Maßstab der Drehzahlen gegenüber Fig. 306 ist nämlich zu beachten. Die Schwankungen, selbst beim Übergang von Voll auf Leer bleiben bei der Gasmaschine auf etwa $\pm 2\%$, während sie bei der Dampfmaschine beim Übergang von Voll auf Halb etwa ebensoviel, beim Übergang von Halb auf Leer aber etwa $\pm 4\%$ des zu

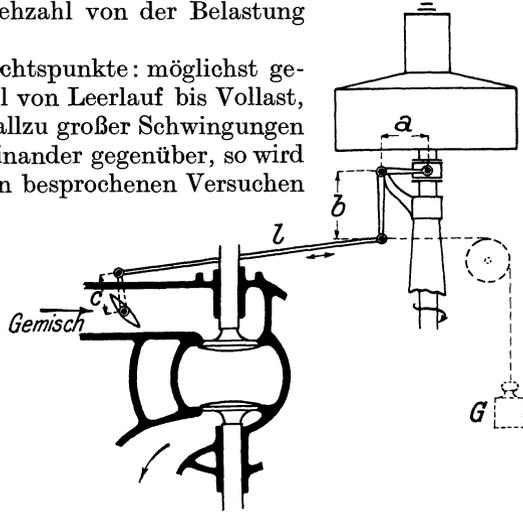


Fig. 311. Regelung einer Gasmaschine mit Drosselklappe als passivem Regelorgan.

erwartenden Endwertes betragen. Der Grund ist in der geringeren bei der Gasmaschine zu überwindenden Reibung zu suchen; es ist nur eine einfache Drosselklappe zu drehen, Fig. 311, die überdies bei Gas nicht nach außen sonderlich dicht zu sein braucht, also keiner Stopfbüchse bedarf. Daher ist die vom Regler zu leistende Verstellarbeit nur klein. Daß aber der Einfluß einer in der Regelung vorhandenen Reibung in diesem Sinne liegt, werden wir sogleich sehen.

Nun wieder an der Regelung der Dampfmaschine wird der *Einfluß verschiedener Dämpfungsverhältnisse* durch die Diagrammreihe Fig 313 bis 317, Tafel II belegt. Die Dämpfung wird einmal durch eine mechanische Reibung, ein zweites Mal durch eine eigentliche (molekulare) Dämpfung mittels einstellbarer Ölbremse erzeugt.

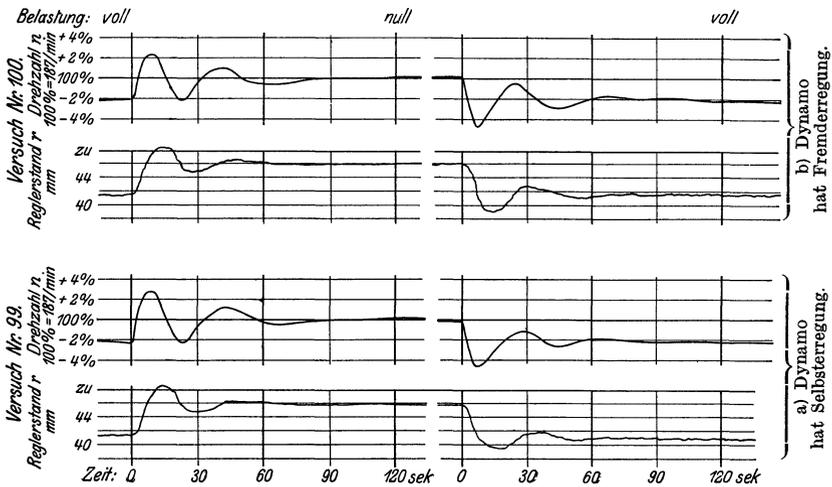


Fig. 312. Regelungsvorgang in einer Gasdynamo. $\frac{1}{3}$ nat. Gr.

Zu dem Zweck kann man künstlich eine Reibung erzeugen mit Hilfe der in Fig. 300 bereits schematisch angedeuteten Vorrichtung. Zwei Backen pressen mit der Kraft R' gegen eine Platte, die bei Bewegungen der Regelwelle zwischen ihnen hin und her bewegt wird. Die Pressung R' bedingt Kräfte R , die sich, stets der erstrebten Bewegung entgegengesetzt, aber der Größe nach von ihr unabhängig, jeder Regelbewegung entgegensetzen. Da R im Abstände x von der Regelwelle angreift, so erfährt die Regelwelle Momente $-R x$, die Reglermuffe aber Kräfte $-\frac{R x}{a}$, die bei jeder erstrebten Bewegung überwunden werden müssen.

Der Wert von R kann versuchsweise bestimmt und durch Änderung von R' auf einen passenden Wert gebracht werden. — Etwas einfacher, aber weniger gut definiert wird die Versuchseinrichtung, wenn man auf die Regelwelle oder auf eine mit ihr verbundene Scheibe oder auch einfach an die Hängestange hölzerne Klemmbacken bringt, die sich nach Bedarf anziehen lassen und die an der Bewegung gehindert

werden. Das Ganze entspricht dann durchaus einem Bremszaum (Techn. Mess. § 76); wie bei jenem ist eine federnde Klemmung für das gleichmäßige Arbeiten empfehlenswert. Dagegen dürfen die die Reibungskräfte aufnehmenden und übertragenden Bauteile nicht gegen die Bewegung elastisch sein; wenigstens war das bei den nun zu besprechenden Versuchen nicht der Fall, und man findet andere Ergebnisse, wenn solche Federung vorhanden ist.

Statt der künstlichen Reibung kann eine hydraulische Dämpfung angebracht werden; dazu tritt eine Ölbremse an die Stelle des Klemmgetriebes, und diese übt statt der konstanten Kraft R nun eine Kraft $-D = c \cdot w$ aus, worin c eine Konstante ist, die sich wieder versuchsmäßig finden läßt, w aber die Geschwindigkeit des Kolbens im Bremszylinder. c macht man zweckmäßig veränderlich durch Anbringen eines Umlaufes zwischen den beiden Zylinderseiten mit verstellbarem Drosselventil: je enger der Durchgang, desto größer c .

Der grundsätzliche Unterschied zwischen der Dämpfung (im engeren Sinn), wie sie durch die Ölbremse hervorgebracht wird, also durch die Drosselung einer Flüssigkeit in engem Querschnitt, und der mechanischen Reibung (Klemmung) ist also: Die Dämpfung bringt Kräfte hervor ungefähr der Geschwindigkeit proportional. Sie bringt daher nur bei größeren Geschwindigkeiten merklichen Widerstand, kleinen Geschwindigkeiten widersteht sie kaum: Die von ihr ausgeübte Kraft konvergiert zugleich mit der Geschwindigkeit gegen Null.

Die mechanische Reibung dagegen bringt eine Kraft hervor, die im wesentlichen unabhängig von der Geschwindigkeit ist, höchstens daß man ihr vielfach nachsagt, es sei die Reibung der Ruhe größer als die der Bewegung, das heißt, das erste Loslösen der durch Reibung bewirkten Hemmung aus der Ruhelage erfolge gegen einen größeren Widerstand, als er späterhin der Bewegung entgegensteht. Jedenfalls sind die Kräfte auch gegenüber langsamster Bewegung von endlichem Wert. Das führt leicht zu sprunghaft vor sich gehenden Bewegungen. Die Wirkung dieser beiden Arten der Dämpfung sind grundverschieden voneinander, ja in bezug auf die Regelung führen sie zu geradezu entgegengesetzten Resultaten. Bei Beurteilung der Versuchsergebnisse bleibt zu beachten, daß die Regelung schon auf alle Fälle durch Reibung und wohl auch molekular gedämpft ist. Es handelt sich also immer nur um eine künstliche Vergrößerung der Dämpfung.

Den *Einfluß mechanischer Reibung* (Klemmung) zeigt das Diagramm Fig. 313. Der Betrag der Reibung war durch eine Eichung festgelegt worden, indem Gewichte passend an das Geklemme gehängt wurden, bis sie durchzogen. Umrechnung nach den Hebelarmen ergab, daß bei dem Versuch ± 12 kg Reibungskraft auf die Muffe des Reglers ausgeübt wurden. Da nach Fig. 301 der Muffenkraft $121 - 108 = 13$ kg eine Drehzahländerung um etwa 7 min entspricht, so bleibt nach Anbringung unserer Klemmung die Drehzahl um $\pm \frac{12}{13} \cdot 7 = \pm 6,5/\text{min}$ unbestimmt. In der Tat finden wir schon in Fig. 302, daß sich die

Punkte mit Reibung in diesen Grenzen vom Sollwert der Reglerkennlinie entfernen.

Das Regeldiagramm Fig. 313 indessen zeigt am deutlichsten beim Übergang auf Leerlauf, daß der Regler in der Tat immer wartet, bis die Drehzahl entsprechend geändert ist, worauf er dann einen Sprung über das Ziel hinaus macht, um in der neuen Stellung zu verharren. Das Diagramm der Reglerbewegung wird daher trapezartig-zickzackförmig. Unter dem Einfluß dieser Reglerbewegung macht die Drehzahl Änderungen durch, die jeweils Teile von Kurven sind, die sich der dem vorübergehend festen Reglerstand zugeordneten Drehzahl asymptotisch nähern würden, machte nicht vorher der Regler einen neuen Sprung. Die Linie der Drehzahlen verläuft also dreieckig-zickzackförmig. Immerhin kommt bei diesem Betrag der Klemmung die Regelung noch von selbst in eine Ruhestellung.

Der *Einfluß molekularer Dämpfung* wird in den Diagrammen Fig. 314 und 315 gezeigt. In einem Vorversuch war der Kolben der Ölbremse mit Gewichten belastet und seine Geschwindigkeit unter ihrer Einwirkung beobachtet worden; dies unter der Annahme quadratischer Änderung und unter Beachtung der Hebellängen auf Muffenkraft umgerechnet, hatte ergeben

für Fig. 314,	1 Umlauf offen:	Muffenkraft	1,03 kg	bei	1 mm/s
„ „	315, $\frac{1}{2}$ „	„	102 „	„	1 „
					Muffengeschwindigkeit.

Die Dämpfung ist also, bei Verwendung sehr dickflüssigen Öles als Umlaufmittel, außerordentlich viel schneller gewachsen, als der gemessene Querschnitt abgenommen hatte.

Die Regeldiagramme sind unter dem Einfluß der Dämpfung sehr schön rein als ein Paar von gedämpften Sinuslinien erhalten worden, die einander als voneinander abgeleitet zugeordnet und daher um 90° in der Phase gegeneinander verschoben sind. Es zeigt sich also, daß die molekulare Dämpfung die Reinheit der Sinusform fördert. Denn in den normalen Regeldiagrammen Fig. 306 läßt sich ihre Verzerrung unter dem Einfluß der Reibung schon, schwächer als in Fig. 313, aber doch deutlich, erkennen.

Die Amplitude wie die Anzahl der im ganzen ausgeführten Schwingungen wie auch die Schwingungszeit wird durch die Dämpfung merklich vergrößert. Die Ausführung der schon an Fig. 305 erläuterten Zerlegung der gesamten Drehzahländerung zeigt, daß zu der notwendigen Drehzahländerung bis *A* wieder die Überreglung durch Trägheit und diesmal eben auch durch Dämpfung des Reglers tritt, Senkrechte *BC*. Dagegen läßt sich der dritte Teil, das Überregeln durch Speicherwirkung des Aufnehmers, nicht mehr erkennen: gegenüber den jetzt langsamer verlaufenden Regelvorgängen eilt der Aufnehmerdruck nicht mehr sichtlich nach. Bei stärkster Dämpfung, Fig. 315, wird sogar bei der Senkrechten *D* vorzeitig ein Zustand erreicht, wo Reglerstand und Drehzahl einander zugeordnet sind und die Drehzahl daher zu steigen aufhört, obwohl der Regler noch weiter steigt.

Bei der schwächeren Dämpfung ergibt der Übergang von voller auf halbe Last eine Drehzahl-Amplitude bis + 8%, bei der stärksten sogar bis + 12%, während die Regelung im normalen Zustande nur + 2% ergab, Fig. 306. Insoweit bedeutet also die Anbringung und Verstärkung der Dämpfung eine sehr merkliche Verschlechterung der Regelung. Ihre guten Seiten erweist sie in Fig. 316 und 317. Hier ist die Dämpfung einmal zugleich mit der Klemmung von der Größe wie bei Fig. 313, ein zweites Mal am beinahe astatisch gemachten Regler angebracht, der sich in Fig. 309 als mangelhaft erwies und namentlich für den Übergang auf Leerlauf ganz unbrauchbar war. Die Ölbremse verbessert in beiden Fällen die Verhältnisse sichtlich, dämpft insbesondere auch die astatische Regelung beim Übergang auf Leerlauf sicher ab. Aber doch zeigen die Kurven deutlich: Die Verwendung der Ölbremse ist ein Notbehelf, um eine Regelung brauchbar zu machen, wenn sie übermäßige Reibung hat oder wenn, bei nicht mehr zu verringernden Reibungswiderständen, der Regler zu schwach oder zu nahe der Astatie ist. In diesen Fällen schafft die Anbringung einer Ölbremse eine große Besserung; ihre Anbringung verstößt aber gegen die allgemeine Regel beim Beseitigen auch von Maschinenfehlern: es solle nicht ein Fehler durch Gegenwirkung gelähmt, sondern es solle seine Ursache beseitigt werden. Man suche also alle vorhandenen Gelenkreibungen zu vermindern; man untersuche die statischen Verhältnisse der Regelung (nicht nur: des Reglers) und mache sie nach Befund etwas stärker statisch; oder endlich man bringe durch Änderung der Übersetzungshebel zwischen Regler und geregelter Teil (z. B. Steuerung) die Arbeitsfähigkeit des Reglers so voll zur Geltung, wie die Rücksicht auf einen erforderlichen Sicherheitshub es zuläßt. Wenn alles dieses die Regelung nicht zum ruhigen Übergang von einer Belastung zur anderen bringt, so ist das Arbeitsvermögen des Reglers zu gering zur sicheren Beherrschung der Widerstände, und eine Auswechslung des Reglers gegen einen stärkeren ist am Platze.

Andererseits kann man, wo ein Regler reichlich ist, durch Ändern der Hebellängen, also der Beziehung des § 156

$$\varphi = f_2(r) \dots \dots \dots (2)$$

eine Besserung erzielen in dem Sinne, daß man nur ein kleines Stück des Muffenhubes ausnutzt und daher die Ungleichförmigkeit der Regelung verringert, zugunsten gleichmäßiger Drehzahl bei allen Belastungen. Als Beispiel hierfür gaben wir schon die Regelung einer Gasmaschine, deren Verhalten in § 164 genauer erläutert werden soll.

163. Anforderungen an die Regelung. Einfluß des Stellzeuges. Aufgabe der Kraftmaschinenregelung ist es, die Drehzahl der Maschine auf einem Wert festzuhalten, unabhängig von Änderungen der Belastung, unabhängig auch von den unvermeidlichen Änderungen äußerer Bedingungen, wie Schwankungen des Dampf- und Kondensatordruckes, des Heizwertes von Treibgas und ähnlichem. Dieser Aufgabe wird die Regelung zunächst einmal um so besser gerecht werden, je größer das ausgenutzte (§ 157) Arbeitsvermögen des Reglers ist; denn um so

Additional material from *Maschinenuntersuchungen und das Verhalten der Maschinen im Betriebe*
ISBN 978-3-662-38847-1, is available at <http://extras.springer.com>



besser wird, bei gegebenen dem Regelvorgang entgegenstehenden Widerständen, die Einstellung auf die reibungsfreie Sollstellung erfolgen. Mit anderen Worten: der Regler darf nicht zu klein für die zu regelnde Steuerung sein, und die Verbindung zwischen ihm und dem passiven Regelorgan durch das Stellzeug soll so sein, daß das Arbeitsvermögen über eine genügende Strecke des Muffenhubes hin benutzt wird. Insoweit liegen also die etwa vorzunehmenden Verbesserungen eindeutig in einer Richtung.

Weniger klar liegen die Verhältnisse hinsichtlich des Ungleichförmigkeitsgrades. Je kleiner er ist, desto genauer erstrebt der Regler die Drehzahl bei allen Belastungen der Maschine — bei allen Muffenstellungen — auf genau den gleichen Wert einzuregeln. Aber ein Vergleich der Fig. 318a und b miteinander läßt erkennen, daß bei gegebener Unempfindlichkeit um so größere Abweichungen der Hülsenstellung und damit des Drehmoments vom Sollwert möglich sind, je steiler die Kennlinie verläuft. Ein steiler Verlauf hat daher Nachteile in dynamischer Hinsicht, die an Fig. 309 versuchsmäßig gezeigt wurden. Danach darf und soll man sich der Astatic so weit nähern, wie das dynamische Verhalten der Regelung es zuläßt. Dieses ist bestimmt durch das Verhältnis der verstellenden zu den widerstehenden Kräften in der Regelung — durch ausgenutztes Arbeitsvermögen einerseits und Unempfindlichkeit andererseits.

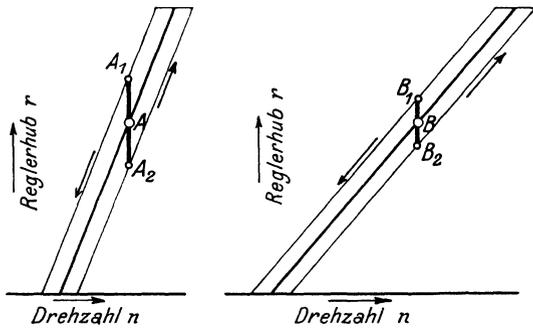


Fig. 318. Mögliche Abweichung des Hülsenhubes von der Sollstellung: a) bei schwach statischem, b) bei stark statischem Regler.

— durch ausgenutztes Arbeitsvermögen einerseits und Unempfindlichkeit andererseits.

Für die *Ausnutzung des Arbeitsvermögens* ist wesentlich die Anordnung des Stellzeuges und die Bemessung seiner Hebel- und Stangenlängen. Ihre Veränderung übt Einflüsse auf das Zusammenwirken der gesamten Regelung, die nicht mit den an Fig. 303 und 310 besprochenen Wirkungen des Rückdruckes und der Schwerpunktslage des passiven Regelorgans verwechselt werden dürfen. Diese Veränderungen wirkten nämlich nicht auf das Arbeitsvermögen der Regelung ein, die nun zu besprechenden tun es.

Man kann den Unterschied der beiden Beeinflussungen des Reglers durch die Steuerung auch an Hand der in § 156 schon gegebenen Formeln klarstellen. Dort hatten wir folgende Zusammenhänge festgestellt: es ist:

$$\begin{aligned} \text{für die Maschine } M_i \text{ (oder } N_i) &= f_1(\varphi) \dots \dots \dots (1) \\ \text{für das Stellzeug} &\quad \varphi = f_2(r) \dots \dots \dots (2) \\ \text{für den Regler} &\quad r = f_3(n) \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

so daß im ganzen eindeutig $n = F(N_i)$ wird. Durch den Rückdruck und die Schwerpunktslage des passiven Regelorgans wird die Beziehung (3) verändert, sie wird für den angebauten Regler eine andere als für den freien. Jetzt aber handelt es sich darum, daß man die Beziehung (2) überhaupt beliebig wählen kann. Von ihr haben wir noch gar nicht gesprochen, so wenig wie über (1).

Es sei deshalb zunächst noch in Fig. 319 gezeigt, wie die aus der Zusammenfassung von (1) und (2) entstehende Beziehung

$$r = f(M_i) \dots \dots \dots (14)$$

unabhängig ist von der Drehzahl, solange das Stellzeug unverändert bleibt. Denn die aus Fig. 301 schon bekannten Versuche Nr. 1 bis 15

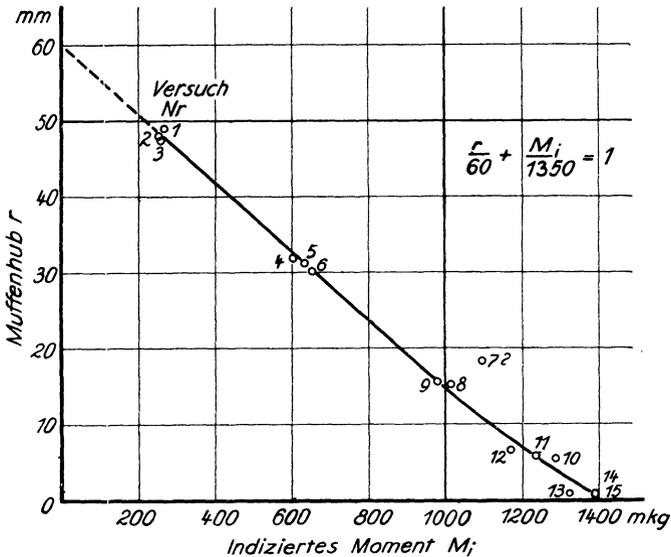


Fig. 319. Beziehung zwischen Muffenhub und indiziertem Moment als (fast) unabhängig von der Drehzahl.

sind reihenweise zu dreien durch Steigern der Drehzahl entstanden, § 158. Die Zahlenwerte gibt Tabelle 97.

Die Beziehung (1) ist nun aber (bei Kolbenmaschinen, soweit sie nicht Schnellläufer sind, Fig 2, § 4, bei Kreisradmaschinen, soweit sie nahe dem Bestwert arbeiten, Fig. 1, außerdem immer bei bestimmter Qualität des Energieträgers) eine Konstante der Maschinenabmessungen (der Zylinder- und Düsenmaße). Sie kann daher nicht geändert werden. Eine Änderung der Beziehung (14) und Fig. 319 ist jedoch möglich durch Verändern von (2). Fig. 320 zeigt die Möglichkeiten.

In Fig. 320 ist nämlich folgendes angedeutet. Für den Leerlauf der Maschine $N = 0$ ist eine bestimmte Füllung $\varphi = \varphi_0$ erforderlich. Die Mittellinie M des Riderschiebers liegt dabei (zufällig genau) in der Horizontalen, das hängt ab von der gegenseitigen Orientierung des Riderschiebers zum oberen Spiegel des Grundschiebers. Die Höchst-

last N_{\max} der Maschine wird vorgeschrieben sein, ihr entspricht eine Füllung $\varphi = \varphi_{\max}$ sowie ein Bogen s , um den der Riderschieber sich drehen muß; s hängt auch namentlich ab von der Neigung der schraubenartigen Schlitzte in den beiden Schiebern. Nehmen wir die Schieber als gegeben an, so muß zu $\varphi = \varphi_0$ gehören $r = r_{\max}$, und zu $\varphi = \varphi_{\max}$ muß gehören $r = 0$ als Muffenhub des Reglers. Wollen wir einen bestimmten Hub r_{\max} des Reglers ausnutzen, so ist nur eine Länge λ des Angriffshebels und nur eine Länge l der Hängestange möglich, die zusammen die zwei Bedingungen erfüllen, daß nämlich die zwei Grenzen des verfügbaren Reglerhubes gerade den zwei Grenzen der Leistung entsprechen.

In Fig. 320 sind zwei Stellvorrichtungen angedeutet, bei deren Vorhandensein man den Einfluß von Änderungen am Stellzeug versuchs-mäßig verfolgen kann, λ kann durch A und l kann durch L geändert werden.

Habe sich praktisch beim Erproben einer Maschine die Beziehung 1 der Fig. 321 zwischen dem Reglerhub einerseits, der Füllung oder dem Drehmoment oder (bei jedenfalls annähernd konstanter Drehzahl auch) der Leistung ergeben; die erreichte Höchstleistung ist nicht die verlangte, nach Lage der Dinge kann man aber s oder φ noch vergrößern, ohne falsche Dampfeinströmung fürchten zu müssen oder an Vollfüllung zu kommen, man kann auch r noch steigern, ohne dem oberen Regleranschlag zu nahe zu kommen, also den Sicherheitshub zu weit zu verringern (z. B. für Schwingungen wie in Fig. 305).

Dann hat man die Wahl, entweder den Angriffshebel λ des Gestänges am passiven Regelorgan zu verkleinern oder die Gestängelänge l zu vergrößern. Es mögen bei anderen Steueranordnungen andere Formen der Verstellmöglichkeit vorkommen, immer aber handelt es sich um den Unterschied der Änderung einerseits von *Hebellängen* λ , andererseits von *Stangenzängen* l . Beider Wirkung ist verschieden: Änderung von λ ergibt Kurve 2, Änderung von l ergibt Kurve 3, insbesondere also: erstere ergibt eine Drehung, letztere eine Parallelverschiebung der Kennlinie; beide Änderungen zusammen lassen jede Lage derselben im Schaubild erzielen.

Welche man vorzieht, bestimmt sich nach dem Bedarf an Arbeitsvermögen in der Regelung. Geht man auf Kurve 3 über, so vergrößert man das Arbeitsvermögen entsprechend dem größeren ausgenutzten Hub. Wo aber der Regler reichlich groß ist, hat der Übergang auf



Fig. 320. Stellzeug mit zwei Verstellbarkeiten.

Kurve 2 den Vorteil, daß die Drehzahl bei verschiedenen Leistungen besser gleich bleibt — kleinere Ungleichförmigkeit der Regelung. Überdies hat ein tunlichst kleines r_{max} den Vorteil, die Reglerwege zu verkleinern und daher die Wirkungen des Reglernacheilens zu verringern, es bietet also, sofern das Arbeitsvermögen ausreicht, Aussicht auf geringste Schwingungen bei Belastungsänderungen.

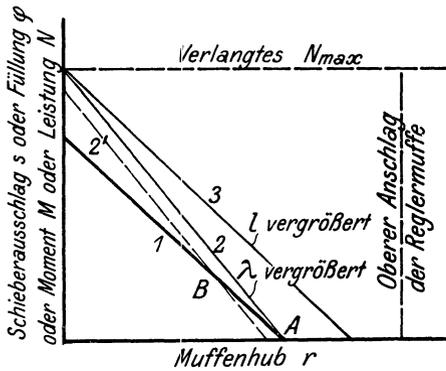


Fig. 321. Einfluß der beiden Verstellbarkeiten der Fig. 320 auf die Höchstleistung und auf die Ausnutzung des Arbeitsvermögens des Reglers, schematisch.

Auch die Wirkung einer Verschränkung im Regelgestänge, wenn also λ und l nicht senkrecht aufeinander stehen und daher das Übersetzungsverhältnis sich ändert, ist gegebenenfalls zu beachten.

Mit wie geringen Reglerhüben man gelegentlich mit Vorteil auskommen kann, davon geben Fig. 299 und 312 sowie das in § 164 zu Sagende ein deutliches Beispiel.

164. Regelung einer Gasmaschine bis zur Überlastung. Die in Fig. 311 dargestellte Gasmaschinenregelung nutzt in eigenartiger Weise nur einen Teil, und zwar ziemlich den oberen des Muffenhubes aus, Fig. 299. Die eigenartigen Verhältnisse, die sich hieraus ergeben, sollen untersucht werden.

Man bringt die Regelung einer Kraftmaschine zum Spielen durch Belasten der Kraftmaschine. Handelt es sich im vorliegenden Fall um eine Gasdynamo, so wird zu dem Zweck der Widerstand W_A des

Tabelle 98. Verhalten der Gasmaschinen-
Die Dynamo arbeitet

Versuch Nr.		89	90	91
1	Äußere Leitfähigkeit $J/E_p = 1/G_A$ S	0	0,113	0,227
2	Feldreglerstellung k Kontakt Nr.	3	12	20
3	Erregerstrom i A	0,57	0,67	0,76
4	Zündung eingestellt °	14	12	10
5	Zündungszeit vor dem Totpunkt "	-16,5	-10	-4
6	Klemmenspannung E_p V	222	222	221
7	Elektrische Leistung $N_{el} = E_p \cdot J$ kW	0	5,55	11,1
8	Drehzahl n /min	192,0	190,1	186,7
9	Reglerstand r mm	44	42	28
10	Volumetrischer Wirkungsgrad η_v —	0,595	0,745	0,985
11	Mischungsverhältnis L/G —	12,0	10,4	9,3
12	Gasaufnahme G $m^3(760^0)/h$	4,92	7,15	10,28
13	Lieferungsgrad η_l —	0,44	0,57	0,76
14	Indizierter Druck p_i at	2,07	3,41	4,84
15	Abgastemperatur °C	348	374	419

äußeren Stromkreises verringert, meist indem man mehr und mehr Widerstände parallel zueinander zur Geltung bringt. — Der Beginn der Reihe im Leerlauf ist $W_A = \infty$; das ist für die Darstellung unbequem. Bequemere Proportionalitäten ergeben sich, wenn man die äußere Leitfähigkeit $G_A = 1/W_A$ in Ansatz bringt, im Leerlauf ist $G_A = 0$. Gemessen ist dabei J und E_p an den Klemmen der Maschine, woraus sich $G_A = J/E_p$ errechnet: Stromaufnahme für 1 Volt Spannung. G_A wird in Siemens S gemessen.

Mit zunehmender äußerer Leitfähigkeit nimmt J und daher die Leistung $N_{el} = EJ$ zu, daher die Drehzahl n etwas ab. Diese Abnahme hat zur Folge, daß beim Aufbringen von größerer Last die elektromotorische Kraft der Dynamo, als proportional der Drehzahl, sinkt; die Klemmenspannung tut es um so mehr, als auch der Spannungsverlust im Anker der Dynamo mit der Stromstärke wächst. Die Abnahme der Klemmenspannung E_p unter beiden Einflüssen ist durch Bedienen der Feldreglung auszugleichen, man muß den Erregerstrom i verstärken; das geht so lange, bis der Feldregler ganz ausgeschaltet ist und die Erregerwicklung unmittelbar an der Klemmenspannung liegt. Die Erregung nimmt bei der vorliegenden Dynamo auf $i_{\max} = 1,05$ A bei 220 V Klemmenspannung zu.

In Tab. 98 und Fig. 322 ist das Versuchsergebnis gegeben. Zunächst wurde in zwei groben Stufen von Leerlauf bis etwa Vollast gegangen, Versuch Nr. 89, 90, 91; der Feldregler muß von Kontakt 3 bis Kontakt 20 nachgeregelt werden, dadurch bleibt die Spannung erhalten, obwohl die Drehzahl von 192,0 auf 186,7/min gefallen war. Nun wurde bei Versuch 92 die äußere Leitfähigkeit nur wenig, nämlich von 0,227 auf 0,235 S gesteigert; aber damit war, obwohl der Regler erst auf $r = 17,5$ mm angekommen war, doch die Höchstleistung schon überschritten; denn wenn wir den Feldregler von Kontakt 22 weiter auf 25

reglung bei Überlastung.
mit Fremderregung.

92	93	94	95	96
0,235	0,235	0,235	0,377	0,528
22	25	41	41	41
0,78	0,82	1,05	1,05	1,05
10	10	10	8	9
-5	-6	-11	-9	-17,5
217	216	212	146	90
11,1	11,2	10,4	8,03	4,27
181,7	174,1	151,0	107,8	73,6
17,5	1,5	0	0	0
0,985	0,985	0,995	1	1
9,3	9,25	9,2	9,35	10,7
10,13	9,79	8,63	6,19	3,56
0,77	0,78	0,78	0,79	0,76
5,16	5,11	5,39	5,28	4,51
422	420	396	354	288

bringen, erreichen wir doch nicht mehr die verlangte Spannung: der Regler sinkt, mit ihm die Drehzahl, und dadurch wird die Spannung mehr herabgesetzt, als der Feldregler einbringen kann. Setzen wir vollends, Versuch 94 bis 96, den Feldregler auf das Ende, Kontakt 41, und steigern wir dann noch die Leitfähigkeit, so drücken wir nur bei aufsitzendem Regler die Drehzahl herab — die Maschine ist überlastet, linker Zweig der Leistungskurve Fig 299, § 157.

Diese Zusammenhänge sind das Äußere der Erschei-

nung; der innere Grund, weshalb die Steigerungsmöglichkeit nur bis $G_A \leq 0,235$ geht, liegt im Energieumsatz. Bis zu Versuch 91 steigt der volumetrische Wirkungsgrad η_{vol} , der sich nach Maßgabe von § 95 den Indikatordiagrammen Fig. 323 entnehmen läßt. Bei Versuch 91 ist $\eta_{vol} = 0,985$ und daher nicht mehr wesentlich steigerungsfähig. Beim Reglerstand $r = 28$ mm über dem unteren Anschlag hat sich also die Drosselklappe, Fig. 311, bereits so weit geöffnet, daß die angesaugte

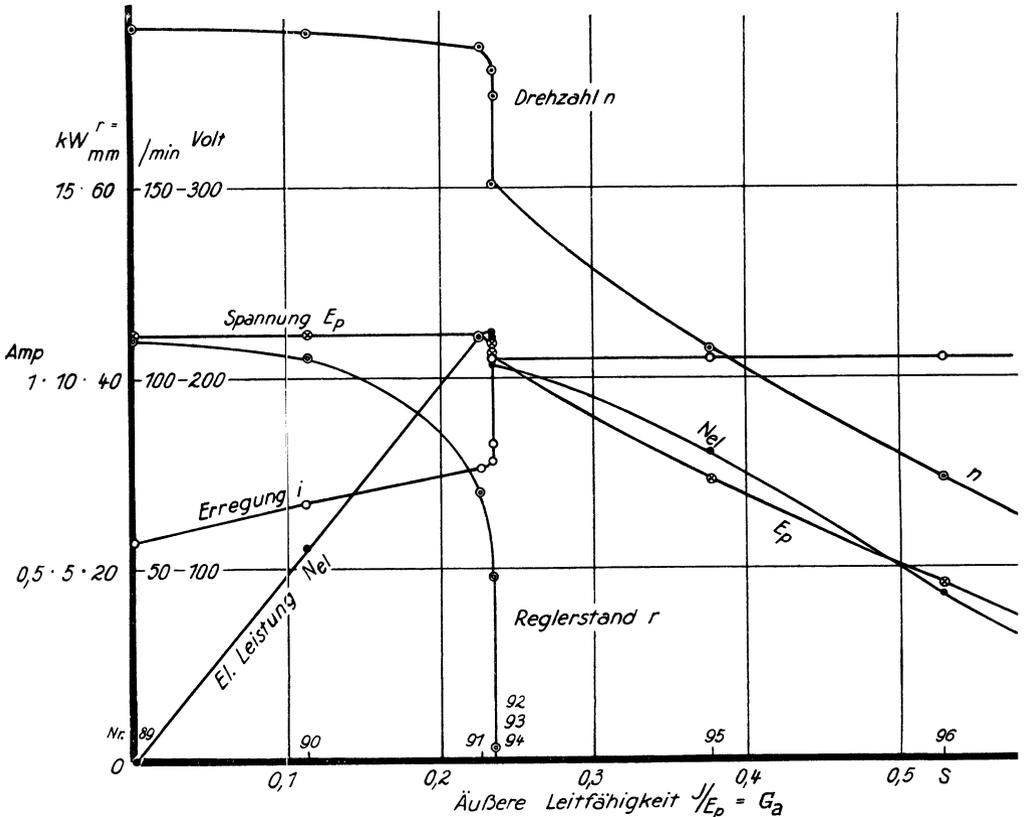


Fig. 322. Regulierung einer Gasdynamo bis zur Überlastung.

Mischung keinen merklichen Widerstand mehr findet, weitere Öffnung der Drosselklappe ist dann belanglos und hierdurch der untere Reglerhub totgelegt. Ist aber die Brennstoffaufnahme nicht mehr steigerungsfähig, so kann nach dem Energiesatz auch die Leistung nicht weiter steigen.

Anders als bei der Dampfmaschine, Fig. 299, § 162, ist also die Höchstleistung der Maschine nicht durch den Regler oder seinen Anschluß, sondern durch die Maschine selbst gegeben.

Die Dynamo der Gasmaschine arbeitete mit Fremderregung, sonst hätte mit abnehmender Drehzahl bei den letzten Versuchen 94 bis 96 auch i abnehmen müssen.

In den Schwachfederdiagrammen der Fig. 296 zeigen sich abklin-
gende *Schwingungen* der durch den Auspuffvorgang angestoßenen
Gassäule *im Auspuffrohr*. Diese verlaufen mit stets etwa unveränderter
Schwingszeit, daher kommen bei den letzten Diagrammen kleinerer
Drehzahl mehr Schwingungen auf den Auspuffhub.

165. Einflüsse der Belastung. Auf den zeitlichen Verlauf der Regel-
diagramme nach Fig. 305ff. hat nicht nur der Regler Einfluß, sondern

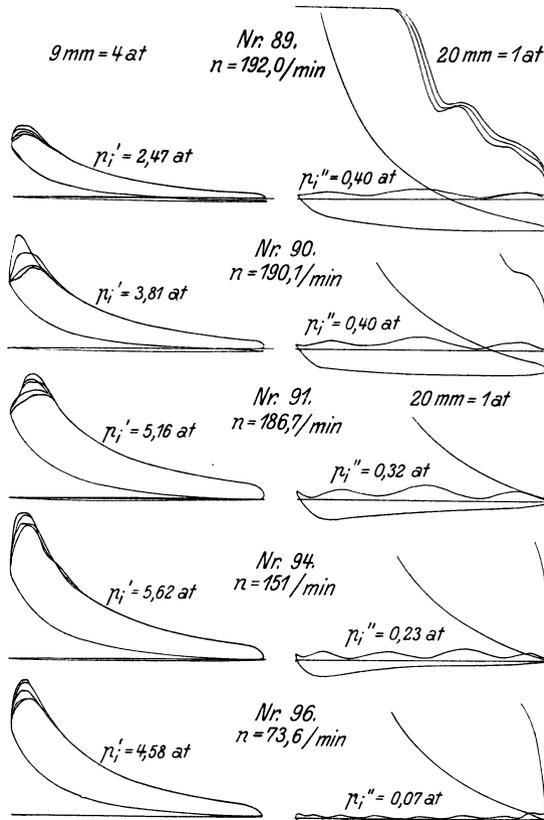


Fig. 323. Diagramme der Gasdynamo bis zur Überlastung. $\frac{2}{5}$ nat. Gr.

auch Vorgänge in der Kraftmaschine, wie die Speicherwirkung des
Aufnehmers. Das wurde an Fig. 305 erläutert, wo die Überreglung
über Punkt *C* hinaus eine Folge dieser Aufnehmerspeicherung war.

Ähnliche Einflüsse können aber auch von der Belastung herrühren,
nämlich von dem Verlauf, den deren Kennlinie hat, die nicht immer
wie in Fig. 298, Kurve 3 bis 5, parabolisch läuft.

Bei elektrischem Betrieb müssen beispielsweise, je nachdem eine
Dynamo mit Fremderregung oder mit Selbsterregung arbeitet, Ver-
schiebenheiten in den Regelungsdiagrammen auftreten; denn je nach

der Art der Erregung ist, solange die Erregerpole nicht magnetisch gesättigt sind, der Grad der Selbstreglung ein verschiedener. Die beiden Diagramme der Fig. 312, § 162 zeigen beim Übergang auf Vollast diesen Einfluß erkennbar, jedoch schwächer, als sich erwarten

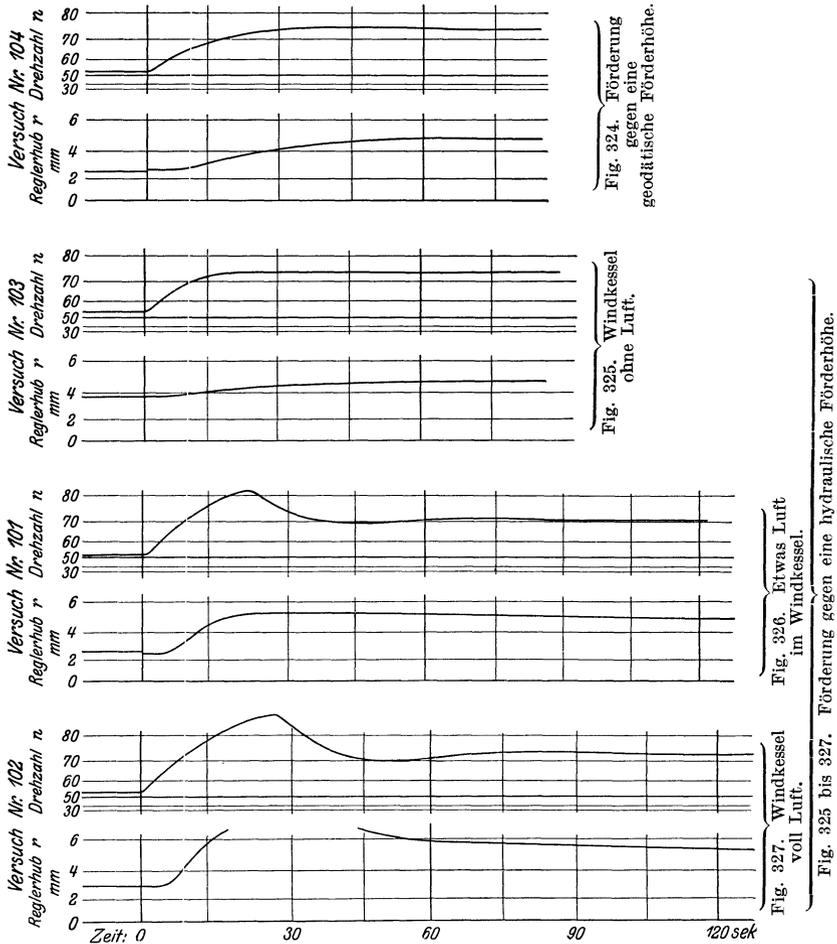


Fig. 324 bis 327.

ließ: bei Selbsterregung ist die Selbstreglung stärker. Beim Übergang auf Leerlauf war der Einfluß nicht zu erwarten.

Unterschiede im zeitlichen Ablauf des Regelvorganges ergeben sich allgemein außer durch *verschiedene Kennlinie* der Belastung auch noch durch *Speicherwirkungen* innerhalb der Belastung. Als Beispiel für beide Möglichkeiten werden noch die Diagramme Fig. 324 bis 327 gegeben, die an der aus Fig. 190 und 196 bekannten Pumpe aufgenommen wurden, indem die Stellzeuglänge (Verbindung zwischen Regler und Rider-

schieber, es handelte sich um eine Leistungsreglung) schnell verändert wurde. Die Verstellung war jedesmal um den gleichen Betrag erfolgt, und deshalb regelt die Regelung jedesmal auf (etwa) den gleichen Endzustand ein. Der Übergang aber erfolgt in verschiedener Weise, je nachdem ob die Pumpe gegen eine *geodätische* oder gegen eine *hydraulische Förderhöhe* arbeitet — erstere ergibt keine Selbstreglung, letztere gibt eine solche und führt daher den Endzustand schneller herbei (Fig. 325 gegen Fig. 324). Der Vergleich von Fig. 326 und 327 mit Fig. 325 läßt jedoch erkennen, wie die Beendigung des Regelvorganges verschleppt wird, wenn eine größere *Luftmenge im Windkessel* vorhanden ist. Dann kann nämlich eine Druckänderung nur zustande kommen nach Maßgabe der Verdichtung der im Windkessel eingeschlossenen Luft, und der von der Luft freigegebenen Raum muß dann mit Wasser gefüllt werden; ein Teil der geförderten Menge wird also im Windkessel gespeichert. — Es ist ohne weiteres möglich, diese Vorgänge punktweise rechnerisch zu verfolgen.

Namen- und Sachverzeichnis.

- Abbildung § 59.
Abbrand § 40.
Abdampfausnutzung § 22, 87a; und Kühlanlagen 150.
Abgase (Koks) § 40; (Steinkohle) 32; (Gasmaschine) 97.
Abgasanalyse und Mischungsverhältnis (Gasmaschine) § 100.
Abgaskalorimeter § 97.
Abgleichung § 128, 142, 157.
Ablesungen, Verteilung § 30, 49, 66, 89.
Ablesungsprotokoll § 27; (Dampfkessel) 27; (Dampfturbine) 49; (Dampfmaschine) 66; (Gasmaschine) 89, 93.
Ablesungsregeln § 49, 89.
Ablesungsfehler, Berichtigung § 53, 89, 93, 140.
Abnahme (rechtlich) § 17.
Absperrorgan, Kennlinie des Abschlusses § 118, 127.
Achsenregler § 83.
Amerikanische Normen § 24, 29, 27, 30.
Anlaufperiode, Kreiselpumpe § 125.
Anlassen der Gasmaschine § 111.
Annahme als Erfüllung (rechtlich) § 17, 21.
Anzapfmaschine § 87 b.
Anzeigepflicht bei Mängeln § 19.
Arbeitsentziehung aus Dampf § 60.
Arbeitsfähigkeit von Dampf § 38, 47.
Arbeitsmaschine § 113 ff.
Arbeitsvermögen der Regelung mit Stellzeug § 163.
— des Reglers § 155, 160, 160.
Arbeitsverlust durch Resonanz im Windkessel § 123.
Auffüllverfahren, Luftmessung § 147.
Aufnahme, Hergabe § 3.
Aufnehmerspannung § 82.
Aufnehmer, Wirkung auf die Regelung § 161.
Auftrieb im Überhitzer § 35.
Ausfluß von Dampf § 45, 61, 86.
Ausflußmenge und Druck § 61, 121, 147; durch Undichtheiten 147; durch Hahnküken 147.
Ausgleich mehrerer Zusagen § 14.
Ausklinksteuerung § 85.
Aussetzende Zündung § 111.
Auspuff und Kondensation (Dampfturbine) § 58, 60; (Dampfmaschine) 67, 75.
Auspuffbetrieb § 48, 51.
Auspuffgase, Temperatur § 98.
Auspumpversuch § 130.
Äußere Betriebsbedingungen § 6, 9, 11.
Barometerstand § 11, 96, 142.
Bedingende Angaben bei Gewährleistung § 8, 9.
Beharrungszustand § 2; (Dampfkessel) 33, 34, 35; labiler 87 b; bei Kühlanlagen 152.
— (Verdampfungsversuch) § 29, 33.
Belastung (Dampfkessel) § 34; (Dampfmaschine) 67; (Dampfturbine) 50; (Gasmaschine) 89, 90, 93; (Ölmotor) 109.
—, Einfluß wechselnder § 5.
—, Kennlinie der § 6, 157.
— -sart § 6.
— -sgrad § 3, 56.
— -sprünge § 150.
Benachbarte Kessel § 6, 36.
— Maschinen § 6.
Berichtigung von Ablesungen § 53, 89, 93, 140.
Betriebsversuch § 2.
Betriebszustand § 12, 112, 143.
Betriebsbedingungen, äußere § 9, 11.
Bremsung einer Gasmaschine § 92.
Bewegliche Sachen (rechtlich) § 17.
Beweislast § 21.
Beweissicherung § 21.
Carnot - Prozeß § 47, 150, 153.
Charakteristik siehe Kennlinie.
Dampfaufnahme, -verbrauch § 46.
— der Dampfturbine, unabhängig von Druck und Drehzahl § 61.
Dampfdiagramm, normales § 80; fehlerhaftes 87.
Dampfdruck § 72.

- Dampfgeschwindigkeit in Steuerung § 86.
 Dampfgewicht, arbeitendes § 78.
 Dampfkessel § 24 ff.; (veränderlicher Rost) 132; (Wärmebilanz) 31.
 Dampfkraftanlage § 11, 15, 76.
 Dampfkraftmaschinen § 46 ff.
 Dampfleitung § 38.
 Dampfmaschine § 65 ff., 10, 13.
 —, Regelung § 161.
 Dampftabelle, Benutzung § 26, 43.
 Dampfturbine § 49 ff., 13.
 Dämpfung der Regelung § 162.
 Dampfverbrauch der Pumpmaschine § 115.
 Dampfvolumen (Turbine) § 52, 55; (Wasserwärmer) 45.
 Dampfwärme § 43.
 Dampfzustand (Dampfmaschine) § 72.
 — in Turbinenstufen § 60.
 Dampf- und Steuerungsdiagramm § 83.
 Dauerbetrieb oder nicht § 73, 130.
 Dekompression § 111.
 Diagramm und Steuerung § 80, 84, 111.
 Dieselmotor § 109 ff.
 Dimensionslose Angaben § 12, 56, 138.
 — Diagramm § 56, 71, 141, 147.
 Diffusor § 134.
 Doppelschiebersteuerung § 83.
 Drehmoment § 4, 59, 73, 117; bei Luftpumpen 147.
 Drehzahl § 4; (Dampfmaschine) 73; (Dampfturbine) 59; (Flugmotor) 10; (Gasmaschine) 102; (Kolbenpumpe) 116; (Ventilator) 136; (Luftpumpe) 147.
 — und Diagramm der Dampfmaschine § 81.
 — Regelung § 158.
 —, hohe, Verbrennungskraftmaschine § 112.
 — und wirtschaftlicher Betrieb § 73.
 Drosselorgan, Kennlinie § 118, 127; Ausflußmenge bei Luft 147.
 Druckabfall (Dampfleitung) § 38.
 (Dampfmaschinensteuerung) 86; (Pumpenventil) 120, 122.
 Druck und Ausflußmenge 61, 121.
 —, Kolbenpumpe § 117.
 Druckmessung § 134.
 Druck, statischer, dynamischer, Gesamt- § 134.
 Druckstufen i. Dampfturbine § 60.
 Druckverlust siehe Druckabfall.
 Duplexpumpe § 123.
 Düse der Dampfturbine § 61.
 Düsenverstellung (Dampfturbine) § 13, 54.
 Düsenwert hydraulischer Widerstände § 119, 137, 126, 139, 147; von Undichtheiten einer Leitung 147.
 Dynamisches Verhalten des Reglers § 161.
 Dynamische Windkesseltheorie § 123.
 Eigenschaften, zugesagte § 18.
 Eigenschwingungszahl einer Wassersäule § 123.
 Einblasedruck am Ölmotor § 110.
 Einlaufdauer (Dampfkessel) § 29, 35; (Pumpe) 117.
 Einstuerung (Dampfmaschine) § 83; (fehlerhafte) 87; (Verbrennungskraftmaschine) 112; (Kompressor, Luftpumpe) 147, 148.
 Elektrische Messungen § 49, 125, 126.
 — Schaltung § 91.
 — Verluste § 67.
 Energiebilanz § 3; (Dampfkessel) 31; (Dampfkraftanlagen) 76; (Dampfmaschine) 76; (Gasmaschine) 76; (Kühlanlage) 150, 153; (Ventilator) 136; (Wasserwärmer) 43.
 Energieumsatz im Regler § 155, 160.
 Entropiediagramm (Dampfmaschine) § 78; (Gasmaschine) 108.
 Entropietafel siehe is-Tafel.
 Erläuternde Zahlenangaben § 8.
 Entwässerung, landwirtschaftliche § 16, 130.
 Ergänzung von Ablesungen § 53, 140.
 Erwärmung (Kreiselpumpe) § 125; (Ventilator) 136.
 Expansionslinie § 79.
 Exponentenermittlung § 59, 79.
 Fehler im Dampfdiagramm § 87; im Kompressoridiagramm 148.
 —, Mängel (rechtlich) § 18.
 Fehlerberichtigung § 89, 93.
 Fehlergrenze § 7.
 Fehlerhafter Pumpengang § 124.
 Festbremsung der Dampfturbine § 59, 60.
 Feuerung des Dampfkessels § 31, 34, 41.
 Flaschenzug § 12.
 Flugmotor § 10, 96.
 Förderhöhe, geodätische und hydraulische § 130.
 — (Pumpe) § 115; (Kolbenpumpe) 117; (Kreiselpumpe) 125; (Messung) 126.
 Freifallsteuerung § 85.
 Frischdampfdruck § 72.
 Füllungsgrad, thermometrischer (Gasmaschine) § 95.
 Füllung (Dampfmaschine) § 70; (Gasmaschine) 95.
 — und Reglerstand § 156.
 Füllungsverhältnis der Gasmaschine § 95, 164.
 Füllungs- und Gemischregelung § 99.

Gasmaschine § 11, 88 ff.
 — Regelung § 162, 164.
Gasantrieb für Gebläse § 123.
Garantie siehe Gewährleistung oder Zusage.
Garantieversprechen (rechtlich) § 20.
Gebläse § 123.
Gefahrübergang (rechtlich) § 17.
Gegendruck § 87 a; (Dampfturbine) 58; (Dampfmaschine) 75; (Kompressor) 147.
Gegendruckturbine § 53.
Gegenstrom, Gleichstrom § 44, 45.
Gemisch- und Füllungsregelung § 99.
Genauigkeit (Verdampfungsversuch) § 29.
Geodätische und hydraulische Förderhöhe § 130.
Geräuschlosigkeit (Ventilator) § 7.
Gesamtdruck § 134.
Gesamtlieferung § 14.
Geschlossener, offener Betrieb § 11.
Getriebeverlust § 12, 69, 93, 102.
Gewährleistung § 22, 36; siehe Zusage.
Gewicht oder Volumen (Pumpe) § 113.
Gleichstrom, Gegenstrom § 44, 45.
Gleichgewicht (chemisch) § 40.
Gleichwertige Düse siehe Düsenwert.
Gleichzeitigkeit der Zusagen § 13, 54.
Grenzvakuüm (Dampfturbine) § 62.
Gruppe, Beeinflussung der Glieder § 6; Rückwirkung von Hilfseinrichtungen 6.
Gutachter, rechtliche Stellung § 23.
Gütegrad § 47, 57; (Dampfmaschine) 71; (Dampfturbine) 57; (Gasmaschine) 105, 106; (Kühlmaschine) 150, 153.
Heberkreiselpumpe § 130.
Heizfläche (Kessel) § 25.
Hebezeug § 12, 18.
Hilfseinrichtungen, Rückwirkung § 6; Verrechnung 94.
Hochbehälter, Förderung in § 14, 73, 115, 125.
Höchstleistung, Beeinflussung durch gemeinsame Hilfseinrichtungen § 6.
 — (Gasmaschine) § 96; (Dampfkessel) 36.
 —, **Steigerung der** § 5, 10.
 — und **Verbrauch** (Dampfmaschine) § 81.
 — und **Wirtschaftlichkeit** § 3.
Hülshub siehe Reglerstand.
Hydraulische und geodätische Förderhöhe § 130.
Hydraulischer Widerstand § 118, 126.
Idealprozeß siehe theoretischer Kreisprozeß.

Indikatordiagramm (Dampfmaschine) § 77 ff.; (Kompressor) 146.
 —, (eigenartige) § 111.
 — (Ölmotor) § 111; (Gasmaschine) 93.
Indizierter Druck, Stufenkolbenpumpe § 115.
Indizierte Leistung, Begriff § 94.
 — (Dampfmaschine) § 69.
Instrumente, Beschaffung der § 23.
Irreversible Vorgänge § 75.
is-Tafel § 49, 57, 60, 61, 71.
Juristische Begriffe § 17.
Katze (Hebezeug) § 12.
Kaufpreis einbehalten § 20.
Kauf-, Werkvertrag § 17.
Kennlinie (Belastung) § 156, 157, 165; (Kreiselpumpe) 127; (Regler) 156, 157; (Rohrleitung) 126, 118; (Ventil) 118; (Ventilator) 139; (Wasserschieber) 127.
 — **Reglungskennlinie der Kraftmaschine** § 156, 157.
Kennzahlen, Ventilator § 138.
Kesselgruppe § 6.
Kette (Kran-) § 18.
Kleinkessel § 25.
Klemmung, Regelung § 162.
Krankette § 18.
Kreiselrad- gegen Kolbenmaschine § 4, 127.
Kreiselpumpe § 10, 125 ff.
 —, **Allgemeines Verhalten** § 128.
 — **Parallelarbeiten** § 129.
Kreisprozeß siehe Theoretischer Kr.
Koksverbrennung § 40.
Kolbendampfmaschine § 65 ff.
Kolben- gegen Kreiselradmaschine § 4, 127.
Kolbenreibung in der Wärmebilanz § 97, 153.
Kolbenpumpe § 113 ff.
Kompression (Dampfmaschine) § 75; (Gasmaschine) 104; (Kompressor) 148.
Kompressor § 133, 144 ff.
Kondensationsbetrieb § 48, 52.
 —, **Vorsicht beim Übergang zum** § 75.
Kontrollen § 50, 140.
Künstlicher Zug § 8, 37.
Kurvenscharen § 59, 140.
Kühlanlage § 1, 14, 73, 149 ff.
Kühlmantel, Wärmeabgabe § 97.
Kühlwassermenge § 103.
Ladungsgewicht (Gasmaschine) § 106.
Langsamläufer § 4.
Lässigkeit § 12; (Dampfmaschinenkolben) 87; (Dampfmaschinenventil) 87; (Kreiselpumpe) 131; (Ventilator) 143.
Laufkatze § 12.

Leerlauf § 50, 67, 90.
 Leistungsparabel § 4; (Dampfturbine) 59.
 Leistungsregelung, Dampfpumpe § 119.
 Leistungsverlust durch Resonanz im Windkessel § 123.
 Lieferzahl (Ventilator) § 138.
 Lieferungsbedingungen der Maschinenbau-Anstalten § 22.
 Lieferungsgrad (Gasmaschine) § 95; (Kompressor) 145, 147.
 Logarithmische Darstellung § 59.
 — Verfahren § 79.
 Lorentzscher Vergleichsprozeß § 150, 153.
 Luftbedarf § 100.
 Luftdichte § 11, 96, 142.
 Luftleitung, Schwingungen § 123.
 Luftmangel (Gasmaschine) § 101, 112; (Ofen) 40.
 Luftmessung § 7, 146; aus Temperaturerhöhung 136.
 Luftpumpe § 147.
 Lufttemperatur § 11, 96, 142.
 Luft im Pumpenraum § 124.

 Mängelhaftung § 18.
 Mängel, Fehler § 18.
 Manometrische Förderhöhe § 130.
 Maschinengruppe, Beeinflussung der Glieder § 6.
 Maschinensatz, -gruppe § 1.
 Mariottesche Linie § 79.
 Mauerwerk des Dampfkessels, Wärmespeicherung § 33.
 Minderung, Berechnung § 22.
 —, Wandelung § 18.
 Mischung und Zündungspunkt § 101.
 Mischungsverhältnis § 99.
 — und Abgasanalyse § 100.
 Mollier - Tafel siehe is-Tafel.
 Muffenhub siehe Reglerstand.

 Nachbesserungsrecht § 18.
 Nachhinken des Reglers § 150.
 Negative Nutzleistung § 93.
 Nicht umkehrbare Vorgänge § 75.
 Niederdruckfüllung § 13, 74.
 Normaldampf § 24.
 Normen § 7, 24.
 —, amerikanische § 24, 29, 30.
 — der Fachvereine § 22.

 Ofen § 40.
 Offener, geschlossener Betrieb § 11.
 Öffnung, gleichwertige (äquivalente) siehe Düsenwert.
 Öffnungsdauer und Voreilung (Steuerung) § 83.
 Ölbremse, Reglung § 162.

Ölmaschine § 8, 14, 109ff.
 Ölpuffer (Freifallsteuerung) § 85.
 Ölverbrennung in der Gasmaschine § 12, 97.
 Originalprotokoll § 27, 49, 66, 89, 114.

 Parallelarbeiten von Kreiselpumpen § 129, von Kesseln 6.
 Parallelstrom, Gegenstrom § 44, 45.
 Peltonrad § 10.
 Protokoll § 27, 49, 66, 89, 114.
 Protokollführung § 27.
 Puffer § 85.
 Pumpe, Zusagen § 8.
 —, Pumpmaschine, Pumpanlage § 115.
 Pumpwerk § 14.

 Rankinisieren § 77.
 Rauchgase § 40.
 Rauchgasmenge § 32.
 Rauchschieberstellung § 33.
 Rechtliches über Abnahmeversuche § 17ff.
 Regeln der Fachvereine siehe Normen.
 Regelung § 155ff.; (Gasmaschine) 162, 164; (Leistungsregelung der Pumpe) 119; bei Gegendruckbetrieb 87b.
 Reglerstand (Muffenhub) § 70, 163.
 — und Füllung § 156.
 Reibung im Regler § 162.
 Rekordzahlen § 16.
 Resonanzerscheinungen § 123.
 Restverlust § 3.
 Richtkraft des Reglers § 161.
 Ringspalt, Kreiselpumpe § 131; Ventilator 143.
 Rohrleitung, Verlust § 130; Dampf 38.
 Rost veränderlich (Dampfkessel) § 13.
 Rostbelastung § 25.
 Rückdruck oder Steuerung § 159.
 Rückstände, Gasmaschine § 106.
 Rücktrittsrecht § 22.
 Rückwirkung der Steuerung § 159.

 Sachverständige, Stellung, Kosten § 23.
 Saugzuganlage § 8, 37.
 Schadenersatz § 18; (Berechnung) 22.
 Schichthöhe (Verbrennung) § 40.
 Schiedsrichter, Schiedsmänner § 23.
 Schieber (Absperrorgan), Kennlinie des Abschlusses § 118, 127,
 Schieberstellung (Dampfkessel) § 33.
 Schieberellipse § 85.
 Schmieröl, Verbrennung § 89, 97.
 Schmierung § 12.
 Schnellläufer § 4.
 Schornstein § 42; gemeinsam für mehrere Kessel 6.
 Schornsteinhöhe § 36.
 Schornsteinzug § 36, 42.

- Schubstangenlänge, endliche § 83.
 Schwachfederdiagramm § 93, 109, 111.
 Schwelende Verbrennung § 111.
 Schwingungen im Auspuff der Gasmaschine § 164.
 — in Pumpenleitungen § 123.
 — in Gebläseleitungen § 123.
 Schwungradwiderstand § 11.
 Selbstreglung der Kraftmaschinenbelastung § 161, 162, 165.
 Selbstzündung § 111.
 Spaltverlust § 131, 143,
 Speicherwirkung § 2; (Reglung) 161, 165.
 Speisung (Verdampfungsversuch) § 30.
 Spezifisches Gewicht (Pumpe) § 132.
 Spezifische Wärme von Gasen § 32a, 108.
 Spielraum (Toleranz) § 7, 22; (Bedingungen) 9.
 Statische und dynamische Eigenschaften des Reglers § 162.
 Statische Förderhöhe § 115, 130, 125.
 Statischer Druck § 126, 134.
 Stellzeug (Reglung) § 118, 163.
 Steuerung, Auskurbeln § 83; eines Kompressors durch Schieber 148.
 Steuerungsdiagramm § 83.
 Stufen der Dampfturbine § 60.
 Stufenkolbenpumpe § 115.
 Tachograph § 161.
 Tageslieferung, wirtschaftlichste Förderung § 84, 130.
 Temperatur der Abgase § 33, 34; der Auspuffgase 98.
 Temperaturen im Gasmaschinenzylinder § 106, 107, im Kompressorzylinder 147.
 Temperaturerhöhung im Ventilator § 136.
 Temperaturverlust, Schornstein § 42.
 Theoretischer Kreisprozeß (Dampfmaschine) § 47, 71, 78; (Gasmaschine) 105; (Kühlanlage) 150.
 Thermischer Wirkungsgrad, bezogen auf Luft § 101.
 Toleranz siehe Spielraum.
 Tourenzahl siehe Drehzahl.
 Trägheit des Reglers § 150.
 Treiböl und Zündöl § 109.
 Überdeckung und Voreilung § 83, 84.
 Überförderung einer Kolbenpumpe § 123.
 Übergabe (rechtlich) § 17.
 Überhitzer § 25, 26, 33.
 Überhitzung § 72, 78.
 Überhitzer Dampf, Wärmeinhalt § 26.
 Überlastung einer Gasmaschine § 164.
 Umlaufzahl siehe Drehzahl.
 Umrechnung (Dampfkessel) § 28; (Ölmotor) 109.
 Umrechnung auf Normalverhältnisse § 96.
 Umrechnung auf Sollbedingungen § 10, 64, 154.
 Umsatz § 3.
 Undichter Kolben, Ventil (Dampfmaschine) § 87.
 Undichtheit, Gasmaschinenventil § 112; —, Pumpenventil 124.
 Unempfindlichkeit (Regler) 157.
 Unfruchtbare Versuche § 16.
 Ungleichförmigkeit (Regler) § 157, 158.
 Unterbrochener oder Dauerbetrieb § 73, 130.
 Vakuumpumpe § 147.
 Ventilator § 11, 133 ff.
 — (Geräuschlosigkeit) § 7.
 — (Lässigkeit) § 143.
 —, Ventilationsmaschine § 139.
 Ventilbewegung (Dampfmaschine) § 85; (Pumpe) 122, 124.
 Ventilerhebungsdiagramm siehe Ventilbewegung, Ventilhub.
 Ventilhub (Pumpe) § 120.
 Ventil undicht (Pumpe) § 124.
 Ventil hängt (Kompressor) § 148.
 Ventilquerschnitt, freier § 86.
 Verbrauch § 3.
 — und Höchstleistung § 4, 81.
 Verbrennung § 39 ff.
 Verbrennungskraftmaschine § 88 ff.
 Verbundmaschinen-Diagramm § 82.
 Verdampfungsversuche § 27.
 Verdampfungszahl § 24.
 Verdichtungsgrad (Gasmaschine) § 104, Kompressor, Luftpumpe 147.
 Vereinbarungen der Fachvereine § 22.
 Vergleichsprozeß siehe Theoretischer Kreisprozeß.
 Verjähmung der Mängelansprüche § 20.
 Verlustflächen § 80, 146, 148.
 Verluste bei wechselnder Leistung § 5; bei Leerlauf 67.
 Verlust in Rohrleitungen 38, 115, 130.
 Versetzte Diagramme § 111.
 Versuchsanordnung (Dampfmaschine) § 48; (Gasmaschine) 91; (Kreiselpumpe) 125, 126; (Ventilator) 135; (Regler) 158; (Ofen) 40; (Schornstein) 42.
 Versuchsausführung (Wasserpumpe) § 43.
 Versuchsbericht § 27, 64, 66.
 Versuchsdauer (Verdampfungsversuch) § 29.
 Versuchsprotokoll § 27, 49, 66, 89, 114.
 Verteilung der Ablesungen § 30, 49, 66, 89.
 Vertragsarten § 17.
 Vertretbare (Gattungs-) Sachen (rechtlich) § 17.
 Viertakt, Zweitakt § 94.

- Völligkeit § 78.
 Volumen oder Gewicht (Pumpe) § 113; (Ventilator) 134.
 Volumetrischer Wirkungsgrad (über Eins) § 123; (Gasmaschine) 95, 164; (Pumpe) 144, 124.
 Vorbelastung des Pumpenventils § 121.
 Voreilung und Überdeckung § 83, 84.
 Vorein-, -ausströmung § 80.
 Vorgeschwindigkeit der Luft § 134.
 Vorspannung der Ventilfeder § 121.
 Vorwärmerleistung § 36.
 Wandlung, Minderung § 18.
 Wanderrost § 41.
 Wärmebilanz siehe Energiebilanz.
 Wärmeerzeugung im Ventilator § 136.
 Wärmegefälle § 57, 87 a.
 Wärmeinhalt und Arbeitsentziehung § 60.
 — von Dampf § 26, 43.
 Wärmekraftmaschinen § 46 ff.
 Wärmespeicherung (Mauerwerk) § 33.
 Wärmeübertragung, Dampfkessel § 33.
 Wärmeverlust (Dampfleitung) § 38.
 Wälzhebel § 85.
 Wassergeschwindigkeit im Pumpenventil § 120, 121.
 Wasserwärmer § 43 ff.
 Wasserwärmer eingebaut § 44.
 Wehrmessung § 130.
 Werk-, Kaufvertrag § 17.
 Windkesselwirkung (Pumpe) § 123.
 Wirkungsgrad § 3; (Dampfkessel) 24, 34; (thermischer, wirtschaftlicher) 46; (thermischer bezogen auf Luft) 101; (mehrere) 43; (Vorteile von hohem) 3; (volumetrischer) 95, 114, 145, 147, 164; (hydraulischer) 113, 147.
 Wirtschaftlichkeit und Höchstleistung § 3.
 Wortzusage, Zahlzusage § 7.
 Zähigkeit (Pumpe) § 132.
 Zahlenbeispiele:
 Abgasmenge § 32, 40, 100.
 Auffüllmethode für Luftmessung § 147
 Auftrieb § 34, 42.
 Ausfluß von Dampf § 61; in der Steuerung 86; von Wasser 120, 121.
 Ausgleich der Zahlzusagen § 35, 39.
 Berechnung der Minderung und des Schadenersatzes § 22.
 Dampfdüse § 61.
 Dampfgeschwindigkeit im Ventil § 86.
 Dampfmaschine § 65.
 Dampfturbine § 49.
 Dampfvolumen § 43, 55.
 Elektrische Messung § 125.
 Elektrizitätszentrale § 15.
 Entropiediagramm § 108.
 Exponentenbestimmung § 57, 79.
 Fehlerbestimmung § 7, 29.
 Gasmaschine § 89.
 Geschwindigkeit im Ventil (Dampf) § 86; (Wasser) 121.
 Gütegrad (Dampfmaschine) § 71; (Gasmaschine) 105.
 Heizwert § 109.
 Indizierte Leistung § 69, 93.
 Kolbenpumpe § 114.
 Kreiselpumpe § 125, 127.
 Kühlanlage § 153, 154.
 Ölmotor § 109.
 Pumpwerk mit Ölmotor § 14.
 Rankinisierung § 77.
 Reglereigenschaften § 158, 161, 162.
 Resonanz § 123.
 Spezifische Wärme von Gasgemisch § 32 a, 108.
 Temperaturen in Gasmaschine § 106; im Kompressor 147.
 Überhitzerleistung § 26.
 Verdampfungsversuche § 17.
 Ventilator § 135; Kennzahlen 141; Lässigkeit 143.
 Ventillbewegung § 86, 122.
 Verlust bei Leerlauf § 67.
 Volumetrischer Wirkungsgrad der Kolbenpumpe § 114.
 Wärmebilanz (Dampfkessel) § 60; (Dampfkraftanlage) 76; (Gasmaschine) 97; (Kühlanlage) 153.
 Wärmeinhalt von Dampf § 26.
 Wärmespeicherung (Dampfkessel) § 33.
 Wärmeverlust § 97, 103, 136.
 Wasserwärmer § 43.
 Zahlzusage, Wortzusage § 7, 8.
 Zeitdiagramme (Pumpe) § 123; (Pumpenventil) 122.
 Zentrifugalpumpe siehe Kreiselpumpe.
 Zuanlage, künstliche § 8, 37.
 Zugesagte Eigenschaften § 18, 22.
 Zugstärke (Kessel) § 8.
 Zugverhältnisse am Kessel § 34, 36.
 Zündöl und Treiböl § 109.
 Zündfähigkeit des Gemisches § 99.
 Zündung aussetzend § 111.
 —, Kerzen- und Abreiß- § 102.
 Zündungszeit § 98; und Drehzahl 102; und Mischung 101.
 Zusagen, Gleichzeitigkeit § 13.
 —, mehrere § 8, 13, 14, 15; siehe Gewährleistung.
 Zustand der Maschine § 12.
 Zustandswerte und Mengenwerte § 6.
 Zweiter Hauptsatz § 47, 87 a, 150.
 Zwischenabschlüsse, Zwischenablesungen § 27, 49, 89, 114.
 Zwischendampfenahme § 87 a.
 Zylindervolumen und Gütegrad § 71.

Maschinentechnisches Versuchswesen. Von Professor Dr.-Ing. **A. Gramberg**, Oberingenieur an den Höchster Farbwerken.

Erster Band: **Technische Messungen bei Maschinenuntersuchungen und zur Betriebskontrolle.** Zum Gebrauch in Maschinenlaboratorien und in der Praxis. Fünfte, vielfach erweiterte und umgearbeitete Auflage. Mit 826 Figuren im Text. (877 S.) 1923.
Gebunden 18 Goldmark / Gebunden 4.80 Dollar

Technische Untersuchungsmethoden zur Betriebskontrolle insbesondere zur Kontrolle des Dampfbetriebes. Zugleich ein Leitfaden für die Übungen in den Maschinenbaulaboratorien Technischer Lehranstalten. Von Professor **Julius Brand**, Oberlehrer der Staatl. vereinigten Maschinenbauschulen zu Elberfeld. Mit einigen Beiträgen von Dipl.-Ing. Oberlehrer **Robert Heermann**. Vierte, verbesserte Auflage. Mit 277 Textabbildungen, 1 lithographischen Tafel und zahlreichen Tabellen. (285 S.) 1921.
Gebunden 12 Goldmark / Gebunden 2.90 Dollar

Die Dampfkessel nebst ihren Zubehörteilen und Hilfseinrichtungen. Ein Hand- und Lehrbuch zum praktischen Gebrauch für Ingenieure, Kesselbesitzer und Studierende. Von Professor **R. Spackhaver** und Ingenieur **Fr. Schneiders** †. Zweite, verbesserte Auflage. Unter Mitarbeit von Dipl.-Ing. **A. Ruster**. Mit 810 Abbildungen im Text. (489 S.) 1924.
Gebunden 40.50 Goldmark / Gebunden 9.70 Dollar

F. Tetzner, Die Dampfkessel. Lehr- und Handbuch für Studierende Technischer Hochschulen, Schüler Höherer Maschinenbauschulen und Techniken sowie für Ingenieure und Techniker. Siebente, erweiterte Auflage von **O. Heinrich**, Studienrat an der Beuthschule zu Berlin. Mit 467 Textabbildungen und 14 Tafeln. (422 S.) 1923.
Gebunden 10 Goldmark / Gebunden 2.40 Dollar

Handbuch der Feuerungstechnik und des Dampfkesselbetriebes mit einem Anhang über allgemeine Wärmetechnik. Von Dr.-Ing. **Georg Herberg**, Vorstandsmitglied der Ingenieurgesellschaft für Wirtschaft A.-G., Stuttgart. Dritte, verbesserte Auflage. Mit 62 Textabbildungen, 91 Zahlentafeln sowie 48 Rechnungsbeispielen. (350 S.) 1922.
Gebunden 11 Goldmark / Gebunden 2.65 Dollar

Die Grundgesetze der Wärmeleitung und des Wärmeüberganges. Ein Lehrbuch für Praxis und technische Forschung. Von Oberingenieur Dr.-Ing. **Heinrich Gröber**. Mit 78 Textfiguren. (279 S.) 1921.
9 Goldmark / 2.15 Dollar

Die Wärme-Übertragung. Auf Grund der neuesten Versuche für den praktischen Gebrauch zusammengestellt. Von Dipl.-Ing. **M. ten Bosch** in Zürich. Mit 46 Textabbildungen. (127 S.) 1922.
5 Goldmark / 1.20 Dollar

Technische Thermodynamik. Von Professor Dipl.-Ing. **W. Schüle**.
Erster Band: **Die für den Maschinenbau wichtigsten Lehren nebst technischen Anwendungen.** Vierte, neubearbeitete Auflage. Mit 225 Textfiguren und 7 Tafeln. Berichtigter Neudruck. (569 S.) 1923. Gebunden 18 Goldmark / Gebunden 4.80 Dollar
Zweiter Band: **Höhere Thermodynamik** mit Einschluß der chemischen Zustandsänderungen nebst ausgewählten Abschnitten aus dem Gesamtgebiet der technischen Anwendungen. Vierte, erweiterte Auflage. Mit 228 Textfiguren und 5 Tafeln. (527 S.)
Gebunden 18 Goldmark / Gebunden 4.80 Dollar

Leitfaden der Technischen Wärmemechanik. Kurzes Lehrbuch der Mechanik der Gase und Dämpfe und der mechanischen Wärmelehre. Von Professor Dipl.-Ing. **W. Schüle**. Dritte, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 93 Textfiguren und 3 Tafeln. (232 S.) 1922.
5 Goldmark / 1.20 Dollar

Taschenbuch für den Maschinenbau. Bearbeitet von zahlreichen Fachleuten. Herausgegeben von Professor **Heinrich Dubbel**, Ingenieur, Berlin. Vierte, erweiterte und verbesserte Auflage. Mit 2786 Textfiguren. In zwei Bänden. (1739 S.) 1924.

Gebunden 18 Goldmark / Gebunden 4.30 Dollar

Die Steuerungen der Dampfmaschinen. Von Professor **Heinrich Dubbel**, Ingenieur. Dritte, umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 515 Textabbildungen. (599 S.) 1923. Gebunden 10 Goldmark / Gebunden 2.40 Dollar

Kolbendampfmaschinen und Dampfturbinen. Ein Lehr- und Handbuch für Studierende und Konstrukteure. Von Professor **Heinrich Dubbel**, Ingenieur. Sechste, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 566 Textfiguren. (530 S.) 1923. Gebunden 11 Goldmark / Gebunden 2.65 Dollar

Anleitung zur Berechnung einer Dampfmaschine. Ein Hilfsbuch für den Unterricht im Entwerfen von Dampfmaschinen. Von **R. Graßmann**, o. Professor an der Technischen Hochschule in Karlsruhe i. B., Geheimer Hofrat, Regierungsbaumeister a. D. Vierte, umgearbeitete und stark erweiterte Auflage. Mit 25 Anhängen, 471 Figuren und 2 Tafeln. (658 S.) 1924. Gebunden 28 Goldmark / Gebunden 6.70 Dollar

Kolben- und Turbo-Kompressoren. Theorie und Konstruktion. Von Professor Dipl.-Ing. **P. Ostertag**, Winterthur. Dritte, verbesserte Auflage. Mit 358 Textabbildungen. (308 S.) 1923. Gebunden 20 Goldmark / Gebunden 4.80 Dollar

Kälteprozesse. Dargestellt mit Hilfe der Entropie-Tafel. Von Dipl.-Ing. Professor **P. Ostertag**, Winterthur. Mit 58 Textabbildungen und 3 Tafeln. (120 S.) 1924. 6 Goldmark; gebunden 6.80 Goldmark / 1.45 Dollar; gebunden 1.65 Dollar

Die Kältemaschine. Grundlagen, Berechnung, Ausführung, Betrieb und Untersuchung von Kälteanlagen. Von Dipl.-Ing. **M. Hirsch**, beratender Ingenieur V. B. I. Mit 261 Abbildungen im Text. (522 S.) 1924. Gebunden 20 Goldmark / Gebunden 4.75 Dollar

Die Entropietafel für Luft und ihre Verwendung zur Berechnung der Kolben- und Turbo-Kompressoren. Von Dipl.-Ing. **P. Ostertag**, Winterthur. Zweite, verbesserte Auflage. Mit 18 Textfiguren und 2 Diagrammtafeln. Unveränderter Neudruck. (46 S.) 1922. 2.50 Goldmark / 0.60 Dollar

Neue Tabellen und Diagramme für Wasserdampf. Von Professor Dr. **R. Mollier**, Dresden. Mit 2 Diagrammtafeln. Unveränderter Neudruck. (26 S.) 1922. 2 Goldmark / 0.50 Dollar

Regelung der Kraftmaschinen. Berechnung und Konstruktion der Schwungräder, des Massenausgleichs und der Kraftmaschinenregler in elementarer Behandlung. Von Hofrat Professor Dr.-Ing. **Max Tolle** in Karlsruhe. Dritte, verbesserte und vermehrte Auflage. Mit 532 Textfiguren und 24 Tafeln. (902 S.) 1921. Gebunden 33.50 Goldmark / Gebunden 8 Dollar

Der Regelvorgang bei Kraftmaschinen auf Grund von Versuchen an Exzenterreglern. Von Dr.-Ing. **A. Watzinger**, Professor der Norweg. Technischen Hochschule in Trondhjem und Dipl.-Ing. **Leif J. Hanssen**, Assistent am Laboratorium für Wärmekraftmaschinen der Norweg. Technischen Hochschule in Trondhjem. Mit 82 Abbildungen. (92 S.) 1923. 7 Goldmark; gebunden 8 Goldmark / 1.70 Dollar; gebunden 1.95 Dollar

Drehschwingungen in Kolbenmaschinenanlagen und das Gesetz ihres Ausgleichs. Von Dr.-Ing. **Hans Wydler**, Kiel. Mit einem Nachwort: Betrachtungen über die Eigenschwingungen reibungsfreier Systeme von Professor Dr.-Ing. Guido Zerkowitz, München. Mit 46 Textfiguren. (106 S.) 1922. 6 Goldmark / 1.45 Dollar

Die Berechnung der Drehschwingungen und ihre Anwendung im Maschinenbau. Von **Heinrich Holzer**, Oberingenieur der Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg. Mit vielen praktischen Beispielen und 48 Textfiguren. (204 S.) 1921. 8 Goldmark; gebunden 9 Goldmark / 1.95 Dollar; gebunden 2.15 Dollar

Dynamik der Leistungsregelung von Kolbenkompressoren und -pumpen (einschl. Selbstregelung und Parallelbetrieb). Von Dr.-Ing. **Leo Walther** in Nürnberg. Mit 44 Textabbildungen, 23 Diagrammen und 85 Zahlenbeispielen. (156 S.) 1921. 4.60 Goldmark / 1.10 Dollar

Graphische Thermodynamik und Berechnen der Verbrennungsmaschinen und Turbinen. Von **M. Seiliger**, Ingenieur-Technolog. Mit 71 Abbildungen, 2 Tafeln und 14 Tabellen im Text. (258 S.) 1922. 6.40 Goldmark; gebunden 8 Goldmark / 1.55 Dollar; gebunden 1.95 Dollar

Graphische Dynamik. Ein Lehrbuch für Studierende und Ingenieure. Mit zahlreichen Anwendungen und Aufgaben. Von **Ferdinand Wittenbauer** †, Professor an der Technischen Hochschule in Graz. Mit 745 Textfiguren. (813 S.) 1923. Gebunden 30 Goldmark / Gebunden 7.15 Dollar

Technische Schwingungslehre. Ein Handbuch für Ingenieure, Physiker und Mathematiker bei der Untersuchung der in der Technik angewendeten periodischen Vorgänge. Von Dipl.-Ing. Dr. **Wilhelm Hort**, Oberingenieur bei der Turbinenfabrik der AEG., Privatdozent an der Technischen Hochschule in Berlin. Zweite, völlig umgearbeitete Auflage. Mit 423 Textfiguren. (836 S.) 1922. Gebunden 24 Goldmark / Gebunden 5.75 Dollar

Christmann-Baer, Grundzüge der Kinematik. Zweite, umgearbeitete und vermehrte Auflage von Dr.-Ing. **H. Baer**, Professor an der Technischen Hochschule in Breslau. Mit 164 Textabbildungen. (144 S.) 1923. 4 Goldmark; gebunden 5.50 Goldmark / 0.95 Dollar; gebunden 1.35 Dollar

Dampf- und Gasturbinen. Mit einem Anhang über die Aussichten der Wärmekraftmaschinen. Von Dr. phil. Dr.-Ing. **A. Stodola**, Professor an der Eidgen. Techn. Hochschule in Zürich. Sechste Auflage. Unveränderter Abdruck der fünften Auflage. Mit einem Nachtrag nebst Entropie-Tafel für hohe Drücke und B¹T-Tafel zur Ermittlung des Rauminhalts. Mit 1138 Textabbildungen und 13 Tafeln. (1122 S.) 1924.

Gebunden 50 Goldmark / Gebunden 12 Dollar

Nachtrag nebst Entropietafel für hohe Drücke und B¹T-Tafel zur Ermittlung des Rauminhaltes. Sonderausgabe zur Ergänzung der 5. Auflage. (32 S.) 1924.

3 Goldmark / 0.75 Dollar

Sonderausgaben der Tafeln:

JS-Tafel für Wasserdampf. Sonderausgabe in doppelter Größe der Buchbeilage (d. i. Originalgröße). 1.20 Goldmark / 0.30 Dollar

Entropietafel I für Gase. 0.80 Goldmark / 0.20 Dollar

Entropietafel II für Gase. (Mit den wahren spezifischen Wärmen.) 0.80 Goldmark / 0.20 Dollar

Das Entwerfen und Berechnen der Verbrennungskraftmaschinen und Kraftgasanlagen. Von Maschinenbaudirektor Dr.-Ing. e. h. **Hugo Güldner** in Aschaffenburg. Dritte, neubearbeitete und bedeutend erweiterte Auflage. Mit 1282 Textfiguren, 35 Konstruktions tafeln und 200 Zahlen tafeln. Dritter, unveränderter Neudruck. (809 S.) 1922.

Gebunden 42 Goldmark / Gebunden 10 Dollar

Untersuchungen über den Einfluß der Betriebswärme auf die Steuerungseingriffe der Verbrennungsmaschinen. Von Dr.-Ing.

C. H. Güldner. Mit 51 Abbildungen im Text und 5 Diagrammtafeln. (128 S.) 1924. 5.10 Goldmark; gebunden 6 Goldmark / 1.25 Dollar; gebunden 1.45 Dollar

Schnellaufende Dieselmotoren. Beschreibungen, Erfahrungen, Berechnung, Konstruktion und Betrieb. Von Professor Dr.-Ing. **O. Föppl**, Marinebaurat a. D., Braunschweig, Dr.-Ing. **H. Strombeck**, Obergeringieur, Leunawerke, und Professor Dr. techn. **L. Ebermann** in Lemberg. Zweite, veränderte und ergänzte Auflage. Mit 147 Textabbildungen und 8 Tafeln, darunter Zusammenstellungen von Maschinen von AEG, Benz, Daimler, Danziger Werft, Germaniawerft, Görlitzer M.A., Körting und MAN Augsburg. (236 S.) 1922.

Gebunden 9 Goldmark / Gebunden 2.15 Dollar

Die Pumpen. Ein Leitfaden für Höhere Maschinenbauschulen und zum Selbstunterricht. Von Professor Dipl.-Ing. **H. Matthiessen** in Kiel und Dipl.-Ing. **E. Fuchslocher** in Kiel. Mit 137 Textabbildungen. (89 S.) 1923.

1.60 Goldmark / 0.40 Dollar

Die Kolbenpumpen einschließlich der Flügel- und Rotationspumpen. Von Professor **H. Berg** in Stuttgart. Zweite, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 536 Textfiguren und 13 Tafeln. (436 S.) 1921.

Gebunden 16 Goldmark / Gebunden 3.85 Dollar

Kreiselpumpen. Eine Einführung in Wesen, Bau und Berechnung neuzeitlicher Kreisel- oder Zentrifugalpumpen. Von Dipl.-Ing. **L. Quantz** in Stettin. Mit 109 Textabbildungen. (112 S.) 1922.

3.80 Goldmark / 0.95 Dollar

Wasserkraftmaschinen. Eine Einführung in Wesen, Bau und Berechnung neuzeitlicher Wasserkraftmaschinen und Wasserkraftanlagen. Von Dipl.-Ing. **L. Quantz** in Stettin. Fünfte, erweiterte und verbesserte Auflage. Mit 179 Textfiguren. (155 S.) 1924.

3 Goldmark / 0.75 Dollar