

WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

BIBLIOTEKA GŁÓWNA

L. inw. ~~369~~ 172

~~369~~

430
Reisteswelt

R. Börnstein
Die Lehre von
der Wärme

Zweite Auflage

BG

B. G. Teubner. Leipzig-Berlin

Die Sammlung „Aus Natur und Geisteswelt“

nunmehr über 800 Bände umfassend, bietet wirkliche „Einführungen“ in die Hauptwissensgebiete für den Unterricht oder Selbstunterricht des Laien nach den heutigen methodischen Anforderungen, seit ihrem Entstehen (1898) den Gedanken dienend, auf denen die heute so mächtig entwickelte Volkshochschulbewegung beruht. Sie will jedem geistig Mündigen die Möglichkeit schaffen, sich ohne besondere Vorkenntnisse an sicherster Quelle, wie sie die Darstellung durch berufene Vertreter der Wissenschaft bietet, über jedes Gebiet der Wissenschaft, Kunst und Technik zu unterrichten. Sie will ihn dabei zugleich unmittelbar im Beruf fördern, den Gesichtskreis erweiternd, die Einsicht in die Bedingungen der Berufsarbeit vertiefend. Diesem Bedürfnis können Skizzen im Charakter von „Auszügen“ aus großen Lehrbüchern nie entsprechen, denn solche setzen eine Vertrautheit mit dem Stoffe schon voraus.

Die Sammlung bietet aber auch dem Fachmann eine rasche zuverlässige Übersicht über die sich heute von Tag zu Tag weitenden Gebiete des geistigen Lebens in weitestem Umfang und vermag so vor allem auch dem immer stärker werdenden Bedürfnis des Forschers zu dienen, sich auf den Nachbargebieten auf dem laufenden zu erhalten.

In den Dienst dieser Aufgabe haben sich darum auch in dankenswerter Weise von Anfang an die besten Namen gestellt, gern die Gelegenheit benutzend, sich an weiteste Kreise zu wenden.

So konnte der Sammlung auch der Erfolg nicht fehlen. Mehr als die Hälfte der Bände liegen, bei jeder Auflage durchaus neu bearbeitet, bereits in 2. bis 8. Auflage vor, insgesamt hat die Sammlung bis jetzt eine Verbreitung von fast 5 Millionen Exemplaren gefunden.

Alles in allem sind die schmucken, gebaltvollen Bände besonders geeignet, die Freude am Buche zu wecken und daran zu gewöhnen, einen Betrag, den man für Erfüllung körperlicher Bedürfnisse nicht anzusehen pflegt, auch für die Befriedigung geistiger anzuwenden.

Wenn eine Verteuerung der Sammlung infolge der durch die wirtschaftliche Lage bedingten außerordentlichen Steigerung der Herstellungskosten auch unvermeidbar gewesen ist, so ist der Preis doch entfernt nicht in dem gleichen Verhältnis gestiegen, und auch jetzt ist ein Band „Aus Natur und Geisteswelt“ im Verhältnis zu anderen Büchern und insbesondere zu der Verteuerung im allgemeinen wohlfeil.

Jeder der meist reich illustrierten Bände
ist in sich abgeschlossen und einzeln käuflich

Leipzig,

Biblioteka Politechniki Krakowskiej

J. Teubner



100000295919

Ein vollständiger

o versendet auf Wunsch

Bisher sind erschienen zur Technik und mechanischen Industrie:

Geschichte und Grundlagen der Technik.

Schöpfungen der Ingenieurtechnik der Neuzeit. Von Ober- u. Geh. Reg.-Rat M. Seitel. 2. Aufl. Mit 32 Abbildungen. (Bd. 28.)

Einführung in die Technik. Von Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. H. Lotenz. Mit 77 Abb. im Text. (Bd. 729.)

Mechanik.

Mechanik. Von Prof. Dr. G. Hamel. I. Grundbegriffe der Mechanik. Mit 38 Figuren. *II. Mechanik der festen Körper. *III. Mechanik der flüssigen u. luftförmigen Körper. (Bd. 684/86.)

Aufgaben aus der technischen Mechanik. Für den Schul- und Selbstunterricht. Von Prof. N. Schmitt. I. Statik und Festigkeitslehre. 2. Aufl. Mit Aufgaben, Lösungen und zahlreichen Figuren im Text. II. Dynamik und Hydraulik. 140 Aufgaben und Lösungen mit zahlreichen Figuren im Text. (Bd. 558/559.)

Statik. Von Gewerbeschulrat Baugewerkschuldirektor Reg.-Baumeister A. Schau. 2. Aufl. Mit 112 Figuren. (Bd. 828.)

Festigkeitslehre. Von Gewerbeschulrat Baugewerkschuldirektor Reg.-Baumeister A. Schau. 2. Auflage. Mit 119 Figuren. (Bd. 829.)

Einführung in die technische Wärmelehre (Thermodynamik). Von Geh. Bergrat Prof. A. Vater. 2., erweiterte Auflage bearbeitet von Privatdozent Dr. J. Schmidt. Mit 46 Abbildungen im Text. (Bd. 516.)

Praktische Thermodynamik. Aufgaben und Beispiele zur technischen Wärmelehre. Von Geh. Bergrat Prof. A. Vater. Mit 40 Abb. im Text u. 3 Tafeln. (Bd. 596.)

Bergbau, Hüttenwesen und mechanische Technologie

Unser Kohlen. Von Bergassessor P. Kukul. 2., verb. Aufl. Mit 49 Abbildungen im Text und 1 Tafel. (Bd. 396.)

*Metallurgie. Von Dr.-Ing. Nuge l. Leicht- u. Edelmetalle. II. Schwermetalle. (Bd. 446/47.)

Das Eisenhüttenwesen. Von Geh. Bergrat Prof. Dr. H. Wedding. 6. Aufl. von Bergassessor J. W. Wedding. Mit 22 Abb. (Bd. 20.)

Maschinenelemente. Von Geh. Bergrat Prof. A. Vater. 4., erw. Aufl. bearbeitet von Privatdozent Dr. J. Schmidt. Mit 189 Abb. (Bd. 301.)

Hebezeuge. Hilfsmittel zum Heben fester, flüssiger und gasförmiger Körper. Von Geh. Bergrat Prof. A. Vater. 2. Aufl. Mit 67 Abb. im Text. (Bd. 196.)

Die Fördermittel. Einrichtungen zum Fördern von Massengütern und Einzellasten in industriellen Betrieben. Von Oberingenieur D. Veßstein. Mit 74 Abb. im Text. (Bd. 726.)

Das Holz, seine Bearbeitung und seine Verwendung. Von Studienprof. J. Großmann, Oberinspektor der Lehrwerkstätten für Holzbearbeitung in München. Mit 39 Originalabbildungen im Text. (Bd. 473.)

Die Spinnerei. Von Direktor Prof. M. Lehmann. Mit 95 Abbildungen. (Bd. 398.)

Die Kälte, ihr Wesen, ihre Erzeugung und Verwertung. Von Dr. H. Alt. Mit 45 Abbildungen. (Bd. 311.)

Maschinenlehre.

Die Dampfmaschine. Von Geh. Bergrat Prof. A. Vater. 2 Bde. I. Bd.: Wirkungsweise des Dampfes im Kessel und in der Maschine. 5. Aufl. Von Privatdozent Dr. J. Schmidt. Mit 38 Abb. II. Bd.: Ihre Gestaltung und ihre Verwendung. 3. Aufl. Von Privatdozent Dr. J. Schmidt. Mit 94 Abb. (Bd. 393/94.)

Die neueren Wärmekraftmaschinen. Von Geh. Bergrat Prof. A. Vater. 2 Bände. I. Bd.: Einführung in die Theorie und den Bau der Gasmaschinen. 6. Aufl. Von Privatdozent Dr. J. Schmidt. Mit 45 Abb. (Bd. 21.) II. Bd.: Gaszeuger, Gasholmaschinen, Dampf- und Gasturbinen. 5. Aufl. bearb. von Privatdozent Dr. J. Schmidt. Mit 46 Abb. (Bd. 86.)

*Elektrische Maschinen. Von Dipl.-Ing. M. Lischik. (Bd. 774.)

Wasserkraftausnutzung und Wasserkraftmaschinen. Von Dr.-Ing. J. Sawaczek. Mit 57 Abb. (Bd. 732.)

Landwirtschaftliche Maschinenkunde. Von Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. G. Fischer. Mit 64 Abbildungen. 2. Auflage. (Bd. 316.)

Elektrotechnik.

- Grundlagen der Elektrotechnik. Von Obering. A. Kottb. 3. Aufl. Mit 70 Abb. (Bd. 391.)
Die elektrische Kraftübertragung. Von Ing. P. Kühn. 2. Aufl. Mit 133 Abb. (Bd. 424.)
Drähte und Kabel, ihre Anfertigung und Anwendung in der Elektrotechnik. Von Oberpostinsp. H. Fried. 2. Aufl. Mit 43 Abb. (Bd. 285.)
Die Telegraphen- und Fernsprechtechnik in ihrer Entwicklung. Von Oberpost-Inspr. H. Fried. 2. Aufl. Mit 65 Abb. (Bd. 235.)
Das Telegraphen- und Fernsprechwesen. 2. Aufl. Von Abteilungsdirektor Otto Sieblist. (Bd. 183.)
Die Funkentelegraphie. Von Telegr.-Dir. H. Thurn. 5. Aufl. Mit 51 Abb. (Bd. 167.)

Hausbau und -einrichtung.

- Der Eisenbetonbau. Von Dipl.-Ing. E. Haimovici. 2. Aufl. Mit 82 Abbildungen im Text sowie 8 Rechnungsbeispielen. (Bd. 275.)
Beleuchtungswesen. Von Ing. Dr. H. Luz. M. 54 Abb. (Bd. 433.)
Wohnungswesen. Von Prof. Dr. K. Eberstadt. Mit 11 Abb. im Text. (Bd. 709.)

Verkehrstechnik.

- Das Eisenbahnwesen. Von Eisenbahnbau- und Betriebsinspektor a. D. Dr.-Ing. E. Viedermann. 3., verb. Aufl. Mit 62 Abbildungen. (Bd. 144.)
Die Klein- und Straßenbahnen. Von Oberingenieur a. D. Oberlehrer A. Liebmann. Mit 85 Abb. (Bd. 322.)
Die Luftfahrt, ihre wissenschaftlichen Grundlagen und ihre technische Entwicklung. Von Dr. A. Nimtsch. 3. Auflage von Dr. J. Guth. Mit 60 Abbildungen. (Bd. 300.)
Nautik. Von Direktor Dr. J. Müller. 2. Aufl. Mit 64 Fig. im Text u. 1 Seelarte. (Bd. 255.)

Kriegstechnik.

- Die Handfeuerwaffen. Ihre Entwicklung und Technik. Von Major K. Weiß. Mit 69 Abbildungen. (Bd. 364.)
Unsere Kriegsschiffe. Ihre Entstehung und Verwendung. Von Vch. Marinebaurat a. D. E. Krieger. 2. Aufl. von Marinebaurat Friedr. Schürer. Mit 62 Abb. (Bd. 389.)

Graphische und Fein-Industrie.

- Wie ein Buch entsteht. Von Professor A. W. Unger. 5. Aufl. Mit 9 Tafeln und 26 Abbildungen im Text. (Bd. 175.)
Die Schmucksteine und die Schmuckstein-Industrie. Von Dr. A. Eppler. Mit 64 Abbildungen. (Bd. 376.)
Die Uhr. Grundlagen und Technik der Zeitmessung. Von Prof. Dr.-Ing. H. Bod. 2., umgearbeitete Auflage. Mit 55 Abbildungen im Text. (Bd. 216.)
Die Rechenmaschinen und das Maschinenrechnen. Von Reg.-Rat Dipl.-Ing. K. Lenz. Mit 43 Abbildungen im Text. (Bd. 490.)
Die Schreibmaschine und das Maschinenschriften. Von Fortbildungsschuldirektor H. Scholz. (Bd. 694.)

Zeichnen.

- Der Weg zur Zeichenkunst. Von Oberstudienrat Dr. E. Weber. 3. Aufl. Mit 84 Abb. und 1 Farbtafel. (Bd. 430.)
Grundzüge der Perspektive nebst Anwendungen. V. Prof. Dr. K. Doeblemann. 2. verb. Aufl. Mit 91 Fig. u. 11 Abb. (Bd. 510.)
Geometrisches Zeichnen. Von atad. Zeichenlehrer A. Schudeisth. Mit 172 Abb. im Text und auf 12 Tafeln. (Bd. 568.)
Projektionslehre. Die rechtwinkl. Parallelprojektion und ihre Anwendung auf die Darstellung techn. Gebilde nebst Anhang über die schiefwinkl. Parallelprojektion in kurzer leichtfaßlicher Darstell. f. Selbstunterr. u. Schulgebr. Von atad. Zeichenl. A. Schudeisth. M. 208 Fig. i. Text. (Bd. 564.)
Masse und Messen. Von Dr. W. Bloch. Mit 34 Abb. (Bd. 385.)

Die mit * bezeichneten und weitere Bände befinden sich in Vorbereitung.

Aus Natur und Geisteswelt
Sammlung wissenschaftlich-gemeinverständlicher Darstellungen

172. Bändchen

Die Lehre von der Wärme

Gemeinverständlich dargestellt von

Prof. Dr. R. Börnstein

Zweite, durchgesehene Auflage

herausgegeben von

Prof. Dr. A. Wigand

Mit 33 Abbildungen im Text

N. W. 255.

V. 164.



Arbeitsblätter für die 4. Klasse.

N. 242.

Verlag von B. G. Teubner in Leipzig und Berlin 1918



I-301514

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

~~1869~~

Schutzformel für die vereinigten Staaten von Amerika:
Copyright 1918 by B. G. Teubner in Leipzig

Alle Rechte, einschließlich des Übersetzungsrechts, vorbehalten

~~EPK-B-17/2017~~
Druck von B. G. Teubner, Dresden.

Akc. Nr. ~~419~~ 50

Vorwort zur ersten Auflage.

Gelegentlich der Berliner „volkstümlichen Hochschulkurse“ hielt der Verfasser im Winter 1905/06 sechs Experimentalvorträge über Wärmelehre, deren nachträgliche Niederschrift hier vorliegt. Wie gewöhnlich bei diesen Kursen bestand die Zuhörerschaft größtenteils aus Handwerkern, namentlich Mechanikern u. dgl., zu denen aber diesmal auch eine Anzahl von Volksschullehrern sich gesellt hatte, und hieraus erwuchs für den Vortragenden die Veranlassung, neben dem gewohnten Streben nach gemeinverständlicher Darstellung noch besonderen Wert auf die Vorführung einfacher Unterrichtsversuche zu legen, namentlich solcher, die keine großen Zurüstungen oder kostbaren Apparate erfordern. Auch beim Niederschreiben des Textes sind die vorkommenden Versuche genau und mit mancherlei auf die praktische Ausführung bezüglichen Einzelheiten geschildert und in einem besonderen Verzeichnis zusammengestellt worden. Ein anderes Verzeichnis bezieht sich auf die im Text zerstreuten Tabellen, in welchen zahlenmäßige Angaben über die Wärmeigenschaften der Körper enthalten sind, und bei deren Zusammenstellung das beste in der Literatur vorhandene Tatsachenmaterial benutzt wurde.

Zur Erzielung möglicher Klarheit ist bei der Ausarbeitung die Form des mündlichen Vortrages beibehalten worden.

Berlin, im Juli 1907.

R. Börnstein.

Vorwort zur zweiten Auflage.

Vom Verlage aufgefordert hat der Herausgeber an Stelle des verstorbenen Verfassers die Neubearbeitung übernommen. Gegenüber der ersten Auflage sind zahlreiche Ergänzungen und Berichtigungen angebracht worden. Die Anlage des Büchleins blieb jedoch unverändert.

Halle a. d. S., im April 1918.

A. Wigand.

Inhalt.

Seite

I. Ausdehnung erwärmter Körper. Temperaturmessung	1
Ausdehnung. Ihre Verschiedenheit bei verschiedenen festen Körpern. Anwendungen. Ausdehnung der Flüssigkeiten und Gase. Bewegung durch teilweise Erwärmung. Warmwasserheizung. Wind. Aufsteigender Luftstrom. Kubische Ausdehnung. Verhalten des Wassers. Thermometrie.	
II. Wärmemessung. Wärme- und Kältequellen. Wärme als Energieform	18
Unterscheidung zwischen Temperatur und Wärme. Wärmemenge. Kalorie. Spezifische Wärme fester und flüssiger Körper. Klimatische Einwirkung der Gewässer. Wärmequellen. Sonne. Verbrennung. Wärmetönung bei chemischen Umsetzungen. Lösungswärme. Kältemischungen. Spezifische Wärme der Gase. Mechanisches Äquivalent der Wärme. Dynamische Erwärmung und Abkühlung. Reibung. Messung des mechanischen Wärmeäquivalentes.	
III. Schmelzen und Erstarren	39
Schmelztemperatur. Regelation. Gletscher. Unterkühlung. Graupeln. Hagel. Eisregen. Gefrierpunktniedrigung durch gelöste Körper. Schmelzwärme. Eiskühlung. Strahlungswärme und Eisschmelzung in den Polargegenden. Eiskalorimeter.	
IV. Sieden. Verdampfen. Verflüssigen	52
Siedetemperatur. Ihre Abhängigkeit vom Druck. Verhalten des Wassers. Hypsothermometer. Sättigung. Siedepunktserhöhung durch gelöste Körper. Siedeverzug. Verflüssigen der Gase. Ein des Kältemaschine. Flüssige Luft. Kritischer Zustand. Partialdruck eines Gases. Verdunstung. Verdampfungswärme. Dampfheizung.	
V. Verhalten des Wasserdampfes in der Atmosphäre. Dampf- und andere Wärmekraftmaschinen	70
Absolute Luftfeuchtigkeit. Sättigungstemperaturen und -drücke für Wasserdampf. Taupunkt. Relative Feuchtigkeit. Hygrometer. Schwüle. Nachtfrostprognose. Föhn. Wolkenbildung. Kondensationskerne. Nebel. Tau. Reif. Aufsteigender Luftstrom. Trocken-, Regenstadium. Größe der Regentropfen. Hagel-, Schneestadium. Wärmekraftmaschinen. Leidenfrostscher Versuch. Verdampfungswärme des Wassers. Dampfmaschine. Expansion. Kondensator. Vorteile hohen Dampfdruckes. Heißdampfmaschine. Heißluftmaschine. Gasmaschinen. Wirkungsgrad. Dampfturbine. Entropiegesetz.	
VI. Leitung und Strahlung der Wärme	98
Wärmeleitfähigkeit fester Körper. Anwendungen. Verhalten der Kristalle. Leitungsfähigkeit der Flüssigkeiten und Gase. Wärmestrahlung. Zurückwerfung. Brechung. Absorption. Wärmespektrum.	
Verzeichnis der Abbildungen und ihrer Quellen	114
Verzeichnis der im Text beschriebenen Unterrichtsversuche	115
Verzeichnis der in Tabellenform mitgeteilten Zahlenangaben	116
Alphabetisches Verzeichnis	116

Erstes Kapitel.

Ausdehnung erwärmter Körper. Temperaturmessung.

In diesen Vorträgen werden wir eine Reihe einzelner Tatsachen aus dem Gebiete der Wärmelehre kennen lernen und zugleich eine Anzahl nützlicher Anwendungen für das tägliche Leben. Dagegen wollen wir nicht näher auf die Anschauungen über die Natur der Wärme eingehen.

Indem wir den einzelnen Wärmevorgängen näbertreten, beginnen wir mit der aus vielfacher Erfahrung hervorgehenden Tatsache, daß die Körper sich beim Erwärmen ausdehnen. Als erstes Beispiel diene uns dabei das Verhalten einer Messingkugel, die, wie wir sehen, durch den am gleichen Gestell befindlichen Eisenring jetzt leicht und glatt hindurchgeführt werden kann (Abb. 1). Erwärme ich nun die Kugel, während der Ring auf Zimmertemperatur verbleibt, so dehnt sie sich derartig aus, daß sie nicht mehr durch den Ring gleitet, sondern auf ihm liegen bleibt. Es genügt dafür, die Kugel während einiger Sekunden in die Gasflamme zu halten, und es dauert darum auch nur kurze Zeit, bis die Kugel wieder durch den Ring hindurchfällt, denn sie hat sich inzwischen durch Wärmeabgabe an die Umgebung abgekühlt, der Ring sich zugleich durch Berührung mit der wärmeren Kugel selbst etwas erwärmt und vergrößert. Der Versuch zeigt uns demnach sowohl die Ausdehnung beim Erwärmen wie auch die Zusammenziehung beim Abkühlen.



Abb. 1.
Ausdehnen beim Erwärmen.

Daß dergleichen Größenänderung mit erheblicher Kraft geschieht, lehrt uns ein anderer Versuch, bei welchem wir die Erkaltung eines Stahlstabes verfolgen wollen. Der Stab (Abb. 2, oben) trägt an einem Ende (links) ein Gewinde und eine daraufgeschraubte breite Schraubenmutter, am anderen Ende (rechts) eine quengerichtete Durch-

bohrung, durch welche ich einen kurzen gußeisernen Pflock stecke. Ich bringe den Stab in ein festes eisernes Gestell, gegen dessen beide Widerlager von außen her die Mutter und der Pflock sich legen, und er-

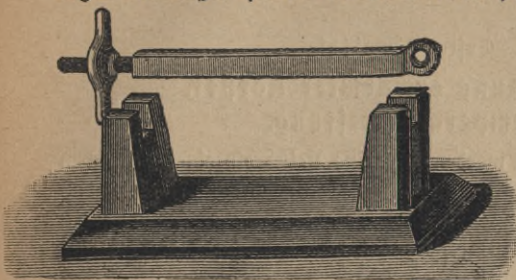


Abb. 2 Zusammenziehung beim Erkalten.

hize dann den Stab durch eine untergesetzte Flamme. Ist die Temperatur hoch genug, so ziehe ich die Schraubenmutter fest an und verhindere damit zunächst das Zusammenziehen des Stabes, den ich nun der Abkühlung überlasse. Auf die

Fortsetzung des Versuches müssen wir, weil die Erkaltung langsam vor sich geht, eine Weile warten, werden aber deutlich genug daran erinnert, wenn der sich verkürzende Stab endlich den Eisenpflock zerreißt und sich mit plötzlichem Ruck nach dem Schraubenende hin zusammenzieht, denn dieser einseitige Ruck ist so stark, daß der ganze Stahlstab aus dem Eisen- gestell herausfliegt und mit entsprechendem Gepolter zu Boden fällt.

Hiermit vergleichbar ist das bekannte Springen von Gläsern bei ungleichmäßiger Erwärmung; denn ebenso ungleichmäßig wie die Erwärmung ist auch die Ausdehnung, und dadurch kann der Zusammenhang benachbarter Teile zerstört werden.

Haben wir so die Tatsache der Ausdehnung erwärmter Körper kennen gelernt, so finden wir bei genauerer Untersuchung, daß verschiedene Materialien wesentliche Unterschiede zeigen. Aluminium z. B. dehnt sich bei gleicher Erwärmung etwa doppelt so stark aus wie Eisen; Messing, Kupfer und Neusilber ungefähr um die Hälfte mehr als Eisen. Hier habe ich ein Stäbchen, bestehend aus zwei Streifen von Stahl und Kupfer, die der Länge nach durch Nieten aneinander befestigt sind. Bei gewöhnlicher Temperatur ist der Stab gerade; erwärme ich ihn, so dehnt das Kupfer sich stärker aus als der Stahl, und der Stab krümmt sich derartig, daß Kupfer die äußere, Stahl die innere Seite des Bogens bildet (Abb. 3). Bei Abkühlung würde die entgegengesetzte Krümmung eintreten.

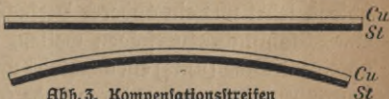


Abb. 3. Kompensationsstreifen

Die große praktische Bedeutung der Wärmeausdehnung und ihrer Kenntnis hat schon längst dazu geführt, daß man ihren Betrag für eine große Zahl von Körpern feststellte. Dazu gehört die gleichzeitige Messung der Temperatur und Länge eines Stabes, der aus dem zu untersuchenden Material besteht und nacheinander den verschiedenen Temperaturen unterworfen wird. Kennt man dann die Länge, welche er bei jeder einzelnen Temperatur annimmt, so ist es leicht, daraus seinen linearen Ausdehnungskoeffizienten zu berechnen, welcher der zahlenmäßige Ausdruck seines Ausdehnungsvermögens ist und die Verlängerung für die Erwärmung um 1°C als Bruchteil der ganzen Länge angibt.

In der folgenden Tabelle ist dieser Wert für einige Körper zusammengestellt. Die Bedeutung der Zahlen ist diese, daß z. B. ein Aluminiumstab von 1 m Länge, den man um 10°C erwärmt, dadurch um 0,22 mm länger wird. Der geringe Betrag dieser Verlängerung läßt es verstehen, daß zur Feststellung derartiger Zahlen recht empfindliche Apparate und genaue Messungen erforderlich sind, während andererseits die Wichtigkeit solcher Feststellungen und ihre Beachtung bei zahlreichen Fragen des Tageslebens und der Technik durch die allgemeine Verbreitung der hier geschilderten Erscheinungen bedingt wird.

Lineare Ausdehnungskoeffizienten bei etwa 18°C .

Aluminium	0,0000 22	Wismut	0,0000 13	Glas	0,0000 06
Blei	29	Zinn	29	bis	09
Eisen	11	Zinn	21	Hartgummi	8
Stahl	10	Messing	18	Holz, quer	4
Gold	14	Neusilber	18	bis	6
Kupfer	16	Platin-Iri-		Holz, längs	03
Nickel	13	dium	09	bis	06
Platin	09	Nickelstahl			
Silber	19	(36,1 % Nickel)	009		

Einige solche Anwendungen seien zunächst geschildert. Alle eisernen Bauteile, wie Träger, Brücken usw., müssen derartig gelagert werden, daß ohne Schädigung des Bauwerks die Länge sich ändern kann, wie es den im Jahreslauf eintretenden Temperaturschwankungen entspricht. Ebenso pflegt man beim Eisenbahnbau die einzelnen Schienen durch ausreichend breite Fugen zu trennen, damit nicht im heißen Sommer Druck und Verbiegung eintritt.

Wichtig ist die Berücksichtigung der Längenausdehnung ferner bei

den Uhren. Betrachten wir zunächst eine Pendeluhr, so hängt bekanntlich ihr Gang von der Länge des Pendels ab; das längere Pendel

schwingt langsamer, das kürzere rascher. Also würde eine solche Uhr mit einfacher Pendelstange, die den Temperaturen der Umgebung ausgesetzt ist, in der Kälte vorausseilen, in der Wärme zurückbleiben. Man vermeidet dies, indem man die einfache Pendelstange durch eine aus zwei verschiedenen Metallen gebildete Gruppe von Stäben ersetzt. Abb. 4 zeigt ein solches Rostpendel, dessen Stäbe abwechselnd aus Eisen und Zink bestehen. Die Anordnung ist derartig, daß durch Ausdehnen der Eisenstäbe das Pendel länger wird, daß es sich dagegen verkürzt, wenn die Zinkstäbe erwärmt und ausgedehnt werden. Da nun Zink eine etwa $2\frac{1}{2}$ mal stärkere Ausdehnung als Eisen hat, ist die Länge der Stäbe derartig gewählt, daß das gesamte Eisengehänge (der mittlere Stab bis zur Mitte des runden Gewichts gemessen) $2\frac{1}{2}$ mal länger ist als das Zinkgehänge. Auf diese Art wird also das Pendel durch die gleichzeitige Ausdehnung beider Metalle um ebensoviel verlängert wie verkürzt und behält trotz veränderlicher Temperatur seine unveränderte Länge und Schwingungsdauer. Will man durch eine solche Kompensation eine Taschenuhr gegen die Temperatureinflüsse schützen, so dient dazu ein anderes Verfahren. Dem Pendel der Wanduhr entspricht bei der Taschenuhr die „Unruhe“, jenes Rädchen, welches in Verbindung mit der spiralförmigen „Unruhesfeder“ durch seine hin und her gehende Bewegung den Gang des Wertes regelt.



Abb. 4.
Rostpendel.



Abb 5. Kompensierte Unruhe einer Taschenuhr.

Man kann die Unruhe (Abb. 5) auffassen als eine Anzahl von Pendeln, deren gemeinsamer Drehpunkt in der Radachse liegt, während die Radien als Pendelstäbe zu denken sind und die Pendelgewichte im Radkranz liegen. Auch hier wird durch Vergrößerung des Rades (der Pendellänge) der Uhrgang verlangsamt, durch Verkleinerung beschleunigt. Ist aber der Radkranz unter Verwendung zweier Metalle aus einem Stab hergestellt, wie er oben (Abb. 3) beschrieben wurde, so kann er gegen Temperaturwirkung gesichert sein. Das sich stärker ausdehnende Metall ist dabei

außen angebracht, und der Stab ist nicht völlig zum Kreise gebogen, sondern enthält eine oder mehrere Lücken (a und b). Beim Erwärmen krümmt er sich stärker, so daß sein Schwerpunkt der Mitte genähert und auf diese Art der durch die Temperaturerhöhung ausgedehnte Radius wieder verkürzt wird, also die Schwingungsdauer unverändert bleibt.

Endlich sei noch darauf hingewiesen, daß bei jeder genauen Längenmessung die Beachtung der Temperaturverhältnisse erforderlich ist, und zwar muß sowohl die Temperatur des zu messenden Gegenstandes wie auch diejenige des Maßstabes berücksichtigt werden. Das erstere ist wohl ohne weiteres klar; und was das zweite betrifft, so wollen wir einmal annehmen, es werde die Länge eines bestimmten und nicht veränderlichen Gegenstandes zuerst bei gewöhnlicher Temperatur gemessen, dann nochmals mit dem gleichen, aber inzwischen erwärmten Maßstab. Da dieser sich ausgedehnt hat, sind die Abstände seiner Teilstriche gewachsen, seine Millimeter sind tatsächlich jetzt länger als vorher, und es gehen ihrer weniger auf die gleiche Gesamtlänge. Der gemessene Gegenstand, welcher selbst unverändert bleibt, erscheint um so kürzer, je wärmer der Maßstab ist. Wenn Maßstab und Gegenstand aus gleichem Material bestehen, genügt es natürlich, daß sie beide gleiche Temperaturen haben; andernfalls aber kommt in Betracht, daß sie verschieden stark beim Erwärmen ausgedehnt werden. Also gilt eine jede Messung strenggenommen nur für diejenige Temperatur, bei welcher sie ausgeführt wurde. Gewöhnlich werden Längenmessungen auf 0° bezogen, nötigenfalls durch Umrechnen.

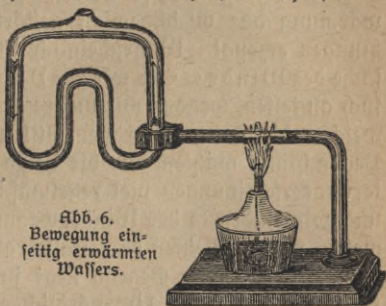
Wie bei festen, so findet auch bei flüssigen und gasförmigen Körpern Ausdehnen und Zusammenziehen als Wirkung von Erwärmen und Abkühlen statt. Zur Darstellung dieser Tatsachen mögen folgende Versuche dienen. Ich habe hier eine hohle dünnwandige Glasugel von etwa 5 cm Durchmesser, welche bei Zimmertemperatur ganz mit Wasser gefüllt und dann durch Abschmelzen des Stiels verschlossen ist. Wenn ich sie nun in ein mit heißem Wasser gefülltes Gefäß lege, so erwärmt sich sowohl die Glashülle wie auch die Wasserfüllung. Hätten beide die gleiche Ausdehnung, so würden wir ohne genaue Messung gar keine Änderung bemerken. Tatsächlich wird aber beim Erwärmen das Wasser viel stärker als das Glas ausgedehnt, und so nehmen wir alsbald wahr, daß die Glashülle dem wachsenden inneren Druck nicht mehr widerstehen kann, sondern mit leisem Klang in mehrere Stücke zerspringt. Betrachten wir die Bruchstücke,

so ist ersichtlich, daß die Glaswand an einer Stelle, jedenfalls der schwächsten, zuerst nachgab, und daß von hier aus dann zahlreiche Sprünge nach allen Seiten ausgingen. Wir führen nun den entsprechenden Versuch mit Luft statt des Wassers aus und müssen dabei eine stärkere Wärmequelle benutzen, denn das bloße Eintauchen in heißes Wasser genügt nicht, um die mit Luft gefüllte Glaskugel zu sprengen. Ich setze also diese Kugel der Einwirkung einer Gasflamme aus und gebrauche dabei die Vorsicht, eine recht dicke Fensterglascheibe zwischen die Augen der Anwesenden und unsere Glaskugel zu bringen; denn sobald sie genügend erhitzt ist, zerspringt sie mit lautem Knall in zahllose kleine Stückchen. Woher kommt nun diese äußere Verschiedenheit der beiden Versuche? Der Wärmevergang war beidemale der nämliche: die Glaskugel wurde durch Ausdehnen ihres Inhalts auseinandergetrieben. Aber Luft ist stark zusammendrückbar, Wasser dagegen fast gar nicht. Demnach nimmt die Wasserfüllung in jedem Augenblick denjenigen Raum ein, welcher der jeweiligen Temperatur entspricht, und wird daran nicht durch die Glashülle gehindert, sondern widerstandslos muß das Glas sich ausdehnen, um die wachsende Größe der erwärmten Wassermenge zu umschließen, bis endlich die Spannung so weit gestiegen ist, daß die Hülle springt. Dieser Vorgang hat aber auf das Wasser keinen merklichen Einfluß; es war vorher durch den starken inneren Druck nicht auf geringeren Raum eingeengt und hat also jetzt beim Nachlassen des Druckes auch keinen Anlaß, sich mehr auszudehnen, als der Temperatur entspricht. Die Luft hingegen ist so stark zusammendrückbar, daß beim Beginn des Erwärmens die Festigkeit der dünnen Glashülle ausreicht, um eine Ausdehnung der eingeschlossenen Luft zu hindern. Die Wirkung der erhöhten Temperatur besteht zunächst nur in einer Vermehrung des inneren Druckes; um ihn zu verdoppeln, muß die Luft um 273°C erwärmt werden. Ist dieser Druck stärker geworden, als die Glashülle vertragen kann, so springt sie auch diesmal an ihrer schwächsten Stelle; dann aber tritt sofort ein Ausgleich zwischen innerem und äußerem Druck ein, und die vom bisherigen Druck befreite Innenluft dehnt sich so stürmisch aus, daß sie von der eben entstehenden Öffnung her rasch das Glas nach allen Seiten aufreißt und in kleine Stückchen zertrümmert.

Zugleich mit der Ausdehnung der Körper ändert sich auch ihre Dichte. Ein Gramm Wasser z. B. erfüllt bei 4°C gerade den Raum

eines Kubikzentimeters; wird es erwärmt und ausgedehnt, so faßt jetzt ein Kubikzentimeter weniger als ein Gramm, die Flüssigkeit ist spezifisch leichter geworden. Daraus folgt, daß durch stellenweise Temperaturänderung in Flüssigkeit wie auch in Luft Störungen des Gleichgewichts entstehen und Bewegungen herbeigeführt werden, wie uns der folgende Versuch lehrt. Dies Glasrohr (Abb. 6) ist der-

artig gebogen, daß seine beiden Enden miteinander verschmolzen werden konnten; füllen wir es durch die obere Öffnung mit Wasser, so bildet dies einen zusammenhängenden und in sich geschlossenen Flüssigkeitsfaden. Das im übrigen freischwebende Rohr wird an seinem rechten Schenkel mittels einer Kupferklemme gehalten, welche sich am



Ende eines kräftigen Kupferdrahtes befindet. Ich erwärme jetzt diesen Draht durch eine daruntergestellte kleine Spirituslampe und erhöhe, weil das Kupfer die Wärme gut leitet, auf diese Art auch die Temperatur des im rechten Rohrschenkel befindlichen Wassers. Damit ist im Innern des Rohres das Gleichgewicht gestört; denn während vorher in beiden Schenkeln gleichwarme und gleichschwere Wassersäulen standen und beiderseits den gleichen Druck ausübten, ist jetzt rechts eine erwärmte und darum leichtere Wassersäule vorhanden, und daraus entsteht eine Bewegung, welche im rechten Schenkel aufwärts, im linken abwärts gerichtet ist, oben nach links und unten nach rechts führt. Das aus dem rechten Schenkel in die kälteren Rohrteile fließende Wasser gibt seine überschüssige Wärme bald ab, während das kühlere Wasser, welches nun in den rechten Schenkel einfließt, dort sogleich erwärmt wird. Mit der Ursache der Gleichgewichtsstörung, nämlich der ungleichen Erwärmung beider Seiten, bleibt als Wirkung die geschilderte Bewegung bestehen. Ich kann diesen Kreislauf des Wassers in der Röhre leicht für uns alle sichtbar machen, indem ich durch die obere Öffnung ein Tröpfchen roter Farbe in die Flüssigkeit bringe, denn nun schreitet die Rotfärbung im Wasser nur nach links (mit der Strömung) fort. In größerem Maßstab finden wir den gleichen Vorgang bei der Warmwasserheizung. Eine mit Wasser gefüllte

und in sich geschlossene Röhrenleitung durchzieht alle Räume des Gebäudes und wird an einer zweckmäßig gewählten Stelle durch Feuerung erhitzt. Dann entsteht durch die Gleichgewichtsstörung in der Röhre ein Kreislauf des Wassers, welcher den sämtlichen Räumen Wärme zuführt.

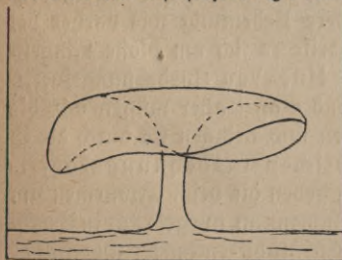
Wie in Flüssigkeit, so wird auch in Luft durch ungleichmäßige Erwärmung das Gleichgewicht gestört und das Auftreten von Strömungen erzeugt. Wahrscheinlich ist dies die letzte und einzige Ursache des Windes. Ehe wir zur Veranschaulichung einen eigenen Versuch anstellen, wenden wir unsere Aufmerksamkeit einem Vorgang zu, welchen die Natur in großem Stil uns vorführt. Als Schauplatz der Beobachtung wählen wir die heiße Zone, denn dort treten die Witterungserscheinungen viel regelmäßiger auf als in unseren Breiten, und wir finden in der Windbewegung dieselben Einzelheiten wieder, welche uns im kleinen das Wasserrohr des vorigen Versuchs erkennen ließ. Die wärmste Gegend liegt in der Nähe des Äquators, durchschnittlich bei etwa 10° nördlicher Breite, und verschiebt sich im Jahreslauf während unseres Sommers nach Norden, während unseres Winters (der bekanntlich mit dem Sommer der südlichen Erdhälfte zusammenfällt) nach Süden. Über dieser wärmsten Gegend steigt die Luft empor; da wir die bloß aufsteigende Bewegung nicht als Wind empfinden, herrscht dort meist Windstille, und man bezeichnet diese Zone der Erdoberfläche als Kalmengürtel. Unten fließt von Nord und von Süd her kältere Luft herbei, während oben die aufgestiegene Luft nach beiden Seiten abfließt, um in nördlicheren bzw. südlicheren Gegenden wieder herabzusteigen. Außer der Temperaturverteilung wirkt auf die Bewegung der Luftmassen auch die Erddrehung ein, und zwar in der Weise, daß eine jede Bewegung auf der nördlichen Erdhälfte nach rechts, auf der südlichen nach links abgelenkt wird. Die untere Strömung, welche wir als Wind wahrnehmen und bezeichnen, ist also nicht als Nord- und Südwind gegen den Äquator gerichtet, sondern kommt von Nordosten und von Südosten her und führt unter dem Namen Passatwind die Luftmassen von beiden Seiten schräg zu den Kalmen hin.

In höheren Breiten treten die Witterungsvorgänge weniger regelmäßig auf, weil die ungleichmäßige Verteilung von Wasser und Land vielfach einwirkt. Aber auch diese Einwirkung ist vorzugsweise auf die ungleich verteilte Erwärmung und Ausdehnung der Luft zurück-

zuföhren. Aus verschiedenen Gründen, die später erwähnt werden sollen, ist auf dem Meere und an der Küste die jährliche Temperaturschwankung kleiner als im Binnenlande; an der See gibt es geringere Sommerhitze und geringere Winterkälte als mitten im Lande. Das gleiche gilt von der Luft, die sich über dem Wasser und dem festen Boden befindet; auch sie ist im Sommer über dem Lande wärmer, im Winter über der See. Genau wie bei dem zuletzt von uns betrachteten Versuch muß also auch hier ein Kreislauf entstehen, welcher an der wärmeren Seite hinauf, an der kälteren herab, unten von der kalten zur warmen Gegend und oben umgekehrt gerichtet ist. Für die untere Strömung, welche die von uns wahrgenommenen Winde ausmacht, folgt daraus im Sommer Seewind, im Winter Landwind, und in der Tat finden wir an den Küsten der großen Kontinente vielfach derartige Winde, die in der warmen und kalten Jahreszeit aus entgegengesetzten Richtungen wehen und als Monsune bezeichnet werden.

In geringerem Betrage, aber doch an vielen Stellen recht deutlich, wirkt auf diese Weise auch die tägliche Temperaturschwankung. Sie führt, wie nach dem Vorstehenden leicht einzusehen ist, dazu, daß bei Tage das Land, bei Nacht die See wärmer ist, und daß also namentlich im Sommer, wenn diese Verschiedenheit größer ist, bei Tage Seewind, bei Nacht Landwind vorwiegt, wie es ja an vielen Küstenorten durch Erfahrung längst feststeht.

Endlich können wir auch durch einen Versuch noch Luftbewegungen der geschilderten Art anschaulich machen. Eine Glasplatte liegt wagenrecht auf einigen Holzklößen und trägt eine Glasglocke, wie man sie bei Luftpumpenversuchen zu benutzen pflegt. Um die Bewegungen der inneren Luft sichtbar zu machen, blase ich in den unteren Teil der



Glocke etwas Tabaksrauch hinein und überlasse dann den nach außen völlig abgeschlossenen Innenraum für kurze Zeit sich selbst. Der Tabaksrauch besteht aus feinen Teilchen, welche schwerer als Luft sind und sich deshalb in langsamem Herabsinken am Boden des Gefäßes wie eine dichte Nebelschicht ansammeln. Nun erwärme ich die Mitte der

Abb. 7. Aufsteigender Luftstrom.

Grundplatte, etwa durch Berühren mit dem glimmenden Ende der Zigarre, und alsbald sehen wir (Abb. 7), wie sich aus der Rauchsicht ein pilzförmiges Gebilde emporhebt: über der erwärmten Stelle steigt die Luft auf, breitet sich oben aus und fließt unten von allen Seiten heran.

Übrigens können wir die Bewegung ungleich erwärmter Flüssigkeits- oder Luftmassen auch ohne färbenden Zusatz (rote Flüssigkeit, Tabaksrauch) erkennen, wenn wir auf die Lichtbewegung achten, denn mit jeder Änderung der Temperatur und Dichte ändert sich auch die Brechung des hindurchgehenden Lichtes. Während in einer gleichmäßig warmen Wasser- oder Luftmasse die Strahlen geradlinig fortschreiten, führt eine örtliche Erwärmung zu abgelenkten Lichtbahnen und erzeugt eine derartig veränderte Verteilung der Helligkeit, daß wir die an den erwärmten Stellen aufsteigenden Ströme mit den Augen erkennen können (Schlierenbildung). Recht deutlich wird die Erscheinung, wenn ich mit Hilfe der Projektionslampe an der Wand das vergrößerte Bild einer kleinen Spiritusflamme entwerfe; wir sehen dann über der Flamme den von ihr ausgehenden Strom warmer und leichter Luft emporsteigen. Aber auch ohne solche Vorrichtung können wir leicht das gleiche bemerken, wenn wir über eine Flamme hinwegblicken und die dahinter befindlichen Gegenstände anschauen. Sie erscheinen uns dann schwankend, weil der von der Flamme aufsteigende warme Strom fortwährend kleine Schwankungen ausführt. Auch das Flimmern der Sterne entspringt aus der Bewegung unregelmäßig erwärmter Luftmassen, und sein Ursprung ist also nicht etwa bei dem Stern, sondern meist ganz nahe bei dem Beobachter zu suchen.

Indem wir nunmehr auch für einige flüssige und gasförmige Körper den Betrag der Ausdehnung zahlenmäßig angeben, hat der Ausdehnungskoeffizient hier eine etwas andere Bedeutung wie vorher bei den festen Körpern; denn dort handelte es sich um bloße Längenänderung, und sie wurde durch den linearen Ausdehnungskoeffizienten gemessen. Bei Flüssigkeiten und Gasen aber müssen wir die räumliche Ausdehnung zugrunde legen und bringen sie durch die in der folgenden Tabelle enthaltenen kubischen Ausdehnungskoeffizienten zum Ausdruck. Diese Zahlen geben die beim Erwärmen um 1°C stattfindende Vermehrung des Volumens an, ausgedrückt in Bruchteilen des ursprünglichen Volumens. Ein Kubikzentimeter Quecksilber z. B., dessen Temperatur man um 10°C erhöht, nimmt danach um

1,81 Kubikmillimeter mehr Raum ein. Zwischen beiden Ausdrucksweisen besteht eine sehr einfache Beziehung, denn da die lineare Ausdehnung nach einer Richtung, die räumliche nach drei Richtungen stattfindet, so kann man ohne große Ungenauigkeit sagen, der kubische Ausdehnungskoeffizient sei gleich dem dreifachen Werte des linearen. Für Glas z. B., dessen linearer Ausdehnungskoeffizient oben zu 0,000 006 bis 0,000 009 angegeben wurde, beträgt der kubische Koeffizient 0,000 018 bis 0,000 027 und ist also bei allen Glasarten viel geringer als beim Quecksilber. Bei Hartgummi dagegen sind die entsprechenden Werte 0,000 08 und 0,000 24; dieser Körper hat also erheblich stärkere räumliche Ausdehnung als Quecksilber.

Kubische Ausdehnungskoeffizienten bei etwa 18° C.

Äther	0,00163	Essigsäure . .	0,00107	Wasser	0,00018
Alkohol	110	Petroleum . .	092	Quecksilber . .	0181
Anilin	085	Schwefelkohlen-		Luft	3670
Benzol	124	stoff	121		

Der in der Überschrift der Tabelle vorhandene Zusatz „bei etwa 18° C“ deutet schon auf eine Abhängigkeit der Ausdehnung von der Anfangstemperatur hin, und in der Tat sind die Werte des Ausdehnungskoeffizienten bei höherer Temperatur meist größer. Namentlich das Wasser ändert seine Ausdehnung mit der Temperatur sehr stark, sein Ausdehnungskoeffizient bei 18° nimmt mit sinkender Temperatur rasch ab, erreicht bei 4° C den Wert Null und wird dann sogar negativ. Das heißt: Wasser hat nur oberhalb 4° die Eigenschaft, sich beim Erwärmen auszudehnen; zwischen 4 und 0° verhält es sich umgekehrt, dehnt sich beim Abkühlen aus und zieht sich beim Erwärmen zusammen. Man drückt das auch durch die Angabe aus, das Wasser habe bei 4° seine größte Dichte, weil es von dieser Temperatur ab beim Erwärmen wie beim Abkühlen sich ausdehnt und also an Dichte abnimmt. Diese Temperatur des „Dichtemaximums“ ist übrigens vom Druck abhängig, und der obengenannte Wert von 4° C entspricht dem Druck einer Atmosphäre; unter einem Druck von 10 Atmosphären liegt das Dichtemaximum etwa bei 3,5°, unter 150 Atmosphären etwa bei 0,5°. Durch einen Versuch können wir die besonderen Ausdehnungsverhältnisse des Wassers leicht sichtbar machen. Dazu bedienen wir uns eines flaschenförmigen Gefäßes, auf dessen Hals eine lange und enge Röhre aufgesetzt ist, füllen dies Gefäß bis in die Röhre hinein mit Wasser und stellen es in Eis oder Schnee von 0°.

Wir sehen das anfangs zimmerwarme Wasser zunächst rasch in der Röhre sinken, dann langsamer, endlich bleibt es stehen, und ein im Innern des Wassers befindliches Thermometer zeigt uns an, daß gerade bei 4° das Sinken aufhörte; hierauf steigt das Wasser wieder, bis es mit 0° die Temperatur der Umgebung und zugleich denjenigen Stand erreicht hat, welchen es vorher bei $8,1^{\circ}$ einnahm.

Bringen wir das auf 0° abgekühlte Wasser in eine noch kältere Umgebung und entziehen ihm dadurch Wärme, so verwandelt es sich allmählich in Eis von 0° und dehnt sich dabei wieder beträchtlich aus. Während ein Gramm Wasser bei 4° genau den Raum eines Kubitzentimeters erfüllt, bei 100° 1,04343 und bei 0° 1,000132 ccm, beträgt für 1 g Eis von 0° der entsprechende Wert 1,092 ccm; das Wasser dehnt sich also beim Erstarren ohne Temperaturänderung um etwa 9 Prozent seines Volumens aus. Wird Eis abgekühlt, so tritt, wie bei anderen festen Körpern, Zusammenziehung ein. Daß die Ausdehnung des gefrierenden Wassers ebenso kraftvoll geschieht, wie wir es beim Erwärmen vorher sahen, wird uns der folgende Versuch zeigen. Eine gußeiserne Bombe, nämlich eine Hohlkugel von etwa 10 cm äußerem Durchmesser und 1 bis 2 cm Wandstärke, fülle ich mit Wasser von nahezu 4° , verschraube die Öffnung fest durch einen gut passenden eisernen Stopfen und bringe das Ganze in eine mit Kältemischung (Kochsalz mit dem dreifachen Gewicht Schnee oder Eistückchen) gefüllte Kiste. Um vor etwa herumfliegenden Sprengstücken sicher zu sein, legen wir auf die Kiste einen festen Deckel, stellen sie vorläufig beiseite und vernehmen nach einer Viertel- oder halben Stunde einen dumpfen Knall: das im Gefrieren sich stark ausdehnende Wasser hat die Bombe zersprengt.

Aus diesen Eigenschaften des Wassers vermögen wir die Vorgänge zu verstehen, welche beim winterlichen Abkühlen und Zufrieren der Gewässer zu beobachten sind. Beim Eintritt der kühlen Jahreszeit erkaltet zunächst das an der Oberfläche befindliche Wasser, wird dabei schwerer und sinkt zu Boden. Dies dauert aber nur so lange, bis die Temperatur von 4° erreicht ist und eine Wasserschicht von dieser Temperatur, die sich also im Zustande der größten Dichte befindet, den Boden bedeckt. Die weitere Abkühlung des Oberflächenwassers führt dann wieder zur Ausdehnung. Das zwischen 4 und 0° befindliche Wasser ist leichter als die unterste Schicht und bleibt also oben, und wenn dann die oberste und jetzt kälteste Schicht zu gefrieren be-

ginnt, ist auch damit wieder eine Ausdehnung verbunden; das sich bildende Eis schwimmt auf der Oberfläche, weil es leichter ist als alles Wasser, und die bei fortwirkender Kälte entstehende zusammenhängende Eisdecke schützt als schlechter Wärmeleiter das Wasser gegen weitere Wärmeentziehung.

Wo im Gestein oder im Mauerwerk Spalten dem Regenwasser und der Winterkälte zugänglich sind, werden sie durch das gefrierende Wasser erweitert, und die Zerkleinerung von Felsmassen sowie die Auflockerung des Bodens sind die weitverbreiteten Wirkungen solcher Vorgänge.

Man würde indessen irren, wollte man diese Dinge als Besonderheiten gerade des Wassers ansehen. Die meisten andern Körper ziehen sich allerdings beim Erstarren zusammen, nicht jedoch Wismut. Hier habe ich eine Probe metallischen Wismuts, an dem wir sogleich die beim Erstarren auftretende Ausdehnung bemerken werden. Ich erhitze das Metall in einem dünnwandigen Probiergläschen, bis es geschmolzen ist, und lasse es dann abkühlen. Wie auf dem Wasser das Eis schwimmt, so erstarrt auch beim Wismut zuerst die oberste Schicht. Wenn wir dann noch die weitere Erkaltung abwarten, wird dem sich ausdehnenden Metall das Gefäß zu klein, und es zerspringt.

Die vorstehend geschilderte Eigenschaft aller Körper, mit der Temperatur auch ihr Volumen zu ändern, findet ebenso wichtige wie fruchtbare Anwendung in der Thermometrie. Es scheint, daß verschiedene Erfinder unabhängig voneinander darauf verfallen sind, jene Volumenänderungen für die Temperaturmessung zu benutzen. Bereits um das Jahr 1597 verwendete Galilei (1564—1642) in seinen an der Universität Padua gehaltenen Vorlesungen einen Apparat, bestehend aus einer Glasröhre mit angeblasener Kugel, welcher in aufrechter Stellung so befestigt war, daß das unten befindliche offene Ende der Röhre in ein Gefäß mit Wasser tauchte. Durch schwaches Erwärmen der Kugel hatte man einen Teil der darin befindlichen Luft ausgetrieben, so daß nach dem Erkalten das Wasser in der Röhre emporgestiegen war und durch seine Stellung die Temperatur der eingeschlossenen Luft anzeigte. Wurde die Luft erwärmt und ausgedehnt, so sank die Wassersäule, wurde die Luft abgekühlt, so stieg das Wasser im Rohr. Diese Vorrichtung war übrigens recht unvollkommen, denn außer der Temperatur wirkte auf den Stand der Wassersäule auch der Luftdruck, dessen Anwachsen die eingeschlossene Luft zusammen-

drückte und also gerade wie eine Abkühlung das Wasser in der Röhre steigen ließ, während umgekehrt bei abnehmendem Druck die innere Luft sich wie beim Erwärmen ausdehnte und die Wassersäule sank. Man konnte daher höchstens rasche Temperaturänderungen mit diesem Instrument verfolgen.

Den Übelstand, daß das Instrument nicht nur von der Temperatur, sondern auch vom Luftdruck abhing, lernte man vermeiden, indem man zum Füllen des Gefäßes statt Luft eine nicht zusammen-drückbare Flüssigkeit nahm. Alkohol und Quecksilber wurden dafür verwendet, und die Thermometer gewannen bald die noch heute übliche Form einer engen Röhre mit angeblasener Kugel und zugeschmolzenem Ende. Das erste Quecksilberthermometer scheint von Ismael Bouillau 1659 hergestellt zu sein, wird aber als unempfindlich geschildert und dürfte daher wenig brauchbar gewesen sein. Daniel Gabriel Fahrenheit (1686—1736) beschrieb 1724 ein Verfahren zur Herstellung gut miteinander übereinstimmender Thermometer. Er benutzte anfangs Alkohol, später Quecksilber zum Füllen der Instrumente; um die festen Punkte für die Gradeinteilung zu bestimmen, brachte er das Thermometer zuerst in ein Gemisch von Eis, Wasser und Salmiak oder Kochsalz und bezeichnete die Stellung der Flüssigkeit mit 0° ; dies war etwa die tiefste Temperatur des strengen Winters 1709 in Danzig. Dann stellte er das Thermometer in ein Gemisch von Eis mit Wasser und bezeichnete die nun eintretende Stellung mit 32° . Indem er die zwischen beiden Punkten liegende Strecke in 32 gleiche Teile zerlegte und diese Teilung nach oben fortsetzte, bildete er die nach ihm genannte Thermometerskala, welche in England und Amerika noch viel benutzt wird. Zur Kontrolle bestimmte Fahrenheit mit seinem Thermometer die Bluttemperatur eines gesunden Menschen durch Einlegen in den Mund und unter den Arm und bezeichnete diese mit 96° ; für den Siedepunkt des Wassers gibt er 212° an, scheint aber diesen Punkt nicht zum Herstellen der Teilung benutzt zu haben. Die beiden von der Gefrier- und Siedetemperatur des Wassers hergeleiteten festen Punkte benutzte der Pariser René Antoine Ferchault de Réaumur (1683—1757); er fand, daß die in seinen Thermometern befindliche Alkohol-Wasser-Mischung sich zwischen jenen beiden Temperaturen um 80 Tausendstel ihres Volumens ausdehnte, bezeichnete die beiden Punkte darum mit 0 und 80° und zerlegte ihren Abstand in 80 gleiche Teile mit entsprechen-

der Fortsetzung dieser Teilung nach oben und unten. Die regelmäßige Ausdehnung, welche das Quecksilber vor dem Alkohol auszeichnet, führte dazu, daß man immer häufiger das Quecksilberthermometer benutzte. Der Schwede Anders Celsius (1701—44) schlug dazu vor, die zwischen Gefrier- und Siedepunkt des Wassers liegende Strecke in 100 Teile zu zerlegen, hatte aber die 100 am Eispunkt und die Null am Siedepunkt angebracht. Auf Veranlassung seines Landsmannes und Zeitgenossen, des Botanikers Karl v. Linné (1707—78), kehrte man die Teilung um und gab ihr die heute noch übliche Gestalt. Für wissenschaftliche und ärztliche Messungen dient allgemein die Celsiusskala, während daneben in Deutschland diejenige von Réaumur noch vielfach benutzt wird. Die gegenseitige Umrechnung der drei noch gebräuchlichen Thermometerskalen ist leicht auf Grund der folgenden Angaben auszuführen. Réaumur- und Celsiusgrade haben bei gleichem Nullpunkt das Zahlenverhältnis 4 zu 5; will man sie mit Fahrenheitgraden vergleichen, so ist von diesen erst 32 abzuziehen, dann stehen sie zu Réaumur- und Celsiusgraden im Verhältnis von 9 zu 4 und 5.

Die folgende Tabelle enthält einige dieser Umrechnung entsprechende Zahlen, während Abb. 8 die Vergleichung der festen Punkte zeigt.

Thermometerskalen von Celsius, Réaumur, Fahrenheit.

C	R	F	C	R	F
-23,3°	-18,6°	-10°	25°	20°	77°
-20	-16	-4	30	24	86
-17,8	-14,2	0	35	28	95
0	0	32	37	29,6	98,6
10	8	50	50	40	122
20	16	68	100	80	212

Soll ein Quecksilberthermometer zu recht genauen Messungen dienen, so muß man seine etwaigen Fehler kennen und in Rechnung ziehen. Dazu gehört in erster Linie die Prüfung seiner festen Punkte; man bringt dabei das Instrument in schmelzendes Eis und stellt die Lage des richtigen Nullpunktes fest; ebenso wird in einem mit dem Dampf siedenden Wassers erfüllten geschlossenen Gefäß die Lage des richtigen Siedepunktes (unter Berücksichtigung des Barometerstandes, vgl. Siedepunkt) festgestellt. Dann kommen die Kaliberfehler in Betracht, bestehend in ungleicher Weite der Röhre, weil eine bestimmte Queck-

silbermenge an verschiedenen weiten Stellen des Rohres verschieden lang erscheint. Durch Verschieben eines kurzen Quecksilberfadens im Rohr unter beständiger Beachtung seiner Länge kann man solche Fehler er-

kennen und ihre Größe bestimmen. Ferner ist zu bedenken, daß wir nicht bloß die Ausdehnung des Quecksilbers an unseren Thermometern beobachten, sondern stets den Unterschied der Ausdehnung von Quecksilber und Glas. Um dies zu bemerken, brauchen wir nur die Quecksilbersäule eines Thermometers zu betrachten, dessen Kugel rasch erwärmt wird. Ich benutze hier für den Versuch ein Instrument mit gläserner, durchsichtiger Skala und entwerfe mittels der Projektionslampe an der Wand ein vergrößertes Bild, welches uns das Ende des Quecksilberfadens und die Zahlen der Teilung deutlich sehen läßt. Wenn ich nun die Thermometerkugel mit der Gasflamme rasch berühre, macht das Quecksilber eine zuckende Bewegung nach unten, es sinkt zunächst um einen oder mehrere Grade und beginnt dann erst zu steigen. Der Vorgang ist leicht zu verstehen, denn zuerst wird die Glashülle erwärmt und ausgedehnt; darum fällt das Thermometer, bis die Wärme durch das Glas hindurch zum Quecksilber gelangt ist und nun erst das Steigen beginnt.

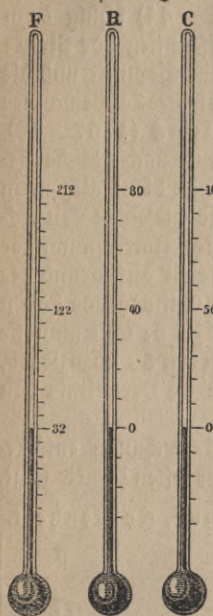


Abb. 8.

Thermometerskalen.

Lehrt dieser Versuch uns die Wichtigkeit auch

der Glasausdehnung für die Angaben des Instruments kennen, so werden wir um so eher verstehen, wie störend es sein mußte, daß namentlich in früherer Zeit die Glaskugeln allmähliche Veränderungen ihrer Größe aufwiesen. War das Instrument vor der Glasbläserlampe hergestellt und dann abgekühlt, so gewann es nicht sofort seine endgültige Größe, sondern zeigte eine langsame Nachwirkung, welche den Nullpunkt allmählich hob, Monate und länger dauerte und nach jedem Erhitzen des Thermometers wieder auftreten konnte. Durch passende Wahl der Bestandteile vermag man neuerdings Glasarten herzustellen, welche diesen Übelstand nur in sehr geringem Grad zeigen; namentlich das Jenaer Thermometerglas hat sich als sehr brauchbar erwiesen.

Den starken Einfluß des Materials, aus welchem das Thermometergefäß gefertigt ist, sehen wir auch in folgendem Versuch. Hier habe ich ein aus Hartgummi hergestelltes Gefäß, dessen Hohlraum einige Kubikzentimeter beträgt. Es ist ganz mit Quecksilber gefüllt und mit einem durchbohrten Kork verschlossen; nun schiebe ich durch die Bohrung des Korkes ein genau passendes, enges Glasrohr so weit hinein, daß das Quecksilber in dieser Röhre emporsteigt, stelle das Ganze zusammen mit einem gewöhnlichen Quecksilberthermometer vor der Projektionslampe auf und entwerfe von beiden Apparaten ein vergrößertes Bild an der Wand. Wenn ich jetzt durch Herausheben eines mit heißem Wasser gefüllten Bechers die Apparate erwärme, sehen wir in unserem Hartgummi-Apparat das Quecksilber sinken, während das Glasthermometer in bekannter Weise steigt. Die Erklärung hierfür gibt uns ein Blick in die Zahlenangaben von S. 3 und 11: der kubische Ausdehnungskoeffizient des Quecksilbers (0,000 181) ist größer als der des Glases (0,000 018), aber kleiner als derjenige des Hartgummi (0,000 24). Verwenden wir diesen letzteren Stoff zu einem Thermometergefäß, so entsteht eine Vorrichtung, die man etwa als verkehrt gehendes Thermometer bezeichnen könnte.

Ein für genaue Temperaturmessungen wichtiger Umstand ist ferner die ungleichmäßige Ausdehnung der Thermometerflüssigkeit. Das Quecksilber ist in dieser Hinsicht zwar noch günstiger als der Alkohol, hat aber doch merklich stärkere Ausdehnung bei höheren als bei niederen Temperaturen. Die Thermometerstalen müßten also, um dieser Eigenschaft der Quecksilberfüllung zu entsprechen, derartig geteilt sein, daß die Gradstriche nach oben hin immer größere Abstände voneinander hätten, und doch wäre es auch dann noch überaus schwierig, die Teilung wirklich genau richtig zu gestalten. Man vermeidet diese Uebelstände, indem man statt der Flüssigkeit eine geeignete Luftart benutzt; freilich steht dann dem Vorteil der gleichförmigen Ausdehnung der schon oben erwähnte Nachteil gegenüber, daß der von einer abgeschlossenen Gasmenge eingenommene Raum nicht bloß durch die Temperatur, sondern auch durch den Druck beeinflusst wird, und man muß also den äußeren Luftdruck entweder abschließen oder in Rechnung ziehen. Demnach ist ein Gasthermometer zwar ein zuverlässiger, aber auch recht umständlicher Meßapparat, und eine jede Temperaturbestimmung mit diesem meist Wasserstoff enthaltenden Instrument erfordert erheblichen Aufwand an Zeit und Arbeit. Man pflegt sich in-

dessen zur bequemerer Erzielung genauer Temperaturmessungen dadurch zu helfen, daß man Quecksilberthermometer benutzt, deren Angaben durch Vergleich mit einem Wasserstoffthermometer geprüft und, soweit nötig, berichtigt sind.

Zweites Kapitel.

Wärmemessung. Wärme- und Kältequellen. Wärme als Energieform.

Es mag sonderbar scheinen, daß in der Überschrift des vorigen Kapitels die Temperaturmessung genannt wurde und nun hier wieder von Wärmemessung die Rede sein soll. Die Sprache des täglichen Lebens pflegt freilich zwischen Temperatur und Wärme nicht zu unterscheiden, und eifrige Verdeutschungs-Schwärmer haben sogar das harmlose, weil in allen Sprachen gleichlautende Fremdwort Thermometer durch „Wärmemesser“ zu ersetzen versucht. Die Physik legt aber beiden Worten ganz verschiedene Bedeutung bei, und man sollte die Begriffe Temperatur und Wärme auch in der gewöhnlichen Verkehrssprache nicht vermengen. Unter Temperatur eines Körpers nämlich verstehen wir seinen Wärmezustand, und wir vergleichen die Temperaturen verschiedener Körper, indem wir diese nahe aneinander bringen und zusehen, ob dabei ihr Wärmezustand sich ändert oder nicht. So erforschen wir die Temperatur der uns umgebenden Körper durch Betasten (wobei übrigens die Außenseite unserer Finger das feinste Empfindungsvermögen zeigt) und stellen aus dem Gefühl der Hand fest, ob der untersuchte Gegenstand uns „warm“ oder „kalt“ erscheint, d. h. ob er der Hand Wärme gibt oder entzieht, wärmer oder kälter als die Hand ist. Zuverlässiger und genauer geschieht solches Erforschen mittels des Thermometers, weil dieses seinen jeweiligen Wärmezustand leicht erkennen und in Zahlen ausdrücken läßt. Wenn wir z. B. die Körpertemperatur eines Fiebernden untersuchen wollen und in seine Achselhöhle ein Thermometer einführen, so sehen wir dies alsbald steigen und erkennen also, daß seine Temperatur niedriger war als diejenige des Kranken, und daß es von ihm Wärme empfängt. Warten wir ab, bis das Quecksilber einen festen Stand erreicht hat, so wissen wir nun, daß beide Temperaturen gleich geworden sind, und können den gemeinsamen Wärmezustand an der Thermometerskala ablesen. Das sind freilich lauter Einzelheiten, die uns allen längst

schon ebenso bekannt sind, wie die Tatsache, daß die Temperatur eines Körpers steigt oder sinkt, wenn ihm Wärme zugeführt oder fortgenommen wird. Wieviel Wärme aber zugeführt oder fortgenommen werden muß, um eine bestimmte Temperaturänderung zu erwirken, pflegen wir im täglichen Leben nicht zu beachten. Das Thermometer gibt uns darüber auch zunächst keine Auskunft, es ist eben nicht ein Wärmemesser, sondern ein Temperaturmesser, es zeigt uns den Wärmezustand der Körper an, aber nicht die ihnen etwa zugeführte Wärmemenge.

Wir werden im folgenden das Wort Wärme stets zur Bezeichnung einer Wärmemenge brauchen, wie es in der Wissenschaft üblich und zur Vermeidung von Mißverständnissen wünschenswert ist. Danach bedeutet also z. B. „Luftwärme“ oder „Bodenwärme“ nicht etwa die Temperatur der Luft oder des Bodens, sondern die ihnen zugeführte oder innewohnende Wärmemenge.

Zunächst sollen einige Versuche diesen Begriff anschaulich machen. Hier habe ich fünf Kugeln von gleicher Größe, 1 bis 2 cm im Durchmesser, bestehend aus Eisen, Zink, Kupfer, Blei und Wismut (Abb. 9). Sie sind alle mit Ösen versehen und auf die umgebogenen Enden eines Drahtgestelles derartig aufgeschoben, daß ich die Kugeln festhalten und durch eine kleine Drehung des Gestelles von diesem befreien kann. Jetzt sind sie mit ihrem Gestell bereits seit geraumer



Abb. 9.
Vergleichung spezifischer Wärmen.

Zeit so angebracht, daß die Kugeln in ein Gefäß mit siedendem Wasser tauchen und dessen Temperatur angenommen haben. Ferner befindet sich hier eine Scheibe aus weißem Wachs von gleichmäßiger Dicke (4 bis 5 mm) wagerecht und mit ihrem Rand auf einem festen Ringe aufliegend. Nun hebe ich die Kugeln aus dem Wasserbade, entferne durch rasches Betupfen mit Fließpapier die anhängenden Wassertropfen, lege die Kugeln auf die Wachscheibe und befreie sie durch entsprechendes Drehen von dem Drahtgestell. Die heißen Kugeln beginnen sogleich das Wachs ihrer Umgebung zu schmelzen und langsam einzusinken. Dabei bemerken wir aber, daß die

Eisenkugel tiefer als die anderen in das Wachs eindringt und bei dünner Wachs Scheibe sogar hindurchfällt, das Kupfer etwas weniger stark wirkt, Zink noch weniger, während Blei und Wismut sogar nur geringe Vertiefungen im Wachs erzeugen. Also: obwohl die Kugeln gleich groß sind und alle fünf gleichmäßig auf die Temperatur des siedenden Wassers erhitzt waren, haben sie doch verschiedene Wachsmengen geschmolzen. Man könnte daran denken, daß die Kugeln bei gleicher Größe verschiedenes Gewicht haben, und daß vielleicht diesem Unterschied der Masse die Schmelzwirkung entspreche. Aber dann müßte die Bleikugel als schwerste von allen auch die stärkste Schmelzung erzeugt haben, und es war doch beinahe umgekehrt. Außer der Größe und Masse der Kugeln muß es also noch eine weitere Eigenschaft geben, welche die verschiedene Wärmeabgabe herbeiführte, denn unser Versuch zwingt uns zu der Annahme, daß die Kugeln bei gleicher Anfangs- und Endtemperatur, also bei Erkaltung um die gleiche Anzahl von Graden, ganz verschiedene Wärmemengen hergaben. Nicht minder verschieden sind natürlich auch diejenigen Wärmemengen, welche man den Kugeln zuführen müßte, um sie von der Temperatur des schmelzenden Wachses auf diejenige des siedenden Wassers zu erwärmen.

Ein anderer Versuch soll uns nun auch zeigen, wie groß die Unterschiede sind, deren Vorhandensein wir eben erkannten. Ich benutze dazu nur zwei Metalle, Kupfer und Blei, beide in Form kleiner Zylinder; sie sind gleich schwer, der Kupferzylinder also etwas größer, und befinden sich seit einer Weile in je einem Probiergläschen, welches in einem größeren Gefäß mit siedendem Wasser steht und oben mit einem Wattebausch verschlossen ist. Die beiden Metallkörper haben nunmehr die Temperatur des siedenden Wassers angenommen, ohne selbst dabei benetzt zu werden. Daneben haben wir hier zwei gleiche Gläschen, welche gleiche Wassermengen und außerdem je ein empfindliches Thermometer enthalten. Nun hole ich die erhitzten Metallstücke mittels der feinen Drähte, die an ihnen befestigt sind, aus ihren Heizgefäßen und bringe sie in die Wassergläschen, welche bisher Zimmertemperatur hatten. Die Thermometer beginnen zu steigen, und wenn sie nach einiger Zeit zur Ruhe kommen, ist bei dem Kupferzylinder die Temperatur um dreimal so viel Grade gestiegen wie bei dem Bleizylinder. Soll der Vorgang in allen Teilen unseres Hörsaals sichtbar sein, so kann man statt der Quecksilberthermometer eine Vorrichtung

(Abb. 10) benutzen, die etwa dem Luftthermometer gleicht. Dabei ist jedes der beiden Wassergläschen von einem größeren, daran geschmolzenen Glasgefäß *a* umschlossen, welches Luft enthält und in einen Rohrstutzen endet. Von diesem führt ein Schlauch *d* zu einem Glasrohr *e* mit aufwärts gebogenen Enden, welches eine farbige Flüssigkeit enthält und mittels der Projektionslampe auf der Wand vergrößert abgebildet werden kann. Jede Temperaturänderung des Wassergläschens teilt sich dann der umgebenden Luftmasse mit und wirkt durch diese auf die Stellung der Flüssigkeit im Rohr, sobald die Hähne *c* geschlossen sind. Der Verlauf unseres Versuchs lehrt nun, daß gleiche Gewichtsmengen von Kupfer und Blei beim Abkühlen zwischen der gleichen Anfangs- und Endtemperatur verschiedene Wärmemengen

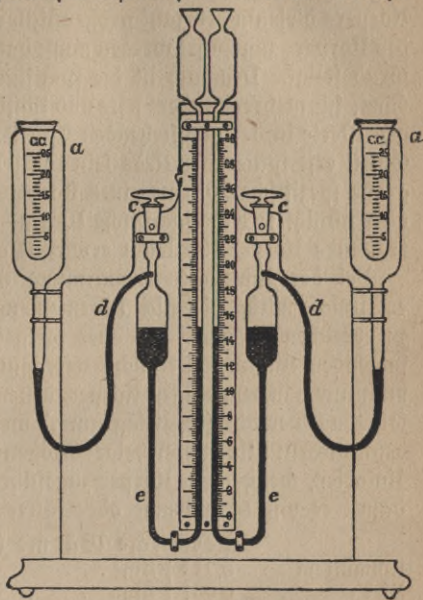


Abb. 10. ThermoSTOP.

hergeben, das Kupfer etwa dreimal so viel als das Blei. Oder: um gleiche Abkühlung zu erzielen, muß man einem Gramm Kupfer dreimal so viel Wärme entziehen, als einem Gramm Blei; oder umgekehrt: um gleiche Erwärmung zu erzielen, muß man einem Gramm Kupfer dreimal so viel Wärme zuführen als einem Gramm Blei.

Solche Vergleichen, wie hier zwischen Kupfer und Blei, hat man auch zwischen vielen anderen Körpern ausgeführt; um die Ergebnisse zahlenmäßig auszudrücken, bedurfte man einer Maßeinheit und legte dabei das Verhalten des Wassers zugrunde. Diejenige Wärmemenge, welche einem Kilogramm Wasser zugeführt werden muß, damit seine Temperatur um einen Celsiusgrad steigt, heißt eine Kalorie, und zwar große oder Kilogramm-Kalorie, während man als kleine oder Gramm-Kalorie die entsprechende Wärmemenge bezeichnet, durch welche

ein Gramm Wasser um einen Grad erwärmt wird. In dieser Einheit drücken wir aus, wie leicht oder schwer ein Körper erwärmt und abgekühlt werden kann, und bezeichnen als spezifische Wärme eines Körpers diejenige Anzahl großer Kalorien, welche einem Kilogramm des Körpers zugeführt werden muß, damit seine Temperatur um einen Grad steigt. Demnach ist die spezifische Wärme des Wassers gleich Eins; für mehrere andere feste und flüssige Körper sind die entsprechenden Werte in der nachstehenden Tabelle enthalten, während von den Gasen erst später die Rede sein soll. Wie leicht ersichtlich, bedeutet große spezifische Wärme eines Körpers, daß er sich schwer erwärmt oder abkühlt; kleine spezifische Wärme bedeutet dagegen, daß der betreffende Körper sich leicht erwärmt oder abkühlt.

Bei der künstlichen Erwärmung und Abkühlung von Massen ist es oftmals nötig, diejenige Wärmemenge zu berechnen, welche für den zu erreichenden Zweck zu- oder fortgeführt werden muß. Nach den folgenden Angaben ist solche Berechnung leicht durchführbar, sofern man nur von demjenigen Körper, dessen Temperatur geändert werden soll, das Gewicht (in Kilogramm) und die spezifische Wärme kennt; denn durch Multiplizieren beider Größen erhält man die Zahl der (großen) Kalorien, welche dem Körper zugeführt oder entzogen werden müssen, damit er um 1° wärmer oder kälter wird.

Spezifische Wärme bei etwa 18° C.

Aluminium . . .	0,214	Zinn	0,092	Glas	0,12 bis 0,22
Blei	0,031	Zinn	0,052	Thermometerglas	0,19
Eisen	0,105	Messing	0,093		
Gold	0,031	Neusilber	0,095	Wasser	1,00
Kupfer	0,091			Alkohol	0,58
Nickel	0,106	Marmor	0,20	Äther	0,56
Platin	0,032	Basalt	0,20	Anilin	0,50
Quecksilber . . .	0,033	Granit	0,19	Petroleum	0,51
Silber	0,055	Gneis	0,19	Benzol	0,41
Wismut	0,029	Quarz	0,18	Glycerin	0,58

Die gleiche Überlegung läßt erkennen, wie eine Wärmemessung, d. h. die Messung einer Wärmemenge geschehen kann. Wird die Temperatur eines Körpers um eine gewisse Zahl von Graden geändert, so hat man diese Zahl mit dem soeben erwähnten Produkt von Gewicht und spezifischer Wärme zu multiplizieren, um die Wärmemenge zu erhalten, welche dem betrachteten Körper zugeführt oder entzogen wurde. Eine Vorrichtung zur Messung einer Wärmemenge heißt Kalorimeter.

Auch in der Natur können wir leicht die Bedeutung der spezifischen Wärme erkennen. Unsere vorstehende Tabelle zeigt den größten aller angeführten Zahlenwerte beim Wasser. Sämtliche dort mitgetheilten Zahlen sind kleiner, insbesondere zeigen die Bodenbestandteile (Quarz, Granit usw.) nur etwa ein Fünftel derjenigen spezifischen Wärme, welche das Wasser hat. Der trockene Boden muß sich demnach merklich leichter erwärmen und abkühlen als die Gewässer, und in der That tritt dieser Unterschied ganz deutlich hervor, wenn man einen Vergleich zwischen Binnen- und Seeklima anstellt. Haben zwei Orte gleiche geographische Breite und gleiche Lage (Höhe, Neigung), so darf man annehmen, daß ihnen die gleiche Sonnenwärme zugestrahlt wird. Die Wirkung dieser übereinstimmenden Wärmezuführung ist aber ganz verschieden, falls einer der Orte inmitten trockenen Binnenlandes liegt, der andere an der Küste oder auf einer Insel; denn wo das Wasser seinen Einfluß übt, bewirkt es Verminderung der Temperaturschwankungen. Im trockenen Lande ist der Temperaturunterschied zwischen Tag und Nacht, sowie besonders derjenige zwischen Sommer und Winter merklich größer als an der See. Daß unsere Küsten und Inseln von Sonnenhitze viel weniger zu leiden haben als das Binnenland, ist ja bekannt; entsprechend ist auch die Winterkälte am Meere geringer als im Innern der Erdteile; und wenn auch ein Teil dieser Verschiedenheit auf Strahlungsvorgängen sowie auf Änderungen des Aggregatzustandes beruht, so ist doch von wesentlichem Einfluß dabei die hohe spezifische Wärme der Wassers. Und diese Verhältnisse kann man über die ganze Erdoberfläche verfolgen. Auf der nördlichen Erdhälfte ist demnach im Januar das Land kalt und die See wärmer, im Juli das Land heiß und die See kühler. Auf der südlichen Erdhälfte findet das Umgekehrte statt, denn dort sind bekanntlich die Jahreszeiten entgegengesetzt den unsrigen.

Aus den vorstehenden Darlegungen dürfte zu entnehmen sein, daß wir die vor unseren Augen stattfindenden Wärmeporgänge nur verstehen können, wenn wir außer den Änderungen der Temperatur auch zugleich die Größe der bewegten Wärmemengen beachten. Haben wir bisher die Wirkungen solcher Wärmebewegung kennen gelernt, so soll nun auch auf ihre Herkunft und Erzeugung, die Quellen der Wärme und der Kälte, eingegangen werden. Unsere mächtigste Wärmequelle ist die Sonne; sie strahlt der Erde so viel Wärme zu, daß eine an der Außenseite unserer Atmosphäre befindliche Fläche, welche von

den Sonnenstrahlen senkrecht getroffen wird, auf jedem Quadratmeter in der Minute etwa zwei Grammkalorien empfängt (Solar-konstante). Beim Durchlaufen der Luft wird allerdings ein erheblicher Teil dieser Strahlung zurückgehalten, so daß in mittleren Breiten und bei ganz heiterem Himmel nur etwa die Hälfte der in die Atmosphäre eintretenden Sonnenstrahlung bis zum Boden gelangt; aber dieser Betrag ist immerhin noch so groß, daß die während eines Jahres der Erdoberfläche zugeführte Wärmemenge ausreichen würde, um eine Eisschicht von etwa 50 m Mächtigkeit zu schmelzen. Unter welchen besonderen Erscheinungen diese Strahlung geschieht, und wie die gleiche Wärmemenge durch Ausstrahlung in den Weltraum von der Erde wieder hergegeben wird, lehrt die Betrachtung der Witterungsercheinungen.

Nun wenden wir uns zu der wichtigsten Quelle künstlicher Erwärmung, der Verbrennung. Den Wert eines Brennmaterials bemißt man im wesentlichen nach seiner Heizkraft, d. h. nach derjenigen Wärmemenge, welche durch Verbrennen eines Kilogramms des Materials erlangt werden kann. Einige solche Zahlen sind im folgenden zusammengestellt.

Verbrennungswärme

in großen Kalorien für je 1 kg verbrennender Substanz, beim Leuchtgas für 1 cbm. Bei den Hölzern ist ein Wassergehalt von 12 bis 14 Prozent anzunehmen.

Graphit	7800 Kal.	Esche	4155 Kal.
Anthrazit	8400 "	Buche, 130jährig . . .	4168 "
Sinterkohle, gasarm . .	8200 "	" 60 "	4101 "
" gasreich	6000 "	Birke	4207 "
Gasretortenkohle	8050 "	Fichte	4485 "
Holzkohle	7000 bis 8000 "	Alkohol	7070 "
Koks	6900 "	Benzin	10360 "
Braunkohle	4000 bis 7000 "	Petroleum	10300 "
Torf	etwa 7200 "	Rüböl	9470 "
Eichenholz	3990 "	Leuchtgas (1 cbm) . . .	5700 "

Der Verbrennungsvorgang, welcher diese Wärmemengen frei werden läßt, ist eine chemische Umsetzung, nämlich eine Vereinigung der verbrennenden Substanz mit dem Sauerstoff der Luft. Daß zum Stattfinden einer Verbrennung Sauerstoff nötig ist, lehren uns mancherlei bekannte Vorgänge. Eine Ofenfeuerung kann nicht brennen ohne den nötigen „Zug“, d. h. ohne Luftzufuhr, und wir können nach Belieben eine Flamme stark oder schwach brennen lassen oder auch zum Ver-

löschen bringen, indem wir den Luftzutritt vermehren oder teilweise oder ganz absperren. Daß aber von den Bestandteilen der Luft nur der Sauerstoff wesentlich für die Verbrennung ist, lehrt die Untersuchung der Verbrennungsprodukte.

Hier stülpe ich über eine brennende Kerze eine Glasglocke, so daß die Flamme von der äußeren Luft völlig abgesperrt ist. Nach kurzer Zeit sehen wir die Kerze immer matter brennen und bald verlöschen. Untersuchen wir die in der Glocke verbliebene Luft, so findet sich von dem ursprünglich vorhandenen Sauerstoff und Stickstoff nur der letztere unverändert vor, und als Ergebnis der Verbrennung Verbindungen des Sauerstoffs mit den Bestandteilen der Kerze.

Ferner habe ich hier einen sogenannten Bunsenbrenner, wie er in Laboratorien ganz allgemein verwendet wird. An seinem Fuß befindet sich eine Vorrichtung, durch welche man nach Belieben dem Leuchtgas Luft beimengen kann. Sperre ich die Luft ab und entzünde das dem Brennerrohr entströmende Gas, so brennt es mit leuchtender Flamme; halte ich in diese Flamme einen kalten Gegenstand, z. B. eine weiße Porzellanschale, so zeigt deren Oberfläche alsbald einen schwarzen Belag von Ruß. Es sind demnach in der Flamme unverbrannte Kohleteilchen vorhanden, die sich auf der weißen Fläche ansammeln. Wenn ich nun Luft in den Apparat eintreten lasse und dem Gas vor der Verbrennung beimische, so gewinnt die Flamme sofort ein anderes Aussehen, sie wird fast farblos, leuchtet gar nicht mehr, ist erheblich heißer als vorher und gibt an die kalte Porzellansfläche keinen Ruß ab. Zum Verständnis dieser Vorgänge erinnern wir uns nochmals, daß die Verbrennung eine Verbindung mit Sauerstoff ist. Zu den wesentlichen Bestandteilen des Leuchtgases gehören Kohlenwasserstoffe, d. h. Verbindungen aus Kohlenstoff und Wasserstoff. Durch die Hitze der Flamme wird ihre Zerlegung eingeleitet, und es verbrennt der Kohlenstoff zu Kohlensäure und der Wasserstoff zu Wasserdampf, sofern nämlich die hierfür erforderliche Sauerstoffmenge vorhanden ist. Denn um in Kohlensäure überzugehen, muß der Kohlenstoff sich mit $\frac{8}{3}$ seines Gewichts an Sauerstoff verbinden, und um in Wasserdampf überzugehen, muß der Wasserstoff das Achtfache seines Gewichtes an Sauerstoff zur Verfügung haben. Fehlt es an dem zur völligen Verbrennung nötigen Sauerstoff, so bleibt ein Teil der brennbaren Gasbestandteile unverbrannt, und namentlich enthält dann die Flamme viele feine Kohleteilchen in weißglühendem Zustande, welche

das Leuchten bewirken. Bringt man in solche leuchtende Flamme einen kalten Körper, so bedeckt er sich alsbald mit einer Schicht dieser Kohleteilchen, wie wir es vorher an der Porzellanfläche sahen. Wird dagegen durch Luftzutritt die nötige Sauerstoffmenge der Flamme zugeführt, so tritt vollständige Verbrennung ein, die Flamme enthält keinerlei unverbrannte Bestandteile, sondern nur die gasförmigen Verbrennungsprodukte, sie leuchtet also nicht, und ist, weil nun eine größere Substanzmenge verbrennt, heißer, als sie es vorher ohne Luftzuführung war.

Wir haben also gesehen, daß Kohle, Holz, Leuchtgas u. dgl. sich beim Verbrennen mit Sauerstoff verbinden, und daß dabei eine der Menge entsprechende und von der Art des Brennmaterials abhängige Wärmemenge frei wird. Ähnliches geschieht allgemein bei chemischen Umsetzungen, und wenn auch die Verbrennungen für unser tägliches Leben von besonders hoher Bedeutung sind, bilden sie doch nur einen besonderen Fall der allgemeinen Regel, daß die Entstehung ebenso wie der Zerfall chemischer Verbindungen stets von Wärmebewegungen begleitet ist. Entweder wird dabei Wärme frei (wie bei der Verbrennung von Kohle), oder es wird Wärme verbraucht (wie wir es bei den Kältemischungen sogleich sehen werden), und man bezeichnet diese beiden Fälle als positive und negative Wärmetönung. Einige Beispiele mögen zur Erläuterung dienen.

Betrachten wir zunächst nochmals den Kohlenstoff; im reinen Zustande kommt er bekanntlich als Graphit vor. Wenn wir nun 1 kg Graphit (C) haben und wollen es mit Sauerstoff (O) verbinden, so können wir entweder die erforderliche Menge von $\frac{8}{3}$ kg Sauerstoff sogleich verwenden und den Graphit zu Kohlenäure (CO_2) verbrennen, wobei eine Wärmemenge von 7800 großen Kalorien frei wird. Oder wir können zunächst nur die halbe Sauerstoffmenge von $\frac{4}{3}$ kg bei der Verbrennung anwenden, wobei unter Freiwerden von 2100 Kalorien Kohlenoxyd (CO) entsteht; und dieses erste Verbrennungsprodukt können wir durch nochmalige Verbindung mit neuen $\frac{4}{3}$ kg Sauerstoff zu Kohlenäure (CO_2) werden lassen, wobei jetzt 5700 Kalorien frei werden. Die gesamte Wärmewirkung bei der Übersführung eines Kilogramm Graphit in Kohlenäure ist beidemal gleich.

Anders verläuft die Sache, wenn wir Stickstoff (N) mit Sauerstoff (O) verbinden. Auch hier können wir 1 kg Stickstoff zuerst gleich mit $\frac{16}{7}$ kg Sauerstoff zu Stickstoffperoxyd (NO_2) vereinigen; dabei tritt aber nicht

Wärme auf, sondern Kälte, es werden 143 große Kalorien verbraucht (der Umgebung entzogen). Wollen wir nicht auf einmal die ganze Umsetzung stattfinden lassen, so können wir zuerst nur $\frac{4}{7}$ kg Sauerstoff mit dem 1 kg Stickstoff verbinden, und beide werden dann zu Stickstoffoxydul (N_2O) unter Verbrauch von 654 Kalorien; dann fügen wir nochmals $\frac{4}{7}$ kg Sauerstoff hinzu, wobei sich Stickstoffoxyd (NO) unter Verbrauch von weiteren 887 Kalorien bildet; endlich verbinden wir dies mit noch $\frac{8}{7}$ kg Sauerstoff, und es entsteht Stickstoffperoxyd (NO_2), wobei aber jetzt Wärme im Betrage von 1398 Kalorien frei wird. Ausgehend von 1 kg Stickstoff sahen wir also in drei Stufen entstehen:

Stickstoffoxydul (N_2O)	mit einer Wärmetönung von	- 654 Kal.
Stickstoffoxyd (NO)	" " " "	- 887 "
	zusammen	- 1541 Kal.
Stickstoffperoxyd (NO_2)	mit einer Wärmetönung von	+ 1398 "
	insgesamt	- 143 Kal.

d. h. ebensoviel wie bei der sofortigen Bildung des Stickstoffperoxyds (NO_2).

Nicht minder interessant ist die Entstehung gasförmiger Kohlenwasserstoffe aus der Verbindung festen Kohlenstoffs (C) mit gasförmigem Wasserstoff (H). Es verbindet sich 1 kg Kohlenstoff

mit $\frac{1}{12}$ kg	Wasserstoff zu	Acetylen (C_2H_2)	unter Wärmetönung	- 2008 Kal.
" $\frac{1}{6}$ "	" "	" Äthylen (C_2H_4)	" "	- 112 "
" $\frac{1}{4}$ "	" "	" Äthan (C_2H_6)	" "	+ 1192 "
" $\frac{1}{3}$ "	" "	" Methan (CH_4)	" "	+ 1812 "

Einige weitere Beispiele solcher Wärmetönung sind folgende:

1 kg Wasserstoff (H) verbindet sich mit 8 kg Sauerstoff (O) zu Wasser (H_2O), und zwar entsteht

entweder Wasserdampf	unter Wärmetönung	+ 29 050 Kal.
oder flüssiges Wasser	" "	+ 34 500 "
oder Eis	" "	+ 35 200 "

1 kg Wasserstoff (H) verbindet sich mit 35,5 kg Chlor (Cl) zu gasförmigem Chlorwasserstoff (HCl) unter Wärmetönung + 22 000 Kalorien.

1 kg Chlor (Cl) verbindet sich mit 0,225 kg Sauerstoff (O) zu Chlormonoxyd (Cl_2O) unter Wärmetönung - 252,2 Kal.

Neben der Wärmetönung dieser in festen Mengenverhältnissen geschehenden Verbindungen ist ferner die Verdünnungs- und Lösungs-

wärme zu nennen. Dahin gehört z. B. die Erhitzung der Schwefelsäure beim Hinzufügen von Wasser. Wird 1 kg Schwefelsäure (H_2SO_4) mit Wasser (H_2O) verdünnt, so beträgt die Wärmetönung

bei Hinzufügung von 0,18 kg Wasser	+	65 Kal.
" " " 0,55 " "	+	114 "
" " " 3,5 " "	+	166 "
" " " 18,2 " "	+	172,5 "

Wird 1 kg Kochsalz ($NaCl$) in 30,8 kg Wasser (H_2O) gelöst, so tritt unter entsprechendem Sinken der Temperatur eine Wärmetönung von $-20,5$ Kal. auf.

Solche Zusammenstellungen von Substanzen, bei deren Verbindung ein erheblicher Wärmeverbrauch stattfindet, bezeichnet man als Kältemischungen und bedient sich ihrer vielfach zum Erzielen niedriger Temperaturen. Denn indem der Lösungsvorgang Wärme verbraucht, wird aus der Umgebung die erforderliche Wärme herangezogen, solange die Gegenstände der Umgebung noch wärmer sind als die Kältemischung selbst. Bei der praktischen Anwendung hat man zu unterscheiden, ob der Zweck des Verfahrens in der Erreichung möglichst tiefer Temperaturen besteht oder in der Abkühlung großer Massen um wenige Grade, und je nachdem die eine oder andere dieser Aufgaben vorliegt, wird man die Kältemischung verschieden wählen. Wird beispielsweise Kälte durch Lösen von Ammoniumnitrat in Wasser von 15° erzeugt, so würde man, um eine recht tiefe Temperatur hervorzubringen, 1 kg des Nitrats mit 1,31 kg Wasser mischen; dann sinkt während des Lösen die Temperatur bis $-17,5$, es werden aber nur 2,3 Kal. verbraucht und der Umgebung entzogen. Wenn dagegen die Abkühlung großer Massen bezweckt wird, nimmt man 0,85 kg Wasser, sieht die Temperatur nur bis 0° sinken, aber unter Verbrauch von 32,9 Kal.; und mit 0,75 kg Wasser sinkt die Temperatur sogar nur bis 5° unter Verbrauch von 38 Kal. Stärker wird der Wärmeverbrauch, wenn man statt des Wassers zerkleinertes Eis oder Schnee verwendet, weil dann auch noch der zum Schmelzen gehörende Wärmebetrag verbraucht wird. Würden statt der eben genannten Wassermengen die gleichen Gewichtsbeträge von Schnee verwendet, so wären die erreichten niederen Temperaturen die gleichen, aber der Wärmeverbrauch größer. Dieser beträgt beim Zusammenbringen eines Kilogramm Ammoniumnitrat

mit 0,85 kg Schnee	119,2 Kal.
" 1,31 " "	131,9 "
" 7,28 " "	675 "

Im letzteren Falle würde die Temperatur nur bis -4° sinken.

Ähnliche Betrachtungen kann man an die Kältemischung Schwefelsäure-Schnee knüpfen. Mit Wasser gibt die Schwefelsäure, wie eben erwähnt, eine positive Wärmetönung; mischt man sie mit Schnee, so tritt Abkühlung und Wärmeverbrauch ein, und zwar wird mit wachsender Schneemenge die Abkühlung geringer und der Wärmeverbrauch größer. Mischt man 1 kg 66,2prozentiger Schwefelsäure ($H_2SO_4 + 2,87 H_2O$) mit 1,1 kg Schnee, so sinkt die Temperatur des Gemisches bis -37° ; inzwischen ist aller Schnee geschmolzen und Wärme weder entstanden noch verbraucht. Nimmt man 3,5 kg Schnee, so sinkt die Temperatur bis -27° , steigt dann, bis aller Schnee geschmolzen, auf $-8,6^{\circ}$, und dabei werden 213 Kalorien verbraucht. Bei 13,1 kg Schnee sinkt die Temperatur nur bis -16° und steigt bis zum Schmelzen des Schnees auf $-2,1^{\circ}$ unter Verbrauch von 967 Kal.

Einige andere Beispiele von Kältemischungen samt den mit ihnen erreichbaren Temperaturen sind:

Kochsalz mit dem dreifachen Gewicht Schnee:	-21° ,
Alkohol mit etwa dem gleichen Gewicht Schnee:	-30° ,
Feste Kohlensäure mit Äther:	-77° ,
" " " schwefliger Säure:	-82° .

Von diesen auf chemischen Vorgängen beruhenden Quellen der Wärme und Kälte wenden wir uns nunmehr zu den Beziehungen, welche zwischen Wärme und mechanischer Arbeit bestehen, und betrachten zunächst die vorher ausgelassene spezifische Wärme der Gase. Um diese Größe für Luft zu bestimmen, können wir auf zweierlei Arten verfahren. Entweder wir bringen in ein mit Wasser gefülltes Gefäß ein dünnwandiges und in vielen Windungen schlangenförmig gebogenes Metallrohr, erhitzen in einem anderen abgeschlossenen Gefäß die zu untersuchende Luft auf eine gemessene hohe Temperatur und treiben sie dann durch das Schlangenrohr so langsam hindurch, daß sie beim Austritt die gleiche Temperatur hat wie das umgebende Wasser. Wenn wir Menge, Anfangs- und Endtemperatur des Wassers kennen, ist es nicht schwer, zu berechnen, wie viele Kalorien das Wasser aufgenommen hat. Ebensoviele hat natürlich die hindurchgetriebene Luft abgegeben, und wenn wir auch deren Menge, Anfangs- und Endtemperatur kennen, so ergibt sich leicht ihre spezifische Wärme, d. h. diejenige Wärmemenge, die einem Kilogramm Luft zugeführt oder entzogen werden muß, damit seine Temperatur um 1° steigt oder sinkt.

Zweitens können wir die gleiche Größe auch noch auf folgende Weise bestimmen. Wir füllen mit der zu untersuchenden Luft ein von starren Wänden begrenztes und dicht verschlossenes Gefäß, erhitzen es samt Luftpinhalt und werfen es dann in kühleres Wasser, dessen Menge, Anfangs- und Endtemperatur uns auch diesmal angeben, wie viel Wärme das Luftgefäß mit Inhalt bei seiner Abkühlung hergab. Die gleiche Bestimmung wiederholen wir dann mit dem jetzt völlig entleerten Luftgefäß in der Weise, daß nur das erhitzte Gefäß allein und keine Luft in das kühlere Wasser gebracht wird. Durch Vergleichen beider Messungen berechnen wir als Differenz die Wärmemenge, welche die eingeschlossene Luft allein beim Abkühlen hergab, und entnehmen aus ihrer Menge, Anfangs- und Endtemperatur wiederum einen Wert für die spezifische Wärme der Luft.

Die letztere Bestimmung ist zwar mit den üblichen Apparaten nicht sehr genau durchzuführen. Wenn wir aber auch die denkbar größte Genauigkeit annehmen, so fallen die beiden Messungen doch ganz verschieden aus; die erste Bestimmung liefert uns im Vergleich zur zweiten ein fast um die Hälfte größeres Ergebnis. Der Grund zu dieser auffälligen Abweichung kann nur in der Verschiedenheit des Verfahrens gesucht werden und ist in der That leicht anzugeben. Bei der ersten Messung befand sich die untersuchte Luft stets unter Atmosphärendruck, konnte sich beliebig ausdehnen oder zusammenziehen und in jedem Augenblick denjenigen Raum ausfüllen, welcher ihrer jeweiligen Temperatur entsprach. Bei der zweiten Messung dagegen war die untersuchte Luftmenge in ein starres Gefäß eingeschlossen und an dessen Rauminhalt gebunden, ohne sich auszudehnen oder zusammenzuziehen. Die Ergebnisse der beiden Messungen haben demnach verschiedene Bedeutung und werden bezeichnet als spezifische Wärme bei konstantem Druck oder bei konstantem Volumen; man kann auch dafür sagen: mit Ausdehnung oder ohne Ausdehnung. Nun ist der erstere dieser Werte, nämlich die spezifische Wärme der Luft bei konstantem Druck und mit Ausdehnung, größer als der andere. Zur bloßen Temperaturerhöhung einer Luftmasse ohne Ausdehnung gehört eine gewisse Wärmemenge; wenn die Luft sich außerdem auch noch ausdehnt, gehört dazu noch eine weitere Wärmemenge, welche etwa $\frac{4}{10}$ der vorigen ausmacht. Einige Zahlen für verschiedene Gase seien hier zunächst angeführt.

Spezifische Wärme bei konstantem Druck (mit Ausdehnung)
bei etwa 18°.

Luft	0,24	Wasserstoff . . .	3,40	Kohlenoxyd . . .	0,25
Sauerstoff	0,22	Stickstoff	0,25	Kohlensäure . . .	0,20

Das Verhältnis dieser Zahl zur spezifischen Wärme bei konstantem Volumen (ohne Ausdehnung) beträgt bei den 5 ersten der genannten Gase 1,4, bei Kohlensäure 1,3. Die auf S. 22 angegebenen Werte der spezifischen Wärme fester und flüssiger Körper sind mit den vorstehenden Zahlen insofern vergleichbar, als sie ebenfalls mit Ausdehnung gemessen wurden.

Wenn nun also das Zustandekommen der Ausdehnung einen gewissen Wärmeverbrauch bedingt, so liegt es nahe, auch hier zahlenmäßige Beziehungen aufzusuchen. Den Wärmeverbrauch durch die Zahl der nötigen Kalorien auszudrücken, ist nach dem Vorausgegangen leicht; die Ausdehnung werden wir als Arbeitsleistung ebenfalls messen und den entsprechenden Betrag genau angeben können. Um dies auszuführen, betrachten wir das Verhalten eines Kubikmeters Luft, welcher in einem würfelförmigen Kasten von 1 m Seitenlänge eingeschlossen ist. Die sechs Flächen dieses Kastens sind Quadrate von je 1 qm Größe; drei von ihnen, nämlich die obere, vordere und rechte, seien senkrecht zur eigenen Ebene verschiebbar, so daß, wenn die innen befindliche Luft sich ausdehnt, diese drei Seitenflächen nach außen hin nachgeben können. Dabei müßten sie aber den Luftdruck überwinden, welcher auf ihrer Außenseite lastet und auf jeder dieser Flächen eine Kraft von 10 332,5 kg betätigt.

Wird die eingeschlossene Luft um 1° erwärmt, so dehnt sie sich nach S. 11 um 0,003670 ihres Rauminhalts und demnach in jeder der drei Kantenrichtungen um ein Drittel dieses Betrages aus; dann werden also die drei beweglichen Flächen jede um 0,001 223 m nach außen verschoben, und zwar unter Überwindung des eben angegebenen äußeren Drucks. Die hierbei geleistete Arbeit wird gemessen durch das Produkt aus der wirksamen Kraft (gleich dem zu überwindenden Druck) und dem zurückgelegten Weg, und demnach in Kilogramm Metern ausgedrückt, d. h. in derjenigen Arbeitsmenge, welche erforderlich ist, um 1 kg auf die Höhe eines Meters zu heben. Für jede der drei Würfel Flächen beträgt diese Arbeit $10\,332,5 \times 0,001\,223$, insgesamt also 37,92 kgm.

Dieser Arbeit entspricht die bei der Ausdehnung verbrauchte Wärme-

menge. Aus den auf voriger Seite mitgetheilten Zahlen geht hervor, daß einem Kilogramm Luft, welches sich mit Ausdehnung um 1° erwärmen soll, 0,24 Kal. zugeführt werden müssen. Geschieht die Erwärmung ohne Ausdehnung, so sind nur $0,24/1,4 = 0,171$ Kal. erforderlich. Für die bloße Ausdehnung eines Kilogramms Luft beim Erwärmen um 1° wird also die Wärmemenge 0,069 Kal. verbraucht. Da 1 cbm Luft unter gewöhnlichen Verhältnissen (mittlerer Barometerstand und 0°) 1,293 kg wiegt, so beträgt diejenige Wärmemenge, welche unser Luftwürfel zur Ausdehnung verbraucht,

$$1,293 \times 0,069 = 0,089 \text{ Kal.}$$

Diese Wärmemenge ist gleichwertig mit der oben berechneten Arbeitsmenge von 37,92 kgm, und demnach ist eine große Kalorie gleichwertig mit 426 Kilogramm Metern. Genauer durchgeführte Messung und Berechnung ergibt den Wert 427. Man pflegt diesen Betrag als mechanisches Äquivalent der Wärme zu bezeichnen.

Die vorstehenden Überlegungen haben uns zu der sehr wichtigen Erkenntnis geführt, daß zwei scheinbar so verschiedene Dinge wie Wärme und mechanische Arbeit miteinander vergleichbar sind und in einem festen, zahlenmäßig ausdrückbaren Wertverhältnis stehen. Ähnlich besteht zwischen Markstücken und Kronen ein bestimmtes Wertverhältnis, und wie jede der beiden Münzsorten dazu dienen kann, um eine beliebige Geldsumme auszudrücken, so können Kilogramm Meter und Kalorien zum Ausdruck jeder beliebigen Energiemenge benutzt werden. Dabei fassen wir unter dem Begriff Energie alle die verschiedenen Formen zusammen, in welchen die Fähigkeit, Arbeit zu leisten, uns entgegentritt, und deren zwei als Wärme und mechanische Arbeit uns soeben beschäftigen. Markstücke und Kronen aber können gemäß dem Zahlenverhältnis ihres Wertes ineinander umgewechselt werden; daß auch Kilogramm Meter und Kalorien ineinander umgewechselt, Wärme in mechanische Arbeit und umgekehrt verwandelt werden kann, darf bereits aus unserer Betrachtung des sich ausdehnenden Luftwürfels gefolgert werden. Denn indem die Luft sich beim Erwärmen ausdehnt und hierfür Wärme verbraucht, wird diese Wärmemenge in die Ausdehnungsarbeit umgesetzt. Und indem umgekehrt die Luft sich beim Abkühlen zusammenzieht, muß ihr eine entsprechende Wärmemenge entzogen werden, welche mit der beim Zusammenziehen gewonnenen Arbeitsfähigkeit gleichwertig und aus ihr entstanden ist.

Wenn nun aber von außen her einer Luftmasse weder Wärme zu-

geführt noch entzogen wird, so muß jede Änderung ihres Volumens mit einer entsprechenden Temperaturänderung verbunden sein. Um dies zu erkennen, denken wir uns einen festen Zylinder, an einem Ende geschlossen, und in ihm verschiebbar einen dicht anliegenden Kolben, der eine darin enthaltene Luftmasse abschließt. Heben wir den Kolben, so daß der Luft ein größerer Raum als bisher geboten wird, so füllt sie diesen alsbald aus, und weil zu solcher Ausdehnung Wärme verbraucht, aber nicht von außen her zugeführt wird, so verbraucht die Luft dazu einen Teil ihrer eigenen Wärme und wird um ebensoviel kälter, als wenn statt der Ausdehnung ihr die entsprechende Wärmemenge entzogen wäre. Wird umgekehrt der Kolben in den Zylinder hineingepreßt und die eingeschlossene Luft auf einen kleineren Raum als bisher gebracht, so müßte, um die Temperatur unverändert zu halten, der Luft eine gewisse Wärmemenge entzogen werden; da dies nicht geschieht, vermehrt die eingeschlossene Luft ihre eigene Wärme, und ihre Temperatur steigt um ebensoviel, als wenn statt der Zusammendrückung ihr die entsprechende Wärme zugeführt wäre. Diese beim Zusammendrücken und beim Ausdehnen von Gasen stattfindenden Temperaturänderungen nennt man dynamische Erwärmung und dynamische Abkühlung.

Einige Versuche werden uns die Erscheinung anschaulicher machen. Hier habe ich ein pneumatisches Feuerzeug (Abb. 11), nämlich einen starkwandigen, an einem Ende geschlossenen Glaszylinder, in wel-



Abb. 11. Pneumatisches Feuerzeug.

chen ein mit Lederscheiben gedichteter Kolben genau hineinpaßt. Ich befestige ein Stückchen Feuerschwamm an der Unterseite des Kolbens, bestreiche diesen mit Öl, damit er glatt und doch dicht im Glaszylinder verschiebbar ist, und bringe ihn in die Bohrung. Wenn ich jetzt rasch und kräftig den Kolben hineinstoße, so sehen wir es im Innern aufleuchten und bemerken beim Herausholen des Kolbens, daß der Schwamm glimmt. Das starke Zusammendrücken der eingeschlossenen Luft war von so großer dynamischer Erwärmung begleitet, daß die Entzündungstemperatur des Schwammes erreicht wurde. Zum sicheren Gelingen des Versuchs ist es zweckmäßig, Sauerstoff statt der Luft in das Rohr zu bringen. Es genügt indessen auch die Anwendung viel geringerer Druckänderungen, um deutliche dynamische Temperaturwirkungen zu



Abb. 12. Flasche zur dynamischen Erwärmung und Abkühlung.

erzielen. Dazu diene uns diese Flasche von etwa 1 Liter Inhalt (Abb. 12), durch deren Stopfen ein mit Glashahn verschließbares Rohr gesteckt ist. Durch Blasen mit dem Munde verdichte ich die innere Luft, schließe den Hahn und lasse nun zunächst die Temperatur zwischen innen und außen sich ausgleichen. Nachdem dies geschehen, öffne ich den Hahn, wir hören mit leisem Zischen die überschüssige Luft herausströmen und warten, bis im Innern der Atmosphärendruck sich hergestellt hat. Die in der Flasche verbliebene Luft erfüllte vorher nur einen Teil des Innenraumes, während sie jetzt die ganze Flasche füllt, sie hat sich also beim Öffnen des Hahnes ausgedehnt und dynamisch abgekühlt. Daß sie nun kälter als ihre Umgebung ist und von außen Wärme empfängt, sehen wir, sobald ich die Flasche gleich einem Luftthermometer wirken lasse und durch einen Schlauch mit dem einen Ende des gebogenen Rohres verbinde, das uns bei der Untersuchung der spezifischen Wärme bereits gedient hat (Abb. 10 S. 21). Die gefärbte Flüssigkeit in dieser Röhre setzt sich sogleich in Bewegung und zeigt uns, daß in der Flasche die Temperatur steigt. Mit einer zweiten Flasche gleicher Art stellen wir nun den umgekehrten Versuch an. Durch Saugen entferne ich einen Teil der Luft aus der Flasche, warte bei geschlossenem Hahn, bis die Temperatur zwischen innen und außen sicher ausgeglichen ist, und öffne dann den Hahn. Nachdem so viel Luft eingetreten ist, daß auch im Innern Atmosphärendruck herrscht, überzeugen wir uns leicht davon, daß die innere Luft in Folge der eben geschehenen Druckzunahme dynamisch erwärmt ist und nun an ihre kühlere Umgebung Wärme abgibt. Ich verbinde zu diesem Zweck die geöffnete Flasche durch einen Schlauch mit der zweiten gebogenen Röhre unseres Thermostops, und wir erkennen an der sofort beginnenden Bewegung der gefärbten Flüssigkeit, daß die in dieser Flasche befindliche Luft sich abzukühlen im Begriff ist.

Die gleichen Vorgänge finden überaus häufig in der Atmosphäre statt und sind von großer Bedeutung für die Witterungserscheinungen. Wird nämlich irgendein Stück des Erdbodens über die Temperatur der Umgebung erwärmt, so teilt sich auch der unmittelbar darüber liegenden Luft die Temperaturerhöhung mit, und weil nun hier die

Luft wärmer und also leichter ist als ringsum, so beginnt sie aufzusteigen. Dabei steht sie an jeder Stelle unter der Last derjenigen Luftsäule, welche über dieser Stelle sich befindet, und gelangt im Emporsteigen unter immer geringeren Druck. Hiermit ist eine beständige Ausdehnung und eine dynamische Abkühlung verbunden, welche auf je 100 m Höhenzunahme gerade 1° C beträgt, und aus welcher die Begrenzung der Steighöhe folgt. Denn es steigt natürlich die Luft nur so lange, als ihre Temperatur über derjenigen der jeweiligen Umgebung liegt, und das Steigen hört dort auf, wo die umgebende Luft gerade so warm ist wie die aufgestiegene. Welche Höhen auf solche Art erreicht werden, hängt sowohl von der Anfangstemperatur der aufsteigenden Luft ab, wie auch von der Temperaturverteilung in der ruhenden Umgebung. Abgesehen von gewissen Ausnahmeständen zeigt die Temperatur der ruhenden Luft nach oben hin regelmäßige Abnahme, welche z. B. für Berlin in den untersten 1000 m durchschnittlich 4° , auf je 100 m also $0,4^{\circ}$ beträgt. Demnach sinkt in der aufsteigenden Luft die Temperatur viel rascher als in ihrer Umgebung, und der aufsteigende Strom vermag nur begrenzte Höhen zu erreichen. Immerhin wird aber die in dynamischer Abkühlung begriffene Luft in bezug auf ihren Wasserdampfgehalt der Sättigung (von welcher später ausführlich die Rede sein soll) nähergeführt und kann bei entsprechend großem Feuchtigkeitsgehalt bis zur Kondensation gelangen, d. h. bis zur Bildung von Nebel und Wolken. So ist also der aufsteigende Luftstrom die weitaus häufigste Veranlassung zur Wolkenbildung und bei stärkerem Auftreten auch zur Entstehung von Regen und Schnee.

Die Umkehrung dieser Betrachtung führt uns zur örtlichen Abkühlung von Luftmassen, woraus dann absteigende Ströme mit dynamischer Erwärmung entstehen. Ihr Auftreten wirkt der Kondensation der Luftfeuchtigkeit entgegen und bringt etwa vorhandene Wolken zur Verdampfung, ist also von klarem Himmel begleitet.

Nicht immer haben Vorgänge dieser Art ihren Ursprung in örtlicher Erwärmung oder Abkühlung von Luftmassen. Wenn der Wind gegen ein Gebirge weht und die Luftmassen also auf einer Seite hinauf-, auf der anderen hinabsteigen, wird auch hierdurch dynamische Abkühlung und Wolkenbildung auf der Luvseite, dynamische Erwärmung und Verdampfen der Wolkentröpfchen auf der Leeseite hervorgerufen. So entsteht die bekannte Wolkenkappe zahlreicher Berge, welche stets dann auftritt, wenn die aufsteigende Luft Feuchtigkeit

genug enthält, um beim Aufsteigen bis zum Berggipfel die Sättigung zu erreichen.

Für die gegenseitige Umwandlungsfähigkeit von Wärme und mechanischer Arbeit bietet das tägliche Leben mancherlei Beispiele. So kann ein Schmied durch bloße Hammerschläge ein auf dem Amboss liegendes Stück Metall heiß machen. Die Bewegung des Hammers wird beim Auftreffen gehemmt; seine Wucht hört auf, Bewegungsenergie zu sein, und verwandelt sich in Wärme. Treffend schildert Wilhelm Busch diesen Vorgang bei der Ohrfeige:

„Die Kraft, in Folge der Erregung,
Verwandelt sich in Schwingbewegung,
Bewegung, die in schnellem Blitze
Zur Backe eilt, wird hier zur Hitze.“

Ähnliches geschieht in kleinem Maßstabe und an vielen Stellen bei der Reibung; denn diese besteht im Zusammenstoßen der kleinen Unebenheiten, welche sich auf den Oberflächen der aneinander bewegten Körper befinden. Bei allen diesen kleinen Stößen wird Bewegungsenergie verbraucht und in Wärme umgesetzt, und je nachdem die Reibung zwischen rauhen oder glatten Körpern stattfindet, ist die Zahl der Stöße groß oder gering, wird mehr oder weniger Arbeit durch sie in Anspruch genommen, mehr oder weniger Wärme erzeugt. Bekanntlich dient bei Naturvölkern die Reibung zweier Holzstücke zum Gewinnen von Feuer. Chamisso erzählt, daß er gelegentlich seiner Erdumsegelung ein solches Verfahren auf den Aleuten gefunden habe. Ein Tannenholzstab wird mit einem Ende gegen ein anderes Stück Tannenholz gedrückt und mittels einer Schnur in rasche Drehung versetzt; die entstehende Reibungswärme gibt in wenigen Sekunden Feuer.

Aus der Äquivalenz von Wärme und mechanischer Arbeit (erster Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie), aus der Verwandeltbarkeit beider Energiearten ineinander schließt man auf die Natur der Wärme und nimmt sie als eine Art Bewegung an; die Bewegung der kleinsten Teilchen der Körper (Moleküle und Atome) äußert sich als Wärme.

Der folgende Versuch soll uns nun die Wärmewirkung der Reibung zeigen. Am Ende einer Kurbel ist ein kurzer hohler Stahlstab so befestigt, daß ich den Stab zwischen entsprechend geschnittene Korkstücke klemmen und mittels der Kurbel herumdrehen kann. Vorher habe ich die Höhlung des Stabes mit Äther gefüllt und in die Öffnung einen

gut schließenden Stopfen gesteckt. Wenn ich nun den Stahlzylinder zwischen den zusammengedrückten Korkstücken drehe, so wird durch die Reibung Wärme erzeugt, und die Ätherfüllung erlangt nach einiger Zeit so hohe Temperatur, daß sie zu sieden beginnt und den Stopfen mit einem Knall fortschleudert. Um den Vorgang im ganzen Hörsaal sichtbar zu machen, habe ich vor den Stopfen ein kleines Gefäß mit brennendem Spiritus gestellt, dessen schwachbläuliche Flamme aus der Entfernung kaum sichtbar ist; sobald der Stopfen herausgetrieben wird, folgt ihm der Ätherdampf und entzündet sich mit weithin sichtbarer Flamme.

Wenn wir hierbei die aufgewendete Arbeit (in Kilogrammetern) und die erzeugte Wärme (in Kalorien) messen, so ergibt sich als Verhältnis beider wiederum ein Zahlenwert für das bereits oben (S. 32) berechnete Wärmeäquivalent. Die Ausführung geschieht aber zweckmäßiger mittels einer Vorrichtung, in welcher die Reibung zwischen festen und flüssigen Körpern stattfindet.

Ein solcher Apparat ist in Abb. 13 dargestellt; eine Achse ist bei *c* in einen Metallkasten eingeführt und trägt innen eine Anzahl Flügel *a*, während sich im Innern des Kastens feststehende Arme *b* befinden. Um einen auf der Achse sitzenden Zylinder *d* ist eine Schnur gewickelt; diese kann am freien Ende mit einem Gewicht belastet werden. Man füllt den Kasten mit Flüssigkeit und läßt durch das an der Schnur herabsinkende Gewicht die Achse drehen. Durch die im Innern des Kastens stattfindende Reibung wird Wärme erzeugt, deren Betrag aus der Temperaturerhöhung sowie aus Gewicht und spezifischer Wärme der Apparateile und der Füllung leicht zu berechnen ist; die aufgewendete mechanische Arbeit ergibt sich aus der Schwere des herabsinkenden Gewichts und dem Weg, um welchen es gesunken ist. Das Verhältnis beider Größen ist dann das mechanische Äquivalent der Wärme.

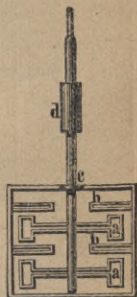
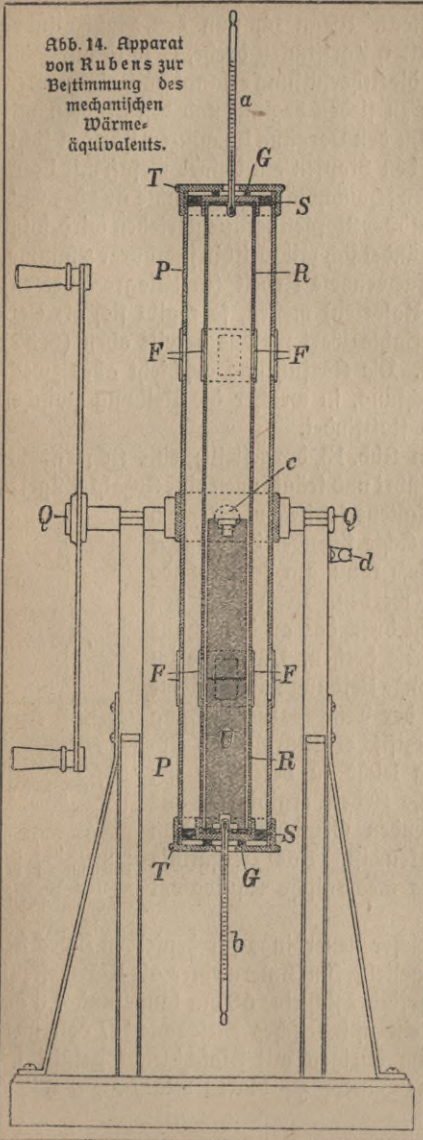


Abb. 13. Apparat von Joule zur Bestimmung des mechan. Wärmeäquivalents.

Ein anderer Apparat, welcher neuerdings für denselben Zweck benutzt wird, ist in Abb. 14 dargestellt. Im Innern einer als Wärmeschutz dienenden Metallhülle *PP* befindet sich eine 60 cm lange und 4,5 cm weite Messingröhre, welche ein zylindrisches Bleigewicht *U* von über 4 kg Schwere enthält und im übrigen mit Maschinenöl gefüllt ist. *FF* sind Fenster, die in das Innere zu blicken erlauben, *a* und *b*

Abb. 14. Apparat
von Rubens zur
Bestimmung des
mechanischen
Wärme-
äquivalents.



Thermometer. Das Ganze ist in einem geeigneten Gestell derart angebracht, daß der Apparat um die Achse *OO* mittels der Doppelpendel gedreht werden kann. Wenn im Anfang des Versuchs das Bleigewicht unten liegt und durch eine rasche Drehung nach oben gebracht wird, sinkt es langsam durch das Öl herab, während ein gleiches Volumen Öl um ebensoviel emporsteigt. Die Differenz der beiden Gewichte (Blei weniger Öl) multipliziert mit der Fallhöhe ergibt die mechanische Arbeit, mit welcher die gleichzeitig durch Reibung erzeugte Wärmemenge gleichwertig ist. Ist bei einmaliger Handhabung die Wirkung auch nur klein, so kann sie durch Wiederholen beliebig gesteigert werden und zur Auswertung der gesuchten Verhältniszahl von Wärme und mechanischer Arbeit führen.

Als Ergebnis solcher Messungen hat man gefunden, daß das mechanische Äquivalent für eine Kilogrammcalorie gleich 427 Kilogrammtern ist.

Drittes Kapitel. Schmelzen und Erstarren.

Wir wenden uns nunmehr zu einer besonderen Gruppe von Erscheinungen, die man als Änderungen des Aggregatzustandes zu bezeichnen pflegt. Als Einleitung soll uns ein einfacher Versuch dienen, dessen Verlauf uns allen wohl schon bekannt sein dürfte. In ein Gefäß bringe ich ein Gemisch von Wasser und Eis und bestimme die Temperatur, sobald das eingefetzte Thermometer einen festen Stand eingenommen hat. Wir finden 0° und sehen diese Temperatur so lange unverändert bleiben, als noch in dem Gefäß sowohl Eis als Wasser vorhanden ist. Führen wir so lange Wärme hinzu, bis das Thermometer zu steigen beginnt, so ist das Eis geschmolzen und nur noch Wasser da. Entziehen wir dagegen dem Gefäß so viel Wärme, daß das Thermometer unter 0° zu sinken beginnt, so ist inzwischen alles Wasser gefroren und nur noch Eis vorhanden. Daraus entnehmen wir die besondere Bedeutung der Nullgrad-Temperatur für das Wasser: nur bei dieser Temperatur kann es sowohl fest als flüssig bestehen, darunter ist es fest, darüber flüssig. Den gleichen Versuch können wir mit Paraffin oder mit Blei anstellen und würden dann bei 46° oder bei 327° C die Grenztemperatur finden, welche derjenigen von Wasser bei 0° entspricht. Ganz allgemein hat jeder Körper einen solchen Schmelz- oder Erstarrungspunkt, d. h. eine Temperatur, bei welcher allein es ihm möglich ist, sowohl fest als flüssig zu bestehen, und die für ihn so charakteristisch ist, daß man daran die verschiedenen Substanzen zu erkennen und zu unterscheiden vermag. Einige solche Zahlen sind in der folgenden Tabelle angegeben.

Schmelztemperaturen in Celsiusgraden.

Platin	1780 ^o	Schwefel, mono-		Gewichtsteile	
Eisen, rein	1600	klin	119 ^o	Zink (Messing)	970 ^o
Guß Eisen	1200	Schwefel, rhom-		32,7 Gewichtsteile	
Gußstahl	1375	bisch	113	Kupfer +	
Nickel	1484	Wachs	63	67,3 Gewichtsteile	
Kupfer	1065	Paraffin	46	Zink	
Silber	962	Phosphor	44	(Messing)	804
Aluminium	657	Cäsium	26	61,6 Gewichtsteile	
Zink	419	Eis	0	Kupfer +	
Blei	327	Quecksilber	— 39	38,4 Gewichtsteile	
Kadmium	322	Argon	— 188	Zinn	
Wismut	269	75 Gewichtsteile		(Bronze)	660
Zinn	232	Kupfer + 25			

Bemerkenswert sind einige aus verschiedenen Metallen zusammengesetzte Legierungen, deren Schmelzpunkte weit unter denjenigen aller Bestandteile liegen, nicht zwischen denselben, wie bei Messing und Bronze. Beispiele solcher leicht schmelzbaren Legierungen sind:

- 1 Teil Blei + 1 Teil Zinn (Weichlot); Schmelzpunkt 200°C .
 25 Teile Blei + 25 Teile Zinn + 50 Teile Wismut (Rosches Metall);
 Schmelzpunkt 95°C .
 2 Teile Blei + 1 Teil Zinn + 4 Teile Wismut + 1 Teil Kadmium (Wood'sches Metall); Schmelzpunkt 68°C .

Die beiden letzteren Legierungen schmelzen bereits beim Eintauchen in siedendes Wasser. Ich habe hier ein Stäbchen aus einer der genannten Legierungen, und sobald ich es in dieses Gefäß mit heißem Wasser eintauche, sehen wir das geschmolzene Metall heruntertropfen und auf dem Boden des Glases flüssig verweilen. Durch passende Menge und Wahl der Bestandteile kann man den Schmelzpunkt zwischen weiten Grenzen verändern und so Körper herstellen, die beim Erreichen einer bestimmten Temperatur schmelzen. So hat man z. B. mitunter Sicherheitsplatten an Dampfkesseln angebracht, nämlich Platten aus leicht schmelzbarem Material, deren Schmelzen dem eingeschlossenen Dampf einen Ausweg eröffnet, sobald Druck und Temperatur sich der für die Festigkeit der Kesselwand gefährlichen Grenze nähern.

Der Übergang des festen in den flüssigen Aggregatzustand wird indessen nicht bloß durch die Temperatur bedingt, sondern außerdem auch durch den Druck. Im ersten Kapitel wurde (S. 12 und 13) erwähnt, daß Wasser und Wismut sich beim Erstarren ausdehnen. Hiermit im Zusammenhang steht die Abhängigkeit des Schmelzpunktes vom Druck, welche namentlich beim Wasser von großer Bedeutung ist. Daß nämlich der Schmelzpunkt des Eises durch starken Druck herabgesetzt wird, zeigen uns die folgenden Versuche.

Dieser hölzerne Klotz hat eine Bohrung, welche durch einen Stahlzylinder ausgefüllt ist und einen zylindrischen Hohlraum von etwa 2 cm Durchmesser enthält. Dahinein fülle ich Schnee (klein geschlagenes Eis wäre ebenso brauchbar) und treibe dann einen Stahlstempel, der in die Höhlung paßt, durch Hammerschläge hinein. Der Schnee wird dadurch im untersten Teil der Höhlung zusammengedrückt, und beim Herausnehmen finden wir nicht mehr das Haufwerk einzelner Kristalle (oder Eisstückchen), welches hineingebracht wurde, sondern ein zusammenhängendes und ziemlich festes Eisstück von der Form der Höhlung, in die es gedrückt wurde. Diese Veränderung zu verstehen

ist nicht schwer, wenn wir annehmen, daß unter der Wucht der Hammerschläge jedesmal ein entsprechender Druck im Innern des Zylinders entstand, und daß hierdurch die Schmelztemperatur des Schnees herabgesetzt wurde. Da er sich bereits seit einiger Zeit hier im Zimmer befindet, ist seine Temperatur nur wenig unter 0° . Durch den Druck kann sein Schmelzpunkt unter 0° und somit auch tiefer sinken, als die augenblickliche Temperatur des Schnees beträgt. Wenn dies eintritt, d. h. wenn der Schnee wärmer ist, als sein jetziger Schmelzpunkt angibt, so schmilzt er, freilich nur für die Dauer der Druckwirkung. Während der einzelnen Hammerschläge bestand die im Hohlraum befindliche Masse jedesmal für eine ganz kurze Zeit aus Wasser, um beim Nachlassen des Druckes sogleich wieder zu gefrieren; denn jetzt lag ja der Schmelzpunkt wieder über der drinnen herrschenden Temperatur. Dies Wiedergefrieren führte aber nicht zur Bildung von Schnee oder von einzelnen Eisstücken, sondern ließ einen zusammenhängenden Eiskörper entstehen, der den ihm gebotenen Hohlraum gerade ausfüllte.

Der gleiche Versuch in anderer Ausführung sieht folgendermaßen aus. Hier habe ich eine aus zwei Teilen bestehende hölzerne Form: der eine Teil trägt einen halbkugeligen Ansatz, welcher gerade in die halbkugelige Vertiefung des anderen Teiles hineinpast. Ich fülle diese Vertiefung mit Eisstücken, drücke die Halbkugel mittels der hydraulischen Presse recht fest hinein und finde nach Aufhören des Druckes in der Höhlung ein zusammenhängendes Eisstück von der Gestalt einer halben Hohlkugel.

Noch auf andere Weise läßt sich zeigen, wie durch Druck die Schmelztemperatur des Eises sinkt. Ich lege ein Brett mit beiden Enden auf zwei Stühle oder dergl., auf das Brett ein großes Eisstück und über dieses einen Draht von etwa 1 mm Dicke. Die beiden Drahtenden, welche zu beiden Seiten des Brettes herabgeführt sind, belaste ich durch Anhängen eines nicht zu kleinen Gewichtes (etwa 10 kg oder mehr) und überlasse das Ganze zunächst sich selbst. Der von dem Gewicht gespannte Draht ruht auf der Oberseite des Eisstücles und belastet dort einen schmalen Streifen, dessen Breite der Drahtstärke gleich ist, mit entsprechend hohem Druck. Dadurch wird nun wieder die Schmelztemperatur unter die im Eisstück herrschende Temperatur herabgedrückt, das Eis schmilzt an dem gedrückten Streifen und wird als Wasser durch den abwärtsstrebenden Draht verdrängt. Sobald es aber auf diese Art über den Draht gelangt und also seinem Druck entzogen

wird, nimmt der Schmelzpunkt wieder den früheren Wert an, und das Wasser gefriert von neuem. Wenn unser Versuch eine halbe Stunde gedauert hat, können wir bereits deutlich erkennen, daß der Draht im Eise immer tiefer versinkt, ohne es aber zu zerschneiden; und sofern wir lange genug warten, sehen wir schließlich aus dem unverlezt gebliebenen Eisstück den Draht unten hervorkommen und können die Bahn, welche er im Eise zurückgelegt hat, deutlich mit den Augen verfolgen.

Diese Erscheinung des Schmelzens unter Druck und Wiedergefrieren nach Aufhören des Druckes nennt man die Regelation des Eises. Messungen haben ergeben, daß beim Eise eine Druckzunahme um eine Atmosphäre mit einem Sinken des Schmelzpunktes um $0,0075^{\circ}$ verbunden ist.

Übrigens brauchen wir, um die Regelation des Eises wahrzunehmen, keineswegs besondere Versuche anzustellen. Beim Schlittschuhlaufen z. B. pflegen wir diese Erscheinung stets zu benutzen. Dabei ruht nämlich die Körperlast meist allein auf einer Kante des gerade am Boden befindlichen Schlittschuhs, also auf einem sehr schmalen Streifen; und hieraus ergibt sich eine so starke Belastung des Eistreifens, daß Verflüssigung erfolgt. Unter dem Schlittschuh haben wir also eine dünne Wasserschicht, die hinter dem Laufenden sogleich wieder gefriert, und der wir das leichte ruhige Gleiten auf der Eisbahn zuschreiben müssen. Ohne solche verflüssigte Oberfläche ist das Eis hart und stumpf; das kann der Schlittschuhläufer bemerken, wenn er bei starker Kälte die Eisbahn aufsucht, weil dann der Druck der Körperlast nicht ausreicht, um den Schmelzpunkt des Eises bis unter die herrschende tiefe Temperatur herabzubringen.

In großem Maßstabe tritt die Regelation bei der Gletscherbildung auf und bewirkt dort die Umbildung der auf den Berggipfeln angehäuften Schneemassen in das klare Eis der Gletscher. Oberhalb der sogenannten Schneegrenze fällt im Winter mehr Schnee, als der Sommer aufzutauen vermag, und so entsteht die „Region des ewigen Schnees“, deren Schneemassen nicht bloß die warme Jahreszeit überdauern, sondern auch während des Winters jedesmal neuen Zuwachs erhalten. Dadurch wird schließlich eine so große Schneelast angesammelt, daß die unterste Schicht einen hohen Druck erleidet und unter seiner Einwirkung zu schmelzen beginnt. Das entstehende Schmelzwasser fließt unter den Schneemassen hervor und erstarrt, da es nun dem verflüs-

sigenden Druck entronnen ist, sogleich zu klarem Eise. Der gleiche Vorgang wiederholt sich, so oft an irgendeiner Stelle der Druck groß genug wird, um wiederum das Eis schmelzen zu machen, also nicht bloß in den untersten Schneeschichten, sondern auch in der ganzen Eismasse, die von oben durch stets erneuten Druck abwärtsgeschoben wird. Sie schmiegt sich dabei der Bodenform an, wie es vorher bei unseren Versuchen die Schneemassen in den Hohlformen taten, denn sobald irgendwo Widerstand oder Spannung die Bewegung zu hindern beginnt, schmilzt das gedrückte Eis und umfließt als Wasser schmiegsam das Hindernis, um dann sofort wieder zu erstarren. In der Mitte des Eisstromes ist die Schichtdicke größer als am Rande, und demgemäß hat man wahrgenommen, daß die mächtigeren mittleren Teile langsam einsinken, während die dünneren Randgebiete aufquellen. Indem die Gletschermassen so in die wärmeren Täler hinabströmen, bewegen sie sich, gerade wie der Schlittschuhläufer und aus demselben Grunde, auf einer dünnen Wasserschicht, die das Gleiten erleichtert, und finden ihre Auflösung durch das allmähliche, von der wärmeren Umgebung erzeugte Abschmelzen des vorderen Randes.

Zu den Angaben über die Schmelz- und Erstarrungstemperatur gehört noch die Schilderung einer Unregelmäßigkeit, die man als Unterkühlung bezeichnet. Es kann nämlich eine Flüssigkeit erheblich unter den Erstarrungspunkt abgekühlt werden, ohne in den festen Zustand überzugehen, wenn man dabei Erschütterungen, namentlich aber Berührung der Flüssigkeit mit einem festen Teilchen derselben Substanz vermeidet. Beginnt an irgendeiner Stelle der unterkühlten Flüssigkeit die Erstarrung, so verbreitet sie sich sogleich; die Masse wird zum Teil oder als Ganzes fest und erwärmt sich dabei im ersten Falle bis zur Temperatur des normalen Schmelzpunktes. Besonders leicht gelingt dies bei einigen Salzen, wie z. B. dem essigsauren und dem unterschwefligsauren Natron, auf deren Verhalten wir nachher noch einzugehen haben; und auch das Wasser kann bei entsprechender Vorsicht weit unter 0° abgekühlt werden, ohne zu gefrieren. Reine und luftfreie Wassertropfen, die in ein enges Glasrohr gebracht werden, bleiben flüssig bei Abkühlung bis -20° .

In der Atmosphäre kommt unterkühltes Wasser oftmals vor. Wenn ein aufsteigender Luftstrom zur Bildung von Wassertropfchen führt (vgl. S. 35, 81) und diese mit sich hinaufhebt, so kann bei fortgesetzter dynamischer Abkühlung der Luft eine Unterkühlung der Tröpf-

chen leicht eintreten. Wird dann durch Berührung mit Eiskristallen, die aus noch höheren Schichten herabfallen, oder auf andere Art die Unterkühlung unterbrochen, so erstarren die Tröpfchen rasch, und im Gegensatz zu den langsam kristallisierten Schneeflocken bilden sie einfacher gestaltete Eisklumpchen, welche sich vielfach miteinander vereinigen, auch wohl im Herabfallen andere unterkühlte Tröpfchen zum Erstarren bringen und mit ihnen zusammenfrieren. So entstehen die trüben, aus vielen kleinen Eisteilchen zusammengesetzten Graupelkörner, die in Schauern herabfallen und gewöhnlich als Begleiter örtlich aufsteigender Luftströme, der sogenannten Böen, erscheinen. Meistens ist dabei die Luft in starker Bewegung, und nicht selten entstehen in der Höhe Luftwirbel mit wagerechter Achse, die also die Luftmassen samt den darin enthaltenen Eiskörnchen und Wassertropfen in raschem Wechsel auf- und abwärts führen. Wenn dann unten die Graupelkörner mit Wassertropfen zusammentreffen und sich mit einer Schicht bedecken, die nachher in der kälteren Höhe gefriert, so entstehen die Hagelkörner, die bekanntlich einen trüben Kern mit einer oder mehreren halbdurchsichtigen Eishüllen zu zeigen pflegen, und deren Lebensgeschichte man beim Durchschneiden leicht aus den verschiedenen Schichten ablesen kann. Der Hagel entsteht wahrscheinlich viel häufiger, als wir ihn auftreten sehen, denn wenn die Hagelkörner sich in großer Höhe bilden und durch eine entsprechend mächtige Schicht wärmerer Luft herabfallen, schmelzen sie und langen unten als große Tropfen an, so daß man nicht Hagelfall, sondern Platzregen wahrnimmt. Dauert das Ganze lange, so geschieht es wohl, daß die von den ersten Hagelmassen abgekühlte Luft den Rest nicht mehr schmelzen kann, und das Unwetter, welches als Platzregen begann, endet mit Hagel.

Ein anderes Auftreten unterkühlten Niederschlages finden wir in dem seltener zu beobachtenden Eisregen. Ein Beispiel hierfür fand in Mittel- und Ostdeutschland am 20. Oktober 1898 statt und erzeugte am Boden sowie an den Pflanzen, Häusern usw. einen zusammenhängenden Überzug klaren Eises. Die Belastung der Pflanzen war eine so große, daß durch Brechen vielfach schwerer Schaden entstand. Die genauere Untersuchung der einzelnen Witterungsvorgänge läßt vermuten, daß der Regen jenes Tages aus einer oberen und verhältnismäßig warmen Schicht stammte und in Form flüssiger Tropfen von wenig über 0° durch eine tiefere und kältere Schicht fiel. Hier

unter 0° erkaltet und unterkühlt, trafen die Tropfen den Boden, die Pflanzen usw. und erstarrten auf diesen Gegenständen sogleich durch die Erschütterung des Auftreffens oder beim Berühren des schon vorhandenen Eises.

Wie durch Druck beim Wasser so kann die Erstarrungstemperatur einer Flüssigkeit auch dadurch erniedrigt werden, daß man in ihr eine andere Substanz auflöst. Es gefriert dabei zwar nur das Lösungsmittel, und so bildet sich z. B. aus dem salzigen Meerwasser bei Kälte reines Eis, welches höchstens mechanisch eingeschlossene Salzteilchen enthält. Die Temperatur aber, bei welcher das Lösungsmittel zu erstarren beginnt, liegt um so tiefer, je mehr es gelöste Substanz enthält. So findet man beispielsweise beim Lösen von 10 g Rohrzucker in 100 g Wasser ein Sinken des Gefrierpunktes um $0,54^{\circ}$. Diese Gefrierpunktserniedrigung steht in geradem Verhältnis zur gelösten Menge und insbesondere auch zur Zahl der gelösten Moleküle; sie dient daher den Chemikern zur Bestimmung des Molekulargewichtes.

Nachdem wir bisher die Temperatur betrachtet haben, bei welcher das Schmelzen und Erstarren stattfindet, erwächst uns nun die weitere Aufgabe, auch von der Wärmemenge Kenntnis zu nehmen, deren Umsetzung für das Zustandekommen jener Vorgänge wesentlich ist. Um zunächst eine Anschauung der Sache zu gewinnen, betrachten wir nochmals den einfachen Versuch, mit welchem dies Kapitel begann. In einem Gemisch von Eis und Wasser zeigt ein Thermometer unveränderlich die Temperatur 0° , gleichviel ob wir dem Gemisch Wärme zuführen oder entziehen, solange nur die beiden Bestandteile, festes Eis und flüssiges Wasser, nebeneinander noch vorhanden sind. Nun wissen wir aber (vgl. S. 32, 36), daß Wärme eine Form der Energie ist, und daß wir also unserem Eis-Wasser-Gemisch mit der Wärme etwas zuführen oder entziehen, was weder verschwinden noch aus dem Nichts entstehen kann. Wo also bleibt die Wärme, welche wir dem Gemisch zuführen, oder woher kommt die Wärme, welche wir ihm entziehen, wenn in seiner unverändert bleibenden Temperatur kein Anzeichen der geschehenen Wärmebewegung sichtbar wird? Darauf antwortet uns der Versuch, welcher erkennen läßt, daß beim Zu- oder Wegführen von Wärme zwar nicht die Temperatur, wohl aber der Aggregatzustand sich ändert. Führen wir dem Gemisch Wärme zu, so schmilzt ein Teil des vorhandenen Eises, entziehen wir ihm Wärme,

so gefriert ein Teil des vorhandenen Wassers. Wir ziehen daraus den Schluß: beim Schmelzen von Eis wird Wärme verbraucht, beim Gefrieren von Wasser wird Wärme frei. Man nennt die für solche Änderung des Aggregatzustandes in Betracht kommende Wärmemenge *latent* oder *gebunden* und spricht demgemäß von *latenter Schmelzwärme*.

Ohne besonders schwierige Vorbereitungen können wir jetzt unseren Versuch derartig abändern, daß er uns die Schmelzwärme des Eises zu messen gestattet. Wir bedienen uns dazu gewogener Mengen von Wasser und Eis und verfolgen den Gang ihrer Temperaturen. Ein Gefäß enthalte 1 kg (Liter) Wasser von 25° C. Dahinein bringen wir 100 g Eis von 0° und rühren das Gemisch sorgfältig so lange um, bis alles Eis geschmolzen ist. Dann finden wir die Endtemperatur $15,5^{\circ}$ und gründen darauf folgende Berechnung. Die anfangs vorhanden gewesene Wassermenge wurde um $9,5^{\circ}$ abgekühlt, wobei sie 9,5 Kal. hergab, und dabei wirkten zwei Ursachen mit. Erstens ist das hineingebrachte Eis von 0° in Wasser von 0° verwandelt worden und hat dazu eine gewisse Wärmemenge verbraucht. Zweitens wurden diese 100 g Schmelzwasser von 0° auf $15,5^{\circ}$ erwärmt. Da wir aus dem vorigen Kapitel (vgl. S. 21) wissen, daß durch Zuführen einer Kalorie 1 kg Wasser um 1° erwärmt wird, gehört zur Erwärmung unserer 100 g um $15,5^{\circ}$ eine Wärmemenge von 1,55 Kal. Von 9,5 Kal., die das anfangs vorhandene Kilogramm Wasser abgab, bleiben also, wenn wir der Einfachheit halber die Hundertstel weglassen, noch 8 Kal. übrig als diejenige Wärmemenge, welche 100 g Eis von 0° in Wasser von 0° verwandelten, oder für 1 kg Eis beträgt die Schmelzwärme 80 Kal. Um ein Stück Eis von 0° ohne Temperaturänderung zu schmelzen, wird also eben soviel Wärme gebraucht wie zur Erhitzung des beim Schmelzen entstandenen Wassers von 0 auf 80° .

Um ganz genau zu verfahren, hätte man auch noch diejenige Wärmemenge berücksichtigen müssen, welche dem Gefäß bei der Abkühlung entzogen wurde und also dem für die Eisschmelzung erforderlichen Betrag eigentlich zuzurechnen ist. Indessen kann bei einem dünnwandigen Glasgefäß diese Wärmemenge wohl vernachlässigt werden, da ja die geringe spezifische Wärme des Glases und das geringe Gewicht des Gefäßes eine Beachtung dieses Gefäßeinflusses nur bei größerer Genauigkeit nötig machen.

Wie in unserem Beispiel für das Wasser, so hat man auf ähnliche Art für viele Substanzen die Schmelzwärme bestimmt und Zahlen gefunden, deren einige in der folgenden Tabelle zusammengestellt sind. Ihre Bedeutung ist die, daß jede der mitgeteilten Zahlen angibt, wie viele Kilogrammkalorien nötig sind, um 1 kg der betreffenden Substanz bei ihrer Schmelztemperatur zu verflüssigen; oder auch, wieviel Kilogrammkalorien einem Kilogramm flüssiger Substanz bei ihrer Schmelztemperatur entzogen werden müssen, um sie erstarren zu machen.

Schmelzwärme.

Aluminium	77 Kal.	Schwefel, rhombisch	9,4 Kal.
Blei	5,4 =	" , monoklin	10,4 =
Kadmium	13,7 =	Silber	21 =
Guß Eisen, weiß	33 =	Wismut	12,4 =
" , grau	23 =	Zink	28 =
Kupfer	43 =	Zinn	14,6 =
Nickel	4,6 =	Eis	79,9 =
Phosphor	5,0 =	Bienenwachs	61,8 =
Platin	27,2 =	Unterschwefligsaures Na-	
Quecksilber	2,8 =	tron, kristall.	37,6 =

Die Einzelheiten, welche bei der Schmelzung und insbesondere bei der Unterkühlung stattfinden, soll uns der folgende Versuch zeigen. Wir beobachten den Vorgang der Schmelzung beim unterschwefligsauren Natron, einem aus weißen Kristallen bestehenden Salz, welches wegen seiner Anwendung in der Photographie als „Fixiernatron“ bekannt ist. Ein Gläschen, welches mit dem Salz gefüllt ist und außerdem ein Thermometer enthält, wird in ein größeres Gefäß mit heißem Wasser eingesenkt, bis das Salz geschmolzen ist. Hiersür eine Gasflamme unmittelbar zu verwenden, wäre bedenklich, weil dabei leicht ein Teil des Salzes zu stark erhitzt und dann zersetzt werden könnte. Bei 48° liegt der Schmelzpunkt, und sobald nach Erreichung dieser Temperatur die vollständige Schmelzung geschehen ist, setze ich das Gläschen in eins der Glasgefäße unseres im vorigen Kapitel (S. 21, Abb. 10) beschriebenen Thermostops, so daß wir jede Temperaturänderung genau verfolgen können. Sorgfältig muß dabei beachtet werden, daß alles Salz auch wirklich geschmolzen ist, denn wenn irgendein kleines Körnchen darin fest zurückbliebe, würde dies nachher die Unterkühlung verhindern. Wir vermeiden also die Anwesenheit fester Salzteilehen ebenso wie zu viel Erschütterung und können vielleicht auch die Abkühlung beschleunigen, indem wir vorsichtig das

Gläschen zunächst in kaltes Wasser und dann erst in das Thermoskop bringen. Es ist nicht schwer, auf diese Art die flüssige Masse bis 20° und tiefer abzufühlen und diese Veränderung sowohl am Thermometer wie auch in größerem Abstände an dem farbigen Flüssigkeitsfaden des Thermostops oder dessen an die Wand geworfener Vergrößerung zu erkennen. Nun werfe ich ein Stückchen festen unterschwefligsauren Natrons in die Flüssigkeit und erzeuge durch dessen Berührung das sofortige Aufhören der Unterkühlung. Die ganze flüssige Masse trübt sich durch rasch anschließende Kristalle und erstarrt binnen weniger Sekunden. Zugleich wird die vorher bei der Schmelzung gebundene Wärme jetzt wieder frei, und wir sehen die Temperatur der Substanz schnell steigen. Natürlich kann sie nicht über die normale Erstarrungstemperatur von 48° hinauskommen; denn wenn diese erreicht ist, würde ein Mehr von Wärme einen Teil des Salzes wieder schmelzen, und es kann der Vorgang des Erstarrens nicht den Anlaß zu neuem Schmelzen geben.

Die Möglichkeit der Unterkühlung und das Freiwerden gebundener Wärme beim Erstarren flüssiger Substanz finden praktische Anwendung in dem sogenannten Thermophor. Das ist ein aus passendem Material (Blech, Gummi) gefertigtes Behältnis, welches mit einem geeigneten Salz gefüllt ist und zur Erwärmung kleiner Räume, zum Warmhalten von Speisen, in der Krankenpflege als warmer Umschlag und dergl. dient. Für den Gebrauch wird der Apparat in kochendes Wasser getan und darin so lange gelassen, daß die Füllung, meist essigsaures oder unterschwefligsaures Natron, vollständig schmilzt. Dabei ist die Temperatur auf den Schmelzpunkt der Füllung gestiegen und bleibt nun auch in kälterer Umgebung unverändert, bis alles Salz wieder fest geworden ist. Inzwischen gibt der Apparat diejenige Wärmemenge nach außen ab, welche ihm während des Schmelzens zugeführt und durch die Füllung gebunden wurde, und die jetzt beim Erstarren wieder frei wird. Man verwendet als Füllung natürlich nur Salze, deren Schmelzwärme beträchtlichen Wert hat. Indem die ganze latent gewesene Wärme beim Erstarren nach außen abgegeben wird, wirkt der auf Schmelztemperatur verbleibende Apparat wie ein kleiner Ofen. In solcher Art dient er z. B. auch zum Heizen von Eisenbahn- und Straßenbahnwagen. Bei geeigneter Behandlung kann auch das Erstarren der Füllung hintangehalten und eine Unterkühlung herbeigeführt werden. Dann ist die Füllung flüssig geblieben, der Appa-

rat hat die Temperatur der umgebenden Luft angenommen, und man kann zu beliebiger Zeit die noch darin enthaltene gebundene Wärme frei werden lassen, indem man die Erstarrung einleitet. Dazu pflegt es zu genügen, wenn man durch Lösen einer Schraube der Außenluft den Eintritt in das erkaltete Innere gestattet.

Das Wesentliche bei dieser Anwendung des Vorausgegangenen ist also die Möglichkeit, eine Temperatur, nämlich diejenige des Schmelzpunktes, für längere Zeit und trotz des beständigen Wärmeaustausches mit der Umgebung unverändert zu erhalten. Liegt die gewünschte Temperatur über der gewöhnlichen, so benutzt man, wie im Thermophor, ein Salz mit entsprechendem Schmelzpunkt, welches im Erstarren so viel Wärme an seine Umgebung abgibt, als der vorliegende Zweck verlangt. Wenn dagegen eine unter der gewöhnlichen liegende Temperatur erzielt und erhalten werden soll, so wird umgekehrt eine Substanz zu verwenden sein, deren Schmelzpunkt die entsprechende tiefe Lage hat, und die vom festen Zustande ausgehend im Schmelzen so viel Wärme bindet, als der Umgebung zu entziehen ist. Dies letztere trifft zu bei allen mit Eis betriebenen Kühlanlagen. Wenn man z. B. einen Eiskeller im Winter mit Eis versieht, so ist damit die Sicherheit gegeben, daß alle in der wärmeren Jahreszeit herzukommende Wärme nicht zur Temperaturerhöhung, sondern nur zur Eisschmelzung verbraucht werden wird, solange noch Eis vorhanden ist, und daß also bis dahin die Temperatur des Kellers nicht über 0° steigen kann.

Eine ähnliche Erscheinung, welche die Natur in großem Stil ausführt, finden wir in den Eismassen der Polargebiete. Die Sonnenstrahlung trifft den Boden verschiedener Zonen in verschiedener Steilheit und zeitlicher Verteilung. So kommt es, daß die größte jährliche Gesamtmenge an Sonnenwärme der Äquatorzone zukommt, und den anderen Gegenden um so weniger, je höher ihre nördliche oder südliche geographische Breite ist. Dementsprechend finden wir auch die höchste jährliche Durchschnittstemperatur in den Tropen, die niedrigste an den Polen. Ein anderer Unterschied der Zonen besteht ferner darin, daß die zeitliche Verteilung der zugestrahlten Sonnenwärme über das Jahr in der Nähe des Äquators nur geringe Schwankungen zeigt, während nach den Polen hin die jährlichen Temperaturschwankungen immer größer, die Jahreszeiten immer verschiedener werden. In unseren mittleren Breiten sind wir daran gewöhnt, daß der Sommer lange Tage und kurze Nächte, der Winter kurze Tage und lange

Nächte bringt, und daß dieser Unterschied der Sonnenscheindauer zusammen mit demjenigen der Sonnenhöhe die Sommerwärme und die Winterkälte erzeugt. In der Zone des Äquators sind dagegen während des ganzen Jahres Tag und Nacht nahezu gleich lang, und die Unterschiede in der Sonnenhöhe bewirken dort hauptsächlich die geringen Temperaturschwankungen des Jahres. Und andererseits ist an den Polen die Verschiedenheit der Jahreszeiten bekanntlich so groß, daß während je einer Jahreshälfte die Sonne dort nur über und nur unter dem Horizont steht. Dieser langdauernden Sonnenstrahlung entspricht es, daß am Tage der Sommer Sonnenwende der Pol mehr Strahlungswärme empfängt als ein Punkt des Äquators an seinem heißesten Tage, und daß es im Polarsommer insgesamt eine Zeit von 56 Tagen gibt, an welchen dort die Strahlung stärker ist als gleichzeitig an irgendeinem anderen Punkt der Erde. Aus der bekannten Achsendrehung und Bahnbewegung der Erde sind die Angaben leicht zu berechnen, und doch erscheint es uns überraschend, daß so große Wärmemengen den Polargebieten zugehen sollen, die wir als starre Eiswüsten schildern zu hören gewöhnt sind. Indessen ist zu bedenken, daß der Wärmezufuhr des Sommers ein ebenso großer Wärmeverlust des Winters gegenübersteht, und daß der Winter dort größere Eismassen hinterläßt, als der Sommer schmelzen kann. So wirken also in den Polargebieten die Eismassen ähnlich wie in unseren Eiskellern. Die zugeführte Sommerwärme kann, solange noch Eis vorhanden ist, die Temperatur nicht über 0° erhöhen, sondern wird durch Schmelzung gebunden.

Endlich sei noch eine Anwendung der Eisschmelzung erwähnt, die von wissenschaftlicher Bedeutung ist, nämlich die Messung der spezifischen Wärme mittels des Eiskalorimeters. Wie wir im vorigen Kapitel sahen, antwortet die Angabe der spezifischen Wärme eines Körpers auf die Frage: Wieviel Kalorien müssen einem Kilogramm des Körpers zugeführt oder entzogen werden, damit seine Temperatur um 1° steigt oder sinkt? Eine Messungsweise, nämlich die sogenannte Mischungs-methode, haben wir (S. 20) kennen gelernt. Es wird der zu untersuchende Körper gewogen, auf höhere Temperatur erwärmt und dann in eine gewogene Wassermenge von bekannter Temperatur gebracht, worauf die gemeinsame Endtemperatur des Ganzen abgelesen wird. Dann hat der vorher wärmere Körper ebensoviel Wärme abgegeben, als das vorher kühler Wasser aufgenommen

hat, und aus Gewicht und Temperaturerhöhung des Wassers ist diese Wärmemenge leicht zu berechnen, ebenso aus Gewicht und Abkühlung des Körpers dessen spezifische Wärme.

Bei der in Abb. 15 dargestellten Form des Eiskalorimeters nach Bunsen wird die von einem erwärmten Körper bei der Abkühlung auf 0° abgegebene Wärmemenge aus der Menge des geschmolzenen Eises bestimmt, indem man die Volumenverminderung benutzt, welche beim Übergang von Eis zu Wasser stattfindet (vergl. S. 12), um die Menge des geschmolzenen Eises zu finden. Ein oben offenes Glasröhrchen *a* ist in das weitere Glasrohr *b* eingeschmolzen, und an dieses unten das zweimal gebogene Glasrohr *c* angesetzt, welches oben eingesetzt das enge und mit Teilung versehene, horizontal umgebogene Glasrohr *s* trägt. Zum Gebrauch wird *b* oberhalb β mit reinem Wasser, im übrigen und bis an *s* mit Quecksilber gefüllt. Dann bringt man in *a* eine geeignete Kältemischung (vergl. S. 28) und erzeugt dadurch auf der Außenseite von *a* einen Überzug von Eis. Nun wird *a* entleert und das Ganze bis auf das Rohr *s* in einem größeren Gefäß mit Schnee von 0° umgeben. Sobald der im Rohr *s* endende Quecksilberfaden sich nicht mehr bewegt, ist daraus ersichtlich, daß der ganze Apparat die Temperatur 0° angenommen hat, und der Versuch kann beginnen. Der zu untersuchende Körper von bekanntem Gewicht wird auf höhere Temperatur gebracht und in das Gefäß *a* eingesenkt. Indem er sich auf 0° abkühlt und eine entsprechende Wärmemenge abgibt, schmilzt dadurch ein Teil der außen an *a* befindlichen Eisschicht. Wie groß die geschmolzene Eismenge ist, kann man aus der Bewegung des Quecksilberfadens in der Röhre *s* entnehmen; denn, wie oben (S. 12) angegeben, nimmt bei 0° 1 g Eis den Raum von 1,092 ccm, 1 g Wasser nur 1,000 132 ccm ein. Haben wir vorher das geteilte Rohr *s* genau ausgemessen, so können wir angeben, um wieviel Kubikzentimeter oder Bruchteile eines solchen das Quecksilber in den Apparat hineingesogen wurde, wenn es um eine bestimmte Strecke im Rohr *s* zurücktrat; und hier-

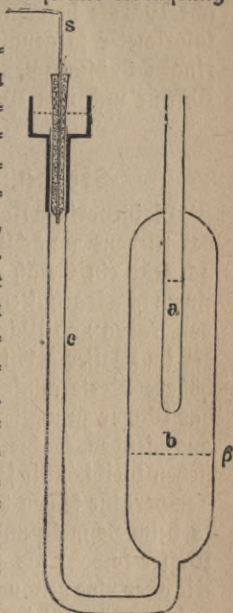


Abb. 15.
Eiskalorimeter.

aus kann dann leicht die Menge des geschmolzenen Eises, die von dem untersuchten Körper abgegebene Wärmemenge und also seine spezifische Wärme berechnet werden. In dieser Form ermöglicht das Eis-kalorimeter so genaue Messungen, daß man auch schon mit recht geringen Substanzmengen zuverlässige Bestimmungen der spezifischen Wärme und von Wärmetönungen ausführen kann.

Viertes Kapitel.

Sieden. Verdampfen. Verflüssigen.

Wie im vorigen Kapitel für die Schmelzung, so soll hier für den Vorgang des Siedens zunächst ein Versuch uns die nötige Anschauung liefern. Ich setze ein Gefäß mit Wasser über eine Flamme und beobachte an einem hineingehaltenen Thermometer die Temperatur. Zuerst sehen wir von Boden und Wänden des Gefäßes Bläschen aufsteigen, welche aus der im Wasser gelösten Luft bestehen, während die Temperatur immer höhere Werte annimmt. In einem gewissen Augenblick aber beginnt das Wasser zu wallen und in seiner ganzen Ausdehnung Dampfblasen auszusenden, während gleichzeitig das Thermometer bei etwa 100° C stehen bleibt. Wir sagen dann: das Wasser siedet, nennen die erreichte Temperatur seinen Siedepunkt und verstehen darunter, ähnlich wie es beim Schmelzpunkt geschah, diejenige Temperatur, bei welcher das Wasser sowohl als Flüssigkeit wie als Dampf bestehen kann. Wenn wir aber eine genaue Bestimmung des Siedepunktes vornehmen wollen und sie an verschiedenen Tagen wiederholen, finden wir deutliche Schwankungen. Gerade wie das Barometer steigt und sinkt, so bewegt sich, und zwar in gleichem Sinne, auch der Siedepunkt. Davon können wir uns leicht überzeugen, wenn wir statt der zeitlichen die örtlichen Unterschiede des Luftdrucks benutzen und die Siedetemperatur des Wassers in verschiedenen Höhen untersuchen. Es wird z. B. auf dem Gipfel eines Hügels oder auf einem Turme der Siedepunkt des Wassers gleich $99,8^{\circ}$ gefunden, während er am Fuße den Wert von 100° hat. Die später genauer zu erörternde Beziehung zwischen Siedepunkt und Luftdruck läßt dann erkennen, daß der Hügel oder Turm etwa 60 m hoch ist, und daß in den beiden verschiedenen Siedetemperaturen sich der Druckunterschied ausspricht; denn je höher wir hinaufsteigen, um so geringer wird die Luftsäule, welche noch auf uns und unseren Apparaten lastet, und um so kleiner also auch der im Barometer erkennbare Luftdruck. Daß dabei auch der Siedepunkt des Wassers sinkt, leh-

ren Messungen der erwähnten Art, und man hat durch Vergleichung von Barometerstand und Siedetemperatur ein Mittel gefunden, um den Luftdruck genau zu bestimmen und das Barometer durch das handlichere Thermometer zu ersetzen. Eine solche Vorrichtung heißt Höhen- oder Hypsothermometer und besteht aus einem Siedegefäß mit Dreifuß, einem ausreichenden Vorrat reinen Wassers, einer Spirituslampe und einem sehr genauen Thermometer. Um die Siedetemperatur möglichst fehlerfrei zu messen, bringt man das Thermometer nicht in das kochende Wasser, sondern unmittelbar darüber in den aufsteigenden Dampf, und deshalb hat das Siedegefäß einen geeigneten zylindrischen Aufsatz, der das Thermometer umschließt und gegen Abkühlung schützt. Namentlich zur barometrischen Höhenmessung ist dieses Instrument recht zweckmäßig, da es beim Ersteigen von Bergen sehr viel leichter mitgeführt werden kann als das unbequeme Quecksilberbarometer und dabei doch genauere Messungen gestattet als das Aneroidbarometer. Wie die Siedetemperatur des Wassers sich mit dem Barometerstande ändert, ergeben folgende Zahlen:

Siedetemperatur des Wassers bei verschiedenen
Barometerständen.

101° 787,57 mm	98° 707,29 mm	95° 634,01 mm	92° 567,19 mm
100 760,00 "	97 682,11 "	94 611,04 "	91 546,27 "
99 733,24 "	96 657,69 "	93 588,77 "	90 526,00 "

In geringer Seehöhe bedeutet also ein Sinken des Siedepunktes von Wasser um 1°, daß der Luftdruck um etwa 27 mm Quecksilberhöhe gesunken ist; dem entspricht ein Emporsteigen um etwa 300 m.

Übrigens ist es nicht schwer, auch ohne zeitliche oder räumliche Änderungen die Abhängigkeit der Siedetemperatur vom Druck zu erkennen. Zu diesem Zweck benutze ich ein halb mit Wasser gefülltes Kochfläschchen, erhitze es bis zum Sieden und nehme es dann vom Feuer, indem ich es gleichzeitig mit einem gut passenden Kork verschließe. Nun befestigte ich das Gefäß in umgekehrter Stellung an einem passenden Halter und überlasse es der Abkühlung. Wenn ich jetzt auf den nach oben gerichteten Teil blase und also die Abkühlung beschleunige, so beginnt im Innern alsbald das Wasser von neuem zu sieden, hört aber gleich damit auf, sobald ich mit einer Gasflamme den oberen Gefäßteil bestreiche und erwärme. Diesen scheinbar seltsamen Vorgang, daß das Sieden des Wassers durch Abkühlung vermehrt, durch Erwärmen aber verhindert wird, kann ich beliebig oft wiederholen, ehe die Tem-

peratur des Gefäßes weit genug gesunken ist, um den Versuch zu erschweren. Tatsächlich war es aber nicht das Wasser, welches dabei abgekühlt und erwärmt wurde, sondern das über dem Wasser im Gefäß befindliche Gemisch von Dampf und Luft. Wurde dies abgekühlt, so zog es sich zusammen und übte einen entsprechend geringen Druck auf das Wasser aus. Hierdurch sank dessen Siedepunkt; und wenn seine Abkühlung noch nicht weit vorgeschritten war, konnte der neue Siedepunkt unter die augenblickliche Temperatur des Wassers herabgehen, und mußte das Sieden von neuem beginnen. Wurde dagegen durch Erwärmen des Dampf- und Luftgemisches der Druck, welcher auf dem Wasser lastet, vergrößert, so stieg sein Siedepunkt, überschritt die augenblickliche Temperatur des Wassers, und das Sieden hörte auf.

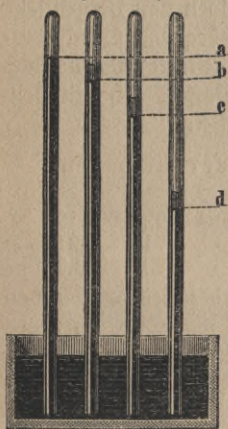


Abb. 16. Dampfdruck verschiedener Flüssigkeiten.

Zur weiteren Erkundung des Siedevorganges und zum Vergleichen des Wassers mit anderen Flüssigkeiten diene uns noch der folgende Versuch. Ich fülle ein an einem Ende geschlossenes Glasrohr von ausreichender Länge (über 76 cm) ganz mit Quecksilber, verschließe die Öffnung mit dem Finger, lehre es um und stelle es so auf, daß seine Öffnung sich in einem mit Quecksilber nahezu gefüllten Gefäß befindet. Mache ich dann die Öffnung durch Fortnehmen des Fingers frei, so sehen wir das Quecksilber in der Röhre so weit (bis a, Abb. 16) fallen, daß die verbleibende Quecksilbersäule dem außen herrschenden Luftdruck entspricht, während der oberste Teil der Röhre luftleer ist und das sogenannte Torricellische Vakuum bildet. Die Röhre stellt jetzt ein Barometer dar und bildet zusammen

mit dem Gefäß ein Paar kommunizierender Röhren, in welchen Gleichgewicht herrscht. Im äußeren Gefäß wirkt der Druck des dort befindlichen Quecksilbers und derjenige der Luft, in der Röhre nur der Druck der entsprechend längeren Quecksilbersäule; und demnach wird der Luftdruck gemessen durch diejenige Länge, um welche das Quecksilber innen höher als außen steht. Nun gieße ich in eine zweite, gleiche Glasröhre so viel Quecksilber, daß noch ein kleiner Raum frei bleibt, und fülle diesen mit Wasser. Stelle ich dies Rohr ebenso auf wie das erste, so sinkt darinnen das Quecksilber merklich tiefer (bis b),

und ein Teil des Wassers verwandelt sich sogleich in Dampf. Ein drittes und viertes Rohr behandle ich in derselben Weise, nehme jedoch statt des Wassers Alkohol und Äther, wobei die Quecksilbersäulen die in der Abbildung angedeuteten geringeren Längen haben (bis *c* und *d*). Die verschiedene Höhe der Quecksilbersäulen ist nicht schwer zu erklären; während in der ersten Röhre nur Quecksilber enthalten ist und darüber ein leerer Raum, haben wir in jeder der anderen Röhren über dem Quecksilber nicht bloß einen Flüssigkeitsrest, sondern da die Flüssigkeit sich verringert hat und zum Teil in Dampf überging, muß der über der Flüssigkeit befindliche Raum mit diesem Dampf erfüllt sein, und es muß in ihm ein der Dampfmenge entsprechender Druck herrschen. Dieser Dampfdruck zusammen mit dem Druck der Quecksilbersäule kommt dem äußeren Luftdruck gleich und also auch demjenigen Druck, den in der ersten Röhre das Quecksilber allein ausübt. Um den Betrag des Dampfdruckes, welcher in jeder der drei Röhren herrscht, ist darin folglich der Quecksilberdruck kleiner als in der ersten Röhre. Wenn unser Apparat die Zimmertemperatur von 20° C angenommen hat, so finden wir aus den Unterschieden der Quecksilbersäulen den Dampfdruck des Wassers gleich 17,41 mm, des Alkohols gleich 44,00 mm, des Äthers gleich 442,36 mm Quecksilberhöhe. Diese Größen bleiben unverändert, solange die gleiche Temperatur bestehen bleibt, gleichviel ob der für den Dampf verfügbare Raum etwa zu- oder abnimmt. Um auch dies zu zeigen, bringe ich eine der Röhren unter geeigneten Vorsichtsmaßregeln in ein tieferes Gefäß mit Quecksilber. Senke ich es darin, so sehen wir die Länge der im Rohre stehenden Quecksilbersäule unverändert bleiben, während der Dampf auf einen kleineren Raum beschränkt wird; hebe ich das Rohr, so daß seine Öffnung bis nahe unter die Quecksilberoberfläche des Gefäßes gelangt, so bleibt die Länge der Quecksilbersäule gleichfalls ungeändert, während der Dampf jetzt einen größeren Raum ausfüllt. Vermöge genaueren Zusehens konnten wir aber bemerken, daß die über dem Quecksilber stehende Flüssigkeit beim Senken des Rohres zunahm, beim Heben sich verringerte, und daß also in dem kleineren Raum weniger, im größeren mehr Dampf enthalten war, während der Dampfdruck in dem mit der Flüssigkeit in Berührung stehenden Raum sich nicht änderte. Diesen Dampf, der während des ganzen Versuches den gerade verfügbaren Raum erfüllte und dabei den größten bei der herrschenden Temperatur möglichen Druck ausübte, nennt man gesättigt,

und seine Sättigung war in unserem Apparat so lange gesichert, als noch Flüssigkeit vorhanden war, durch deren Verdampfen er sich ergänzen konnte. Hätte ich dagegen das Rohr so weit gehoben, daß alle über dem Quecksilber stehende Flüssigkeit verdampfte, so hätte bei weiterem Heben der Dampf zwar den verfügbaren Raum gleichfalls ausgefüllt, aber mit kleinerem Druck, als bei der herrschenden Temperatur möglich wäre, und in solchem Fall heißt der Dampf ungesättigt oder überhitzt.

Der in Abb. 16 abgebildete Versuch bezog sich zunächst nur auf eine einzige Temperatur. Wie er zur Messung des Dampfdruckes aus dem Unterschiede der Quecksilberhöhen dienen kann, wurde soeben gezeigt; jetzt nehmen wir an, es sei diese Messung für eine ganze Reihe verschiedener Temperaturen durchgeführt, und stellen die so gewonnenen Ergebnisse in der folgenden Tabelle zusammen, welche die Temperaturen in Celsiusgraden, die Sättigungsdrucke in Millimetern Quecksilberhöhe angibt. Die Werte für Wasser unterhalb 0° gelten für Eis.

Diese Tabelle enthält also für die als Beispiele gewählten drei Flüssigkeiten zusammengehörige Werte von Temperatur und Druck. Man kann sagen, es sei für jede darin genannte Temperatur der zugehörige Sättigungsdruck angegeben, d. h. derjenige größte Druck, welchen der Dampf bei der genannten Temperatur ausüben kann. Oder man kann sagen, für jeden in der Tabelle genannten Druck sei die zugehörige Sättigungstemperatur angegeben, d. h. die tiefste Temperatur, bei welcher der genannte Dampfdruck noch bestehen kann.

Sättigungstemperaturen und -drucke.

	Wasser	Alkohol	Äther
— 20°	0,77 mm	3,3 mm	63,0 mm
— 10	1,95 "	6,5 "	111,8 "
0	4,58 "	12,2 "	184,9 "
10	9,21 "	23,8 "	291,8 "
20	17,54 "	44,0 "	442,4 "
30	31,83 "	78,1 "	647,9 "
34,6	41,26 "	—	760,00 "
40	55,34 "	133,4 "	921,7 "
50	92,54 "	219,8 "	1276,1 "
60	149,46 "	350,2 "	1728,1 "
70	233,79 "	540,9 "	2293,9 "
78,4	333,05 "	760,00 "	—
80	355,47 "	811,8 "	2991,4 "
90	526,00 "	1186,5 "	3839,7 "
100	760,00 "	1692,3 "	4859,0 "

Zu einer anderen Deutung der Tabelle kommen wir, indem wir den Vorgang des Siedens betrachten. Er besteht bekanntlich darin, daß in der Flüssigkeit Dampfblasen sich bilden und emporsteigen. In solcher Dampfblase findet ein Druck statt, welcher dem Sättigungsdruck für die herrschende Temperatur gleichkommt; bilden kann sich also die Blase nur dann, wenn der in der Flüssigkeit herrschende Druck nicht größer ist als jener Sättigungsdruck, denn sonst würde die Blase schon im Entstehen zusammengedrückt werden. Und so ist der Beginn des Siedens an das Vorhandensein mindestens derjenigen Temperatur gebunden, deren Sättigungsdruck dem in der Flüssigkeit herrschenden (auf ihr lastenden) Druck gleich ist. Demnach können wir endlich die vorstehende Tabelle auch so deuten: sie enthält die Siedepunkte für die einzelnen darin angegebenen Drücke.

Der im Anfang dieses Kapitels geschilderte Versuch, bei welchem ein Glas Wasser bis zum Sieden erhitzt wurde, gestattet eine Anwendung dieser eben gewonnenen Beziehung. Das Wasser stand unter dem im Zimmer herrschenden Druck einer Atmosphäre, gleich demjenigen von 760 mm Quecksilberhöhe. Es mußte also, ehe das Sieden begann, diejenige Temperatur erreicht werden, für welche der Sättigungsdruck des Wassers 760 mm beträgt, d. h. 100° . Die Tabelle gestattet demgemäß, ohne weiteres die Siedepunkte auch der anderen Flüssigkeiten für Atmosphärendruck abzulesen, nämlich diejenigen Temperaturen, deren Sättigungsdruck eine Atmosphäre ist: bei Alkohol $78,4^{\circ}$, bei Äther $34,6^{\circ}$. Einige weitere Zahlen der gleichen Bedeutung sind folgende:

Siedepunkt beim Druck einer Atmosphäre.

Schwefel	444,5 ^o	Benzol	80,2	Sauerstoff	— 183,0
Quecksilber	356,7	Alkohol	78,4	Stickstoff	— 195,7
Phosphor	287,3	Brom	58,6 ^o	Wasserstoff	— 252,8
Jod	184,4	Äther	34,6	Helium	— 268,8
Anilin	184,2	Chlor	— 35,8		
Wasser	100,0	Kohlensäure	— 78,5		

Wie die S. 45 geschilderte Gefrierpunktserniedrigung, so kann durch Lösen anderer Substanzen eine Siedepunktserhöhung des Lösungsmittels bewirkt werden, welche gleichfalls zu der gelösten Menge und insbesondere auch zur Zahl der gelösten Moleküle in geradem Verhältnis steht. Bei Rohrzucker ergibt die Lösung von 10 g in 100 g Wasser eine Erhöhung des Siedepunkts um $0,155^{\circ}$.

Der Unterkühlung, von welcher S. 43 die Rede war, entspricht hier die Erscheinung des Siedeverzuges. Eine Flüssigkeit kann über ihren

normalen Siedepunkt erhitzt werden, ohne daß Sieden eintritt, wenn sie nicht mit Dampf in Berührung ist. Im geschlossenen Gefäß kann man solche überhitzte Flüssigkeit durch galvanische Zersetzung oder auch durch Schütteln zum Sieden bringen, wobei dann die ganze Masse in stürmisches Sieden übergeht.

Umgekehrt kann man auch unterkühlten Dampf erzeugen. Wenn ich z. B. hier in einer Flasche das Wasser durch eine daruntergestellte Flamme siedend erhalte und durch ein nicht zu weites Rohr einen Dampfstrahl austreten lasse, so sehen wir erst in einigem Abstand über der Rohrmündung die weißliche Nebelwolke, welche aus Wassertropfchen besteht, während zunächst über der Öffnung der Dampf noch nicht kondensiert, sondern unterkühlt ist. Hiervon überzeugen wir uns leicht, indem wir ohne Änderung von Druck oder Temperatur Staubteilchen an die Rohroöffnung bringen und den bisher durchsichtigen Dampfstrahl sich sogleich mit sichtbaren Tröpfchen füllen sehen, bei deren Entstehung die Stäubchen als Ansatzkerne (Kondensationskerne) wirken.

Die entsprechenden Beziehungen wie für das Sieden und Verdampfen der Flüssigkeiten gelten für den umgekehrten Vorgang, das Verflüssigen oder Kondensieren der Dämpfe. Ein Dampf kann auf die Dauer nur bestehen bei einem Druck, der höchstens gleich dem Sättigungsdruck für die herrschende Temperatur ist. Dies lehrt uns der auf S. 54 geschilderte Versuch (Abb. 16). Dasselbe besagt der Satz: Ein Dampf kann auf die Dauer nur bestehen, wenn seine Temperatur nicht unter derjenigen liegt, welche für den vorhandenen Druck des Dampfes die Sättigungstemperatur bildet. Steigt der Druck über jenen Sättigungsdruck, oder sinkt die Temperatur unter jene Sättigungstemperatur, so muß die Verflüssigung beginnen. Damit beginnt zugleich ein Sinken des Druckes und ein Steigen der Temperatur, so daß, wenn ein Teil des Dampfes flüssig geworden ist, der Rest wieder bestehen kann. Das Sinken des Druckes bei der Kondensation entsteht, weil derselbe Raum nun weniger Dampf enthält als vorher; das gleichzeitige Steigen der Temperatur beruht auf Freiwerden gebundener Wärme, wie nachher noch erörtert werden soll.

Druckvermehrung und Abkühlung sind also die Mittel zur Verflüssigung von Dämpfen und Gasen; und um für den Einzelfall die genaueren Bedingungen der Verflüssigung zu kennen, müssen wir Angaben über die zusammengehörigen Werte von Sättigungstemperatur und -druck haben, wie sie für einige Körper in der auf S. 56 mitge-

teilten Tabelle enthalten sind. Aus dieser ergibt sich z. B., daß Alkohol unter dem Druck einer Atmosphäre bis $78,4^{\circ}$ flüssig ist, daß er aber auch bei 100° noch flüssig gemacht werden kann, wenn man den Druck auf 1692,3 mm Quecksilber, d. h. auf etwa $2\frac{1}{5}$ Atmosphären steigert, während Äther, der beim Druck einer Atmosphäre den Siedepunkt $34,6$ hat, bei 100° flüssig wird unter einem Druck von 4859,0 mm Quecksilber, d. i. etwa $6\frac{1}{2}$ Atmosphären. Andererseits kann aber auch bei geringeren Drucken die Verflüssigung geschehen, wenn die Temperatur entsprechend herabgesetzt wird. So wird Wasserdampf flüssig bei dem Druck von wenig über $\frac{1}{200}$ Atmosphäre (4,58 mm Quecksilber), wenn man ihn auf 0° abkühlt; Alkohol kann bei etwa $\frac{1}{120}$ Atmosphären-Druck (6,5 mm Quecksilber) flüssig sein, wenn er auf -10° abgekühlt wird; Äther verflüssigt sich bei etwa $\frac{1}{10}$ Atmosphäre (63,0 mm Quecksilber), falls er bis -20° gekühlt wird.

Solche Erwägungen kommen auch in Betracht bei der Verflüssigung derjenigen Körper, die unter den gewöhnlichen Verhältnissen des Druckes und der Temperatur nicht flüssig werden, und die man, da sie lange nur in Gasform bekannt waren, als „permanente Gase“ zu bezeichnen pflegte. Kohlensäure z. B. müßte auf $-78,5^{\circ}$ abgekühlt werden (vgl. Tabelle S. 57), um beim Druck einer Atmosphäre flüssigen Aggregatzustand anzunehmen, und Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff und Helium bedürfen im gleichen Fall noch viel tieferer Temperaturen.

Da die Erreichung so tiefer Temperaturen schwierig ist, hilft man sich durch Einwirkung vermehrten Druckes und benutzt dabei Messungsergebnisse, wie einige in der folgenden Tabelle zusammengestellt sind.

Sättigungstemperaturen und -drucke
 für schwer zu verflüssigende Körper.

Kohlensäure	Sauerstoff	Stickstoff	Wasserstoff
mm	mm	mm	mm
-100° 119	-196° 138,4	-200° 435	$-258,07^{\circ}$ 100
Atm.	-190 319,2	-195 800	$-256,63$ 200
$-78,5^{\circ}$ 1,0	-185 560,0	-190 1370	$-255,64$ 300
-50 6,7	-183 760,0	-185 2170	$-254,85$ 400
-20 19,5	Atm.	-180 3290	$-254,18$ 500
-10 25,8	$-135,8^{\circ}$ 22,20	-170 6720	$-253,59$ 600
0 34,3	$-133,4$ 24,40	Atm.	$-253,07$ 700
10 44,4	$-131,6$ 25,85	$-195,7$ 1	$-252,78$ 760
20 56,3	$-129,6$ 27,02	$-146,6$ 38,45	$-252,59$ 800

Daraus ergibt sich z. B., daß Kohlensäure bei Eiskühlung, also bei einer nur bis 0° reichenden Temperaturerniedrigung, durch Druck von 34,3 Atmosphären flüssig wird; benutzt man zum Kühlen eine Kältemischung, deren Wirkung bis -20° herabreicht, so genügen 19,5 Atmosphären zum Verflüssigen. Für technische Zwecke wird flüssige Kohlensäure vielfach hergestellt. Man bedient sich einer Kompressionspumpe, welche das Gas in ein starkwandiges eisernes Gefäß preßt, und entzieht diesem durch eine geeignete Kühlvorrichtung die bei der Kompression dynamisch (S. 33) erzeugte Wärme; nötigenfalls kühlt man die Substanz auch noch so viel weiter ab, daß die Verflüssigung bei der mit der Kompressionspumpe erreichbaren Druckhöhe möglich ist. Wenn nachher das Eisengefäß mit seinem flüssigen Inhalt in einer Umgebung von gewöhnlicher Temperatur aufbewahrt wird, bildet sich darin natürlich der höhere Druck, welcher jetzt der Sättigung entspricht, bei 20° also gegen 60 Atmosphären.

Ein solches mit flüssiger Kohlensäure gefülltes Gefäß kann vermöge seines hohen Innendruckes wie ein aufgespeicherter Arbeitsvorrat angesehen und verwendet werden. Beispielsweise benutzt man diese Energiequelle zum Heben von Flüssigkeit. Im Restaurationsbetrieb ist es oft wünschenswert, den Inhalt eines im Keller ruhenden Fasses Bier durch eine entsprechende Röhrenleitung nach den darüber befindlichen Ausschänkräumen zu pressen. Dazu wird statt der sonst benutzten Druckpumpe besser ein Gefäß mit flüssiger Kohlensäure verwendet, nicht bloß wegen der großen Einfachheit des Verfahrens, sondern auch weil dann das Bier nicht mit Luft in Berührung kommt, sondern nur mit Kohlensäure, durch deren teilweise Aufnahme es gewinnt. Bei starken Bränden benutzt die Feuerwehr den Druck flüssiger Kohlensäure, um die Dampfspritze zu betreiben, wenn bei Alarm der nötige Dampfdruck durch die Feuerung nicht sofort erzeugt werden kann. Auch zum Treiben kleiner Motoren hat man statt der Dampfkraft oder sonstiger Druckquellen den Druck flüssiger Kohlensäure zu verwenden gesucht.

Größeren Widerstand als die Kohlensäure setzen die anderen „permanenten“ Gase der Verflüssigung entgegen. In einer erheblichen Zahl von Fällen gelang es dadurch, daß man zunächst ein Gas verflüssigte, bei welchem dies mit den verfügbaren Mitteln von Druck und Abkühlung möglich war. Dann ließ man diese Flüssigkeit unter niedrigem Druck verdampfen und erzeugte dadurch eine Verdunstungs-

kälte (vgl. S. 67), unter deren Einfluß ein schwerer zu kondensierendes Gas dem gleichen Verfahren unterworfen werden konnte. Stufenweise fortschreitend gelang es so, eine Zahl von Verflüssigungen (Sauerstoff, Kohlenoxyd, Luft, Stickstoff, Wasserstoff) fertigzubringen. Mehrfach hat man auch das zu verflüssigende Gas selbst stark zusammengedrückt, abgekühlt und dann ausströmen lassen, wobei durch die Entspannung Abkühlung entstand und Nebel- oder Flüssigkeitsbildung eintrat (Wasserstoff, Helium).

Eine sinnreiche Vereinigung der verflüssigenden Wirkung von Druck, Abkühlung und Ausdehnung findet sich in der Kältemaschine, welche 1896 von C. Linde angegeben wurde und seither fabrikmäßig zur Herstellung flüssiger Luft verwendet wird. Die in Abb. 17 dargestellte Vorrichtung hat eine als Kompressor bezeichnete Pumpe (links), welche die Luft unter starkem Druck (z. B. 65 Atmosphären) durch ein Ventil nach dem Kühler hintreibt. Hier wird ihr die beim Zusammendrücken erzeugte dynamische Wärme wieder entzogen (z. B. durch Brunnenwasser), und sie gelangt unter dem Druck der Pumpe in den Gegenstromapparat. Dieser besteht aus zwei konzentrisch ineinander steckenden Röhren von 3 und 6 cm lichter Weite. In der Figur sind sie der Einfachheit wegen geradlinig gezeichnet, in Wirklichkeit haben sie 100 m Länge und sind spiralförmig aufgewunden, wobei die einzelnen Windungen voneinander und nach außen sorgfältig isoliert sind. Durch das innere Rohr fließend wird die Luft, wie wir sogleich sehen werden, weiter abgekühlt und gelangt dann durch ein Ventil in das unter dem Gegenstromapparat gezeichnete Sammelgefäß. Da in diesem ein geringerer Druck (z. B. 22 Atmosphären) herrscht als im Kompressor, ist mit dem Übertritt in das Sammelgefäß eine Ausdehnung und nochmalige Abkühlung verbunden. Durch ein anderes Rohr tritt nun die Luft aus dem Sammelgefäß in das äußere Rohr des Gegenstromapparates, umspült und kühlt demnach dessen inneres Rohr und wird sodann dem Kompressor durch ein Ventil (links) wieder zugeführt, um den gleichen Kreislauf von neuem zu beginnen. Dabei sinkt die Temperatur sowohl im Gegenstromapparat wie auch im Sammelgefäß dauernd bis zum Eintritt eines Beharrungszustandes, und inzwischen hat im Sammelgefäß, nämlich an der kältesten Stelle der ganzen Vorrichtung, die Bildung flüssiger Luft begonnen. Unter Ansaugung einer entsprechenden Menge von Außenluft kann die Maschine stündlich mehrere Liter Flüssigkeit liefern.

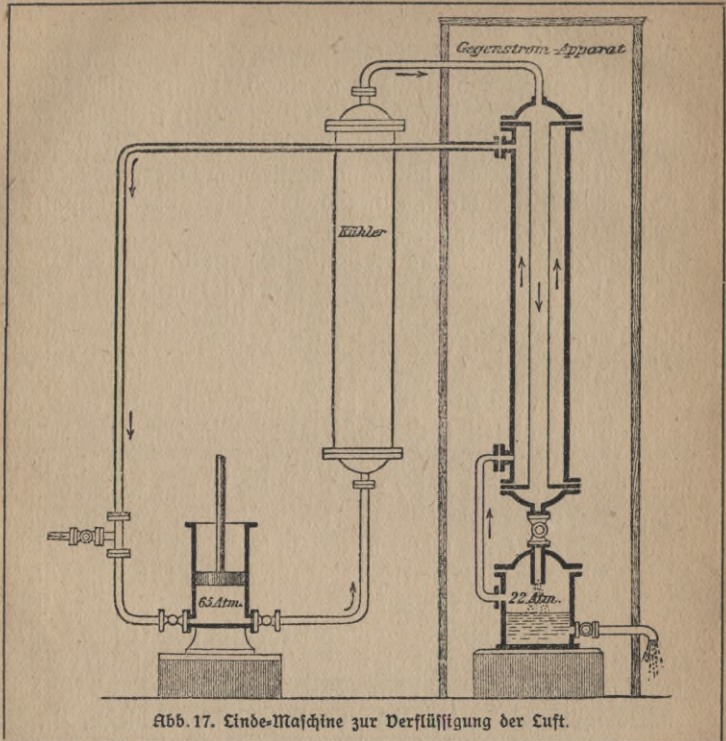


Abb. 17. Linde-Maschine zur Verflüssigung der Luft.

Die flüssige Luft hat bei Atmosphärendruck eine Sättigungstemperatur oder, was ja dasselbe ist, einen Siedepunkt von -193° . Nachdem ihre fabrikmäßige Herstellung auf verhältnismäßig billige Art gelungen ist, wird sie als bequemes Mittel zur Abkühlung oder Kühllhaltung von Lebensmitteln und sonstigen leicht verderblichen Gegenständen viel benutzt. Zur Ausführung einiger Versuche habe ich hier einen kleinen Vorrat dieser merkwürdigen Flüssigkeit. Sie befindet sich in einem Gefäß, welches soviel als möglich gegen das Eindringen von Wärme aus der Umgebung Schutz gewährt. Außen sehen wir einen Drahtkorb mit dicker Filzlage ausgefüllt und darin eine doppelwandige Glasflasche, bestehend aus zwei ineinander steckenden und am Rande zu einem einzigen Glaskörper verschmolzenen Gefäßen. Der

zwischen den Wänden liegende Hohlraum ist luftleer gemacht, und die gegen diesen Hohlraum gewendete Fläche der inneren Wand ist versilbert. Der luftleere Raum gibt mehr Wärmeschutz als eine irgendwie beschaffene und die Wärme doch immerhin leitende Substanz. Und die blanke Silberschicht soll alle etwa eintretenden Strahlen zurückwerfen, ohne daß diese eine Wärmewirkung zu äußern vermögen. In ein kleineres Doppelgefäß ähnlicher Beschaffenheit bringe ich nun zunächst eine kleine Probe der flüssigen Luft. Wir sehen sie stark sieden, denn aus der ursprünglich zimmerwarmen Gefäßwand wird ihr viel Wärme zugeführt; wenn sie allmählich das Gefäß abgekühlt und sich beruhigt hat, erscheint sie als eine blaue Flüssigkeit. Sie verdient aber jetzt eigentlich den Namen „Luft“ nicht mehr, denn bei dem vorausgegangenen Sieden hat sie ihre Zusammensetzung geändert. Sauerstoff und Stickstoff, welche in bestimmtem Verhältnis (21 zu 79 Raumteilen) gemischt die atmosphärische Luft bilden, unterscheiden sich merklich dadurch, daß, wie aus den Zahlen S. 57 ersichtlich, unter Atmosphärendruck der Sauerstoff bei $-183,0^{\circ}$, der Stickstoff bei $-195,7^{\circ}$ siedet. Stickstoff hat einen tieferen Siedepunkt, ist flüchtiger, verdampft leichter. Wenn die aus beiden Stoffen gemischte flüssige Luft siedet, so entweicht verhältnismäßig mehr Stickstoff; und die zurückbleibende Flüssigkeit wird immer reicher an Sauerstoff. Das können wir leicht auf folgende Art erkennen. Ein an einem Draht befestigtes Stückchen Watte beneße ich mit der Flüssigkeit und führe es in die farblose Gasflamme eines Bunsenbrenners; sogleich sehen wir die Watte trotz der Kälte mit lebhafter Flamme brennen, gerade wie wenn wir sie in Sauerstoff entzündet hätten. Ebenso kann man auch einen glimmenden Holzspan über die Flüssigkeit halten, um ihn sogleich durch den reichlichen Sauerstoffgehalt der Luft hell aufbrennen zu sehen. Ich fülle das inzwischen abgekühlte Gläschen nun von neuem mit flüssiger Luft und zeige durch einige Versuche die Wirkungen ihrer niedrigen Temperatur. Ein weicher Kautschukschlauch wird durch die Kälte so hart, daß ich damit wie mit einem Stück Holz klappernd auf den Tisch schlagen kann; und er zerspringt unter einem Hammerschlage wie Glas. Ein Probiergläschen mit Quecksilber zeigt in der flüssigen Luft alsbald Erstarren des Metalls (Erstarrungspunkt -39°) und umgibt sich, wenn ich es nachher in Wasser tauche, mit einer Eisschicht. Blumen und grüne Pflanzenteile erstarren in der flüssigen Luft durch Gefrieren ihres Zellstoffes zu porzellanartigen Gebilden.

Hier habe ich eine Glocke aus Blei mit eisernem Klöppel; sie klingt matt und häßlich bei Zimmertemperatur. Wenn ich aber das Blei stark abfühle, indem ich die Glocke an ihrem hölzernen Stiel in die flüssige Luft hineinhalte, gewinnt sie metallischen Klang.

Lasse ich auf ein Gefäß mit Wasser eine kleine Menge flüssiger Luft fallen, so zeigt sich Ähnliches wie bei dem später zu erwähnenden Leidenfrost'schen Versuch. Gerade wie ein Wassertropfen auf heißem Metall fährt der Lufttropfen auf dem zimmerwarmen Wasser unter lebhafter Verdampfung umher, ohne die Unterlage zu berühren. Unter ihm bildet sich eine ihn begleitende Eisschicht von wachsender Dicke, deren obere Höhlung die Form des Lufttropfens noch erkennen läßt, wenn dieser bereits verdampft ist und das leere Eisschiffchen auf der Wasserfläche zurückgelassen hat.

Bei den Verflüssigungserrscheinungen muß eine Grenze beachtet werden, die man als kritischen Zustand bezeichnet. Ein Versuch soll uns zunächst die nötige Anschauung liefern. Hier habe ich ein Gläschen von etwa 5 cm Länge und 6—8 mm Weite, halb mit flüssigem Äther gefüllt und zugeschmolzen. Der über der Flüssigkeit befindliche innere Raum ist mit luftfreiem Ätherdampf erfüllt und bei der herrschenden Temperatur gesättigt, der innere Druck ist also gleich dem Sättigungsdruck des Ätherdampfes für die jeweilige Temperatur. Dies Gläschen bringe ich in eine Probierröhre und befestige es mit dieser über einer Gasflamme, von der es langsam erhitzt wird. Damit wir alle den Vorgang verfolgen können, entwerfe ich mittels der Projektionslampe an der Wand ein vergrößertes Bild der Vorrichtung. Mit steigender Temperatur geht immer mehr Flüssigkeit in Dampf über und wächst der Druck nach Maßgabe der auf S. 56 angegebenen Sättigungswerte. Zugleich ändert sich auch die Dichte des Röhrcheninhalts, und zwar in zweierlei Sinne. Die Flüssigkeit dehnt sich beim Erwärmen aus, ohne darin durch den vermehrten Druck merklich gehindert zu werden, und ihre Dichte wird also im Verlaufe des Versuchs immer geringer. Der Dampf dagegen steht unter einem beständig wachsenden Druck und wird dadurch immer dichter. Während anfangs der Dichteunterschied zwischen Flüssigkeit und Dampf erheblich war, wird er beim Erwärmen geringer; denn die anfangs dichtere Flüssigkeit wird immer leichter, der anfangs leichtere Dampf immer dichter, und schließlich sehen wir eine Temperatur eintreten, bei welcher Flüssigkeit und Dampf gleich dicht sind. Nun ist kein Anlaß mehr, daß die

Flüssigkeit im unteren Teil des Röhrchens verbleibt, sondern sie ist jetzt gleich schwer mit dem Dampf, und beide mischen sich und erfüllen gemeinsam den ganzen Innenraum. Wir erkennen das an dem Verschwinden des Meniskus, d. h. der Grenzfläche zwischen Flüssigkeit und Dampf, und sehen nun das ganze Röhrchen mit einer einzigen gleichmäßigen Masse erfüllt. Lösche ich jetzt die Flamme, so erleben wir den ganzen Vorgang nochmals in umgekehrter Folge, der Meniskus tritt wieder auf, und die Flüssigkeit erfüllt wieder den unteren Teil des Röhrchens.

Der so von uns beobachtete kritische Zustand ist dadurch definiert, daß Flüssigkeit und Dampf gleiche Dichte haben. Die zu diesem Zustande gehörigen Werte von Temperatur, Druck und Dichte bezeichnet man als kritische. Oberhalb der kritischen Temperatur vermag die Substanz nur noch als Dampf und nicht mehr in flüssigem Zustande zu bestehen. Eine Kondensation durch Druck kann oberhalb der kritischen Temperatur nicht stattfinden. Einige Beispiele kritischer Zahlen sind die folgenden.

Kritische Temperatur und kritischer Druck.

Wasser	374°	217	Atm.	Kohlensäure	31°	73	Atm.
Chloroform	260	55	"	Sauerstoff	— 119	51	"
Alkohol	241	62	"	Kohlenoxyd	— 140	36	"
Äther	194	36	"	Stickstoff	— 146	35	"
Schweflige Säure .	157	78	"	Wasserstoff	— 241	15	"
Schwefelwasserstoff	100	89	"	Helium	— 268	2,5	"

Nachdem von dem Einfluß des Druckes auf das Verhalten der Dämpfe so vielfach die Rede war, sei darauf hingewiesen, daß es immer nur der eigene Druck eines Dampfes ist, durch den dieser beeinflusst werden kann. Befinden sich in einem abgeschlossenen Raum gleichzeitig verschiedene Gase, so übt deren jedes nach Maßgabe der Menge, in der es vorhanden ist, einen besonderen Druck (Partialdruck) auf die Wände aus. Diese haben die Summe aller Einzeldrucke auszuhalten, und auf diese Art ist also z. B. der atmosphärische Druck eine Summe vieler Einzelbeträge. Denn zu den begrenzenden Wänden gehört in diesem Fall der Erdboden, die Oberfläche aller darauf befindlichen Körper, und auch die Quecksilberfläche im offenen Schenkel des Barometers. Diese also empfängt die Summe der Einzeldrucke, welche von Stickstoff, Sauerstoff, Kohlensäure, Wasserdampf und den sonst noch in der Luft befindlichen Gasen ausgeübt werden. Die einzelnen Gase

(oder Dämpfe) stehen aber jedes für sich nur unter dem Einfluß des eigenen Druckes, und ihr Aggregatzustand wird nicht beeinflusst durch die Anwesenheit anderer gasförmiger Körper im gleichen Raume. Man kann also z. B. die in einem Gefäß befindliche gasförmige Kohlensäure nicht dadurch verflüssigen, daß man den innen herrschenden Druck durch Hineinpressen von Sauerstoff vermehrt. Das Gefäß würde vielleicht zerspringen, denn seine Wände haben die Summe der Drucke von Kohlensäure und Sauerstoff auszuhalten, aber die Kohlensäure steht nur unter ihrem eigenen Druck, und dieser kann durch das Hinzukommen des Sauerstoffs nicht geändert werden. Um von diesem Verhalten der Gase im gleichen Raum nebeneinander eine entfernte Anschauung zu gewinnen, kann man sich vorstellen, daß ein Saß gänzlich mit Kartoffeln angefüllt und unfähig sei, deren noch mehr aufzunehmen. Dann ist es aber doch noch möglich, in diesen „vollen“ Saß eine erhebliche Menge von Erbsen zu schütten, welche zwischen den Kartoffeln Platz finden. Und wenn jetzt der Saß mit Kartoffeln und mit Erbsen gefüllt ist, bietet er immer noch Raum genug zur Aufnahme zahlreicher Sandkörner.

Hieraus ergibt sich die Möglichkeit, daß eine Flüssigkeit und ihr Dampf in einem Gefäß gleichzeitig vorhanden sein und beide unter verschiedenem Druck stehen können, nämlich wenn zugleich noch andere Gase oder Dämpfe anwesend sind. Der einzelne Dampf steht dann nur unter seinem eigenen Druck, die Flüssigkeit aber unter der Summe der einzelnen Gasdrucke. Auf diese Art kann es also geschehen, daß der Dampf, welcher sich über einer Flüssigkeit befindet, geringeren Druck hat, als zu seiner Sättigung gehört, während die Flüssigkeit selbst unter höherem als dem Sättigungsdruck steht. Dann ist der Dampfraum ungesättigt und kann noch mehr Dampf aufnehmen, die Flüssigkeit aber kann nicht siedend, weil der auf ihr lastende Druck jede entstehende Dampfblase sogleich zusammenpressen würde. In solchem Falle unterbleibt denn auch die Dampfbildung im Innern der Flüssigkeit, sie findet aber an der Oberfläche statt und wird als Verdunsten bezeichnet. Voraussetzung dafür ist lediglich das Vorhandensein einer unterhalb ihrer Siedetemperatur befindlichen Flüssigkeit und darüber eines nicht von ihrem Dampfe gesättigten Raumes. Dann verdunstet die Flüssigkeit so lange, bis der mit ihr in Berührung befindliche Raum mit dem Dampf gesättigt ist.

Bei allen diesen Übergängen zwischen dem flüssigen und dampf-

förmigen Aggregatzustand findet eine ganz ähnliche Umsehung von Wärme statt, wie wir dies beim Schmelzen und Erstarren kennen lernten. Wird Flüssigkeit in Dampf verwandelt, so wird eine gewisse Wärmemenge dazu verbraucht, welche man auch hier als gebundene oder latente Wärme, und zwar als Verdampfungswärme bezeichnet; und geht Dampf in flüssigen Zustand über, so wird eine ebenso große Wärmemenge frei, als beim Verdampfen gebunden wurde, und heißt dann Kondensationswärme. Solche Vorgänge begegnen uns im täglichen Leben fortwährend. An der Oberfläche von durchnähter Kleidung findet Verdunstung statt, welche zur Übersührung des Wassers in Dampf eine erhebliche Wärmemenge verbraucht und diese aus der nächsten Umgebung entnimmt, also dem Körper entzieht. So entsteht die Verdunstungskälte, deren gesundheits-schädliche Wirkung wir in solchem Fall mit Recht zu vermeiden suchen. Auf gleichem Zusammenhang beruht das bekannte Verfahren zur Feststellung der Windrichtung, bestehend im Emporhalten eines benehten Fingers. Auf der Windseite wird die Feuchtigkeit durch die stets erneute Luft besonders schnell zum Verdampfen gebracht, und hier macht sich demnach die Verdunstungskälte fühlbarer als an den anderen Seiten.

Um die Verdunstungskälte zu zeigen, benutze ich das bereits früher (S. 21, Abb. 10) verwendete Thermoskop, diesmal mit einem etwa halbkugelig geformten Glasgefäß als Luftthermometer, und lege auf dessen flache Oberseite ein Stück Fließpapier. Sobald ich dies mit Wasser beneße, erkennen wir am Sinken der Temperatur die Verdunstungskälte, namentlich wenn ich durch Blasen den entstehenden Dampf rasch entferne und die Verdampfung beschleunige. Noch deutlicher als Wasser wirkt Alkohol oder Äther.

Ein weiterer Versuch soll uns die Verdunstungskälte noch einer anderen Flüssigkeit zeigen. Auf ein Brettchen gieße ich eine kleine Menge Wasser, lege darauf ein Uhrglas und fülle dies mit Schwefelkohlenstoff. Sodann richte ich den Luftstrom eines Blasebalges auf die Oberfläche dieser Flüssigkeit und beschleunige durch das rasche Wegblasen des entstehenden Dampfes die ohnehin schon rasche Verdunstung der flüssigen Substanz. Hierbei wird die zur Dampfbildung verbrauchte Wärme in so großer Menge und Geschwindigkeit der Umgebung entzogen, daß das Uhrglas stark abgekühlt wird und das mit ihm in Berührung befindliche Wasser gefriert. Nachdem der Schwefelkohlen-

stoff verdampft ist, kann ich das Uhrglas nicht aufheben, ohne das durch eine Eisschicht mit ihm verbundene Brettchen mitzunehmen.

Wie beim Verdampfen Wärme gebunden wird, so ist der umgekehrte Vorgang, das Verflüssigen von Dampf, mit Freiwerden von Wärme verbunden. Ich werde auch dies durch einen Versuch zeigen und dabei zugleich eine Messung der umgesetzten Wärmemenge ausführen. In einem dünnwandigen Glase habe ich gerade ein Liter Wasser von 20° . Daneben befindet sich ein Kochfläschchen mit Wasser, aus dessen verkorfter Öffnung ein zweimal gebogenes Rohr derartig hinausführt, daß es in das erstgenannte Gefäß bis nahe zum Boden eintaucht. Um dies vor Strahlungswärme zu schützen, ist zwischen beiden Gefäßen ein Pappdeckel angebracht. Nun erhitze ich das Kochfläschchen und lasse den sich bildenden Dampf in das Wasser des anderen Gefäßes eintreten, wo jede Blase unter knatterndem Geräusch sogleich zu Wasser kondensiert wird. Nach einiger Zeit höre ich mit dem Einleiten des Dampfes auf und stelle fest, daß die Temperatur des Wassers von 20 auf nahezu 38° gestiegen und zugleich das Gewicht des vor dem Versuch bereits gewogenen Gefäßes um 30 g gewachsen ist. Daraus kann die beim Kondensieren des Wasserdampfes frei gewordene Wärmemenge leicht berechnet werden, indem wir davon ausgehen, daß der im Betrage von 30 g hinzugekommene Dampf von 100° zu Wasser von 38° umgewandelt wurde und dabei so viel Wärme hergab, als nötig war, um 1000 g Wasser von 20 auf 38° zu erhitzen. Diese letztere Menge berechnet sich leicht zu 18 Kilogramm-Kalorien, und ebensoviel muß also dem Wassergefäß durch den eingeleiteten Dampf zugeführt sein. Da nun 30 g kondensiertes Wasser beim Abkühlen von 100 auf 38° eine Wärmemenge von $0,030 \times 62 = 1,86$ Kal. abgeben, so bleiben 16,14 Kal. übrig als diejenige Wärme, welche beim Verwandeln der 30 g Dampf von 100° in Wasser von 100° frei wurden. Auf 1000 g Dampf berechnet ergibt sich daraus als Kondensationswärme 538 Kal. Bei genauerer Temperaturbestimmung unter Berücksichtigung der Zehntelgrade erhält man die Verdampfungs- (oder Kondensations-) Wärme des Wassers zu 536 Kal.; d. h. um eine Wassermenge von 100° in Dampf von der gleichen Temperatur zu verwandeln, ist 5,36 mal soviel Wärme nötig, als zur Erhitzung der gleichen Wassermenge von 0 auf 100° .

In ähnlicher Weise hat man die Verdampfungswärme zahlreicher Körper bestimmt; die folgende Tabelle enthält einige der hierbei ge-

wonnenen Zahlen. Dieselben geben an, wieviel Kilogramm-Kalorien erforderlich sind, um bei der angegebenen Siedetemperatur 1 kg der Flüssigkeit in Dampf zu verwandeln.

Verdampfungswärme.

	Temperatur	Verdampfungswärme		Temperatur	Verdampfungswärme
Quecksilber	357°	68 Kal.	Kohlensäure	- 78°	142 Kal.
Schwefel	444	362	Schweflige Säure	- 11	96
Chlor	- 36	62	Ammoniak	- 33	321
Sauerstoff	- 183	51	Benzol	80	94
Stickstoff	- 196	48	Alkohol	78	202
Luft	- 193	50	Äther	35	90
Wasser	100	536			

Eine Anwendung des beim Verdampfen stattfindenden Wärmeverbrauchs wurde bereits (S. 60) erwähnt, nämlich die zur Verflüssigung schwer kondensierbarer Gase benutzte Abkühlung verdampfender Substanz, und es soll nun hier etwas ausführlicher eine solche Vorrichtung geschildert werden, die zur stufenweisen Kälteerzeugung und schließlich zur Verflüssigung von Luft gedient hat. Ein Gemisch von Kohlensäure und schwefliger Säure, die sogenannte „Pictetsche Flüssigkeit“, wurde unter Abkühlung durch eine Druckpumpe in flüssigen Zustand versetzt und in ein Sammelgefäß gepreßt, aus dessen oberem Teil andererseits der sich bildende Dampf fortwährend abgesaugt wurde. Indem die Substanz dann immer von neuem durch denselben Weg getrieben, zusammengepreßt und verflüssigt wurde und in dem Sammelgefäß verdampfte, entstand in diesem durch Verdunstungskälte eine Temperatur von $- 80^{\circ}$. Diese benutzte man zur Abkühlung eines zweiten Gases, des Stickstoffoxyduls, welches durch Pumpen ebenfalls flüssig gemacht, in ein Sammelgefäß gepreßt und als Dampf aus diesem abgesaugt wurde, um von neuem abgekühlt und verflüssigt zu werden. So entstand im zweiten Sammelgefäß eine Temperatur von $- 130^{\circ}$; diese konnte wiederum zur Kühlung eines dritten Gases dienen, welches gleichfalls in der beschriebenen Weise zusammengepreßt, verflüssigt und freigelassen wurde. Bei Anwendung von Luft erlangte man so $- 200$ bis $- 210^{\circ}$.

Wie man später durch den Gegenstromapparat die Verflüssigung der Luft ohne Zuhilfenahme der anderen Substanzen zustande brachte,

wurde bereits (S. 61) geschildert. Auch hierbei ist die Verdunstungskälte von wesentlicher Bedeutung für das Vorkühlen der zu verflüssigenden Luft, und ebenso auch bei den meisten derjenigen Versuche, durch welche wir die besonderen Eigenschaften dieser merkwürdigen Flüssigkeit kennen lernten.

Von praktischer Bedeutung ist die Verdampfungswärme bei vielen Gelegenheiten, als deren eine hier noch die Dampfheizung ganzer Gebäude genannt sei. Eine solche Anlage bietet ebenso wie die S. 7 erwähnte Wasserheizung den Vorteil, daß man von einer einzigen Feuerstelle aus die sämtlichen Räume des Hauses mit Wärme versehen kann. Die Feuerung wirkt auf die Wasserfüllung eines Dampfkessels und verwandelt einen Teil des Wassers in Dampf, wobei an diesen eine entsprechende Wärmemenge übertragen und durch die Verdampfung gebunden wird. Der so zum Träger der Wärme gewordene Dampf steigt in Röhren empor und wird nach den einzelnen Heizkörpern hingeleitet. Während aber die Röhren durch schlecht leitende Umhüllung gegen Wärmeverlust möglichst geschützt sind, hat man den Heizkörpern eine recht große Oberfläche („Rippenkörper“) und damit eine Form gegeben, vermöge deren sie zur Abgabe von Wärme an die Umgebung besonders geeignet sind. Sie heizen also die Zimmer, in welchen sie angebracht sind, und entnehmen die hierbei hergegebene Wärme aus dem Vorrat, welchen ihnen der Dampf gebracht hat. Dieser hinwiederum ist in gesättigtem Zustand emporgestiegen und kann Wärme nur hergeben unter gleichzeitiger Umwandlung in Wasser. Dem Dampf wird also seine mitgeführte, gebundene Wärme entzogen, und indem er sie an die zu heizenden Räume abgibt, wird er zu Wasser, welches in den Kessel hinabfließt, um alsbald mit neuem Wärmevorrat beladen als Dampf den Aufstieg zu wiederholen.

Fünftes Kapitel.

Verhalten des Wasserdampfes in der Atmosphäre. Dampf- und andere Wärmekraftmaschinen.

Die im vorigen Kapitel geschilderten Beziehungen zwischen dem flüssigen und dem dampfförmigen Aggregatzustand gewinnen für unser Leben und Befinden erhöhte Bedeutung im Verhalten der atmosphärischen Feuchtigkeit. Von dieser soll zunächst die Rede sein. Das Vorhandensein von Wasserdampf in der Luft erkennen wir jedesmal bei seiner Verdichtung zu flüssiger oder fester Form, also aus dem

Auftreten von Regen, Schnee, Hagel, Nebel und Wolken ebenso wie beim Beschlagen der Fenster oder am Sichtbarwerden unseres Hauches in kalter Luft. Und andererseits bemerken wir bei lange dauerndem Sonnenschein das Austrocknen des Bodens und der Pflanzen und können daraus schließen, daß das verdunstete Wasser als Dampf in die Luft übergegangen ist. Solche Änderungen im Aggregatzustand der atmosphärischen Feuchtigkeit finden fortwährend statt, und ihnen haben wir vorzugsweise die Mannigfaltigkeit der Witterungserrscheinungen zuzuschreiben. Sowohl am Boden wie auch in der Höhe wechselt beständig die Menge des vorhandenen Dampfes, und wir vermögen darum keineswegs aus der an einer Stelle vorhandenen und gemessenen Dampfmenge etwa einen Schluß zu ziehen auf diejenige Menge, welche in der Nähe oder über dem Beobachtungsorte sich befinden mag. Eine solche Erwägung erscheint nötig, weil die an einer Stelle vorhandene Dampfmenge gewöhnlich durch diejenige Quecksilberhöhe, welche den gleichen Druck ausübt, gemessen und bezeichnet wird, und weil diese Ausdrucksweise leicht zu der Meinung führen kann, als bilde der Wasserdampf eine gesonderte Atmosphäre von solcher Art, wie man es für den Sauerstoff oder Stickstoff ja annehmen darf. Diese Gase üben in der That am Boden Drucke aus, welche der über der Beobachtungsstelle vorhandenen Menge des einzelnen Gases entsprechen. Aber diese Luftbestandteile sind auch in unveränderlicher Menge vorhanden, während der Wasserdampf durch Bilden und Verschwinden von Wolken, durch Niederschläge usw. beständigen Änderungen seines Bestandes unterworfen ist.

Indem wir den an einer einzelnen Stelle herrschenden Dampfgehalt der Luft angeben, geschieht es, wie gesagt, durch Nennung desjenigen Quecksilberdrucks, welcher dem Einzeldruck des Wasserdampfes gleichkommt, oder desjenigen Theiles des Barometerstandes, welcher vom örtlichen Einfluß des Wasserdampfes herrührt. Diese in Millimeter angegebene Größe heißt Dampfdruck oder absolute Luftfeuchtigkeit, und nahezu die gleiche Zahl gibt auch an, wieviel Gramm Wasserdampf in einem Kubikmeter Luft enthalten sind. Bezieht man das Gewicht des Dampfes nicht auf die Raumeinheit, sondern auf die Gewichtseinheit der Luft, welcher der Dampf beigemischt ist, so kann man den Feuchtigkeitsgehalt auch als spezifische Feuchtigkeit oder als Mischungsverhältnis angeben, nämlich als diejenige Zahl von Grammen Wasserdampf, die in einem Kilogramm feuchter Luft ent-

halten oder einem Kilogramm trockener Luft beigemischt ist. Aus den im vorigen Kapitel gemachten Angaben (S. 56) geht bereits hervor, wieviel Dampf höchstens bei den verschiedenen Temperaturen in einem Raume bestehen kann. Da nun das Vorhandensein anderer Gase im gleichen Raum keinen Einfluß auf den Dampf ausübt, sind jene Zahlen ohne weiteres auch für den Sättigungsdruck desjenigen Dampfes gültig, welcher der atmosphärischen Luft beigemischt ist, und wir können also die dort gewonnene Anschauung sogleich auf die atmosphärische Feuchtigkeit anwenden. Die Sättigungstemperaturen und -drücke für Wasserdampf sind in der folgenden Tabelle nochmals zusammengestellt, einerseits beschränkt auf die in unserem Klima vorkommenden Lufttemperaturen, andererseits innerhalb dieser Grenzen ausführlicher. Die Werte des Sättigungsdruckes unterhalb 0° gelten für Eis.

Sättigungstemperaturen und -drücke des Wasserdampfes.

Temperatur	Druck	Temperatur	Druck	Temperatur	Druck
-20°	0,77 mm	-2°	3,88 mm	12°	10,52 mm
-15	1,24	-1	4,22	13	11,23
-14	1,36	0	4,58	14	11,99
-13	1,49	1	4,93	15	12,79
-12	1,63	2	5,29	16	13,64
-11	1,78	3	5,68	17	14,53
-10	1,95	4	6,10	18	15,48
-9	2,13	5	6,54	19	16,48
-8	2,32	6	7,01	20	17,54
-7	2,53	7	7,51	21	18,66
-6	2,76	8	8,05	22	19,83
-5	3,01	9	8,61	23	21,07
-4	3,28	10	9,21	24	22,38
-3	3,57	11	9,85	25	23,76

Auch hier können wir wieder sagen: jeder der angegebenen Sättigungsdrücke bezeichnet den höchsten Druck, welchen der Dampf bei der daneben genannten Temperatur haben kann; und jede der angegebenen Sättigungstemperaturen bezeichnet die niedrigste Temperatur, bei welcher der daneben genannte Druck noch bestehen kann. Wird dampfhaltige Luft erwärmt, so wächst ihre Fähigkeit zur Aufnahme von Wasserdampf. Wird ihr dagegen Wärme entzogen, so sinkt ihre Temperatur zunächst bis zu derjenigen Grenze, für welche die vorhandene Dampfmenge gerade die Sättigung bedeutet; bei weiterer Wärmeentziehung kann die ganze Dampfmenge nicht mehr als solche weiter-

bestehen, sondern beginnt sich zu Wasser (oder zu Eis, wenn die Temperatur unter 0° liegt) zu verdichten. Darum wird jede der Temperaturen in der vorstehenden Tabelle auch als Taupunkt für den danebenstehenden Dampfdruck bezeichnet, und hiermit ist ausgedrückt, daß die Kondensation (Bildung von Tau, Reif, Nebel, Wolken, Regen, Schnee) eintritt, wenn bei einem gegebenen Dampfdruck die Luft bis zu der entsprechenden Sättigungstemperatur abgekühlt ist, und die Wärmeentziehung fortgesetzt wird.

Für die Gestaltung des Wetters und demnach auch für unser Miterleben der Witterung ist natürlich die Kondensation samt den Vorbedingungen ihres Eintritts von besonderer Bedeutung, und demnach hat man für den Feuchtigkeitsgehalt der Luft noch eine besondere Bezeichnungsweise im Gebrauch, bei welcher ausdrücklich erkennbar ist, wie weit der tatsächliche Zustand der Luft einer Kondensation günstig ist. Man drückt nämlich die vorhandene Dampfmenge in Prozenten derjenigen Menge aus, welche bei der herrschenden Temperatur zur Sättigung nötig wäre, und bezeichnet so als relative Feuchtigkeit das Verhältnis der wirklichen zur höchstmöglichen Dampfmenge. Bei völlig gesättigter Luft beträgt die relative Feuchtigkeit 100% , und dies bedeutet, daß der Taupunkt erreicht ist; bei 50% ist nur die Hälfte der Dampfmenge vorhanden, welche zur Sättigung gehörte, und bei 0% ist die Luft ganz trocken. Als Beispiel sei erwähnt, daß in Berlin die relative Feuchtigkeit durchschnittlich während des Jahres 74% beträgt, und daß die Monatsmittel zwischen 84 (Dezember und Januar) und 64 (Mai) Prozent liegen; in Helgoland fand man im Jahresmittel 84 , als extreme Monatswerte 90 (Januar) und 78 (Mai) Prozent.

Die Messung der Luftfeuchtigkeit erfolgt mittels der als Hygrometer oder Psychrometer bezeichneten Apparate. Dabei kann man die Eigenschaft mancher organischen Körper benutzen, welche bei Änderungen der Luftfeuchtigkeit Gestaltsänderungen zeigen. Es beruht hierauf die Anwendung des Haarhygrometers (Abb. 18), in welchem ein entfettetes Menschenhaar ausgespannt ist und durch seine wechselnde Länge die schwankende relative Luftfeuchtigkeit erkennen läßt. Das obere Ende des Haares ist in einem Rahmen befestigt, das untere ist um eine leicht drehbare Achse geschlungen und an seinem herabhängenden Ende mit einem kleinen Metallgewicht belastet. Wird das Haar länger oder kürzer, so dreht sich die Achse samt dem an ihr be-

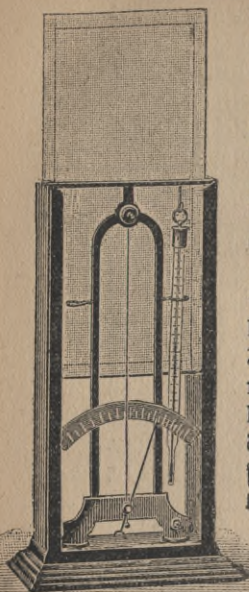


Abb. 18. Haarhygrometer.

festigten Zeiger, und dieser bezeichnet an der Teilung die vorhandene relative Feuchtigkeit. Um den Apparat wenigstens für die hauptsächlich vorkommenden hohen Feuchtigkeiten zu prüfen, bedient man sich eines mit Musselin bespannten Rahmens, der mit Wasser benetzt und samt dem ganzen Instrument in ein Glasgehäuse eingeschlossen wird. Dann verdunstet von der großen Oberfläche des nassen Gewebes so viel Feuchtigkeit, daß der Innenraum alsbald gesättigt ist und also 100% relativer Feuchtigkeit enthält. Zeigt das Instrument hierbei eine andere Zahl als 100, so wird durch eine einfache Vorrichtung der Zeiger in die richtige Stellung gebracht. Dem gleichen Zweck dient das in Abb. 19 dargestellte Taupunkt- oder Kondensationshygrometer. In einem Gefäß, dessen Außenseite eine fein polierte Metallfläche enthält, befindet sich Äther, der mittels durchgesaugter Luft zum Verdampfen gebracht wird. Die erzeugte Verdunstungskälte bewirkt einen Beschlag feiner Wassertröpfchen auf der blanken Außenfläche, sobald deren Temperatur auf den Taupunkt der umgebenden Luft gesunken ist. Man kann an dem innen befindlichen Thermometer diesen Taupunkt ablesen und dann aus unserer vorstehenden Tabelle (S. 72) sowohl die absolute wie auch die relative Feuchtigkeit herleiten, letztere unter Zuhilfenahme einer in der umgebenden Luft vorgenommenen Temperaturmessung. Die Ablesung des inneren Thermometers muß freilich mit aller Vorsicht geschehen, damit nicht etwa durch den Atem des Beobachters das Ergebnis der Feuchtigkeitsmessung beeinträchtigt wird. Man bedient sich daher zweckmäßig eines Fernrohrs, um aus genügendem Abstand das Entstehen des Beschlages zu beobachten, und tut außerdem gut, auch diejenige Temperatur abzulesen, bei welcher der Beschlag wieder verschwindet, um als Mittel beider Ablesungen den Taupunkt zu berechnen. Ist beispielsweise bei 15° Lufttemperatur ein Taupunkt von 10° gefunden, so beträgt der Dampfdruck (die absolute Feuchtigkeit) 9,21 mm; und da bei 15° der

festigten Zeiger, und dieser bezeichnet an der Teilung die vorhandene relative Feuchtigkeit. Um den Apparat wenigstens für die hauptsächlich vorkommenden hohen Feuchtigkeiten zu prüfen, bedient man sich eines mit Musselin bespannten Rahmens, der mit Wasser benetzt und samt dem ganzen Instrument in ein Glasgehäuse eingeschlossen wird. Dann verdunstet von der großen Oberfläche des nassen Gewebes so viel Feuchtigkeit, daß der Innenraum alsbald gesättigt ist und also 100% relativer Feuchtigkeit enthält. Zeigt das Instrument hierbei eine andere Zahl als 100, so wird durch eine einfache Vorrichtung der Zeiger in die richtige Stellung gebracht. Dem gleichen Zweck dient das in Abb. 19 dargestellte Taupunkt- oder Kondensationshygrometer. In einem Gefäß, dessen Außenseite eine fein polierte Metallfläche enthält, befindet sich Äther, der mittels durchgesaugter Luft zum Verdampfen gebracht wird. Die erzeugte Verdunstungskälte bewirkt einen Beschlag feiner Wassertröpfchen auf der blanken Außenfläche, sobald deren Temperatur auf den Taupunkt der umgebenden Luft gesunken ist. Man kann an dem innen befindlichen Thermometer diesen Taupunkt ablesen und dann aus unserer vorstehenden Tabelle (S. 72) sowohl die absolute wie auch die relative Feuchtigkeit herleiten, letztere unter Zuhilfenahme einer in der umgebenden Luft vorgenommenen Temperaturmessung. Die Ablesung des inneren Thermometers muß freilich mit aller Vorsicht geschehen, damit nicht etwa durch den Atem des Beobachters das Ergebnis der Feuchtigkeitsmessung beeinträchtigt wird. Man bedient sich daher zweckmäßig eines Fernrohrs, um aus genügendem Abstand das Entstehen des Beschlages zu beobachten, und tut außerdem gut, auch diejenige Temperatur abzulesen, bei welcher der Beschlag wieder verschwindet, um als Mittel beider Ablesungen den Taupunkt zu berechnen. Ist beispielsweise bei 15° Lufttemperatur ein Taupunkt von 10° gefunden, so beträgt der Dampfdruck (die absolute Feuchtigkeit) 9,21 mm; und da bei 15° der

Sättigungsdruck 12,79 mm sein würde, so ist die relative Feuchtigkeit $100 \times 9,21/12,79 = 72\%$.

Größere Sicherheit der Feuchtigkeitsmessung gewährt das Augustsche Psychrometer, welches in seiner älteren, einfachen Gestalt durch Abb. 20 dargestellt ist. Es besteht aus zwei gleichen, empfindlichen

Thermometern, deren eines, das „feuchte“, an seinem Quecksilbergefäß einen Überzug aus Musselin trägt, welcher durch Woll-

fäden mit einem Wassernäpfchen verbunden ist und dadurch stets feucht erhalten wird. Indem von der feuchten Stofffläche das Wasser verdunstet, bewirkt die Verdunstungskälte, daß das feuchte Thermometer tiefer steht als das trockene, und dieser Unterschied, den man die „psychrometrische Differenz“ nennt, kann als Maß für die Feuchtigkeit der umgebenden Luft

dienen. Denn je weiter die Luft von der Sättigung entfernt ist, um so mehr Dampf kann sie noch aufnehmen, und um so größer ist die Verdunstungskälte und die psychrometrische Differenz. In neuerer Zeit pflegt man den Apparat als „Aspirationspsychrometer“ zu gestalten und so gegen Strahlung zu schützen. Es wird nämlich die Kugel jedes der beiden Thermometer im Innern einer außen blank polierten und unten offenen Metallröhre angebracht, durch welche mittels geeigneter Vorrichtung ein Strom angesaugter Luft getrieben wird. Soweit die Sonnenstrahlung nicht von der polierten äußeren Röhrenwand zurückgeworfen wird und also den Stand des Thermometers über die Lufttemperatur emporzutreiben beginnt, wird dieser zugestrahlte Wärmeüberschuß sogleich der Thermometerkugel von der rasch vorübergeführten Luft entzogen, so daß das Instrument von der Temperatur der Außenluft nicht abzuweichen vermag.

Dienachfolgenden, als Psychrometertafeln bezeichneten Tabellen können zur Herleitung der Feuchtigkeit aus den Angaben des trocke-



Abb. 19. Kondensationshygrometer.

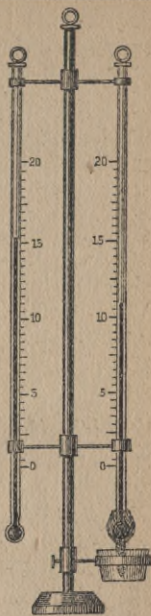


Abb. 20. Psychrometer.

nen und des feuchten Thermometers dienen. Nennen wir die Temperaturen, welche diese beiden Instrumente zeigen, t und f , also die psychrometrische Differenz $t - f$, und bedeutet ferner m_f den der Temperatur f entsprechenden Sättigungsdruck, a die absolute, r die relative Feuchtigkeit, T den Taupunkt und b den Barometerstand, so dient zur Berechnung der absoluten Luftfeuchtigkeit die Formel

$$a = m_f - \frac{1}{2} (t - f) \frac{b}{755}.$$

Der letzte Faktor $b/755$ kann auch wegbleiben, solange es sich um mittlere Barometerstände handelt; er kommt dagegen bei kleineren Luftdrücken in Betracht, wie sie z. B. der Luftschiffer zu beobachten hat. In den nachfolgenden Tabellen ist der Faktor $b/755$ vernachlässigt. Für negative Temperaturen sind die dem Eisdampf entsprechenden Sättigungsdrücke eingesetzt. Bei derjenigen Feuchtigkeit, welche im Beispiel vorher angenommen wurde, zeigt das trockene Thermometer 15° , das feuchte $12,2^\circ$; die psychrometrische Differenz ist also $2,8^\circ$, und die Tabelle ergibt die absolute Feuchtigkeit zu $9,2$ mm, die relative zu 72% und den Taupunkt zu $10,1^\circ$.

Die Apparate und Methoden zur Bestimmung der Luftfeuchtigkeit sind um so wichtiger, als wir nicht die Fähigkeit haben, unmittelbar und ohne Meßinstrumente den Feuchtigkeitszustand der uns umgebenden Luft zu erkennen. Nur ausnahmsweise wirkt dieser auf unser Empfinden, und auch dann pflegt die Feuchtigkeit nicht zu bewusster Wahrnehmung zu gelangen. Wenn nämlich die relative Feuchtigkeit sehr groß ist und die Luft also kaum noch Dampf aufzunehmen vermag, unterbleibt die an der Oberfläche unseres Körpers gewöhnlich stattfindende Verdunstung, und zugleich fällt auch die entsprechende Verdunstungskälte weg. Es verbleibt also bei gehinderter Verdampfung dem Körper die Wärme, welche er gewöhnlich zur Dampfbildung herzugeben pflegt, und die Folge ist ein unbehagliches Gefühl der Schwüle sowie starke Absonderung von Schweiß. Umgekehrt empfinden wir in sehr trockener Luft die verstärkte Verdunstung als Abkühlung und haben es beispielsweise dieser Ursache zuzuschreiben, wenn im Gebirge, wo die relative Feuchtigkeit erheblich geringer als im Tal zu sein pflegt, das Wandern uns durch erfrischende Kühle und durch Ausbleiben der Schweißbildung so fühlbar erleichtert wird. In beiden Fällen können wir aus der bloßen Temperaturbeobachtung keine Erklärung unseres Empfindens herleiten, sondern gewinnen dafür ein Verständnis erst bei Beachtung der Luftfeuchtigkeit.

Ψνχρομετρηταφελ.

t	Ψνχρομετρητικη Διφφερην3 (t - f)								
	0°			1°			2°		
	a	r	T	a	r	T	a	r	T
-20°	0,8mm	100%	-20°	—	—	—	—	—	—
-15	1,3	100	-15	0,6mm	55%	-22,0°	—	—	—
-10	2,0	100	-10	1,3	66	-14,5	0,6mm	33%	-22,0°
-9	2,2	100	-9	1,5	68	-13,2	0,8	37	-19,8
-8	2,3	100	-8	1,7	70	-12,0	1,0	42	-17,8
-7	2,6	100	-7	1,8	72	-10,7	1,2	45	-15,9
-6	2,8	100	-6	2,1	74	-9,5	1,3	48	-14,2
-5	3,0	100	-5	2,3	75	-8,3	1,6	51	-12,6
-4	3,3	100	-4	2,5	77	-7,1	1,8	54	-11,1
-3	3,6	100	-3	2,8	78	-5,9	2,0	57	-9,7
-2	3,9	100	-2	3,1	79	-4,8	2,3	59	-8,2
-1	4,2	100	-1	3,4	80	-3,7	2,6	61	-6,9
0	4,6	100	0	3,7	81	-2,5	2,9	63	-5,6
1	4,9	100	1	4,1	83	-1,4	3,2	65	-4,3
2	5,3	100	2	4,4	84	-0,4	3,6	68	-3,0
3	5,7	100	3	4,8	84	0,6	3,9	69	-1,9
4	6,1	100	4	5,2	85	1,7	4,3	70	-0,8
5	6,5	100	5	5,6	86	2,8	4,7	72	0,3
6	7,0	100	6	6,0	86	3,9	5,1	73	1,5
7	7,5	100	7	6,5	87	4,9	5,5	74	2,6
8	8,0	100	8	7,0	87	6,0	6,0	75	3,8
9	8,6	100	9	7,5	88	7,0	6,5	76	4,9
10	9,2	100	10	8,1	88	8,1	7,0	76	6,1
11	9,8	100	11	8,7	88	9,2	7,6	77	7,2
12	10,5	100	12	9,3	89	10,2	8,1	78	8,3
13	11,2	100	13	10,0	89	11,3	8,8	79	9,4
14	11,9	100	14	10,7	90	12,3	9,5	79	10,5
15	12,7	100	15	11,4	90	13,3	10,1	80	11,6
16	13,6	100	16	12,2	90	14,4	10,9	81	12,6
17	14,4	100	17	13,1	90	15,4	11,7	81	13,7
18	15,4	100	18	14,0	91	16,4	12,6	82	14,8
19	16,4	100	19	14,9	91	17,5	13,4	82	15,9
20	17,4	100	20	15,9	91	18,5	14,4	83	16,9
21	18,5	100	21	16,9	91	19,5	15,4	83	18,0
22	19,7	100	22	18,0	92	20,6	16,4	83	19,0
23	20,9	100	23	19,2	92	21,6	17,5	84	20,1
24	22,2	100	24	20,4	92	22,6	18,7	84	21,1
25	23,5	100	25	21,7	92	23,6	19,9	84	22,2

t	Psychrometrische Differenz (t - f)								
	3°			4°			5°		
	a	r	T	a	r	T	a	r	T
-7°	0,5 mm	18%	-25,2°	—	—	—	—	—	—
-6	0,7	22	-21,9	—	—	—	—	—	—
-5	0,8	28	-19,2	—	—	—	—	—	—
-4	1,1	32	-16,9	0,3 mm	11%	-28,3°	—	—	—
-3	1,3	36	-14,8	0,6	16	-23,6	—	—	—
-2	1,5	39	-12,8	0,8	20	-20,0	—	—	—
-1	1,8	43	-11,0	1,0	24	-17,2	—	—	—
0	2,1	46	-9,4	1,3	28	-14,6	0,5 mm	12%	-24,0°
1	2,4	49	-7,8	1,6	32	-12,4	0,8	16	-19,8
2	2,7	52	-6,3	1,9	36	-10,5	1,1	21	-16,6
3	3,1	54	-4,8	2,2	39	-8,7	1,4	25	-13,9
4	3,4	56	-3,6	2,6	42	-6,9	1,7	28	-11,5
5	3,8	58	-2,3	2,9	45	-5,4	2,1	32	-9,4
6	4,2	60	-1,1	3,3	47	-4,0	2,4	35	-7,6
7	4,6	61	0,0	3,7	49	-2,7	2,8	37	-6,0
8	5,0	63	1,3	4,1	51	-1,4	3,2	40	-4,5
9	5,5	64	2,5	4,5	53	-0,1	3,6	42	-3,0
10	6,0	65	3,8	5,0	54	0,2	4,0	44	-1,6
11	6,5	66	5,0	5,5	56	2,5	4,5	46	-0,2
12	7,1	68	6,2	6,0	57	3,8	5,0	48	1,2
13	7,7	69	7,3	6,6	59	5,3	5,5	49	2,6
14	8,3	70	8,5	7,2	60	6,3	6,1	51	4,0
15	9,0	70	9,7	7,8	61	7,6	6,7	52	5,3
16	9,7	71	10,8	8,5	62	8,8	7,3	54	6,6
17	10,4	72	12,0	9,2	63	10,0	8,0	55	7,9
18	11,2	73	13,1	9,9	64	11,2	8,7	56	9,2
19	12,1	74	14,2	10,7	65	12,3	9,4	57	10,4
20	13,0	74	15,3	11,6	66	13,5	10,2	59	11,6
21	13,9	75	16,4	12,4	67	14,7	11,1	60	12,8
22	14,9	76	17,5	13,4	68	15,8	12,0	61	14,0
23	15,9	76	18,5	14,4	69	16,9	12,9	61	15,2
24	17,0	77	19,6	15,4	69	18,0	13,9	62	16,4
25	18,2	77	20,7	16,5	70	19,1	14,9	63	17,5

t	Ψηδρονιμετρισε Διφερενζ (t - f)								
	6°			7°			8°		
	a	r	T	a	r	T	a	r	T
3°	0,6mm	10%	-23,0°	—	—	—	—	—	—
4	0,9	15	-18,7	—	—	—	—	—	—
5	1,2	19	-15,3	0,4mm	6%	-27,1°	—	—	—
6	1,6	23	-12,5	0,7	10	-20,9	—	—	—
7	1,9	26	-10,3	1,1	14	-16,7	—	—	—
8	2,3	28	- 8,3	1,4	18	-13,6	0,6mm	7%	-23,2°
9	2,7	31	- 6,5	1,8	21	-11,1	0,9	11	-18,4
10	3,1	34	- 4,8	2,2	24	- 8,9	1,3	14	-14,7
11	3,5	36	- 3,2	2,6	26	- 6,9	1,7	17	-11,8
12	4,0	38	- 1,7	3,0	29	- 5,0	2,1	20	- 9,4
13	4,5	40	- 0,2	3,5	31	- 3,3	2,5	23	- 7,1
14	5,0	42	1,3	4,0	33	- 1,7	3,0	25	- 5,1
15	5,6	44	2,8	4,5	36	- 0,1	3,5	27	- 3,3
16	6,2	45	4,2	5,1	37	1,5	4,0	30	- 1,6
17	6,8	47	5,6	5,7	39	3,1	4,6	32	0,0
18	7,5	48	7,0	6,3	41	4,5	5,2	34	1,7
19	8,2	50	8,3	7,0	42	6,0	5,8	35	3,3
20	8,9	51	9,6	7,7	44	7,4	6,5	37	4,9
21	9,7	52	10,9	8,4	46	8,7	7,2	39	6,4
22	10,6	54	12,1	9,2	47	10,1	7,9	40	7,8
23	11,4	55	13,4	10,1	48	11,4	8,7	42	9,2
24	12,4	56	14,6	11,0	49	12,7	9,6	43	10,6
25	13,4	57	15,8	11,9	50	13,9	10,4	44	12,0

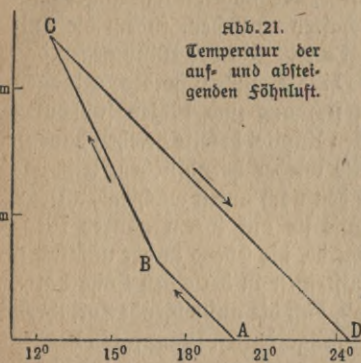
t	Ψηδρονιμετρισε Διφερενζ (t - f)								
	9°			10°			11°		
	a	r	T	a	r	T	a	r	T
10°	0,4mm	4%	-26,4°	—	—	—	—	—	—
11	0,8	8	-20,0	—	—	—	—	—	—
12	1,2	11	-15,7	—	—	—	—	—	—
13	1,6	14	-12,4	0,7mm	6%	-21,6°	—	—	—
14	2,0	17	- 9,7	1,1	9	-16,6	—	—	—
15	2,5	19	- 7,3	1,5	12	-12,8	0,6mm	4%	-23,0°
16	3,0	22	- 5,1	2,0	15	- 9,9	1,0	8	-17,2
17	3,5	24	- 3,2	2,5	17	- 7,3	1,5	10	-13,1
18	4,1	26	- 1,4	3,0	20	- 5,0	2,0	13	- 9,9
19	4,7	28	0,3	3,6	22	- 3,0	2,5	15	- 7,2
20	5,3	30	2,1	4,2	24	- 1,1	3,1	18	- 4,8
21	6,0	32	3,7	4,8	25	0,7	3,7	20	- 2,7
22	6,7	34	5,3	5,5	28	2,5	4,3	22	- 0,8
23	7,4	35	6,9	6,2	29	4,2	5,0	24	1,2
24	8,2	37	8,4	6,9	31	5,9	5,7	25	3,0
25	9,1	38	9,8	7,7	33	7,4	6,4	27	4,8

Eine praktische Anwendung von Feuchtigkeitsmessungen findet statt, wenn bei drohendem Nachtfrost festgestellt wird, wie tief voraussichtlich das Thermometer während der bevorstehenden Nacht sinken wird. Bekanntlich ist es möglich, wertvolle Pflanzungen, wie Weinberge und Obstgärten, einigermaßen gegen die schädigende Wirkung der Frühjahrsfröste zu schützen, indem man durch Bedeckung mit Stroh, Matten und dergl. oder durch Erzeugung von Rauchwolken die Wärmeausstrahlung gegen den Himmel verhindert. Um aber im Einzelfall zu wissen, ob solche Maßregeln erforderlich sind, ist es wünschenswert, das zu erwartende nächtliche Temperaturminimum rechtzeitig am Tage beurteilen zu können. Hierzu dient die Erwägung, daß die Luft bei fortschreitender Abkühlung ihren Taupunkt erreicht, und daß hierauf bei weiterer Wärmeentziehung ein Teil des Dampfes kondensiert wird unter Freiwerden derjenigen Wärmemenge, welche bei der Dampfbildung gebunden wurde. Aus der S. 69 mitgetheilten Tabelle geht hervor, wie bedeutend diese Menge gerade beim Wasser ist, und indem nun der bis zum Taupunkt abgefühlten, d. h. gesättigten Luft die frei werdende Kondensationswärme zugeführt wird, ist damit das weitere Sinken der Temperatur nahezu verhindert. Die Erfahrung bestätigt, daß die Lufttemperatur nicht erheblich unter den Taupunkt zu sinken pflegt. Man braucht also nur den Taupunkt der gerade am Beobachtungsorte befindlichen Luft zu bestimmen, um die voraussichtliche Grenze zu kennen, bis zu welcher diese Luft sich höchstens abkühlen wird. Natürlich ist bei windigem Wetter, welches beständig neue Luftmassen heranzführt, eine solche Bestimmung des Taupunktes bedeutungslos, aber in Wirklichkeit sind es gerade die windstillen Nächte mit klarem Himmel und hohem Luftdruck, welche die stärkste Abkühlung zu bringen pflegen, und bei solcher Wetterlage kann es recht nützlich sein, am Nachmittag oder Abend den Taupunkt zu bestimmen und danach die etwa erforderlichen Maßregeln zu treffen.

Eine andere Witterungserscheinung, bei welcher die Feuchtigkeit der Luft eine wichtige Rolle spielt, ist der Föhn. So nennt man in der Nordschweiz einen vom Gebirge her in das Alpenvorland herabstürzenden heißen und trockenen Südwind. Der Name Föhn wird auf das lateinische Favonius zurückgeführt, obwohl dies Wort den Westwind bezeichnet. Im Binnenlande hat indessen die Richtung des Windes geringere Bedeutung als seine Temperatur und Feuchtigkeit, so daß

man es wohl verstehen kann, wenn die im rauhen Alpengebiet angesiedelten Römer durch den warmen Föhn an die milden westlichen Frühlingswinde ihrer Heimat erinnert wurden. Für die Föhnluft charakteristisch ist ihre hohe Temperatur, verbunden mit geringer relativer Feuchtigkeit, und diese Eigenschaften entstehen, indem die Luft das Gebirge zu überschreiten genötigt wird. Wo der Wind gegen das Gebirge weht und die Luftmassen also hinaufgeführt werden, gelangen sie unter geringeren Druck, dehnen sich aus und fühlen sich dabei dynamisch ab (wie wir dies im zweiten Kapitel bereits gesehen haben). Wenn sie dann auf der anderen Seite wieder herabfließen, tritt das Umgekehrte ein, die Luft wird durch den nach unten wachsenden Druck dynamisch erwärmt und erreicht, falls sie auf ihrem ganzen Wege nicht bis zum Taupunkt abgekühlt wurde, die Ebene in der nämlichen Temperatur, welche sie vor dem Aufsteigen in derselben Höhe hatte. Ist dagegen der Dampfgehalt so groß, daß die aufsteigende Luft ihren Taupunkt erreicht und einen Teil des mitgeführten Dampfes in Wasser verwandelt, so wird dabei eine entsprechende Menge gebundener Wärme frei, und die im Aufsteigen eintretende Abkühlung ist demgemäß geringer. Während ungesättigt aufsteigende Luft auf je 100 m um etwa 1° kälter wird, beträgt nach Erreichung der Sättigung die Abkühlung bei weiterem Aufsteigen nur etwa halb so viel. Trotzdem würde die Luft auch in diesem Fall wieder mit ihrer ursprünglichen Temperatur auf der anderen Gebirgsseite unten anlangen, wenn sie alle entstandenen Wassertröpfchen mit sich führen könnte und bei deren Verdampfung im Absteigen die gleiche Wärmemenge hergeben müßte, die sie durch die Kondensation im Aufsteigen empfangen hat. Aber diese Voraussetzung trifft nicht zu, denn die Wassertropfen fallen zum großen Teil als Regen heraus, benetzen das Gebirge und lassen der Luft die Kondensationswärme. Um diese bereichert, dagegen um das herausgefallene Regenwasser ärmer kommt dann die Luft am Fuße des Gebirges an; sie muß demnach wärmer und trockener sein als vorher. Ein Beispiel liefert Abb. 21, in welcher die Temperatur nach rechts und die Höhe nach oben hin gezählt ist, so daß wir Temperatur und Feuchtigkeit einer Luftmasse beim Überschreiten eines Gebirges genau verfolgen können. Vor dem Aufsteigen sei im Meeresniveau die Temperatur 20° (Punkt A); wir nehmen eine absolute Feuchtigkeit von 15 mm an, also nicht gesättigte Luft, sondern solche von 86% relativer Feuchtigkeit, und demnach sinkt die Temperatur im Steigen

zunächst wie bei trockener Luft und beträgt in 300 m Höhe 17° (Punkt B). Hier ist Sättigung und Taupunkt erreicht, es beginnt die Bildung von Wassertropfen, und im weiteren Aufsteigen ist die



Abkühlung so viel langsamer, daß bei 1200 m Höhe die Luft noch 12,5° warm ist (Punkt C) und die entsprechende Sättigungsmenge mit 10,9 mm Dampfdruck enthält. Wenn damit die Kammhöhe des Gebirges erreicht ist, so folgt nun das Absteigen mit der vom Dampfgehalt nicht beeinflussten Erwärmung um 1° auf je 100 m, und beim Wiedereintreffen im Meeresniveau hat die Luft eine Temperatur von 24,5° (Punkt D), ihre absolute Feuchtigkeit beträgt noch immer

10,9 mm, die relative aber ist unter 50% gesunken. Solche trockenen, heißen Winde sind natürlich nicht an die Gegend gebunden, von welcher zufällig ihr bei uns üblicher Name stammt, sondern „Fallwinde“ der gleichen Art finden sich an zahlreichen anderen Gebirgen, in Deutschland beispielsweise in den Vogesen, im Riesengebirge, im Thüringer Wald, wenn auch die geringere Höhe dieser Gebirge ihre Wirkung weniger machtvoll gestaltet als diejenige der Alpen. Übrigens ist das Vorhandensein des Gebirges nicht einmal unbedingt nötig, um die Einzelheiten des Föhns hervorzurufen, denn wesentlich ist ja dabei nur, daß die Luft auf- und abwärts geführt wird, und diese Voraussetzung ist bereits erfüllt, wenn ein Tief- und ein Hochdruckgebiet derartig in Wechselwirkung treten, daß die Luftmassen, welche im Tief hinaufsteigen und einen Teil ihrer Feuchtigkeit als Niederschlag herabfallen lassen, oben dem Hoch zufließen und dort im Herabsteigen erwärmt werden. Mit Rücksicht auf die übliche Bezeichnung der Hochdruckgebiete als „Antizyklonen“ spricht man daher außer vom „Bergföhn“ auch von dem „antizyklonalen Föhn“.

Nachdem wir den Eintritt der Kondensation in feuchter Luft mehrfach erwähnt und zum Ausgang von Folgerungen gemacht haben, soll nun der Vorgang selbst etwas näher betrachtet werden. Zunächst will ich in einem Versuch die Entstehung atmosphärischer Wassertropfen

zeigen. In diesem Glaszylinder befindet sich Zimmerluft mit etwas Wasser; das Gefäß ist durch einen mit einer Öffnung versehenen Deckel verschlossen, und in dessen Öffnung befindet sich ein dicht schließender, von einem Glasrohr durchsetzter Korkstopfen. Das Rohr gabelt sich außen, so daß ich die eine Öffnung mit dem Finger verschließen und durch die andere mittels eines Gummigebläses noch mehr Luft in den Zylinder treiben und darinnen einen erhöhten Druck erzeugen kann. In Ermangelung einer geeigneten Gebläsevorrichtung kann man auch durch Blasen mit dem Munde die nötige Druckvermehrung erzeugen. Ich warte, nachdem dies geschehen, kurze Zeit, damit die innen hervorgerufene dynamische Erwärmung sich ausgleichen kann, und lasse nun, indem ich den Finger von der Rohröffnung nehme, die innere Luft sich ausdehnen. Diese rasche Abnahme des Innendruckes wirkt ebenso wie etwa das Emporführen der Luft durch den gegen ein Gebirge wehenden Wind, es entsteht dynamische Abkühlung, und, da die Zimmerluft reichliche Feuchtigkeit zu enthalten pflegt und im Zylinder auch noch Dampf aufnehmen konnte, wird der Taupunkt im Abkühlen schnell erreicht, so daß wir den Zylinder sich mit Nebel füllen sehen. Besonders deutlich erscheint der Vorgang, wenn ich den Lichtkegel der elektrischen Bogenlampe hineinsende und dadurch alle die einzelnen Tröpfchen wenigstens für nahe am Apparat befindliche Beobachter sichtbar mache. Sobald ich jetzt die Luft des Zylinders wieder zusammendrücke, verschwindet sogleich der Nebel, weil in der dynamisch erwärmten Luft die Tröpfchen wieder verdampfen.

Nun wäre es aber unrichtig, die gesehene Erscheinung allein den Änderungen des Druckes und der Temperatur zuzuschreiben, denn der Versuch gelingt nicht mehr, wenn ich ihn mit diesem zweiten Zylinder nochmals unternehme, und dabei besteht der einzige Unterschied gegen vorher darin, daß diesmal staubfreie, reine Luft den Zylinder füllte. Um dies zu erreichen, habe ich das Gefäß etwa 2 Wochen lang unbewegt stehen gelassen, so daß die darin befindlichen Staubteilchen und sonstige Fremdstoffe in das am Boden befindliche Wasser hinabsinken konnten; und die vom Gebläse zugeführte Luft wird durch eine mit befeuchteter Watte gefüllte Röhre getrieben und dadurch filtriert. In solcher reinen Luft kann ich durch beliebige Änderungen von Druck und Temperatur keinen Nebel zustande bringen. Entferne ich aber jetzt das Watterohr und treibe die Luft unmittelbar aus dem Gebläse in das Gefäß, so kommt mit der unfiltrierten Zimmerluft Staub genug

hinein, um alsbald wieder den vorher gesehenen Verlauf des Versuchs zu ermöglichen. Die Anwesenheit des Staubes ist demnach eine notwendige Vorbedingung für den Beginn der Kondensation. Man bezeichnet die Stäubchen als „Kondensationskerne“. In gesättigter Luft können flüssige Tropfen nur bestehen, insofern sie eine gewisse Größe überschreiten. Wenn die ersten Tröpfchen sich ohne Ansatzkerne bilden müßten, wären sie zunächst so klein, daß sie nicht bestehen könnten, sondern gleich verdampfen würden; wenn sie aber als wässriger Überzug der Staubkörnchen auftreten, so haben sie von Anfang an größeren Umfang (kleinere Krümmung) und die Fähigkeit zu dauernder Existenz.

Da nun offenbar Wolken in allen Teilen der Atmosphäre sich bilden können, muß wohl auch überall ein ausreichender Vorrat von Staub vorhanden sein, der zur Bildung der Tröpfchen die nötigen Ansatzkerne liefert. Über dem Lande spielen benutzbare mineralische oder organische Teilchen diese Rolle, in der Hauptsache Verbrennungsprodukte (z. B. Schwefel- und Stickstoffoxide) mit hygroskopischen (d. h. wasseranziehenden) Eigenschaften; über dem Meere erfüllen die von Wind und Wogen verspritzten Tröpfchen nach Verdampfen des Wassers als Salzkörnchen die Luft und können als Kondensationskerne dienen. Ferner kommen als Kondensationskerne auch die sogenannten Ionen in Betracht, nämlich negativ oder positiv elektrische Teilchen, welche in der Atmosphäre hauptsächlich durch Verbrennungs- und Strahlungsvorgänge entstehen.

Ist diese Vorbedingung, nämlich die Anwesenheit genügender Ansatzkerne, erfüllt, so gehört zum Eintritt der Kondensation und zur Entstehung von Wolken und Niederschlag lediglich Wärmeentziehung, und diese kann in der Luft hauptsächlich auf zweierlei Arten zustande kommen: durch Berührung mit dem kälteren Boden und durch dynamische Abkühlung beim Aufsteigen. Die Wirkung des Bodens vermag sich in der Bildung von Nebel und andererseits von Tau und Reif zu äußern. Beim Nebel wird einfach die unterste Luftschicht durch Berührung mit dem erkalteten Boden zur Abgabe von Wärme veranlaßt; indem diese unterste Schicht dabei kälter und schwerer geworden ist, bleibt sie an ihrer Stelle und entzieht nun ihrerseits der darüber befindlichen Luftschicht Wärme, solange deren Temperatur noch höher ist. So verbreitet die zuerst im Boden durch Ausstrahlung entstandene Kälte sich allmählich nach aufwärts und mit ihr,

falls genügende Feuchtigkeit vorhanden ist, die Bildung feiner Tröpfchen. Man sagt alsdann „der Nebel steigt“, obwohl natürlich nur die Kälte steigt, die Nebeltröpfchen aber schwerer als Luft und daher im langsamen Sinken begriffen sind. Nur wenn die Kälte rascher emporsteigt, als die Tröpfchen sinken, kann die Erscheinung zustandekommen. Liegt die Temperatur unter 0° , so können an Stelle der flüssigen Tröpfchen feine nadelförmige Eiskristalle treten, die durch Zurückwerfen der Sonnenstrahlen dem Nebel das bekannte Glitzern verleihen.

Verschieden hiervon ist die Entstehungsweise von Tau und Reif, weil diese Gebilde z. T. aus Feuchtigkeit kondensiert werden, die nicht aus der Luft stammt, wie beim Nebel, sondern aus dem Boden. Wenn dieser einige Feuchtigkeit enthält und an seiner Oberfläche der abendlichen Abkühlung ausgesetzt ist, so kann es geschehen, daß in der wärmeren Schicht, welche unmittelbar unter der Oberfläche liegt, Wasser verdunstet und beim Berühren mit der kälteren obersten Schicht sich wieder kondensiert. So wird beispielsweise auf einem mit Rasen bedeckten Boden durch Wärmeausstrahlung von der großen Oberfläche der zahlreichen Grashalme eine recht erhebliche Abkühlung der obersten, von den Halmen gebildeten Schicht entstehen können, während darunter in der Region der Wurzeln eine wärmere und zugleich feuchte Luft die Poren des Bodens erfüllt. Indem Teile dieser Luft zu der kalten Oberschicht emporsteigen und besonders auch feuchte, wärmere Luft aus der Umgebung der abgekühlten Halme mit ihnen in Berührung kommt, beschlagen sich die Halme und bedecken sich, je nachdem die Temperatur über oder unter 0° liegt, mit Wassertropfen oder Eisnadeln, mit Tau oder Reif. Günstig für Entstehung von Tau oder Reif ist also starke Abkühlung der obersten Bodenschicht und Durchlässigkeit für die darunter befindliche feuchte Luft. Bei Steinpflaster pflügt Reif nur an den Fugen, die zwischen den Steinen liegen, aufzutreten, weil die Steine selbst keine Feuchtigkeit hindurchlassen.

Über nassem Boden oder über Wasserflächen kann auch in kälterer Luft Nebel entstehen, wenn nämlich durch Verdampfen von dem wärmeren Boden oder Wasser mehr Dampf sich bildet, als die kältere Luft aufnehmen kann. Der Vorgang verläuft dann gerade so wie das „Dampfen“ heißer Flüssigkeit in Zimmerluft.

Die abkühlende und kondensierende Wirkung des aufsteigenden Luftstromes samt der Bildung von Bewölkung und Niederschlag kann anschaulich gemacht werden durch Betrachtung der verschiedenen

Zustände oder Stadien, welche die emporgeführte Luft durchläuft. Zuerst befindet sie sich im Trockenstadium, zeigt dabei eine durch dynamische Abkühlung erzeugte Temperaturabnahme von 1° auf je 100 m Höhe und wird der Sättigung immer nähergeführt. Wo diese eintritt, beginnt das Regenstadium: die zum Taupunkt abgefühlte Luft kann bei fortgesetztem Aufsteigen und dynamischem Abkühlen nicht mehr die bisher mitgeführte Feuchtigkeit als Dampf behalten, sondern es tritt Kondensation ein. Wo Trocken- und Regenstadium sich berühren, und die Luft ihren Taupunkt erreicht, beginnt eine Wolke sich zu bilden, und darüber ist die Luft von den entstandenen Tropfen erfüllt. Aus den anfänglich kleinen Tropfen entstehen durch Weiterwachsen und Zusammenfließen größere; und alle fallen sie natürlich herab, denn Wasser ist schwerer als Luft. Aber sie bewegen sich, umgeben von dem Luftstrom, welcher sich selbst in aufsteigender Bewegung befindet, und darum werden alle diejenigen Tröpfchen, welche langsamer fallen, als die Luft aufsteigt, in der Wolke zurückgehalten, und nur die größeren Tropfen, welche den Luftwiderstand besser überwinden und rascher fallen, gelangen in den Raum des Trockenstadiums und sinken hier unter steter Verdampfung herab. Sind sie groß genug, um den Erdboden zu erreichen, ehe sie verdampft sind, so haben wir Regen, andernfalls sehen wir nur eine Wolke über uns. Durch entsprechende Versuche hat man diese Erscheinungen nachgeahmt und messend verfolgt. Es wurde mittels eines Gebläses ein aufsteigender Luftstrom erzeugt, und in diesen brachte man Tropfen verschiedener Größe. Durch passende Geschwindigkeiten des Luftstromes konnte man für die verschiedenen Tropfengrößen denjenigen Zustand herbeiführen, bei welchem der Tropfen gerade schwebend verweilte und also die Steigegewindigkeit der Luft genau gleich der Fallgeschwindigkeit des Tropfens war. Die zusammengehörigen Werte von Geschwindigkeit und Tropfengröße lassen dann erkennen, wie rasch höchstens die Luft aufsteigt, wenn Tropfen einer bestimmten Größe herabfallen. Durch andere Versuche wurden die vorkommenden Tropfengrößen bei wirklichem Regenfall ermittelt. Dazu ließ man die Tropfen auf Löschpapier fallen, welches in einem sehr flachen Holzkästchen kurze Zeit dem Regen ausgesetzt und dann sogleich mit einem wasserlöslichen Farbstoff (z. B. Eosin) bestäubt wurde. Wenn man gleich danach das überschüssige Pulver durch Abklopfen entfernte, verblieben auf dem Papier kreisförmige haltbare Tropfenbilder, aus deren Größe

die Tropfengröße sicher und leicht zu erkennen war. Nur die kleinsten Tropfen konnten auf diese Art nicht mehr untersucht werden, sondern erst von 0,5 mm Durchmesser aufwärts gelang die Erkennung und Messung; und gerade diese Größe kam so regelmäßig und so zahlreich zur Wahrnehmung, daß die entsprechende Geschwindigkeit in den meisten Fällen als obere Grenze für die Bewegung des aufsteigenden Luftstromes gelten kann. Sie beträgt etwa 3 m in der Sekunde und ist gleich der Geschwindigkeit, mit welcher bei „leichtem“ Wind die Luftmassen horizontal bewegt werden. Meistens verläuft aber der aufsteigende Strom sehr viel langsamer. Regentropfen von mehr als 5,5 mm Durchmesser (8 m Fallgeschwindigkeit) können überhaupt nur für wenige Sekunden bestehen und werden durch den Luftwiderstand zersprengt, so daß bei einer Geschwindigkeit der aufsteigenden Luft von 8 m in der Sekunde überhaupt kein Regentropfen den Boden erreichen könnte.

Die Temperatur nimmt im Regenstadium nach oben hin etwa halb so rasch ab wie im Trockenstadium, weil die beim Kondensieren der Tropfen frei werdende gebundene Wärme der dynamischen Abkühlung entgegenwirkt. Sobald nun die Temperatur bis auf 0° gesunken ist, schließt sich nach oben hin das Hagelstadium an, jedoch nur, falls der aufsteigende Strom kräftig genug ist, um einen Teil der Regentropfen über die 0° -Grenze hinaus emporzuheben. Diese Tropfen gelangen nun in die Luft, welche unter den Gefrierpunkt abgekühlt ist, erstarren dort und gleichen durch ihre frei werdende gebundene Wärme die dynamische Abkühlung der Luft aus. Die Schicht des Hagelstadiums enthält demnach ein Gemisch von Luft, Wasser und Eis; es reicht bis zu derjenigen Höhe, in welcher alle Wassertropfen gefroren sind, und hat durchweg die Temperatur 0° . Darauf folgt sodann das Schneestadium, in welchem durch fortschreitende dynamische Abkühlung wieder neue Kondensation stattfindet, und zwar in Form von Schnee; die Temperatur sinkt dort immer tiefer unter den Gefrierpunkt.

Nicht immer sind im aufsteigenden Strom all diese Stadien vorhanden; nur wenn er hoch genug hinaufreicht, können sie zustande kommen, und namentlich das Hagelstadium setzt außerdem eine erhebliche Geschwindigkeit der aufsteigenden Luft voraus. Bei warmem Wetter liegt die 0° -Grenze so hoch, daß meistens das Regenstadium nicht überschritten wird, während in der kalten Jahreszeit, wenn der Taupunkt unter 0° liegt, das Regen- und Hagelstadium ausfällt und gleich auf das Trocken- das Schneestadium folgt. Oftmals geschieht

es auch, daß Schnee oder Hagel im Herabfallen schmilzt. So mancher Plazregen ist ursprünglich Hagel gewesen, dessen Eiskörner beim Durcheilen warmer Luft zu großen Regentropfen geschmolzen sind. —

Die Gruppe von Wärmeerscheinungen, welchen der Rest dieses Kapitels gewidmet werden soll, nämlich das Verhalten der Wärmekraftmaschinen, ist von so großer wissenschaftlicher und praktischer Bedeutung und bietet so vielerlei wichtige Einzelheiten, daß eine auch nur bescheidene Ausführlichkeit weit über den hier verfügbaren Raum hinausgehen würde.¹⁾ Wir müssen uns daher mit der Vorführung einiger Grundtatsachen begnügen. Der Zweck aller Wärmekraftmaschinen besteht in der Umwandlung einer Energieform in die andere, nämlich im Überführen von Wärme in Bewegungsenergie.²⁾ Die Maschine empfängt die Verbrennungswärme des Heizstoffes und liefert dafür mechanische Arbeit; sie wird dieser Aufgabe um so besser entsprechen, je vollständiger sie die Umwandlung zu bewirken vermag, je größer also derjenige Bruchteil der zugeführten Wärme ist, den wir als nutzbare Arbeit von der Maschine zurückerhalten. Dabei wird die zugeführte Wärme zur Erzeugung von Druck verwendet, der auf die beweglichen Teile der Maschine wirkt und ihnen lebendige Kraft erteilt.

Wie dies beim Verdampfen von Wasser geschieht, d. h. wie der in den Dampfmaschinen³⁾ wirkende Druck zustande kommt, soll nun zunächst gezeigt werden. Wir bedienen uns dazu eines einfachen Vorganges, der gewöhnlich als Leidenfrost'scher Versuch bezeichnet wird. Eine flache Metallschale wird durch eine darunter befindliche Gasflamme erhitzt, und auf sie lasse ich einzelne Wassertropfen fallen. Zunächst sehen wir die Tropfen sogleich mit zischendem Geräusch sieden und verdampfen; ist aber das Metall heißer geworden, so verzischt der darauffallende Tropfen nicht, sondern gleitet als eine runde Masse auf der heißen Fläche hin und her, ohne sie zu benetzen, und erst allmählich sehen wir ihn kleiner werden. Wenn ich nun die Flamme lösche und das Metall sich abkühlen lasse, tritt bald wieder der frühere Zustand ein, und der Tropfen verzischt. Zur Deutung des Versuches bedenken wir, daß bei dem Herabfallen gegen die stark erhitzte Metallfläche die Unterseite des Tropfens bereits Dampf aus-

1) Vgl. Vater, Die neueren Wärmekraftmaschinen I/II (ANuG 21 u. 86).

2) Vgl. Vater, Thermodynamik (ANuG 576).

3) Vgl. Vater, Die Dampfmaschine I/II (ANuG 393/94).

sendet, ehe noch eine Berührung stattfindet. Das Wasser nimmt im Verdampfen einen so stark vermehrten Raum ein und erzeugt demnach so großen Druck unter dem Tropfen, daß er am Herabfallen verhindert wird. Solange das Metall heiß genug ist, um den seitlich entweichenden Dampf durch immer neue Wasserverdampfung zu ersetzen, schwebt der Tropfen; beginnt aber die Schale kälter zu werden, so vermag der Dampf nicht mehr das Herabfallen des Tropfens zu hindern, und er gerät beim Berühren der immer noch heißen Fläche sogleich ins Sieden.

Zeigt uns dieser Versuch, wie durch Verdampfen von Wasser erhebliche Drücke entstehen können, so liefert die folgende Tabelle den zahlenmäßigen Zusammenhang zwischen Druck, Temperatur, Dichte und Gesamtwärme gesättigten Wasserdampfes. Der Druck ist dabei in Atmosphären (je 760 mm Quecksilberhöhe oder je 1,033 kg auf 1 qcm) angegeben, die Temperatur in Celsiusgraden, und diese Zahlen bilden die Ergänzung zu den auf S. 56 und 72 mitgeteilten Tabellen für Wasserdampf. Gesamtwärme eines Kubikmeters bedeutet diejenige Wärmemenge, durch welche 1 cbm gesättigter Dampf der dabei stehenden Temperatur aus Wasser von 0° erzeugt wird, und die sich also aus denjenigen Mengen zusammensetzt, welche zur Temperaturerhöhung, zur Umwandlung des Aggregatzustandes und zur Volumenvermehrung erforderlich sind.

Verhalten gesättigten Wasserdampfes.

Sättigungsdruck	Temperatur	Dichte (Gewicht eines cbm)	Gesamtwärme eines cbm	Differenz
1 Atm.	100,0°	0,6059 kg	386,0 Kal.	362,2 Kal.
2	120,6	1,1631	748,2	353,8
3	133,9	1,7024	1102,0	348,6
4	144,0	2,2303	1450,6	344,9
5	152,2	2,7500	1795,5	342,1
6	159,2	3,2632	2137,6	339,8
7	165,3	3,7711	2477,4	337,8
8	170,8	4,2745	2815,2	336,2
9	175,8	4,7741	3151,4	334,9
10	180,3	5,2704	3486,3	333,6
11	184,5	5,7636	3819,9	332,8
12	188,4	6,2543	4152,7	331,6
13	192,1	6,7424	4484,3	330,7
14	195,5	7,2283	4815,0	

Während man bei den ersten Dampfmaschinen die Erzeugung des Dampfes im gleichen Raum vornahm, in welchem er auch wirken sollte, nämlich dem Zylinder, dient jetzt dazu ein besonderer

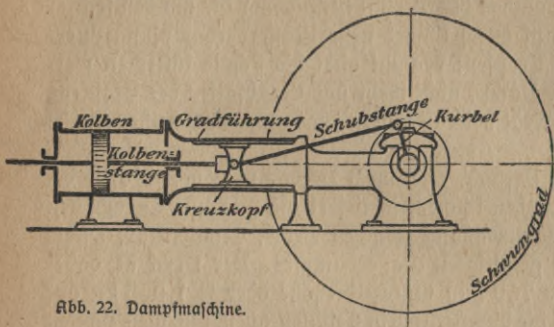


Abb. 22. Dampfmaschine.

Maschinenteil, der

Dampfessel.

Die Wärme geht ihm von der Feuerung zu und wird zur Dampfbildung verwendet, und der so entstehende Druck wird durch Röhren dem Zylinder zugeführt, in welchem er auf

den Kolben wirkt. Abb. 22 gibt eine Übersicht der beweglichen Maschinenteile.

Im Zylinder ist der Kolben dampfdicht verschiebbar und wird hin und her bewegt; die Kolbenstange durchsetzt dampfdicht die (rechte) Zylinderwand und überträgt die Kolbenbewegung auf den mittels geeigneter Führung geradlinig beweglichen Kreuzkopf, welcher seinerseits durch Schubstange und Kurbel die geradlinig hin und her gehende Bewegung des Kolbens in die Drehung der Welle und des auf ihr sitzenden Schwungrades umwandelt. Die eigentliche Triebkraft der Maschine besteht in dem Unterschied der beiden Drücke, welche im Zylinder auf der linken und rechten Seite des Kolbens herrschen. Dieser Druckunterschied treibt den Kolben jeweils nach der Seite des schwächeren Druckes und wird als Kolbenüberdruck bezeichnet. Bei den einfach wirkenden Maschinen wird der Kolben durch Dampf nur nach einer Richtung getrieben und macht den Rückweg vermöge der Wucht, welche er bei seinem Hingang dem Schwungrad erteilte. Wenn dagegen der Dampf sowohl den Hin- wie den Hergang des Kolbens bewirkt, nennt man die Maschine eine doppelt wirkende. Auch in diesem Falle ist das Schwungrad notwendig, um die Maschine über die toten Punkte zu bewegen. So heißen die beiden Stellungen, in welchen der Kolben an einem Ende seiner Bahn angelangt und im Umkehren begriffen ist. Hierbei bilden Kolbenstange, Schubstange und Kurbel eine gerade Linie, der Kolben

kann durch die Dampfkraft jetzt keine Bewegung erhalten, und erst wenn ihm die Wucht des Schwungrades über diese Stellung hinweggeholfen hat, tritt die Triebkraft des Dampfes wieder in Tätigkeit. Hat die Maschine mehrere Zylinder, welche auf dieselbe Welle wirken, so kann man dafür sorgen, daß sie nicht gleichzeitig, sondern abwechselnd auf den toten Punkt kommen, und in diesem Fall dient das Schwungrad lediglich zum Ausgleich der Geschwindigkeit. Die zur Erzeugung der Hin- und Herbewegung des Kolbens erforderlichen Änderungen der Dampfleitung zwischen Kessel, Zylinder und Außenluft werden durch eine Vorrichtung besorgt, welche Steuerung heißt und von der Maschine ihre Bewegung empfängt.

Die Wirkung des Dampfes kann nun in der Weise erfolgen, daß eine Seite des Zylinders, z. B. die linke, mit dem Dampfkessel, die rechte mit der Außenluft verbunden wird; dann wird der Kolben nach rechts mit einer Kraft bewegt, die dem Unterschied zwischen Kesseldruck und Atmosphärendruck entspricht. Ist er am rechten Ende seines Weges angelangt, so werden durch die Steuerung die Verbindungen derartig vertauscht, daß nun rechts der Kesseldruck, links der Atmosphärendruck wirkt, der Kolben bewegt sich nach links und treibt den dort noch vorhandenen Dampf heraus, um dann die Bewegung von neuem zu beginnen. Solche Maschinen, aus deren Zylinder der Dampf ins Freie gelangt, werden Auspuffmaschinen genannt. Wollte man hierbei den vollen Kesseldruck auf den Kolben während seines ganzen Weges wirken lassen, so ergäbe das einen doppelten Nachteil. Erstens wird beim Umkehren des Kolbens der von ihm herauszutreibende Dampf nicht sofort auf Atmosphärendruck sinken, sondern bedarf zum Ausströmen einer gewissen Zeit und leistet währenddessen dem Kolben einen Widerstand, der zum Arbeitsverlust führt. Und zweitens wird diese ganze Dampfmenge durch Auspuffen verloren, zusammen mit derjenigen Wärmemenge, welche sie in gebundener Form enthält. Darum benutzt man statt solcher Volldruckmaschine die Expansionsmaschine, bei welcher die Verbindung zwischen Kessel und Zylinder geschlossen und der Dampfzutritt zum Kolben unterbrochen wird, ehe dieser das Ende seines Weges erreicht hat. Dann ist für den Rest des Kolbenweges nur noch derjenige Dampfdruck wirksam, welchen der im Zylinder abgeschlossene Dampf ausübt, und da diese Dampfmenge einen Raum auszufüllen hat, welcher mit fortschreitendem Kolben immer größer wird, befindet sich der ab-

geschlossene Dampf im Zustande der Expansion, d. h. mit wachsendem Volumen nimmt sein Druck ab, und man kann es leicht dahin bringen, daß, wenn der Kolben am Ende seines Weges angelangt ist, der expandierte Dampf gerade denjenigen Druck hat, welcher im anderen Zylinderteil herrscht, und daß also dann der Kolbenüberdruck gleich Null geworden ist. Der umkehrende Kolben wird dann nicht durch Dampfdruck gehindert, und der Auspuffdampf bedeutet einen tunlichst geringen Verlust.

Wenn alle diese Vorgänge sich an einem einzigen Zylinder und Kolben abspielen, treten mancherlei Übelstände auf. Die Expansion bewirkt starke Schwankungen des Druckes, welche nicht nur den gleichförmigen Gang der Maschine beeinträchtigen können, sondern auch für die Maschinenteile (Zylinderwand, Gestänge, Fundament) diejenige Stärke bedingen, die den größten vorkommenden Drücken entspricht. Mit dem Druck des Dampfes schwankt auch seine Temperatur, und diese Schwankungen geschehen rascher, als daß die Zylinderwände sie vollständig mitmachen könnten. Tritt heißer Dampf in den Zylinder, so findet er in dessen Wandung noch die tiefere Temperatur der eben vorausgegangenen Expansion, und wenn die folgende Expansion den Dampf abkühlt, ist die Wandung noch heiß von dem vorausgegangenen hohen Druck; daraus ergibt sich Wärmeverlust und Verringerung der Arbeitsleistung. Um diese Nachteile zu vermeiden, bedient man sich der mehrstufigen Expansion: der Dampf tritt aus dem Kessel in einen ersten Zylinder, arbeitet dort mit hohem Druck und beginnt sich zu expandieren; dabei hat der Kolben seinen Weg einmal durchlaufen, und der nun teilweise expandierte Dampf wird nicht ausgepufft, sondern in einen zweiten Zylinder übergeführt, dessen Kolben er nach Vollendung der Expansion bewegt. Der erste Zylinder heißt Hochdruck-, der zweite Niederdruckzylinder, und dazwischen befindet sich bei dreistufiger Expansion noch ein Mitteldruckzylinder. Maschinen dieser Art werden als Verbundmaschinen bezeichnet.

Wie bereits erwähnt, ist die eigentliche Triebkraft der Maschine im Kolbenüberdruck zu suchen, nämlich im Unterschied der Drucke, welche zu beiden Seiten des Kolbens herrschen. Bei den bisher beschriebenen Auspuffmaschinen befindet sich stets die eine Seite des Zylinders in Verbindung mit der Außenluft, und der Kolbenüberdruck ist also um eine Atmosphäre kleiner als der Kesseldruck. Um bei glei-

dem Kesseldruck den Überdruck zu vermehren, bedarf es der Herabminderung des Druckes unter eine Atmosphäre in dem nicht mit dem Kessel verbundenen Zylinderteil. Dies geschieht mittels des Kondensators, eines eisernen Behälters, der entweder durch Einspritzen kalten Wassers oder äußeres Abkühlen der Wände (Einspritz-, Oberflächen-Kondensator) auf niederer Temperatur gehalten wird und mit derjenigen Seite des Zylinders verbunden ist, in welcher der kleinere Druck wirken soll. Der Dampf, welcher den Kolben nach einer Seite getrieben hat, wird also nicht ausgepufft, sondern tritt in den Kondensator und wird hier durch Abkühlung größtentheils in Wasser verwandelt. Der in Dampfform verbleibende Teil übt dann nur noch denjenigen Druck aus, welcher der niedrigen Temperatur des Kondensators entspricht, nämlich bei einer Temperatur von 45 bis 50° etwa ein zehntel bis ein achtel Atmosphäre. Behufs Erhaltung dieses niederen Druckes wird durch die von der Maschine betriebene Luftpumpe der Kondensator fortwährend von den angesammelten Wasser- und Luftmassen befreit. Das Wasser entstammt theils der Kondensation, theils ist es als Kühlwasser (beim Einspritz-Kondensator) hineingekommen, während die Luft im Wasser gelöst war und wohl auch durch die Fugen des Kondensators, der Dichtungen u. dgl. vermöge des geringen Innendruckes eintritt.

Im Zylinder der Kondensatormaschine herrscht also auf der einen Seite des Kolbens der hohe Druck des Kessels, auf der anderen Seite der niedere Druck des Kondensators. Der Unterschied beider bedeutet einen entsprechend hohen Kolbenüberdruck, der den Hauptvorteil der Kondensator- vor der Auspuffmaschine bildet. Als ein anderer Vorteil kann es angesehen werden, daß durch Kondensation die mit dem Auspuffen verbundenen Verluste wenigstens teilweise vermieden werden. Die gebundene Wärme des vom Zylinder kommenden Dampfes kann zum Teil für das Vorwärmen von Kesselspeisewasser dienen, und der Dampf selbst bleibt als Wasser für den Maschinenbetrieb erhalten. Dies letztere kommt in Betracht, wenn, wie z. B. bei den Maschinen der Seeschiffe, reines Wasser nicht in beliebiger Menge verfügbar ist.

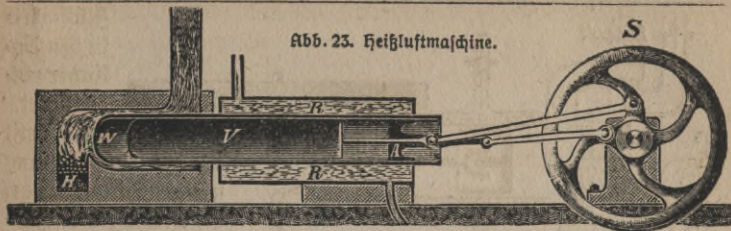
Wir richten jetzt nochmals unsere Aufmerksamkeit auf die S. 89 mitgeteilte Tabelle und entnehmen daraus eine für den Betrieb von Dampfmaschinen wesentliche Tatsache. Die in der vierten Reihe mitgeteilte Gesamtwärme gibt an, wieviel Wärme zur Erreichung der in der ersten Reihe genannten Drucke erforderlich ist. Die

Gesamtwärme läßt also erkennen, welcher Betrag an Brennmaterial oder an Geld aufzuwenden ist, um die einzelnen Drücke hervorzurufen, und die Vergleichung der Zahlen zeigt, wie die Gesamtwärme mit zunehmendem Druck immer langsamer anwächst. Insbesondere ist die Gesamtwärme eines Kubikmeters Dampf ein Maß für denjenigen Aufwand an Kohlen, welcher nötig ist, um den Raum des Dampfkessels mit gesättigtem Dampf zu erfüllen; und wie langsam dieser Betrag mit zunehmendem Druck wächst, ergibt die zuletzt angeführte Reihe der Differenzen. Um im Raume eines Kubikmeters von 1 auf 2 Atmosphären zu gelangen, bedarf man der Zuführung von 362,2 Kal.; wenn aber der Druck von 13 auf 14 Atmosphären steigen soll, genügt die Zuführung von 330,7 Kal. Sind hiernach die höheren Drücke billiger zu beschaffen als die niederen, so wird es verständlich, daß man in neuerer Zeit die höheren Dampfspannungen soweit, als es praktisch tunlich erscheint, bevorzugt.

Ein Mittel zur Erzielung hohen Druckes besteht in der Anwendung überhitzten, d. h. ungesättigten Dampfes. Hierzu baut man in die Maschine, welche dadurch zur Heißdampfmaschine wird, einen Überhitzer ein, nämlich einen eisernen Behälter, in welchem der vom Kessel kommende und zunächst noch gesättigte Dampf weiterer Temperaturerhöhung ausgesetzt wird. Der Vorteil solcher Einrichtung besteht in der Möglichkeit, Kessel und Kondensator kleiner zu wählen als ohne Überhitzer bei gleichem Dampfdruck, und außerdem im Vermeiden von Kondensationsverlusten, die durch äußere Abkühlung in der Maschine und in ihren Leitungsrohren um so eher eintreten, je näher der innen befindliche Dampf dem Sättigungszustande ist. Andererseits ist die höhere Temperatur von Nachteil, weil auf entsprechend größere Ausdehnung der erwärmten Maschinenteile Rücksicht genommen werden muß, und weil die Dichtung sowie die Anwendung von Schmieröl besondere Sorgfalt bedingen, um der größeren Hitze Widerstand zu leisten.

Trotz aller Verbesserungen ermöglicht die Dampfmaschine indessen nur eine recht ungünstige Ausnutzung des Brennstoffs; wie die unten mitgeteilte Tabelle (S. 97) zeigt, werden bei kleinen Dampfmaschinen nicht einmal 2 Prozent, bei großen und besonders günstigen Anlagen auch nur kaum mehr als 14 Prozent der zugeführten Heizwärme in Arbeit umgesetzt. Diese geringe Ausnutzung beruht zunächst auf technischer Unvollkommenheit, nämlich einerseits auf dem

Abb. 23. Heißluftmaschine.



großen Verlust an gebundener Wärme beim Austritt des Dampfes aus dem Zylinder; entweder geht er als Auspuffdampf in die Luft, wobei seine Gesamtwärme völlig verloren wird, oder er tritt in den Kondensator und kann von seinem Wärmevorrat wenigstens einen geringen Teil zum Vorwärmen des Kesselspeisewassers hergeben. Andererseits geht in Feuerung und Kessel viel Wärme verloren durch unvollständige Verbrennung der Kohlen, Entweichen heißer Verbrennungsgase in den Schornstein, Wärmeleitung und -strahlung, Kondensation in den Leitungsrohren usw.

Um diese Verluste zu vermeiden, hat man Wärmekraftmaschinen gebaut, bei welchen der wirksame Druck nicht in einem gesonderten Kessel erzeugt wird, sondern, ähnlich wie bei den ältesten Dampfmaschinen, im Zylinder. Einen solchen Versuch stellte die Heißluftmaschine (Abb. 23) dar: von dem durch den Kolben A abgeschlossenen Innenraum des Zylinders wird ein Teil durch Feuerung H erhitzt, der andere durch Wasserspülung A kalt gehalten; vermittels eines als Verdränger V bezeichneten Hohlkörpers gelangt die innen befindliche Luft abwechselnd in den heißen und kalten Teil des Zylinders und bewirkt dadurch das Vor- und Zurückgehen des Kolbens. Große Drücke können aber auf diese Art nicht erzielt werden, denn um eine beim Druck einer Atmosphäre eingeschlossene Luftmasse auf zwei Atmosphären zu bringen, muß sie um 273° erhöht werden, und für jede weitere Atmosphäre nochmals um ebensoviel. Ein Vergleich mit den in unserer Tabelle (S. 89) für Drücke des gesättigten Wasserdampfes angegebenen Temperaturen läßt verstehen, daß die von der Heißluftmaschine verlangten sehr viel höheren Temperaturen der Verbreitung dieser Maschine hinderlich waren. Sie hat nur für kleine Motoren Verwendung gefunden.

Günstigere Ergebnisse liefern die in neuerer Zeit weit verbreiteten Gasmaschinen, bei welchen der Brennstoff als Gas oder vergaste

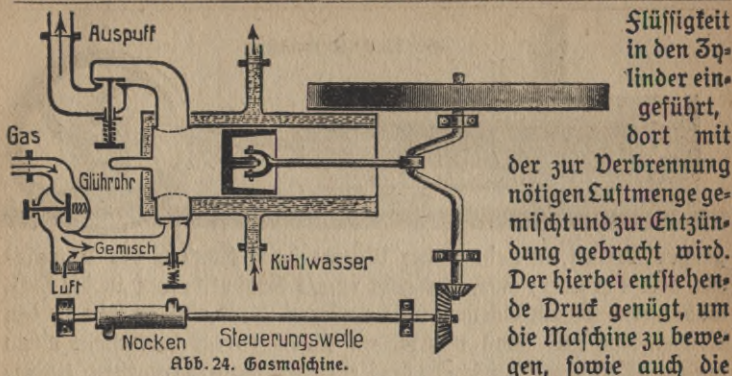


Abb. 24. Gasmaschine.

Vorrichtungen zu betätigen, welche für Entfernung der Verbrennungsprodukte aus dem Zylinder, Einsaugen neuen Brennstoffs samt der zugehörigen Luftmenge und für das Zünden des Gemisches sorgen. Hierher gehören die Leuchtgasmaschinen, die Sauggasmaschinen (ein Gemisch von Luft und Wasserdampf wird durch eine Schicht glühender Kohlen gesogen und dabei unter Bildung von Wasserstoff und Kohlenoxyd in ein brennbares Gas verwandelt), die Benzin-, Petroleum- und Spiritusmaschinen.

In der folgenden Tabelle ist die Ausnutzung der Brennstoffe in verschiedenen Maschinen angegeben. Unter Pferdestärke (PS) versteht man die Leistung von 75 Kilogramm in der Sekunde und zählt insbesondere die von einer Maschine abgegebene nutzbare Arbeitsleistung nach Nutzpferdestärken (PS_n). Eine Stunden-Nutzpferdestärke ($Std-PS_n$) ist demnach die nutzbare Arbeit einer Maschine von $75 \times 3600 = 270000$ Kilogramm in der Stunde. Unter Wirkungsgrad ist verstanden das Verhältnis der Wärmemenge, welche mit einer Stunden-Nutzpferdestärke gleichwertig ist, zu derjenigen Wärmemenge, welche von der betreffenden Maschine zur Hervorbringung einer Stunden-Nutzpferdestärke verbraucht wird.

Die Höhe des Wirkungsgrades, d. h. der Brennstoff-Ausnutzung, hat für sich allein rein technische Bedeutung und kann zur Grundlage wirtschaftlicher Erwägungen nur in Verbindung mit dem Preise des Brennstoffs sowie mit äußeren Umständen (Art und Dauer der Maschinenbenutzung, Verkehrsverhältnisse u. a.) gemacht werden.

Den vorstehend geschilderten Kolbenmaschinen in mancher Hinsicht

Brennstoffverbrauch und Wirkungsgrad verschiedener Wärme kraftmaschinen.

Art der Maschinen	Brennstoff- verbrauch für 1 Std-PS _n	Heizwert von 1 $\left\{ \begin{array}{l} \text{kg} \\ \text{cbm} \end{array} \right.$ Brennstoff	Wärme- verbrauch für 1 Std-PS _n	Wir- kungs- grad
Dampfmaschinen	Steinkohle	Kal.	Kal.	
kleine, weniger gute Aus- führung	5 kg	7500 (1 kg)	37500	0,017
große, beste Ausführung	0,6 "	"	4500	0,142
Leuchtgasmaschinen	Leuchtgas			
kleine	0,7 cbm	5000 (1 cbm)	3500	0,180
große	0,45 "	"	2250	0,283
höchster erreichter Wert .	0,385 "	4700 "	1800	0,353
Sauggasmaschinen	Anthrazit			
kleine	0,55 kg	8000 (1 kg)	4400	0,145
große, vorzügliche Aus- führung	0,32 "	"	2560	0,250
Benzinmaschinen	Benzin			
kleine	0,45 kg	10300 (1 kg)	4725	0,138
große	0,25 "	"	2570	0,248
Petroleummaschinen	Petroleum			
gewöhnliche	0,5 kg	—	5150	0,124
Dieselmachine, 17 PS _n .	0,186 "	—	1910	0,33
Spiritusmaschinen	Spiritus			
im Mittel	(90 Vol.-Proz.) 0,5 kg	5500 (1 kg)	2750	0,232

überlegen ist die Dampfturbine (Abb. 25). Hochgepannter Dampf strömt aus dem Dampfkessel durch besonders geformte Düsen gegen das Schaufelrad und versetzt es in rasche Drehung. Da hier nur Drehbewegungen stattfinden, werden die Übelstände vermieden, welche mit der geradlinig hin und her gehenden Bewegung des Kolbens und seines Gestänges verbunden sind. Auch ist der thermische Einfluß der Wandungen auf den Dampf gering. Die Dampfturbine hat wenig Gewicht, bedarf sehr geringen Raumes und bewährt sich namentlich für den Antrieb von Dynamomaschinen und Schiffen. Ihr Wirkungsgrad ist verhältnismäßig hoch.

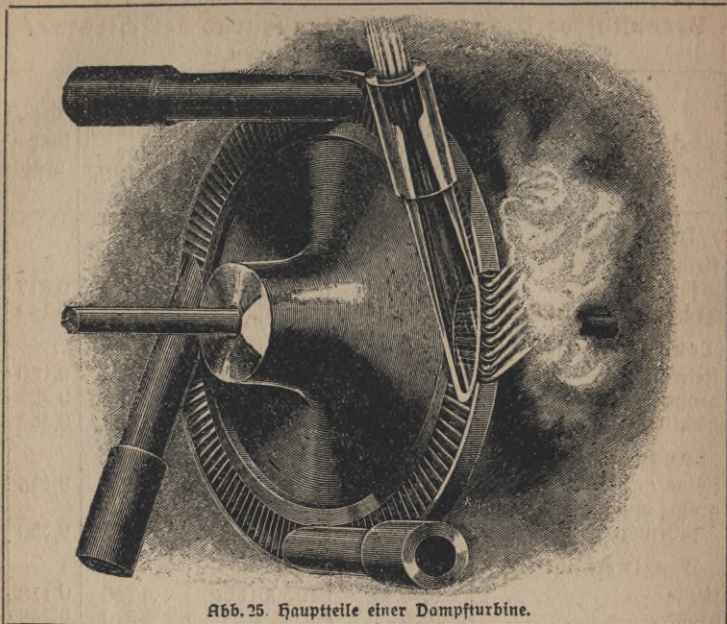


Abb. 25. Hauptteile einer Dampfturbine.

Außer in den technischen Bedingungen hat die geringe Ausnutzung der zugeführten Heizwärme bei allen Wärmekraftmaschinen ihre Ursache in der Natur der Wärme selbst. Gemäß dem zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie, dem sog. Entropiegesetz, entgeht bei Verwandlung von Wärme in mechanische Arbeit stets ein bestimmter Teil der Wärme der Verwandlung in nutzbare Arbeit. Bei der Verwandlung von mechanischer Arbeit in Wärme besteht jedoch keine derartige Einschränkung.

Sechstes Kapitel.

Leitung und Strahlung der Wärme.

Wo Körper verschiedener Temperatur aufeinander wirken, findet ein Wärmeausgleich statt, indem der wärmere Körper an den kälteren Wärme abgibt, und zwar um so mehr, je größer der Temperaturunterschied beider Körper ist. Dieser Übergang der Wärme von einem

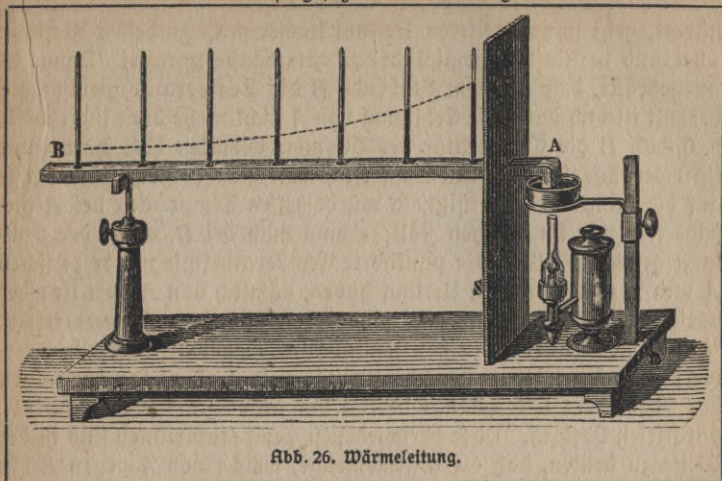


Abb. 26. Wärmeleitung.

Körper auf einen anderen kann in zweierlei Art geschehen: durch Leitung und durch Strahlung.

Die Leitung findet nur zwischen solchen Körpern statt, die miteinander in Berührung stehen. Sie ist ein so langsamer Wärmeübergang, daß wir ihren Verlauf von einer Schicht zur anderen leicht verfolgen können, und ihr Weg ist an die Form derjenigen Massen gebunden, welche die Leitung vermitteln.

Die Strahlung dagegen ist auf keinen Abstand beschränkt. Sie überträgt die Energie durch den Raum mit Lichtgeschwindigkeit und auf geradliniger Bahn, die nur an den Grenzen der durchheilten Substanzen durch Zurückwerfung, Brechung oder Beugung beeinflusst werden kann.

Wir beschäftigen uns zunächst mit der Leitung und stellen folgenden Versuch an. Ein Eisenstab AB (Abb. 26) wird an einem Ende A erhitzt, während ein Schirm S die Strahlung der Heizlampe von dem übrigen Teil des Stabes abhält. Dieser trägt eine Anzahl Thermometer, die in entsprechenden Bohrungen angebracht sind und die Temperaturverteilung derartig erkennbar machen, daß eine durch die oberen Enden der Quecksilbersäulen gezogene (punktirte) Linie die Temperatur an jeder einzelnen Stelle durch ihren Abstand von dem Stabe angibt. Während diese Linie von A ab sich zuerst rasch dem Stabe

nähert, geht sie im weiteren Verlauf immer mehr zu dessen Richtung über und verläuft schließlich bei *B* dem Stabe parallel. Damit ist ausgedrückt, daß an dem Stabende *B* die Temperatur gleichmäßig verteilt ist und durch die Erhitzung von *A* nicht mehr beeinflusst wird, d. h. daß *B* die Temperatur des Zimmers behalten hat. Hätten wir statt des Eisenstabes einen Kupferstab von gleicher Form und Größe auf die nämliche Art erhitzt, so würde dessen Temperatur bei *A* dieselbe sein wie im vorigen Fall; ebenso auch bei *B*, wenn der Stab lang genug ist. Aber die punktierte Temperaturlinie würde zwischen *A* und *B* einen anderen Verlauf haben, nämlich von *A* ab über der vorigen Linie liegen und erst nahe bei *B* mit ihr zusammentreffen. Und wenn wir drittens einen Neusilberstab demselben Versuch unterwerfen, so liegt dessen Temperaturlinie von *A* ab unter derjenigen des Eisenstabes und gelangt bereits vor dieser zu einem dem Stabe parallelen Verlauf. Diese verschiedenen Temperaturlinien sind in der Weise zu deuten, daß die Wärmemenge, welche von *A* gegen *B* hin fortgeführt wird, im Kupferstab größer und im Neusilberstab kleiner als im Eisenstab ist. Die Temperaturlinie bezeichnet den in jedem der Stäbe zuletzt eintretenden stationären Zustand, d. h. denjenigen, bei welchem jeder einzelne Querschnitt des Stabes in der Sekunde von *A* aus ebensoviel Wärme empfängt, als er gegen *B* hin und nach außen abgibt. Und mit Rücksicht auf das erwähnte Verhalten der drei Stäbe sagen wir, daß Kupfer ein besserer Wärmeleiter sei als Eisen, und daß Eisen wiederum besser die Wärme leite als Neusilber.

Die verschiedene Leitfähigkeit der Körper für Wärme können wir leicht beim bloßen Betasten bemerken. Denn da unsere Hand wärmer ist, entzieht ihr der berührte Gegenstand Wärme, und zwar um so mehr, je besser er leitet. Darum erscheint uns der bessere Wärmeleiter kälter und der schlechtere wärmer: Metall, namentlich Kupfer und Silber, fühlt sich kühl an, Holz dagegen warm.

Ein für eine größere Zahl von Beobachtern gleichzeitig sichtbarer Vorgang, der die verschiedene Wärmeleitfähigkeit einiger Körper erkennen läßt, wird durch folgenden Versuch veranschaulicht. Ich habe hier ein Kästchen aus Blech, durch dessen Seitenwand eine Anzahl gleichgestalteter Stäbchen verschiedenen Materials wasserdicht hindurchgesteckt sind (Abb. 27). Die Stäbchen sind mit einer leicht schmelzbaren Fettmischung (Wachs und Schweinefett) bestrichen, und mittels dieses

Überzugs ist an jedes Stäbchen eine Reihe kleiner Schrotkugeln geklebt. Mit Hilfe der Projektionslampe entwerfe ich auf dem Vorhang ein vergrößertes Bild des Apparates und gieße nun in das Kästchen heißes Wasser. Dadurch werden die inneren Enden der Stäbe sämtlich auf die gleiche höhere Temperatur gebracht, sie beginnen die zugeführte Wärme nach außen hin abzuleiten, und wir sehen das Fett schmelzen und die Schrote abfallen, sobald an der einzelnen Stelle die Schmelztemperatur des Fettes erreicht ist. Auf diese Art erkennen wir, daß die vorhandenen Stäbchen nach ihrer Leitfähigkeit für Wärme in folgender Reihe aufeinanderfolgen: Kupfer, Messing, Zink, Zinn, Eisen, Blei.

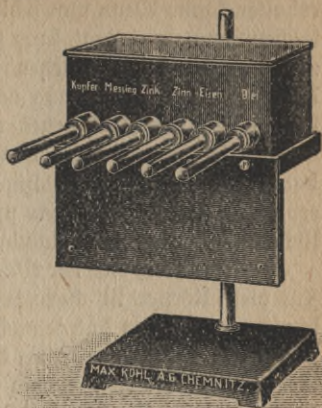


Abb. 27. Wärmeleitung.

Ein anderer Versuch, der die Wirkung der Wärmeleitung zeigt, ist folgender: An einem Bunsenschen Gasbrenner sperre ich die Luft ab und erzeuge dadurch eine weithin sichtbare leuchtende Flamme. Wenn ich jetzt ein Drahtnetz, wie man es im Laboratorium beim Erhitzen von Glasgefäßen benutzt, horizontal in die Flamme hineinhalt, verschwindet der über dem Drahtnetz gelegene Teil der Flamme. Die brennbaren Gase steigen zwar durch die Öffnungen des Netzes empor, es wird aber beim Berühren der messingenen Drähte so viel Wärme durch diese fortgeleitet, daß die noch unverbrannten Gasmassen stark abgekühlt heraufkommen. Mit einem Streichholz kann ich diesen Gasstrom über dem Drahtnetz entzünden; blase ich ihn wieder aus, so ist die Wärmefortleitung in den Drähten stark genug, um eine Zündung durch das Netz hindurch zu verhindern.

Die gleiche Wirkung finden wir in den Sicherheitslampen der Bergleute angewandt. In den Kohlenbergwerken bilden sich bekanntlich zuweilen brennbare Gase, deren Entzündung zu den gefürchteten Schlagwetter-Explosionen führen kann. Um solches Unheil zu vermeiden, benutzt man in den Werken dieser Art keine offenen Grubenlampen, sondern solche, deren Flamme nach außen hin durch ein Drahtnetz abgeschlossen ist und nur durch dieses die zur Verbrennung nötige Luft

erhalten kann. Wenn nun Schlagwetter-Luft in den Innenraum einer solchen Lampe eindringt, kann sie sich zwar an der Flamme entzünden und diese durch die entstehende Explosion zum Erlöschen bringen, ein Übertreten der Entzündung nach außen wird aber durch die Wärmeleitfähigkeit des Drahtnetzes verhindert. Ich habe hier eine solche Sicherheitslampe angezündet und richte auf sie einen Strom brennbaren Gases aus der Leuchtgasleitung. Wir sehen im Innern das explosible Gemisch von Gas und Luft sich entzünden, die Lampe erlischt dabei, aber eine Zündung nach außen findet nicht statt.

Eine besondere Art der Wärmeleitung tritt bei den Kristallen auf. Für diese Körper ist charakteristisch, daß ihre physikalischen Eigenschaften verschieden sind je nach der Richtung, in welcher wir sie untersuchen. So hat die Elastizität der Kristalle verschiedene Größe in verschiedenen Richtungen, ebenso die Lichtgeschwindigkeit, und auch die Wärmeleitung. Um dies zu zeigen, überziehe ich die ebene Oberfläche eines geeigneten Kristallstückes mit einer dünnen Wachsschicht, bestäube diese nach dem Erkalten mit irgendeinem leichten Pulver und setze auf eine Stelle die Spitze eines erhitzten Metallstäbchens, z. B. eines Nagels. Dann verbreitet sich die zugeführte Wärme in der Oberfläche nach allen Seiten, und wenn ich nach einigen Sekunden das heiße Stäbchen fortnehme und das Pulver wegblase, bleibt es in der Ausdehnung haften, wie die Wachsdecke vorher geschmolzen war, und bezeichnet also dasjenige Flächenstück, dessen Temperatur den Schmelzpunkt des Wachses erreicht hatte. Auf einem Metallstück müßte diese Fläche kreisrund sein, weil dort in allen Richtungen gleiche Wärmebewegung stattfindet. Bei dem Kristall aber zeichnet sich eine Ellipse ab, deren große Achse die Richtung der besten, deren kleine Achse die Richtung der schlechtesten Wärmeleitung erkennbar macht.

Um die Leitfähigkeit der Flüssigkeiten und Gase zu untersuchen, können wir nicht ganz so einfach verfahren wie bei den festen Körpern; denn während in diesen eine Verbreitung der Wärme, abgesehen von Wärmestrahlung, nur auf dem Wege der Leitung möglich ist, kann in flüssigen und gasförmigen Körpern auch durch Strömungen Wärmeverbreitung zustande kommen, weil beim Erwärmen die Substanz sich ausdehnt und spezifisch leichter wird. Wenn man beispielsweise in einem kalten Zimmer den Ofen heizt, so erwärmt er zunächst die ihm benachbarte Luft und macht sie dadurch leichter als die kälteren Luftmassen, welche sich in der Nähe der Wände und

fenster befinden. Daraus ergibt sich eine Bewegung, welche die warme Luft hinauf, die kalte herabführt und außerdem unten zum Ofen hin, oben von ihm weg gerichtet ist. Wo dergleichen Strömungen in Flüssigkeiten und Gasen als Folge von Temperaturunterschieden auftreten, verbreiten sie die Wärme sehr viel rascher, als es die bloße Leitfähigkeit in unbewegter Substanz vermag. Wir können aber die Strömungen auf einfache Art ausschließen, indem wir die Erwärmung von oben her bewirken und damit erzielen, daß die leichteste und wärmste Masse sich stets oben befindet und also nicht mehr steigen kann. Ein solcher Versuch ist der folgende, welcher zugleich die geringe Wärmeleitfähigkeit des Wassers zeigt. Ein Probiergläschen befestige ich aufrecht in einem geeigneten Halter, fülle es bis oben mit Wasser und bringe in dies ein Stückchen Eis, welches durch ein daraufgelegtes Bleistück am Boden des Glases festgehalten wird. Alsdann erwärme ich mittels einer Gasflamme das im oberen Teil des Gefäßes befindliche Wasser, und nach kurzer Zeit sehen wir oben das Wasser sieden, während unten das Eis ungeschmolzen verblieben ist. Die Leitfähigkeit des Wassers ist also klein genug, um innerhalb des Abstandes von etwa 10 cm einen Temperaturunterschied von 100° C zu ermöglichen.

Ein anderes Verfahren, das gleichfalls die Wärmeleitung im Wasser unabhängig vom Einfluß der Strömungen erkennen läßt, besteht in der Anwendung mehrerer ineinandergestellter Gefäße. Ich habe hier drei Bechergläser verschiedener Größe, die so ineinandergestellt sind, daß eine Berührung durch dazwischengebrachte Korkstückchen vermieden wird. Das innere Gefäß sowie die Zwischenräume der Glaswände fülle ich mit erwärmtem Wasser und gieße die gleiche Wassermenge der nämlichen Temperatur auch in ein einzelnes Glas entsprechender Größe, welches zum Vergleich danebensteht. An beiden Stellen verfolgen wir durch hineingebrachte Thermometer die allmählich sinkende Temperatur und finden die Abkühlung merklich rascher in dem Einzelgefäß. Denn in diesem treten infolge der von außen her wirkenden Abkühlung alsbald Strömungen auf, die an der Gefäßwand abwärts führen, während die wärmer gebliebene Flüssigkeit in der Mitte aufsteigt; in dem dreifachen Gefäß aber sind solche Strömungen auf die einzelnen Schichten beschränkt und daher nahezu wirkungslos.

Die Gase leiten die Wärme noch erheblich schlechter als die Flüssigkeiten, und darum eignet sich Luft vortrefflich als Wärmeschutz für solche Gegenstände, deren Temperatur erheblich über oder unter der-

jenigen der Umgebung gehalten werden soll. Wie bei den Flüssigkeiten, so kann auch hier durch Strömungen viel mehr Wärme als durch Leitung verbreitet werden, und diese Bewegungen muß man also überall da auszuschließen suchen, wo die Luft Wärmeschutz gewähren soll. Hiernach sind wir zu handeln gewöhnt, indem wir unsere Körperwärme durch die Kleidung zusammenhalten. Wäre der unbekleidete warme Körper von kühlerer Luft umgeben, so würde diese von ihm Wärme empfangen, sogleich aufsteigen und durch eine neue Schicht von kühler Luft ersetzt werden. Die beständig erneuerte kältere Umgebung würde dem Körper viel mehr Wärme entziehen, als es diejenige Luftschicht vermag, welche in den Kleidern festgehalten wird und als einmal erwärmte, schlecht leitende Hülle die Körperwärme zusammenhält. Diese Bedeutung unserer Bekleidung wird bestätigt durch vielerlei tägliche Erfahrungen. So halten uns weite Gewänder, welche zwischen Stoff und Körper für eine nicht zu dünne Luftschicht Raum gewähren, viel wärmer als eng anliegende Kleider, und mehrere an sich dünne Stoffschichten, zwischen denen sich Luft befindet, gleichen in ihrer Wirkung dem vorher erwähnten dreifachen Glas und schützen uns besser gegen die Kälte als ein einzelner dicker Kleiderstoff. Ganz ebenso verhält es sich mit der Wirkung von Pelz, Watte, Heu usw. Diese Stoffe gelten als schlechte Wärmeleiter, sie sind es aber nur darum, weil sie viel Luft enthalten und zugleich deren Strömungen verhindern. Auch der Schnee ist aus diesem Grunde ein schlechter Wärmeleiter und wird dadurch für das Gedeihen der Wintersaat überaus wichtig. Die Schneedecke wirkt für den Boden als Wärmeschutz ähnlich wie die Kleidung für unsern Körper; und je mehr die Bodenwärme zusammengehalten und an Übertritt in die äußere Luft gehindert wird, um so kälter ist diese. Demgemäß haben wir bei zusammenhängender Schneedecke zwar kaltes Wetter, im Boden aber wird die Wärme gerade durch den schützenden Schnee zusammengehalten; und es gedeihen dabei viele Keime, die im nackten Boden erfrieren würden.

Nun will ich noch einen Versuch zeigen, der uns die erheblich verschiedene Wärmeleitung in zweierlei Gas deutlich macht. Dazu benutze ich zwei ganz gleiche Glasröhren, in deren jeder ein dünner Platindraht ausgespannt ist, während die Enden der Röhren durch Kork verschlossen sind. Die beiden Drähte verbinde ich miteinander und schalte sie in den Stromkreis eines Akkumulators, so daß sie in helles Glühen geraten. Die beiden Röhren sind so eng, daß in ihrem

Innern nahezu gleichmäßige Temperatur herrscht und Strömungen daher keinen merklichen Einfluß haben können. Wenn ich nun in einer der Röhren die Luft durch Wasserstoff ersetze, glüht beim Schließen des elektrischen Stromes nur noch der andere, unverändert in Luft verbliebene Draht, nicht aber derjenige, welcher sich jetzt in Wasserstoff befindet. Um diesen Unterschied zu deuten, bedenken wir, daß dem heißen Draht durch Leitung des umgebenden Gases dauernd Wärme entzogen wird, und daß, je stärker dies geschieht, um so niedriger seine Temperatur werden muß. Wenn nun der Wasserstoff die Wärme besser leitet, als die atmosphärische Luft, so ist damit erklärt, daß der in Wasserstoff befindliche Draht mehr Wärme durch Leitung verliert als der von Luft umgebene, und daß nur der letztere noch heiß genug ist, um für unser Auge bemerkbar zu glühen.

In der folgenden Tabelle ist die Wärmeleitfähigkeit einiger Körper zusammengestellt, und zwar in folgender Bezeichnungsweise. Wenn die betreffende Substanz eine ebene Platte von 1 cm Dicke bildet und auf ihren beiden Seiten Temperaturen herrschen, die um 1° verschieden sind, so bewegt sich ein beständiger Strom geleiteter Wärme von der wärmeren zur kälteren Seite, und zwar gehen durch jeden Quadratcentimeter in der Sekunde so viel Grammkalorien, als die Zahlen der Tabelle angeben. Diese Größe wird als die absolute Wärmeleitfähigkeit der Substanz bezeichnet, bezogen auf Zentimeter, Gramm, Sekunde und Celsiusgrad.

Absolute Wärmeleitfähigkeit.

Silber	1,00	Haare, mit Luft gemischt	0,000 058
Kupfer	0,88	" ohne Luft	0,000 48
Gold	0,70	Schnee, frisch gefallen	0,000 2
Aluminium	0,35	" alte Lage	0,000 5
Zink	0,26	Eis	0,005
Messing	0,25	Quecksilber	0,016
Platin	0,17	Wasser	0,001 4
Eisen	0,16	Äther	0,000 4
Zinn	0,15	Alkohol	0,000 5
Blei	0,08	Glycerin	0,000 6
Neusilber	0,07	Wasserstoff	0,000 32
Wismut	0,018	Kohlensäure	0,000 03
Porzellan	0 002 5	Atmosphärische Luft	0,000 05
Glas	0,001 7	Stickstoff	0,000 05
Kiefernholz, Faserrichtung	0,000 3	Sauerstoff	0,000 06
" im Radius	0,000 09		

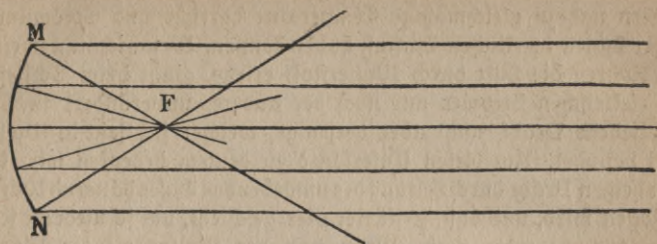


Abb. 28. Hohlspiegel.

Indem wir uns nunmehr der Strahlung zuwenden, erinnern wir uns des bereits erwähnten Gegensatzes zur Leitung: die Verbreitung der Wärme durch Strahlung geschieht rasch, und die Körper werden von den Strahlen in geradliniger Bahn durchsetzt. Beides können wir wahrnehmen, wenn eine Wolke an der Sonne vorüberzieht. Sobald die Sonne wieder frei ist, empfinden wir sofort von neuem ihre wärmende Wirkung, obgleich doch die Strahlen nun erst den Weg von der Wolke zu uns durchlaufen müssen, und wir schließen daraus, daß dieser Weg in überaus kurzer Zeit durchstrahlt wird. Das Ausbleiben der Wirkung während des Vorüberganges der Wolke lehrt uns andererseits die geradlinige Fortbewegung der Strahlen, denn nur so lange gibt die Wolke uns Schatten und Abkühlung, als sie sich in der geradlinigen Verbindung zwischen der Sonne und unserem Standpunkt befindet. Das gleiche ergibt sich aus der Anwendung des Ofenschirmes, durch den wir die Strahlenwirkung des Kaminfeuers oder des stark geheizten Ofens zu mildern suchen, indem wir dabei erfahrungsgemäß und unwillkürlich die geradlinige Bahn der Strahlen voraussetzen.

Gestört wird dies geradlinige Fortschreiten überall da, wo die Strahlen auf die Grenze zweier Körper gelangen. Von den hierbei stattfindenden Vorgängen sei zunächst die Zurückwerfung (Reflexion) genannt, welche entweder als regelmäßige Zurückwerfung (Spiegelung) oder als unregelmäßige (diffuse) Zurückwerfung auftritt. Die erstere geschieht an glatten, blanken Flächen und folgt dem Spiegelungsgesetz, welches an der Lichtwirkung der Strahlen ebenso wie hier an ihrer Wärmewirkung erkannt werden kann. Es besagt, daß der einfallende und der gespiegelte Strahl in einer Ebene mit dem Einfallslot liegen und gegen dieses gleiche Neigung haben. Die Richtigkeit des Spiegelungsgesetzes zu prüfen, kann uns ein Hohlspiegel dienen, wie

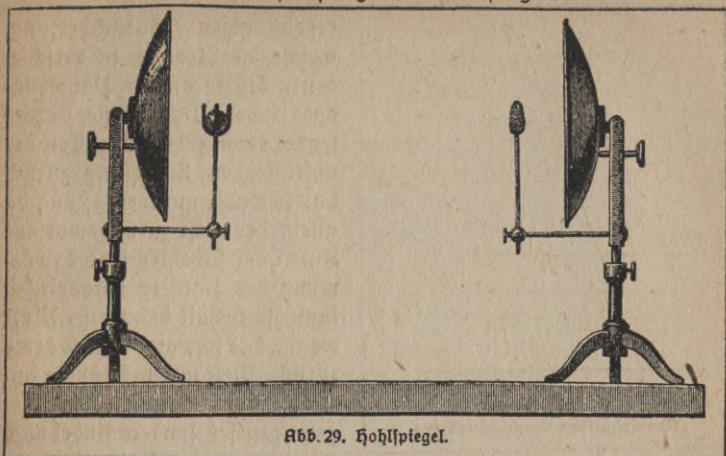


Abb. 29. Hohlspiegel.

er in Abb. 28 abgebildet ist. Seine Krümmung ist derartig, daß alle parallel zur horizontalen Spiegelachse auf seine Fläche MN fallenden Strahlen nach einem Punkte, dem Brennpunkt F , gespiegelt werden, und daß ebenso in umgekehrter Richtung die von F kommenden Strahlen nach der Spiegelung parallel zur Achse verlaufen. Daß man mittels zweier Hohlspiegel die von einer Stelle ausgehende Strahlung größtenteils an einer zweiten Stelle wieder vereinigen kann, sehen wir aus dem folgenden Versuch (Abb. 29). Im Brennpunkt eines Hohlspiegels bringe ich den Lichtbogen einer elektrischen Lampe (oder in deren Ermangelung eine rotglühend gemachte Eisentugel) an und bewirke dadurch, daß die Strahlen dieser Wärmequelle auf die Fläche des Spiegels fallen und von dieser als paralleles Bündel horizontal zurückgeworfen werden. Stelle ich gegenüber dem ersten einen zweiten Hohlspiegel auf, so wird die ankommende Strahlung von diesem aufgefangen und durch Spiegelung in seinem Brennpunkt vereinigt. Die hier stattfindende Ansammlung von Wärme reicht aus, um ein Stück Papier, das ich an jene Stelle halte, in Brand zu setzen. Dabei fällt uns ein Unterschied in dem Verhalten verschiedener Papiersorten auf: schwarzes Papier entzündet sich im Brennpunkt des Hohlspiegels rasch, bedrucktes, d. h. teilweise schwarzes Papier kaum weniger schnell; weißes Papier dagegen gerät entweder gar nicht in Brand oder doch erst nach erheblich längerer Einwirkung der Strahlen. Dies beruht auf der un-

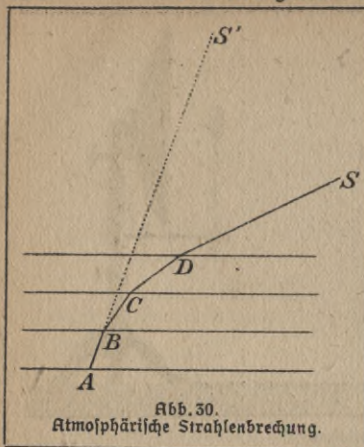


Abb. 30.
Atmosphärische Strahlenbrechung.

regelmäßigen Zurückwerfung, welche die Strahlen in verschiedener Stärke an den Papierflächen finden. Das weiße Papier sendet einen erheblichen Teil der auffallenden Strahlung zurück, das schwarze nur wenig; und da allein der nicht zurückgeworfene Anteil der Strahlen eine Erwärmung des Papiers hervorrufen kann, so behält das weiße Blatt wenig, das schwarze viel Wärme zurück. Diese unregelmäßige Zurückwerfung folgt nicht dem Spiegelungsgesetz, sondern findet nach allen Seiten hin statt.

Während ein Teil der Strahlung, die auf die Grenze zweier Körper fällt, in der eben erwähnten Art zurückgeworfen wird, dringt der übrige Teil ein. Wenn dieser Anteil nicht absorbiert wird, so tritt Brechung ein; d. h. der Strahl verändert seine Richtung beim Übergang aus einem Körper in einen zweiten um so mehr, je verschiedener die Geschwindigkeit seines Fortschreitens in beiden ist. Hat er eine größere Geschwindigkeit vor als nach dem Übergang, so wird er zum Einfallslot hin, anderenfalls von diesem weg gebrochen. So werden z. B. von den Sonnenstrahlen die leichten, dünnen Luftschichten der Höhe rascher durchlaufen als die dichteren Schichten, welche sich nahe am Boden befinden; und darum erleiden die Sonnenstrahlen in der Atmosphäre eine Brechung, welche zum Einfallslot gerichtet ist und vom geraden Wege nach unten hin abweicht (Abb. 30), von SD über C und B nach A führt.

Die Wärmewirkung gebrochener Strahlen zeigt ferner das „Brenn-
glas“, ein konvex geschliffene Glaslinse, welche die Strahlen der Sonne oder der elektrischen Bogenlampe durch Brechung ebenso vereinigt, wie wir es bei dem Hohlspiegel mittels Zurückwerfung erzeugten.

Eine andere Anwendung solcher Brechung finden wir beim Sonnenschein-Autographen, der an meteorologischen Stationen benutzt wird, um die Dauer des Sonnenscheins aufzuzeichnen (Abb. 31). Er besteht aus einer klaren Glasugel, die den Sonnenstrahlen ausgesetzt wird und sie durch Brechung auf einem hinter der Kugel angebrachten Pappstrei-

fen sammelt. Scheint die Sonne auf den Apparat, so brennt sie in die Pappe eine schwarze Spur und zeichnet während ihres täglichen Laufes einen entsprechenden Brandstreifen, der überall da unterbrochen ist, wo die Sonne von Wolken verhüllt war. Der Pappstreifen ist mit Vordruck versehen, auf welchem die einzelnen Tagesstunden bezeichnet sind; und indem man für jeden Tag

einen solchen Streifen der Besonnung aussetzt, ist nachher leicht zu ersehen, wann und wie lange die Sonne geschienen hat. Aus derartigen Aufzeichnungen hat sich z. B. ergeben, wie viel mehr Sonnenschein es auf dem Lande und in kleinen Orten gibt als in großen Städten, deren Rauch- und Nebelmassen die Strahlungswirkung stören. Hamburg hatte im Jahre 1898 insgesamt nur 1026,3 Stunden Sonnenschein, während das in ganz ähnlicher geographischer Lage an der holsteinischen Küste gelegene Städtchen Meldorf im gleichen Jahre 1332,8 Sonnenscheinstunden zu verzeichnen hatte. Verglichen mit der möglichen Dauer des Sonnenscheins, d. h. mit der Summe der Tagesstunden, ergibt dies für Hamburg 22,9 Prozent, für Meldorf 29,8 Prozent Sonnenscheindauer.

Endlich haben wir noch denjenigen Teil der auf die Grenze zweier Körper fallenden Strahlung zu betrachten, welcher weder zurückgeworfen noch gebrochen wird. Dieser Teilbetrag wird absorbiert, d. h. er hört auf, als Strahlung fortzuschreiten, und die ihm innewohnende lebendige Kraft wird in Körperwärme umgesetzt. So wurde bei dem Versuch, den wir vorher mit den Hohlspiegeln anstellten, derjenige Teil der Strahlung, welchen das Papier absorbierte, in Wärme verwandelt, und zwar ein um so höherer Betrag, je weniger zurückgeworfen wurde. Das schwarze Papier absorbierte stärker als das weiße und wurde darum wärmer.



Abb. 31. Sonnenscheinautograph

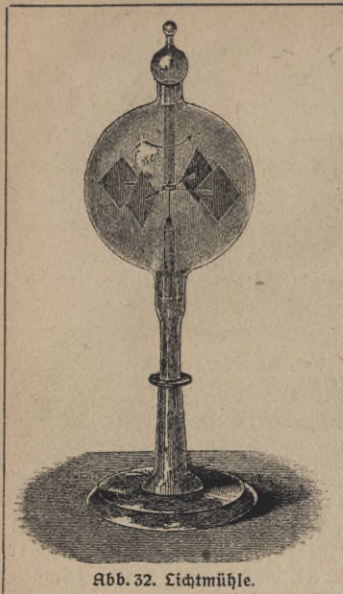


Abb. 32. Lichtmühle.

Einen anderen Versuch, der gleichfalls die stärkere Absorption der dunkelen Flächen zeigt, stelle ich mit dem kleinen, als Lichtmühle (Radiometer) bezeichneten Apparat (Abb. 32) an. Er besteht aus einem leichten Drehkreuz, welches in horizontaler Stellung auf einer Spitze ruht und um diese drehbar ist; an seinen vier Enden trägt es aufrecht stehende Glimmerblättchen, von denen je eine Seite mit Ruß geschwärzt ist, und zwar derartig, daß beim Drehen die schwarzen Flächen aller Platten an einem ruhenden Auge in der gleichen Stellung vorbeikommen. Das Ganze ist in ein gläsernes Gehäuse eingeschlossen, welches außerdem nur noch verdünnte Luft enthält. Im Tageslicht

pflegt das Drehkreuz unbewegt zu verharren. Lasse ich aber jetzt aus geringer Entfernung die Strahlen des elektrischen Lichtbogens darauffallen, so beginnt alsbald eine rasche Drehung, denn die schwarzen Flächen werden vermöge ihrer stärkeren Absorption mehr als die blanken Glimmerflächen erwärmt, ebenso auch die ihnen anliegende Luft, und indem diese sich ausdehnt, übt sie rückwirkend auf die schwarzen Flächen einen Druck aus, der an allen vier Enden des Kreuzes in gleichem Sinne auftritt und es in rasche Drehung versetzt.

Ähnlich wie die dunkelen zeichnen sich auch die matten oder rauhen Flächen vor den glatten durch stärkere Absorption der darauffallenden Strahlung aus. Um dies zu verstehen, bedenken wir, daß ein rauher Körper mit allen seinen Unebenheiten, Erhöhungen und Vertiefungen erheblich größere Oberfläche besitzt als ein glatter Körper von gleicher Größe und Gestalt, und daß demnach die rauhe Fläche mehr Gelegenheit zur Aufnahme der Strahlung bietet.

Der gleiche Unterschied wie in betreff der Absorption einfallender Strahlung findet auch bei der Aussendung (Emission) von Strahlen

statt. Ist ein wärmerer Körper von kälteren umgeben, und strahlt ihnen demnach Wärme zu, so geschieht diese Ausstrahlung stärker von dunklen und von rauhen Flächen als von hellen und glatten.

Hierauf beruhetes, daß auf dunklen und rauhen Bodenstücken größere Temperaturschwankungen auftreten als auf hellen oder glatten, weil jene am Tage mehr Strahlungswärme aufnehmen und nachts mehr verlieren.

Für einige weitere Absorptionsversuche soll uns die vorher schon benutzte Lichtmühle dienen. Ich stelle sie wieder so auf, daß sie durch die Strahlung der Bogenlampe in rasche Drehung versetzt wird, und bringe dann in den Gang der Strahlen ein Glasfläschchen, dessen ungefähr kugelförmiger Innenraum mit Wasser gefüllt ist. Sogleich beginnt die Mühle sich langsamer zu drehen und zeigt damit, daß das Wasser, welches wir als durchsichtig anzusehen gewöhnt sind, offenbar diejenigen Strahlen, die auf die Lichtmühle wirken, stark absorbiert und nur zu einem geringen Teil durchläßt. Nun ersetze ich das Wassergefäß durch ein zweites Fläschchen von derselben Größe und Gestalt, welches aber mit einer Lösung von Jod in Schwefelkohlenstoff gefüllt ist. Diese Flüssigkeit ist dunkelviolett und für das Auge schon in geringer Schichtdicke völlig undurchsichtig. Die Lichtmühle aber scheint anders als unsere Augen zu empfinden, denn sie verfällt sofort in schnelle Drehung und gewinnt sogar bald eine noch größere Geschwindigkeit, als sie ohne das Fläschchen hatte. Wir entnehmen daraus, daß diese dunkle Flüssigkeit für die auf die Lichtmühle wirkenden Strahlen viel durchlässiger ist als das Wasser. Indem sie außerdem die Strahlen bricht und sammelt, vereinigt sie in der Lichtmühle eine größere Strahlungsmenge und erzeugt eine raschere Drehung, als es in Abwesenheit des Fläschchens der Fall ist.

Aus diesen Beobachtungen geht scheinbar hervor, daß wir es dabei mit zwei verschiedenen Arten von Strahlen zu tun hatten: Lichtstrahlen, die vom Wasser wenig und von der Jodlösung stark absorbiert werden, und Wärmestrahlen, bei denen das Umgekehrte zutrifft. So pflegte man früher in der That die Sache darzustellen; die Erfahrung lehrt aber, daß eine Trennung der Strahlen nach verschiedenen Wirkungsweisen nicht möglich ist, weil dieselbe Strahlung je nach Art des getroffenen Körpers in verschiedener Weise zu wirken vermag. Eine Strahlung z. B., die unserem Auge als rotes Licht erscheint, ruft am Thermometer Erwärmung und auf einer rotempfindlichen photo-

graphischen Platte chemische Änderung hervor. Wollen wir verschiedene Gattungen von Strahlen unterscheiden, so kann es nicht nach der Wirkung geschehen, sondern nur nach der Beschaffenheit der Strahlen selbst. Über diese geben uns Erscheinungen Aufschluß, die hier nur kurze Erwähnung finden können: Interferenz, Beugung und Polarisation*); indem wir diese Vorgänge vermittels der verschiedenen Strahlenwirkungen erforschen, finden wir, daß es Transversalwellen des Äthers sind, welche als Strahlen den Raum durchheilen und in denjenigen Körpern, von denen sie absorbiert werden, Licht, Wärme, chemische Änderung usw. durch Umsezung der mitgeführten Energie erzeugen. Untereinander sind diese Wellen durch ihre Länge verschieden, d. h. durch den Abstand, in welchem je zwei Wellenberge aufeinander folgen; und da die Brechbarkeit der Strahlen sich mit der Wellenlänge regelmäßig ändert, kann man den Vorgang der Brechung dazu benutzen, um die verschiedenen Strahlen voneinander zu trennen und jede einzelne Wellenlänge für sich zu untersuchen. Läßt man zu diesem Zweck die Strahlen der Sonne durch ein brechendes Prisma gehen und nach der Brechung auf einen Schirm fallen, so erhält man ein Spektrum, dessen durch Wärmewirkung nachweisbarer Teil in Abb. 33 gezeichnet ist. Darin folgen von links nach rechts die Strahlen aufeinander nach wachsender Wellenlänge und nach abnehmender Brechbarkeit.

*) Genaueres findet man in Nr. 64 dieser Sammlung: R. Börnstein und W. Marckwald, Sichtbare und unsichtbare Strahlen. 1905.

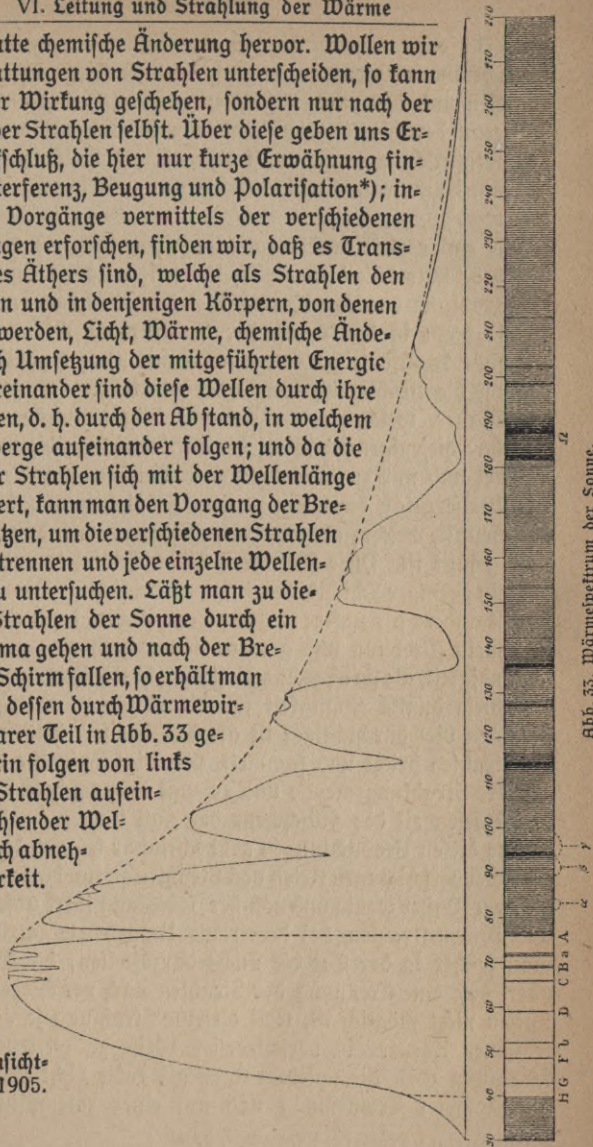


Abb. 33. Wärmespektrum der Sonne.

Die Zahlen geben die Wellenlängen in Hunderttausendsteln des Millimeters an; nur der hell gezeichnete Teil zwischen A (rot) und H (violett) ist dem Auge bemerkbar, das ganze übrige, in der Zeichnung schraffierte Spektrum erscheint dunkel und wird ultraviolett resp. Ultrarot genannt in denjenigen Teilen, die sich an den violetten (links) resp. roten (rechts) Teil des Spektrums anschließen. Daß wir diese Strahlenarten nicht sehen können, liegt allein an der begrenzten Wahrnehmungsfähigkeit unserer Augen, denn ein anderer Unterschied als derjenige der Wellenlänge besteht zwischen dem sichtbaren und unsichtbaren Teil des Spektrums nicht. Als Fraunhofersche Linien bezeichnet man Unterbrechungen des Spektrums, welche von der Absorption der betreffenden Strahlen in der Atmosphäre der Sonne oder der Erde herrühren und an den durch schwarze Linien erkennbar gemachten Stellen als dunkle und kühle Lücken erscheinen. Die oberhalb des Spektrums gezeichnete Linie gibt durch ihre wechselnde Höhe die Verteilung der Wärmewirkung an, gemessen mittels eines als Bolometer bezeichneten thermometrischen Apparates; man erkennt darin als kühlere Stellen die unten gezeichneten Fraunhoferschen Linien und sieht, daß die Wärmewirkung sich vom Ultrarot bis in das Ultraviolett hinein erstreckt.

Die folgende Tabelle enthält die Längen derjenigen Ätherwellen, welche man bisher mittels verschiedener Arten der Strahlenwirkung nachzuweisen vermochte:

Wellenlängen des gesamten Spektrums.

Röntgenstrahlen etwa	0,0012	hunderttausendstel mm
Ultraviolette Strahlen, kürzeste beobachtete, etwa	9	" "
Violettes Licht	36 bis 42	" "
Blaues "	42 " 49	" "
Grünes "	49 " 54	" "
Gelbes "	54 " 59	" "
Gelbrotes "	59 " 65	" "
Rotes "	65 " 81	" "
Ultrarote Strahlen, längste beobachtete	0,31	mm
Hertz'sche elektromagnetische Wellen, kürzeste beobachtete	2	"
Hertz'sche elektromagnetische Wellen der drahtlosen Telegraphie	etwa 100 bis 10000	m.

Verzeichnis der Abbildungen und ihrer Quellen.

Abb.	Seite
1. Ausdehnen beim Erwärmen (nach Kohls Katalog)	1
2. Zusammenziehung beim Erkalten (nach Kohls Katalog)	2
3. Kompensationsstreifen (nach Bremer, Leitfaden der Physik)	2
4. Rostpendel (nach Bremer, Leitfaden der Physik)	4
5. Kompensierte Unruhe einer Taschenuhr (nach Bremer, Leitfaden der Physik)	4
6. Bewegung einseitig erwärmten Wassers (nach Lenbolds Katalog)	7
7. Aufsteigender Luftstrom (nach Wettin, Poggendorffs Annalen)	9
8. Thermometerskalen (nach Bremer, Leitfaden der Physik)	16
9. Vergleichung spezifischer Wärmen (nach Gebhardts Katalog)	19
10. Thermoskop (nach Lenbolds Katalog)	21
11. Pneumatisches Feuerzeug (nach Bremer, Leitfaden der Physik)	33
12. Flasche zur dynamischen Erwärmung und Abkühlung (nach Bremer, Leitfaden der Physik)	34
13. Apparat von Joule zur Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents (nach Wüllner Bd. II)	37
14. Apparat von Rubens zur Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents (nach Verh. d. D. Phys. Gesellschaft 1906)	38
15. Eistalorimeter (nach Wüllner Bd. II)	51
16. Dampfdruck verschiedener Flüssigkeiten (nach Wüllner Bd. II)	54
17. Linde-Maschine zur Verflüssigung der Luft (nach Bremer, Leitfaden der Physik)	62
18. Haarhygrometer (nach Börnstein, Wetterkunde)	74
19. Kondensationshygrometer (nach Bremer, Leitfaden der Physik)	75
20. Psychrometer (nach Bremer, Leitfaden der Physik)	75
21. Temperatur der auf- und absteigenden Föhnluft (nach Börnstein, Wetterkunde)	82
22. Dampfmaschine (nach Vater, Die Dampfmaschine II [ANuG Bd. 394])	90
23. Heißluftmaschine (nach Grimsehl, Lehrbuch der Physik)	95
24. Gasmaschine (nach Grimsehl, Lehrbuch der Physik)	96
25. Hauptteile einer Dampfturbine (nach Vater, Die neueren Wärmekraftmaschinen II [ANuG Bd. 86])	98
26. Wärmeleitung (nach Wüllner Bd. II)	99
27. Wärmeleitung (nach Kohls Katalog)	101
28. Hohlspiegel (nach Börnstein und Marckwald, Sichtbare und unsichtbare Strahlen [ANuG Bd. 64])	106
29. Hohlspiegel (nach Börnstein und Marckwald, Sichtbare und unsichtbare Strahlen [ANuG Bd. 64])	107
30. Atmosphärische Strahlenbrechung (nach Börnstein und Marckwald, Sichtbare und unsichtbare Strahlen [ANuG Bd. 64])	108
31. Sonnenscheinautograph (nach Börnstein und Marckwald, Sichtbare und unsichtbare Strahlen [ANuG Bd. 64])	109
32. Lichtmühle (nach Müller-Lehmann, Physik)	110
33. Wärmespektrum der Sonne (nach Börnstein und Marckwald, Sichtbare und unsichtbare Strahlen [ANuG Bd. 64])	112

Verzeichnis der im Text beschriebenen Unterrichtsversuche.

	Seite		Seite
Ausdehnung, Ring mit Kugel Kraftwirkung beim Abkühlen und Verkürzen eines Stahl- stabes	1 2	Dynamische Erwärmung und Abkühlung, gezeigt mittels Thermoskops	34
Verschiedene Ausdehnung von Kupfer und Stahl	2	Reibungswärme	36
Zersprengen einer Glaskugel durch Erwärmen ihres In- halts (Wasser oder Luft)	6	Leicht schmelzbare Legierungen Regelationsversuche	40 40
Bewegung einseitig erwärm- ten Wassers	7	Sieden von Wasser unter ge- ringem Druck	53
Aufsteigender Luftstrom bei örtlicher Erwärmung, sicht- bar gemacht durch Tabaks- rauch	9	Dampfdruck verschiedener Flüs- sigkeiten	54
Lichtbrechung im aufsteigen- den, warmen Luftstrom	11	Dampfstrahl mit unterkühltem Dampf und Kondensation durch Staub	58
Ausdehnung des Wassers	11	Versuche mit flüssiger Luft	62
Sprengen einer Bombe durch gefrierendes Wasser	12	Kritischer Zustand des Äthers Verdunstungsfälte, gezeigt mittels Thermoskops	64 67
Sprengen eines Probierglass chens durch erstarrendes Wismut	13	Verdunstungsfälte von Schwefel- kohlenstoff	67
Anfängliches Sinken eines Ther- mometers beim raschen Er- wärmen	16	Bestimmung der Verdamp- fungswärme des Wassers	68
Quecksilberthermometer mit Hartgummi-Gefäß („ver- kehrtes Thermometer“)	17	Nebelbildung durch dynamische Abkühlung feuchter, staub- haltiger Luft	82
Vergleichung spezifischer Wär- men durch Wachserschmelzen	19	Leidenfrostscher Versuch	88
Vergleichung der spezifischen Wärme von Kupfer und Blei im Thermoskop	21	Wärmeleitung in einem Me- tallstab	99
Verlöschen einer Kerzenflamme in abgeschlossenem Lustraum	25	Vergleich der Wärmeleitung in verschiedenen Stoffen	100
Unvollständige und vollstän- dige Verbrennung von Leuchtgas im Bunsenbrenner	25	Wärmeleitung in einem Draht- netz	101
Dynamische Erwärmung im pneumatischen Feuerzeug	33	Anwendung auf die Davnische Sicherheitslampe	101
		Wärmeleitung in Kristallen	102
		Schlechte Wärmeleitung in Wasser	103
		Wärmeleitung in Luft und Wasserstoff	104
		Hohlspiegel-Versuche	107
		Radiometer-Versuche	110

Verzeichnis der in Tabellenform mitgetheilten Zahlenangaben.

	Seite		Seite
Lineare Ausdehnungskoeffizienten	3	Sättigungstemperaturen und -drücke für schwer zu verflüssigende Körper	59
Kubische Ausdehnungskoeffizienten	11	Kritische Temperaturen und Drücke	65
Thermometerstufen	15	Verdampfungswärmen	69
Spezifische Wärme fester und flüssiger Körper	22	Sättigungstemperaturen und -drücke des Wasserdampfes (Taupunkte)	72
Verbrennungswärme	24	Psychrometertafel	77
Verdünnungs- und Lösungswärmen	28	Verhalten gesättigten Wasserdampfes (Dichte und Gesamtwärme)	89
Kältemischungen	29	Brennstoffverbrauch und Wirkungsgrad verschiedener Wärmekraftmaschinen	97
Spezifische Wärme von Gasen bei konstantem Druck	31	Absolute Wärmeleitungsfähigkeit	105
Schmelztemperaturen	39	Wellenlängen für alle bekannten Ätherwellen	113
Schmelzwärmen	47		
Siedetemperatur des Wassers bei verschiedenen Barometerständen	53		
Sättigungstemperaturen und -drücke	56		
Siedepunkte beim Druck einer Atmosphäre	57		

Alphabetisches Verzeichnis.

Absolute Luftfeuchtigkeit 71.	Aufsteigender Luftstrom 85.	Brennstoffverbrauch 96.
Absolute Wärmeleitungsfähigkeit 105.	Augusts Psychrometer 75.	Bunsenbrenner 25.
Absorption 109.	Ausdehnung beim Erwärmen 1.	Bunsens Eiskalorimeter 50.
Anfahkerne (Kondensation) 58, 84.	Auspuffmaschine 91.	Busch 36.
Äquivalent, mechanisches, der Wärme 32, 37.	Barometer 54.	Celsius 15.
Aspirationspsychrometer 75.	Benzinmaschine 96.	Chamisso 36.
Atmosphärische Feuchtigkeit 70.	Binnenklima 23.	Dampfdruck 54, 65, 71.
Atmosphärische Strahlenbrechung 108.	Böen 44.	Dampfheizung 70.
Atome 36.	Bolometer 113.	Dampffessel 90.
	Bouillau 14.	Dampfmaschine 88, 90.
	Brechung der Strahlen 108.	Dampfstrahl 58.
	Brennglas 108.	Dampfturbine 97.
		Dampfwärme 89.
		Dichte 6.
		Dichtemaximum 11.

- Doppeltwirkende Maschine 90.
 Dynamische Erwärmung und Abkühlung 33.
 Einfachwirkende Maschine 90.
 Einspritzkondensator 93.
 Eis, Ausdehnung 12.
 Eiskalorimeter 50.
 Eiskeller 49.
 Eisregen 44.
 Emission 110.
 Energie 32, 36.
 Entropie 98.
 Erstarren 39.
 Erstarrungspunkt 39.
 Expansionsmaschine 91.
 Fahrenheit 14.
 Fallgeschwindigkeit des Regens 86.
 Fallwinde 82.
 Feuchtigkeit der Luft 71.
 Feuerzeug, pneumatisches 33.
 Flüssige Luft 61.
 Flüssigkeiten, Ausdehnung 5.
 Föhn 80.
 Fraunhofer'sche Linien 113.
 Galilei 13.
 Gase, Ausdehnung 5.
 Gasmaschine 95.
 Gasthermometer 17.
 Gebundene Wärme 46, 67.
 Gefrieren, Ausdehnung dabei 12.
 Gefrierpunktserniedrigung 45.
 Gesättigter Dampf 55.
 Gesamtwärme von Dampf 89.
 Gletscher 42.
 Graupeln 44.
 Haarhygrometer 73.
 Hagel 44.
 Hagelstadium 87.
 Hauptsatz, erster 36.
 Hauptsatz, zweiter 98.
 Heißdampfmaschine 94.
 Heißluftmaschine 95.
 Heizkraft 24.
 Hochdruckzylinder 92.
 Höhenthermometer 53.
 Hohlspiegel 106.
 Hygrometer 73.
 Hypsothermometer 53.
 Ionen 84.
 Jenaer Thermometerglas 16.
 Joule 37.
 Kältemaschine 61.
 Kältemischungen 28.
 Kalibrieren von Thermometern 16.
 Kalmengürtel 8.
 Kalorie 21.
 Kalorimeter 22, 50.
 Kleidung, Wärmewirkung 104.
 Kolben 90.
 Kolbenstange 90.
 Kolbenüberdruck 90.
 Kompensationsstreifen 2.
 Kondensator 93.
 Kondensationshygrometer 74.
 Kondensationskerne 58, 84.
 Kondensationswärme 67.
 Kondensieren 58.
 Kreuzkopf 90.
 Kristalle, Wärmeleitung 102.
 Kritischer Zustand 64.
 Kubische Ausdehnung 10.
 Kurbel 90.
 Längenmessung 5.
 Land- und Seewind 9.
 Latente Wärme 46, 67.
 Legierungen, leicht schmelzbare 40.
 Leitung der Wärme 99.
 Leuchtgasmaschine 96.
 Leydenfrost'scher Versuch 88.
 Lichtmühle 110.
 Linde 61.
 Lineare Ausdehnung 3.
 Linné 15.
 Lösungswärme 27.
 Luftfeuchtigkeit 70.
 Luftpumpe 93.
 Mechanisches Wärmeäquivalent 32, 37.
 Mehrstufige Expansion 92.
 Mischungsmethode für spez. Wärme 20, 50.
 Mischungsverhältnis 71.
 Mitteldruckzylinder 92.
 Moleküle 36, 45, 57.
 Molekulargewicht 45.
 Monsun 9.
 Nachtfrostprognose 80.
 Natur der Wärme 36.
 Nebelbildung 84, 85.
 Niederdruckzylinder 92.
 Oberflächenkondensator 93.
 Partialdruck 65.
 Passatwind 8.
 Permanente Gase 60.
 Petroleummaschine 96.

- Pictetsche Flüssigkeit 69.
 Platzregen 44.
 Pneumatisches Feuerzeug 33.
 Psychrometer 75.
 Psychrometertafel 77.
 Quellen der Kälte 28, 49.
 Quellen der Wärme 23.
 Radiometer 110.
 Réaumur 14.
 Reflexion 106.
 Regulation 42.
 Regenstadium 86.
 Reif 85.
 Relative Luftfeuchtigkeit 73.
 Rippenkörper 70.
 Rosens Metall 40.
 Rostpendel 4.
 Rubens 38.
 Rußbildung 25.
 Sättigung 56.
 Sauggasmaschine 96.
 Schlieren 10.
 Schlittschuhlaufen 42.
 Schmelzen 39.
 Schmelzpunkt 39.
 Schmelzwärme 46.
 Schneegrenze 42.
 Schneestadium 87.
 Schubstange 90.
 Schwüle 76.
 Schwungrad 90.
 Seeklima 23.
 Seewind 9.
 Sicherheitslampe 101.
 Sicherheitsplatten 40.
 Sieden 52.
 Siedepunkt 52, 57.
 Siedepunktserhöhung 57.
 Siedeverzug 57.
 Solarfonstante 24.
 Sonnenschein = Auto-graph 108.
 Sonnenwärme 23.
 Spektrum 112.
 Spezifische Feuchtigkeit 71.
 Spezifische Wärme 22, 29, 50.
 Spiegelung 106.
 Spiritusmaschine 96.
 Springen ungleichmäßig erwärmter Gläser 2.
 Stationärer Zustand 100.
 Staubteilchen als Kondensationskerne 58, 84.
 Steuerung 91.
 Strahlung 106.
 Tau 85.
 Taupunkt 73.
 Taupunktspsychrometer 74.
 Temperatur und Wärme 18.
 Thermometer 13.
 Thermophor 48.
 Thermoskop 21.
 Torricellis Vakuum 54.
 Toter Punkt 90.
 Trockenstadium 86.
 Turbine 97.
 Überhitzer 94.
 Überhitzter Dampf 56.
 Ultrarot 113.
 Ultraviolet 113.
 Ungefättigter Dampf 56.
 Unruhe 4.
 Unterkühlter Dampf 58.
 Unterkühlung 43, 47.
 Verbrennung 24.
 Verbindungswärme 26.
 Verbundmaschine 92.
 Verdampfungswärme 68.
 Verdränger 95.
 Verdünnungswärme 27.
 Verdunsten 66.
 Verdunstungskälte 67.
 Verflüssigen 58.
 Verflüssigen von Gasen 58, 69.
 Volldruckmaschine 91.
 Wärmeäquivalent 32, 37.
 Wärmekraftmaschinen 88.
 Wärmeleitung 99.
 Wärmemenge 22.
 Wärmemessung 18, 22.
 Wärmequellen 23.
 Wärmestrahlung 106.
 Wärmetönung 26.
 Warmwasserheizung 7.
 Wasser, Ausdehnung 11.
 Wasserstoffthermometer 18.
 Welle 90.
 Wellenlänge 112.
 Winderzeugung 8.
 Wirkungsgrad 96.
 Wolkenbildung 35, 83.
 Woodsches Metall 40.
 Zentralheizung 7, 70.
 Zurückwerfung 106.
 Zusammenziehen beim Erkalten 2.
 Zylinder 90.

Einführung in die technische Wärmelehre. (Thermodynamik.) Von Geh. Bergrat Professor Dr. R. Vater. Mit 40 Abbildungen im Text. (Aus Natur und Geisteswelt Bd. 516.) Geh. M. 1.20, geb. M. 1.50

Mit großer Klarheit und Anschaulichkeit behandelt der Verfasser in diesem Bändchen unter Beschränkung auf die wichtigsten Regeln und Gesetze, deren praktische Verwendbarkeit grundsätzlich und überall durch Beispiele nachgewiesen wird, die Grundlagen der mechanischen Wärmetheorie.

Praktische Thermodynamik. Aufgaben und Beispiele zur mechanischen Wärmelehre. Von Geh. Bergrat Prof. Dr. R. Vater. Mit 40 Abb. im Text und 3 Tafeln. (Aus Natur und Geisteswelt Bd. 596.) Geh. M. 1.20, geb. M. 1.50

In Beispielen und Aufgaben, die der Praxis entnommen sind, zeigt das Bändchen die mannigfache Anwendung der Thermodynamik auf allen Gebieten der Technik.

Thermodynamics. An introductory treatise dealing mainly with first principles and their direct applications. By Prof. G. H. Bryan, Sc. D., J. R. S. Geb. M. 7.—

Les théories statistiques en thermodynamique. Conférences faites au collège de France en novembre 1912. Rédigées en 1913 par L. Dunoyer. Von Prof. Dr. H. A. Lorentz. Geh. M. 5.80

Grundlagen der Theorie u. des Baues der Wärmekraftmaschinen. Aus d. Engl. v. Prof. Dr. A. Musil. Zugl. autor., erw. dtsh. Ausg. d. Werkes: „The steam-engine and other heat-engines“ v. Prof. Dr. J. A. Ewing. Mit 302 Figuren. Geb. M. 20.—

„Somit haben wir ein Werk von seltener Vollständigkeit und Abrundung vor uns, welches nicht nur dem angehenden Ingenieur, sondern auch jedem mit einigen physikalischen Kenntnissen ausgerüsteten Gebildeten warm empfohlen werden kann.“ (Archiv f. Mathematik u. Physik.)

Bau der Dampfturbinen. Von Prof. Dr. A. Musil. Mit zahlreichen Abb. Geb. M. 8.—

Aufgabensammlung aus der technischen Mechanik für den Schul- und Selbstunterricht. Von Prof. N. Schmitt. In 2 Bänden. Mit zahlr. Fig. im Text. (AMuG Bd. 558/559.) Geh. je M. 1.20, geb. M. 1.50

I. Bewegungslehre, Statik, 156 Aufgaben u. Lösungen. II. Dynamik. 140 Aufgaben u. Lösungen. Im Anschluß an die Lehrgänge werden Aufgaben aus der Bewegungslehre, Statik und Dynamik gegeben und teils rechnerisch, teils graphisch, wie auch nach beiden Methoden gelöst.

Die technische Mechanik. Element. Lehrbuch f. mittl. maschinentechn. Fachschul. u. Hilfsb. f. Studier. höh. techn. Lehranst. Von Reg.-Bmstr. Dipl.-Ing. P. Stephan. I.: Mechanik starrer Körper. Mit 255 Fig. Geh. M. 5.—, geb. M. 7.—. II.: Festigkeitslehre u. Mechanik der flüssigen u. gasförmigen Körper. Mit 200 Fig. Geh. M. 5.—, geb. M. 7.—

Die elementare Mechanik. Ein Lehrbuch, enthaltend: Eine Begründung der allgemeinen Mechanik; die Mechanik der Systeme starrer Körper; die synthetischen und die Elemente der analytischen Methoden sowie eine Einführung in die Prinzipien der Mechanik deformierbarer Systeme. Von Professor Dr. G. Hamel. Mit 265 Figuren. Geh. M. 16.—, geb. M. 18.—

Vorlesungen über technische Mechanik. Von Geh. Hofrat Professor Dr. A. Söppel. In 6 Bänden. Gebunden.

I. Bd. Einführung in die Mechanik. 5. Aufl. Mit 104 Figuren. Geh. M. 9.20, geb. M. 10.—
II. Bd. Graphische Statik. 3. Aufl. Mit 209 Fig. M. 8.— III. Bd. Festigkeitslehre. 6. Aufl. Mit ca. 100 Fig. ca. M. 16.— IV. Bd. Dynamik. 4. Aufl. Mit 86 Fig. M. 12.— V. Bd. Die wichtigsten Lehren der höheren Elastizitätstheorie. Mit 44 Fig. M. 10.— VI. Bd. Die wichtigsten Lehren der höheren Dynamik. Mit 30 Fig. M. 12.—

Teuerungszuschläge auf sämtliche Preise 30 % einschließlich 10 % Zuschlag der Buchhandlung

Verlag von B. G. Teubner in Leipzig und Berlin

Lehrb. d. Experimentalphysik. V. Geh. Reg.-R. Prof. Dr. A. Willner. 4 Bde. 6. bezw. 5. Aufl. Geh. M. 32.—, geb. M. 64.— (Die Bände sind auch einzeln käuflich.)

„Der Inhalt umfaßt alles, was gegenwärtig auf d. Gebiete d. Wissenschaft bekannt ist.“ (Ztschr. d. österr. Ing.-u. Arch.-Ver.)

Repertorium der Physik. V. Prof. Dr. R. S. Weber u. Prof. Dr. R. Gans. 2 Bde: I. Bd.: Mechanik u. Wärme. Unt. Mitarb. von F. A. Schulze-Marburg u. P. Herz-Göttingen. II. Teil Mechanik, Elastizität, Hydrodynamik u. Akustik. Mit 126 Fig. im Text. Geh. M. 8.—. 2. Teil: Kapillarität, Wärme, Wärmeleitung, kinetische Gastheorie u. statist. Mechanik. Mit 72 Fig. M. 11.—, geb. M. 12.—. II. Bd. In Vorb.

Das Repertorium soll mehr bringen als die elementaren Lehrbücher, indem es neuere Untersuchungen teils behandelt, teils wenigstens erwähnt, damit gewissermaßen das Studium der Einzelwerke über besondere Gebiete der Physik vorbereitet und Auffinden und Verständnis der Originalarbeiten erleichtert.

Physik in graphischen Darstellungen. Von Hofrat Prof. Dr. F. Auerbach. 1373 Figuren auf 213 Tafeln mit erläut. Text. Geh. M. 9.—, geb. M. 10.—

„Die Anordnung ist systematisch und folgt der üblichen Einteilung der Physik in ihre einzelnen Zweige. Druck und Papier sind vorzüglich. Das Buch hat sicher einen hohen Wert.“ (Unterrichtsblätter f. Mathematik u. Naturwissenschaft.)

Taschenbuch für Mathematiker und Physiker. Unt. Mitwirk. namhafter Fachgenossen hrsg. von Hofrat Prof. Dr. F. Auerbach u. Prof. Dr. R. Rothe. I. Jahrg. 1909. Mit einem Bildnis Lord Kelvins. Geh. M. 6.—. II. Jahrg. 1911. Mit Bildnis G. Minnowskis. Geh. M. 7.—. III. Jahrg. 1913. Mit Bildnis Fr. Kohlruschs. Geh. M. 6.—

Lehrbuch d. praktischen Physik. V. weil. Prof. Dr. Fr. Kohlrusch. 12., verm. Aufl. In Gemeinschaft mit H. Geiger, E. Grüneisen, L. Holborn, W. Jaeger, E. Orlich, R. Scheel, D. Schönrod hrsg. von E. Warburg. Mit 389 Fig. Geh. M. 11.—

Die neue Auflage, in der das Buch zum ersten Male nach dem Tode d. Verf. erscheint, enthält zahlreiche Zusätze und Ergänzungen, welche durch den Fortschritt der Wissenschaft geboten waren. Einzelne Abschnitte, z. B. über den Druck, die Saccharimetrie, Radioaktivität und einige elektrische Kapitel haben deshalb größere Veränderungen erfahren.

Steuerungszuschläge auf sämtliche Preise 30 % einschließlich 10 % Zuschlag der Buchhandlung

Kleiner Leitfaden der praktischen Physik. Von weil. Professor Dr. Fr. Kohlrusch. 2., vermehrte Aufl. (6. bis 10. Tausend). Mit zahlr. Fig. Geh. M. 5.60

Physik. Unter Redaktion v. Dr. E. Warburg. Mit 106 Abbildungen. (Die Kultur der Gegenwart. Hrsg. von Prof. P. Hinneberg. Teil III, Abt. III, 1.) Geh. M. 22.—, geb. M. 24.—, in Halbfranz. M. 30.—

Inhalt: I. Mechanik: E. Wiechert. II. Akustik: F. Auerbach. III. Wärme: E. Dorn, A. Einstein, F. Henning, L. Holborn, W. Jäger, H. Rubens, E. Warburg, W. Wien. IV. Elektrizität: F. Braun, J. Elster, R. Gans, E. Gebrde, H. Gertel, E. Sumlich, W. Kaufmann, E. Lecher, H. A. Lorenz, St. Meyer, D. Reichenheim, F. Rietharz, E. v. Schweidler, H. Starke, W. Wien. V. Optik: F. Exner, E. Gebrde, D. Lummer, D. Wiener, P. Zeeman. VI. Allgemeine Gesetze und Gesichtspunkte: A. Einstein, F. Hasenöhrl, M. Planck, W. Voigt, E. Warburg.

Lehrbuch der Physik. Von weil. Prof. E. Grimsehl. 3., verm. u. verb. Aufl. 2 Bde. Bd. I m. 1063 Fig. u. 2 farb. Taf. geh. M. 11.—, geb. M. 12.—; Bd. II mit 1 Bildn. Grimsehls u. 517 Fig. geh. M. 7.—, geb. M. 8.—; tplt. geh. M. 16.—, geb. M. 18.—

Einführung in das Studium der theoretischen Physik, insbesondere in das der analytischen Mechanik. Mit einer Einleitung in die Theorie der physikal. Erkenntnis. Von Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. P. Volkmann. 2., mehrf. umgearbeitete Auflage. Geh. M. 13.—, geb. M. 14.—

„Die durchgehende Betonung philosophischer Auffassung, der enge Anschluß an die Leistungen der führenden Geister bilden eigentümliche Vorzüge des Werkes, durch die es eine große Anzahl interessierter Leser anziehen wird. Besonders wird die Wirkung auf die studierende Jugend eine nachhaltige sein.“ (Jahrb. üb. d. Fortsch. d. Mathem.)

Vorlesungen über neuere Probleme der theoret. Physik. Von Geh. Hofrat Professor Dr. W. Wien. Mit 11 Figuren. Geh. M. 2.40

Es wird zuerst die Strahlungsformel abgeleitet, hieran schließt sich die Theorie der elektrischen Leitung in Metallen, die Theorie der Einsteinschen Schwanungen, endlich die Theorie der Röntgenstrahlen u. Sekundärstrahlen.

Physikal. Experimentierbuch. V. Studienrat Prof. H. Rebenstorff. 2 Tle. I. Teil: Mit 99 Abb. Geh. M. 3.—. II. Teil: Mit 87 Abb. Geh. M. 3.—

Teubners kleine Fachwörterbücher

geben rasch und zuverlässig Auskunft auf jedem Spezialgebiete und lassen sich je nach den Interessen und den Mitteln des einzelnen nach und nach zu einer Enzyklopädie aller Wissenszweige erweitern.

„Mit diesen kleinen Fachwörterbüchern hat der Verlag Teubner wieder einen sehr glücklichen Griff getan. Sie erheben tatsächlich für ihre Sondergebiete ein Konversationslexikon und werden gewiss großen Anklang finden.“ (Die Warte.)

„Wer ist jetzt in der Lage, teure Nachschlagebücher zu kaufen? Wie viele aus den Reihen der Volkshochschulbesucher verlangen nach Handreichungen, die das Studium der Natur- und Geisteswissenschaften ermöglichen. Die Erklärungen sind sachlich zutreffend und so kurz als möglich gegeben, das Sprachliche ist gründlich erfaßt, das Wesentliche berücksichtigt. Die Bücher sind eine glückliche Ergänzung der Bändchen „Aus Natur und Geisteswelt“ des gleichen Verlags. Selbstverständlich ist dem neuesten Stande der Wissenschaft Rechnung getragen.“ (Pädagog. Arbeitsgemeinschaft.)

„Diese handlichen Nachschlagebücher bieten nach Form und Inhalt Vorzügliches und werden sich, wie zu erwarten steht, in unseren Volksbüchereien schnell einbürgern.“

(Blätter für Volksbibliotheken.)

Bisher erschienen:

Philosophisches Wörterbuch. 3. Aufl. V. Studentat Dr. P. Thormeyer. (Bd. 4.) M. 4.—

Psychologisches Wörterbuch von Dr. Fritz Giese. Mit 60 Fig. (Bd. 7.) M. 3.50

Wörterbuch zur deutschen Literatur von Studentat Dr. H. Köhl. (Bd. 14.) M. 4.—

* **Musikalisches Wörterbuch** von Privatdoz. Dr. J. H. Moser. (Bd. 12.)

* **Wörterbuch zur Kunstgeschichte** von Dr. H. Vollmer.

Physikalisches Wörterbuch von Prof. Dr. G. Berndt. Mit 81 Fig. (Bd. 5.) M. 4.—

* **Chemisches Wörterbuch** von Privatdozent Dr. H. Remß. (Bd. 10.)

* **Astronomisches Wörterbuch** v. Observator Dr. H. Naumann. (Bd. 11.)

Geologisch-mineralogisches Wörterbuch von Dr. E. W. Schmidt. Mit 211 Abb. (Bd. 6.) M. 4.—

Geographisches Wörterbuch von Prof. Dr. O. Kende. I. Allgem. Erdkunde. Mit 81 Abb. (Bd. 8.) M. 4.— *II. Wörterbuch der Länder- und Wirtschaftskunde. (Bd. 13.)

Zoologisches Wörterbuch von Dir. Dr. Th. Knottnerus-Meyer. (Bd. 2.) M. 3.50

Botanisches Wörterbuch von Dr. O. Gerke. Mit 109 Abb. (Bd. 1.) M. 3.50

Wörterbuch der Warenkunde von Prof. Dr. M. Pietsch. (Bd. 3.) M. 4.—

Handelswörterbuch von Handelschuldir. Dr. V. Sittel u. Justizrat Dr. M. Strauß. Zugleich fünf Sprachiges Wörterbuch, zusammengestellt von V. Armhaus, verpfl. Dolmetscher. (Bd. 9.) M. 4.—

* in Vorbereitung bzw. unter der Presse (1922)

Verlag von B. G. Teubner in Leipzig und Berlin

Die angegebenen Preise

sind Grundpreise, die gegenwärtig (November 1922), den jetzigen Herstellungs- und allgemeinen Unkosten entsprechend, mit der Teuerungsziffer 100 (für Schulbücher, mit * bezeichnet, mit 70) zu vervielfältigen sind.

Europa

Grundzüge der Länderkunde. Band I

Von A. Hettner. 2., gänzl. umg. Aufl. Mit Taf. u. Rärtchen. (U. d. Pr. 1922.)

Der vorliegende I. Band der „Grundzüge der Länderkunde“ bietet eine zusammenfassende Darstellung der Länder Europas in ihrer neuen Gestaltung auf wissenschaftlicher, aber gemeinverständlicher Grundlage. — II. Band: Außereuropäische Erdteile. (In Vorb. 22.)

Astronomie

Unter Redaktion von J. Hartmann bearbeitet von zahlreichen Fachgelehrten. (Die Kultur der Gegenwart. Teil III, Abt. III, Bd. 3.) M. 20.—, geb. M. 25.—

„Soll ich in kurzen Worten mein Urteil über das Buch zusammenfassen, so möchte ich sagen: Bei völligem Fehlen nutzloser Spekulationen verbindet es eine Übersicht über die gesamte astronomische Forschung mit einer historischen Darstellung des Einflusses der Sternkunde auf das äufere Leben und Weltanschauung aller Kulturstufen.“ (Köln. Volkstg.)

Anthropologie

Unter Redakt. v. G. Schwalbe u. E. Fischer bearb. von zahlr. Fachgelehrten. (Die Kultur der Gegenwart. Teil III, Abt. V.) Geh. ca. M. 20.—, geb. ca. M. 25.—

In dem Werk wird erstmalig ein abgerundetes Bild der Gesamtgebiete der Anthropologie, Völkerkunde und Urgeschichte in streng wissenschaftlicher und zugleich gemeinverständlicher Darstellung aus der Feder bester Kenner geboten.

Astrophysik

3., Neubearb. Aufl. von Schreiners Populärer Astrophysik. Von R. Graff. Mit 254 Tafeln und 17 Figuren. Geh. M. 12.—, geb. M. 15.60

Das Werk bietet in der Neuausgabe eine auch dem gebildeten Laien zugängliche Einführung in die neuesten außerordentlichen Fortschritte der astrophysikalischen Forschung und entwirft ein vollständiges Bild des Kosmos, der Sonne, der Planeten, der Fixsterne und Nebelwolke, wie es sich darnach darstellt.

Führer durch unsere Vogelwelt

Von B. Hoffmann. 2., verm. u. verb. Aufl. Mit zahlr. Notenbildern, Vogelliedern u. Bildschmuck. Geh. M. 6.80. II. Teil: Vom Bau und Leben des Vogels. (Erscheint rechtzeitig vor Weihnachten 1922.)

Leubners Naturwissenschaftliche Bibliothek

U. a. gehören zur Sammlung: Große Physiker. Von Job. Keizerstein. • Physikalische Experimentierbuch. Von H. Rebenkerff. In 2 Teilen. • Chemisches Experimentierbuch. Von K. Scheid. In 2 Teilen. • Geologisches Wanderbuch. Von K. G. Volk. In 2 Teilen. • Geographisches Wanderbuch. Von A. Berg. 2. Aufl. • Große Biologen. Von W. May. • Biologisches Experimentierbuch. Von E. Schäffer.

Mathematisch-Physikalische Bibliothek

Hrsg. von W. Liehmann und A. Witting. Jeder Band M. 1.—

Neu erschienen: Einführung in die Trigonometrie. Von A. Witting. (Bd. 43.) Abgekürzte Rechnung. Von A. Witting. (Bd. 47.) Funktionen, Schaubilder, Funktions tafeln. Von A. Witting. (Bd. 48.) Mathematik und Biologie. Von M. Schips. (Bd. 42.) Die mathematischen Grundlagen der Lebensversicherung. Von H. Schöke. (Bd. 46.) Atom- und Quantentheorie. Von P. Kirchberger. (Bd. 44.) Unter der Presse: Trugschlüsse. Von W. Liehmann. (Bd. 50.) Wie man einstens rechnete. Von E. Fetzweis. (Bd. 49.) Ebene Geometrie. Von B. Kerst.

Verlag von B. G. Teubner in Leipzig und Berlin

Teubners Künstlersteinzeichnungen

Wohlfeile farbige Originalwerke erster deutscher Künstler fürs deutsche Haus
Die Sammlung enthält jetzt über 200 Bilder in d. Größen 100×70 cm (M. 1.000.-), 75×55 cm (M. 750.-), 109×41 cm (M. 500.-), 60×50 cm (M. 600.-), 55×42 cm (M. 400.-), 41×36 cm (M. 250.-). Geschmackvolle Rahmung aus eigener Werkstatt.

Neu: Kleine Kunstblätter

18×24 cm je M. 100.-. Liebermann, Im Park. Prentzel, Am Wehr. Hedder, Unter der alten Kastanie und Weihnachtsabend. Treuter, Bei Mondenschein. Weber, Apfelblüte.

Schattenbilder

R. W. Diefenbach „Per aspera ad astra“. Album, die 94 Teilh. des vollst. Wandstiefes fortlaufend wiederz. (20 $\frac{1}{2}$ ×25 cm) M. 750.-. Teilbilder als Wandstiefes (42×30 cm) je M. 300.-, (35×18 cm) je M. 100.-, auch getahmt in versch. Ausführ. erhältlich.

„Göttliche Jugend“. 2 Mappen, mit je 20 Blatt (25 $\frac{1}{2}$ ×34 cm) je M. 750.-. Einzelbilder je M. 50.-, auch getahmt in versch. Ausführ. erhältlich.

Kindermusik. 12 Blätter (25 $\frac{1}{2}$ ×34 cm) in Mappe M. 500.-, Einzelblatt M. 50.-.

Gerda Luise Schmidt (20×15 cm) je M. 40.-. Auch getahmt in verschiedener Ausführung erhältlich. Blumenorakel. Reissenspiel. Der Besuch. Der Liebesbrief. Ein Frühlingsstraß. Die Freunde. Der Brief an „Ihn“. Annäherungsversuch. Am Spinett. Beim Wein. Ein Märchen. Der Geburtstag.

Teubners Künstlerpostkarten

(Ausf. Verzeichnis v. Verlag in Leipzig.) Jede Karte M. 12.-. Reihe von 12 Karten in Umschlag M. 120.-, jede Karte unter Glas mit schwarzer Einfassung u. Schnur edig oder oval.

Die mit * bezeichneten Reihen auch in feinen ovalen Holzrahmen edig oder oval. Teubners Künstlersteinzeichnungen in 12 Reihen. Teubners Künstlerpostkarten nach Gemälden neuerer Meister. 1. Macco, Malenzeit. 2. Köstlich, Sonnenbild. 3. Buttersack, Sommer im Moor. 4. Hottmann, Sommerweide. 5. Kühn jr., Im weißen Zimmer. In Umschlag M. 60.-.

*Diefenbachs Schattenbilder in 7 Reihen. Aus dem Kinderleben, 6 Karten nach Bleistiftzeichn. von Hela Peters. 1. Der gute Bruder. 2. Der böse Bruder. 3. Wo drückt der Schuh? 4. Schmeichellächchen. 5. Püppchen, aufgepaßt! 6. Große Wäsche. In Umschlag M. 60.-. *Schattenreihenarten von Gerda Luise Schmidt: 1. Reihe: Spiel und Tanz, Fest im Garten, Blumenorakel, Die kleine Schäferin, Delauschter Dichter, Rattensänger von Hameln. 2. Reihe: Die Freunde, Der Besuch, Im Grünen, Reissenspiel, Ein Frühlingsstraß, Der Liebesbrief. 3. Reihe: Der Brief an „Ihn“, Annäherungsversuch, Am Spinett, Beim Wein, Ein Märchen, Der Geburtstag. Jede Reihe in Umschlag M. 60.-

Rudolf Schäfers Bilder nach der Heiligen Schrift

Der barnberzige Samaritaner (M. 750.-), Jesus der Kinderfreund (M. 600.-), Das Abendmahl (M. 750.-), Hochzeit zu Kana (M. 600.-), Weihnachten (M. 750.-), Die Bergpredigt (M. 600.-), (75×55 bzw. 60×50 cm).

Diese 6 Blätter in Format **Biblische Bilder** in Mappe M. 250.-, als 29×30 unter dem Titel Einzelblatt je M. 50.- (Auch als „Kirchliche Gedentblätter“ und als „Glückwunsch- u. Einladungskarten“ erhältlich.)

Karl Bauers Federzeichnungen

Charakterköpfe zur deutschen Geschichte. Mappes, 32 Bl. (36×36 cm) M. 250.-

12 Bl. M. 100.-, Einzelblätter M. 18.-

Aus Deutschlands großer Zeit 1813. In Mappe, 16 Bl. (28×36 cm) M. 100.-

Einzelblätter M. 18.-

Führer und Helden im Weltkrieg. Einzelne Blätter (28×36 cm) M. 18.-

2 Mappen, enthaltend je 12 Blätter, je M. 50.-

Katalog über künstlerischen Wandschmuck vom Verlag in Leipzig, Poststraße 3, erhältlich

Verlag von B. G. Teubner in Leipzig und Berlin

Biblioteka Politechniki Krakowski



I-301514



Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000295919