

# METALLPHYSIK

VON

WALTHER DEUTSCH

MIT 20 ABBILDUNGEN



SPRINGER FACHMEDIEN WIESBADEN GMBH

# METALLPHYSIK



# METALLPHYSIK

VON

WALTHER DEUTSCH

---

MIT 20 ABBILDUNGEN



SPRINGER FACHMEDIEN WIESBADEN GMBH

---

Alle Rechte vorbehalten.

---

ISBN 978-3-663-00786-9      ISBN 978-3-663-02699-0 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-663-02699-0

Copyright, 1916, by Springer Fachmedien Wiesbaden  
Originally published by Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, Germany 1916

## Vorwort.

---

Das vorliegende, den modernen Forschungen angepaßte Buch soll dem Techniker, wie dem Physiker als Nachschlagewerk, wie als Lehrbuch in gleichem Maße dienen. Ich habe mich darin neben der notwendigen Prägnanz vor allem einer möglichst großen Einfachheit des Ausdrucks befließigt, um auch dem Nichtfachmann seinen Gebrauch zu ermöglichen.

Es hat sich nämlich — besonders in den Kreisen der Metalltechnik — das Bedürfnis immer mehr geltend gemacht, ein handliches Nachschlagewerk zu besitzen, aus dem man die Eigenschaften der Metalle und damit die physikalischen Grundlagen jener Technik nach allen Richtungen hin kennen lernen kann und das jedem, der sich für dieses Gebiet interessiert, einen zunächst abschließenden Überblick über das Wesen der Metalle gewährt.

Einen großen Teil des Buches nehmen die Tabellen ein, in denen die Metalle nicht, wie üblich, in alphabetischer Reihenfolge aufgeführt sind, sondern, wieder der Wertung der Technik zuliebe so, daß die bekanntesten und wichtigsten an erster Stelle stehen.

Bei der Durchsicht der Korrekturen hat mich Herr J. Czochralski unterstützt.

Dem Verlag bin ich für den deutlichen Satz und die gute Ausstattung des Buches Dank schuldig.

Berlin-Karlshorst, im August 1916.

Der Verfasser.

# Inhaltsübersicht.

---

	Seite
I. Einteilung und einige augenfällige Eigenschaften der Metalle (Dichte) . . . . .	1
II. Messung an Metallkristallen . . . . .	3
1. Wesen der Metallkristalle . . . . .	3
2. Die Kristallgestalt . . . . .	5
3. Korngrenzen . . . . .	10
4. Kristallgröße . . . . .	10
III. Kompressibilität der Metalle . . . . .	12
IV. Das Verhalten der Metalle in der Wärme . . . . .	14
1. Thermometrie . . . . .	14
2. Lineare Ausdehnung . . . . .	16
3. Schmelzen und Verdampfen . . . . .	17
4. Spezifische Wärme . . . . .	21
5. Wärmeleitfähigkeit, Strahlung . . . . .	24
V. Elastizität der Metalle . . . . .	24
1. Elastizitätsmodul . . . . .	24
2. Torsionsmodul . . . . .	26
3. Viskosität . . . . .	29
4. Poissonsche Konstante . . . . .	29
5. Härte . . . . .	31
VI. Plastizität der Metalle . . . . .	31
VII. Schallschwingungen in Metallen . . . . .	33
VIII. Kapillarität . . . . .	34
1. Kapillarität der flüssigen Metalle . . . . .	34
2. Kapillarität der festen Metalle . . . . .	35
IX. Metalloptik . . . . .	36
1. Allgemeines über Energiestrahlen . . . . .	36
2. Brechungsindex der Metalle . . . . .	38
3. Reflexion an Metallen . . . . .	38

	Seite
4. Spektrum von Metaldämpfen . . . . .	40
5. Polarisation . . . . .	42
6. Lichtelektrischer Effekt an Metalloberflächen . . . . .	42
X. Das magnetische Verhalten der Metalle . . . . .	44
XI. Elektrizität und Metalle . . . . .	47
1. Elektrizitätsleitung in Metallen . . . . .	47
2. Wärme- und Elektrizitätsleitung . . . . .	56
3. Thermoelektrische Kraft . . . . .	59
4. Peltier-Effekt . . . . .	63
5. Thomson-Effekt . . . . .	64
6. Magnetische Effekte . . . . .	65
7. Elektrolytische Lösungstension der Metalle . . . . .	68
8. Radioaktivität . . . . .	69
XII. Anhang. Absolute Maßeinheiten . . . . .	70
Literatur und Quellen . . . . .	72
Alphabetisches Namen- und Sachregister . . . . .	73

---

## I. Einteilung und einige augenfällige Eigenschaften der Metalle (Dichte).

Von den bis jetzt bekannten 85 Elementen der Chemie sind 60 Metalle; davon sind jedoch nur etwa 24 in größerem Maßstabe gewerblich verwertet; von diesen sind wieder etwa 11 durch den täglichen praktischen Gebrauch gut bekannt. Es sind dies:

Metall	Gewicht eines Kubikzentimeters in Gramm bei 4° C	Metall	Gewicht eines Kubikzentimeters in Gramm bei 4° C
Eisen . . . . .	7,86	Aluminium . . . . .	2,60
Kupfer . . . . .	8,92	Platin . . . . .	21,50
Silber . . . . .	10,53	Quecksilber . . . . .	13,59
Gold . . . . .	19,32	Zinn . . . . .	7,29
Nickel . . . . .	8,90	Zink . . . . .	7,15
Blei . . . . .	11,37		

Die Farben der übrigen 13 Metalle ähneln mehr oder weniger denen von Silber und Eisen:

Metall	Farbe	Gewicht eines Kubikzentimeters in Gramm bei 4° C
Natrium . . . . .	Silberähnlich	0,978
Magnesium . . . . .	„	1,74
Chrom . . . . .	„	6,50
Kadmium . . . . .	„	8,60
Baryum . . . . .	„	3,75
Kalzium . . . . .	„	1,57

Metall	Farbe	Gewicht eines Kubikzentimeters in Gramm bei 4° C
Strontium . . . . .	Silberähnlich (gelblich)	2,54
Kalium . . . . .	„ (bläulich)	0,87
Wismut . . . . .	„ (rötlich)	9,80
Mangan . . . . .	Eisenähnlich	7,39
Kobalt . . . . .	„	8,60
Arsen . . . . .	„	5,73
Antimon . . . . .	Zinkähnlich	6,71

Natrium, Kalium und Kalzium verbinden sich an der Luft zusehends mit Sauerstoff; in sauerstofffreier Atmosphäre bleibt der Metallglanz erhalten.

Dichte der selteneren Metalle.

Metall	Gewicht eines Kubikzentimeters in Gramm bei 4° C	Metall	Gewicht eines Kubikzentimeters in Gramm bei 4° C
Lithium . . . . .	0,59	Indium . . . . .	7,42
Beryllium . . . . .	1,99	Cäsium . . . . .	1,88
Skandium . . . . .	3,86	Lanthan . . . . .	6,1
Titan . . . . .	3,7 (?)	Cerium . . . . .	6,68
Vanadium . . . . .	5,5	Praseodymium . . . . .	6,47
Gallium . . . . .	5,95	Neodymium . . . . .	6,96
Germanium . . . . .	5,47	Tantal . . . . .	10,4
Rubidium . . . . .	1,52	Wolfram . . . . .	19,1
Zirkonium . . . . .	4,15	Osmium . . . . .	22,48
Niobium . . . . .	7,2	Iridium . . . . .	22,42
Molybdän . . . . .	8,6	Thallium . . . . .	11,85
Ruthenium . . . . .	12,26	Thorium . . . . .	11,00
Rhodium . . . . .	12,1	Uran . . . . .	18,7
Palladium . . . . .	11,4		

Bestimmung der Dichtigkeit:

a) Durch Wägung und Ausmessung des Volumens (mit dem Maßstab oder durch das Ansteigen der Flüssigkeit in einer kalibrierten Röhre) bei einfach gestalteten Körpern; sie ist gleich dem erhaltenen Gewicht in Gramm, geteilt durch das Volumen in Kubikzentimetern.

b) Mit dem Pyknometer (Abb. 1): Dieses dient vorzugsweise für sehr geringe Mengen (Späne usw.); es ist eine kleine Flasche, die ganz oder bis zu einer Marke gefüllt wird und in die der Körper geworfen wird. Wiegt der Körper  $m$  g, das mit Wasser gefüllte Pyknometer  $P$  und das den Körper und Wasser enthaltende Pyknometer  $P'$ , so ist das verdrängte Wassergewicht (oder auch die Wassermenge, da die Dichte des Wassers = 1 ist):

$$W = P + m - P'$$

und das spezifische Gewicht:

$$s = \frac{m}{W}.$$

c) Nach der Auftriebsmethode: Der Körper von  $m$  g wiegt in einer anderen Flüssigkeit, deren Dichte  $d$  ist,  $p$  g, dann ist das spezifische Gewicht des Körpers:

$$s = \frac{m \cdot d}{m - p}.$$

Auf dem Grundsatz der Auftriebsmethode beruht die Nicholsonsche Senkwage und die Jollysche Federwage.

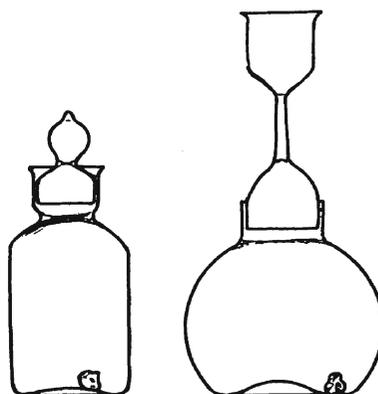
Für diejenigen Legierungen, deren Bestandteile im festen Zustande nicht ineinander löslich sind, also ein heterogenes Kristallgemenge bilden, kann die Dichte leicht berechnet werden: Sie folgt einfach der Mischungsregel.

In jedem anderen Falle folgt sie jedoch unbekanntem Gesetzen.

## II. Messung an Metallkristallen.

1. **Wesen der Metallkristalle.** Die natürliche Gestalt der Metalle ist nicht die, in der wir sie täglich sehen, sondern die Kristallform. Kupfer kristallisiert z. B. wie Steinsalz in Würfelform, besonders aber auch in anderen Formen des regulären Systems. Mit der Größe der Kristalle wächst im allgemeinen die Schwierigkeit ihrer Herstellung.

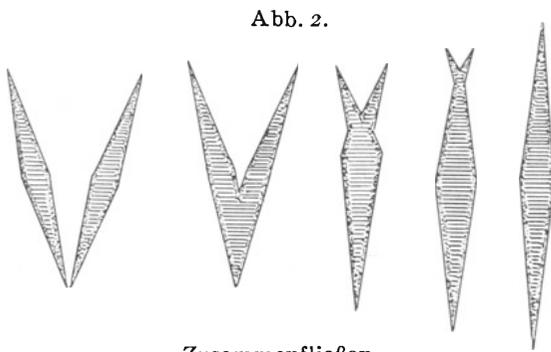
Abb. 1.



Pyknometer.

Um das Wesen der Metallkristalle zu ergründen, ist es besser, sich mit dem Studium der „flüssigen Kristalle“ zu befassen, weil die weicheren Metalle insbesondere bei höheren Temperaturen keinerlei Sprödigkeit mehr aufweisen und eine so geringe Elastizitätsgrenze besitzen, daß sie sich von den flüssigen Kristallen kaum mehr unterscheiden.

a) Flüssige Kristalle. Zähne Flüssigkeiten haben keine Elastizitätsgrenze; wenn nun Lehmann im Jahre 1906 im Jodsilber eine Flüssigkeit fand, die trotzdem unter dem Mikro-



Zusammenfließen  
flüssiger Kristalle des Ammoniumoleats  
(nach O. Lehmann).

oskop ausgeprägte polyedrische Formen abscheidete, wenn man die Temperatur auf ein bestimmtes Maß brachte, so ist damit erwiesen, daß die polyedrische Form von Kristallen kein Kriterium für das Vorhandensein einer Elasti-

zitätsgrenze ist. Dies ist besonders deutlich bei verschiedenen leichtflüssigen Substanzen, z. B. bei den verschiedenen Abarten der Schmierseife, insbesondere dem Ammoniumoleat. Hier scheiden sich beim Erkalten zunächst sehr kleine (flüssige) Kriställchen aus, die sich durch Zusammenfließen (genau wie bei zwei Öltropfen) sehr bald zu großen, optisch einachsigen Pyramiden vereinigen (siehe Abb. 2).

b) Definition des Kristallbegriffs. Homogenität und polyedrische Form sind nur dann einem Kristall eigen, wenn er sich im zwangsfreien Zustande befindet. Die flüssigen Kristalle sind plastisch deformierbar und fließen, ohne ihre Kristallnatur zu verändern.

Es gibt demnach wirklich plastische Kristalle.

Da ferner Kristalle, die unter dem Einfluß eines äußeren Zwanges stehen, in übersättigten Lösungen mit gekrümmten Flächen weiterwachsen, sich also nicht zu einem ebenflächigen

Polyeder ergänzen, ist man genötigt, das Hauptmerkmal eines Kristalles weder in seiner Homogenität, noch in der Form seiner Begrenzung, sondern in seinem Wachstum zu suchen. Wird ein Kristall durch Verbiegen oder Zerquetschen in ein Haufwerk von kleineren Kristallen verwandelt, deren Zwischenräume wieder durch kleinere und kleinste Kriställchen ausgefüllt sind, so kann man ihn natürlich nicht mehr mit dem Namen Kristall belegen.

„Ein Kristall ist demnach eine feste Phase ohne Diskontinuität, welche anisotrop ist, mindestens bezüglich des Wachstums“ (Lehmann).

c) Molekularaufbau eines Kristalles. Dieselbe molekulare Anziehung, die bei isotropen Flüssigkeiten diese zur Kugelgestalt ausbildet (Öltropfen in Wasser), täuscht auch bei flüssigen Kristallen eine Oberflächenspannung vor. Außerdem muß den Molekeln noch eine zunächst rätselhafte Kraft innewohnen, die sie befähigt, ebenflächige Formen anzustreben — Gestaltungskraft —, zu wachsen, ja selbst sich fortzubewegen. Besonders augenfällig wird diese Kraft — die molekulare Richtkraft — wieder bei den flüssigen Kristallen. Diese stellen sich in den Zonen stärkster Deformation sämtlich parallel und quer zur Gleitrichtung, etwa wie Eisenfeilspäne in einem Magnetfelde. Diese Richtkräfte müssen, wie Poisson schon gezeigt hat, auch schon im Gebiete der elastischen Formänderungen auftreten, ja sie sind mit dem elastischen Widerstand zu identifizieren, der sich als Resultante der molekularen Richtkräfte ergibt.

**2. Die Kristallgestalt.** Die Gestaltungskraft der Metalle wirkt beim Fehlen eines äußeren Zwanges zur Bildung von Polyederformen hin; jedoch nicht alle ebenflächigen, ja nicht einmal alle regelmäßigen Polyeder sind mögliche Kristallformen. Die Fülle der möglichen Formen läßt eine Einteilung in nur sieben Kristallsysteme zu, die aus der folgenden Übersicht hervorgeht (Abb. 3 a. f. S.).

Es sind nur wenige besondere Fälle bekannt, in welchen eine Substanz Kristalle bildet, die verschiedenen Systemen angehören.

In jedem einzelnen System unterscheidet man gewisse Gruppen und immer ist eine dieser Gruppen — die holoedrische — dadurch ausgezeichnet, daß man die übrigen aus ihr ableiten kann. Die holoedrische (Vollflächner-)Gruppe umfaßt die Formen, die in dem betreffenden System dem höchsten

Abb. 3.

*Das triklone od. dreif. geneigte System*

*mit 3 ungleichlangen schiefen Achsen*



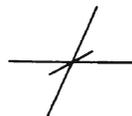
*Das monokline od. einf. geneigte System*

*mit 3 ungleichlangen Achsen von denen eine Achse schief ist*



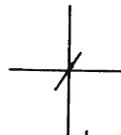
*Das rhomboedrische od. trigonale System*

*mit 3 gleichlangen aber schiefen Achsen*



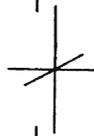
*Das rhombische System*

*mit 3 ungleichlangen Achsen*



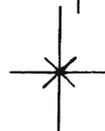
*Das tetragonale System*

*mit einer Hauptachse u. 2 gleichl. Nebenachsen*



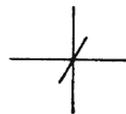
*Das hexagonale System*

*mit einer Hauptachse u. 3 gleichl. Nebenachsen*



*Das reguläre System*

*mit 3 gleichlangen Hauptachsen*

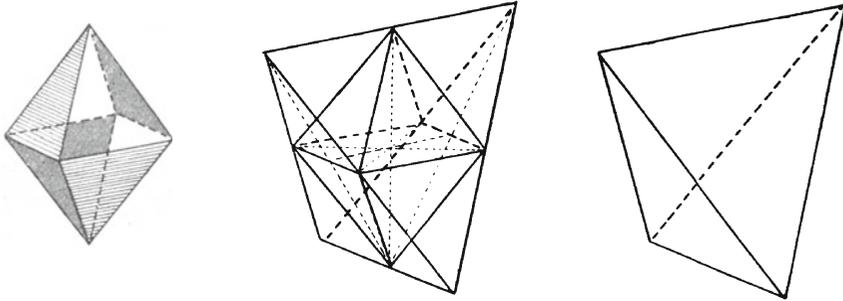


Grad der Symmetrie entsprechen: einfache Formen der holoedrischen Gruppe des regulären Systems sind z. B. der Würfel (Hexaeder), das Oktaeder, das Rhombendodekaeder usw.

Zu den übrigen Gruppen eines Systemes gelangt man, wenn man den Symmetriegrad reduziert; am einfachsten geschieht das dadurch, daß man bestimmte Symmetrieebenen

wegfallen läßt, also die auf einer Seite der betreffenden Ebene liegenden Flächen unterdrückt, während die übrigen sich in entsprechender Weise ausdehnen; so erhält man z. B. aus dem Oktaeder das Tetraeder (siehe Abb. 4). Die Anzahl der Begrenzungsflächen dieser Teilflächner (Meroeder) ist natürlich

Abb. 4.



Das Tetraeder als Hemieder des Oktaeders.

nur die Hälfte, ein Viertel oder ein Achtel der Begrenzungsflächen des Ursprungsholoeders, und man unterscheidet daher Hälftflächner (Hemieder), Viertelflächner (Tetartoeder) und Achtelflächner (Ogdoeder). Für einige Metalle sind im folgenden die Formen angegeben:

Stoff	System	Form	Ausbildung der Formen
Eisen . . . . .	Regulär	Holoedrisch	Hexaeder?
Kupfer . . . . .	"	"	Verzerrte Oktaeder, Würfel, Rhombendodekaeder, Zwillingsformen, Skelettformen.
Silber . . . . .	"	"	Verzerrte Würfel, Oktaeder, Rhombendodekaeder, oft geknickt, Zwillingsformen.
Gold . . . . .	"	"	Verzerrte Oktaeder oder Würfel, auch Rhombendodekaeder. Kombin. und Zwillingsformen.
Blei . . . . .	"	"	Meist Oktaeder.
Aluminium . . .	"	"	Oktaedrische Skelettformen.

Stoff	System	Form	Ausbildung der Formen
Platin . . . . .	Regulär	Holoedrisch	Würfel, selten Oktaeder und Pyramidenwürfel. Zwillingsformen.
Quecksilber . .	"	"	Oktaeder, künstlich in Hexakisoktaedern.
Zinn . . . . .	Tetragonal und auch rhomboedrisch	?	?
Zink . . . . .	Hexagonal	Holoedrisch	Dihexagonale Tafeln.
Natrium . . . .	Tetragonal? regulär?	"	Pyramiden mit 50° Kantenwinkel an der Spitze. Oktaeder?
Magnesium . .	Hexagonal	"	Dihexagonale Bipyramiden.
Kadmium . . . .	"	"	"
Kalzium . . . .	"	"	Tafeln, Rhomboeder.
Kalium . . . . .	Tetragonal	"	Bipyramiden, Kantenwinkel an der Spitze 76°, an der Basis 52°.
Wismut . . . . .	Hexagonal	Rhomboedrisch-hemiedrisch <sup>1)</sup>	Würfelähnliche Rhomboeder, Kombinationen, Zwillinge, skelettartige (dendritische) Spiralen.
Antimon . . . .	"	"	Würfelähnliche Rhomboeder oder tafelförmig. Meist in Zwillingsform.
Beryllium . . .	"	Holoedrisch	Prismen, Tafeln, Kristallskelette.
Palladium . . .	Regulär und rhomboedrisch	?	?
Osmium . . . . .	Regulär	Holoedrisch	Oktaeder.
Iridium . . . . .	"	"	"
Amalgam (Hg, Ag) . .	"	"	Flächenreich.

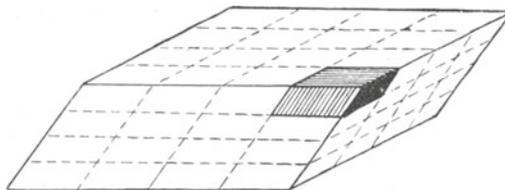
<sup>1)</sup> Aus den Holoedern des hexagonalen Systems dadurch hervorgehend, daß die auf der Hauptachse senkrecht stehende Symmetrieebene und noch weitere drei dazu senkrechte, im Winkel von 60° zueinander stehende Symmetrieebenen unterdrückt werden. Das Hauptrhomboeder hat angenähert rechte Winkel und ist daher würfelähnlich.

Stoff	System	Form	Ausbildung der Formen
<b>Einige Legierungen (Metallverbindungen).</b>			
Cu <sub>2</sub> Zn (Messing)	Regulär	Holoedrisch	Würfel?
CuZn "	"	?	Würfel?
Cu <sub>4</sub> Sn (Bronze)	Hexagonal	Hemiedrisch	Rhomboeder mit Basis.
Cu <sub>3</sub> Sn . "	?	?	Sechsstrahlige Kristallskelette.
CuSn . . . . .	Hexagonal	Holoedrisch	Nadelförmige Prismen.

Zu derselben Symmetrieeinteilung gelangt man auch durch die sogenannte „Raumgittertheorie“ (Bravais, Frankenheim). Sommerfeldt beschreibt deren Grundzüge wie folgt:

„Sämtliche holoedrischen Symmetriearten lassen sich durch die Bravaisschen Typen — deren Zahl 14 beträgt — darstellen, d. h. dadurch, daß man den

Abb. 5.



Raumgitteranordnung.

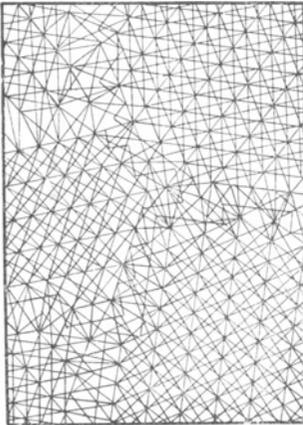
Raum durch kongruente und parallelgestellte Parallelepipede“ (im allgemeinen sind hierschiefwinkelige gemeint, also mit

Rhombenflächen, siehe Abb. 5) „lückenlos ausfüllt und die Ecken dieser Parallelepipede als die Mittelpunkte der Formelemente eines (unbegrenzt groß zu denkenden) Kristalles auffaßt.“ Die Formelemente (Molekel) des regulären Systems sitzen demnach an den Ecken eines Würfelgitters, d. h. eines Gitters, dessen Stäbe nach drei Richtungen parallel und äquidistant angeordnet sind.

Ob diesen „Formelementen“ reale Existenz zukommt, oder ob sie nur als „Schwerpunkte“ von elektromagnetischen Elementarfeldern anzusprechen sind, bleibt dabei natürlich dahingestellt. Jedenfalls haben Beugungserscheinungen, die von M. Laue mit Röntgenstrahlen ausgeführt wurden, die Theorie der Raumgitterstruktur glänzend bestätigt.

Kohäsion oder Oberflächenspannung bewirken nun bei den Metallkristallen selbst dort, wo sie sich ungestört entwickeln können, Abrundung der Kanten, ja vielfach Tropfenbildung. Im Inneren von Metallmassen (Haufwerken) kann man die Kristalle in den meisten Fällen nur noch als Fragmente ansprechen, die, dicht aneinandergelagert, in den verschiedensten Achsenrichtungen orientiert sind (Allotriomorphie); ein solcher Stoff wird „quasiisotrop“ genannt. Auch die Beimischung fremder Stoffe (zwei ineinander unlösliche Phasen) kann die Ausbildung der ebenen Begrenzungsformen verhindern und es gibt daher Übergangsformen von den vollkommen regelmäßigen Kristallen, bis zu denen mit Schuppenform, Faserform usw., die man wohl auch „Kristalliten“ nennt.

Abb. 6.



Kraftrichtungen im Inneren  
und an der Grenze der  
Kristalliten (nach W. Gürtler).

form, Faserform usw., die man wohl auch „Kristalliten“ nennt.

**3. Korngrenzen.** Die Grenze zwischen zwei Metallkristalliten (Körnern) ist nicht nur eine ideelle; sie ist als Zone höherer Widerstandskraft anzusprechen, so zwar, daß gewisse Metalle in bestimmten Zuständen sich wie Zellensysteme mit starren Wänden und weicher Zellsubstanz verhalten. Die mikroskopische Betrachtung von Ätzschliffen lehrt, daß diesen Zonen eine endliche Breite zukommt. Die Anwesenheit solcher Zonen ist hauptsächlich dadurch zu erklären, daß ein Molekel des einen Kornes von sämtlichen Molekeln des anderen

anderen Kornes angezogen und gerichtet wird; dadurch werden besonders die unmittelbar an der Grenze liegenden Molekelschichten eine komplizierte Bewegungsform annehmen, die in einer starken Verspannung ihren Ausdruck findet (s. Abb. 6).

**4. Kristallgröße.** Die Größe von Kristallen kann entweder direkt im Mikroskop (mit Okularmikrometer) oder genauer durch Planimetrierung aus dem Mikroskopbilde geschätzt werden.

Für die Winkelmessung der Metallkristalle werden die Methoden der Kristallographie verwendet.

a) Planimeter. Wegen seiner Einfachheit und Billigkeit (etwa 15  $\mathcal{M}$ ) ist das leider zu wenig gebrauchte Stangenplanimeter von Prytz zu nennen. Es besteht aus einer doppelt gebogenen Stahlstange, die an dem einen Ende eine Spitze zum Umfahren der Fläche, an dem anderen Ende eine „Beilschneide“, die gegen die Stange gerichtet ist, besitzt (siehe Abb. 7). Man setzt ungefähr im Schwerpunkt der Fläche ein, fährt in einer geraden Linie gegen irgendeinen Punkt der Berandung, hierauf im Sinne des Uhrzeigers um die Berandung bis zu demselben Punkt und auf derselben Linie wieder zum Ausgangspunkt zurück.

Hierauf dreht man die Fläche um  $180^\circ$  und wiederholt die Messung mit dem Unterschiede, daß man jetzt entgegengesetzt

dem Sinne des Uhrzeigers die Fläche umfährt. Die Beilschneide wird bei jeder dieser Operationen von einer Anfangsstellung in eine Endstellung übergeführt. Die Entfernung dieser beiden, multipliziert mit der konstanten Länge zwischen Beilschneide und Führungsspitze gibt die Fläche angenähert. Das arithmetische Mittel aus dem erhaltenen Resultat der beiden Operationen gibt Flächen mittlerer Größe mit etwa 1 Proz. Genauigkeit. Fabrikanten sind: der Mechaniker Knudsen, Kopenhagen, Kjöbmadergade 37 (11  $\mathcal{M}$ ). Eine andere Konstruktion hat das von Fieguth vom Mechaniker Grotthaus in Danzig ausgeführte (15  $\mathcal{M}$ , in besserer Ausführung 25  $\mathcal{M}$ ) Schneidenradplanimeter: Das Schneidenrad sitzt lose auf einer Welle, die durch einen Polarm geführt ist und gegen eine Skala läuft. In einem dritten von Pregél, ausgeführt von der Reißzeugfabrik E. O. Richter & Co. (in Etui 24  $\mathcal{M}$ ), sind zwei Schneidenräder vorhanden.

Genauer sind die Polarplanimeter von Conradi, ausgeführt von Wichmann (etwa 50  $\mathcal{M}$  in Etui).

b) Stereometer. In neuerer Zeit hat man auch Verfahren zur Messung der Dimensionen an Kristallen mit Hilfe

Abb. 7.



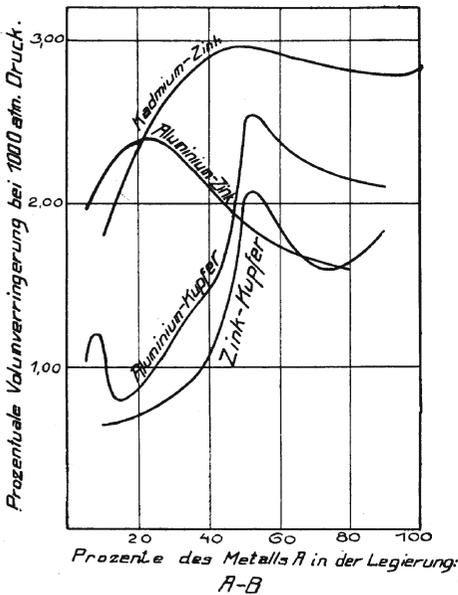
Beilschneide-Planimeter.

von Stereoskopaufnahmen ausgebildet. Es dient dazu das „Stereometer“ in Verbindung mit der „Stereokomparatormarke“. Mit der Stereometerkamera (Pulfrich) wird eine Aufnahme des betreffenden Objektes gemacht. Das erhaltene Stereoskopbild ist dann ein Modell, das dem Gegenstand gleichwertig, bei mikrostereoskopischen Aufnahmen sogar überlegen und jederzeit verfügbar ist. Die Stereokomparatormarke ist eine mikrometrische Vorrichtung, bei der eine Meßmarke verschoben wird. Mit ihr kann man das Bild genau so abtasten, wie man etwa den Gegenstand selbst mit Tasterzirkel, Maßstab u. dgl. abtasten würde.

### III. Kompressibilität der Metalle.

Wenn man von nicht homogenen oder „heterotropen“ (kristallinen oder inneren Spannungen unterworfenen) Körpern absieht, so bewirkt ein allseitig gleichmäßiger, normaler äußerer Druck im Inneren des Materials stetig verteilte Druckkräfte  $dk$ , die, wie in Flüssigkeiten, senkrecht zu den beliebig orientierten Flächenelementen  $df$  stehen. Man nennt den Quotienten  $dk/df$ , der also bei gleichmäßiger Kraftverteilung die Kraft bedeutet, mit der die Fläche 1 gedrückt wird, den „Druck“.

Abb. 8.



Veränderung des Volumens  
durch Druck.

Um hohe Drücke zu erzeugen, verwendet man das Prinzip der hydraulischen Pressen (z. B. die Cailletetische Pumpe, und für Drucke bis etwa 3000 kg/qcm die Bauart von J. E. Petavel).

Die Messung des Druckes erfolgt mit dem

Die Messung des Druckes erfolgt mit dem

a) Kolbenmanometer: Eine einfache Wagevorrichtung, die durch Hebelübersetzung mit einem Kolben von genau definierter Fläche verbunden ist.

b) Metallmanometer; aus der Formveränderung einer Metallmembran oder durch die Krümmung einer gebogenen Metallröhre (übertragen auf einen Zeiger oder beobachtet mit Spiegel, Fernrohr und Skale). Für die Messung kleiner Druckunterschiede kann die Röhre mehrfach spiralförmig gewunden sein und die Ablesung mit Fernrohr, Spiegel und Skale geschehen.

c) Elektrischen Widerstandsmanometer; für sehr hohe Drucke. Die Messung des Widerstandes kann mit der Wheatstoneschen Brücke geschehen; dann kann man von 500 Atm. aufwärts bei homogenen Metallen unter Berücksichtigung der Kompressionswärme bis auf  $\frac{1}{10}$  Proz. Genauigkeit kommen. Weiteres s. unter „Leitfähigkeit der Metalle“ (S. 52).

Der Grad der „Zusammendrückbarkeit“ eines Körpers, seine Kompressibilität  $K$  wird durch die relative Verringerung seines Volumens gemessen, die er erfährt, wenn der Druck um 1 kg/qcm zunimmt. Der reziproke Wert  $M$  heißt „Volumelastizitätsmodul“. In gewissen Grenzen gilt dann also, wenn  $p$  den Druck,  $V$  das Volumen und  $v$  die Volumenzunahme bedeutet,

$$\frac{v}{V} = K \cdot p = \frac{p}{M}.$$

Über die Beziehung zwischen dem Volumelastizitätsmodul und den übrigen Konstanten der Elastizitätslehre siehe im V. Abschnitt.

Tabelle der Kompressibilität einiger Metalle.  
( $K$  für einige hier fehlende Metalle siehe S. 52).

Stoff	Prozentuale Volumenveränderung für 1000 Atm. berechnet	Stoff	Prozentuale Volumenveränderung für 1000 Atm. berechnet
Eisen . . . . .	0,0006	Zink . . . . .	0,0015—0,0009
Gold . . . . .	0,0007	Magnesium . . . . .	0,0030
Nickel . . . . .	0,0006	Kadmium . . . . .	0,0020
Messing . . . . .	0,0010	Palladium . . . . .	0,0006
Zinn . . . . .	0,0019		

Die Kompressibilität wächst mit der Temperatur:

Tabelle der Kompressibilität einiger Metalle bei verschiedenen Temperaturen.

Stoff	Eisen	Kupfer	Silber	Blei	Aluminium	Platin	Zinn	
Prozentuale Volumen- veränderung für 1000 Atm. berechnet	— 190 <sup>0</sup>	0,00061	0,00072	0,00071	0,0025	0,0013	0,00037	0,0021
	+ 17 <sup>0</sup>	0,00063	0,00077	0,00076	0,0032(?)	0,0015	0,00039	0,0031(?)
	+ 100 <sup>0</sup>	0,00065	0,00080	0,00082	—	0,0017	0,00040	—

#### Kompressibilität der Legierungen.

Die Werte der Kurven (Abb. 8 a. S. 12) sind mit einer Spannung von 1000 Atm. ermittelt worden.

### IV. Das Verhalten der Metalle in der Wärme.

1. **Thermometrie.** Das Gefühl der „Warmheit“ beim Betasten eines Körpers ist erfahrungsgemäß immer verbunden mit einem gewissen Zustande, in dem er sich hinsichtlich aller seiner Eigenschaften befindet. Am augenscheinlichsten offenbart sich dies bei sehr kalten und sehr heißen Körpern durch den veränderten Aggregatzustand. Man hat zunächst willkürlich die Volumenveränderung der Körper bei Erhitzung oder Abkühlung zur Festlegung der Warmheitsgrade herangezogen und demgemäß den Ausdehnungszuwachs, z. B. des Quecksilbers, wenn es mit schmelzendem Eis und wenn es mit siedendem Wasser in Berührung steht, in 100 gleiche Teile: „Temperaturgrade“ geteilt (Thermometer). Die Gastheorie hat diese Willkür gerechtfertigt (thermodynamische Skala). Die Celsiussche Skala — über andere siehe z. B. Sammlung Göschen: Physikalische Tabellen, S. 60 — nimmt den „Eispunkt“ zum Nullpunkt an.

Die Thermometer sind so geeicht, daß die angezeigte Temperatur nur bei gleichmäßiger Erwärmung des ganzen Quecksilbers erreicht wird. Ist man daher berechtigt, anzunehmen, daß ein Teil  $a$  (in Graden) des Quecksilberfadens nicht

die abgelesene Temperatur  $t$ , sondern  $t_0$  (durch Schätzung zu bestimmen oder durch ein kleines, in der Nähe des herausragenden Fadens angebrachtes Hilfsthermometer zu messen) hat, so hat man zur Ablesung hinzufügen:  $0,00016 a (t - t_0)$ .

Quecksilberthermometer von  $-39^\circ$  bis ungefähr  $+300^\circ$ ; wenn sie über Quecksilber mit Stickstoff oder Kohlensäure gefüllt sind und Jenaer Hartglas (Nr. 59) verwendet wird, bis etwa  $+550^\circ$ .

Als Thermometergefäße können verwendet werden:

Bis  $1100^\circ$  innen und außen glasiertes Porzellan, bis  $1600^\circ$  Platin oder Platin-Iridium, bis  $2000^\circ$  Iridium (Heizgase ableiten!), Quarzglas mit Stickstofffüllung bis  $1100^\circ$ . Zur rohen Schätzung von Temperaturen bis etwa  $600^\circ$  kann mit Vorteil ein einfaches, gebogenes Drahtstück dienen, das an dem einen Ende eine Skala trägt.

Ihrer Bequemlichkeit und Anpassungsmöglichkeit an alle vorkommenden Fälle wegen sehr zu empfehlen ist die elektrische Temperaturmessung. Es wird hier entweder die thermoelektrische Kraft (S. 59) oder die Widerstandsänderung (S. 51) benutzt.

Zur Messung der Temperatur glühender Körper dienen die „optischen Pyrometer“. Die von einem glühenden Körper ausgehende Lichtmenge wächst sehr stark mit dessen Temperatur, deshalb kann man durch Messung der Lichtstärke mit beträchtlicher Genauigkeit die Temperatur bestimmen.

Da die Eichung dieser optischen Pyrometer unter Zugrundelegung des Prinzips des „vollkommen schwarzen“ Hohlkörpers (siehe S. 39) geschieht, ist z. B. bei glänzenden Oberflächen der gemessene Wert, die sogenannte „schwarze Temperatur“, nicht ganz richtig. Die mittlere Temperatur in einem gleichmäßig glühenden Ofen wird jedoch mit befriedigender Genauigkeit angegeben; Beobachtung durch eine kleine Öffnung.

Besondere Erwähnung verdienen:

a) Für Temperaturen über  $1000^\circ$  das Pyrometer von Wanner (Dr. R. Hase, Hannover). Eine an eine Batterie

angeschlossene Vergleichslampe (6 Volt) wird mit Hilfe eines Nicolschen Prismas auf gleiche Helligkeit eingestellt; es wird nur die Strahlung der roten Spektralfarbe benutzt.

b) Für Strahlungen unter 1000 bis 600° das Pyrometer von Holborn und Kurlbaum (Siemens & Halske). Hier wird die Lichtstärke einer 4-Volt-Lampe durch Veränderung der Stromstärke so einreguliert, daß gleiche Helligkeit mit dem Gegenstande eintritt.

c) Das Pyrometer von Le Chatelier und Shores Pyroskop (Schuchardt & Schütte). Das Bild der Flamme einer kleinen Gasolin- oder Petroleumlampe wird auf gleiche Helligkeit mit dem des betrachteten Gegenstandes gebracht.

d) Das Radiumpyrometer von Dr.-Ing. Allner, Dessau. Ein im Pyrometer eingeschlossenes Radiumpräparat wird als Lichtquelle benutzt und mit ihr die grüne Linie des Spektrums verglichen. Der Apparat ist leicht zu transportieren, aber sehr lichtschwach. Das Radiumpräparat muß nach 1 bis 1½ Jahren durch ein neues ersetzt werden.

Bei allen diesen Pyrometern kann man die Temperatur entweder direkt oder aus einer Tabelle bestimmen, die das Resultat einer amtlichen (Physikalisch - technische Reichsanstalt) Eichung ist.

**2. Lineare Ausdehnung.** Nach der Auffassung der kinetischen Gastheorie ist die Temperatur ein Maß der mittleren Energie der schwingenden Molekel (durch gelegentliche Summenwirkung einzelner Molekelkomplexe wird die Erscheinung in Form der „Brownschen Bewegung“ im Mikroskop sichtbar). Absolute Ruhe herrscht demnach im absoluten Nullpunkt bei  $-273^{\circ}\text{C}$ . Die mittlere Weglänge der schwingenden Molekel wird mit wachsender Temperatur immer größer, und daraus folgt, daß das Volumen zunehmen muß. Am auffälligsten tritt dies bei langen dünnen Drähten in Erscheinung. Wenn sich diese für die Längeneinheit und für  $1^{\circ}$  Temperaturerhöhung um  $\alpha$  verlängern, so nennt man  $\alpha$  den linearen Ausdehnungskoeffizienten; da er einen kleinen Wert darstellt, so ist der „Volumenausdehnungskoeffizient“ das Dreifache.

Lineare Ausdehnung der Metalle.

Stoff	Ausdehnung in Millimetern für 1 m und 1° Temperaturunterschied		
	zwischen -190° und +17°	bei etwa 18°	zwischen 0° und 100°
Eisen . . . . .	0,0091	0,0110	0,0120
Stahl . . . . .	—	0,0100	0,0110
Kupfer . . . . .	0,0142	0,0161	0,0170
Messing . . . . .	—	0,0180	0,0190
Silber . . . . .	0,0171	0,0184	0,0194
Gold . . . . .	0,0132	0,0138	0,0147
Nickel . . . . .	0,0102	0,0124	0,0135
Neusilber . . . . .	—	—	0,0180
Blei . . . . .	0,0270	0,0275	0,0290
Aluminium . . . . .	0,0184	0,0216	0,0242
Platin . . . . .	0,0080	0,0089	0,0090
Zinn . . . . .	—	0,0213	0,0230
Zink . . . . .	—	0,0286	0,0297
Magnesium . . . . .	0,0213	0,0245	0,0320
Iridium . . . . .	0,0057	0,0065	0,0067
Konstantan . . . . .	—	—	0,0152
Platin-Iridium (10Proz.Ir.)	—	0,0087	0,0088
Tantal . . . . .	—	0,0079	—
Wismut . . . . .	0,013	0,0128	0,0137
Kobalt . . . . .	—	—	0,0124
Invar (64 Fe, 36 Ni) . . .	—	0,002	—

Stehen die Metalle unter allseitigem Druck, so ist der Ausdehnungskoeffizient etwas kleiner, z. B. bei einer Drucksteigerung von 1000 Atm.

bei Aluminium um etwa 3,5 Proz.

„ Antimon „ „ 6 „

„ Wismut „ „ 20 „

bei einer Blei-Zinnlegierung

mit 91,3 Proz. Zinn um etwa 20 Proz.

„ 76,0 „ „ „ 27 „

„ 65,7 „ „ „ 22 „

**3. Schmelzen und Verdampfen.** Wird die Temperatursteigerung der festen, reinen Metalle immer weiter getrieben, also nach Auffassung der Molekularphysik die mittlere Weglänge der Molekel immer größer, so kommt es endlich zu

einem jähen Abbruch der den festen Zusammenhang bewirkenden Molekularkräfte: das Metall wird flüssig. Ist bei weiterer Erhitzung schließlich die gegenseitige Entfernung der Molekel so groß geworden, daß eine gegenseitige Beeinflussung nur noch bei einem Anprall aneinander eintritt, so ist der Zustand in den gasförmigen übergegangen. Steigert man die Temperatur noch weiter, so wird die Wahrscheinlichkeit des Zusammenstoßes je zweier Molekel immer geringer. Dieser Zustand zeichnet sich für alle Stoffe durch eine hohe Gesetzmäßigkeit aus, da sich eine große Zahl physikalischer Eigenschaften durch wenige Konstanten des Stoffes herleiten lassen (ideale Gase). Für Metalle ist dieser Zustand jedoch noch wenig untersucht.

Der Schmelzpunkt wird als diejenige Temperatur definiert, bei welcher feste und flüssige Phase nebeneinander bestehen; man ist nämlich nur dann sicher davor, daß man sich nicht im Gebiete eines labilen Gleichgewichtes befindet. Zur Bestimmung des Schmelzpunktes wird der Körper in einem bedeckten Porzellan- oder Graphittiegel in der Gasflamme oder im Ofen (Gehäuse, elektrischer Ofen) geschmolzen. Ein Thermoelement, das durch den Deckel in die Schmelze ragt (durch ein Porzellanrohr geschützt), gibt den Schmelzpunkt durch längeres Stehenbleiben auf ein und derselben Temperatur zu erkennen.

Man kann diesen Punkt auch scharf dadurch bestimmen, daß man das zu untersuchende Metall in Drahtform (etwa  $\frac{1}{2}$  cm) bringt und über ein Galvanoskop in einen Stromkreis schaltet (eventuell in den Stromkreis des Thermoelementes). Im Moment des Schmelzens wird der Strom unterbrochen.

Eine Methode, um sehr geringe Mengen zu untersuchen, ist die mit dem „Meldometer“ (Joly): der Körper wird auf den mittleren Teil eines elektrisch geheizten Platinbandes (10 cm lang, 1 mm breit) gelegt und mit dem Mikroskop beobachtet; die Temperatur wird durch eine mikrometrische Vorrichtung aus der Verlängerung des Streifens angezeigt. Der Schmelzpunkt wird durch Regulierung des Heizstromes eingestellt.

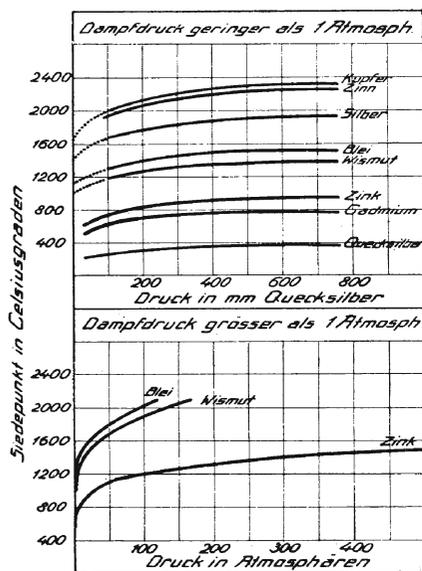
Der Siedepunkt ist die Temperatur, bei welcher das flüssige Metall bei 760 mm Quecksilberdruck in den Dampfungszustand übergeht.

Schmelz- und Siedepunkte der Metalle.

Metall	Schmelzpunkt °C	Siedepunkt °C
Eisen . . . . .	1520	2450
Kupfer . . . . .	1084	2310
Silber . . . . .	961	1955
Gold . . . . .	1063	2200
Nickel . . . . .	1451	—
Blei . . . . .	327	1525
Aluminium . . . . .	657	1800
Platin . . . . .	1780	—
Quecksilber . . . . .	— 39	357
Zinn . . . . .	232	2275
Zink . . . . .	419	918
Natrium . . . . .	98	742
Magnesium . . . . .	635	1120
Chrom . . . . .	1553	2200
Kadmium . . . . .	322	778
Baryum . . . . .	850	—
Kalzium . . . . .	800	—
Strontium . . . . .	etwa 600	—
Kalium . . . . .	62,5	667
Wismut . . . . .	269	1420
Mangan . . . . .	1128	1900
Kobalt . . . . .	1492	—
Arsen . . . . .	817	—
Antimon . . . . .	630	1440
Thallium . . . . .	304	1280
Iridium . . . . .	2200	—
Cer . . . . .	623	—
Molybdän . . . . .	2100	—
Molybdän . . . . .	2450 ± 60 (Pirani u. Meyer)	—
Osmium . . . . .	2500	—
Palladium . . . . .	1541	—
Tellur . . . . .	450	—
Titan . . . . .	> 2200	—
Vanadium . . . . .	1800	—
Vanadium . . . . .	1715 (Ruff u. Martin)	—
Wolfram . . . . .	3100 ± 60	—
Rhodium . . . . .	1940	—

Über die Schmelzpunkte von Legierungen geben die sogenannten Schmelzdiagramme Aufschluß, die in der metallographischen Literatur zu finden sind und hier wegen ihrer großen Zahl nicht aufgenommen werden können.

Abb. 9.



Dampfdruckkurven von Metallen.

Die Temperatur der verdampfenden Schmelze führt nur dann den Namen „Siedepunkt“, wenn die Verdampfung unter dem Druck einer Atmosphäre vor sich geht; herrscht ein anderer „Dampfdruck“, so ändert sich auch die Temperatur, und zwar für die Metalle Quecksilber, Kadmium, Zinn, Zink, Kupfer, Silber, Blei und Wismut nach nebenstehenden Kurven (Abb. 9).

### Die Schmelz- und Verdampfungswärme.

Die kinetische Energie der Molekel eines Körpers, also nach dem Vorhergehenden seine Temperatur, wächst, wenn er in Berührung mit einem wärmeren gebracht wird. Die Verteilung der Temperaturen innerhalb der Körper geschieht dabei so, als ob ein den Vektorgesetzen folgender Energiestrom vom wärmeren zum kälteren Körper verlaufen würde.

Man spricht daher von einer gewissen „Wärmemenge“, die zwischen den Körpern übergeht, und definiert deren Einheit, die „Kalorie“, als Wärmemenge, durch die die Masseneinheit (1 g oder 1 kg, Gramm-Kalorie oder Kilogramm-Kalorie) Wasser von 14,5° C auf 15,5° C erhöht wird. Die mechanische Arbeit, die einer Kilogramm-Kalorie entspricht, ist das mechanische Wärmeäquivalent = 427,1 mkg = 4190 Joule.

Beim Übergehen von einem Aggregatzustand in den anderen wird der in Form von Wärme aufgespeicherte Energieinhalt sprunghaft verändert. Man benötigt eine gewisse „Schmelzwärme“ und „Verdampfungswärme“. Bekannt sind die Schmelzwärmen und Verdampfungswärmen folgender Metalle:

Metall	Schmelzwärme für 1 kg in Kilogramm-Kalorien	Verdampfungswärme für 1 kg in Kilogramm-Kalorien
Eisen . . . . .	6 (nach Schenk) (!)	—
Kupfer . . . . .	30 (nach Kohlrausch (!))	—
Silber . . . . .	43	70 600
Nickel . . . . .	21	55 800
Blei . . . . .	4,6	—
Aluminium . . . . .	6	45 500
Platin . . . . .	77	—
Quecksilber . . . . .	27	—
Zinn . . . . .	2,8	68
Zink . . . . .	14	73 900
Natrium . . . . .	28	28 500
Kadmium . . . . .	32	—
Kalium . . . . .	14	—
Wismut . . . . .	16	—
Palladium . . . . .	13	42 700
Gallium . . . . .	36	—
Roses Metall . . . . .	19	—
Woods Metall . . . . .	7	—
	8	—

**4. Spezifische Wärme.** Um den Molekeln der Masseneinheit eines Körpers einen kinetischen Zuwachs, entsprechend einer Temperaturerhöhung um 1°, zu erteilen, ist eine gewisse Wärmemenge, die spezifische Wärme, notwendig. Diese Wärme ist jedoch auch für einen und denselben Körper je nach der Temperatur, auf der er sich befindet, verschieden.

Spezifische Wärme einiger Metalle (Äquivalentwerte).

Metall	Spezifische Wärme für 1 g in Joule		
	bei $-150^0$	um $18^0$	bei $+50^0$
Eisen . . . . .	—	0,440	—
Kupfer . . . . .	0,280	0,380	0,390
Silber . . . . .	0,190	0,230	0,230
Gold . . . . .	0,110	0,130	0,130
Nickel . . . . .	0,280	0,444	0,457
Blei . . . . .	0,120	0,130	0,130
Aluminium . . . . .	0,574	0,896	0,867
Platin . . . . .	—	0,130	—
Quecksilber . . . . .	—	0,140	0,140
Zinn . . . . .	0,190	0,220	0,230
Zink . . . . .	0,310	0,385	0,390
Magnesium . . . . .	0,742	0,047	1,047
Kadmium . . . . .	—	0,230	2,300
Kalzium . . . . .	—	0,754	—
Wismut . . . . .	0,110	0,120	0,130
Mangan . . . . .	—	0,503	—
Kobalt . . . . .	0,280	0,423	0,432
Antimon . . . . .	0,170	0,210	0,210
Iridium . . . . .	—	0,130	—
Konstantan . . . . .	—	0,410	—
Palladium . . . . .	—	0,240	—
Rhodium . . . . .	—	0,240	—
Tantal . . . . .	—	0,150	—
Roses Metall . . . . .	—	0,170	—
Woods Metall . . . . .	—	0,170	—

Spezifische Wärme einiger Legierungen, deren Bestandteile chemisch gebunden sind (Äquivalentwerte).

Stoff	Spezifische Wärme für 1 g in Joule		
	bis $-150^0$	bis $0^0$	bis $+50^0$
Ag <sub>3</sub> Al . . . . .	0,228	0,279	0,287
Ag <sub>2</sub> Al . . . . .	0,238	0,305	0,314
AgMg . . . . .	0,277	0,359	0,370

Spezifische Wärme einiger Legierungen usw. (Fortsetzung).

Stoff	Spezifische Wärme für 1 g in Joule		
	bis $-150^0$	bis $0^0$	bis $+50^0$
Ag <sub>3</sub> Sb . . . . .	0,193	0,231	0,233
Al <sub>3</sub> Mg <sub>4</sub> . . . . .	0,658	0,928	0,966
AuMg <sub>3</sub> . . . . .	0,243	0,344	0,360
AuMg <sub>2</sub> . . . . .	0,212	0,286	0,300
AuMg . . . . .	0,164	0,217	0,225
Co <sub>2</sub> Sn . . . . .	0,240	0,320	0,335
CoSb . . . . .	0,211	0,273	0,283
Cu <sub>3</sub> Al . . . . .	0,313	0,434	0,448
CuAl <sub>2</sub> . . . . .	0,416	0,606	0,628
CuAl . . . . .	0,350	0,513	0,535
Cu <sub>2</sub> Mg . . . . .	0,354	0,437	0,487
CuMg <sub>2</sub> . . . . .	0,460	0,634	0,659
Cu <sub>3</sub> Sb . . . . .	0,261	0,327	0,333
Cu <sub>2</sub> Sb . . . . .	0,244	0,304	0,310
Mg <sub>3</sub> Sb <sub>2</sub> . . . . .	0,286	0,390	0,398
Mg <sub>2</sub> Si . . . . .	0,540	0,871	0,916
MgZn <sub>2</sub> . . . . .	0,370	0,469	0,484
Ni <sub>3</sub> Sn . . . . .	0,245	0,329	0,342
Ni <sub>2</sub> Si . . . . .	0,295	0,465	0,487
NiSi . . . . .	0,297	0,505	0,534
SbCr . . . . .	0,204	0,290	0,306
ZnSb . . . . .	0,218	0,277	0,281

Es ist für das Resultat einer Messung nicht dasselbe, ob man die Wärme unter solchen Versuchsbedingungen zu- oder abführt, daß der Druck konstant ( $c_p$ ) bleibt, oder daß das Volumen erhalten bleibt ( $c_v$ ). Die Differenz  $c_p - c_v$  ist jedoch meist klein:

Für	Aluminium	Antimon	Wismut	Kadmium	Kupfer	Zinn	
ist: $c_p - c_v$ im Mittel (Joule)	536	0,018	0,010	120	96	92	$\times 10^{-4}$

**5. Wärmeleitfähigkeit einiger Metalle (Äquivalentwerte)**  
(s. auch S. 58).

Metall	Wärmeleitfähigkeit bei 180°C in Joule Grad.cm . sec	Metall	Wärmeleitfähigkeit bei 180°C in Joule Grad.cm . sec
Eisen . . . . .	0,25—0,71	Rhodium . . . . .	1,30
Gold . . . . .	2,90	Palladium . . . . .	0,71
Nickel . . . . .	0,59	Iridium . . . . .	1,40
Platin . . . . .	0,71	Konstantan . . . . .	0,23
Quecksilber . . . . .	0,08	Messing . . . . .	0,63—1,30
Magnesium . . . . .	1,60	Neusilber . . . . .	0,29—0,38
Wismut . . . . .	0,08	Roses Metall . . . . .	0,17
Antimon . . . . .	0,17	Woods Metall . . . . .	0,13

(Über „Wärmestrahlung an der Oberfläche der Metalle“ s. auch „Metalloptik“, S. 38).

**V. Elastizität der Metalle.**

**1. Elastizitätsmodul.** Wirken an einem Körper Kräfte solcher Art, daß die durch sie erzeugten Deformationen mit den Kräften wieder verschwinden, so nennt man die Beanspruchung „elastisch“. Im Inneren der Körper halten die zwischen den gewaltsam aus ihrer Gleichgewichtslage entfernten Molekeln wirkenden Elastizitätskräfte das Gleichgewicht.

Wenn der Stab von der Länge  $l$  und dem Querschnitt  $q$  durch eine parallel zu seiner Achse wirkende Kraft  $P$  eine Verlängerung um  $\lambda$  erfährt, so sagt ein Erfahrungsgesetz, das Hookesche Gesetz, aus, daß die Verlängerung

$$\lambda = \frac{1}{E} \cdot \frac{l}{q} \cdot P$$

ist. Die Materialkonstante  $1/E$  (der „Elastizitätskoeffizient“ oder „Dehnungsmodul“) ist der reziproke Wert des „Elastizitätsmoduls“  $E$ ; dieser stellt, wie leicht zu erkennen, das Verhältnis der Kraft zu der entstehenden Verlängerung dar bei einem Zylinder von der Länge und dem Querschnitt 1. Außer den in der Festigkeitslehre gegebenen Methoden zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls seien noch folgende genannt:

α) Ist nur ein kurzer Stab zur Verfügung, so wird dieser an einem kurzen Stahldraht aufgehängt und am anderen Ende ebenso mit der Wagschale verbunden. Die Längenänderung zwischen zwei Querschnitten wird dadurch gemessen, daß man den Stab mit zwei eng anschließenden Röhren umkleidet, die mit Spitzenschrauben an dem Stab befestigt sind und ihre Bewegung auf zwei planparallele Glasplatten übertragen. Beim Beanspruchen werden auf diesen die Farben dünner Schichten bemerkbar. Es entstehen Fransen (Newtonsche Streifen oder Haidingersche Ringe). Durch eine Exzentervorrichtung kann die Belastung langsam und erschütterungsfrei verändert werden; dadurch wandern die Fransen und jeder Streifenbreite entspricht eine Längenänderung um eine halbe Wellenlänge des verwendeten Lichtes. Um die durch Biegungen vorgeäußerten Deformationen auszuschalten, wird auf beiden Seiten gemessen.

β) Der Elastizitätsmodul von dünnen Drähten läßt sich dadurch bestimmen, daß man die Drähte horizontal spannt und in der Mitte quer zur Drahtachse belastet. Man kann entweder den Draht von der Länge  $2l$  über eine Rolle führen und mit einem bekannten Gewicht  $S_0$  spannen; dann ist der Elastizitätsmodul aus dem in der Mitte angreifenden Gewicht  $P$  und der dadurch entstehenden Senkung  $h$  bestimmt durch

$$E = \frac{1}{h^2} \cdot \left( P \cdot \frac{l}{h} - 2 S_0 \right) \cdot \frac{l^2}{q},$$

oder, wenn die Belastung  $S_0$  unbekannt ist, beobachte man bei einer zweiten Belastung  $P'$  die entstehende Senkung  $h'$ , dann ist für kleine Senkungen ( $h$  und  $h'$  ist sehr genau zu messen)

$$E = \frac{P'/h' - P/h}{h'^2 - h^2} \cdot \frac{l^3}{q}.$$

γ) Über die Bestimmung des Elastizitätsmoduls durch den Schall siehe „Schallwellen in Metallen“, S. 34.

δ) Bestimmung des Elastizitätsmoduls durch Biegung:

1. Ein an einem Ende festgeklemmter horizontaler, rechteckiger (Höhe  $a$ , Breite  $b$ ) Stab von der Länge  $l$  (alles in Millimetern) wird am anderen Ende mit  $P$  kg belastet und die

Durchbiegung  $h$  an dieser Stelle genau gemessen (Spiegelmaßstab; Kathetometer); dann ist

$$E = 4 \frac{l^3 P}{a^3 b h} \text{ kg/qmm.}$$

Ebenso bei dünnen Drähten, die man in einen Schraubstock klemmt. Um den etwaigen ungleichförmigen Querschnitt auszuschalten, wird, nachdem man den Draht um  $90^\circ$  gedreht hat, eine zweite Bestimmung gemacht.

2. Wird der Stab lose auf zwei feste Unterlagen aufgelegt, so ist bei analogen Bezeichnungen

$$E = \frac{1}{4} \frac{l^3 P}{a^3 b h},$$

genauer durch Messung der Neigung der Enden (gemessen mit Spiegel und Fernrohr). Ist  $\alpha$  der Neigungswinkel, so findet man

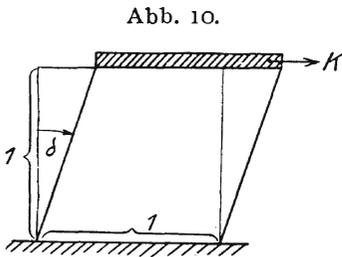
$$E = \frac{3}{4} \frac{l^2 P}{a^3 b \operatorname{tg} \alpha}.$$

**2. Torsionsmodul.** (Siehe auch Poissonsche Konstante S. 29.) Ein möglichst langer, dünner, kreisrunder Stab wird an einem Ende eingeklemmt, am anderen mit einem Drehmoment  $D$  ( $\text{kg} \times \text{mm}$ ) so beansprucht, daß die dadurch bewirkte Verdrehung  $\alpha$  (im Bogenmaß) an diesem Ende nur klein bleibt; dann ist diese proportional dem aufgewendeten Drehmoment, und zwar ist

$$D = F \frac{\alpha \cdot \pi r^4}{2 l},$$

wo  $l$  (mm) die Länge,  $r$  (mm) der Halbmesser des Stabes ist und  $F$  den konstanten „Torsionsmodul“ ( $\text{kg/qmm}$ ) bedeutet.

Der Torsionsmodul ist identisch mit dem „Gleit“- oder „Scherungs“- oder „Schiebungs“-Modul, oder auch mit dem „zweiten Elastizitätsmodul“. Diese Namen sind deshalb berechtigt, weil sein Wert sich (bis auf einen konstanten Faktor) auch ergibt als Verhältnis der „scherenden Kraft“  $K$  zum „Scherungswinkel“  $\delta$  (siehe Abb. 10).



Die Bestimmung des Torsionsmoduls geschieht entweder direkt durch Messung (Spiegel und Fernrohr) des Verdrehungswinkels, oder durch Messung der Schwingungsdauer eines an dem zu untersuchenden Stab angebrachten Körpers von bestimmtem Trägheitsmoment. Ist  $K$  (qcm  $\times$  g) das Trägheitsmoment der Masse,  $l$  (cm) die freie Länge,  $r$  (cm) der Halbmesser des Stabes, ferner  $t$  die durch Abzählung (Stoppuhr) ermittelte Schwingungsdauer, so ist  $F = \frac{2\pi}{98100000} \cdot \frac{l \cdot K}{r^4 t^2}$  kg/qmm.

Elastizität der Metalle.

Stoff	Elastizitätsmodul in kg/qmm	Verringerung des Elastizitätsmoduls bei Erhöhung der Temperatur von 0 auf 100° in Proz.
Eisen . . . . .	7 500—20 000	2
Kupfer . . . . .	10 000—13 000	2—4
Silber . . . . .	7 000— 8 000	4
Gold . . . . .	6 000— 8 100	3
Nickel . . . . .	20 000—22 000	2
Blei . . . . .	1 500— 1 700	—
Aluminium . . . . .	6 300— 7 500	20
Platin . . . . .	16 000—17 500	1—2
Zinn . . . . .	4 000— 5 500	—
Zink . . . . .	8 000—13 000	—
Magnesium . . . . .	4 000	—
Kadmium . . . . .	5 000— 7 000	—
Wismut . . . . .	3 200	—
Iridium . . . . .	53 000	—
Rhodium . . . . .	30 000	—
Tantal . . . . .	19 000	—

Der Einfluß der Temperatur auf den Elastizitätsmodul ist aus folgender Tabelle zu entnehmen:

Stoff	Elastizitätsmodul in kg/qmm		
	bei 15°	bei 100°	bei 200°
Eisen . . . . .	20 800	21 900 (?)	17 700
Kupfer . . . . .	10 500	9 800	7 900
Silber . . . . .	7 150	7 300 (?)	6 400
Gold . . . . .	5 600	5 400	5 500(?)
Blei . . . . .	1 700	1 600	—
Platin . . . . .	15 500	14 200	13 000

Da sich in einem Stabe mit kreisförmigem Querschnitt eine Torsionswelle mit der Geschwindigkeit

$$U = \sqrt{\frac{9810 \cdot F}{s}} \text{ m/sec,}$$

wo  $s$  die Dichte des Materials bedeutet, fortpflanzt, kann man auch durch Messung der Tonhöhe eines in Torsionsschwingungen begriffenen Stabes den Torsionsmodul bestimmen. Der Stab von der Länge  $l$  (cm) wird in der Mitte mit einigen Lagen Draht umgeben und dort festgeklemmt. Mit einem über den Stab geschobenen, geschlitzten und mit Kolophonium eingeriebenen Kork kann man den Grundton der Torsionsschwingung erzeugen; ist dessen Schwingungszahl in der Sekunde gleich  $N$ , so ist also

$$F = \frac{4}{98100000} N^2 l^2 s.$$

Torsionselastizität der Metalle.

Stoff	Torsionsmodul in kg/qmm	Verringerung des Torsionsmoduls bei Erhöhung der Tem- peratur von 0 auf 100° in Proz.
Eisen . . . . .	5000—8300	2—5
Kupfer . . . . .	3900—4800	4—6
Silber . . . . .	2500—2900	7—8
Silber . . . . .	7412	1,64
	(nach Katzenelsohn)	(nach Katzenelsohn)
Gold . . . . .	2800—3900	3
Nickel . . . . .	7800	3
Blei . . . . .	550	80
Aluminium . . . . .	2300—3300	21
Platin . . . . .	6000—7000	2
Platin . . . . .	2551	7,2
	(nach Katzenelsohn)	(nach Katzenelsohn)
Zinn . . . . .	1500—1700	—
Zink . . . . .	4000	40
Magnesium . . . . .	1700	—
Kadmium . . . . .	2400	50
Wismut . . . . .	1200—1400	—

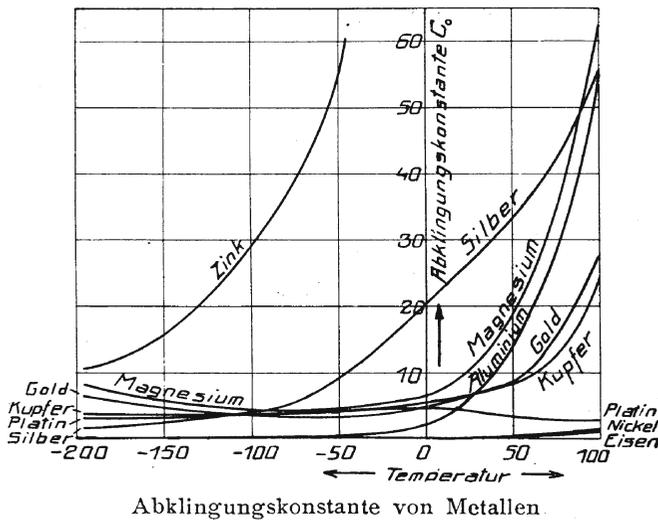
**3. Viskosität der Metalle.** Die innere Reibung der festen Körper äußert sich sehr augenfällig, wenn diese in Form von Drähten in Torsionsschwingungen begriffen sind. Der durch einen anfänglichen Impuls erteilte Ausschlag  $\alpha_0$  nimmt mit wachsender Zeit  $t$  nach einem Exponentialgesetz

$$\alpha = \alpha_0 e^{-C_0 t}$$

ab, wo  $C_0$  die „Abklingungskonstante“ ist.

$C_0$ , reduziert auf unendlich kleine Ablenkungen, geht für Temperaturen zwischen  $+100$  und  $-196^\circ$  aus den folgenden Kurven hervor (Abb. 11):

Abb. 11.



**4. Poissonsche Konstante.** Wird ein Stab von der Länge  $l$  einer Formveränderung durch reinen Zug unterworfen, so steht die hierbei entstehende elastische Querkontraktion zu der relativen Verlängerung des Stabes in einem für jedes Metall konstanten Verhältnis. Bedeutet  $\lambda$  die Verlängerung für den Durchmesser  $d$  und  $\delta$  die Durchmesserverringering, so ist

$$\frac{\delta}{d} : \frac{\lambda}{l} = \mu$$

die Poissonsche Konstante. Sie ist für alle Stoffe in verhältnismäßig enge Grenzen eingeschlossen, und zwar zwischen

0,2 und 0,5. Mit ihrer Hilfe ergibt sich die relative Volumenvermehrung beim Zugversuch zu

$$\frac{\varphi}{v} = \frac{\lambda}{l} (1 - 2\mu),$$

wo  $\varphi$  die Vermehrung des Volumens  $v$  bedeutet. Das Volumen der meisten Metalle ändert sich also um 1 Proz., wenn sich der Stab um etwa 3 Proz. dehnt.

Aus der Theorie ergibt sich die Poissonsche Konstante auch aus dem Elastizitäts- und dem Torsionsmodul durch die Beziehung:

$$\frac{E}{F} = 2(1 + \mu);$$

für einen Mittelwert:  $\mu = 1/4$ , ist  $F$  annähernd 40 Proz. von  $E$ .

Außer durch direkte Messung, die mit empfindlichen (Spiegel- oder Interferenz-)Apparaten geschehen muß, kann man  $\mu$  bestimmen durch Messung der beiden Elastizitätsmoduln  $E$  und  $F$ , ferner durch Messung des Volumelastizitätsmoduls  $M$ , der nach der Theorie mit  $E$  und  $\mu$  durch folgende Gleichung verknüpft ist:

$$M = \frac{1}{3} \frac{E}{1 - 2\mu}$$

(siehe auch Kompressibilität der Metalle, S. 12). Schließlich kann  $\mu$  bestimmt werden durch einen Interferenzversuch. Wird das zu untersuchende Material in Plattenform unter einer ebenen Glasplatte schwach gebogen, so bilden sich zwischen den beiden Platten Interferenzstreifen in Form von Hyperbeln, deren gemeinschaftliche Asymptoten mit der Querichtung der Platte den Winkel  $\alpha$  einschließen (senkrecht beobachten). Es ist dann  $\mu = \text{tg}^2 \alpha$ .

Die Poissonschen Zahlen für die Metalle.

Stoff	$\mu$	Stoff	$\mu$
Eisen . . . . .	0,28	Platin . . . . .	0,38
Kupfer . . . . .	0,34	Zinn . . . . .	0,33
Silber . . . . .	0,37	Zink . . . . .	0,2—0,3
Gold . . . . .	0,41	Kadmium . . . . .	0,3
Nickel . . . . .	0,30	Wismut . . . . .	0,33
Blei . . . . .	0,40	Palladium . . . . .	0,39
Aluminium . . . . .	0,33		

**5. Härte der Metalle.** Obwohl man bis heute noch keine absolute Definition dessen, was man gemeinhin unter „Härte“ versteht, besitzt, d. h. noch keine Vorrichtung, die es gestattet, diese als Materialkonstante unabhängig von der Größe und Art der Vorrichtung zu kennzeichnen, gibt es eine Anzahl von Prüfverfahren, die wenigstens eine relative Wertung gestatten. Auch das in der Mineralogie übliche Ritzverfahren gestattet keine absolute Messung, da man mit einer scharfen Spitze oder einer schnell rotierenden Scheibe aus weichem Metall auch härtere Körper ritzen kann.

Die Härte wurde daher von Hertz durch den Eindruck gemessen, den eine Kugel in dem betreffenden Material hervorruft. Wenn man eine Kugel des zu prüfenden Materials vom Radius  $r$  auf einen ebenen Körper desselben Metalls legt und mit einer gewissen Kraft  $P$  zusammenpreßt, wobei man die Kraft so lange steigert, bis gerade schon ein dauernder Eindruck sichtbar ist, so wird nach der Theorie von Hertz die Härte durch folgenden Ausdruck definiert:

$$\rho = \frac{1}{\pi} \left( \frac{2}{3} \frac{E}{1 - \mu^2} \right)^{2/3} \cdot \left( \frac{P}{r^2} \right)^{1/3},$$

und denselben Wert erhält man auch bei zwei über Kreuz gelegten gleichen Zylindern vom Radius  $r$ .

$E$  bedeutet den Elastizitätsmodul,  $\mu$  die Poissonsche Zahl. Diese Methode wird modifiziert auch in der Technik angewandt.

## VI. Plastizität der Metalle.

Bei der mechanischen Beanspruchung eines Metalles über die Elastizitätsgrenze hinaus treten Verschiebungen der kleinsten Teilchen ein. Denkt man sich im Inneren eines unbeanspruchten Metalles eine überaus kleine Kugel herausgegriffen, so wird diese, wenn der Körper elastisch beansprucht wird, im allgemeinen zu einem dreiachsigen Ellipsoid verspannt werden. In diesem Sinne spricht man von dem Ellipsoid der Verrückungen und von dem der Spannungen; den drei Hauptachsen entsprechen die drei Hauptspannungen. Die Plastizitätstheorie, die von Coulomb, Tresca, Saint Venant, Levy,

Boussinesq und Mohr begründet worden ist, macht nun die Annahme, daß im Gebiete der Plastizität die Differenz zwischen der größten und kleinsten Hauptspannung konstant bleibt und nennt ihren halben Betrag den „Plastizitätsmodul“  $P$ . Es entspricht dies der Annahme einer konstanten Höchstschubspannung.

Bei der Torsion eines Zylinders werden die Bereiche in der Nähe der Achse elastisch deformiert, während in der Nähe der Mantelfläche starke bleibende Verschiebungen auftreten können. Die Grenze bildet ein gewisser Radius, den man den Radius der Aktivitätszone nennt. Er ist

$$r_0 = \frac{2P(1 + \mu)}{E \cdot \alpha},$$

wo  $\alpha$  den auf die Längeneinheit entfallenden Torsionswinkel (im Bogenmaß) bedeutet.

Abb. 12.



Durch metallographische Methoden sichtbar gemachte Aktivitätszone eines um den Radius 90 cm gebogenen Zinnstreifens ( $7/10$  nat. Gr.).

Ebenso gibt es bei der Biegung eines Prismas oder eines Zylinders in der Nähe der „neutralen Zone“ eine „Aktivitätszone“, deren Breite durch:

$$h_0 = \frac{2P}{E} \varrho_0$$

gegeben ist, wo  $E$  den Elastizitätsmodul und  $\varrho_0$  den Krümmungsradius der „elastischen Linie“ bedeutet (Abb. 12).

Die Resultate der Plastizitätstheorie können nicht strenge Gültigkeit haben, denn es ist darin den sehr erheblichen Wirkungen der in den Metallkristallen auftretenden Richtkräfte (siehe S. 5) nicht Raum gegeben. Man hat zwar gefunden,

daß der Plastizitätsmodul bei allen Metallen mit Ausnahme der ganz spröden, z. B. Gußeisen, nur von der Differenz der beiden extremen Spannungen abhängt und nicht etwa davon, daß die letzteren, für sich betrachtet, große oder kleine Drucke sind. Dagegen wird  $P$  in gewissem Maße davon abhängen können, wie die mittlere Hauptspannung zwischen die extremen Spannungen verteilt ist.

Tresca hat durch Scherversuche an Blei (Durchlochung von Zylindern mit Stempeln verschiedenen Durchmessers) die Annahmen der Plastizitätstheorie bestätigt gefunden. Die Messung der Kräfte, die beim Lochen auftreten, hatte ihm für die untersuchten Metalle folgende Scherwiderstände gegeben:

Blei . . . . .	1 820 000 kg/qm
Zinn . . . . .	2 090 000 "
Legierung (?) von Blei und Zinn . . . . .	3 390 000 "
Zink . . . . .	9 000 000 "
Kupfer . . . . .	18 930 000 "
Eisen . . . . .	37 570 000 "

## VII. Schallschwingungen in Metallen.

**Beziehungen zwischen Elastizität und Schall.** Eine örtliche Kompression in einer Metallmasse pflanzt sich in Form von Kugelwellen nach allen Seiten hin fort. Ist  $s$  die Dichtigkeit des betreffenden Körpers und  $E$  der Elastizitätsmodul in kg/qmm, so ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit, mit der sich diese Kugelwellen ausbreiten, gegeben durch den Ausdruck:

$$U = \sqrt{\frac{9810 \cdot E}{s}} \text{ m/sec.}$$

Je nach der Anordnung des schwingenden Körpers kann man die umliegenden Luftschichten zum Mitschwingen bringen und aus der Höhe des hörbaren Tones auf die Schwingungszahl  $N$  bzw. auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit im Inneren des Körpers schließen. Wenn man z. B. einen Stab, der in der Mitte oder an seinen beiden Enden eingeklemmt ist, in Longitudinalschwingungen versetzt (durch Reiben mit einem mit Kolophonium eingeriebenen Lappen), so ist dessen Länge  $l$

gleich einer halben Wellenlänge. Bestimmt man durch Vergleich mit Stimmgabeln die Schwingungszahl  $N$ , so ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit  $U = 2lN$ .

Man kann das Verfahren benutzen, um den Elastizitätsmodul von Metallen zu bestimmen. Er ergibt sich aus dem Vorangehenden zu

$$E = \frac{(2Nl)^2 s}{9810} \text{ kg/qmm,}$$

wo  $l$  in  $m$  einzusetzen ist.

Auch die Querschwingungen, die ein kreisrunder oder rechteckiger Stab ausführt, lassen sich so aus dem Elastizitätsmodul und der Dicke bestimmen; die Berechnung ist jedoch hier umständlicher wegen der zahlreichen zueinander unharmonischen Töne.

Über Torsionsschwingungen siehe „Torsionsmodul“ S. 26.

Tabelle der Schallgeschwindigkeiten in Metallen.

Stoff	Schallgeschwindigkeit in m/sec bei 18° C	Stoff	Schallgeschwindigkeit in m/sec bei 18° C
Eisen . . . . .	5100	Zink . . . . .	3900
Kupfer . . . . .	3600	Magnesium . . . . .	4800
Silber . . . . .	2700	Kadmium . . . . .	2600
Gold . . . . .	2100	Wismut . . . . .	1800
Nickel . . . . .	4900	Kobalt . . . . .	4700
Blei . . . . .	1300	Rhodium . . . . .	4900
Aluminium . . . . .	5000	Palladium . . . . .	3000
Platin . . . . .	2800	Tantal . . . . .	3400
Zinn . . . . .	2600	Iridium . . . . .	4900

## VIII. Kapillarität der flüssigen und festen Metalle.

1. **Metalle in flüssigem Zustande.** Haftet ein Tropfen geschmolzenen Metalles an einem vertikal gehaltenen Draht, so heißt das Gewicht des abfallenden Tröpfens in Milligramm, dividiert durch die in Millimetern gemessene Peripherie des Drahtes, die Kapillaritätskonstante. Sie ist demnach leicht zu bestimmen; die abgefallene Perle kann mit einem Platinblech

oder Porzellanscherben aufgefangen und gewogen werden. Ist  $s$  die Dichte des betreffenden Metalles und  $V$  das Volumen eines Flüssigkeitsteilchens im Inneren, welches auf die Teilchen der Oberfläche wirkt, so mißt  $V/s$  die Kraft, welche die gleichförmig über das Volumen  $V$  verteilte Masse 1 auf die Oberflächenschicht der Flüssigkeit ausübt; also die Anziehung, die auf ein Stück der Oberflächenschicht der Flüssigkeit mit der Basis 1 von der Masse 1 im Inneren der Flüssigkeit ausgeübt wird. Diese Größe heißt spezifische Kohäsion. Es gilt für die Reihe der folgenden Metalle:

Quecksilber, Blei, Silber, Wismut, Antimon;  
 Gold;  
 Platin, Kadmium, Zinn;  
 Zink, Palladium;  
 Natrium;  
 Kalium

das nachfolgende merkwürdige Gesetz: Fallen Tropfen dieser Metalle aus Röhren von demselben Durchmesser, so verhalten sich die Volumina der Tropfen dieser Metalle entsprechend der obigen Reihenfolge wie die Zahlen 2:3:4:6:12:20.

Kapillaritätskonstanten der Metalle.

Stoff	Kapillaritätskonstante in mg/mm bei 18° C	Stoff	Kapillaritätskonstante in mg/mm bei 18° C
Eisen . . . . .	97	Zink . . . . .	88
Kupfer . . . . .	58	Natrium . . . . .	26
Silber . . . . .	43	Kadmium . . . . .	71
Gold . . . . .	100	Kalium . . . . .	37
Blei . . . . .	46	Wismut . . . . .	39
Platin . . . . .	169	Antimon . . . . .	25
Quecksilber . . . . .	59	Palladium . . . . .	13,6
Zinn . . . . .	60		

**2. Metalle im festen Zustande.** Die zwischen den inneren Teilchen eines Metalles im festen Zustande auftretenden anziehenden Kräfte erzeugen eine Zunahme der Dichtigkeit an der Oberfläche und damit eine Spannung an der freien Oberfläche. Die Festigkeit eines Drahtes von  $r$  mm Halbmesser

läßt sich als Summe einer „peripheren Festigkeit“:  $\alpha \cdot 2r$  und einer „inneren Festigkeit“:  $\beta \cdot r^2$  zerlegen. In Übereinstimmung mit der Definition für Flüssigkeiten (siehe den vorhergehenden Absatz) nennt man auch hier  $\alpha$  die Kapillaritätskonstante.

Tabelle der Kapillaritätskonstanten der Metalle  
im festen Zustande.

Stoff	Kapillaritätskonstante $\alpha$ in g/mm	
	für hartgezogenes Material	für ausgeglühtes Material
Eisen . . . . .	5731	1592
Kupfer . . . . .	2388	—
Silber . . . . .	2388	478
Gold . . . . .	1592	478
Platin . . . . .	3025	2388
Zink . . . . .	557	—
Stahl . . . . .	6685	955
Neusilber. . . . .	6685	1114
Silber (12 lötig) . .	5253	2547
Gold (14 karätig) .	3661	2228
Messing (Draht) .	2547	1751
Messing (Saite) . .	1751	637

## IX. Metalloptik.

1. **Allgemeines über Energiestrahlen.** Die Elektronentheorie (siehe S. 47) sieht den von aller wägbaren Materie befreiten Raum als Überträger jeder Kraftwirkung an und belegt ihn im Hinblick auf diese Eigenschaft mit einem besonderen Namen: Weltäther. Die Kräfte, die im Weltäther aufgespeichert liegen, bestehen in den „elektromagnetischen Feldern“, die die Elektronen in ihrer Umgebung hervorrufen. Gegenüber diesen Kraftwirkungen verhält sich der Äther wie ein elastischer Körper, in dessen Inneren irgendwelche Spannungen oder Kräfte wirken. Sind diese Kräfte oszillatorisch, so entstehen rings um den Erregungspunkt im Inneren des elastischen Körpers Kugelwellen, die sich nach allen Richtungen ausbreiten. Dasselbe ist der

Fall bei den elektromagnetischen Schwingungen, in die der Äther durch die Kraftwirkungen eines schwingenden Elektrons versetzt wird.

Je nach ihrer Wellenzahl haben aber Ätherschwingungen verschiedene Wirkungen auf die wägbaren Körper, gegen welche sie auffallen. Der menschliche Körper z. B. empfindet Ätherwellen, die in jeder Sekunde 400 bis 750 Billionen Schwingungen ausführen, als Licht. Noch schnellere Schwingungen bewirken starke chemische Veränderungen. Je geringer die Zahl der Schwingungen ist, die der Äther ausführt, desto mehr empfinden wir ihn als Wärme (das Grenzgebiet sind die ultraroten Strahlen). Allmählich kann man, wenn man in die Gegend von 5 Billionen Schwingungen in der Sekunde kommt, Eigenschaften an den Wärmestrahlen beobachten, die ganz die Wirkungen der in der Funkentelegraphie benutzten Ätherschwingungen aufweisen (Reststrahlen), und in der Tat ist man von der Frequenz der elektromagnetischen Schwingungen dann nur noch durch einen geringen Spalt getrennt, der noch nicht ganz überbrückt ist.

Wie aus der Definition des Äthers erhellt, besteht das elektromagnetische Feld auch im Inneren der Körper, oder, wie man zu sagen pflegt, der Äther durchdringt die wägbaren Körper.

Der Zustand, in dem sich die Elektronen im Inneren der festen Körper befinden, charakterisiert das Verhalten der betreffenden Körper. Während sich im Inneren der Metalle hauptsächlich frei bewegliche „Leitungselektronen“ befinden, erklärt man das Verhalten der Isolatoren durch negative Elektronen, die an die positiven gebunden sind, „Polarisationselektronen“, und mit ihnen zusammen elektrische Doppelpole bilden. Diese können sich unter der Einwirkung elektrischer Kräfte nur um gewisse molekulare Entfernungen gegeneinander verschieben. Der magnetische Zustand wird durch „Magnetisierungselektronen“ (Magnetonen), die kreisende Bewegungen um die positiven Ionen ausführen, erklärt.

Die Metalle enthalten nun allerdings vorwiegend Leitungselektronen. Für gewisse Vorgänge sind aber auch noch die Polarisationselektronen zu berücksichtigen.

**2. Brechungsindex der Metalle.** Die Berücksichtigung der Polarisationssektoren ist hauptsächlich bei den raschen Lichtschwingungen notwendig, wenn man z.B. den in das

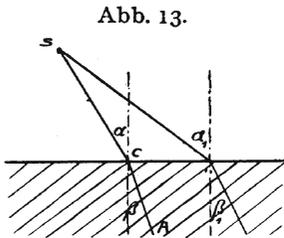


Abb. 13.

Metall eintretenden gebrochenen Lichtstrahl betrachten will. Daß man auch bei Metallen überhaupt von einer Brechung sprechen kann, ist durch einen Versuch bewiesen, den Kundt schon 1888 ausgeführt hat, indem er aus Metallen sehr dünne, bereits durchsichtige Prismen hergestellt und den

Brechungsexponenten bestimmt hat. Die Werte, die er erhielt, sind zwar ungenau, stehen aber keineswegs im Widerspruch mit den später auf ganz anderem Wege indirekt,

durch Beobachtung des reflektierten Lichtes, gefundenen.

In Abb. 13 ist S die Strahlungsquelle, SC der einfallende, CA der in ein „Mittel“ gebrochene Strahl. Dann ist für jeden beliebigen Strahl:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_1} \text{ usw.}$$

konstant und gleich dem Brechungsexponenten des Mittels. Abb. 14 gibt ihn für einige Metalle zwischen 200 bis 600  $\mu\mu$  ( $1 \mu = 0,001 \text{ mm}$ ;  $1 \mu\mu = 0,000001 \text{ mm}$ ).

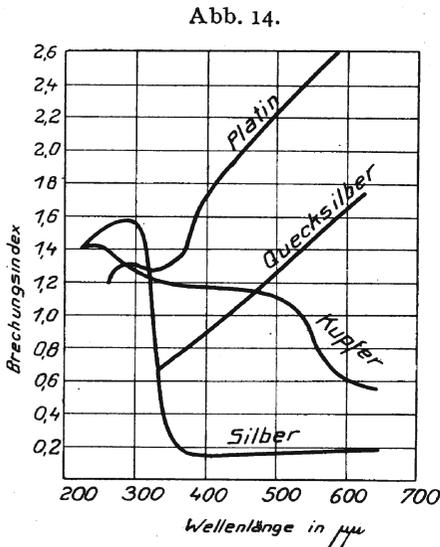


Abb. 14.

Brechungsindizes von Metallen bei verschiedener Wellenlänge.

**3. Reflexion an Metallen.**

Die Strahlung, die von der Oberfläche irgend eines Körpers ausgeht, kann man sich nach Lorentz hervorgebracht denken durch die im Körper schwingenden und dadurch elektromagnetische Wellen (Licht, Wärme) im Äther hervorbringenden Elektronen. Aus den allgemeinen Gesetzen, die die elektromagnetischen Wellen befolgen (Max-

welche Gleichungen) folgert man für die Grenzschicht zwischen Metallen und leerem Raum, daß das Verhältnis der Intensität der auftreffenden Welle zu der in das Metall eindringenden, das sogenannte Absorptionsvermögen oder der Eindringungskoeffizient  $a$ , nur von der Periode der Schwingung  $\tau$  und von der Leitfähigkeit  $\kappa$  in  $\frac{\text{qcm}}{\text{Ohm} \cdot \text{cm}}$  des Metalles abhängt. Es ist annähernd (für große Werte von  $\tau$ ):

$$a = \frac{2}{\sqrt{\kappa \tau}}.$$

Nun ist nach einem für die Strahlungserscheinungen grundlegenden Satze von Kirchhoff die infolge seiner Wärme von 1 qcm Oberfläche abgegebene Strahlungsenergie eines Körpers, sein Emissionsvermögen, proportional dem Absorptionsvermögen:

$$e = e_s \cdot a.$$

Die Konstante  $e_s$  ist das Emissionsvermögen für die Absorption 1, d. h. das Emissionsvermögen einer die ganze Strahlung „verschluckenden“ Oberfläche, d. i. eines sogenannten „absolut schwarzen Körpers“ (annähernd verwirklicht durch Platinschwarz).

Da der ankommende Strahl sich nur in den reflektierten und absorbierten spaltet, so ist das „Reflexionsvermögen“:

$$r = 1 - a = 1 - \frac{e}{e_s}.$$

Da man  $e_s$  kennt — die von 1 qcm des schwarzen Körpers bei der absoluten Temperatur  $T$  in einer Sekunde abgegebene Strahlungsenergie beträgt:  $5,36 \cdot 10^{-5} \cdot T^4$  Erg —, so kann man das Reflexionsvermögen allein durch Messung der in Form von Wärme in den Körper eingestrahlten Energie in einer bolometrischen Vorrichtung genau bestimmen.

Es sind hierbei einfarbige und langsam schwingende Strahlen von besonderem Vorteil, und es wurden daher Messungen im Gebiete des ultraroten Lichtes und der Reststrahlen (Hagen und Rubens) verwendet.

Man fand z. B. folgende Werte:

Tabelle der Absorptionskoeffizienten in Metallplatten.

Stoff	Absorbierte Strahlung in Prozenten der Gesamtstrahlung bei einer Wellenlänge von		
	0,012 mm, ultraroter Teil des Spektrums	0,0005 mm, sichtbarer Teil des Spektrums	0,00025 mm, ultravioletter Teil des Spektrums
Eisen . . . . .	6,2	45	—
Stahl . . . . .	4,9	45	67
Kupfer . . . . .	1,6	47	—
Silber . . . . .	1,15	10	66
Gold . . . . .	2,1	53	61
Nickel . . . . .	4,1	44	62
Platin . . . . .	3,5	42	66
Zinn . . . . .	28	45	—
Magnesium . . . . .	7	28	—
Chrom . . . . .	3,0	45	—
Wismut . . . . .	17,8	—	—
Wolfram . . . . .	3,7	51	—
Patentnickel P . . . . .	5,7	—	—
Patentnickel M . . . . .	7,0	—	—
Konstantan . . . . .	6,0	—	—
Rosesche Legierung . . . . .	7,1	—	—
Brandes und Schöne- mannsche Legierung	9,1	—	—

**4. Das Spektrum von Metaldämpfen.** Glühende Metaldämpfe senden Licht von einer für jedes Metall charakteristischen Wellenlänge aus. Im Spektralapparat zeigt sich daher bei jedem Metall eine Serie von scharfen Linien, die in bezug auf ihre Stellung zum Sonnenspektrum mit den Fraunhofer'schen usw. Linien verglichen werden können. Es ergibt sich folgende

Teilübersicht der Spektrallinien glühender Metaldämpfe.

Stoff	Wellenlänge μ	Stoff	Wellenlänge μ
Lithium . . . . .	0,670 79	Baryum . . . . .	0,618 3
Kadmium . . . . .	0,643 85	Quecksilber . . . . .	0,615 21
Zink . . . . .	0,636 23	Lithium . . . . .	0,610 36

Teilübersicht der Spektrallinien glühender Metalldämpfe (Forts.).

Stoff	Wellenlänge μ	Stoff	Wellenlänge μ
Baryum . . . . .	0,598 8	Aluminium . . . . .	0,396 16
Natrium . . . . .	0,589 60	" . . . . .	0,394 40
" . . . . .	0,589 00	Baryum . . . . .	0,393 5
Quecksilber . . . . .	0,579 06	Kalzium . . . . .	0,393 37
" . . . . .	0,576 95	Quecksilber . . . . .	0,390 2
Silber . . . . .	0,546 54	Magnesium . . . . .	0,383 83
Quecksilber . . . . .	0,546 08	" . . . . .	0,382 59
Kadmium . . . . .	0,537 90	Eisen . . . . .	0,382 05
Tellur . . . . .	0,535 05	" . . . . .	0,381 59
Kadmium . . . . .	0,533 81	" . . . . .	0,373 49
Eisen, Kalzium . . . . .	0,527 04	" . . . . .	0,372 00
Eisen . . . . .	0,526 96	Kadmium . . . . .	0,361 1
Silber . . . . .	0,520 91	Eisen . . . . .	0,358 12
Magnesium . . . . .	0,518 37	Kadmium . . . . .	0,346 7
" . . . . .	0,517 27	Eisen . . . . .	0,344 1
Eisen . . . . .	0,516 90	" . . . . .	0,340 4
Magnesium, Eisen . . . . .	0,516 74	Kadmium . . . . .	0,336 0
Kadmium . . . . .	0,508 58	Zink . . . . .	0,334 50
Eisen . . . . .	0,495 76	" . . . . .	0,330 3
Quecksilber . . . . .	0,491 6	" . . . . .	0,328 7
Zink . . . . .	0,481 05	" . . . . .	0,328 2
Kadmium . . . . .	0,479 99	" . . . . .	0,326 1
Zink . . . . .	0,472 22	Kadmium . . . . .	0,325 0
" . . . . .	0,468 01	" . . . . .	0,318 0
Kadmium . . . . .	0,467 82	Kalzium . . . . .	0,314 5
Eisen . . . . .	0,466 8	Eisen, Nickel . . . . .	0,310 1
Strontium . . . . .	0,460 74	Aluminium . . . . .	0,309 28
Indium . . . . .	0,451 1	" . . . . .	0,308 22
Kadmium . . . . .	0,441 30	Zink . . . . .	0,307 4
Eisen . . . . .	0,438 36	Eisen . . . . .	0,304 76
Quecksilber . . . . .	0,435 84	Zink . . . . .	0,303 58
" . . . . .	0,434 8	Kadmium . . . . .	0,298 07
Eisen . . . . .	0,433 52	" . . . . .	0,288 08
Eisen, Kalzium . . . . .	0,430 79	" . . . . .	0,283 69
Kalzium . . . . .	0,422 68	Zink . . . . .	0,280 08
Quecksilber . . . . .	0,407 80	" . . . . .	0,277 08
" . . . . .	0,404 7	Kadmium . . . . .	0,274 84
Kalium, Eisen . . . . .	0,404 6	Zink . . . . .	0,271 25
Kadmium . . . . .	0,398 2	" . . . . .	0,268 42
Kalzium . . . . .	0,396 8	Aluminium . . . . .	0,257 51

Teilübersicht der Spektrallinien glühender Metalldämpfe (Schluß).

Stoff	Wellenlänge $\mu$	Stoff	Wellenlänge $\mu$
Kadmium . . . . .	0,257 30	Kadmium . . . . .	0,214 44
Aluminium . . . . .	0,256 80	Zink . . . . .	0,209 9
„ . . . . .	0,237 31	„ . . . . .	0,206 2
„ . . . . .	0,236 71	„ . . . . .	0,202 5
Kadmium . . . . .	0,232 93	Aluminium . . . . .	0,199 0
„ . . . . .	0,231 29	„ . . . . .	0,193 5
Aluminium . . . . .	0,226 91	„ . . . . .	0,186 2
Kadmium . . . . .	0,226 5	„ . . . . .	0,185 4
„ . . . . .	0,219 46		

Die Dämpfe werden mit einer Metallsalzperle, die an einer Platinöse (elektrisch) angeschmolzen wird, erzeugt.

**5. Polarisation an Metallen.** Es sei nur erwähnt, daß ein auf eine Metallfläche fallendes linear polarisiertes Licht nach der Reflexion im allgemeinen elliptisch polarisiert ist.

**6. Lichtelektrischer Effekt an Metalloberflächen.** Solange die kinetische Energie der Elektronen eine gewisse Größe nicht überschreitet, können diese an der Oberfläche ihrem Drange, dort zu entweichen, nicht folgen, weil sie von den positiv geladenen Atomen nach dem Inneren gezogen werden; wird indeß die lebendige Kraft z. B. durch Erhöhung der Temperatur gesteigert, so kann die Oberfläche negative Elektrizität ausströmen und benachbarte Leiter laden (Thermoionik).

Die Erhöhung der kinetischen Energie kann aber auch durch kurzwelliges Licht erfolgen, dessen wechselndes elektrisches Feld die Elektronen in erzwungene Schwingungen setzt. Die Emission negativer Elektronen bewirkt die bereits lange bekannte Erscheinung der positiven Ladung bestrahlter Metalloberflächen.

Die Anfangsgeschwindigkeit der Elektronen beträgt einige Volt. (Es ist üblich, die Geschwindigkeit der Elektronen in Volt anzugeben, d. i. diejenige Potentialdifferenz, die einem ruhenden Elektron die betreffende Geschwindigkeit erteilen würde: der Geschwindigkeit  $v$  m/sec entspricht dabei die

Potentialdifferenz:  $V = 2,82 \cdot 10^{-16} \nu^2$ ; dieselbe Potentialdifferenz ist auch ein Maß der Arbeit, da die Energie des bewegten Elektrons von der Ladung  $\epsilon = 4,2 \cdot 10^{-10}$  gleich ist  $\epsilon \cdot V$ .

In jedem Metall hat ein Elektron eine dem betreffenden Metall eigentümliche Arbeit  $w_0$  zu leisten, um die Metalloberfläche verlassen zu können; sie beträgt für Natrium 1,7 Volt, für Platin 3,9 Volt.

Dagegen scheint die darauf folgende Elektronenemission nur von der Wellenlänge des bestrahlenden Lichtes und möglicherweise nicht von dem betreffenden Metall abzuhängen; der Koeffizient  $h$  in der Gleichung:

$$E = h\nu - w_0,$$

die die Energie des Elektrons als Funktion der Wellenlänge  $\nu$  darstellt, ist nämlich nicht sehr verschieden; für Wismut ist er:

$$h = 3,7 \cdot 10^{-15}$$

(wenn  $E$  und  $w_0$  in Volt gemessen werden), für Platin ist der Wert 1,65 mal größer.

Es gibt für jedes Metall eine gewisse Wellenlänge  $\nu_0$ , für die

$$E = h\nu_0 - w_0 = 0$$

ist, die also die Grenze jenes Lichtbereiches angibt, in dem photoelektrische Effekte überhaupt zu erwarten sind. Bei den Metallen Kalium, Natrium und Rubidium tritt dieser noch für sichtbares Licht auf, dagegen bei Zink nur noch für ultraviolettes Licht; Röntgenstrahlen bewirken den Effekt bei allen Stoffen.

Bereichsgrenze des lichtelektrischen Effektes  
für einige Metalle.

Stoff	Oberste Grenze des Wellenlängenbereiches, in dem der Effekt auftritt, in $\mu$		Stoff	Oberste Grenze des Wellenlängenbereiches, in dem der Effekt auftritt, in $\mu$	
	a <sup>1)</sup>	b <sup>2)</sup>		a <sup>1)</sup>	b <sup>2)</sup>
Kupfer . . . . .	0,300	0,309	Zink . . . . .	0,376	0,357
Aluminium . . . .	0,477	0,411	Natrium . . . . .	0,583	0,577
Platin . . . . .	0,288	0,291	Magnesium . . . .	0,382	0,375
Zinn . . . . .	0,362	0,337	Wismut . . . . .	0,330	0,337

<sup>1)</sup> Durch Messung der Maximalenergie der Elektronen gewonnen.

<sup>2)</sup> Durch Messung der mittleren Energie der Elektronen gewonnen.

## X. Das magnetische Verhalten der Metalle.

Nach Auffassung der Elektronentheorie wird der magnetische Zustand eines Körpers, z. B. eines Eisenstabes, durch die Summenwirkung gleichgerichteter „Molekularmagnete“ hervorgebracht. Jeder dieser Molekularmagnete ist nichts anderes, als eine Anzahl Elektronen, die alle um eine gemeinsame Achse in derselben Richtung herumrotieren. Diese Auffassung ist durch grundlegende Versuche Einsteins neuerdings stark gestützt worden. Hierbei geht keine Energie verloren. Man hat ja hier denselben Fall, wie bei jeder Planetenbewegung. Der eigentümliche Zustand, der in der Nähe solcher kreisender Elektronen beobachtet wird, und den man Magnetismus nennt, muß also unverändert bestehen bleiben. Dies gilt für die Moleküle des Eisens und weniger anderer Stoffe. Die meisten jedoch zeigen diese einfache Rotationsbewegung mit einer bevorzugten Achse nicht.

Wird ein unmagnetischer Körper, in dem also die Molekularmagnete nach allen möglichen Richtungen orientiert sind und daher in Summa keinen Magnetismus zeigen, einem starken magnetischen Feld ausgesetzt, so entstehen im allgemeinen zweierlei Wirkungen:

α) Die Molekularmagnete werden teilweise so gerichtet, daß der nunmehr magnetische Körper in den dichtesten Teil des Kraftfeldes hineingezogen wird.

β) Das Magnetfeld bewirkt innerhalb der Moleküle eine solche Änderung der Elektronenbewegung, daß der Körper sich aus dem Felde herauszubewegen sucht.

In jedem Körper sind wahrscheinlich beide Wirkungen vorhanden und je nachdem, ob die erste oder die zweite überwiegt, spricht man von para- oder diamagnetischen Körpern.

Ein diamagnetischer Körper wird — wenn der Versuch im Vakuum ausgeführt wird — von einem starken Magneten abgestoßen, ein paramagnetischer wird angezogen.

Der magnetische Kraftfluß ist also in paramagnetischen Körpern ein wenig größer, in diamagnetischen ein wenig kleiner

als im Vakuum (Äther). Die Verhältniszahl heißt „spezifische Permeabilität“ des betreffenden Körpers; sie ist daher für paramagnetische Körper ein klein wenig größer, für diamagnetische etwas kleiner als 1.

Tabelle der spezifischen Permeabilität der Metalle.

Paramagnetische Metalle		Diamagnetische Metalle	
Stoff	Die Permeabilität ist gegenüber der des Äthers (gleich 1 000 000) größer um:	Stoff	Die Permeabilität ist gegenüber der des Äthers (gleich 1 000 000) kleiner um:
Mangan . . . .	3800	Kupfer . . . .	10
Palladium . . .	700	Blei . . . . .	etwa 13
Platin . . . . .	365	Zink . . . . .	13
Magnesium . . .	51	Silber . . . . .	19
Kalium . . . . .	46	Quecksilber . .	25
Natrium . . . . .	28	Gold . . . . .	38
Aluminium . . .	23	Antimon . . . .	48
Zinn . . . . .	3,8	Wismut . . . . .	176

Für die sogenannten „ferromagnetischen“ Metalle, wie Eisen, Nickel, Kobalt, Heuslersche Legierungen (aus Mn, Al, Cu) usw. ist die spezifische Permeabilität jedoch weit größer als 1, etwa von der Größenordnung 100 bis 1000; sie hängt hier wesentlich von der Feldstärke und der Vorgeschichte des Materials ab.

Nickel läßt sich im Mittel . . . . . auf etwa 30 Proz.,  
 Heuslersche Legierungen . . . . . „ „ 50 „  
 und Gußeisen und Kobalt . . . . . „ „ 75 „

der Magnetisierung von Schmiedeeisen bringen.

Fast gänzlich unmagnetisch (spezifische Permeabilität = 1,4) ist hingegen Manganstahl mit 1 Proz. Kohlenstoff und 12 Proz. Mangan.

Die ferromagnetischen Substanzen werden bei der „kritischen Temperatur“ (siehe Tabelle) unmagnetisch; kühlt man wieder unter diese Temperatur ab, so kehrt der magnetische Zustand wieder, wobei sich der Temperaturpunkt durch Unterkühlung mehr oder weniger verschiebt.

Kritische Temperaturen.

Eisen . . . . .	etwa	690—870 <sup>0</sup>
Nickel . . . . .	„	310 <sup>0</sup>
Nickelstahl (25 Proz. Ni) . . . . .	„	0 <sup>1)</sup> und 580 <sup>0</sup>
Heuslersche Legierung . . . . .	„	200 und 500 <sup>0 2)</sup>

Die bei Sättigung erreichte Magnetisierungsintensität ist bei sehr tiefen Temperaturen (etwa — 255<sup>0</sup>) um einige Prozen- te größer als bei Zimmertemperatur:

bei Nickel . . . . .	um etwa	5,5 Proz.,
„ Eisen . . . . .	„	2,1 „
„ Magnetit . . . . .	„	6 „
„ Kobalt viel geringer als bei Nickel.		

Man hat neuerdings erkannt, daß der Magnetismus ebenso wie die Elektrizität eine atomistische Struktur aufweist. Das magnetische Moment (Polstärke  $\times$  Polabstand) des sogenannten Magnetons beträgt  $16,4 \cdot 10^{-22}$  abs. E. Man kann es her- vorgebracht denken durch ein Elektron, das sich in einem Kreise von  $10^{-8}$  cm Radius mit einer Periode von  $10^{-14}$  Se- kunden dreht.

Die Atome verschiedener Stoffe enthalten je eine be- stimmte Zahl von Magnetonen, die sich mit der Temperatur erhöht.

Zahl der Magnetonen im Eisen, Nickel und Kobalt.

Stoff	Zahl der Magnetonen im Atom bei			
	— 273 <sup>0</sup>	gewöhnlicher Temperatur	770—1200 <sup>0</sup>	mehr als 1200 <sup>0</sup>
Eisen . . . . .	11	—	—	—
Nickel . . . . .	3	—	8	9
Kobalt . . . . .	9	15 (Preuß.)	—	(zwischen 1460 u. 1645 <sup>0</sup> ) 15
$\beta$ Eisen . . . . .	—	10	—	—
$\gamma$ Eisen . . . . .	—	18	—	—
Fe <sub>2</sub> Co . . . . .	—	21	—	—

1) Unmagnetischer Nickelstahl, unter 0<sup>0</sup>, abgekühlt wird magnetisch.

2) Über 500<sup>0</sup> erhitzt, werden diese Legierungen dauernd un- magnetisch.

## XI. Elektrizität und Metalle.

1. **Elektrizitätsleitung in Metallen.** Die neuere Physik versteht unter „Metallen“ elektrische Leiter von solcher Beschaffenheit, daß der Durchtritt des elektrischen Stromes keine Verschiebungen der Massenteilchen im Inneren des Körpers (Konzentrationsänderungen) hervorbringt. Dadurch unterscheiden sich die Metalle scharf von den übrigen elektrisch leitenden Körpern, bei denen man derartige Veränderungen, die stets nach dem Faradayschen Gesetz vor sich gehen, bisher immer hat beobachten können.

Unter „Leitung“ wird hierbei nach der von Riecke 1898 begründeten und von Drude, Thomson und H. A. Lorentz weiter ausgebauten Theorie die mehr oder weniger leichte Beweglichkeit der Elektronen — der negativen Elementarteilchen der Elektrizität — verstanden. Nach aller Erfahrung haftet nämlich die positive Elektrizität fest an den Metallatomen; von den negativen Teilchen, den Elektronen, ist hingegen nur eine gewisse Anzahl an die Molekel gebunden. Die übrigen vollführen in dem zwischen den Molekeln liegenden freien Raum ebensolche Bewegungen, wie sie etwa die Atome eines überaus feinen Gases vollführen würden. Wie groß der Prozentsatz dieser freien Elektronen in jedem Falle ist, hängt von den Eigenschaften des betreffenden Körpers und von dessen Temperatur ab.

In glühenden Metallen ist die innere Energie der Elektronen so groß, daß sie die Oberfläche des Körpers verlassen und in den freien Raum austreten (siehe S. 42). Zahlreiche Methoden zur Bestimmung der negativen Ladung und der Masse der Elektronen (wobei sich ergab, daß die Kathodenstrahlen aus denselben Teilchen bestehen) haben übereinstimmend die Werte:

Ladung  $e = 4,69 \cdot 10^{-10}$  elektrostatische Einheiten oder  
 $e = 1,565 \cdot 10^{-20}$  elektromagnetische CGS-Einheiten,  
und als Verhältnis:

$$\frac{\text{Ladung}}{\text{Masse}} = \frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^7 \text{ elektromagnetische Einheiten ergeben.}$$

Bemerkenswert ist noch ein Ergebnis von Drude, der gefunden hat, daß sich die Elektronen energetisch wie Gas-

partikel verhalten, ja, daß sich hier sogar dieselbe universelle Gaskonstante zu  $2,02 \cdot 10^{-16}$  Erg für einen Grad Temperaturerhöhung ergibt. Aus den bisher genannten Werten ergibt sich nach den Gesetzen der kinetischen Gastheorie als mittlere Geschwindigkeit der Elektronen in Metall für die Temperatur  $0^{\circ}\text{C}$ :

$$v = 111 \text{ km in der Sekunde.}$$

Die Elektronen bewegen sich also in den Metallen verhältnismäßig langsam, während man z. B. bei den Kathodenstrahlen in gewissen Fällen in die Nähe der Lichtgeschwindigkeit = 300000 km in der Sekunde kommt.

Wenn wir nun in einem Metallstück eine elektrische Potentialdifferenz hervorbringen, so wird dadurch im Inneren des Metalles ein gerichtetes elektrisches Feld entstehen und dieses wird das „negativ geladene Elektronengas durch das poröse Gewebe der Atome nach einer Seite hin“ treiben. Der Reibungswiderstand, den es hierbei erfährt, ist nach dem bekannten Poiseuilleschen Gesetz der Mechanik genau proportional mit der Strömungsgeschwindigkeit. Anders ausgedrückt: das Verhältnis von Stromdichte und Spannungsfälle (Feldstärke) ist eine Materialkonstante: die Leitfähigkeit, die nur von der Temperatur, dem Druck und anderen den Zustand bestimmenden Größen abhängt. Ihr reziproker Wert ist der spezifische Widerstand. Der Gesamtwiderstand eines zylindrischen Stabes (Drahtes), den in seiner Längsrichtung ein elektrischer Strom gleichmäßig durchfließt, ist, wenn  $l$  die Länge,  $q$  den Querschnitt und  $\rho$  den spezifischen Widerstand des Materials bedeutet:

$$W = \frac{\rho \cdot l}{q}.$$

Die Hintereinanderschaltung zweier Widerstände  $W_1$  und  $W_2$  ergibt einen Gesamtwiderstand:

$$W_H = W_1 + W_2.$$

Hingegen erhält man aus der Formel:

$$W_K = \frac{W_1 \cdot W_2}{W_1 + W_2}$$

den „Kombinationswiderstand“ der beiden, parallel geschalteten Widerstände.

Spezifische Widerstände und Leitvermögen einiger metallisch leitender Körper bei 18° C.

Stoff	Spez. Widerstand in $\frac{\text{Ohm} \cdot \text{qmm}}{\text{m}}$	Leitfähigkeit in $\frac{\text{m}}{\text{Ohm} \cdot \text{qmm}}$
Eisen . . . . .	0,09—0,15	11,1—6,7
Kupfer . . . . .	0,017	58,8
Silber . . . . .	0,016	62,1
Gold . . . . .	0,023	43,4
Nickel . . . . .	0,08—0,11	12,5—9,1
Blei . . . . .	0,21	4,76
Aluminium . . . . .	0,032	31,2
Platin . . . . .	0,108—0,14	9,3—7,1
Quecksilber . . . . .	0,956	1,046
Zinn . . . . .	0,12	8,3
Zink . . . . .	0,061	16,4
Natrium <sup>1)</sup> . . . . .	0,045	22,4
Magnesium . . . . .	0,048	21
Kadmium . . . . .	0,076	13,2
Kalzium <sup>2)</sup> . . . . .	0,075	13,3
Kalium <sup>3)</sup> . . . . .	0,067	15
Wismut . . . . .	1,2	0,82
Kobalt <sup>4)</sup> . . . . .	0,097	10,3
Antimon . . . . .	0,44	2,3
Osmium . . . . .	0,095	10,5
Palladium . . . . .	0,11	9
Tantal . . . . .	0,165	6,06
Wolfram <sup>5)</sup> . . . . .	0,062	16,1
Stahl . . . . .	0,15 —0,5	6,7—2,0
Messing (30 Proz. Zn) . . . . .	0,085—0,065	12—15
Neusilber . . . . .	0,16 —0,40	6,2—2,5
Konstantan . . . . .	0,49	2,04
Nickelin I . . . . .	0,42	2,4
Nickelin II . . . . .	0,33	3
Manganin . . . . .	0,42	2,38
Rheotan . . . . .	0,47	2,1

1) Bei 21,7° — 2) Bei 17° — 3) Bei 0° — 4) Bei 20° — 5) Bei 25°.  
Deutsch, Metallphysik.

Bis auf gewisse Ausnahmen läßt die elektrochemische Stellung eines Elementes einen Schluß auf dessen Leitfähigkeit zu. Dies wird aus der folgenden Tabelle deutlich, die, nach Art des periodischen Systems eingeteilt, die Leitfähigkeit der Elemente bei 0°C in  $\frac{m}{\text{Ohm} \cdot \text{qmm}}$  wiedergibt. Den Zahlen der Tabelle liegen Messungen an sehr reinem und weichem Material zugrunde. Trotzdem kann man ihre Genauigkeit nicht mit mehr als 2 Proz. ansetzen, da schon die geringsten Verunreinigungen die Leitfähigkeit stark herabsetzen. Ebenso erhöht die Verfestigung den Widerstand der Metalle. Bei Silber beträgt der Unterschied etwa 6,5 Proz., bei Kupfer etwa 2,5 Proz. und bei Gold etwa 1,7 Proz. Stahl leitet in weichem Zustand dreimal so gut als im harten, doch sind hier die Ursachen in der Konstitution begründet.

Elektrische Leitfähigkeit der Elemente bei 0°.

He o	Li 11,9	Be	B	C 0,034	N o	O o	F o	
	Ne o	Na 21,1	Mg 24,0	Al 37	Si	P	S o	Cl o
Ar o	K 15,0	Ca 9,5 (?)	Sc	Ti 0,28	V	Cr	Mn	Fe Ni Co 11,5 14,4 11
		Cu 64	Zn 17,5	Ga 1,9	Ge	As 2,86	Se	Br o
Kr o	Rb 7,8	Sr 4,0	Y	Zr	Nb 5,4	Mo		Ru Rh Pd 18 10,0
		Ag 67	Cd 14,6	In 11,9	Sn 9,8	Sb 2,6	Te	J
Xe o	Cs 5,2	Ba	La	Ce usw.	Ta 6,8	W		Os Ir Pt 10 20 9,9
		Au 46	Hg 4,5	Tl 5,6	Pb 5,1	Bi 0,90		
		Ra		Th		U		

Der spezifische Widerstand der reinen Metalle steigt mit der Temperatur in sehr weiten Grenzen nahezu proportional an; dieses Gesetz ist ebenso wie das Ohmsche aus den Gasgesetzen unmittelbar ableitbar: denn der Reibungswiderstand, den ein Gas zu überwinden hat, wenn man es durch eine enge Kapillare schickt oder wenn es durch eine poröse Wand diffundiert, ist ebenfalls bei höheren Temperaturen größer als bei geringen. Auch hier geht die Übereinstimmung mit den Gasgesetzen bis ins Quantitative: der „Temperaturkoeffizient“ für den spezifischen Widerstand ist in gewisser Annäherung gleich dem Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha = 0,00367$  der idealen Gase (siehe S. 48). Die geringsten Verunreinigungen verringern diesen Wert jedoch ganz erheblich; eine Ausnahme bilden auch die magnetisierbaren Metalle Eisen und Nickel, bei denen dieser Wert größer ist. Ganz wesentliche Abweichungen treten im Gebiet der tiefen Temperaturen (unterhalb der der flüssigen Luft) auf:

Die Leitfähigkeit der Metalle bei tiefen Temperaturen.

Stoff	Verhältnis der Leitfähigkeit			
	um $-183^0$	um $-203^0$	um $-260^0$	bei $-270,8^0$
	zu der bei $0^0$			(Kamerlingh Onnes)
Eisen . . . . .	—	13,9	—	—
Kupfer . . . . .	5,3	10,9	385	—
Silber . . . . .	3,77	—	357	—
Gold . . . . .	3,12	—	—	9 100
Nickel . . . . .	7,15	—	—	—
Blei . . . . .	3,30	—	76	—
Aluminium . . . . .	5,01	8,64	—	—
Platin . . . . .	—	4,48	42	84
Quecksilber . . . . .	13,5	—	—	33 000
Zinn . . . . .	3,83	—	—	—
Zink . . . . .	3,54	—	—	—
Magnesium . . . . .	4,07	—	—	—
Kadmium . . . . .	2,32	—	—	—
Wismut . . . . .	2,64	—	—	—
Antimon . . . . .	3,7	—	—	—
Palladium . . . . .	3,66	—	—	—
Thallium . . . . .	4,31	—	—	—

Unterhalb einer gewissen minimalen Temperatur sinkt der Temperaturkoeffizient des spezifischen Widerstandes wieder auf einen kleinen Wert.

Der hohe Temperaturkoeffizient der reinen Metalle wird zur Temperaturmessung benutzt (Widerstandsthermometer). Besonders gut eignet sich Platin, das von sehr tiefen Temperaturen bis etwa 1100° (Platinthermometrie) verwendbar ist.

Druck erhöht den Widerstand der Metalle. Wie man aus der folgenden Tabelle ersieht, sind die Änderungen bei Anwendung großer Drucke nicht unbedeutend, weshalb man vorgeschlagen hat, diese Eigenschaften zur Messung hoher Drucke zu verwenden (wegen des Auftretens von Kompressionswärme sind nur Materialien mit geringem Temperaturkoeffizienten verwendbar).

Änderung des spezifischen Widerstandes durch Druck.

Stoff	Prozentuale Volumenverminderung (Kompressibilität). für 1000 Atm. berechnet	Prozentuale Widerstandsveränderung für 1000 Atm. berechnet
Quecksilber . . . .	0,0039	+ 3,26
Blei . . . . .	0,0024	+ 1,43
Aluminium . . . .	0,0014	+ 0,388
Silber . . . . .	0,0010	+ 0,38
Kupfer . . . . .	0,0008	+ 0,212
Wismut . . . . .	0,0030	— 1,96
Platin . . . . .	0,0004	+ 0,19
Manganin . . . .	0,0008	— 0,222
Konstantan . . . .	0,0006	+ 0,064

Bei niedrigen Temperaturen scheint jedoch für den Widerstand ein negativer Druckkoeffizient zu bestehen, denn die Messungen an Blei ergaben bei — 183 und bei — 253° einen solchen von — 0,0225 bzw. von — 0,017.

Geschmolzene Metalle leiten, soweit bekannt, mit Ausnahme von Wismut und Antimon, schlechter als im festen Zustand. Die Änderung der Leitfähigkeit erfolgt dabei unstetig.

Änderung der Leitfähigkeit einiger Metalle beim Übergang vom festen in den flüssigen Aggregatzustand.

Stoff	Schmelzpunkt ° C	Verhältnis der Leitfähigkeit des festen Stoffes zu der der Schmelze; für den Schmelzpunkt
Gold . . . . .	1063	2,28
Blei . . . . .	327	1,95
Quecksilber . . . . .	— 38,8	4,1
Zinn . . . . .	232	2,2
Zink . . . . .	419	2,0
Natrium . . . . .	97,6	1,34
Kadmium . . . . .	321	1,96
Kalium . . . . .	62,5	1,39
Wismut . . . . .	269	0,46
Antimon . . . . .	629,5	0,70
Lithium . . . . .	177,8	2,51
Thallium . . . . .	301	2,0

Metalldämpfe leiten im allgemeinen schlecht. Die Alkalimetalle machen jedoch davon eine Ausnahme; ihre Leitfähigkeit ist schon bei niedriger Temperatur ziemlich hoch.

Modifikationsänderungen bewirken in der Regel eine plötzliche Änderung des Leitvermögens. Silicium das bei 220° von der  $\alpha$ - in die  $\beta$ -Modifikation übergeht, vergrößert an dieser Stelle seinen Widerstand um das Vierfache; bei 440°, wo es von der  $\beta$ -Modifikation in die  $\gamma$ -Modifikation übergeht, um das 1,2fache. Sowohl im Zustand  $\alpha$  wie im Zustand  $\beta$  und  $\gamma$  ist jedoch Temperatursteigerung mit einer Abnahme des Widerstandes verbunden.

Die Gasabsorption verschiedener Metalle bringt eine verhältnismäßig starke Erhöhung des elektrischen Widerstandes mit sich.

Messungen, die bei 720° mit einigen Metallen in einer Wasserstoffatmosphäre von 760 mm Hg vorgenommen wurden, ergaben folgende Werte:

Widerstandserhöhung durch Wasserstoffaufnahme.

Stoff	Absorbierter Wasserstoff in tausendstel Prozenten	Widerstandserhöhung in Prozenten
Eisen . . . . .	0,18	0,04
Kupfer . . . . .	0,05	0,01
Nickel . . . . .	0,62	0,14
Platin . . . . .	0,008	0,002

Die Leitfähigkeit von Legierungen.

Wir beschränken uns auf die Besprechung der festen Zweistofflegierungen. Das elektrische Verhalten der Legierungen richtet sich nach der Gruppe, zu der sie gehört:

Bei Legierungen, deren Bestandteile im festen Zustande nicht ineinander löslich sind, die also ein heterogenes Kristallgemenge bilden, kann man die Leitfähigkeit der Legierung aus der der einzelnen Bestandteile nach der Mischungsregel — diese auf Volumenprocente angewandt — annähernd berechnen. Dies gilt z. B. für Cd-Zn, Cd-Sn, Cd-Pb, Sn-Pb, Zn-Sn. Die Leitfähigkeitskurve ist annähernd eine gerade Linie.

Sind die Komponenten gegenseitig löslich und zwar so, daß die eine nur in geringer Menge vorhanden ist, so gilt der Satz, daß äquivalente Mengen verschiedener Metalle, wenn sie in einem und demselben Metall gelöst sind, dessen Leitfähigkeit um denselben Betrag verringern: „Atomare Leitfähigkeiterniedrigung“. Am auffälligsten trifft dieses Gesetz für die Legierungen des Eisens mit Kohle, Silicium, Mangan, Phosphor, Aluminium, Chrom, Nickel und Wolfram zu, also für die Stahllarten. Jedes Atomprozent dieser Stoffe vermehrt den spezifischen Widerstand des Eisens um  $0,059 \frac{\text{Ohm} \cdot \text{qmm}}{\text{m}}$ .

Man erhält also den spezifischen Widerstand irgendeines Stahles durch folgende Gleichung:

$$\rho = 0,076 + 0,059 \nu,$$

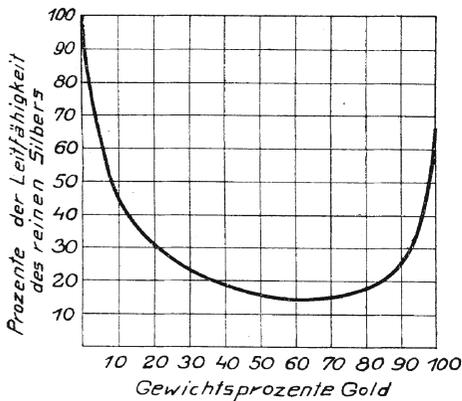
wo  $\nu$  den Gehalt des Stahles an sämtlichen vorhin erwähnten Stoffen in Atomprozenten bedeutet. Dabei ist jedoch zu be-

achten, daß die Kohle dem Eisen teilweise auch mechanisch beigemischt ist. Die hierdurch erzeugte Widerstandsänderung ist natürlich nach der Mischungsregel zu berechnen.

Für die übrigen Legierungsgruppen lassen sich derart einfache Gesetze nicht aussprechen. Den Typus eines Leitfähigkeitsdiagrammes zweier vollständig ineinander löslicher Stoffe zeigt folgende Abb. 15. Hierher gehören die Legierungen Au-Ag (Abbildung) und Cu-Ni.

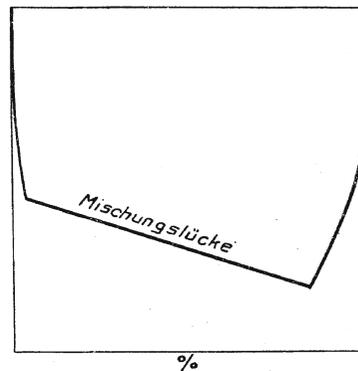
Ist die Löslichkeit nur innerhalb eines bestimmten Gebietes möglich, d. h. besteht die Legierung innerhalb eines Gebietes aus heterogenen Kristallen (Mischungsregel), so ergibt sich der folgende Typus (Abb. 16).

Abb. 15.



Leitfähigkeitskurve des Systems Silber—Gold.

Abb. 16.



Leitfähigkeitskurve eines Systems mit Mischungslücke.

Enthält die Legierung chemische Verbindungen, so läßt sich etwas Allgemeines über das Verhalten der Leitfähigkeit überhaupt nicht aussagen. In diese Gruppen gehören u. a. bekanntlich die Zn-Cu-Legierungen und die Bronzen.

### Der Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes von Legierungen.

a) Der Temperaturkoeffizient einer Legierung, die aus heterogenen Kristallen besteht, kann nach der Mischungsregel berechnet werden. Er schwankt für die reinen Metalle jedoch

nur zwischen 0,0038 und 0,0048, so daß man einen Mittelwert auch für die Legierungen ansetzen kann.

b) Für feste Lösungen hat Matthiesson eine einfache Faustregel aufgestellt. Hiernach ist die prozentuale Leitfähigkeitserniedrigung bei einer Temperatursteigerung von 100° etwa gleich dem 29fachen Verhältnis aus der wahren Leitfähigkeit und derjenigen, die sich nach der Mischungsregel ergeben würde. Der geringe Temperaturkoeffizient und der hohe Widerstand dieser Gruppe von Legierungen macht diese als Widerstandsmaterial für die Elektrotechnik ganz besonders brauchbar. Folgende Tabelle gibt für diese einige Zahlen:

Zusammensetzung und elektrisches Verhalten einiger Widerstandslegierungen.

Stoff	Zusammensetzung	Spezifischer Widerstand in $\frac{\text{Ohm} \cdot \text{qmm}}{\text{m}}$	Temperaturkoeffizient für $\frac{1}{1000}^{\circ} \text{C}$
Konstantan . . . . .	60 Cu, 40 Ni	0,49	— 0,03 bis + 0,05
Manganin . . . . .	84 Cu, 12 Mn, 4 Ni	0,42	„ + 0,03
Nickelin . . . . .	61,6 Cu, 17,7 Zn, 18,5 Ni	0,33	„ + 0,3
Patentnickel . . . . .	75,5 Cu, 24,5 Ni	0,33	+ 0,2

Über die übrigen Legierungsgruppen sind auch in bezug auf den Temperaturkoeffizienten keine bestimmten Regeln aufstellbar.

**2. Beziehungen zwischen der Wärme- und Elektrizitätsleitung der Metalle.** Auch der Vorgang der Wärmeleitung bei den reinen Metallen ist elektronentheoretisch so zu erklären, daß das äußerst feine Elektronengas ausschließlich der Überträger dessen ist, was wir Wärme nennen. Es muß deshalb zwischen der Fähigkeit, die Elektrizität und der, die Wärme zu leiten, ein gewisser Zusammenhang bestehen. Dieser wird durch das Wiedemann-Franzsche Gesetz (1853) ausgesprochen, daß nämlich „das Verhältnis der elektrischen Leitfähigkeit  $k$  zu der Wärmeleitfähigkeit  $\kappa$ “ — letztere ist die Wärmemenge, die bei einem Temperaturunterschiede von 1° C

zwischen zwei im Abstände von 1 cm gegenüberstehenden Flächen durch das zwischen diesen liegende Metall in der Sekunde übergeleitet wird — „bei einer bestimmten Temperatur bei den reinen elementaren Metallen im festen Aggregatzustande eine universelle Konstante“ ist. Man kann wieder aus der kinetischen Gastheorie unschwer ableiten, daß dieses Verhältnis

$$\frac{k}{\kappa} = \frac{4}{3} \left( \frac{\alpha}{e} \right)^2 \cdot T$$

ist, wo  $\alpha$  die Gaskonstante  $= 2,02 \cdot 10^{-16}$ ,  $e$  die Ladung des Elektrons  $= 1,565 \cdot 10^{-20}$  und  $T$  die absolute Temperatur ist.

Es ergibt sich somit:

$$\frac{k}{\kappa} = 2,274 \cdot 10^8 \cdot T \text{ elektromagnetische Einheiten,}$$

oder

$$\frac{k}{\kappa} = 2,47 \cdot 10^{-13} \cdot T \text{ elektrostatische Einheiten.}$$

Aus dieser Formel geht auch das Lorenzsche Gesetz hervor, daß das Leitverhältnis der reinen Metalle der absoluten Temperatur proportional ist.

Für  $T = 291^{\circ}$ , d. h. für  $18^{\circ}\text{C}$ , erhält man den Wert  $6,47 \cdot 10^{10}$ . Aus der folgenden Tabelle sieht man, daß auch die Beobachtung zwar nicht genau, jedoch mit relativ guter Annäherung diesen Wert ergeben hat.

Verhältnis der elektrischen zur Wärme-Leitfähigkeit für verschiedene Metalle.

Stoff	Leitverhältnis: Elektrostatische Einheiten bei $18^{\circ}\text{C}$	Temperaturkoeffizient für $1/1000^{\circ}\text{C}$
Aluminium, 99 Proz. . . . .	$6,36 \cdot 10^{10}$	4,37
Kupfer, rein . . . . .	6,71	3,95
Silber, „ . . . . .	6,86	3,77
Gold, „ . . . . .	7,09	3,75
Nickel, 97 Proz. . . . .	6,99	3,93
Zink, rein . . . . .	6,72	3,85
Kadmium, rein . . . . .	7,06	3,73
Blei, rein . . . . .	7,15	4,07
Zinn, „ . . . . .	7,35	3,4

Verhältnis der elektrischen zur Wärme-Leitfähigkeit  
für verschiedene Metalle (Fortsetzung).

Stoff	Leitverhältnis: Elektrostatische Ein- heiten bei 18° C	Temperaturkoeffi- zient für $\frac{1}{1000}^{\circ}\text{C}$
Platin, rein . . . . .	7,53	4,64
Palladium, rein . . . . .	7,54	4,69
Eisen, (0,1 Proz. C) . . . . .	8,02	4,32
Wismut, rein . . . . .	9,64	1,51
Rotguß . . . . .	7,57	3,46
Konstantan . . . . .	11,06	2,39
Manganin . . . . .	9,14.	2,74

Die Wärmeleitfähigkeit der reinen Metalle ändert sich, wie die folgende Tabelle zeigt, mit der Temperatur, auch wenn man einen großen Bereich betrachtet, nur wenig; geringe Beimengungen können sie jedoch sehr verringern.

Wärmeleitfähigkeit der reinen Metalle im Temperaturbereich  
— 170 bis +100° (Äquivalentwerte) in  $\frac{\text{Joule}}{\text{Grad} \cdot \text{cm} \cdot \text{sec}}$ .

Stoff	— 170	— 100	+ 18	+100°
Kupfer . . . . .	4,660	4,078	3,848	3,804
Silber . . . . .	4,170	4,224	4,218	4,157
Zink . . . . .	1,170	1,135	1,110	1,098
Kadmium . . . . .	1,010	0,968	0,930	0,905
Aluminium . . . . .	2,195	2,060	2,011	2,060
Zinn . . . . .	0,817	0,738	0,650	0,608
Blei . . . . .	0,390	0,365	0,350	0,340
Manganin . . . . .	0,142	0,160	0,220	0,260
Wismut . . . . .	0,193	0,120	0,080	0,067

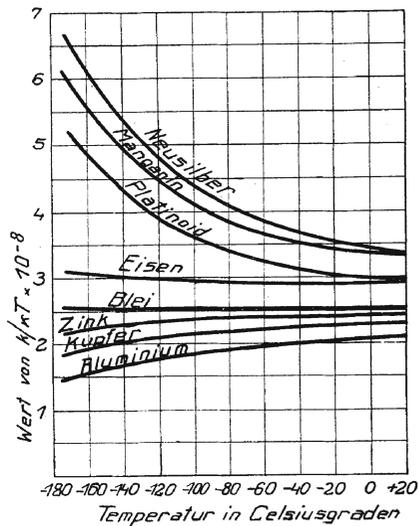
Für die Metallegierungen, für metallisch leitende Erze, für Kohle und für geschmolzene Metalle (Quecksilber) gilt das Wiedemann-Franzsche Gesetz nicht.

Aus dem Wiedemann-Franzschen Gesetz ergibt sich, daß der Wert  $k/\kappa T$  eine Konstante, und zwar  $2,274 \cdot 10^8$  ist. Abb. 17 zeigt zunächst große Abweichungen der verschiedenen Metalle von diesem Wert; mit wachsender Temperatur nähern sie sich ihm jedoch alle.

**3. Thermoelektrische Kraft.** Wenn man zwei verschiedene Metalle zur Berührung bringt, so kann man von der Berührungsstelle ausgehende eigentümliche Erscheinungen beobachten. Man hat sich die Vorgänge elektronentheoretisch so vorzustellen, daß die Elektronen im gewissen Sinne einen „Dampf“ um die großen Atome bilden. Die einzelnen Dampfteilchen werden durch elektrische Kräfte, die man mit den Kohäsionskräften vergleichen kann, von diesen Atomen angezogen. Für jedes Metall sind nun die auftretenden „Elektronendampfspannungen“ verschieden, und es wird an der Berührungsstelle zweier heterogener Metalle ein Übergang von Elektronen von der höheren Dampfspannung zur niederen erfolgen. Dadurch entsteht aber an dieser Berührungsfläche eine elektrische Spannungsdifferenz, die man thermoelektrische Kraft (Seebeck 1821) nennt. Da die Elektronendampfspannung eine Funktion der Temperatur ist, so müssen auch in einem und demselben Metall, wenn in ihm ein Temperaturgefälle vorhanden ist, Elektronenverschiebungen im Inneren des Metalles entstehen. Die

Summe aller Spannungsdifferenzen über den geschlossenen Kreis liefert die thermoelektrische Kraft. Schickt man durch ein solches System einen elektrischen Strom, so kehrt sich der Vorgang um, und es entsteht an der Berührungsstelle eine gewisse Wärmemenge. Diese Erscheinung heißt Peltier-Effekt (1834). Es ist nach dem Angeführten fast selbstverständlich, daß ebenso eine Wärmemenge produziert wird, wenn ein elektrischer Strom durch ein homogenes Metall fließt, das jedoch ein Temperaturgefälle besitzt (Thomson-

Abb. 17.



Beziehung zwischen dem Leitverhältnis und der absoluten Temperatur.

Effekt, 1854). Die Peltier- und Thomson-Wärme ergibt sich, wenn man einen Gleichgewichtszustand zwischen dem Diffusionsstrom der Elektronen und dem durch das Metall fließenden elektrischen Strom annimmt.

Theoretisch können alle diese Erscheinungen durch ähnliche Begriffe geklärt werden, wie sie Nernst in der elektrolytischen Lösungstension der Metalle und dem osmotischen Druck der Ionen für die Elektrochemie geschaffen hat.

### Die thermoelektrische Kraft.

α) Metalle. Im Vergleich zu der bei elektrochemischen Vorgängen auftretenden elektromotorischen Kraft sind die hier beobachteten elektromotorischen Kräfte nur klein (einige Mikrovolt). Die Temperaturverteilung längs der homogenen Stücke der beiden, das Thermoelement bildenden Metalle ändert die auftretende Spannung nicht, ebensowenig wie die Zwischenschaltung eines dritten Metalles. Man kann deshalb auch eine ausgedehnte Lötstelle zur Verbindung der beiden Metalle verwenden. Daraus folgt auch, daß man nur die thermoelektrische Kraft der einzelnen Metalle gegen ein Normalmetall (es wird Blei als solches gewählt, weil es, wie alle reinen und weichen Metalle, sehr einheitliche Werte ergibt) zu kennen braucht, um die irgendeiner Kombination je zweier Metalle zu finden. Die elektromotorische Kraft an den Klemmen eines Thermoelementes, dessen Lötstelle um  $t^0$  über der Temperatur der Kontakte liegt, folgt dem Gesetze:

$$E = \alpha \cdot t + \frac{1}{2} \beta \cdot t^2,$$

wo für  $\alpha$  und  $\beta$  die Zahlen der nebenstehenden Tabelle einzusetzen sind. Positives Vorzeichen soll andeuten, daß an dem betreffenden Metall positives, an Blei negatives Potential auftritt (Avenarius).

Als „Thermoelektrische Kraft“ oder „Thermokraft“ bezeichnet man die auf  $1^0$  bezogene elektromotorische Kraft der Thermoelektrizität. Man findet sie rechnerisch durch Differentiation der Formel:

$$E = \alpha \cdot t + \frac{1}{2} \cdot \beta \cdot t^2$$

nach  $t$  und erhält für sie:

$$E = \alpha + \beta t.$$

Beispiel. Es ist die Thermokraft des Thermoelementes (Fe, Cu) zu finden bei 280° Temperatur der Lötstelle. Aus der Tabelle erhält man:

Koeffizienten  $\alpha$  und  $\beta$  zur Berechnung der Thermokräfte gegen Blei in Mikrovolt.

Stoff	$\alpha$	$\beta$	Bemerkung
Lithium . . . . .	+ 11,6	+ 0,039	— 182 bis + 173°
Natrium . . . . .	— 4,4	— 0,021	— 182 „ + 173
Kalium . . . . .	— 11,6	— 0,025	0 „ + 100
Kupfer . . . . .	+ 2,8	+ 0,0080	0 „ + 200
Silber . . . . .	+ 2,3	+ 0,0076	0 „ + 200
Gold . . . . .	+ 2,8	+ 0,0064	0 „ + 200
Magnesium . . . . .	— 0,12	+ 0,0020	0 „ + 200
Zink . . . . .	+ 2,5	+ 0,016	0 „ + 200
Kadmium . . . . .	+ 3,0	+ 0,034	0 „ + 200
Quecksilber . . . . .	— 3,17	— 0,0173	0 „ + 200
Thallium . . . . .	+ 2,1	— 0,008	(unrein!)
Aluminium . . . . .	— 0,50	+ 0,0017	0 bis + 200° (unrein!)
Kohlenstoff, Graphit . . . . .	— 5,3	—	—
Kohlenstoff, Kohlenfaden . . . . .	+ 10	—	50
Silicium . . . . .	+ 443	—	—
Zinn . . . . .	— 0,17	+ 0,0020	0 bis 200
Blei . . . . .	—	—	—
Antimon, normal zur Hauptachse . . . . .	+ 26,4	—	—
Antimon, parallel „ „ . . . . .	+ 22,6	—	—
Wismut, normal „ „ . . . . .	— 45,5	— 0,60	} 0 bis — 70
Wismut, parallel „ „ . . . . .	— 127,4	— 0,70	
Tantal . . . . .	— 4,1	—	—
Tellur . . . . .	+ 163	—	Te gegen Cu
Eisen . . . . .	+ 13,4	— 0,030	0 bis 200°
Nickel . . . . .	— 23,3	— 0,008	0 „ 250
Kobalt . . . . .	— 20,4	— 0,075	0 „ 250
Rhodium . . . . .	+ 3,0	— 0,004	0 „ 500
Palladium . . . . .	— 8,2	— 0,029	—
Iridium . . . . .	+ 3,2	— 0,008	0 „ 500
Platin . . . . .	— 3,0	— 0,021	0 „ 200
Konstantan-Blei . . . . .	— 34,3	— 0,060	0 „ 250
(Konstantan-Kupfer . . . . .	— 37,1	— 0,068	0 „ 250)
(Manganin-Kupfer . . . . .	— 1,7	+ 0,0028	0 „ 100)

$$\begin{aligned} (\text{Fe, Pb}) &= 13,4 - 0,030 t \\ (\text{Cu, Pb}) &= 2,8 + 0,008 t \end{aligned}$$

also

$$\begin{aligned} (\text{Fe, Cu}) &= 10,6 - 0,038 t \text{ und für } t = 280 \\ (\text{Fe, Cu}) &= 0. \end{aligned}$$

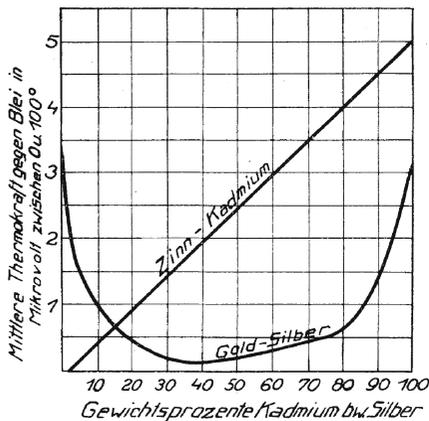
Bei 280° erhält man also keine weitere Steigerung der elektromotorischen Kraft der Thermoelktrizität; diese hat also hier ihr Maximum:

$$E = \alpha t + \frac{1}{2} \beta t^2 = 1480 \text{ Mikrovolt.}$$

Die motorische Wirkung der Thermolemente wird in der Praxis höchstens für kleinere Leistungen, wie Rührwerke u. dgl. verwertet.

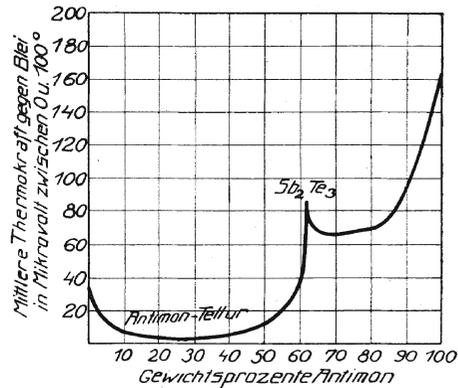
β) Legierungen. Bei Legierungen, die aus heterogenen Kristallen bestehen, kann man wieder die Mischungsregel

Abb. 18.



Thermokraft von Legierungen gegen Blei.

Abb. 19.



Thermokraft der Legierung Antimon-Tellur gegen Blei.

anwenden [in der vorstehenden Abb. 18 als Beispiel (Sn-Cd)]. Die Kurve der Thermokraft von Legierungen, in denen sich die Bestandteile gelöst befinden, zeigt große Ähnlichkeit mit der entsprechenden Leitfähigkeitskurve [in der Abb. 18 als Beispiel (Au-Ag)]. In den Kurven von Legierungen, deren Bestandteile Verbindungen eingehen, prägen sich die Umwandlungspunkte durch scharfe Knicke aus [in der Abb. 19 als Beispiel (Sb-Te)].

Das Hauptanwendungsgebiet der Thermoelemente ist die Temperaturmessung. Die auftretende Klemmenspannung wird in einem Zeigerinstrument gemessen bzw. selbsttätig registriert. Es eignen sich dazu bestimmte Legierungen, für niedrige Temperatur z. B. Konstantan-Kupfer und (über 100°) Konstantan-Silber, für hohe Temperaturen (bis etwa 1700°) das Le Chateliersche Element, Platin und Platin-Rhodium (10 Proz. Rh), käuflich bei Heräus; für dieses gilt folgende Tabelle:

Temperaturen . . . . .	100	200	400	600	800	1000	1200	1500
Klemmenspannung in Milli-								
volt . . . . .	0,6	1,4	3,17	5,14	7,25	9,47	11,8	15,3

Auch für die Messung minimaler Wärmemengen (Wärmestrahlung) ist das Thermoelement als „Bolometer“ von großer Wichtigkeit.

Ein unter Druck stehendes Metall zeigt gegen das ungedrückte ebenfalls eine thermoelektrische Kraft. In der folgenden Tabelle bedeutet das positive Zeichen einen an der kalten Seite zum ungedrückten Metall fließenden Strom. Die entstehende elektromotorische Kraft ist der Druckdifferenz und der Temperaturdifferenz proportional.

Thermoelektrische Kraft der Metalle in Mikrovolt für  
1° Temperaturunterschied zwischen Lötstelle und Kontakt  
und 1 Atmosphäre Druckunterschied der Metalle.

Magnesium . . . . .	— 8,9 · 10 <sup>-6</sup>	Eisen . . . . .	+ 12,5 · 10 <sup>-6</sup>
Manganin . . . . .	— 8,5	Platin . . . . .	+ 18,6
Zinn . . . . .	— 0,95	Palladium . . . . .	+ 23,7
Aluminium . . . . .	— 0,59	Konstantan . . . . .	{ + 31,1
Kupfer . . . . .	+ 3,2		{ + 26,4
Gold . . . . .	+ 4,6	Kadmium . . . . .	+ 36,3
Blei . . . . .	+ 5,6	Zink . . . . .	+ 40
Silber . . . . .	+ 8,7	Quecksilber . . . . .	+ 234
Nickel . . . . .	+ 9,6	Wismut . . . . .	+ 707

**4. Der Peltier-Effekt.** Die in der Berührungstelle zweier Metalle bei Stromdurchgang auftretende Wärmemenge ist proportional den durchgegangenen elektrischen Mengen.

Ist  $p$  eine Materialkonstante,  $i$  die Stromstärke und  $t$  die Zeit, so ist die „Peltier-Wärme“:

$$W_p = p \cdot i \cdot t.$$

In der folgenden Tabelle zeigt der Pfeil die Richtung des elektrischen Stromes an. Auch für den Peltier-Effekt gilt selbstverständlich die Regel, daß die Zwischenschaltung eines dritten Metalles keine Änderung hervorbringt, wenn nur die Lötstelle die gleiche Temperatur besitzt. Diese kann also auch ausgedehnt sein.

Peltier-Wärme in Millikalorien für 1 Coulomb.

Stoff	Temperatur °C	Peltier-Wärme
Cu → Ag . . . . .	0	0,137
Fe → Konstantan . . .	0	3,4
	100	4,1
	200	5,5
Pb → Konstantan . . .	0	1,90
	100	2,73
	200	3,6
	300	4,4
Cd → Pb . . . . .	0	0,197
	100	0,390
	200	0,646
Cu → Ni . . . . .	0	1,9
	100	2,2
	etwa 220	2,5 (Max.)
	„ 340	1,9 (Min.)
	450	2,4

**5. Der Thomson-Effekt.** Ebenso findet man die innerhalb eines Metallstückes, das ein Temperaturgefälle besitzt, beim Stromdurchgang auftretenden Wärmemengen durch Summation der in den einzelnen kleinsten Teilen des Metalles erzeugten Wärmemengen. Die letzteren sind proportional der hindurchgegangenen Elektrizitätsmenge und überdies noch dem Temperaturgradienten der betreffenden Stelle. Bezeichnen wir die Proportionalitätskonstante mit  $S$ , so ist also:

$$W_t = S \cdot \frac{dt}{dx} \cdot i \cdot t.$$

In der Tabelle bedeutet das Zeichen + eine Erwärmung, wenn der elektrische Strom von den heißeren zu kälteren Stellen fließt.

Blei zeigt im Mittel den Thomson-Effekt 0.

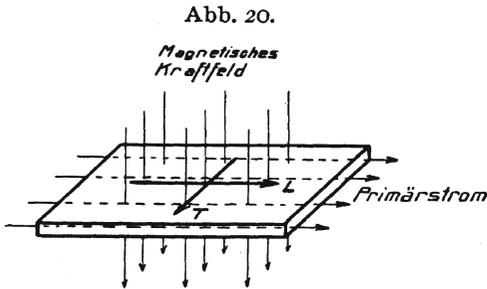
Thomson-Wärme in Mikrokalorien für 1 Coulomb und für den Temperaturgradienten 1° pro Zentimeter.

Stoff	Temperatur °C	Thomson- Wärme
Quecksilber . . . . .	+ 50	+ 1,62
	+ 100	+ 2,05
	+ 150	+ 2,50
Kupfer . . . . .	— 100	+ 0,22
	0	+ 0,38
	+ 100	+ 0,48
Silber . . . . .	+ 300	+ 0,50
	+ 500	+ 0,63
	+ 100	+ 0,82
Platin . . . . .	+ 300	+ 1,00
	+ 500	+ 1,18
	— 50	— 2,25
Eisen . . . . .	0	— 2,18
	+ 50	— 2,15
	+ 100	— 2,18
Konstantan . . . . .	0	— 0,96
	+ 100	— 3,30
	+ 200	— 4,00
	+ 300	— 3,40
	+ 400	— 1,80
	0	— 5,50
	+ 200	— 4,75
	+ 400	— 3,28

**6. Die durch magnetische Felder entstehenden Effekte in Metallen.** Die hierher gehörenden Erscheinungen haben der Theorie die meisten Schwierigkeiten bereitet.

Wird ein plattenförmiger Körper (Abb. 20 a. f. S.) in der Richtung der Pfeile („Primärstrom“) von einem elektrischen oder einem Wärmestrom durchsetzt, und befindet sich die Platte außerdem so in einem magnetischen Felde, daß sie dessen Kraftlinien senkrecht durchdringen, so hat man in der

Platte sowohl in der Richtung der Pfeile als auch senkrecht dazu gewisse Effekte beobachten können; es traten nämlich in den erwähnten Richtungen sowohl Temperatur- als auch



Spannungsunterschiede auf. Man nennt diejenigen Effekte, die in der Richtung des primären Stromes auftreten ( $L$ ), Longitudinal- und diejenigen senkrecht dazu ( $T$ ) Transversaleffekte.

### Transversaleffekte.

a) Den Hall-Effekt nennt man die transversal auftretende Spannungsdifferenz, wenn die dem magnetischen Felde ausgesetzte Platte ein elektrischer Strom durchfließt. Sie ist im allgemeinen dem Produkt aus der magnetischen Feldstärke und der Stromstärke im Streifen proportional. Ist die Breite des Leiters  $b$  (in Zentimetern), die gleichförmige Stromdichte  $j$  (in cgs, 10 Amp. = 1 cgs) und die Kraftlinienzahl des Feldes  $H$  (in cgs), so ist die in den Rändern des Streifens gemessene Potentialdifferenz (in cgs, 100 cgs = 1 Mikrovolt):

$$e = R.H.j.b,$$

wo  $R$  den aus der folgenden Tabelle zu entnehmenden Koeffizienten des Hall-Effektes bedeutet:

#### Koeffizienten des Hall-Effektes.

Gold . . . . .	— 0,00070	Zink . . . . .	etwa + 0,0006
Silber . . . . .	— 0,00088	Blei . . . . .	nahe 0,0
Kupfer . . . . .	— 0,00054	Zinn . . . . .	etwa — 0,00002
Platin . . . . .	— 0,0002	Konstantan . . . . .	— 0,0009
Iridium . . . . .	+ 0,00040	Neusilber . . . . .	— 0,00054
Palladium . . . . .	— 0,0010	Kohle . . . . .	— 0,17

Positives Vorzeichen drückt dabei aus, daß der Transversaleffekt so auftritt, wie es in der Abb. 20 gezeichnet ist ( $T$ ).

Wismut nimmt bei allen diesen Effekten eine besondere Stellung ein; es zeigt ganz besonders große Effekte. Bei diesem Metall hängen jedoch die beobachteten Werte sehr von der Orientierung des Kristalles (trigonal = rhomboedrisch-hemiedrisch) ab. Im Mittel ist der Koeffizient für Wismut + 10.

Werden Metalle mit nur geringen Mengen anderer Metalle legiert, so verändert sich der Hall-Effekt bedeutend.

Der Temperaturkoeffizient der reinen Metalle (außer Wismut) ist sehr klein. Für Wismut siehe die folgende Tabelle:

Hall-Koeffizient des Wismutmetalles (Feld normal zur Hauptachse).

Feldstärke in Kraftlinien	Temperatur °C	Koeffizient	
		Strom senkrecht zur Hauptachse	Strom normal zur Hauptachse
2120	+ 16	— 11,8	— 10,4
2120	— 79	— 9,6	— 7,8
2120	— 186	+ 10,4	+ 8,9
4980	+ 16	— 10,3	— 9,0
4980	— 79	— 3,2	— 2,4
4980	— 186	+ 7,9	+ 6,5

b) Es ist ferner noch hauptsächlich der Nernstsche Transversaleffekt, nämlich die mit dem Hall-Effekt analoge Entstehung eines transversalen Spannungsgefälles beim Durchströmen der Wärme durch einen Metallstreifen, der sich normal zu einem magnetischen Felde befindet, zu erwähnen. Das an den Rändern des Metallstückes von der Breite  $b$  (in Zentimetern) auftretende Spannungsgefälle  $e$  (in absoluten Einheiten) ist bei dem magnetischen Felde  $H$  (Kraftlinien, cgs) und einem Temperaturgefälle  $\frac{dt}{dx}$ :

$$e = Q \cdot H \cdot \frac{dt}{dx} \cdot b,$$

wo  $Q$  die dem Effekt eigentümliche Konstante bedeutet.

In der folgenden Tabelle ist das Vorzeichen analog dem des Hall-Effektes gewählt.

Koeffizient  $Q$  des Nernstschen Transversaleffektes (nach Zahn).

Stoff	$Q$	Stoff	$Q$
Iridium . . . . .	$-5 \cdot 10^{-6}$	Eisen . . . . .	$-10,5 \cdot 10^{-4}$
Palladium I . . . .	$+1,27 \cdot 10^{-4}$	Stahl . . . . .	$-16,6 \cdot 10^{-4}$
Palladium II . . . .	$+0,51 \cdot 10^{-4}$	Nickel I . . . . .	$+13 \cdot 10^{-4}$
Kupfer . . . . .	$-2,7 \cdot 10^{-4}$	Nickel II . . . . .	$+35,5 \cdot 10^{-4}$
Silber . . . . .	$-4,3 \cdot 10^{-4}$	Antimon . . . . .	$+176 \cdot 10^{-4}$
Zink . . . . .	$-2,4 \cdot 10^{-4}$		

### Die Longitudinaleffekte.

Mit Ausnahme des Wismuts sind die Longitudinaleffekte bei Metallen äußerst gering. Wir beschränken uns daher nur auf dieses Metall.

Von Wichtigkeit ist besonders die beim Durchgang eines elektrischen Stromes durch einen Metallstreifen in derselben Richtung entstehende Spannungsdifferenz. Da sich diese der aufgedrückten Spannungsdifferenz überlagert, so entsteht in dem Metall ein Strom, der scheinbar dem Widerstand des Metalles nach dem Ohmschen Gesetz nicht entspricht. Man spricht daher wohl auch von einer Widerstandsveränderung im Magnetfeld. Beim Wismut wird diese Erscheinung zur bequemen Messung von Magnetfeldern benutzt (Wismutspirale von Hartmann & Braun). Die Widerstandsänderung ist für 10000 cgs etwa 50 Proz. Bei der Eichung und nachherigen Messung ist die Temperatur zu berücksichtigen. Die Wirkung eines gegebenen Feldes nimmt für jeden Grad Temperaturzunahme um 1,4 Proz. ab.

**7. Die elektrolytische Lösungstension der Metalle.** Nach Nernst kann man die elektromotorische Wirksamkeit der Metalle, die sich bei der Elektrolyse kundgibt, ungezwungen erklären, wenn man den Metallen ebenso wie den anderen wasserlöslichen Körpern eine gewisse Lösungstension zuschreibt. Es besteht hier aber der wesentliche Unterschied, daß die in Lösung gehenden Molekel positiv elektrisch geladen sind. Man nennt die Spannung (in Atmosphären), mit der sie in die Lösung expandieren, elektrolytische Lösungstension „ $A$ “.

Diese Spannungen haben z. B. bei den unedlen, leicht oxydierbaren Metallen (Zn, Pb, Cd usw.) ungeheure Werte, und es erfolgt ein rapider Zerfall des betreffenden Metalles nur deswegen nicht, weil die Wirkung durch die elektro-statische Ladung des Lösungsmittels kompensiert wird.

Elektrolytische Lösungstension  $A$  der Metalle in Wasser.

Stoff	Größenordnung von $A$ in kg/qcm	Stoff	Größenordnung von $A$ in kg/qcm
Magnesium . . . . .	$10^{43}$	Blei . . . . .	$10^{-2}$
Zink . . . . .	$10^{19}$	Quecksilber . . . . .	$10^{-16}$
Aluminium . . . . .	$10^{13}$	Silber . . . . .	$10^{-18}$
Kadmium . . . . .	$10^7$	Kupfer . . . . .	$10^{-19}$
Eisen . . . . .	$10^4$		

Zwischen einer verdünnten Lösung mit der Konzentration  $\alpha$  eines chemisch  $n$ -wertigen Metalles und dem Metall selbst herrscht eine Spannungsdifferenz von

$$E = 0,0001983 \frac{T}{n} \log^{10} \frac{A}{\alpha} \text{ Volt.}$$

**8. Durchlässigkeit der Metalle für die Strahlen radioaktiver Substanzen.** Während die Absorptionsfähigkeit eines von Röntgenstrahlen getroffenen Mittels im allgemeinen mit dessen Dichte wächst, wirken die von radioaktiven Körpern (Uran, Thor, Radium, Aktinium usw.) ausgehenden Strahlen teilweise nach anderen Gesetzen.

Diese Strahlen bestehen aus den  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - und  $\delta$ -Strahlen.

Für die  $\alpha$ -Strahlen sowohl als auch die von diesen ausgelösten  $\delta$ -Strahlen (80 bis 90 Proz. der Gesamtstrahlung) haben die Metalle ein hohes Absorptionsvermögen: 0,0034 mm Aluminiumfolie lassen nur die Hälfte der Strahlung durch. Es kann ferner eine Luftschicht von 1 cm (bei 760 mm Druck und Zimmertemperatur) ebensoviel absorbieren wie eine Schicht von

- 0,0059 mm Aluminium,
- 0,0047 mm Zinn,
- 0,0027 mm Silber,
- 0,0021 mm Blei,
- 0,0021 mm Platin.

Für die  $\beta$ -Strahlen ist das Absorptionsvermögen geringer: die Hälfte der Gesamtstrahlung wird noch durchgelassen von Blechen folgender Dicke:

Stoff . . . . .	Aluminium	Eisen	Kupfer	Silber	Zinn	Blei
Dicke in mm . .	0,50	0,16	0,12	0,092	0,072	0,057

Für die  $\gamma$ -Strahlen ist das Absorptionsvermögen ganz gering: hinter 30 cm starken Eisenplatten ist die Strahlung von 30 mg Radiumbromid noch nachzuweisen. 70 mm Aluminium und 9 mm Blei setzen die Strahlung erst auf die Hälfte der Gesamtstrahlung herab.

## XII. Anhang. Absolute Maßeinheiten.

Eine Größe ist in absoluten Einheiten angegeben, wenn sie sich definieren läßt durch eine gewisse Zahl von Längen, von Massen und von Zeiten und wenn diese Längen in cm, die Massen in g und die Zeiten in sec gemessen sind.

Es müssen also in diesem System Flächen in qcm, Volumina in ccm, Geschwindigkeiten in cm/sec, Beschleunigungen in (cm/sec) pro sec, also in cm/sec<sup>2</sup> angegeben werden.

Die Kraft als das Produkt aus Masse und Beschleunigung ist in (cm.g.sec<sup>-2</sup>) ausgedrückt; die „(cm g sec)-Einheit der Kraft ist also diejenige, die einer Grammasse den sekundlichen Geschwindigkeitszuwachs von 1 cm/sec erteilt und heißt eine Dyne. Wirkt eine Dyne auf einem Wege von 1 cm, so leistet sie die Arbeit 1 (cm<sup>2</sup>g sec<sup>-2</sup>) oder ein Erg, und wird diese Arbeit in der Zeit 1 geleistet, so entspricht das der Leistung 1 (cm<sup>2</sup>g sec<sup>-3</sup>).

Als magnetischen Einheitspol bezeichnet man denjenigen, der auf einen gleichgroßen in 1 cm Entfernung die Kraft einer Dyne ausübt; aus dem Coulombschen Gesetz:  $P = \frac{mm'}{r^2}$ ,

wo  $P$  die Kraft und  $r$  den Abstand der Mengen  $m$  und  $m'$  voneinander bedeutet, folgt als Einheit: 1 (cm<sup>3/2</sup>g<sup>1/2</sup>sec<sup>-1</sup>).

Aus der Beziehung  $P = m \cdot \mathfrak{H}$  folgt als Einheit für die magnetische Feldstärke: 1 (cm<sup>-1/2</sup>g<sup>1/2</sup>sec<sup>-1</sup>) oder 1 Gauß.

Ähnlich ergibt sich aus dem Biot-Savartschen Satz (siehe z. B. Göschen: Theoretische Physik, Bd. 3) als Einheit der

Stromstärke  $1 \text{ (cm}^{1/2} \text{ g}^{1/2} \text{ sec}^{-1})$  und als Einheit der Elektrizitätsmenge (die vom Strom 1 in 1 sec durch 1 qcm geleitet wird)  $1 \text{ (cm}^{1/2} \text{ g}^{1/2})$ .

Als Einheit der elektromotorischen Kraft, der Spannung und der Potentialdifferenz erhält man die, die in einem Leiter von 1 cm Länge induziert wird, wenn man ihn senkrecht zur Richtung eines homogenen Feldes von 1 Gauß mit der gleichförmigen Geschwindigkeit von  $1 \text{ (cm sec}^{-1})$  bewegt:  $1 \text{ (cm}^{3/2} \text{ g}^{1/2} \text{ sec}^2)$ .

Aus dem Ohmschen Gesetz folgt als Einheit des elektrischen Widerstandes  $1 \text{ (cm sec}^{-1})$ .

### Das praktische Maßsystem.

Bei diesem sind die Grundeinheiten die Länge, die Zeit und die Kraft, und zwar 1 m, 1 sec und „1 Kilobar“ oder „1 Kilogrammgewicht“, d. i. die Kraft, mit der die Masse 1 kg an einem Orte mittlerer Schwere von der Erde angezogen wird; diese Kraft beträgt 981 000 Dyne. Als Arbeitseinheit erhält man so das „Kilobarmeter“ oder nach älterem, aber leicht mißzuverstehendem Sprachgebrauch das Meterkilogramm:

$$1 \text{ mkg} = 981 \cdot 10^5 \text{ Erg.}$$

Man setzt  $10^7 \text{ Erg} = 1 \text{ Joule}$ , daraus folgt:

$$1 \text{ mkg} = 9,81 \text{ Joule.}$$

Als praktisches Maß der Leistung gilt:

$$1 \text{ mkg/sec} = 981 \cdot 10^5 \text{ Erg.}$$

Eine weitere Einheit ist:

$$1 \text{ Watt} = 10^7 \text{ Erg/sec} = 1 \text{ Joule/sec.}$$

Die praktische Einheit der Stromstärke ist:

$$1 \text{ Ampere} = 1/10 \text{ abs. E.,}$$

die der Elektrizitätsmenge:

$$1 \text{ Coulomb} = 1/10 \text{ abs. E.,}$$

die der elektromotorischen Kraft:

$$1 \text{ Volt} = 10^8 \text{ abs. E.,}$$

die des Widerstandes:

$$1 \text{ Ohm} = 10^9 \text{ abs. E.}$$

## Literatur und Quellen.

---

- K. Baedeker: Die elektrischen Erscheinungen in metallischen Leitern. Vieweg 1911.
- F. Kohlrausch: Lehrbuch der praktischen Physik. Teubner 1910.
- Landolt-Börnstein: Physikalisch-chemische Tabellen.
- Ch. Marie: Tables Annuelles. Akad. Verlags-Ges., Leipzig 1914.
- F. Warburg: Physik. Teubner 1915.
- G. Mie: Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus. Enke 1910.
- N. R. Campbell: Moderne Elektrizitätslehre. Steinkopff 1913.
- W. Nernst: Theoretische Chemie.
- R. Schenck: Physikalische Chemie der Metalle 1909.
- Gauss: Logarithmisch-trigonometrische Tafeln 1912.
- O. Lehmann: Die Welt der flüssigen Kristalle 1910.
- W. Bruhns: Kristallographie. Göschen 1909.
- P. Groth: Chemische Kristallographie.
- B. Schmid: Lehrbuch der Mineralogie und Geologie 1904.
- Naumann-Zirkel: Elemente der Mineralogie 1907.
- E. Sommerfeldt: Die Kristallgruppen 1911.
- E. Heyn und O. Bauer: Metallographie. Göschen 1909.
- Todhunter: History of elasticity.
- K. Strecker: Hilfsbuch für die Elektrotechnik. Springer 1912.
- W. Gürtler: Von der Kohäsion der Metallmassen. Internationale Zeitschrift f. Metallogr. V. 4, 1914.
- Lindemann und Nernst: Untersuchungen über die spezifische Wärme bei tiefen Temperaturen. Sonderabdruck aus dem Sitzungsbericht d. Berl. Akad. d. Wiss. 1911.
- G. Quincke: Kapillaritätskonstanten fester Körper. Monatsberichte d. Kgl. Akad. d. Wiss. zu Berlin 1868.

---

Physikalische Zeitschrift: 1908, S. 2 und 543.  
Zeitschrift für Elektrochemie: 1912, S. 319 und 1913, S. 711.  
Chemiker-Zeitung: 1914, Nr. 21.  
Stahl und Eisen: 1912.

---

## Alphabetisches Namen- und Sachregister.

- Abklingungskonstante 29.  
Absorption 39, 40.  
— von Strahlen radioaktiver Substanzen 69, 70.  
Absolut schwarzer Körper 39.  
Absolute Maßeinheiten 70.  
Abstoßung, magnetische 44.  
Ätherschwingungen 37.  
Aktivitätszone 32.  
Allner, Pyrometer 16.  
Allotriomorphie 10.  
Ampere 71.  
Anziehung, magnetische 44.  
Arbeit der Elektronen 43.  
Atomare Leitfähigkeitserniedrigung 54.  
Auftriebsmethode 3.  
Ausdehnung, lineare 16, 17.  
— unter Druck 17.  
Ausdehnungskoeffizient der Gase 51.  
  
**Bereichsgrenze des lichtelektrischen Effekts** 43.  
Biegung 32.  
—, Bestimmung des Elastizitätsmoduls durch 25.  
Bravais 9.  
Brechungsindex 38.  
Brownsche Bewegung 16.  
Bolometer 63.  
  
**Coulomb** 31, 71.  
  
Dampf, Widerstand von Metall 53.  
Dampfdruck 20.  
Deformationen, elastische 24.  
Dehnung 24, 30.  
  
Diamagnetismus 44.  
Dichte 1, 2, 3.  
Druckbeanspruchung 12.  
Druckdifferenz, Thermokraft durch 63.  
Druckkoeffizient des Widerstandes 52.  
Drude 47, 48.  
Durchlochungversuche 33.  
Dyne 70.  
  
**Eindringungskoeffizient** 39.  
Eindruckhärte 31.  
Einheitsladung der Elektronen 47.  
Einteilung der Metalle 1.  
Elastizität 5, 24.  
Elastizitätsgrenze 4.  
Elastizitätsmodul 24, 27, 34.  
—, zweiter 26.  
Elektrizität 47.  
Elektrolytische Lösungstension 68, 69.  
Elektromagnetische Schwingungen 37.  
Elektromotorische Kraft der Thermoelektrizität 60.  
Elektronen 37, 38.  
Elektronendampfspannung 59.  
Elektronenemission 42, 47.  
Elektronengas 47.  
Elektronengeschwindigkeit 43.  
Elektronenmasse 47.  
Elektronentheorie 44.  
Elementarquantum der Elektrizität 47.  
Ellipsoid der Spannungen 31.  
— — Verrückungen 31.  
Emission von Elektronen 42.  
Emissionsvermögen 39.  
Energiestrahlen 36.  
Erg 70.

- Faraday** 47.  
**Farbe** 1, 2.  
**Ferromagnetismus** 45.  
**Festigkeit** 36.  
**Fließen der Kristalle** 4.  
**Formelemente** 9.  
**Fortpflanzungsgeschwindigkeit** 28, 33.
- Gasabsorption, Widerstand nach** 53.  
**Gasgesetze, Analogie der** 47.  
**Gaskonstante** 48.  
**Gastheorie, kinetische** 16, 48.  
**Gauß** 70.  
**Geschwindigkeit der Elektronen** 43, 48.  
**Gestalt, natürliche — der Metalle** 3.  
**Gestaltungskraft** 5.  
**Gleitmodul** 26.  
**Gleitrichtung** 5.  
**Größe der Metallkristalle** 3, 10.
- Hälftflächner** 7.  
**Hall-Effekt** 66, 67.  
**Härte** 31.  
**Haufwerk** 5 10.  
**Hauptachsen** 6, 31.  
**Hauptspannungen** 31.  
**Hemieder** 7.  
**Heterotrope Körper** 12.  
**Heuslersche Legierung** 45.  
**Hintereinanderschaltung** 48.  
**Hohlkörper, vollkommen schwarzer** 15.  
**Holborn u. Kurlbaum'sches Pyrometer** 16.  
**Holoedrie** 6.  
**Homogenität** 4.  
**Hook'sches Gesetz** 24.
- Ideale Gase** 18.  
**Innere Reibung** 29.
- Joule** 20, 71.
- Kalorie** 20.  
**Kapillarität** 34, 35, 36.
- Kilobar** 71.  
**Kilobarmeter** 71.  
**Kinetische Gastheorie** 16.  
**Kirchhoff** 39.  
**Kohäsion, spezifische** 10, 35.  
**Kolbenmanometer** 13.  
**Kombinationswiderstand** 48.  
**Kompressibilität** 12, 13, 14, 30.  
**Korn** 10.  
**Korngrenzen** 10.  
**Korrektur bei Thermometerablesung** 15.  
**Kristalle** 3, 4, 5.  
—, flüssige 4.  
—, Molekularaufbau der 5.  
**Kristallform** 3, 5, 7.  
**Kristallgestalt** 5.  
**Kristalliten** 10.  
**Kristallsysteme** 5, 6.  
**Kritische Temperatur** 45, 46.  
**Kugelwellen** 33, 37.
- Ladung der Elektronen** 47.  
**Le Chatelier** 16, 63.  
**Lehmann** 4.  
**Leistung** 70.  
**Leitfähigkeit** 48, 49.  
— bei tiefen Temperaturen 51.  
**Leitfähigkeitserniedrigung, atomare** 54.  
**Leitung, elektrische** 47.  
**Leitungselektronen** 37.  
**Leitverhältnis** 56, 57, 58.  
**Licht** 37.  
**Lichtelektrischer Effekt** 42, 43.  
**Lichtgeschwindigkeit** 46.  
**Lineare Ausdehnung** 16.  
**Lösungstension, elektrolytische** 68, 69.  
**Longitudinaleffekte** 66, 68.  
**Longitudinalschwingungen** 33.  
**Lorentz** 38, 47.  
**Lorenz'sches Gesetz** 57.
- Magnetische Effekte** 65.  
**Magnetisches Moment** 46.

- Magnetisierung** 45.  
**Magnetisierungselektronen** 37.  
**Magnetismus** 44, 65.  
**Magneton** 46.  
**Manometer** 13.  
**Masse der Elektronen** 47.  
**Maßeinheiten** 70, 71.  
**Maxwellsche Gleichungen** 38.  
**Meldometer** 18.  
**Meroeder** 7.  
**Metалldampf** 40.  
**Metallkristalle** 3.  
**Metallmanometer** 13.  
**Metalloptik** 35.  
**Meterkilogramm** 71.  
**Molekularmagnet** 44.  
**Moment, magnetisches** 46.
- Nernst** 60.  
**Nernstscher Transversaleffekt** 67, 68.  
**Newtonsche Streifen** 25.  
**Nullpunkt, absoluter** 16.
- Oberflächenkraft** 35.  
**Oberflächenspannung** 5, 10.  
**Oberflächenstrahlung** 38.  
**Ohm** 71.  
**Ohmsches Gesetz** 51.  
**Optik** 35.
- Parallelschaltung** 48.  
**Paramagnetismus** 44.  
**Peltier-Effekt** 59, 63.  
**Periodisches System der Leitfähigkeiten** 50.  
**Permeabilität** 45.  
**Photoelektrischer Effekt** 42.  
**Planimeter** 11.  
**Plastizität** 31.  
— der Kristalle 4.  
**Plastizitätsmodul** 32.  
**Poiseuillesches Gesetz** 48.  
**Poissonsche Konstante** 29, 30.  
**Polarisation** 42.
- Polarisationselektronen** 37.  
**Polarplanimeter** 11.  
**Polyederformen** 4, 5.  
**Praktisches Maßsystem** 71.  
**Pyknometer** 3.  
**Pyrometer** 15.  
**Pyroskop von Shore** 16.
- Quasisisotropie** 10.  
**Quecksilberthermometer** 15.  
**Querkontraktion** 29.  
**Querschwingungen** 34.
- Radioaktivität** 69.  
**Raum** 36.  
**Raumgittertheorie** 9.  
**Reflexion** 38, 39.  
**Reibung, innere** 29.  
**Reststrahlen** 37, 39.  
**Richtkraft** 5, 32.  
**Ritzverfahren zur Härtebestimmung** 31.  
**Röntgenstrahlen** 43.  
**Rotation der Elektronen** 44.
- Sättigung, magnetische** 46.  
**Saint-Venantsche Gleichungen** 31.  
**Schallgeschwindigkeit** 33, 34.  
**Scherung** 33.  
**Scherungsmodul** 26.  
**Schiebungsmodul** 26.  
**Schmelzpunkt** 17, 18, 19, 20.  
**Schmelzwärme** 20, 21.  
**Schneidenradplanimeter** 11.  
**Schwingungen der Elektronen** 37.  
—, elektromagnetische 37.  
**Schwingungszahl der Kugelwellen** 33.  
— von Torsionswellen 28.  
**Shores Pyroskop** 16.  
**Siedepunkt** 19, 20.  
**Spannungsellipsoid** 31.  
**Spektralanalyse** 40, 41, 42.  
**Spezifische Kohäsion** 35.  
— Permeabilität 45.  
— Wärme 21, 22, 23.

- Spezifischer Widerstand 48, 49.  
Spezifisches Gewicht 1, 2, 3.  
Sprödigkeit 4.  
Stangenplanimeter 11.  
Stereometer 11.  
Stereoskopaufnahmen 12.  
Strahlen 36.  
Strömungsgeschwindigkeit 48.  
Symmetriegrad 6.
- Teilflächner 7.  
Temperatur, kritische 45, 46.  
Temperaturgrade 14.  
Temperaturkoeffizient 51, 52, 55.  
Temperaturmessung 15.  
Thermoelektrizität 59, 60, 61, 63.  
Thermoionik 42.  
Thermometrie 14, 15.  
Thomson-Effekt 59, 64, 65.  
Torsion 32.  
Torsionselastizität 26, 28.  
Torsionsschwingungen 28, 29.  
Transversaleffekt 66.  
Transversalschwingungen 34.
- Ultrarote Strahlen 39.
- Verdampfen 17.  
Verdampfungswärme 20, 21.  
Verspannung der Kristalliten 10.  
Viskosität 29.
- Vollflächner 6.  
Vollkommen schwarzer Hohlkörper 15.  
Volt 71.  
Volumelastizität 13.  
Volumenvermehrung 30.
- Wachstum der Kristalle 5.  
Wärme 14, 37.  
Wärmeleitfähigkeit 24, 56, 58.  
Wärmestrahlen 37.  
Wanner-Pyrometer 15.  
Wasserstoffaufnahme, Widerstand nach 54.  
Watt 71.  
Weltäther 36.  
Widerstand 48, 49.  
Widerstandslegierungen 56.  
Widerstandsmanometer 13.  
Widerstandsthermometer 52.  
Widerstandsveränderung im Magnetfeld 68.  
Wiedemann-Franz'sches Gesetz 56.  
Wismutspirale 68.
- Zahl der Magnetonen 46.  
Zellenbildung 10.  
Zusammendrückbarkeit 13.  
Zweiter Elastizitätsmodul 26.
-

Verlag von Friedr. Vieweg & Sohn in Braunschweig.

---

*Ende 1915 erschien :*

# Moderne Transformatorenfragen

Von

**Dr. techn. M. Vidmar**

---

Mit 16 Abbildungen. VI, 84 Seiten. 8°. Mk. 2,80.

*(Sammlung Vieweg, Heft 30.)*

## Inhaltsverzeichnis:

- Einleitung. Die modernen Aufgaben des Elektromaschinenbaues. — Die modernen Aufgaben des Transformatorenbaues.
- I. Die Preis- und Wirkungsgradfrage. Der Preisvergleich im Transformatorenbau. — Der Witz des Großtransformators. — Die Verbilligungsmöglichkeiten eines Transformators gegebener Leistung. — Der Preis und der Wirkungsgrad. — Der unnatürliche Wirkungsgrad. — Die „Fortschrittsgerade“. — Die „Schwierigkeitshyperbel“. — Der innere wirtschaftliche Wert einer Typenreihe. — Die Verlustaufteilung.
  - II. Die Leerlaufstromfrage. Die Begrenzung des Leerlaufstromes. — Die Berechnung des Leerlaufstromes. — Die Abhängigkeit des Leerlaufstromes von der Leistung. — Das Problem des Leerlaufstromes. — Der „ingeschnürte“ Kern. Abhilfe durch Verlustaufteilung.
  - III. Die Wärmefrage. Das Wesen der Wärmefrage. — Die Technologie in der Wärmefrage. — Die Grundlagen der Wärmefrage. — Der Temperatursprung an der Oberfläche. — Die innere Temperaturerhöhung im Eisen. — Die innere Temperaturerhöhung im Kupfer. — Die mittlere Kupfertemperatur. — Die Sicherheitsvorschriften. — Die Wärmefrage in Abhängigkeit von der Leistung. — Der Trockentransformator. — Der Öltransformator. — Der Transformator mit künstlicher Luftkühlung. — Der Öltransformator mit Wasserkühlung. — Die Übertreibung der Wärmeabfuhr.
  - IV. Die Stromkraftfrage. Das Wesen der Stromkraftfrage. — Die Berechnung der Hauptstromkraft. — Das Beherrschen der Hauptstromkraft. — Die Stromkraft einer Wickelung. — Das Verhältnis der beiden Stromkräfte. — Innere Kurzschlüsse. — Kurzschluß in der Sekundärwicklung. — Der primäre Kurzschluß. — Sonstige Stromkräfte.
  - V. Die Spannungskraftfrage. Das Problem selbst und die Tendenz der modernen Lösungen. — Wickelung und Eisen. — Die beiden Wickelungen. — Zwei fast gleich hoch gespannte Wickelungen. — Innere Spulenisolation. — Der Großtransformator. — Der Überspannungsschutz. — Das Spannungskraftproblem des Übertransformators.
- 
-