Aus Natur und Geisteswelt
385

W. Block

Maße und Messen

~~1911~~
1913

B. G. Teubner · Leipzig · Berlin

Die Sammlung

„Aus Natur und Geisteswelt“

nunmehr über 800 Bände umfassend, bietet wirkliche „Einführungen“ in abgeschlossene Wissensgebiete für den Unterricht oder Selbstunterricht des Laien nach den heutigen methodischen Anforderungen und erfüllen so ein Bedürfnis, dem weder umfangreiche Enzyklopädien noch skizzenhafte Abrisse entsprechen können. Die Bände wollen 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 wollen ihn dabei zugleich unmittelbar im Beruf fördern, den Gesichtskreis erweiternd, die Einsicht in die Bedingungen der Berufsarbeit vertiefend.

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 Aufgaben haben sich darum auch in dankenswerter Weise von Anfang an die besten Namen gestellt, gern die Gelegenheit benutzend, sich an weiteste Kreise zu wenden.

Seit Herbst 1925 ist eine Neuerung insofern eingetreten, als neben den Bänden im bisherigen Umfange solche in erweitertem, etwa anderthalbfachem zu $1\frac{1}{2}$fachem Preise ausgegeben werden, weil abgeschlossene Darstellungen größerer Gebiete auf beschränkterem Raume heute schwer möglich sind. Diese Bände, die die Nummern von 1001 ab tragen, erscheinen, um die Einheitlichkeit der Sammlung zu wahren, in der gleichen Ausstattung wie die übrigen Bände. Sie sind nur auf dem Rückentitel durch je ein Sternchen über und unter der Nummer besonders gekennzeichnet.

Alles in allem sind die schmucken, gehaltvollen 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.

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

Leipzig, im April 1928. **B. G. Teubner**

...s nach Wissenschaftsgebieten geordnetes Verzeichnis versendet auf Wunsch der Verlag, Leipzig, Poststraße 3/5

2.302

Bisher sind zur Physik und Chemie erschienen:

Physik: Einführung, Grundlagen und Geschichte.

Naturphilosophie. Von Prof. Dr. J. M. Verweyen. 2. Aufl. (Bd. 491.)

Die Grundbegriffe der modernen Naturlehre. Einführung in die Physik. Von Hofrat Prof. Dr. F. Auerbach. 5. Aufl. Mit 63 Figuren. (Bd. 40.)

Einleitung in die Experimentalphysik. Gleichgewicht und Bewegung. Von Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. R. Börnstein. Mit 90 Abbildungen. (Bd. 371.)

Einführung in die Relativitätstheorie. Von Dr. W. Bloch. 3., verb. Auflage. Mit 18 Figuren (Bd. 618.)

Naturwissenschaften, Mathematik und Medizin im klassischen Altertum. Von Prof. Dr. Joh. L. Heiberg. 2. Aufl. Mit 2 Figuren. (Bd. 370.)

Physikalisches Wörterbuch. Von Prof. Dr. G. Berndt. (Teubners kl. Fachwörterbücher Bd. 5.)

Mechanik.

Mechanik. Von Prof. Dr. G. Hamel. 3 Bände. (Bd. 684/86.) I. Grundbegriffe der Mechanik. Mit 38 Fig. im Text. *II. Mechanik der festen Körper. *III. Mechanik der flüssigen und luftförmigen Körper.

Aufgaben aus der techn. Mechanik. Von Prof. R. Schmitt. 2 Bde. 2. Aufl. (Bd. 558/559.)
I. Bewegungslehre, Statik und Festigkeitslehre. 240 Aufgaben und Lösungen. Mit zahlreichen Fig. im Text.
II. Dynamik und Hydraulik. 2. Aufl. bearb. von Studiendirektor Prof. Dr. G. Wiegner. 198 Aufgaben und Lösungen. Mit zahlr. Figuren im Text.

Statik. Von Gewerbeschulrat Oberstudiendirektor A. Schau. 2. Aufl. Mit 12 Figuren im Text. (Bd. 828.)

Festigkeitslehre. Von Gewerbeschulrat Oberstudiendirektor A. Schau. 2. Aufl. Mit 119 Figuren im Text. (Bd. 829.)

Optik, angewandte Optik und Strahlungserscheinungen.

Das Licht und die Farben. (Einführung in die Optik.) Von Prof. Dr. L. Graetz. 5. Auflage. Mit 100 Abbildungen. (Bd. 17.)

Sichtbare und unsichtbare Strahlen. Von Geh. Regierungs-Rat Prof. Dr. R. Börnstein. 3., neubearb. Aufl. von Prof. Dr. E. Regener. Mit 71 Abbildungen. (Bd. 64.)

Das Auge und die Brille. Von Prof. Dr. M. v. Rohr. 2. Aufl. Mit 84 Abbildungen und 1 Lichtdrucktafel. (Bd. 372.)

Das Mikroskop, seine wissenschaftlichen Grundlagen und seine Anwendung. Von Dr A. Ehringhaus. Mit 75 Abbildungen im Text. (Bd. 678.)

Einführung in die Mikrotechnik. Von Prof. Dr. V. Franz und Oberstudiendirektor Dr. H. Schneider. Mit 18 Abb. (Bd. 765.)

Spektroskopie. Von Prof. Dr. L. Grebe. 2. Aufl. Mit 63 Figuren im Text und auf 2 Doppeltafeln. (Bd. 284.)

Die Kinematographie, ihre Grundlagen und ihre Anwendungen. Von Dr. H. Lehmann. 2. Auflage von Dr. W. Merté. Mit 68 zum Teil neuen Abbild. (Bd. 358.)

Die Photographie, ihre wissenschaftlichen Grundlagen u. ihre Anwendung. Von Dipl.-Ing. Dir. Dr. O. Prelinger. 2., verb. Aufl. Mit 64 Abbildungen i. T. (Bd. 414.)

Die künstlerische Photographie. Ihre Entwicklung, ihre Probleme, ihre Bedeutung. Von Studienrat Dr. W. Warstat. 2., verb. Aufl. Mit Bilderanhang. (Bd. 410.)

Die Röntgenstrahlen und ihre Anwendung. Von Dr. med. G. Bucky. Mit 94 Abbildungen im Text und auf 4 Tafeln. 2. verb. Aufl. (Bd. 556.)

Wärmelehre.

Die Lehre von der Wärme. Gemeinverständlich dargestellt von Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. R. Börnstein. 2., durchgesehene Auflage. Hrsg. von Prof. Dr. A. Wigand. Mit 33 Abbildungen im Text. (Bd. 172.)

Einführung in die technische Wärmelehre (Thermodynamik). Von Geh. Bergrat Prof. R. Vater. 3. Aufl. von Prof. Dr. Fr. Schmidt. Mit 46 Abb. im Text. (Bd. 516.)

Praktische Thermodynamik. Aufgaben und Beispiele zur technischen Wärmelehre. Von Geh. Bergrat Prof. R. Vater. 2. Aufl. herausgegeben von Prof. Dr. Fr. Schmidt. Mit 40 Abb. im Text und 1 Tafeln. (Bd. 596.)

Einführung in die Chemie.

Einführung in die allgemeine Chemie. Von Oberstudienrat Dr. B. Bavink. 2. Aufl. Mit 24 Figuren. (Bd. 582.)

Einführung in die anorganische Chemie. Von Oberstudienrat Dr. B. Bavink. Mit 31 Abbildungen im Text. (Bd. 598.)

Einführung in die organische Chemie. (Natürliche und künstliche Pflanzen- und Tierstoffe.) Von Oberstudienrat Dr. B. Bavink. 3. Aufl. Mit 9 Abb. im Text. (Bd. 187.)

Einführung in die analytische Chemie. Von Dr. F. Rüsberg. 2 Bde. I. Theorie und Gang der Analyse. Mit 15 Fig. i. T. II. Die Reaktionen. Mit 4 Fig. i. T. (Bd. 524/25.)

Einführung in die Biochemie in elementarer Darstellung. Von Prof. Dr. W. Löb. 2. durchges. u. verm. Aufl. V. Prof. Dr. H. Friedenthal. M. 12 Fig. i. T. (Bd. 352.)

Elektrochemie und ihre Anwendungen. Von Prof. Dr. K. Arndt. 2. Auflage. Mit 37 Abbildungen im Text. (Bd. 234.)

Das Radium und die Radioaktivität. Von Prof. Dr. M. Centnerszwer. 2. Aufl. Mit 33 Figuren im Text. (Bd. 405.)

Photochemie. Von Prof. Dr. G. Kümmell. 2. Aufl. Mit 23 Abb. i. T. u. auf 1 Tafel. (227.)

Luft, Wasser, Licht und Wärme. Einführung in die Experimentalchemie. Von Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. R. Blochmann. 5. Aufl. Mit 92 Abbildungen. (Bd. 5.)

Das Wasser. Von Geh. Regierungsrat Dr. O. Anselmino. Mit 44 Abbild. (Bd. 291.)

Chemisches Wörterbuch. Von Prof. Dr. H. Remy. Mit 15 Abb. im Text und 5 Tabellen im Anhang. (Teubners kl. Fachwörterbücher Bd. 10/11.)

Chemische Technologie.

Die künstliche Herstellung von Naturstoffen. Von Prof. Dr. E. Rüst. (Bd. 674.)

Der Luftstickstoff und seine Verwertung. Von Prof. Dr. K. Kaiser. 2. Aufl. Mit 13 Abbildungen (Bd. 313.)

Agrikulturchemie. Von Dr. P. Krische. 2., verb. Aufl. Mit 21 Abbildungen. (Bd. 314.)

Die Sprengstoffe, ihre Chemie und Technologie. Von Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. R. Biedermann. 2. Auflage. Mit 12 Figuren. (Bd. 286.)

Farben u. Farbstoffe. Ihre Erzeugung u. Verwendung. Von Dr. A. Zart. Mit 31 Abb. (Bd. 483.)

Bierbrauerei. Von Dr. A. Bau. Mit 47 Abb. (Bd. 333.)

Wörterbuch der Warenkunde. Von Prof. Dr. M. Pietsch. (Teubners kleine Fachwörterbücher Bd. 3.)

Naturlehre im Hause.

Physik in Küche u. Haus. Von Studiendirektor Prof. H. Speitkamp. 2. Aufl. Mit 54 Abb. (Bd. 478.)

Chemie in Küche und Haus. Von Dr. J. Klein. 5. Aufl. (Bd. 76.)

Desinfektion, Sterilisation, Konservierung. Von Regierungs- und Medizinalrat Dr. O. Solbrig. Mit 20 Abbildungen. (Bd. 401.)

***Ernährung und Nahrungsmittel.** Von Geh. Rat Prof. Dr. N. Zuntz. 4. Aufl. (Bd. 19.)

Die Bakterien im Haushalt der Natur und des Menschen. Von Prof. Dr. E. Gutzeit. 2. Aufl. Mit 13 Abbildungen. (Bd. 242.)

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

Aus Natur und Geisteswelt
Sammlung wissenschaftlich-gemeinverständlicher Darstellungen
385. Bändchen

Maße und Messen

Von

Dr. Walter Block

Mit 34 Abbildungen

Druck und Verlag von B. G. Teubner in Leipzig 1913

Vorwort.

Eine ausführliche, vollständige Beschreibung der physikalischen Maße und Meßmethoden zu schreiben, hieße ein Lehrbuch der Experimentalphysik verfassen. In dem vorliegenden Werkchen soll infolgedessen nur auf die physikalischen Grundlagen der Metronomie, das metrische und das absolute Maßsystem eingegangen und gezeigt werden, wie die Maßeinheiten entstanden sind und untereinander zusammenhängen. Ohne mathematische Hilfsmittel ist eine solche Darstellung recht schwierig, und ich hoffe, daß es mir gelungen ist, mein Ziel, eine in sich abgeschlossene Übersicht über das ganze Gebiet zu geben, in einer Weise erreicht zu haben, daß auch ein Nichtfachmann einige Einsicht in eine Disziplin gewinnt, die teilweise in der Physik etwas stiefmütterlich behandelt wird. Vollständigkeit bei der Erörterung aller Maßeinheiten, der Besprechung der grundlegenden Arbeiten soll man in dieser Schrift nicht suchen, ich habe nur das ausgewählt, was mir als das Notwendigste und für eine einfache Darstellung Geeignetste erschien. Ob ich dabei das Richtige getroffen habe, muß ich dem Urteil meiner Leser überlassen.

Berlin-Wilmersdorf, im April 1912.

Der Verfasser.

Inhaltsverzeichnis.

Einleitung.

Maß und Gewicht bezeichnet man vielfach nicht mit Unrecht als Werkzeuge des Handels und Verkehrs, und es bedarf wohl keiner genaueren Begründung, daß ein Handel, der sich über den primitivsten Tauschhandel ausdehnt, ohne zuverlassige, brauchbare Maße nicht bestehen kann. Eine Geschichte des Maß- und Gewichtswesens ist deswegen zugleich ein Teil der gesamten Handelsgeschichte. Je kultivierter ein Volk ist, desto besser sind auch seine Maße, und desto mehr Veranlassung haben seine Nachbar- und die mit ihm Handel treibenden Völker, sich ihrer zu bedienen. Verschiedenheit in Maß und Gewicht bei zwei Kulturstaaten, die auf Handelsverkehr miteinander angewiesen sind, ruft stets nur Schwierigkeiten und Streit hervor.

Von nicht geringerer Bedeutung ist ein zuverlässiges Maß für die Technik. Bei der heutigen Organisation der Technik, wo die Einzelteile von Maschinen, Brücken usw. in den Fabriken hergestellt, und am Orte der Verwendung zusammengesetzt werden, ist es absolut erforderlich, die Dimensionen aller Teile genauestens feststellen zu können, um nicht später zu finden, daß ein Zusammenpassen der Teile unmöglich ist; und wenn die Einzelteile nicht alle in einer Fabrik, sondern in verschiedenen, vielleicht sogar in verschiedenen Staaten hergestellt werden, leuchtet diese Notwendigkeit um so eher ein.

Die vorliegende Schrift will nun Maß und Gewicht nicht vom historischen Standpunkt aus behandeln, sondern in der Hauptsache über die heutigen Maße, ihre wissenschaftliche Festlegung und ihre Anwendung in Wissenschaft und Technik berichten, und im Zusammenhang damit über die grundlegenden Messungen zur Wahrung des Zusammenhanges der einzelnen Maßgrößen.

Einige Worte seien indessen noch über die Entstehung unserer heutigen Maße vorangeschickt. Über die Maße der altesten Zeiten wissen wir wenig, nur die alten überlieferten Bezeichnungen für sie lassen schließen, woher ihre Größen entnommen sind. Fuß, Elle usw. zeigen, daß sie vom menschlichen Körper entlehnt sind. Daß viele der altesten Kulturvölker, — man denke besonders an die Ägypter — ein gutes Maßsystem besessen haben müssen, ist klar, wenn man ihre Leistungen auf technischem Gebiet betrachtet. Viel wissen wir über ihre Maße nicht, es soll deshalb nicht weiter darauf eingegangen werden. Bei den alten Völkern wurden die Normale für Maß und Gewicht als etwas Heiliges angesehen. Sie wurden bei den Israeliten im Tempel aufbewahrt, bei den Römern auf dem Kapitol, bei anderen Völkern im Königspalast. Ihre Größen wurden zum Teil durch die Fürsten festgesetzt. Kaiser Karl der Große führte für sein Reich den „Königlichen Fuß" ein, der der Länge seines Fußes entsprochen haben soll, Heinrich der Erste von England setzte die Länge der Elle als Länge seines Zepters an, und der in der Geschichte der Erdmessungen berühmte Kalif Al-Mamun wählte als Länge der Elle die Länge des Unterarms seiner Lieblingssklavin. Was daran Legende ist, sei dahingestellt. So interessant diese Fragen auch für den Kulturhistoriker sind, für die neueren Maße und Gewichte sind sie bedeutungslos, so daß wir sie hier nicht zu behandeln brauchen.

Das für die Entwicklung der jetzt gebräuchlichen Maße und Gewichte maßgebende Land war Frankreich mit seiner alten Kultur und seiner fortgeschrittenen Pflege der Wissenschaft und seinem im Vergleich zu anderen Ländern am frühesten geordneten Staatswesen. Das Grundlängenmaß war die toise du Châtelet, die Toise, wie sie kurz bezeichnet wird. Ihr Normal war an der Außenwand des Châtelet befestigt und bestand aus einem Eisenbalken mit zwei Vorsprüngen an den Enden; jede „richtige" Toise mußte zwischen diese Vorsprünge passen. Sie stammte aus dem Jahre 1668; doch die Unbilden der Witterung und die natürliche Abnutzung durch den Gebrauch machten sie bald unbrauchbar und sie wurde durch die Toise von Peru ersetzt, jene Toise, die zu der umfangreichen und wichtigen Gradmessung zur Bestimmung des Erdumfanges in Peru in Südamerika (1735—1737) gedient hatte; sie sollte jener Toise an Länge gleich sein. Die Toise von Peru ist ein ganz besonders wichtiges Einheitsmaß, das in der Geschichte der Erdmessung von allergrößter Bedeutung ist, da auf sie alle Bestimmungen des Erdumfanges bis in die neueste Zeit hinein bezogen sind, bis sie durch das Meter ersetzt wurde. Beiläufig sei erwähnt, daß ihre Länge etwa 1,9 m ist.

Das Normalgewicht war das aus dem 15. Jahrhundert stammende sogenannte „Gewicht Karls des Großen", auch „Markgewicht" genannt, ein Gewichtssatz im Gesamtgewicht von etwa 489,5 g. Zu irgendwelcher wesentlichen Bedeutung ist dieses Gewicht indessen nicht gelangt.

Diese wenigen Bemerkungen mögen genügen. Wir wollen uns jetzt zu den heute üblichen Maßen wenden und ihre Entstehungsgeschichte erörtern.

Das metrische Maßsystem und seine Entstehung.

Die grundlegenden Maßeinheiten für alle wissenschaftlichen und technischen Messungen und für das bürgerliche Leben sind das Meter für Längen, Flächen, Räume, das Kilogramm für Massen, Gewichte, Kräfte, und die Zeitsekunde für Zeitmessungen.

Es sollen nun im folgenden zunächst die Maße im einzelnen besprochen und das Notwendige über ihre Entstehung mitgeteilt werden. Wir beginnen da mit der Zeitsekunde, als dem ältesten Maß, das von der Astronomie übernommen ist. Nebenher sei erwähnt, daß ich Zeitsekunde sage, zum Unterschied von der Winkelsekunde, dem 3600. Teil eines Winkelgrades, oder dem 1296000. Teil des Kreisumfanges. Es muß auf diesen Unterschied sorgfältig geachtet werden, da die Astronomen vielfach Winkelgrößen der Einfachheit wegen direkt in Zeitmaß angeben. Die astronomische Zeitmessung beruht bekanntlich auf der Sternzeit. Die Zeit zwischen zwei oberen Kulminationen eines Fixsternes, oder, was das gleiche ist, die Zeit zwischen zwei gleichartigen Meridiandurchgängen eines Fixsternes nennt man einen Sterntag.

Abb. 1. Zur Erläuterung des Unterschiedes zwischen Stern- und Sonnenzeit.

Ähnlich nennt man die Zeit zwischen zwei Meridiandurchgängen der Sonne einen Sonnentag. Man wird nun leicht einsehen, daß ein Sterntag und ein Sonnentag einer vollen Umdrehung der Erdkugel um ihre Achse gleichkommen, je nachdem man die Fixsterne oder die Sonne als feststehend annimmt. Da nun aber die Erde im Laufe eines Jahres selbst einen vollen Umlauf um die Sonne beschreibt, so ist es klar, daß im Laufe eines Jahres, also 365 Tagen Sonnenzeit, 366 Tage Sternzeit verflossen sein müssen, oder, daß ein Tag Sternzeit um rund 4 Minuten kürzer ist als ein Tag Sonnenzeit. Für die Bestimmung der Zeit aus den Fixsternen ist die Bewegung der Erde in ihrer Bahn infolge des ungeheuren Abstandes bedeutungslos und, da wir keinen Grund zu der Annahme haben, daß die Erde sich zu verschiedenen Zeiten verschieden schnell um ihre Achse dreht, so können wir es als sicher setzen, daß die Länge eines Sterntages dauernd die gleiche ist. Anders bei der Sonnenzeit. Wir wissen, daß die Bahn-geschwindigkeit der Erde verschieden ist, je nach der Jahreszeit, und zwar bewegt sie sich in unserem Sommer langsamer als im Winter, also wird auch die Länge eines Sonnentages je nach der Jahreszeit verschieden ausfallen. Die mittlere Länge eines Sonnentages im Laufe eines ganzen Jahres ist die Länge eines Tages mittlerer Sonnenzeit, und seine Länge ist um 235,9 Sekunden größer als die eines astronomisch genau bestimmbaren Tages Sternzeit. Die Sekunde eines solchen Tages mittlerer Sonnenzeit, also der 86400. Teil eines solchen Tages ist die physikalische Zeiteinheit. Mit ihrer Messung usw. wollen wir uns indessen, da dieses in der Hauptsache Sache der Astronomen ist, nur in Kürze beschäftigen.[1])

Die Zeit wird also durch den Umlauf der Fixsterne, die Sternzeit also, festgelegt. Es handelt sich hier also um ein reines Naturmaß, das jeder, ohne von irgendwelchen Normalmaßen abhängig zu sein, sich selbständig — vorausgesetzt natürlich, daß er die ausreichenden Instrumente besitzt, — beschaffen kann. Gemessen wird die Zeit durch Uhren, Pendeluhren, wie sie allgemein zu Messungen höchster Präzision verwendet werden, bei denen die Schwingung eines Pendels als Maß der Zeit verwendet wird, und Federuhren, bei denen die Schwingungen der radförmig ausgebildeten Unruhe ausgenützt werden; jene werden im allgemeinen durch Gewichte angetrieben, diese durch Spiralfedern. Wer sich genauer darüber orientieren will, lese das oben erwähnte Büchlein nach.

Zur Kontrolle der Uhren ist es nach dem oben Gesagten erforderlich, mittels astronomischer Messungen die Zeit zu bestimmen, die zwischen zwei Durchgängen eines Fixsterns durch den Meridian des Beobachtungsortes verfließt. Dazu verwendet man den Meridiankreis, ein Fernrohr, das um eine horizontale, in Ost-Westrichtung liegende Achse drehbar ist. Das Fernrohr selbst beschreibt also bei seiner Drehung um diese Achse einen Kreis, der vertikal in der Nord-Südrichtung liegt. Die genaue Nord-Südrichtung wird im Gesichtsfelde des Fernrohrs durch einen feinen vertikal ausgespannten Faden bestimmt, ähnlich wie bei den später zu besprechenden Mikrometermikroskopen. Nun stellt man an der Uhr fest, wann ein bestimmter Stern durch diesen Faden hindurchläuft. Damit man die Messung möglichst genau ausführen kann, wird man sich dazu einen Stern auswählen, der möglichst schnell läuft, also in der Nähe des Himmelsäquators steht. Würde nun die Uhr genau

1) Vgl. darüber ausführlicher z. B. Aus Natur u. Geisteswelt Nr. 216, H. Bock, Die Uhr.

richtig geben, so müßte sie beim folgenden Durchgang des gleichen Sternes durch den Meridian genau die gleiche Zeit anzeigen. Den Unterschied zwischen dieser Zeit und der wirklich an der Uhr abgelesenen nennt man den **Uhrgang**. Man weiß dann also, daß die Uhr in 24 Stunden eine gewisse Anzahl Sekunden voreilt oder zurückbleibt.

Das wichtigste bei dieser Messung ist, daß das Fernrohr unverändert in der Nord-Südrichtung bleibt. Zur Kontrolle beobachtet man deswegen stets einen Stern in der Nähe des Himmelspoles mit, also z. B. den Polarstern. Da man bei einer guten Uhr weiß, daß sie die Zeit nahezu richtig anzeigt, bis auf einige Sekunden oder Zehntelsekunden sogar, so weiß man stets mit genügender Annäherung, wann dieser Polstern durch den Meridian hindurchgehen muß; da ein solcher Stern sich natürlich nur sehr wenig bewegt, macht ein Fehler von einigen Sekunden in der Zeitbestimmung nichts aus. Auf diese Weise kann man dann feststellen, ob das Fernrohr genau im Meridian steht, oder um wieviel es von dieser Richtung abweicht. Eine solche Abweichung wird dann bei der Berechnung der Beobachtungen berücksichtigt.

Auf eine solche Methode wird der Gang der Uhren kontrolliert. Beobachtet ein Physiker mittels einer derartigen Uhr, so muß er aber stets berücksichtigen, daß sie Sternzeit anzeigt, und muß alle gemessenen Zeiten, die also in Sternzeit gemessen sind, auf mittlere Sonnenzeit umrechnen. Hat er z. B. festgestellt, daß die während einer Beobachtung verflossene Zeit 100,0 Sekunden gewesen ist, so hat er diese Zahl mit $\frac{86400 - 235{,}9}{86400} = \frac{86164{,}1}{86400} = 0{,}99727$ zu multiplizieren, um sie in **mittlere Sonnenzeit** umzurechnen. Es ist wohl klar, wie diese Zahl zustande kommt, sie gibt nur an, welcher Bruchteil einer Sekunde Sternzeit eine Sekunde mittlerer Sonnenzeit ist. Man erhält also in obigem Beispiel $100 \cdot 0{,}99727 = 99{,}7$ Sekunden mittlerer Sonnenzeit. Man sieht dabei gleichzeitig, daß bei zwei Sternzeit und mittlere Sonnenzeit richtig anzeigenden Uhren die erste in etwa 6 Minuten jene um eine Sekunde überholt.

In den meisten Fällen ist die Anwendung der Uhr zu Zeitmessungen so einfach, daß ein Eingehen darauf sich erübrigt. Anders wird es nur, wenn es sich um Messungen höherer Genauigkeit handelt. Da verfährt man anders. Man verwendet dann eine Pendeluhr, bei der das Pendel bei jedem Durchgange durch seine Mittellage mittels einer Kontakteinrichtung einen elektrischen Stromkreis schließt. Dieser Strom wird zu einem Apparat geführt, der ähnlich wie der bekannte Morse-Telegraphenapparat ausgeführt ist. Ein Streifen Papier wird durch ein

Uhrwerk gleichmäßig weitergezogen, und über ihm befindet sich ein Schreibstift. Wird nun der Stromkreis durch das Pendel geschlossen, so wird durch einen Elektromagneten der Schreibstift für einen Moment auf das Papier gedrückt und beschreibt dort einen Punkt; oder er schreibt dauernd eine Linie, und wird nach der Seite gezogen, so daß die gerade Linie eine Zacke erhält. Der Abstand zweier Punkte oder zweier Zacken entspricht dann genau einer Sekunde, wenn das Uhrpendel, wie es gewöhnlich ist, ein Sekundenpendel ist. Neben diesem Schreibstift befindet sich ein zweiter, der durch einen gesonderten Stromkreis vom Beobachter in Bewegung gesetzt werden kann, der in dem Moment, wenn das zu messende Ereignis eintritt, einen Kontakt schließt. Durch die Lage dieses Punktes bzw. der Zacke zu den anderen Sekundenpunkten kann dieser nachträglich in Ruhe den Zeitpunkt, an dem er seinen Kontakt eingeschaltet hat, mit Genauigkeit feststellen.

Handelt es sich um Ereignisse die schnell verlaufen, z. B. die Messung der Zeit, in der ein Körper eine gewisse Strecke fällt, so verwendet man das Hippsche Chronoskop, eine Uhr mit Sekundenzeiger allein, wobei dieser in einer Sekunde einmal oder noch öfter das ganze Zifferblatt umkreist. Zu Beginn des Versuchs wird das Uhrwerk auf elektrischem Wege in Gang gesetzt und zum Schluß elektrisch angehalten, es kann dann die Dauer auf dem Zifferblatt abgelesen werden.

Falls es sich darum handelt, kleine Zeitintervalle künstlich herzustellen, wenn man z. B. einen elektrischen Strom nur eine gewisse ganz kurze Zeit wirken lassen will, so verwendet man den Helmholtzschen Pendelunterbrecher, ein schweres Pendel, das man schwingen läßt, und das während seiner Schwingung zwei Kontakte berührt. Aus der Fallhöhe und den Dimensionen des Pendels kann man mathematisch die Zeit berechnen, die es braucht, um von einem Kontakt zum anderen zu gelangen, andererseits kann man mittels Verstellung dieser Kontakte auch kleine Zeitintervalle genau messen. Auch eine schwingende Stimmgabel, die mittels einer Schreibspitze auf berußtem Papier schreibt, und deren Schwingungszahl in der Sekunde bekannt ist, wird vielfach zu Zeitmessungen verwendet. Das schwierigste bei allen diesen Instrumenten ist immer das, daß infolge der Trägheit der in Bewegung zu setzenden Massen eine gewisse Zeit verstreicht, bis das Instrument wirklich ordnungsmäßig arbeitet. Schaltet man das Hippsche Chronoskop ein, so verstreicht eine gewisse kleine Zeit, bis das Uhrwerk mit seiner normalen Geschwindigkeit läuft, und wird es ausgeschaltet, so dauert es wieder eine gewisse Zeit, bis es tatsächlich stillsteht. Für den Verfertiger des Instrumentes ist es das schwierigste, diese beiden Zeitabschnitte durch geeignete Ausführung in Übereinstimmung zu bringen, da andernfalls merkliche Fehler entstehen können; und der Beobachter muß etwaige Unvollkommenheiten der Instrumente durch geeignete Anordnung der Versuche oder durch Berechnung ausschalten. Weiter soll indessen auf diese Fragen nicht eingegangen werden.

Wenden wir uns nun zu dem Meter, der Längeneinheit, und dem Kilogramm, der Gewichtseinheit. Ihren Ursprung leiten sie beide aus Frankreich her, und zwar aus der Zeit der großen Revolution. Maß und Gewicht waren dort in großer Unordnung, so daß eine Abhilfe dringend geboten erschien. Auch die Wissenschaft, besonders die Geodäsie, die Erdmessung, verlangte gebieterisch nach einem einwandfreien Maß. Im Jahre 1790 machte der Bischof von Autun, Talleyrand, einen darauf hinzielenden Vorschlag in der Nationalversammlung, der auch angenommen wurde. In Kommissionen wurde das ganze Projekt durchberaten, das dann so ausgeführt werden sollte, daß das Meter[1]) — so sollte das neue Längenmaß heißen — der 40000000. Teil des Erdumfanges, über beide Pole gemessen, oder der 10000000. Teil des Bogens vom Pol zum Äquator würde. Das sollte der Definitionswert des Meters sein. Um es festzulegen, sollte nun mit den besten Hilfsmitteln der Umfang der Erde neu gemessen werden, so genau, daß diese Messung an Genauigkeit niemals übertroffen werden könnte. Zwei Gelehrte, Méchain und Delambre unterzogen sich dieser Aufgabe bereits unter den Stürmen der Revolution, ein Umstand, der ihre Arbeit nicht nur noch schwieriger machte, als er es seiner Natur nach war, sondern sie selbst auch persönlich gefährdete. Sie maßen den Meridianbogen von Dünkirchen an der Nordsee bis nach Barcelona in Spanien am Mittelländischen Meer wirklich aus.

Wir wollen hier nur in aller Kürze erörtern, wie denn überhaupt die Größe der Erde bestimmt, oder genauer gesagt, ihr Umfang gemessen werden kann. Nehmen wir nun der Einfachheit wegen zunächst an, daß die Erde eine Kugel ist. Ihren ganzen Umfang durch Aneinanderlegen der Meßstangen auszumessen, ist natürlich praktisch unmöglich, einen gewissen Teil von ihr muß man aber tatsächlich auf diese Weise ausmessen. Man nennt ihn die Grundlinie oder Basis, und wählt ihn in möglichst ebenem Gelände, in einer Länge von etwa 5 bis 15 km. Diese Strecke wird mittels Meßstangen, Meßbändern oder Meßdrähten vollständig ausgemessen, und ihre Endpunkte sorgfältig gekennzeichnet. Betrachten wir die Abb. 2. In ihr sei AB die ausgemessene Grundlinie.

1) Abgeleitet vom Griechischen μετρον, das Maß.

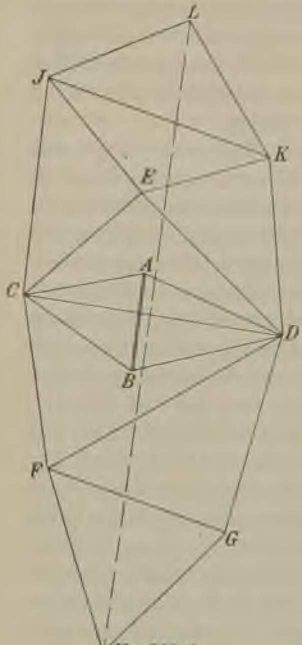

Abb. 2.
Schema einer Gradmessung.

Dann stellen wir in A und B Winkelmeßinstrumente, Theodoliten, auf, und richten diese auf wohlbezeichnete, hohe, weithin sichtbare Punkte der Umgebung, etwa Türme von Kirchen oder öffentlichen Gebäuden, oder wenn man nichts Geeignetes findet, auf hohe Balkengerüste, die eigens zu diesem Zwecke aufgerichtet werden, und die wohl allen als „trigonometrische Punkte" bekannt sind. Zwei solcher Punkte seien C und D. Jetzt mißt man mit dem Theodoliten die Winkel CAB, DAB, CBA und DBA und kann dann in einfacher mathematischer Weise die Entfernung CD berechnen. Durch eine geeignete Wahl der Punkte C und D kann man erreichen, daß die Entfernung CD etwa 30 bis 50 km beträgt. Jetzt sucht man neue Punkte, z. B. E, und mißt die Winkel ECD und EDC, dann F, G und H, und nach der anderen Richtung I, K und L. In dieser rein schematisch dargestellten Weise gelangt man dann mittels dieser „Dreieckskette" durch Messung einer kurzen Strecke AB und die verhältnismäßig einfache Winkelmessung zur Kenntnis der Länge der vielleicht mehrere Hundert Kilometer langen Strecke HL. Wohl gemerkt, die Messungen erstrecken sich über die Erdoberfläche, und man erhält auch so die Länge der Strecke HL auf der Erdoberfläche, also die Länge eines Bogens der Erde. Ihre Krümmung kann auf mathematischem Wege berücksichtigt werden.

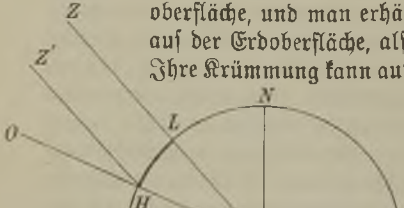

Abb. 3. Messung des Erdumfanges.

In der Abb. 3 sei nun HL diese gemessene Strecke, die so angeordnet wird, daß ihre Endpunkte auf einem Meridian der Erde liegen. M sei der Mittelpunkt der Erde, N ihr Nordpol. Jetzt handelt es sich darum zu bestimmen, welchen Bogen der Erde man ausgemessen hat. Das erreicht man durch astronomische Beobachtungen in H und L, indem man ihre geographischen

Breiten mißt, oder einfacher dargestellt, indem man z. B. folgendes beobachtet: In L stehe ein Stern genau im Zenit des Ortes, in Z. Zur gleichen Zeit wird er dann, von H aus beobachtet, nicht im Zenit O, sondern in der Richtung nach Z' stehen, der Winkel $Z'HO$, den man mißt, gibt dann die Zenitdistanz des Sternes in H, oder wie aus der Abbildung sofort ersichtlich, der Winkel HML, den Breitenunterschied der beiden Orte. Nehmen wir also an, der Breitenunterschied von H und L, d. h. der Winkel HML sei zu $3{,}6^0$ oder $3^0 36'$ gefunden worden und die Entfernung HL zu 400 km, so weiß man, daß auf einen Bogen von $3{,}6^0$ 400 km entfallen, also auf einen Bogen von 360^0, d. h. den vollen Erdumfang 40000 km, oder auf den Erdquadranten vom Pol zum Äquator 10000 km.

Wir haben der Einfachheit wegen angenommen, daß die Erde eine Kugel sei. Tatsächlich ist sie es aber bekanntlich nicht, vielmehr wird ihr Querschnitt in großer Annäherung durch eine Ellipse dargestellt, deren kleine Achse die Erdachse ist. Um den Einfluß dieser Abplattung der Erde auf ihren Umfang zu beseitigen, muß man jene oben dargestellte Messung zweimal ausführen, und zwar an verschiedenen Stellen ihrer Oberfläche, so daß die eine Messung möglichst in der Nähe des Äquators ausgeführt wird, die andere in der Nähe des Poles. Zu diesem Zwecke ist auch jene oben erwähnte Gradmessung in Peru angestellt, und die korrespondierende Messung in Lappland.

Auf solche Weise maßen Méchain und Delambre den ungeheuren Bogen der Erdoberfläche mittels zweier Grundlinien bei Melun und Perpignan aus, unter Anwendung aller Hilfsmittel, die ihnen damals die Wissenschaft zur Verfügung stellen konnte. Und nach den Ergebnissen dieser Messung wurde die Länge des Meters bestimmt und festgestellt.

Aber es kam doch anders als man erwartet hatte. Die Eile, mit der es eingeführt wurde, die nicht gestattete, das endgültige Resultat der ganzen Untersuchung abzuwarten, hatte mit daran schuld, daß das neu geschaffene Meter nun durchaus *nicht in aller Genauigkeit* seinem *Definitionswert*, der 40000000. Teil des Erdumfanges zu sein, *entsprach*. Schon die Diskussion der Resultate der Messungen durch Delambre zeigte, daß es zu kurz war, und neuere Messungen, die trotz der Erwartungen der damaligen Gelehrten bessere Resultate lieferten, zeigten das gleiche Ergebnis. Das Meter war um *rund* 0,08 mm *zu kurz*. Was nun tun? Man hätte sämtliche Maßstäbe ändern müssen. Dann wären neue Messungen angestellt, und diese hätten möglicherweise wiederum ein etwas anderes Resultat gegeben, man sah ein, daß das ganze System undurchführbar war. Andere Länder hatten allmählich auch das metrische Maßsystem eingeführt, und da das damals geschaffene und in dem französischen Archiv deponierte Prototypmeter auch nicht mehr den bedeutend gewachsenen Ansprüchen der Meßtechnik genügte, beschloß man kurzen Prozeß zu machen und ein neues Meter herzustellen, und zwar auf internationaler Grundlage. Die „Internationale Meter-Kommission" war sich darüber klar, daß ein Zusammenhang zwischen Meterlänge und Erdumfang bedeutungslos ist, da wir keine Sicherheit darüber haben, ob die Erde wirklich eine absolut unveränderliche Größe besitzt, und daß die fortschreitende Entwicklung der Meßinstrumente und Meßmethoden immer neue zuverlässigere Werte für eine solche Meterlänge ergeben wird, die jedesmal eine praktisch undurchführbare Änderung aller feinen Metermaßstäbe zur Folge hätte. Sie beschloß also, das neue Meter so herzustellen, daß es an Länge dem alten gleichkam. Das jetzt maßgebende „Internationale Prototypmeter" hat damit keinen Zusammenhang mehr mit irgendeiner in der Natur vorkommenden Größe. Das Verfahren war folgendes: Die Kommission ließ eine Reihe von Maßstäben herstellen, die möglichst genau dem alten Meter an Länge gleich waren. Diese wurden in einer Weise, die in einem späteren Abschnitt auseinandergesetzt werden wird (S. 30), alle untereinander verglichen, und der Meterstab, der dem alten möglichst genau gleich war — bei der praktischen Herstellung lassen sich eben alle Maßstäbe nicht absolut genau gleich ausführen —, wurde das „Internationale Prototypmeter" und im „Internationalen Maß- und Gewichtsbureau" im Pavillon von Breteuil in Sèvres bei Paris deponiert. Die übrigen Meterstäbe wurden durch das Los an die Regierungen der beteiligten Staaten verteilt. Alle diese Maßstäbe sind genau gleich ausgeführt, und zwar

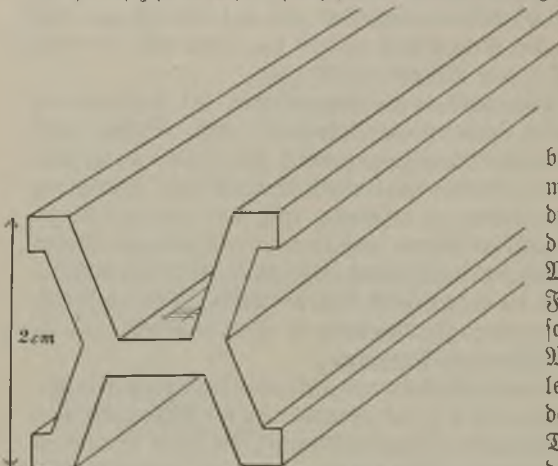

Abb. 4. Das eine Ende des Internationalen Prototypmeters.

aus einer Legierung von 90 Prozent Platin mit 10 Prozent Iridium, einer Zusammensetzung, die in ihrer Festigkeit dem Stahle gleichkommt, ohne dessen Neigung zu geringen Veränderungen in der Länge zu besitzen. Der Querschnitt ist, wie aus der Abb. 4 hervorgeht, die das eine Ende eines dieser Meterstäbe darstellt, eigenartig gestaltet, um den Stab möglichst leicht zu machen, und ihn auch gegen Biegungen zu schützen. Auf der Mittelrippe sind die Striche gezogen, die die Meterstrecke abgrenzen. Die Lage der Striche auf dieser Fläche hat nebenher den Vorzug, daß sie gegen Beschädigungen gut geschützt sind, daß bei Biegungen (vgl. S. 32) ihr Abstand sich nur ganz verschwindend wenig ändert. Die Begrenzungsstriche der Meterstrecke sind nur etwa 0,008 mm breit und haben auf jeder Seite noch je einen weiteren Strich in einem halben Millimeter Abstand. Jedes Prototypmeter ist mit einem Prüfungsschein versehen, der angibt, um wieviel seine Länge von der des Urmeters abweicht, und wie es seine Länge mit der Temperatur ändert. Es ist bekannt, daß die Dimensionen aller Körper durch Änderungen ihrer Temperatur geändert werden. So gibt auch das Urmeter die wahre Meterlänge nur bei der Temperatur des schmelzenden Eises, was man bekanntlich als 0^0 bezeichnet, — eine Festsetzung, die zu seiner Definition gehört —, und das gleiche gilt für jedes der nationalen Meterprototype. So ist für das deutsche Prototypmeter die „Gleichung" giltig:

$$\text{Länge des deutschen Prototypmeters Nr. 18:}$$
$$= 1\,\text{m} - 1{,}7\,\mu + 8{,}642\,\mu \cdot T + 0{,}001\,\mu \cdot T^2.$$

In dieser Gleichung bedeutet T die Temperatur des Maßstabes, die mittels geeigneter Thermometer gemessen wird. μ ist die übliche Abkürzung für Mikron und bedeutet die Länge eines Tausendstelmillimeters, die Einheitsgröße, die für feinste Längenmessungen dauernd angewendet wird. Setzt man in der Gleichung T gleich 0, d. h. berechnet man die Länge des Maßstabes für 0^0, so sieht man sofort, daß er um $1{,}7\,\mu$ oder 0,0017 mm zu kurz ist. Bei 20^0 C ist dagegen seine Länge $1\,\text{m} - 1{,}7\,\mu + 8{,}642\,\mu \cdot 20 + 0{,}001\,\mu \cdot 20^2$ oder $1\,\text{m} - 1{,}7\,\mu + 172{,}8\,\mu + 0{,}4\,\mu$ oder $1\,\text{m} + 171{,}5\,\mu$, d. h. bei dieser Temperatur ist es um bald 0,2 mm zu lang. Diese Änderung seiner Länge mit der Temperatur muß bei allen Messungen sorgfältig berücksichtigt werden. Materialien, deren Dimensionen durch die Temperatur nicht geändert werden, sind nicht bekannt.

Um nun den Inhalt des Obigen kurz zusammenzufassen, können wir sagen, daß die Längeneinheit, das Meter, definiert ist als der Abstand zwischen den Strichen des Internationalen Meterprototyps in Paris, bei einer Temperatur von 0^0.

Die Geschichte der Kilogrammeinheit ist etwa folgende: Während der Festsetzung der ursprünglichen metrischen Einheit wurde als Einheitsgewicht das Gewicht eines Kubikdezimeters destillierten Wassers bei seiner größten Dichte angenommen. Zunächst einige Worte über die Dichte des Wassers. Wasser ändert ja seinen Raumgehalt ebenfalls mit der Temperatur, aber im Gegensatz zu allen sonstigen Stoffen so, daß es sich von 0^0 ab bei Erwärmung zunächst zusammenzieht, bis etwa $+4^0$ C, wo es das Maximum der Kontraktion, seine größte Dichte erhält, von da ab dehnt es sich wie alle Körper gleichmäßig aus. Das Gewicht eines Kubikdezimeters Wasser wurde damals von Lefèvre-Gineau und Fabbroni in folgender Weise bestimmt: Sie stellten sich einen Hohlzylinder aus Messing her, den sie sehr genau ausmaßen, so daß sie seinen Raumgehalt genau kannten. Dann wogen sie ihn auf einer feinen Wage so, daß sie ihn zuerst auf die eine Wageschale herauflegten, und dann, indem sie ihn an einem feinen Draht aufhängten und in Wasser eintauchen ließen. In diesem Fall war sein Gewicht natürlich kleiner, und der Gewichtsunterschied gab direkt das Gewicht des von dem Zylinder verdrängten Wassers an, da nach dem Archimedischen Prinzip jeder Körper im Wasser so viel an Gewicht verliert, wie die Menge des von ihm verdrängten Wassers wiegt. Da der Raumgehalt des verdrängten Wassers, der ja genau dem des Zylinders gleich war, bekannt war, und die Gewichtsdifferenz durch die Wägung festgestellt war, so war es ein leichtes, das Gewicht eines Kubikdezimeters Wassers in der verwendeten Gewichtseinheit zu berechnen und danach ein Platingewicht herzustellen, das das geforderte Gewicht besaß. Dieses war das damalige Archiv-Kilogramm. Bei der Neuregelung der internationalen Maße und Gewichte wurde auch dieses durch ein neues Kilogramm ersetzt. Genau wie bei der Festlegung des Meters wurden eine Reihe von Vollzylindern von etwa 39 mm Durchmesser und Höhe, ebenfalls aus Platin-Iridium hergestellt und sorgfältig untereinander und mit dem damaligen Urkilogramm verglichen. Dasjenige, welches mit jenem am genauesten übereinstimmte, wurde als neues Internationales Prototyp erklärt und mit dem Meter im Internationalen Maß- und Gewichtsbureau deponiert. Die anderen wurden unter die beteiligten Staaten verteilt, um dort als nationale Prototype zu dienen.

Zu Beginn dieses Kapitels habe ich gesagt, daß das Kilogramm die Maßeinheit für Massen ist. Was bedeutet das nun? Nehmen wir den Fall, daß wir zwei Kilogrammstücke im vollständig luftleeren

Raum vergleichen und dann finden, daß sie absolut gleich sind. Nun führen wir die gleiche Messung in gewöhnlicher Luft aus. Sind sie dann auch noch gleich? Ebenso wie ein in Wasser getauchter Körper an Gewicht verliert, verliert natürlich auch ein in Luft befindlicher Körper an Gewicht; und dieser Betrag ist durchaus nicht unmerklich. Haben in jenem Fall die beiden Kilogrammstücke gleichen Raumgehalt, so wird bei den Wägungen in Luft der Luftauftrieb auf beide gleich stark wirken und sie werden dann auch als gleich erscheinen. Ist aber z. B. das eine aus Platiniridium mit einem Raumgehalt von etwa 46 ccm, wie ihn das internationale Prototyp hat, das andere aus Bergkristall, einem für feine Gewichte sehr gebräuchlichen Stoffe von etwa 376 ccm Raumgehalt, so besteht ein Unterschied des Raumgehalts von 330 ccm, wofür der Luftauftrieb nicht ausgeglichen ist. Da nun ein Liter Luft etwa 1,3 g wiegt, entspricht jenem Volumen ein scheinbarer Gewichtsverlust von 0,330 · 1,3 g oder rund 0,4 g; d. h. das Bergkristallgewicht erscheint jetzt um rund 400 mg leichter. Berücksichtigt man, daß man Kilogrammstücke auf wenige Hundertstel eines Milligramms sicher miteinander vergleichen kann, so kann man beurteilen, was der Luftauftrieb für eine Bedeutung hat.

Noch etwas anderes ist zu berücksichtigen. Wie kommt das Gewicht eines Körpers zustande? Doch so, daß er nach dem Gesetz der allgemeinen Gravitation von der Erde, oder richtiger und besser gesagt, vom Erdmittelpunkte angezogen wird. Nach dem Gravitationsgesetz wird nun aber jeder Körper verschieden stark angezogen, je nach seiner Entfernung vom Anziehungsmittelpunkt, und zwar so, daß er in zweifacher Entfernung nur noch mit dem vierten Teil der Kraft, in dreifacher mit dem neunten Teil der Kraft angezogen wird usw. Heben wir also ein Kilogrammstück vom Erdboden hoch, entfernen es also vom Erdmittelpunkt, so wird es dann weniger stark angezogen, d. h. verliert scheinbar an Gewicht, und zwar macht ein Meter Erhebung bereits einen Gewichtsverlust von etwa 0,3 mg aus. Bringen wir ein Gewicht vom Äquator nach dem Pol der Erde, so wird es wegen ihrer Abplattung einen merklichen scheinbaren Gewichtszuwachs erhalten. Indessen müssen wir sagen, daß sich trotzdem das Gewicht als solches, als Stoff, nicht verändert hat, daß die Materie, aus der es besteht, in ihrer Menge und in ihrem Raumgehalt unverändert geblieben ist, daß nur äußere Kräfte eine scheinbare Gewichtsveränderung verursacht haben. Die Menge der Materie, aus der das Gewicht besteht, oder wie man es ausdrückt, seine Masse ist unverändert geblieben.

Man sagt nun, daß das Urkilogramm die Einheit der Masse ist. Was hat man nun damit erreicht? Einmal, daß man durch eine solche Definition von bestimmten Vorschriften über das Gewicht der Luft frei ist. Denn da bei feineren Wägungen fast immer der Unterschied im Raumgehalt der zu vergleichenden Gewichte berücksichtigt werden muß, muß man auch bestimmte Vorschriften haben, unter welchen Verhältnissen das Urkilogramm, oder die davon abgeleiteten Gewichte, ihren wahren Gewichtswert besitzen, also z. B. bei 760 mm Barometerstand, bei 50 Proz. Luftfeuchtigkeit, bei normalem Kohlensäuregehalt der Luft usw. alles Daten, die das genaue Luftgewicht um merkliche Beträge ändern, die aber teilweise schwer bestimmbar sind; oder man muß sagen, das es seinen wahren Gewichtswert im Vakuum hat, ein Zustand, der kaum erreichbar ist und auch praktisch vermieden werden muß, da ein Gewicht, das eine Zeitlang im Vakuum gewesen ist, das unendlich feine Feuchtigkeitshäutchen, das es stets trägt, ändert, und damit inkonstant, natürlich nur für allerfeinste Wägungen, wird. Sodann wird man auch von jeder Annahme über die Schwerkraft unabhängig. Anderenfalls müßte man auch diese genauer definieren, als die Schwerkraft in Meereshöhe, unter 45° Breite. Und so ist durch jene Definition jede weitere erläuternde Definition entbehrlich gemacht.

Es ist noch erforderlich, ein Wort über den Definitionswert des Kilogramms zu sagen. Es soll die Masse eines Kubikdezimeters destillierten Wassers größter Dichte sein. Nach den neuesten, später zu besprechenden Messungen (S. 51) stimmt es, ebenso wie das Meter, nicht genau mit jenem Definitionswert überein, sondern die Masse eines solchen Wasservolumens ist 0,999972 kg.

Das deutsche Kilogrammprototyp Nr. 22, das ebenso wie das Prototypmeter Nr. 18 von der Normal-Eichungskommission in Berlin aufbewahrt wird, hat die Masse von 1,000000002 kg bei einem Raumgehalt von 46,403 $(1 + 0{,}000025859 \cdot t + 0{,}0000000065\, t^2)$ ccm. t bedeutet hierin die jeweilige Beobachtungstemperatur. Man kann damit also nach Einsetzen des beobachteten Temperaturwertes t in die Formel den Raumgehalt für diese Temperatur berechnen und damit die später erwähnten Korrektionen anbringen. 46,403 ccm ist, wie man sieht, der Raumgehalt des Kilogrammstückes bei 0°.

Das ist in aller Kürze das wichtigste, was über die grundlegenden Maßeinheiten, die Zeitsekunde, das Meter und das Kilogramm zu sagen ist. Die Zeitsekunde ist ein wirkliches Naturmaß, das jeder Physiker, der sie zu seinen Messungen braucht, selbständig, vorausgesetzt natürlich, daß er die instrumentellen Hilfsmittel dazu besitzt, ableiten kann. Für das Meter und das Kilogramm ist er auf fremde Hilfe angewiesen. Die Maßstäbe und Gewichte, die er bei seinen Versuchen verwenden will, müssen, falls sie zuverlässig sein sollen, direkt, oder unter Zwischenschaltung anderer Maße und Gewichte, mit den Urmaßen des Internationalen Bureaus verglichen sein. Diese selbst werden zu Messungen nicht gebraucht, sondern dienen ausschließlich nur zu Prüfungen der nationalen Urmaße und Gewichte, Prüfungen, die in gewissen langen Zwischenräumen wiederholt werden. An ihre Stelle treten daher die nationalen Urmaße, die, in der Ausführung genau jenen gleichend, unter Berücksichtigung ihrer Unterschiede gegen diese, ebenso zuverlässig sind.

Diese drei Maßeinheiten sind nun die Grundmaße. Und da erhebt sich nun die Frage, ob sie auch wirklich zuverlässige Grundmaße sind, d. h. ob es nicht möglich ist, daß sie sich im Laufe von Jahren und Jahrzehnten verändern. Eine Veränderung der Umdrehungszeit der Erde und damit der Sekunde ist bis jetzt nicht nachgewiesen und nach Untersuchungen astronomischer Art, die hier nicht besprochen werden können, in den historischen Zeiten nicht festgestellt. Meter und Kilogramm sind keine Naturmaße, also ist hier eine Veränderung recht schwer nachweisbar, wenn man dabei noch berücksichtigt, daß alle maßgebenden Verkörperungen dieser Einheiten ganz gleichartig sind, also sich auch ganz gleichartig verändern können, ein Nachteil, aber in mancher Hinsicht auch wiederum ein Vorzug. Das Kilogramm ist ja in gewisser Weise durch Vermittelung des Wassers an das Meter angeschlossen und in ausführlichen Versuchsreihen die Masse eines Kubikdezimeters Wassers festgelegt. Verändert sich das Urkilogramm, so muß sich diese Zahl ebenfalls ändern; leider aber ist sie bis jetzt noch nicht mit der Genauigkeit festgestellt, wie es für die feinsten Wägungen erforderlich ist, da die Versuche zu schwierig sind. Wie diese angestellt werden, wird in einem späteren Kapitel besprochen werden (vgl. S. 51). Das Meter selbst ist auf ein Naturmaß, die Wellenlänge des Lichtes zurückgeführt, mit einer Genauigkeit, die vollständig ausreichend ist. Wir werden auf diese Versuche noch genauer eingehen (vgl. S. 72).

Von jenen Grundmaßen werden nun alle weiteren Maße in der Physik, Technik und im bürgerlichen Leben abgeleitet. Wie dieses im einzelnen geschieht, wird an anderer Stelle auseinandergesetzt werden. Hier sei nur erwähnt, daß von allen Maßen natürlich auch Unterteilungen und Vielfache, wie ja bekannt ist, in Gebrauch sind. Von der Sekunde wird die Minute, die Stunde, der Tag abgeleitet; vom Meter das Dezimeter, das Zentimeter, das Millimeter und für die Wissenschaft die Hilfsgröße das Mikron, ein Tausendstelmillimeter, allgemein mit dem griechischen Buchstaben μ bezeichnet; dann noch das Kilometer. Vom Kilogramm das Gramm, das Milligramm und die Tonne. Von den Längenmaßen werden dann die Flächenmaße, das Quadratmeter, das Ar, das Hektar usw. und die Raummaße abgeleitet. Das praktische Grundmaß für diese ist das Kubikdezimeter oder Liter. Indessen ist dabei zu beachten, daß beides nicht gleichwertig ist. Das Liter ist der Raum, den ein Kilogramm Wasser größter Dichte einnimmt, und nach oben Gesagtem mit einem Kubikdezimeter Wasser nicht identisch. Vielmehr wiegt ein Kubikdezimeter Wasser nur 0,999 972 kg, d. h. ein Liter ist um 28 Kubikmillimeter größer als ein Kubikdezimeter. In der Praxis ist dieser Unterschied, ganz abgesehen von der Schwierigkeit, einen Raumgehalt genau zu bestimmen, indessen belanglos.

Die wissenschaftliche Physik benutzt nun selbstverständlich ebenfalls alle oben besprochenen Einheiten, indessen meistens nicht die Einheiten selbst, sondern statt des Meters das Zentimeter, den hundertsten Teil des Meters, und das Gramm, den tausendsten Teil des Kilogramms. Dieses streng systematisch durchgeführte Zentimeter-Gramm-Sekunde-Maßsystem (das Gramm als Masse!) ist das sogenannte absolute Maßsystem.[1]) Das Gramm tritt hierin rein als Masse auf, und da sein Gewicht stets nur durch die Schwerkraft bedingt ist, und um so größer ist, je größer diese ist, — wobei noch zu berücksichtigen ist, daß auf anderen Himmelkörpern die Schwerkraft ganz verschieden von der auf der Erde ist — so hat im absoluten Maßsystem eine „Masse" von 1 g auf der Erde ein „Gewicht" von 981 „Gramm", wobei die Zahl 981 die Größe der Schwerkraft angibt. Genaueres darüber folgt im Kapitel über mechanische Maße. Im praktischen Leben und in den meisten technischen Messungen identifiziert man Masse und Gewicht, da die Schwerkraft auf alle Körper gleich wirkt und ihre Änderungen auf der ganzen Erdoberfläche praktisch zu vernachlässigen sind.

Das ist das wichtigste, was über die grundlegenden Maße, ihre Entstehung und ihre jetzige Stellung in der Physik und Technik zu sagen ist; wir werden in den späteren Kapiteln noch genügend Gelegenheit haben, uns mit ihnen zu beschäftigen.

---

1) Das Wort „absolut" ist nicht so zu verstehen, als ob dieses Maßsystem wirklich „absolut" ist. Es ist das nur insofern, als es alle verschiedenartigen Maßgrößen auf nur drei Einheiten zurückführt, ohne weitere Zwischeneinheiten beizubehalten. Jene von Gauß eingeführte Bezeichnung ist nun einmal die übliche und muß beibehalten werden. Eine weitergehende Bedeutung kommt ihr nicht zu.

In dem metrischen Maßsystem und in dem mit ihm in den Grundlagen übereinstimmenden absoluten sind die Einheiten also das Meter, das Kilogramm und eine Zeiteinheit, der mittlere Sonnentag, die Stunde usw. eines solchen Tages. Nun dürfte es vielleicht nicht ohne Interesse sein, zu erfahren, wie es hier mit der internationalen Einigung bestellt ist. Daß eine solche bei der Zeiteinheit nicht erforderlich, vielmehr eine solche selbstverständlich ist, braucht kaum betont zu werden. Ob nun die Stunde, die Minute usw. in den verschiedenen Ländern als Einheit gewählt wird, ist ja belanglos. Daß der Ausgangspunkt der Zeitrechnung verschieden ist, spielt ja nur insofern eine gewisse Rolle, als z. B. Rußland nach dem alten Julianischen Kalender rechnet, anstatt nach dem sonst gebräuchlichen Gregorianischen. Für alle Messungen und Maßbestimmungen spielt das ja keine Rolle; und daß infolge der Kugelgestalt der Erde die Zeit des astronomischen Mittags für verschiedene Längen verschieden ist, so daß man also zwischen mitteleuropäischer, osteuropäischer, westeuropäischer usw. Zeit unterscheiden muß, spielt für Messungen ebenfalls keine Rolle, da es sich hier immer nur um die Messung von Zeitdifferenzen handelt, wo solche Unterschiede stets ohne Bedeutung sind.

Anders ist es dagegen mit den Längen- und Gewichtseinheiten. In nahezu allen Kulturländern ist das metrische Maßsystem, wenn auch nicht ausschließlich eingeführt, so doch wenigstens neben dem bestehenden System zugelassen. Eine ganze Reihe von Ländern verwendet indessen trotz ihrer Duldung des metrischen Systems ihr eigenes fast ausschließlich, insbesondere England, was natürlich nicht zur Erleichterung der Handelsbeziehungen beiträgt.

Es kann nun nicht Aufgabe dieses Buches sein, die verschiedenen Maß- und Gewichtssysteme nicht metrischer Art zu behandeln, aber es sollen doch wenigstens die allerwichtigsten behandelt werden. Zunächst das noch in älteren wissenschaftlichen Werken gebräuchliche altfranzösische Längenmaßsystem der Toisen. Seine Grundlage ist die Toise von Peru, die bereits oben erwähnt ist. Sie bildet die Grundeinheit. Sie wird eingeteilt in 6 Fuß, jeder Fuß in 12 Zoll und jeder Zoll in 12 Linien, die ganze Toise also in 864 Linien. Ihre Beziehung zum metrischen System ist so gegeben, daß das Meter zu 443,296 Linien nach den Messungen von Méchain und Delambre angesetzt wurde. Man hat damit also die Beziehungen

1 Toise = 1,9490363 m	1 Zoll = 0,02706995 m
1 Fuß = 0,3248394 m	1 Linie = 0,00225583 m

1 m = 0,51307407 Toise = 3,0784444 Fuß = 36,941333 Zoll

1 cm = 0,36941333 Zoll	1 mm = 0,44329600 Linie.

Bei dieser Gelegenheit sei noch auf einen Vorzug des metrischen Systems hingewiesen, auf seine streng durchgeführte Anwendung der dezimalen Teilung, jede Unterteilung ist der zehnte, hundertste, tausendste usw. Teil der Einheit. Es ist damit der Übergang von einer Maßeinheit in die andere der denkbar leichteste. 4,326 m sind 43,26 dm, 432,6 cm oder 4326 mm. Man braucht auch nicht zu schreiben 4 Meter, 3 Dezimeter, 2 Zentimeter, 6 Millimeter.

Anders bei dem Toisensystem. Eine Strecke von 3 Toisen, 4 Fuß, 7 Zoll, 7 Linien kann man nicht in einfacher Form als Dezimalbruch schreiben. Will man die Strecke in Zoll als Dezimalbruch schreiben, so muß man eine umständliche Rechnung ausführen, bis man das Resultat 271,583 Zoll erhält, dessen Zahlen einen Zusammenhang mit obigem nicht erraten lassen. Das ganze Toisensystem, das trotz einer gewissen Schwerfälligkeit von ungeheurer Bedeutung für die ganzen Naturwissenschaften war, weil es zuverlässig begründet war, ist heute kaum noch in Gebrauch. Nur sehr selten findet man noch Barometerstände z. B. in Pariser Zoll und Linien angegeben. Derartige Einteilungen beziehen sich auf jenes Toisensystem. Das altfranzösische Gewichtssystem ist praktisch als verschwunden zu bezeichnen.

In Deutschland war entsprechend den vielen kleinen Staaten und Städten die Maßverwirrung recht groß. Das Grundlängenmaß war der Fuß, der in seiner Länge, abgesehen davon, daß z. B. teilweise überhaupt keine Normale dafür existierten, von etwa 280 bis 320 mm schwankte. Nur wenige dieser Fußmaßstäbe gelangten zu allgemeinerer Bedeutung. Am wichtigsten war wohl noch der rheinländische Fuß, der auch die Grundlage für den preußischen Fußmaßstab bildete, der 1839 von Bessel durch Anschluß an das französische Archivmeter als Normal hergestellt wurde. Es wurde die Länge des preußischen Fußes zu 139,13 Pariser Linien gesetzlich festgelegt, also 313,85 mm, und so ein gutes, zuverlässigen Normal geschaffen, bis später im Jahre 1868 durch den Norddeutschen Bund das metrische System eingeführt wurde. Der Fuß wurde in 12 Zoll und jeder Zoll in 12 Linien eingeteilt. $25\frac{1}{2}$ Zoll, oder 2 Fuß $1\frac{1}{2}$ Zoll bildeten die Elle, 12 Fuß die Rute. Flächenmaße waren der Quadratfuß, 144 Quadratfuß bildeten die Quadratrute, 180 Quadratruten bildeten einen Morgen.

Man hat damit also die Beziehungen:

1 pr. Fuß	= 0,31385	m	1 m	= 3,1862	Fuß
1 Zoll	= 2,61542	cm	1 cm	= 0,38235	Zoll
1 Linie	= 2,1795	mm	1 mm	= 0,45882	Linien
1 Elle	= 0,66693	m	1 m	= 1,4994	Ellen

1 Rute	= 3,76620 m	1 m	= 0,26552 Ruten
1 Quadratfuß	= 0,098502 qm	1 qm	= 0,10152 Quadratfuß
1 Quadratrute	= 14,184 qm	1 qm	= 0,070502 Quadratrute
1 Morgen	= 2553,3 qm	1 qm	= 0,00039165 Morgen.

Als Gewichtseinheit galt das sogenannte Zollpfund zu 500 g, das 1856 auf Beschluß des Zollvereins eingeführt wurde. Das Pfund, die Hälfte des amtlichen Kilogramms, bildet auch jetzt noch immer im bürgerlichen Leben das Einheitsgewicht.

Wie der preußische Fuß sich von einem ursprünglich natürlichen Maß zu einem künstlichen herangebildet hat, das prinzipiell mit dem Metermaß seiner Festlegung nach gleichwertig ist, abgesehen von dem Zusammenhang mit ihm, ist es auch mit dem englischen Maß geworden. Seine Grundlage bildet das Yard (Gerte). Es dürfte vielleicht von Interesse sein, darauf hinzuweisen, daß das Yard seine normale Länge bei der immerhin willkürlichen Temperatur von 62° Fahrenheit, also $16\frac{2}{3}°$ Celsius bzw. $13\frac{1}{3}°$ Reaumur hat. Wie der Name bereits besagt, ist es auch von einem natürlichen Maß hergeleitet, jetzt aber auch ein künstliches Maß. Es ist wohl dasjenige Maß, das neben dem Meter von größter Bedeutung im Weltverkehr ist. Trotz der unbestreitbaren Schwierigkeiten des englischen Systems ist bei dem konservativen Sinn der Engländer an eine Abschaffung dieses in absehbarer Zeit nicht zu denken. 1 yard wird in 3 feet (Fuß) geteilt, jeder Fuß in 12 inches (Zoll). Man hat die Beziehungen:

1 Yard (yd)	= 0,914399 m	1 m	= 1,0936143 yds
1 Fuß (ft)	= 0,30480 m	1 m	= 3,280843 ft
1 Zoll (inch)	= 2,5400 cm	1 cm	= 0,3937011 ins

Bei den englischen Gewichten muß man zwei getrennte Systeme unterscheiden, das Troygewicht, für wissenschaftliche Untersuchungen und für Edelmetalle usw. verwendet, und das Avoirdupois als Handelsgewicht. Ohne auf ihre Herleitung einzugehen, seien nur die Beziehungen zum metrischen System festgestellt.

Das Troy-Pfund wird eingeteilt in 12 Troy-Unzen, jede dieser in 20 Pennyweights, jedes dieser in 24 Grains. Es ist also:

1 Troy-Pfund	= 0,373242 kg	1 kg	= 2,679227 Troy-Pfund
1 Troy-Unze (oz)	= 31,1035 g	1 kg	= 32,1507 oz
1 Pennyweight (dwt)	= 1,555175 g	1 g	= 0,643014 dwts
1 Grain (gr)	= 0,0647990 g	1 g	= 15,432 grs.

Weiter gilt dann für das Avoirdupois folgendes: das Pfund wird in 16 Unzen geteilt, die Unze in 16 drams. Außerdem bilden 7000 grains ein Pfund. 1 quarter sind 25 Pfund und 4 quarter sind 1 hundredweight; und zum metrischen System bestehen die Beziehungen:

1 Pfund-avoirdupois (lb)	= 0,453592 kg	1 kg	= 2,20462 lb
1 Unze (oz)	= 28,350 g		= 15432,36 grs
1 dram (dr)	= 1,77184 g	1 kg	= 35,2740 oz
1 grain (gr)	= 0,064799 g	1 g	= 0,564383 drs
1 quarter (q)	= 12,7006 kg	1 g	= 15,432 grs
1 hundredweight (cwt)	= 50,8024 kg	1 kg	= 0,078736 qs
		1 kg	= 0,019684 cwt.

Gleichzeitig besteht nun noch die Beziehung zwischen Troy-Gewicht und Avoirdupois, daß 1 lb gleich 7000 Troy-grains sein soll, was man aus den obigen Zahlen sofort nachkontrollieren kann.

Auf die große Anzahl der Spezialmaße für verschiedene Zwecke, sowie Flächen- und Raummaße sei hier nicht weiter eingegangen, weil es uns von unserem Thema zu weit wegführt.

Man sieht ohne Mühe ein, daß derartig komplizierte Maßsysteme im Gebrauch ungleich schwieriger und wesentlich schwerfälliger sind als das einfache metrische System mit seiner strengen dezimalen Unterteilung.

Auf die Maßsysteme der übrigen Staaten sei hier nicht eingegangen, da die Tabellen, ohne weiteres Interesse zu bieten, eine ganze Reihe Seiten füllen würden, es muß dafür auf Spezialwerke verwiesen werden. Die wichtigsten Systeme sind insoweit mit den metrischen in Zusammenhang gebracht, als ihre Normale mit metrischen verglichen sind, und somit Umrechnungszahlen vorhanden sind. Es mögen obige Beispiele genügen, um zu zeigen, wie vorteilhaft das metrische System ist, und wie unbeholfen ein Maßsystem werden kann, wenn es nicht in aller Strenge und folgerichtig durchgeführt wird, ohne von fremden Zutaten, die allmählich hineingeraten sind, befreit zu werden. Gleichzeitig sind sie auch Beispiele dafür, wie natürliche Maße allmählich in künstliche übergehen.

Allgemeines über Messungen.

Die Naturwissenschaften haben die Aufgabe, die Erscheinungen in der Natur zu beschreiben und auf allgemeine Gesetze zurückzuführen. Die Beschreibung der Erscheinungen kann auf zwei Wegen erfolgen. In dem einen Falle wird nur die beobachtete Erscheinung beschrieben, im anderen die Größe der Erscheinung, ihre Intensität usw. Das eine ist eine qualitative Beschreibung, das andere eine quantitative. Nehmen wir ein Beispiel: Am Regenbogen beobachten wir die Farbenfolge von rot über gelb nach grün, blau und violett. Beim Durchgang des Lichtes durch Prismen aus Glas beobachten wir die gleiche Farbenfolge und gelangen so zu dem allgemeinen Gesetz, daß dieses die normale Farbenfolge sei. Wir beobachten nun weiter, daß die Breite der einzelnen Farben verschieden ausfällt, je nach dem Material des Prismas, seinem Winkel, in dem es geschliffen ist usw. Wir messen mit geeignetem Hilfsmittel die Prismenwinkel und die Ablenkungswinkel der Lichtstrahlen und gelangen zu umfassenderen Gesetzen über den Lichtstrahlengang im Prisma und können auf Grund unserer Messungen die entstehenden Verhältnisse zahlenmäßig, oder in mathematischen Formeln angeben. Ein anderes Beispiel: Reibe ich zwei Gegenstände aneinander, so entsteht an der Reibungsstelle Wärme, stets, auch wenn ich Wasser oder Luft mittels eines Rührers in Bewegung setze. Nun messe ich die Arbeit, die ich bei der Reibung verrichte, und die entstandene Wärme, auf welche Weise interessiert uns an dieser Stelle nicht, und dann gelange ich zu einem der fundamentalsten Gesetze der Physik, daß jedes Quantum Arbeit nur ein ganz bestimmtes Quantum Wärme erzeugt, nicht mehr und nicht weniger.

Die Messung ist in allen Fällen dasjenige, was uns in der Erkenntnis weitergeführt hat, die Messung, die uns gestattet, die beobachteten Erscheinungen zahlenmäßig, oder mathematisch als Formel darzustellen. Was heißt das nun, eine Größe messen? Doch nur, daß ich feststelle, um wievielmal sie größer oder kleiner ist als eine andere Größe. Finde ich die Höhe eines Hauses zu 15 m, so sage ich damit aus, daß die Höhe des Hauses 15 mal größer ist als ein Maßstab, der uns die Länge von 1 m angibt. Habe ich ein Stück Eisen von 5 kg, so bedeutet das, daß es 5 mal so schwer ist wie ein Gewicht, das ich 1 kg nenne. In allen Fällen vergleiche ich eine zu messende Größe mit einer Maßeinheit, in diesen Fällen mit einem Meter und mit einem Kilogramm. Diese selbst bezeichnet man als Maße, oder besser als Maßeinheiten.

Was ist nun das wichtigste bei solchen Messungen? Zunächst das eine, daß ich jede Größe nur mit einer ihr gleichartigen ausmessen kann; es ist unmöglich zu sagen, daß eine Strecke 5 kg lang ist, ebensowenig wie, daß der Inhalt eines Landes 500 km ist. Längen kann man nur mit Längen, Flächen mit Flächen, Gewichte mit Gewichten ausmessen. Daß man z. B. Flächenmaße auf Längenmaße zurückführen kann, ist eine andere Sache, z. B. wenn man sagt, die Grundfläche des Zimmers ist 6 m $\times$ 5 m, in diesem Falle setzt man aber voraus, daß es sich um ein rechteckiges Zimmer handelt, das 6 m lang und 5 m breit ist.

Dann der zweite wichtige Umstand. Das Maß, das man verwendet, bzw. die Maßeinheit muß richtig sein. Was heißt das nun, sie ist richtig? Das bedeutet, daß sie mit dem vorgeschriebenen Normalmaß für diese Maßeinheit übereinstimmen, oder besser gesagt, gleich groß ist wie das vorgeschriebene Normalmaß. Wo erhält man nun aber die Normalmaße? Solche besitzen für die im Verkehr gebräuchlichen Maße die Eichämter, die man überall findet, die amtlich mit Normalen ausgerüstet sind, die direkt oder mittels anderer Normale mit den internationalen Normalen des Meters und des Kilogramms verglichen und als richtig befunden sind. Die Eichämter sind verpflichtet, alle Maße, die gewissen Vorschriften entsprechen, amtlich zu prüfen, und wenn sie richtig sind, d. h. mit den Eichamtsnormalen übereinstimmen, amtlich zu stempeln.

Es sei jetzt hier eine Bemerkung eingeschaltet, die nicht ganz unwichtig ist. Man braucht in vielen Fällen gar keine „richtigen" Maße. Mißt man die Dimensionen eines Maschinenteiles mittels eines beliebigen Maßstabes aus, und fertigt dann unter Anwendung des gleichen Maßstabes diesen Teil neu an, so wird er mit dem alten übereinstimmen; verwendet man aber einen anderen Maßstab, so braucht dieses nicht der Fall zu sein, sie stimmen nur dann überein, wenn die beiden Maßstäbe gleich sind. Mit anderen Worten, wenn man für seinen eigenen Gebrauch z. B. dauernd nur mit einem Zollmaßstabe mißt, können Schwierigkeiten nicht entstehen, gibt man aber einem anderen die erhaltenen Maße an, um danach einen Gegenstand anzufertigen, so wird man nur dann zufrieden sein, wenn dieser mit einem gleichen Zollmaßstabe arbeitet, was nicht selbstverständlich ist, da die Zollskalen bekanntlich recht verschieden sind.

Was bedeutet das nun, daß ein Maß richtig ist? Nach dem oben Gesagten, wenn es mit dem Normalmaß übereinstimmt. Indessen läßt sich eine solche Übereinstimmung niemals vollständig erzielen. Wenn zwei Kilogrammstücke gleich sein sollen, und ich stelle sie auf eine empfindliche Wage, so wird sich im allgemeinen zeigen, daß sie nicht vollständig gleich sind. Mache ich sie dann durch Abfeilen usw. gleich, und verwende ich eine noch feinere Wage, so werden sie doch nicht vollständig übereinstimmen. Für diejenigen Maße und Meßinstrumente, die von den Eichämtern geeicht werden können, sind die „Eichfehlergrenzen" vorgeschrieben; d. h. die Beträge, um die sie von einem absolut richtigen Maße abweichen dürfen. Da es vielleicht von Interesse ist, kennen zu lernen, wie groß diese Beträge sind[1]), so seien im nach-

1) Es sind dieses auch gleichzeitig die Beträge, die angeben, wie genau die Maße und Meßinstrumente ohne größere Schwierigkeiten hergestellt, und welche Fehlergrenzen im Verkehr ohne besondere Mühe eingehalten werden können.

folgenden die im Deutschen Reiche vorgeschriebenen Eichfehlergrenzen für eine Reihe von am meisten angewendeten Maßen und Meßwerkzeugen zusammengestellt.

I Längenmaße:

		mm
Metallene Maßstäbe v. 1 m Länge	±	0,5
Metallene Maßstäbe v. 0,5, 0,2, 0,1 m	±	0,25
Maßstäbe aus anderem Material v 10 - 7 m	±	6
6—4 „	±	4
3 u. 2 „	±	2
1 „	±	1
0,5 „	±	0,75
Maßstäbe aus Buchsbaumholz, Knochen usw. von 0,5, 0,2, 0,1 m	±	0,25
Bandmaße von 50—40 m Länge	±	8
10— 7 „ „	±	3
3 u. 2 „ „	±	1
1 „ „	±	0,75
Präzisionsmaßstäbe v. 1 m	±	0,1
0,5, 0,2, 0,1 m	±	0,05

II. Flüssigkeitsmaße:

		ccm
50 l	±	100
10 „	±	25
5 „	±	12,5
2 „	±	5
1 u. 0,5 „	±	2,5
1/4 „	±	1,25

III. Hohlmaße für trockene Gegenstände:

		ccm
100 l	±	400
50 „	±	200
10 „	±	50
5 „	±	25
2 „	±	10
1 u. 0,5 „	±	5
1/4 „	±	2,5

IV. Gewichte:

		g
Handelsgewichte von 50 kg	±	5
10 „	±	2,5
5 „	±	1,25
2 „	±	0,6
1 „	±	0,4
		mg
500 g	±	250
100 „	±	60
50 „	±	50
10 „	±	20
5 „	±	16
1 „	±	10
Präzisionsgewichte bis 10 g abwärts überall die halben Fehlergrenzen. Dann 5 g	±	6
1 „	±	2
500, 200, 100 mg	±	1
50, 20, 10 „	±	0,5
1 „	±	0,1

V. Wagen:

Die Empfindlichkeit der gleicharmigen Balkenwage muß so groß sein, daß bei einer Wage für

1 kg maximaler Belastung	1 g
5 „ „ „	5 „
10 „ „ „	5 „

einen deutlichen Ausschlag verursachen. Die Fehler durch Ungleicharmigkeit dürfen nicht größer sein als jene Beträge. Präzisionswagen von 1 und 5 kg maximaler Belastung müssen 4 mal, von 10 kg müssen 5 mal empfindlicher sein.

Ungleicharmige Wagen, also Dezimal- oder Zentesimalwagen, müssen eine Empfindlichkeit von 0,6 g für jedes Kilogramm ihrer maximal zulässigen Belastung besitzen, desgleichen keinen größeren Fehler als diesen Betrag wegen der Abweichung der Hebelverhältnisse von ihren Sollwerten 1 : 10 bzw. 1 : 100.

Um vorstehende Beträge dürfen also jene Maße und Meßwerkzeuge von der Richtigkeit abweichen, wenn sie zur Eichung vorgelegt werden, ohne daß ihnen eine amtliche Stempelung versagt werden darf.

Bei der Anwendung von Maßen im bürgerlichen Leben und in der Technik sei noch auf einen allgemeinen Punkt hingewiesen. Nach den Grundlagen des metrischen Maß- und Gewichtssystems ist die Temperatur des schmelzenden Eises, also die Temperatur, die wir allgemein als 0^0 bezeichnen, die maßgebende Temperatur. Deswegen wird auch allgemein von jedem Maßstab vorausgesetzt, daß er bei 0^0 „richtig" ist, falls er nicht eine besondere Kennzeichnung trägt, daß er für eine andere Temperatur „richtig" sein soll, etwa 15^0, 20^0 oder andere Temperaturen. Daß man die etwas ungewöhnliche Temperatur 0^0 als maßgebende gewählt hat, hat seinen Grund darin, daß man damit von jeder Definition einer Temperaturskala unabhängig ist. Auf S. 54 wird man sehen, daß „richtige" Thermometer nicht ohne weiteres in ihren Angaben übereinstimmen. Daß die Temperatur 0^0 nicht immer bequem ist, ist klar, aber eine andere, wie vielleicht 20^0, die für unsere Gegenden ganz brauchbar wäre, ist es auch nicht immer; außerdem muß man bedenken, von welcher Wichtigkeit im gesamten Maß- und Gewichtswesen eine internationale Einigung ist, und daß bei einer internationalen Festsetzung der Normaltemperatur die Bedürfnisse von Indien und Zentralafrika, und Kanada und Spitzbergen, um etwas übertriebene Beispiele zu wählen, wohl schwer in Einklang zu bringen sein werden. Was das für die Praxis zu sagen hat, sollen einige Beispiele zeigen; zwei „richtige" Maßstäbe aus Messing von Meterlänge, von denen der eine für 0^0 justiert ist, der andere für 20^0, werden sich, wenn sie die gleiche Temperatur besitzen, stets um 0,36 mm in ihren Längen unterscheiden (vgl. S. 31). Jener erste Maßstab, der bei 0^0 richtig ist, wird tatsächlich bei uns beinahe stets um 0,3 mm länger sein als ein Meter, indessen mit allen übrigen Maßstäben gleichen Materials unter gleichen Verhältnissen selbstverständlich übereinstimmen. Dagegen hat man wiederum den Vorzug, daß, wenn in der Technik Maschinenteile usw. aus Messing angefertigt werden, sie tatsächlich, wenn ihre Längen mit jenem

Maßstab gemessen werden, ihre richtigen Längen bei 0° haben. Werden sie mit Stahlteilen zusammengesetzt, die in einer anderen Fabrik hergestellt sind und dort mit einem bei 0° richtigen Stahlmaß nachgemessen sind, so müssen sie bei 0° unbedingt genau zusammenpassen; bei anderen Temperaturen tun sie dieses nicht ohne weiteres, was ja auch bei jeder Konstruktion berücksichtigt werden muß. Man weiß dann also von vornherein die Temperatur, bei welcher ein genaues Passen stattfinden muß.

Ein Litermaß aus Messing, das bei 0° richtig ist, ist bei 20° um 1,1 ccm zu groß. Im übrigen gilt für Raummaße das gleiche wie für Längenmaße. Für Gewichte ist diese Frage ohne Bedeutung. Im allgemeinen sind ja überhaupt diese Unterschiede so gering, daß sie für das bürgerliche Leben belanglos sind. In der Technik und in der Wissenschaft müssen sie natürlich genauestens berücksichtigt werden.

Wenden wir uns nun aber von diesen, den Bedürfnissen des öffentlichen Verkehrs angepaßten Maßen zu den mehr wissenschaftlichen Fragen. Für viele wertvolle wissenschaftliche Messungen werden diese Genauigkeiten vollständig ausreichen und für die größte Anzahl der technischen Messungen ebenfalls. Behandeln wir diese Fragen nun einmal etwas genauer. Will ich irgendeine physikalische Größe nachmessen, nehmen wir einmal an, das Gewicht irgendeines Körpers, so bringe ich ihn mit z. B. geeichten Gewichten auf einer Wage ins Gleichgewicht und ich finde dann, daß er 1,0000 kg wiegt. Es mag durch andere Untersuchungen festgestellt sein, daß die Wage vollständig richtig ist. Das Normalgewicht war nun ein geeichtes Gewicht, ist also nach oben Gesagtem nur innerhalb 0,4 g richtig, kann also tatsächlich auch 1,0004 kg betragen, auch nur 0,9996 kg; d. h. also, das Gewicht des Körpers, den ich abwägen wollte, braucht gar nicht 1,0000 kg zu sein, es kann ebensogut 1,0004 wie 0,9996 kg sein, oder irgendwie zwischen diesen Werten liegen, mit diesem Gewicht kann ich ihn also nicht genauer wägen als auf 0,4 g, kann also sein tatsächliches Gewicht einwandfrei so schreiben 1,0000 kg $\pm$ 0,0004 kg. Hätte ich sein Gewicht auf einer sehr empfindlichen Wage festgestellt, aber mit dem gleichen Normalgewicht, und hätte ich sein Gewicht zu 1,0001234 kg gefunden, so würde mir das nichts helfen. Die letzten Ziffern sind nur bei der Wägung gefunden, sind aber tatsächlich infolge des Normals unsicher. Nun lasse ich aber das Normalgewicht genau untersuchen, wobei festgestellt werden mag, daß es innerhalb eines Milligramms genau 1 kg wiegt, also 1,000000 kg $\pm$ 0,000001 kg, dann weiß ich weiter, daß der abzuwägende Körper nunmehr 1,0001234 kg $\pm$ 0,000001 kg wiegt, die letzte Stelle, die 4, ist also wohl noch unsicher, die vorletzte Stelle, die 3, ist indessen höchstens um eine Einheit falsch, sein Gewicht liegt also zwischen 1,0001224 kg und 1,0001244 kg. Die Genauigkeit des Versuches habe ich damit um das rund 400fache vergrößert.

Nehmen wir einen anderen Fall an: Ich bestimme das Volumen eines Würfels durch Messung seiner Kanten. Für diese habe ich unter Verwendung eines fehlerfreien Maßstabes 15,5, 17,1 und 20,3 mm gefunden. Nun rechne ich das Volumen aus, indem ich die drei Zahlen miteinander multipliziere, und finde so sein Volumen zu 5380,515 cmm. Kann ich diese Zahl nun wirklich verantworten? Ich habe die Messung auf Zehntelmillimeter ausgeführt, kann mich dabei also leicht um ein halbes Zehntelmillimeter getäuscht haben. Nehme ich also nun an, daß die dritte Kante nicht 20,30 mm, sondern 20,35 mm lang ist, so erhalte ich als Volumen 5393,7675 cmm. Jener geringe Messungsfehler verändert also das Resultat bereits um rund 14 cmm. Berücksichtigt man nun noch, daß man bei jeder der drei Messungen einen solchen Fehler machen kann, so sieht man, daß man von dem Resultat nur die runde Zahl 5380 cmm als zuverlässig wird ansehen können. Alle weiteren Ziffern sind überflüssig und erwecken nur den Anschein einer durch nichts begründeten Genauigkeit. Nach der anderen Seite würde man wiederum einen Fehler begehen, wenn man das Volumen zu 5000 cmm angeben würde; man gibt damit der Zahl eine geringere Genauigkeit, als sie wirklich beanspruchen kann.

Bei allen Messungen ist es von größter Wichtigkeit festzustellen, wie zuverlässig das Ergebnis ist. Es ist dieses vielfach eine Aufgabe, die nicht weniger schwer ist als die Messung selbst, aber sie ist von größter Wichtigkeit. Jede beobachtete Größe ist mit einer gewissen Unsicherheit behaftet, und diese Unsicherheit festzustellen ist mit die Aufgabe bei jeder Messung. Man hat dabei zwei Arten von Fehlern zu unterscheiden, die eigentlichen Beobachtungsfehler, die Fehler, die während des Versuches selbst entstehen, und in unvermeidlichen Ablesungsungenauigkeiten, störenden Einflüssen von außen, Temperaturschwankungen, die nahezu alle Versuche ungünstig beeinflussen usw., und systematische Fehler, die durch die Messungsmethode oder die Messungshilfsmittel selbst begründet sind, und nicht ohne weiteres als solche erkennbar sind. Haben wir das Gewicht irgendeines Körpers durch zehn Wägungen mit dem gleichen Gewichtssatze festgestellt, und wir nehmen an, daß wir hierbei für sein Gewicht die verschiedenen Werte gefunden haben:

Gewicht des Körpers:		Abweichungen vom Mittelwert:
445,3268 g		— 2,0 mg
3315 „		+ 2,7 „
3279 „		— 0,9 „
3261 „		— 2,7 „
3295 „	Mittelwert aller 10 Werte	+ 0,7 „
3301 „	445,3288 g	+ 1,3 „
3312 „		+ 2,4 „
3288 „		± 0,0 „
3291 „		+ 0,3 „
3274 „		— 1,4 „

Wie man sieht, schwanken alle zehn Werte um den Mittelwert 445,3288 g *unregelmäßig* — und das ist das Kennzeichen der *Beobachtungsunsicherheiten* — herum. Sie zeigen nur damit an, daß ich die einzelne Wägung nicht genauer als auf etwa 1 bis 2 mg erhalte, daß damit der Genauigkeit meiner Messungen eine Grenze gesteckt ist. Wäge ich nun aber den Körper auf einer anderen Wage mit anderen Normalgewichten, und finde ich dafür als Mittelwert 445,3201 g, wobei die Einzelwägungen etwa ebenso genau wie oben sein mögen, so muß ich sagen, daß zwischen beiden Beobachtungsreihen ein *systematischer Fehler* vorliegt, der durch die Beobachtungsfehler nicht erklärt werden kann, und der, falls die gewünschte Genauigkeit es erfordert, aufgeklärt werden muß. Hätte ich die Zahlen der ersten Reihe nicht in jener oben angegebenen Reihenfolge gefunden, sondern etwa in folgender:

445,3261 g		— 2,7 mg
3268 „		— 2,0 „
3274 „		— 1,4 „
3279 „		— 0,9 „
3288 „	Mittelwert aller Zahlen	± 0,0 „
3291 „	445,3288	+ 0,3 „
3295 „		+ 0,7 „
3301 „		+ 1,3 „
3312 „		+ 2,4 „
3315 „		+ 2,7 „

so müßte ich sagen, daß hier in der Beobachtungsreihe selbst ein *systematischer Fehler* vorliegt, da das Gewicht der Körper andauernd zunimmt, denn die Beobachtungsfehler schwanken hier nicht unregelmäßig hin und her, sondern verlaufen offenbar regelmäßig, systematisch. Auch das müßte, wenn erforderlich, aufgeklärt werden.

Nun noch zum Schluß einige Worte über die Genauigkeit von Messungen, wobei ein sehr häufiger Fehler gemacht wird. Nach dem oben Gesagten gewinnt eine Zahl nicht dadurch an Genauigkeit, daß man sie mit möglichst viel Ziffern angibt. Wir wissen, daß das Licht sich mit einer Geschwindigkeit von 300000 km in einer Sekunde bewegt, wofür wir auch schreiben können mit einer Geschwindigkeit von 300000000000 mm in einer Sekunde. Die Zahl wird wohl länger, aber nicht genauer, denn ob das Licht sich mit 300000 oder 300010 km Geschwindigkeit fortbewegt, wissen wir bereits nicht mehr. Aber der Laie verwechselt ständig unter dem Sammelnamen Genauigkeit einer Messung zwei Sachen die präzise Messung einer physikalischen Größe, die bis auf einen geringen Bruchteil ihres Sollwertes festgestellt ist, und die Messung einer sehr kleinen Größe. Eine Wage, die noch ein Milligramm abzuwägen gestattet, braucht keine genaue Wage zu sein, da sie vielleicht nicht mehr gestattet festzustellen, ob es sich um 1,00 oder 1,01 mg handelt, das eine Milligramm kann also nur auf $^1/_{100}$ bestimmt werden; man kann eine solche Wage wohl als sehr empfindlich bezeichnen, da sie eben noch Hundertstel eines Milligramms abzuwägen gestattet, aber nicht als sehr genaue Wage. Gestattet sie dagegen noch Belastungen von 1 kg zu tragen, so lassen sich dann Kilogrammstücke noch auf Hundertstel-Milligramm wägen, d. h. auf $^1/_{100\,000\,000}$, und man wird die Wage als eine ganz außergewöhnlich genaue Wage bezeichnen müssen; diese Messung ist um eine Million mal genauer als jene. Ein empfindliches Instrument braucht noch kein genaues Instrument zu sein, und umgekehrt, es sind das zwei Begriffe, die sich nicht ohne weiteres miteinander in Beziehung setzen lassen. Ein Thermometer, das Hundertstel-Grad abzulesen gestattet, ist ein empfindliches Thermometer, ob es genau ist, ist eine andere Frage, es kann z. B. systematisch um 1^0 falsch anzeigen, also statt $0{,}00^0 + 1{,}00^0$, statt $+ 1{,}00^0 + 2{,}00^0$ usw. angeben. Will ich die Temperatur eines Flüssigkeitsbades messen, und ich lese an diesem Thermometer $18{,}05^0$ ab, während also die Temperatur richtig $17{,}05^0$ ist, so kann man das nicht als sehr genau bezeichnen. Will ich aber die Temperaturänderung des Wasserbades messen, und lese ich im Beginn $18{,}05^0$, nach einiger Zeit $20{,}05^0$ ab, so habe ich festgestellt, daß sich die Temperatur des Wassers um $2{,}00^0$ geändert hat, hierfür ist es im allgemeinen belanglos, ob die wahren Temperaturen $17{,}05^0$ und $19{,}05^0$ waren, die Temperaturdifferenz bleibt die gleiche, und die Genauigkeit meiner Messungen ist recht beträchtlich.

Beschäftigen wir uns jetzt noch kurz mit der Frage, woher wir richtige Maße erhalten können. Wie gesagt, die Zeitmaße sind Naturmaße und können von jedem, die genügenden Instrumente vorausgesetzt, selbständig hergestellt werden. Das Internationale Meter und Kilogramm werden im Internationalen Maß- und Gewichtsbureau in Breteuil bei Paris aufbewahrt. Zu Messungen werden sie nicht benutzt, nur dann, wenn in gewissen langjährigen Zwischenräumen die Kopien dieser, die an alle Staaten der Meterkonvention ausgegeben sind, mit ihnen neu verglichen werden, um die Einheitlichkeit aller Maßbestimmungen aufrechtzuerhalten. Die Behörde, welche die dem Deutschen Reiche überwiesenen Prototype aufbewahrt, ist die Kaiserliche Normal-Eichungskommission in Berlin-Charlottenburg. Ihr liegt die Aufsicht über das gesamte Eichwesen des Reiches ob. Durch ihre Vermittelung sind alle Eichämter im Reiche mit Normalen für Maß und Gewicht ausgerüstet, die direkt oder durch Einschalten anderer Normale mit den deutschen Prototypen verglichen sind. Die Kontrolle der Eichämter größerer Bezirke üben die Eichungsinspektionen aus. Die Normal-Eichungskommission hat eine Maß- und Gewichtsordnung und eine Eichordnung erlassen, in denen die Grundlagen der deutschen Maße und Gewichte festgelegt, die Vorschriften gegeben sind, ob und unter welche Bedingungen Maße und Gewichte amtlich auf ihre Richtigkeit geprüft und gestempelt, geeicht werden müssen, und welchen sonstigen Bedingungen solche hinsichtlich Form und Ausführungsart genügen müssen, um eichfähig zu sein, besonders welche Fehlergrenzen sie einhalten müssen, d. h. um welche maximalen Beträge sie von der Richtigkeit abweichen dürfen. Jene oben angegebenen Fehlergrenzen sind der Eichordnung entnommen. Will man also einen Maßstab oder ein Gewichtsstück auf seine Richtigkeit hin prüfen lassen, so sind dafür die Eichamter, oder bei höheren Ansprüchen an Genauigkeit die übergeordneten Behörden zuständig.

Indessen mit Längenmaßen und Gewichten allein sind alle erforderlichen Messungen, auch die des bürgerlichen Lebens, nicht ausführbar. Man braucht dazu noch andere Maße, besonders Raummaße, die vom Meter bzw. vom Kilogramm abgeleitet sind, und auf der Litereinheit beruhen, und dann die große Anzahl von Meßinstrumenten, hauptsächlich Wagen aller Art, Gasmesser usw. Auch diese müssen natürlich geeicht werden können und unterliegen ebenfalls den Vorschriften der Maß- und Gewichtsordnung sowie der Eichordnung.

Weiter sind noch andere Maße und Meßinstrumente erforderlich, die nicht unmittelbar mit jenen zusammenhängen. Ich erwähne da die Thermometer, die Lichtstärke-Normallampen, die Elektrizitätszähler, Normalwiderstände, Normalelemente usw. Zur Bearbeitung dieser Maße und Meßinstrumente ist vom Reiche in Berlin-Charlottenburg die Physikalisch-Technische Reichsanstalt errichtet, deren besondere Aufgabe es außerdem ist, über die Maßeinheiten, über die eine internationale

Regelung noch nicht eingetreten ist, wie hauptsächlich die Lichtstärke und elektrische Einheiten, die für das Reich gültigen Normale herzustellen und zu überwachen und ihre Beziehungen zu den entsprechenden Normalen anderer Länder im Einvernehmen mit den gleichartigen Instituten dieser festzulegen und an einer internationalen Einigung mitzuarbeiten. Soweit eine solche nicht erfolgt ist, sind die Maßeinheiten für das Deutsche Reich gesetzlich festgelegt.

Aufgabe beider Behörden ist es nun, alle im Handel und Verkehr sowie in der Technik gebräuchlichen Maße und Meßinstrumente zu untersuchen, sie auf Antrag zu prüfen, kurz alle Fragen zu untersuchen, die für sie irgendwie von Bedeutung und für die praktische Anwendung von Wert sind.

Welche Bedeutung die oben erwähnten Maße und Meßinstrumente im einzelnen haben, wird in den späteren Kapiteln genauer erörtert werden.

Mechanische Maße und Messungen.

Im Folgenden wollen wir uns nun mit den Maßen und Messungen der allgemeinen Physik oder der Mechanik, wie man sie, alter Gewohnheit folgend, bezeichnet, beschäftigen, und besonders mit den wichtigsten, den Längenmaßen und Längenmessungen, und dann mit den Massenmaßen und Massenmessungen oder Wägungen, zwei Kapitel, die man auch unter dem Sammelnamen der Metronomie zusammenfaßt.

Die Grundeinheit für alle Längenmaße ist das Meter[1]). Das Internationale Prototyp für dieses wird, wie schon vorher erwähnt, in Paris aufbewahrt und besteht aus einem Stabe von X-förmigem Querschnitt, wie er in Abb. 4 (S. 10) dargestellt ist. Auf die Mittelrippe dieses Stabes sind zwei feine Striche aufgebracht, die den Meterabstand definieren. Wie nun auch vorher schon gesagt ist, genügt diese einfache Definition aber nicht. Denn jedes Material verändert seine Dimensionen mit der Temperatur, und so auch das Meter, d. h. der Abstand der beiden Striche ist bei verschiedenen Temperaturen ver-

1) Die Einteilung des Meters und die amtlich vorgeschriebenen Abkürzungen für die Maßbezeichnungen sind folgende:

1 Meter (m) = 10 Dezimeter (dm) = 100 Zentimeter (cm) = 1000 Millimeter (mm) = 1000000 Mikron (μ)
1 dm = 10 cm = 100 mm = 100000 μ
1 cm = 10 mm = 10000 μ
1 mm = 1000 μ
1000 m = 1 Kilometer (km).

schieden groß, und zwar um Beträge, die durchaus nicht ganz geringfügig sind. Die Gleichung des deutschen Meterprototyps ist ja (vgl. S. 11):

$$L_T = 1m - 1{,}7\,\mu + 8{,}642\,\mu \cdot T + 0{,}001\,\mu \cdot T^2.$$

Für eine Temperatur von $T = 0^0$ C ist also $L_0 = 1m - 1{,}7\,\mu$ [$1\,\mu = 0{,}001$ mm], das deutsche Prototypmeter ist also bei 0^0 um $1{,}7\,\mu$ kürzer als das Internationale Meter. Bei $+ 30^0$ C ist seine Länge indessen:

$$L_{30} = 1m - 1{,}7\,\mu + 8{,}642 \cdot 30\,\mu + 0{,}001 \cdot 900\,\mu = 1m - 1{,}7\,\mu + 259{,}3\,\mu + 0{,}9\,\mu = 1m + 258{,}5\,\mu,$$

d. h. es ist um wenig mehr als ein Viertelmillimeter länger als das wahre Meterintervall. Aus diesem Grunde ist nun als Meterlänge der Abstand zwischen jenen Strichen bei der Temperatur des schmelzenden Eises, also bei der mit Null Grad bezeichneten Temperatur, definiert.

Im allgemeinen haben die zu feinen Maßstäben verwendeten Materialien eine größere Ausdehnung als das Material der Prototypmeter. So ist die Ausdehnung des Stahles etwa $11\,\mu$ für jeden Grad und die Meterlänge, d. h. ein Stab von 1 m Länge wird bei 1^0 Temperaturerhöhung um $11\,\mu$ länger, des Messings und der Bronze etwa $18\,\mu$, des Aluminiums etwa $24\,\mu$. Ein Aluminiumstab von 1 m Länge verändert also bei einer Erwärmung von 0^0 auf 100^0 seine Länge um etwa 2,4 mm! Dagegen hat die Legierung von Eisen und Nickel die höchst merkwürdige Eigenschaft einer sehr geringen Ausdehnung bei einem Nickelgehalt von 36 Prozent. Diese Legierung unter dem Namen Invar (d. h. unveränderlich) bekannt, hat nur eine Ausdehnung von etwa $1\,\mu$. Ein solcher Invarstab würde also bei einer Erwärmung von 100^0 seine Länge um nur 0,1 mm ändern; ja das Material läßt sich auch durch geeignete Behandlung dahin bringen, daß es noch geringere Ausdehnung besitzt. Es sind auch Fälle bekannt, wo durch geeignete Behandlung die Ausdehnung fast ganz verschwindend war und das Material sich bei geringer Erwärmung fast gar nicht mehr ausdehnte, und dann bei weiter steigender Erwärmung sich nicht mehr ausdehnte, sondern langsam zusammenzog. Nun könnte man denken, daß damit ein vorzügliches Material für feinste Maßstäbe geschaffen wäre, leider ist das nicht der Fall, denn es hat den sehr großen Fehler, daß es seine Länge dauernd im Laufe der Zeit verändert und sich langsam um sehr geringe, aber deutlich meßbare Beträge verlängert. In allerneuester Zeit hat man ein anderes Material gefunden, nämlich geschmolzenen, in Röhren gezogenen Quarz, der eine Ausdehnung von $0{,}4\,\mu$ besitzt. Indessen ist er leicht zerbrechlich und damit nicht für alle Zwecke geeignet.

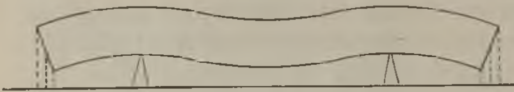

Abb. 5. Durchbiegung eines Stabes.

Nun wird man noch fragen, weswegen die Prototypmeter den eigenartigen Querschnitt haben. Dazu betrachte man die Abb. 5. Sie stellt in sehr stark übertriebener Form einen Maßstab dar, der nicht glatt auf einer ebenen Fläche aufliegt, sondern nur an zwei Punkten unterstützt ist. Befinden sich auf einem solchen Maßstab die Begrenzungsstriche auf der Oberfläche, so sieht man ohne weiteres, daß damit ihr Abstand scheinbar verlängert wird. Wären sie auf der Unterflache, erschiene er verkürzt. Dazwischen gibt es natürlich eine Stelle, wo ihr Abstand unverändert geblieben ist. Diese Schicht des Stabes bezeichnet man als neutrale Schicht. Ihre Lage hängt von den Stellen ab, an denen der Stab unterstützt wird. Der berühmte Astronom Bessel hat nun festgestellt, daß bei einer Unterstützung des Stabes in der in der Abbildung gezeichneten Weise, etwa $^2/_9$ der Stablänge von den Enden entfernt, die gesamte Längenänderung des Stabes infolge seiner Durchbiegung am geringsten ist. Diese Unterstützungspunkte bezeichnet man als Besselsche Punkte. Verlegt man dann die Striche in die Mittelschicht des Stabes — und so sind die Prototypmeter konstruiert —, dann ist die Verkürzung des Strichabstandes praktisch null und kann auch bei den allerfeinsten Messungen unberücksichtigt bleiben. Die Form des Prototypmeters ist also gewählt, um Fehler durch Krümmungen des Stabes zu vermeiden. Das alte französische Archivmeter hatte rechteckigen Querschnitt bei einer Höhe von 4 mm. Unterstützte man dieses an den beiden Enden, anstatt es flach aufzulegen, so änderte es damit seine Länge um rund 0,4 mm.

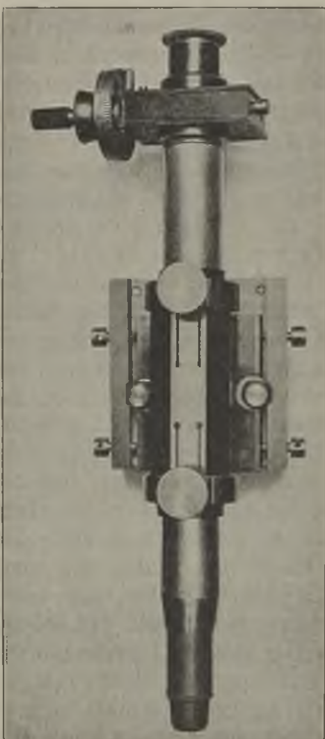

Abb. 6. Mikrometermikroskop.

Wie macht man es nun, wenn man bei feinsten Messungen feststellen will, wie lang ein Maßstab ist? Das dazu verwendete Instrument bezeichnet man als Komparator und eines seiner wichtigsten Bestandteile sind die Mikrometermikroskope. Zunächst sollen diese beschrieben werden. Die Abb. 6 gibt eine vollständige Ansicht eines solchen, und Abb. 7 die des eigentlichen Mikrometerwerks von der Objektivseite her gesehen. Es sind Mikroskope mit einer Feinmeßeinrichtung. Das Objektiv des Mikroskops entwirft ein Bild von einem Millimeterintervall,

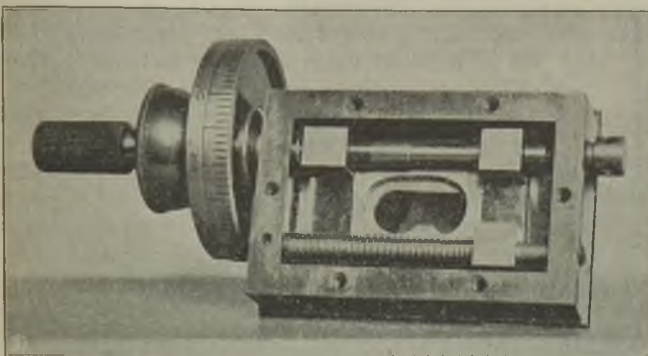

Abb. 7. Innere Einrichtung eines Mikrometers.

wollen wir annehmen. In der Ebene, in der dieses Bild liegt, befindet sich nun ein Rahmen, über den feine Fäden (Abb. 7) gespannt sind. Dieser Rahmen kann durch eine feingängige Schraube (unter dem linken Bohrloch des oberen Randes sichtbar) bewegt werden, deren Drehung an einem geteilten Schraubenkopf mit Ablesemarke gemessen werden kann. In dem Okular sieht man dann das Bild des Intervalls nochmals vergrößert und gleichzeitig die Fäden des Rahmens. Es dient dazu, um die Fäden scharf auf die Striche des Maßstabes, oder besser, auf die Bilder der Striche einzustellen, zu pointieren. Nehmen wir an, das Objektiv vergrößert das Intervall um das Fünffache, und die Mikrometerschraube hat eine Ganghöhe von 0,2 mm, d. h. auf ein Millimeter kommen fünf volle Gänge der Schraube, so muß man diese, um den Mikrometerfaden über das ganze vergrößerte Intervall zu bewegen, 25 mal herumdrehen. Sei nun die Trommel in 100 Intervalle geteilt, so daß man also $^1/_{1000}$ Trommelumdrehung noch ablesen kann, so entsprechen also dem anfänglichen Intervall von 1 mm jetzt 25000 Teile der Mikrometertrommel, oder eine Umdrehung der Mikrometerschraube entspricht $^1/_{25}$ mm oder 40 μ, und ein Teil der Trommel oder $^1/_{1000}$ Umdrehung 0,04 μ. So kleine Beträge kann man auf diese Weise also noch messen. Das Okular muß natürlich eine geeignete Vergrößerung haben, im vorliegenden Fall vielleicht 15—20fach, so daß die gesamte Vergrößerung des ganzen Mikroskops etwa 75 bis 100fach wäre, eine für metronomische Zwecke bereits sehr starke Vergrößerung.

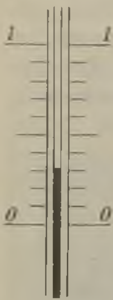

Abb. 8.

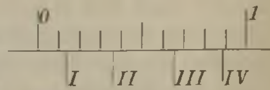

Abb. 9

Es sei hier eine Bemerkung eingeschaltet: Bei genauen Messungen wird man stets, wenn die Genauigkeit es erfordert und zuläßt, also z. B. bei der Thermometerablesung in Abb. 8 nicht ablesen, daß das Thermometer + 0,3° oder gar + 0,4° anzeigt, sondern man wird abschätzen, an welchem Bruchteil des Intervalls das Fadenende steht, und danach sagen, daß das Thermometer + 0,32° zeigt. Ebenso wird man bei Abb. 9 sagen,

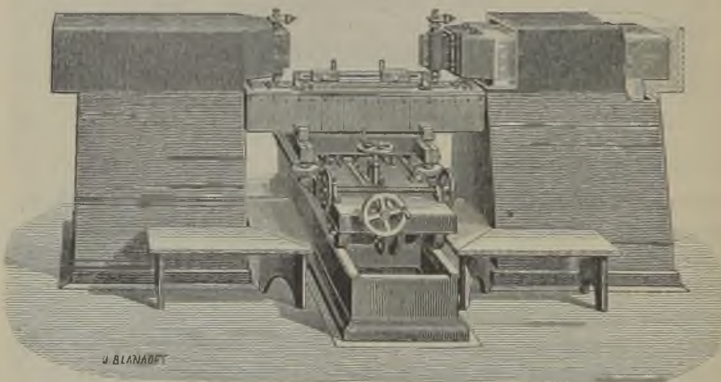

Abb. 10. 1 m-Komparator des Internationalen Bureaus.

daß der Strich I bei 0,14 liegt, II bei 0,36, III bei 0,65 und IV bei 0,89. So erklärt sich auch die obige Bemerkung, das man bei einer in 100 Teile geteilten Trommel $^1/_{1000}$ Trommelumdrehung erhält.

Ein Komparator für Längenmessungen besteht nun, wie man aus der Abb. 10, die den Komparator für Meterstäbe des Internationalen Bureaus darstellt, aus zwei solchen Mikrometermikroskopen, die an zwei schweren Pfeilern befestigt sind. Unter diesen Mikroskopen befinden sich die zu vergleichenden Maßstäbe in einem Troge, der mit Wasser gefüllt ist, das auf beliebige Temperatur gebracht werden kann. Man schiebt zuerst den Trog so unter die Mikroskope, daß diese auf den einen der Maßstäbe, z. B. das Normal gerichtet sind, und stellt die Mikrometer ein, dann bringt man den anderen herunter und stellt die Mikrometer wieder ein; aus diesen vier Ablesungen kann man dann berechnen, um wieviel sich beide Maßstäbe in der Länge unterscheiden. Voraussetzung für diese Berechnung ist, daß man weiß, welchem Betrage eine Trommelumdrehung im metrischem Maß entspricht. Zu diesem Zwecke trägt jeder feine Maßstab, auch die Prototypmeter, ein geeignetes kleines Intervall, dessen Länge, 0,5 oder 1 mm meistens, man von anderen Untersuchungen her kennt. Dieses bringt man unter das Mikroskop und wertet es in Schraubenumgängen der Mikrometerschrauben aus. Das ist auch der Zweck jener oben erwähnten Hilfsstriche an den Prototypmetern. Selbstverständlich ist wohl, daß bei den Messungen die Temperatur der Maßstäbe mittels geeigneter Thermometer abgelesen wird. Die Ableselupen sieht man ebenfalls auf der Abbildung.

Wie genau sind nun solche Maßstabvergleichungen? Dazu muß man bedenken, daß die Striche auf diesen, welche ihn begrenzen, immer nur, grob gesprochen, Verletzungen seiner Politur sind, d. h. die Striche sind niemals ideale Linien, sondern haben eine gewisse Breite, 2 bis 10 Tausendstel eines Millimeters bei feinsten Maßen, und sind niemals ganz geradlinig und scharf begrenzt; die ideale Mittellinie eines solchen Striches bildet nun die Begrenzung des Maßstabes, und wenn der Strich nicht ganz scharf und gerade ist, wird man über die Lage dieser Mittellinie nicht ganz sicher sein, der eine Beobachter wird sie hierhin, der andere vielleicht einige Zehntausendstel Millimeter weiter verlegen. Außerdem ist die Temperaturmessung der Stäbe mit Unsicherheiten behaftet, kurz, man kann sagen, die Prototypmeter sind auf etwa 0,1 μ ($1\ \mu = 0{,}001$ mm) zuverlässig, und das ist auch etwa die Grenze, bis zu der man heute gelangt, d. h. hierdurch ist die Meterlänge auf $^1/_{10\,000\,000}$ ihres Wertes bestimmt. Das ist das äußerste; im allgemeinen werden andere Maßstäbe, die mit den Prototypmetern verglichen sind, sie nicht so genau angeben. Und damit ist auch weiter bestimmt, daß alle Längenangaben, wo sie auch gemacht sind, niemals genauer als auf $^1/_{10\,000\,000}$ sein können, es ist das äußerste, was wir leisten können, die Angaben von Maßzahlen von Längen auf 6—7 Stellen, jede weitere Stelle — Verf. hat solche in weitverbreiteten Büchern auf 15 Stellen gefunden — ist überflüssig und unsinnig. Kleinere Strecken als Meterlänge, die durch Striche begrenzt sind, kann man der Striche wegen nur mit geringerer Genauigkeit bestimmen; eine Millimeterstrecke wird man kaum genauer als auf etwa $\frac{1}{10000}$ erhalten. Größere Längen als 1 m — es sei besonders an den Durchmesser und den Umfang der Erde erinnert — können aus obigen Gründen auch niemals genauer als auf 6 bis 7 Stellen angegeben werden.

So bestimmt man Meterlängen; andere Längen mit geeigneten Komparatoren ähnlich, es soll hierauf nicht weiter eingegangen werden.

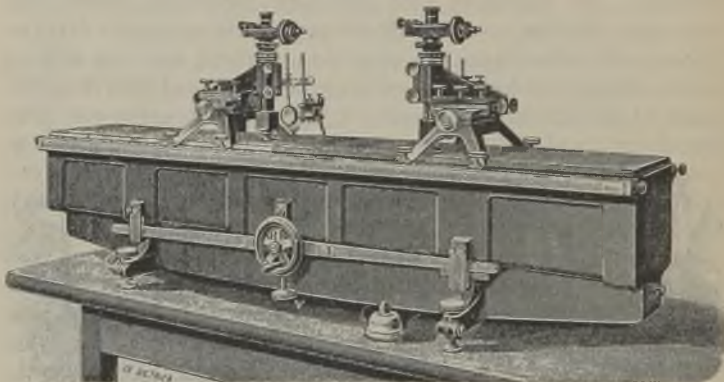

Abb. 11. Skalenkomparator des Internationalen Bureaus.

Ein Maßstab bietet doch aber noch andere Längen, er hat doch vielfach noch Zentimeter- und Millimeterteilungen, wie bestimmt man nun diese? In der Meterlänge ist jedes physikalische Laboratorium auf fremde Hilfe angewiesen, auf das Internationale Bureau oder ein Institut, das ein Prototypmeter besitzt, hat es aber einen geprüften Maßstab, mag er auch nur eine Meterstrecke enthalten, so kann es, geeignete Instrumente vorausgesetzt, das weitere selbst machen. Man nennt das dann die Bestimmung der Einteilungsfehler. Wie man diese bestimmt, soll an einem Beispiel gezeigt werden: Ein Meterstab sei in Dezimeter geteilt, dann vergleicht man jedes dieser 10 Dezimeterintervalle mit einem anderen, das auf einem andern Maßstabe sich befindet, dessen wahre Länge man aber nicht kennen braucht. So erhält man die Unterschiede aller 10 Dezimeterintervalle gegen dieses Hilfsintervall. Die Gesamtlänge aller dieser kennt man, und so kann man dann berechnen, um wieviel jedes von seinem Sollwert abweicht. Einen Komparator aus dem Besitze des Internationalen Bureaus zu solchen Teilfehlerbestimmungen und Skalenprüfungen zeigt Abb. 11.

Soviel über die grundlegenden Längenmessungen. Die vom Meter abgeleiteten Maße sind oben kurz erwähnt. Weiter leitet man vom Meter die Flächenmaße ab, das Quadratmeter, und von diesem die übrigen Flächenmaße[1]).

Weiter leitet man von den Längenmaßen die Raummaße ab, das Kubikmeter als Würfel, dessen Seiten alle 1 m lang sind, des praktischen Gebrauches wegen nimmt man indessen hier nicht dieses als Einheit, sondern das Kubikdezimeter, das Liter[2]).

Flächen mißt man fast stets nur, indem man ihre linearen Dimensionen auf geeignete Weise bestimmt und dann mathematisch den Flächeninhalt berechnet. Bei der Vermessung von Flächen auf Karten verwendet man häufig geeignete Instrumente, Planimeter, die durch Umfahren der zu messenden Fläche mittels eines Stiftes an einem dabei sich drehenden Meßrad direkt den Flächeninhalt der umschriebenen Fläche abzulesen gestattet. Die Messung von Räumen soll im Kapitel über Wägungen besprochen werden.

Für das absolute Maßsystem nimmt man als Längeneinheit gewöhnlich das Zentimeter, das als Länge 1 bezeichnet wird. Von der Längeneinheit wird unter Zuhilfenahme der Zeiteinheit, der Sekunde, die Geschwindigkeitseinheit abgeleitet, als die Geschwindigkeit, mit der ein Körper in einer Sekunde einen Zentimeter zurücklegt. Eine 400 m in einer Sekunde zurücklegende Gewehrkugel hat also eine Geschwindigkeit im absoluten Maßsystem gerechnet von 40 000 $\frac{\text{cm}}{\text{sec}}$. Die Bezeichnung $\frac{\text{cm}}{\text{sec}}$ als Geschwindigkeitsbezeichnung ist wohl selbstverständlich. Ein Körper, dessen Geschwindigkeit sich in jeder Sekunde um die Geschwindig-

---

1) 1 Quadratmeter (qm oder m^2) = 100 Quadratdezimeter (qdm oder dm^2) = 10 000 Quadratzentimeter (qcm oder cm^2) = 1 000 000 Quadratmillimeter (qmm oder mm^2)
1 qdm = 100 qcm = 10 000 qmm
1 qcm = 100 qmm
1 Ar (a) = 100 qm
1 Hektar (ha) = 100 a = 10 000 qm.

2) 1 Kubikmeter (cbm oder m^3) = 1000 Kubikdezimeter oder Liter (cdm, dm^3 oder l) = 1 000 000 Kubikzentimeter oder Milliliter (ccm oder cm^3 oder ml) = 1 000 000 000 Kubikmillimeter (cmm oder mm^3)
1 cdm = 1000 ccm = 1 000 000 cmm
1 ccm = 1000 cmm
1 Hektoliter (hl) = 100 l.

keit 1 ändert, hat die Beschleunigung 1, die also als $1 \frac{\text{cm/sec}}{\text{sec}}$ oder $1 \frac{\text{cm}}{\text{sec}^2}$ bezeichnet werden muß. Ein frei fallender Körper hat am Ende der ersten Sekunde Fallzeit die Geschwindigkeit von 9,81 m in der Sekunde oder $981 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$, am Ende der zweiten Sekunde $2 \cdot 981 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$ usw., er fällt also mit einer Beschleunigung von $981 \frac{\text{cm}}{\text{sec}^2}$, eine sehr wichtige Zahl, die eine große Bedeutung hat.

Es seien hier kurz einige einfache Sätze der Mathematik angeführt, die später häufig Anwendung finden: a^3 bedeutet $a \cdot a \cdot a$, a^5 $a \cdot a \cdot a \cdot a \cdot a$ usw. a^{-3} bedeutet $\frac{1}{a^3} = \frac{1}{a \cdot a \cdot a}$, a^{-5} bedeutet $\frac{1}{a^5}$. $a^{\frac{1}{2}}$ bedeutet $\sqrt[2]{a^1}$ also die Quadratwurzel aus a $a^{\frac{4}{5}} = \sqrt[5]{a^4}$, $a^{-\frac{4}{5}} = \frac{1}{\sqrt[5]{a^4}}$. Für die Rechnung mit Potenzen gelten die ganz allgemeinen Regeln, die durch nachstehende Beispiele erläutert sind: $a^5 \cdot a^7 = a^{5+7} = a^{12}$, $a^5 \cdot a^{-7} = a^{5-7} = a^{-2} = \frac{1}{a^2}$, $(a^3)^2 = a^3 \cdot a^3 = a^{3 \cdot 2} = a^6$, $\sqrt[3]{a^3} = a^{\frac{3}{3}} = a^1 = a$, $\sqrt{a^{-3}} = a^{-\frac{3}{2}} = \frac{1}{a^{\frac{3}{2}}} = \frac{1}{\sqrt{a^3}}$ usw.

Weiter ist die Schreibweise sehr gebräuchlich $1000 = 10^3$, $1000\,000 = 10^6$ usw., entsprechend $\frac{1}{10} = 10^{-1}$, $\frac{1}{10\,000} = 10^{-4}$, wobei dann wieder die einfachen Regeln gelten: $1000 \cdot 100 = 100\,000 = 10^3 \cdot 10^2 = 10^5$, $10^7 \cdot 10^{-4} = 10^{7-4} = 10^3$ und $\frac{1}{10^3} = 10^{-3} = \frac{1}{1000}$.

Als **Masse eines Körpers** bezeichnet man die **Menge seiner Materie**, oder das Produkt aus seinem Raumgehalt und seiner Dichte; wobei man als Dichte, unabhängig von jeder Erläuterung des Wortes Masse, die Zahl bezeichnet, die angibt, um wieviel schwerer ein Körper ist als das gleiche Volumen Wasser. Das Wasser bildet die Einheit für die Dichte als derjenige Stoff, der in der Natur überall vorhanden, wohl definiert, leicht in genügender Reinheit zu erhalten und in seinen Eigenschaften gut bekannt ist. Wasser bildet die Dichteeinheit, in dem Zustand, in welchem ein Quantum Wasser den geringsten Raumgehalt hat, d. h. bei + 4° C. Die Dichte und das Volumen von Wasser sind in folgender Tabelle zusammengestellt:

Temperatur	Dichte	Volumen eines Liters
0°	0,999868	1,000132
1	927	073
2	968	032
3	992	008
4	1,000000	1,000000
5	0,999992	008
6	968	032
7	929	071
8	876	124
9	808	192
10	0,999727	273
20	0,998230	1,001770
30	0,995673	4327

Die **Dichte** einer Reihe von häufig angewendeten Substanzen gibt nachstehende Tabelle:

Platin	21,4	Messing	8,3
Platin mit 10% Iridium	21,5	Eisen	7,8
Gold	19,2	Zinn	7,3
Blei	11,3	Zink	7,1
Silber	10,5	Aluminium	2,7
Kupfer	8,7		

Glas	2,5
Kork	0,2
Quecksilber bei 20°	13,54622
" " 0°	13,59545
Luft bei 0° und 760 mm Druck	0,001293
" " 20° " 760 " "	0,001205

Weswegen man das Kilogramm[1]) als Masseneinheit und nicht als Gewichtseinheit ansetzt, ist bereits auf S. 13 auseinandergesetzt. Wir können also an dieser Stelle darüber hinweggehen und uns sofort den Instrumenten zu Massenvergleichungen zuwenden. Diese Instrumente sind die Wagen, und zwar sind feinste Wagen ausnahmslos gleicharmige Wagen. Die Abbildung 12 zeigt eine solche Wage für 100 g Tragkraft. Man sieht in der Abbildung den Balken bei B, bei W die Welle zum Arretieren, Entarretieren der Wage, und zur Vertauschung der Gewichte und oberhalb des Wagekastens die Einrichtungen zum Auflegen kleiner Zusatzgewichte. Jede Wage ist für eine bestimmte Tragkraft gebaut, bei dieser Belastung ist sie voll ausgenutzt, eine größere

[1]) Von dem Kilogramm sind abgeleitet:

1 Kilogramm (kg)	=	1000 Gramm (g) = 1000000 Milligramm (mg)
1 g	=	1000 mg
100 kg	=	1 Doppelzentner (dz)
1000 kg	=	1 Tonne (t).

Belastung kann sie beschädigen, eine kleinere nutzt ihre Empfindlichkeit nicht voll aus. Als Empfindlichkeit einer Wage bezeichnet man die Massenzulage, die an der Wage noch einen sichtbaren Ausschlag hervorruft. Bei feinsten Wagen wird dieser Ausschlag nicht an einer Zunge abgelesen, sondern an dem Wagebalken befindet sich ein Spiegel, und man beobachtet mittels eines Fernrohrs in dem Spiegel das Bild einer Skala, man ersetzt also den mechanischen Zeiger gewissermaßen durch einen Lichtzeiger, den man beliebig lang wählen kann, wobei man infolge der Spiegelgesetze noch den Vorzug hat, daß jede Bewegung verdoppelt wird, und den wichtigen Vorteil, daß der Beobachter nicht in der Nähe der Wage sich befindet, sondern aus mehreren Metern Entfernung beobachtet und also durch seine Körperwärme die Messungen nicht ungünstig beeinflußt. Diese als Gauß-Poggendorffsche Spiegelablesung bezeichnete Methode, die schematisch in Abb. 13 dargestellt ist, wobei der Spiegel, dessen Drehung man beobachtet, in zwei verschiedenen Lagen dargestellt ist, findet in allen Teilen der Physik ausgedehnte Anwendung, besonders in den Fällen, in welchen nur kleine Drehungen beobachtet werden sollen.

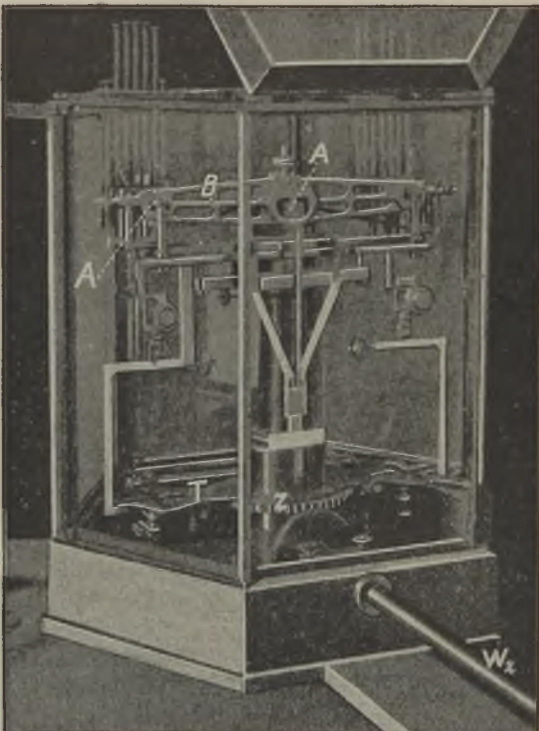

Abb. 12. Wage für 100 g Belastung von Stückrath.

Welche Bedingungen sind nun für eine genaue Wägung erforderlich? Zunächst muß die Wage einwandfrei sein, d. h. als wichtigstes die beiden Hebelarme müssen gleich lang sein. Diese Bedingung läßt sich absolut genau nie erfüllen. Alle Wägungen werden deswegen stets so ausgeführt, daß einmal das Normal auf der linken Wagschale, das zu untersuchende Gewicht rechts steht, und dann beide vertauscht werden, das Mittel beider Wägungen ist dann von dem Fehler durch Ungleicharmigkeit befreit, da, wie man auch ohne Rechnung einsieht, das Gewicht in dem einen Falle zu schwer erhalten wird, im andern um den gleichen Betrag zu leicht. Nehmen wir ein anderes Beispiel Der Wagebalken sei aus Messing, jeder Arm 20 cm lang, beide genau gleich lang, aber der eine sei durch irgend einen Umstand um $0{,}1^0$ wärmer als der andere; er wird dann um den Betrag von $18\,\mu \cdot 0{,}2 \cdot 0{,}1$ länger sein als jener, worin 18 die früher angegebene Temperaturausdehnung des Messings ist, also um $0{,}36\,\mu$. Dieser Arm wird also $\frac{20{,}000036}{20}$, oder 1,0000018 des anderen. Vergleicht man also zwei Kilogrammstücke miteinander, so wird das eine um 1,8 mg scheinbar zu schwer erscheinen, während man auf der feinsten Wage 0,01 mg nachweisen kann. Man sieht aus diesem Beispiel, von wie ungeheurer Wichtigkeit eine genaue Kenntnis der Temperaturverteilung ist. Dieses ist auch ein wichtiger Grund, weswegen Wagen für die feinsten Wägungen so konstruiert sind, daß sie der Beobachter aus größerer Entfernung bedient, ohne durch seine Körperwärme die Messung schädlich zu beeinflussen.

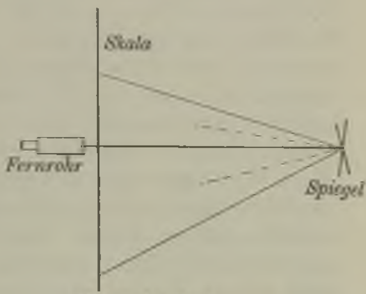

Abb. 13 Schema der Gauß-Poggendorffschen Spiegelablesung

Hat man nun zwei Gewichtsstücke auf die Wage gesetzt und konstatiert, daß sie genau gleich sind, also die gleiche scheinbare Masse haben, sind sie dann auch wirklich gleich? Da ist zunächst zu berücksichtigen, daß auf der Wage die Massen durch die Anziehungskraft, die die Erde auf sie ausübt, miteinander verglichen werden; da diese auf Körper, die weiter von ihrem Mittelpunkte entfernt sind, geringer ist, so erscheint von zwei wirklich gleichen Gewichten das höher stehende leichter. Diese Änderung des Gewichtes mit der Höhe muß für jeden Ort bestimmt werden, indem man eine Wage verwendet, die auf der einen

Seite zwei in größerer Entfernung übereinander befindliche Schalen hat, und das gleiche Gewicht einmal oben, dann unten wägt. Ein Meter in der Änderung der Höhe macht, wie schon früher erwähnt, im Mittel 0,300 mg scheinbare Gewichtsänderung bei einem Kilogramm aus, eine in sehr vielen Fällen, besonders bei Wägungen, wo der zu wägende Körper im Wasser und damit im allgemeinen in merklich anderer Höhe als die Normalgewichte sich befindet, nicht unbedeutende Korrektion.

Weiter ist auch schon früher auseinandergesetzt, daß bei der Wägung beide Gewichte sich in Luft befinden, wodurch sie leichter erscheinen als im luftleeren Raum. Diese *Gewichtsänderung* hängt, ebenso wie die Wasserwägungen, davon ab, *welchen Raum die Gewichte einnehmen*, und welche Dichte die Luft besitzt. Nehmen die Gewichte gleichen Raum ein, so fällt dieser Fehler heraus, da beide um den gleichen Betrag leichter werden. Anderenfalls muß man ihren Raumgehalt bestimmen. Wie dieses geschieht, soll unten besprochen werden. Kennt man dann ihren Unterschied im Raumgehalt, so muß dann das Gewicht dieses Volumens Luft, in dem Zustande, in dem sie sich gerade befindet, gemessen werden. Das *Gewicht der Luft* kennt man, wenn man den *Druck* kennt, unter dem sie steht, also den *Luftdruck*, den man mittels *Barometers* mißt, ihre *Temperatur*, die mittels *Thermometers* gemessen wird, ihren *Feuchtigkeitsgehalt*, und eventuell ihre *Abweichung von der normalen Zusammensetzung*, insbesondere einen vergrößerten *Kohlensäuregehalt*. Um das letzte vorwegzunehmen, kann man dieses vermeiden, indem man die Luft der Beobachtungsräume häufig durch frische Luft aus dem Freien erneuert; diese hat im allgemeinen eine hinreichend konstante Zusammensetzung.

Zu den Messungen des Luftdruckes benutzt man das Barometer, und zwar für die feinsten Messungen ausschließlich das *Quecksilberbarometer*. Das *Aneroidbarometer*, das dadurch allgemein bekannt ist, daß es als Zimmerbarometer Verwendung findet, beruht darauf, daß eine geeignet evakuierte Metallkapsel durch die Änderungen des Luftdruckes ihre Form ändert; diese Änderung wird durch einen Mechanismus auf einen Zeiger übertragen und zeigt damit den Luftdruck an. Selbstverständlich muß ein Aneroidbarometer mittels eines Quecksilberbarometers geeicht werden. Es hat die Nachteile, daß seine Angaben von seiner Temperatur stark abhängig sind, was dann durch eine spezielle Vorrichtung kompensiert werden muß. Auch ändert sich im Laufe der Zeit das Vakuum der Metallkapsel, und damit seine Angaben. Es muß also häufiger mit einem Quecksilberbarometer verglichen werden. Für Messungen geringerer Genauigkeit wird ein solches indessen sehr häufig angewendet, besonders auch in den Fällen, in denen ein Quecksilberinstrument nicht anwendbar ist. Die Konstruktion dieses Instrumentes ist wohl hinlänglich bekannt. Es besteht aus einem langen, oben geschlossenen Schenkel, und einem kurzen offenen, die mit Quecksilber gefüllt sind. Der Abstand beider Quecksilberkuppen gibt den Luftdruck. Der Raum zwischen der oberen Kuppe und dem Glase muß vollständig luftleer sein. Von störendem Einflusse sind die sog. Kapillaritätserscheinungen, die darin bestehen, daß die Quecksilbersäule oben und unten runde Kuppen bildet, wobei die entstehenden Kapillarkräfte es verhindern, daß es die Einstellung annimmt, die es bei ebener Oberfläche einnehmen würde; ebenso wie Wasser in dünnen Glasröhren nach oben steigt und in diesen höher steht als außerhalb der Röhren, bleibt Quecksilber unter diesem Stande stehen. Um diesen Fehler zu beseitigen, müssen die Glasröhren genügend weit sein, etwa 25 mm. Selbstverständlich muß auch die Temperatur des Quecksilbers und des Maßstabes, mit dem man den Höhenunterschied der Kuppen mißt, festgestellt sein, um die Angaben auf die Normaltemperatur 0^0 zu reduzieren. Endlich müssen Barometerablesungen noch wegen der Schwerkraft korrigiert werden. Eine Erhebung des Barometers von 1 m über die Höhe, in der die Gewichte sich befinden, bringt eine Erniedrigung des Barometerstandes von etwa 0,1 mm hervor. Will man wirkliche „Gewichte" berechnen, also Massen, unter den auf S. 14 angegebenen Normalbedingungen, so muß man noch die Höhe des Beobachtungsortes über dem Meeresspiegel kennen und dann nach anderweitig bekannten Zahlen aus der abgelesenen Höhe die Angabe des Barometers berechnen, die es in Meereshöhe machen würde. Da weiter noch die Schwerkraft in verschiedenen geographischen Breiten verschieden ist, muß diese Angabe noch auf die mittlere geographische Breite von 45^0 umgerechnet werden. Man findet hier alle Daten wieder, die bereits auf S. 13 u. 14 bei Besprechung des alten Kilogramms erwähnt sind.

Die Bestimmung der Luftfeuchtigkeit[1]) wird mit dem Aßmannschen Hygrometer vorgenommen, das aus zwei gleichen Thermometern besteht, die in Metallhülsen eingeschlossen sind. Die Quecksilberkugel des einen ist mit Leinwand umhüllt, die dauernd mit Wasser feucht gehalten wird. Dann wird an beiden ein gleichmäßiger Luftstrom vorbeigeführt, wobei das Wasser verdampft und infolge der bei der Verdunstung ent-

1) Vgl. z. B. ANuG. Nr. 172. A. Boernstein, Die Lehre von der Wärme, S. 77 ff.

stehenden Abkühlung das Thermometer fällt, aus den Angaben beider wird dann der Feuchtigkeitsgehalt der Luft berechnet.

Die Temperatur der Luft wird mittels geeignet angebrachter Thermometer gemessen. Wie schwierig das ist, kann jeder selbst an einem einfachen Versuche nachprüfen. Man nehme zwei Thermometer, schwärze die Kugel des einen durch Lampenruß und hänge beide in die Sonne. Man wird über den Unterschied der Angaben beider erstaunt sein.

Aus diesen Daten kann man dann das Gewicht der Luft mittels Tabellen berechnen und die Wägungen entsprechend korrigieren.

So vergleicht man erst Kilogrammstücke miteinander. Hat man einen vollständigen Gewichtssatz, so stellt man sich aus den kleinen Gewichten, also z. B. 500 g + 200 g + 200 g + 100 g, eine Kombination her, die zusammen 1 kg ergibt, und vergleicht diese mit dem Kilogrammstück, dann 500 g mit den drei anderen usf. Wenn man mit allen Wägungen fertig ist, kann man die Fehler der einzelnen Stücke ausrechnen.

Die gesamten Beobachtungen für Wägungen ersten Ranges sind also recht umfangreich, besonders die Messung der meteorologischen Daten. Man hat deswegen, um den Einfluß der Luft zu beseitigen, die Wägungen im Vakuum, oder besser in einem Raume so niedrigen Luftdruckes ausgeführt, daß die Beobachtungsfehler bei Messung des Druckes in ihm ohne Bedeutung sind. Dazu mußte die ganze Wage luftdicht eingeschlossen werden, und Bewegungsreinrichtungen vorgesehen werden, die sie von außen zu betätigen gestatten. Das sind die sog. Vakuumwagen. Man hat dieses aber aufgegeben, da man dabei die Erfahrung machte, daß die Gewichte dabei nicht unverändert blieben. Auf den Gewichten sind stets kleine Mengen Feuchtigkeit kondensiert, ihre Oberfläche hat offenbar auch Gase „adsorbiert", beides wird im Vakuum abgegeben, und die Masse des Stückes hat sich verändert, während sie sonst unter normalem Luftdruck unverändert bleibt, und es dauert dann eine gewisse Zeit, bis die Oberfläche der Gewichte wieder ihren Normalzustand erreicht hat.

Wir haben nun noch die Frage nachzuholen, wie man den Raumgehalt der Gewichte bestimmt. Einmal natürlich so, indem man die Gewichte mittels geeigneter Komparatoren ausmißt, da es sich bei Gewichten ersten Ranges nur um ganz regelmäßig gestaltete Körper handelt, im allgemeinen Cylinder, deren Höhe und Durchmesser gleich sind, eine ganz bequeme Methode. Oder man macht es so, daß man das Gewicht einmal in Luft wägt, also auf die gewöhnliche Methode, dann eine sog. hydrostatische Wägung macht, indem man es an einem feinen Faden in Wasser hängt und sein Gewicht in dieser Lage bestimmt. Der Gewichtsunterschied liefert nach dem Archimedischen Prinzip direkt das Gewicht des verdrängten Wassers, und nach den bekannten Tafeln über Raumgehalt und Dichte (vgl. S. 39) von Wasser, den Raumgehalt des verdrängten Wassers und damit den des Gewichtsstückes. Die Methode hat aber den Fehler, daß genau wie bei der Vakuumwägung die Oberfläche des Stückes sich ändert und es für lange Zeit als Normal ersten Ranges unbrauchbar ist. Es sei gleichzeitig bemerkt, daß dieses die Methode zur Dichtebestimmung fester Körper ist, indem man das Gewicht und den Raumgehalt bestimmt. Die Division beider gibt sofort die Dichte. Dieses ist wiederum eines von den Fällen, bei denen es auf absolute Gewichte gar nicht ankommt, wo es gleichgültig ist, ob man mit Gewichten des metrischen Systems oder mit anderen arbeitet. Die Dichte ist von den Maßeinheiten unabhängig.

Die Messung des Raumgehaltes von Gefäßen wird so ausgeführt, daß diese leer und mit Wasser gefüllt gewogen werden. Aus dem Gewichte der Wasserfüllung kann dann unter Berücksichtigung der meteorologischen Daten der Raumgehalt berechnet werden. Der Raumgehalt von Gefäßen ist naturgemäß von der Temperatur abhängig. Man vergleiche darüber das auf S. 25 Gesagte.

Nach diesen mehr speziellen Erörterungen wollen wir nun zu mehr allgemeinen Betrachtungen übergehen. Wir haben hier dauernd, dem Sprachgebrauche folgend, von Gewichten gesprochen, während früher auseinandergesetzt ist, daß sie tatsächlich Masseneinheiten darstellen. Die Gründe dafür sind ebenfalls dort beigebracht. Was vergleichen wir denn auf der Wage miteinander? Wir setzen auf jede Wagschale ein Gewicht, und, wenn die Wage dann einspielt — von allen Komplikationen durch Unrichtigkeit der Wage und Einfluß des Luftauftriebs abgesehen —, wissen wir, daß die Anziehungskraft der Erde auf beide Gewichtsstücke die gleiche ist. Wir vergleichen auf der Wage also Kräfte miteinander, nichts anderes. Aus der Gleichheit der Kräfte schließen wir, daß die Druckkräfte, die die Gewichte auf die Wagschalen ausüben, gleich sind, und diese Druckkräfte bezeichnen wir als das „Gewicht" jener Stücke und sagen, ihre Gewichte sind gleich. Setzen wir ein „Gewichtsstück" auf eine Federwage und lesen diese ab, und denken wir uns diese Federwage mit dem „Gewichtsstück" auf den Mond versetzt, so werden wir ganz etwas anderes ablesen, weil eben die Anziehungskräfte auf dem Mond ganz andere sind als auf der Erde. Das „Gewichtsstück" als solches ist unverändert geblieben, oder genauer ausgedrückt, seine Masse ist unverändert. So auch in jenem Fall. Aus der Gleichheit der Gewichte schließen wir auf die Gleichheit der Massen. Und die Masse ist auch tatsächlich das, worauf es uns ankommt. Im bürgerlichen Leben, bei den Wägungen, die da gemacht werden, kommt es auf die großte Genauigkeit nicht an. Man sieht dabei einmal von den Fehlern durch Luftauftrieb usw. ab, und setzt die Größe der Schwerkraft überall gleich an, und so identifiziert man Masse und Gewicht. Es kommt dabei dem Käufer und Verkäufer nicht darauf an, wie stark die Anziehungskraft der Erde auf die betreffenden Materialien ist, sondern auf das Quantum, um das es sich handelt, auf die Menge der betreffenden Materie, ihre Masse. Die sog. Gewichtssätze sind tatsächlich Massensätze, in bestimmter Weise abgestufte Massenstücke.

Nachdem nun im vorhergehenden in hoffentlich ausreichender Weise der Massenbegriff erläutert ist, wollen wir jetzt weitergehen. Wir gelangen dann zu dem oben erwähnten Begriff der Kraft. Die Kraft als solche können wir nicht erfassen, wir merken sie nur in ihren Wirkungen. Eine Kraft, die auf einen Körper wirkt, setzt diesen in Bewegung und zwar in eine beschleunigte Bewegung, indem sie ihn aus dem Ruhezustand in einen Zustand der Bewegung versetzt, die er natürlich nur erlangen kann, wenn er von der Geschwindigkeit Null zu der betreffenden anderen Geschwindigkeit gelangt, also eine Geschwindigkeitsänderung durchmacht. Als Maß für die Kraft können wir also die Beschleunigung ansehen, die sie einem Körper erteilt. Einem Körper von der Masse m kann selbstverständlich nur eine m mal größere Kraft die gleiche Beschleunigung erteilen als einem Körper der Masse 1. Wir können also im absoluten Maßsystem die Kraft ansetzen als das Produkt aus Masse und Beschleunigung, also als $\left[g \cdot \frac{cm}{sec^2}\right]$[1] $= [cm\,g\,sec^{-2}]$. Die Krafteinheit ist also die Kraft, die einem Körper der Masse 1 die Beschleunigung 1 erteilt. Man nennt diese Einheit das Dyn. Die Masseneinheit im absoluten Maßsystem ist das Gramm, wie früher gesagt, die Schwerebeschleunigung auf der Erde ist $981\ \frac{cm}{sec^2}$. Eine Grammasse hat also „absolut" gerechnet ein Gewicht von 981 „Grammgewicht". Die „Gewichtseinheit" — mit Rücksicht darauf, daß das Gewicht tatsächlich eine Kraft ist, — ist also $\frac{1}{981}$ Dyn, also 0,00102 „Grammgewicht". Die Einheit des Dyns wird also auf der Erde durch den 0,00102. Teil der Anziehungskraft dargestellt, die ein Grammstück erfährt, oder durch wenig mehr wie die Anziehungskraft auf ein Milli-

1) Man pflegt im absoluten Maßsystem die reinen Maßbezeichnungen, in cm, g, sec ausgedrückt, in eckige Klammern einzuschließen.

grammstück. Es sei noch ausdrücklich betont, daß diese Erläuterung nur für die Erde gilt, das Dyn ist eine ganz bestimmte Kraft, die für alle Himmelskörper gleich ist. Diese Erläuterung für die Erdoberfläche ist nur eine Erläuterung zur Veranschaulichung ihrer Größe, und nicht streng, wenn man daran denkt, daß die Anziehungskraft der Erde an verschiedenen Stellen ihrer Erdoberfläche verschieden ist. Wollte man sie genau darstellen, so müßte man sagen, daß sie z. B. am Äquator durch das 1,0224625 fache, unter 45° durch das 1,0197661 fache und am Pol durch das 1,0170695 fache der Anziehungskraft auf ein Milligrammstück in Meereshöhe im luftleeren Raume dargestellt wird.[1]) Aus dem Vorstehenden folgt auch, daß man, um die üblichen „Gewichte" in „absolute" umzurechnen, sie, wenn sie in Gramm ausgedrückt sind, mit 981, oder mit dem für jede Stelle der Erde genaueren Wert der Schwerkraft multiplizieren muß. Man rechnet also im bürgerlichen Leben tatsächlich mit dem 981. Teil der „Gewichte", eine Tatsache, die praktisch natürlich belanglos ist.

Als Druckeinheit bezeichnet man den Druck eines Dyns auf die Flächeneinheit. Der Druck wird also dargestellt durch $\left[\frac{\text{g cm}}{\text{sec}^2}\Big/\text{cm}^2\right] = \left[\frac{\text{g}}{\text{cm sec}^2}\right] = [\text{cm}^{-1}\,\text{g sec}^{-2}]$.

Der technische Atmosphärendruck ist der Druck einer Quecksilbersäule von 760 mm = 76 cm Höhe und 1 qcm Querschnitt. Da die Dichte von Quecksilber 13,595 bei 0° ist (vgl. S. 39), so ist die Masse einer solchen Säule $76 \cdot 13{,}595$ g = 1033,22 g und der Druck also $1033{,}22 \cdot 981\,[\text{cm}^{-1}\,\text{g sec}^{-2}]$ oder 1014000 Dyn. Der technische Atmosphärendruck ist natürlich auch für die verschiedenen Stellen der Erde verschieden, wird indessen mit einer für die Praxis ausreichenden Genauigkeit als gleich angenommen.

Verschiebt eine Kraft einen Körper über eine bestimmte Wegstrecke, hebt sie ihn z. B. in die Höhe, oder zieht sie ihn nach der Erde zu, so hat sie damit eine gewisse „Arbeit" geleistet.[2]) Die Arbeit ist unabhängig von der Zeit, in der sie ausgeführt ist. Es ist gleichgültig, ob ein Kubikmeter Wasser in einer Minute um ein Meter gehoben ist,

---

1) Die Schwerkraft ist am Äquator 978,031, am Pol 983,217 und unter 45° Breite 980617 cm g sec^{-2}. 1 dividiert durch diese Zahlen gibt dann die obigen Werte.

2) Über Kraft, Arbeit und Energie vgl. man: ANuG. Nr. 257; A. Stein, Die Lehre von der Energie, S. 7; u. Nr. 40, A. Auerbach, Grundbegriffe der modernen Naturlehre, S. 120.

oder in einer Stunde, die Arbeit, die dabei geleistet ist, ist die gleiche. Sie wird allgemein dargestellt durch das Produkt aus Kraft und Weg, also durch $[\mathrm{cm\,g\,sec^{-2}\cdot cm}] = [\mathrm{cm^2\,g\,sec^{-2}}]$. Die Arbeitseinheit ist das Erg, also die Arbeit die 1 Dyn verrichtet, wenn sie die Masse 1 g um 1 cm in der horizontalen Richtung fortbewegt. Die in der Praxis übliche Arbeitseinheit ist das Kilogrammmeter (Kilogramm als Gewicht), die Arbeit, die man braucht, um ein Kilogramm ein Meter gegen die Erdschwere zu heben. Sein Zusammenhang mit dem Erg ist also so: Um ein Gramm einen Zentimeter hoch zu heben, braucht man $981 \cdot 1 \cdot 1$ Erg, um also 1 kg auf 1 m Höhe zu heben, braucht man $981 \cdot 1000 \cdot 100$ Erg, also 98100000 Erg, oder ein Erg ist $^{1}/_{98100000}$ Kilogrammetergewicht, d. h. 0,00000001020, Kilogrammetergewicht.

Mit dem Ausdruck Energie bezeichnet man die Arbeitsfähigkeit eines Systems, oder seinen Arbeitsvorrat. Sie unterscheidet sich also so von der Arbeit, daß sie die Arbeit angibt, die ein System von Körpern leisten kann, während die Anzahl der Erg die tatsächlich geleistete Arbeit angibt. Ein mit Dampf von bestimmter Temperatur und bestimmtem Druck gefüllter Kessel besitzt einen gewissen Energieinhalt, kann eine bestimmte Arbeit leisten. Leiten wir indessen den Dampf in eine Dampfmaschine, so ist die Arbeit, die diese nutzbar leistet, kleiner als der Energieinhalt des Kessels, denn ein Teil dieses geht als Reibung, Wärme usw. verloren. Die Energie ist im Kessel als Druck (mechanische) und als Wärmeenergie vorhanden, treiben wir mittels der Dampfmaschine eine Dynamomaschine an, so erscheint sie wieder als elektrische Energie. Die Verluste sind teils mechanischer Art, Reibung usw., teils thermischer Art, Erwärmung der Maschinen, teils elektrischer Art, Induktion in Maschinenteilen, Magnetisierung von Eisen usw. Die Messung der Energie erfolgt in Erg, in Arbeitseinheiten, $[\mathrm{cm^2\,g\,sec^{-2}}]$.

Wie oben gesagt ist, ist die Arbeitsleistung unabhängig von der Zeit, in der sie ausgeführt wird, die Arbeit bleibt die gleiche. Mit Leistung bezeichnet man die Arbeit, die in einer bestimmten Zeit ausgeführt wird, als Leistungseinheit ist also das Erg/Sekunde, für das kein besonderer Name eingeführt ist, anzusehen, dargestellt durch $[\mathrm{cm^2\,g\,sec^{-3}}]$. $10^7\,[\mathrm{cm^2\,g\,sec^{-3}}]$ bezeichnet man als 1 Watt. Wir kommen darauf später (S. 87 u. 88) zu sprechen. Eine Pferdestärke sind 736 Watt. Die technische Einheit ist die Pferdestärke (häufig durch PS abgekürzt), die Leistung, die bei Hebung von 75 kg um ein Meter in einer Sekunde, oder von 1 kg um 75 m, was nach dem vorstehenden das gleiche ist, gebraucht wird. Sie ist also 75 · 1000 · 100 · 981 Erg/Sekunde, oder 7 360 000 000 Erg/Sekunde. Es sei bemerkt, daß ein Pferd diese Leistung nicht annähernd erreicht.

Es dürfte vielleicht nicht ohne Interesse sein, zu erfahren, wie man Kräfte, Druck, Arbeit usw. mechanisch messen kann. Kräfte werden vielfach durch eine Wage gemessen. Es genügt da wohl der Hinweis, daß ein Gewichtsstück von 1 g mit einer Kraft von 981 Dyn nach der Erde zu gezogen wird; so sieht man wohl ohne weiteres ein, daß die Wage in jeder Form direkt ein Kraftmesser ist, vorausgesetzt, daß man mit ausreichender Genauigkeit die Größe der Schwerkraft kennt. Wie das z. B. ausgenutzt wird, werden wir später an dem Beispiel des Thomsonschen Schutzringelelektrometers sehen. Daß man nicht nur eine Wage verwenden kann, sondern überhaupt jede Kraft, sei sie groß oder klein, mit der Kraft vergleichen kann, mit der ein Gewichtsstück nach der Erde zu gezogen wird, gibt allen Methoden der Kraftmessung eine solche Vielseitigkeit, daß ein Eingehen auf die verschiedenen Möglichkeiten der Lösung entbehrlich macht. Nur auf eine Methode sei noch hingewiesen, die Drehwage von Coulomb. Sie besteht aus einem horizontal aufgehängten Stäbchen, das an seinen Erden mit Kugeln versehen ist. Getragen wird es von einem langen feinen Faden, der in seiner Mitte angreift. Man verwendet die Drehwagen häufig zur Messung elektrischer und magnetischer Anziehungs- und Abstoßungskräfte, wie noch später erwähnt wird, und zu einer sehr interessanten Aufgabe, zur Bestimmung der mittleren Dichte der Erde, und damit zusammenhängend der Frage nach der absoluten Größe der Gravitationskräfte. Bringt man z. B. in die Nähe der Endkugel der Drehwage eine größere Masse, z. B. eine große Bleikugel, so wird diese durch ihre Gravitationskraft auf die Kugel wirken und sie etwas zu sich heranziehen, genau so, wie die Sonne die Erde anzieht, und man beobachtet dann den Winkel, um den sich das Stäbchen dreht. Der Faden, an dem dieses aufgehängt ist, wird natürlich infolge seiner elastischen Eigenschaften dieser Drehung entgegenwirken, und kennt man diese genauer, was durch besondere Untersuchungen festgestellt werden kann, so kann man aus dem Drehwinkel auf die Anziehungskräfte schließen.

Zur Druckmessung verwendet man selbstverständlich zum Teil ebenfalls Wagen, zur Messung des Druckes von Gasen Barometer, oder Manometer, d. h. offene Barometer, indem man den Behälter, in welchem sich das Gas befindet, mit einem U-förmigen Rohr in Verbindung bringt, das mit Quecksilber gefüllt ist, aus dem Unterschied der Einstellung der beiden Quecksilberkuppen kann man direkt den Überdruck oder Unterdruck des Gases mit Bezug auf den jeweiligen Atmosphärendruck berechnen.

Wie man Arbeiten und Leistungen mißt, soll hier auch nicht genauer erörtert werden. Selbstverständlich so z. B., daß man die Kräfte nach obigen Methoden mißt, und gleichzeitig den zurückgelegten Weg, und die Zeit, in welcher er zurückgelegt wird, oder, wie es vielfach gemacht wird, indem man die manchmal schwer meßbaren mechanischen Arbeits- und Energieformen in die leichter meßbaren elektrischen verwandelt, wobei man von dem allgemeinen Prinzip der Erhaltung der Energie, daß jeder mechanischen Energie eine genau bestimmte elektrische, thermische usw. äquivalent ist, Gebrauch macht.

Das sind in ganz kurzen Zügen die wesentlichsten mechanischen Maßeinheiten, die von großer Bedeutung sind, und die wir späterhin noch vielfach gebrauchen werden. Alle sind sie rein auf die drei Grundeinheiten der Zeit, mit der Einheit 1 sec, der Länge, mit der Einheit 1 cm, und der Masse, mit der Einheit 1 g zurückgeführt. Es erhebt sich aber auch sofort die Frage, wie diese drei miteinander zusammenhängen, oder ob sie auf andere, als sicher unveränderliche Urmaße, die in der Natur vorhanden sind, und deren Unveränderlichkeit über jeden Zweifel erhaben ist, zurückgeführt werden können.

Die Zeit ist bereits ein Naturmaß und wird dauernd aus der Natur selbst astronomisch rekonstruiert. Sie stützt sich auf die Erdbewegung. Ob diese im Laufe der Jahre und Jahrhunderte wirklich konstant ist, wissen wir nicht, wir haben sogar guten Grund zu der Annahme, daß es wohl nicht der Fall sein wird; zur Beruhigung sei indessen bemerkt, daß bisher tatsächlich eine Änderung noch nicht nachgewiesen ist.

Das Meter sollte ein Naturmaß sein, ist es aber nach dem auf S. 9 Gesagten tatsächlich nicht, zu seiner wirklichen Festlegung brauchten wir also ein Naturmaß, haben auch glücklich ein solches, wie in dem Kapitel über die optischen Maße erörtert werden wird. Dort wird auch der Zusammenhang zwischen Zeit- und Längenmaß besprochen werden.

Die Masseneinheit sollte anfänglich auch, wie auf S. 12 besprochen, mittels des Wassers und der Längenmaße ein Naturmaß sein, ist es ebensalls nicht. Hier haben wir nun wieder kein Naturmaß, an das wir das Kilogramm anschließen können. Wir können dieses nur wiederum mittels des Meters unter Zuhilfenahme des Wassers an die Längeneinheit anschließen und es so absolut festlegen. Das ist auch bereits ausgeführt durch die Arbeiten von Ch. Ed. G u i l l a u m e im Internationalen Maß- und Gewichtsbureau.

Es handelt sich also dabei um die Frage, w e l c h e M a s s e hat ein

Kubikdezimeter Wasser bei seiner größten Dichte, also bei + 4° C, oder welches Volumen nimmt ein Kilogramm Wasser bei dieser Temperatur ein. Es ist nun aus technischen Gründen nicht gut möglich, einen Hohlkörper herzustellen, der genau ein Kubikdezimeter faßt und gut ausmeßbar ist. Guillaume machte es also anders. Er stellte sich bronzene Zylinder her, von etwa 14, 12 und 10 cm Durchmesser, die er sorgfältig ausmaß; dieses Ausmessen wurde so vorgenommen, daß er sich zwei zylindrische Kontakte herstellte, die genau in einer Linie lagen und gegeneinander beweglich sind. Auf diesen Zylindern waren Striche gezogen. Zwischen diese beiden wurde der zu messende bronzene Zylinder gelegt, und die Kontakte an ihn angeschoben. Dann wurde der Abstand zweier Striche auf diesen Kontakten mikrometrisch mit einem bekannten Intervall auf einem gut untersuchten Normalmaßstab gemessen, endlich die beiden Kontakte direkt miteinander zur Berührung gebracht und wiederum der Abstand dieser beiden Striche mikrometrisch gemessen. So konnte er die Höhe und den Durchmesser aller drei Zylinder messen. Selbstverständlich wurden die Höhen und die Durchmesser an den verschiedensten Stellen gemessen, um sich zu vergewissern, ob die Körper auch wirklich vollkommene Zylinder waren. Nach dieser Messung konnten dann die Volumina der drei Körper im metrischen Maße berechnet werden. Sodann wurde nach genau der früher beschriebenen Methode die Dichte dieser Körper gemessen, indem man sie einmal wie gewöhnlich in Luft, dann in Wasser wog, oder einfacher gesagt, die Differenz beider Wägungen lieferte die Masse des von dem betreffenden Körper verdrängten Wassers. Den Raum des verdrängten Wassers kannte man als den Raum des Körpers, und dann konnte die Masse eines Kubikdezimeter Wassers berechnet werden. Guillaume fand nach Versuchen mit den drei Körpern die Masse eines Kubikdezimeters Wassers oder das Volumen eines Kilogramms Wassers folgendermaßen:

Zylinder	Masse eines Kubikdezimeters Wassers	Volumen eines Kilogramms Wassers	
Nr. 1	0,9999749 kg	1,0000251 ccm	
„ 2	0,9999655 „	1,0000345 „	
„ 3	0,9999672 „	1,0000328 „	
	0,999971 kg	1,000029 ccm	als wahrscheinliche Mittelwerte.

Alles selbstverständlich auf Wasser der größten Dichte bezogen. So ist der Übergang der Masseneinheit zur Längeneinheit gebildet. Weitere Messungen zu diesem Problem werden später behandelt werden.

Thermische Maße und Messungen.

In der Wärmelehre verwendet man neben den im vorigen Kapitel besprochenen Maßen zwei neue, mit diesen nicht ohne weiteres im Zusammenhang stehende, die Temperatur und die Wärmemenge, und die Einheiten dieser bezeichnet man als Temperaturgrade und Kalorien. Mit Temperatur bezeichnet man den Wärmezustand eines Körpers, mit Wärmemenge seinen Gehalt an Wärme. Jeder Körper hat eine bestimmte Temperatur; führe ich ihm eine gewisse Wärmemenge zu, oder entziehe ich sie ihm, so verändere ich seine Temperatur. Temperaturen rechnet man in der praktischen Physik nach Celsiusgraden. Die Temperatur des schmelzenden Eises bezeichnet man als 0^0, die des Wasserdampfes bei 760 mm Barometerstand als 100^0. Den Zwischenraum zwischen beiden teilt man in 100 Teile und setzt diese Einteilung auch nach oben und unten fort. Die genauere Definition der Temperatur wird später gegeben werden. Die theoretische Physik rechnet von einem anderen Nullpunkt aus, zu dem sie folgendermaßen gelangt: Alle Gase haben, gleichen Druck vorausgesetzt, den gleichen Temperaturausdehnungskoeffizienten. Sie alle dehnen sich um $\frac{1}{273}$ oder 0,00367 ihres Volumens aus; oder mathematisch geschrieben $V_T = V_0\left(1 + \frac{T}{273}\right)$, worin V_T das Volumen bei der Temperatur T, V_0 das bei 0^0, und T die Temperatur bezeichnet; wird nun die Temperatur immer niedriger, so zieht sich das Gas immer mehr zusammen; wird die Temperatur endlich -273^0 Celsius, so wird die Formel $V_{-273} = V_0\left(1 - \frac{273}{273}\right) = V_0 \cdot 0 = 0$, das Volumen hat sich auf Null zusammengezogen. Bei der Temperatur -273^0 haben die Gase kein Volumen mehr. Dieser „absolute Nullpunkt der Temperatur" wird in der theoretischen Physik benutzt, sie bezeichnet also den üblichen Punkt 0^0 mit 273^0 und den Punkt $+100^0$ mit 373^0. Erreicht ist dieser Nullpunkt noch nicht. Wir können ihm uns nur bis auf etwa 5^0 nähern, das die Temperatur ist, bei der Helium zu verflüssigen möglich ist.

Haben wir weiter 1 kg Wasser und erhöhen wir seine Temperatur um 1^0, so haben wir ihm die Einheit der Wärmemenge, die Kalorie, zugeführt, haben wir 10 kg Wasser, so brauchen wir zu dieser Erhöhung seiner Temperatur 10 Kalorien. [Es wird vielfach nebeneinander die „große" und die „kleine" Kalorie als Einheit verwendet, die große, die 1 kg, die kleine, die 1 g um 1^0 in der Temperatur erhöht, jene ist also 1000 mal größer, man bezeichnet sie auch als Kilogramm-und Grammkalorien.] Durch das Wasser wiederum hängen beide Einheiten zusammen. Und wie Raumgehalt und Masse durch die Dichte, das spezifische Gewicht zusammenhängen, hängt Temperatur und Wärmemenge durch die spezifische Wärme zusammen, sie gibt also an, wieviel Kalorien nötig sind, um 1 kg (bzw. 1 g) der betreffenden Substanz um 1^0 zu erwärmen. Wie die Dichte des Wassers gleich 1 gesetzt wird, so wird auch die spezifische Wärme des Wassers nach der Definition der Kalorie zu 1 angesetzt. Wasser hat die größte spezifische Wärme. Sie ist also bei allen andern Stoffen kleiner als 1. Die nachstehende Tabelle gibt eine Übersicht über diese Werte bei den gebräuchlichsten Stoffen.

Tabelle der spezifischen Wärmen.

Wasser	1	Kupfer	0,093	Zinn	0,054
Aluminium	0,22	Messing	0,093	Glas	0,19
Blei	0,031	Platin	0,032	Quecksilber	0,0332
Eisen	0,11	Silber	0,056	Luft	0,237
Gold	0,031	Zink	0,094	Wasserstoff	3,4.[1]

Ein Normalmaß für die Temperatur läßt sich naturgemäß nicht feststellen, wenn man nicht die Temperaturen 0^0 und 100^0 als gewissermaßen Normaltemperaturen ansehen will, die jedem immer zur Verfügung stehen. Man kann dagegen einwenden, daß 100^0 doch noch vom Barometerstand abhängt, der genau 760 mm betragen muß, also von einem Längenmaß. Dagegen ist zu berücksichtigen, daß die Unsicherheiten, die von einer fehlerhaften Längenmessung herrühren, für die Temperaturbestimmung noch nicht von großem Einfluß sind. Denn die Siedetemperaturen des Wassers sind bei den Barometerständen von

800 mm	101,44^0	761 mm	100,04^0	740 mm	99,26^0
780 „	100,73^0	760 „	100,00^0	720 „	98,49^0
770 „	100,37^0	759 „	99,96^0	700 „	97,71^0
765 „	100,18^0	755 „	99,82^0	680 „	96,92^0
		750 „	99,63^0		

Also eine Änderung von 0,04^0 in der Temperatur macht in dem Barometerstand bereits 1 mm aus, man sieht also, daß man diesen nicht mit der größten Genauigkeit zu bestimmen braucht; dagegen ist aber

1) Um den Widerspruch gegen die vorstehende Bemerkung aufzuklären, sei darauf hingewiesen, daß die Angaben der spez. Wärme sich auf Gewichte beziehen. Da 1 l Wasserstoff 0,09 g wiegt, sind zur Erwärmung dieser Menge um 1^0 0,0003 Kalorien erforderlich. Die Berechnung der spez. Wärme für Gewichtseinheiten ist teilweise praktisch unbequemer als die für Raumeinheiten.

auch wiederum zu bedenken, daß die zuverlässige Messung der Barometerhöhe auf 0,01 mm bereits ganz bedeutende Schwierigkeiten bereitet.

Stellt man sich nun verschiedene Thermometer her, bei denen man die Punkte 0° und 100° festlegt, und den Zwischenraum gleichmäßig unterteilt, so findet man, daß ihre Angaben in den Zwischenpunkten nicht übereinstimmen. Denn einmal dehnt sich das Quecksilber nicht gleichmäßig aus, sondern vielmehr bei niedrigeren Temperaturen langsamer wie bei höheren, und dann haben auch die Glassorten verschiedene Ausdehnung. Beides wirkt zusammen, um diese Unterschiede entstehen zu lassen. In der Hauptsache hängen die Unterschiede also von der verwendeten Glassorte ab. Die nachstehende Tabelle soll die Angaben von Thermometern aus verschiedenen Glassorten illustrieren:

		Angaben des		
Wasserstoff-thermometers	Luft-thermometers	Quecksilberthermometers aus Jenaer Glas 16 III	Jenaer Glas 59 III	verre dur
0°	0,000	0,00	0,00	0,00
5	5,004	5,03	5,01	5,03
10	10,007	10,06	10,02	10,05
15	15,009	15,08	15,03	15,07
20	20,010	20,09	20,04	20,08
25	25,010	25,10	25,04	25,10
30	30,010	30,11	30,04	30,10
35	35,010	35,12	35,04	35,11
40	40,010	40,12	40,03	40,11
45	45,009	45,12	45,03	45,11
50	50,009	50,12	50,03	50,10
55	55,007	55,11	55,02	55,10
60	60,007	60,10	60,01	60,09
65	65,006	65,09	65,01	65,08
70	70,005	70,08	70,01	70,07
75	75,004	75,07	75,00	75,06
80	80,004	80,06	80,00	80,05
85	85,004	85,04	85,00	85,04
90	90,002	90,03	90,00	90,03
95	95,002	95,02	95,00	95,01
100	100,000	100,00	100,00	100,00

In der ersten Spalte ist das Wasserstoffthermometer aufgenommen. Dieses oder allgemein das Luftthermometer verwendet keine Flüssigkeit wie das Quecksilber zum Anzeigen der Temperatur, sondern benutzt die thermische Ausdehnung eines Gases. Die Abb. 14 gibt das Schema eines solchen Thermometers. Es besteht aus einem Glasgefäß, in Kugelform oder länglich, das der zu messenden Temperatur ausgesetzt wird. Dieses setzt sich in ein U-förmiges Rohr fort, das unten durch einen Gummischlauch gebildet wird. Wird nun der

Gasinhalt in der Kugel erwärmt, so dehnt er sich aus und drückt auf das Quecksilber, das in dem U-förmigen Teil vorhanden ist. Durch entsprechendes Heben des rechten Schenkels wird dann das Quecksilber im linken wieder auf das frühere Niveau eingestellt, wozu im linken Schenkel eine geeignete Spitze vorhanden ist und dann der Unterschied der Quecksilberhöhen abgelesen. Man eicht das Instrument, indem man den Glasballon einmal in schmelzendes Eis packt und die Stellung des Quecksilbers im rechten Schenkel abliest, und dann ihn in Dampf von siedendem Wasser unter gehöriger Beachtung des Luftdruckes bringt und wieder abliest, jedesmal nachdem man das Quecksilber im linken Schenkel an die feste Marke eingestellt hat. Nachdem der Eis- und Siedepunkt festgestellt ist, können alle übrigen Temperaturen aus diesen beiden berechnet werden, indem man voraussetzt, daß das Gas sich gleichmäßig ausdehnt, oder richtiger gesagt, daß es gleichmaßig seinen Druck ändert, wenn es auf konstantem Volumen gehalten wird. Als Gas wird Luft genommen oder Wasserstoff, wie es im internationalen Maß- und Gewichtsdienst vorgeschrieben ist, oder Helium. Die Abweichungen zwischen diesen drei Gasen sind indessen nur unbedeutend. Bei diesem Luftthermometer sind nun eine ganze Reihe von Fehlerquellen vorhanden. Das Gas muß einmal stets unter einem bestimmten Überdruck stehen, damit nicht Luft von außen nach innen eindringt. Eine wichtige Korrektionsgröße ist die Ausdehnung des Glases des Ballons. Diese wird an einem Glasstück der gleichen Schmelze bestimmt und die Ablesungen des Luftthermometers so reduziert, als ob der Ballon in seinem Raumgehalt trotz der Temperaturänderung unverändert geblieben wäre. Endlich ist die dritte Fehlerquelle der sog. schädliche Raum, der so entsteht, daß nicht der ganze Luftraum vom Ballon bis zum Quecksilber auf der zu messenden Temperatur sich befindet, sondern nur der Ballon allein, während die Verbindungsröhre zum Quecksilber im allgemeinen die Temperatur des Beobachtungsraumes besitzt. Durch geeignete Konstruktion muß dieser Raum so klein wie möglich gemacht und sein Einfluß rechnerisch berücksichtigt werden.

Abb. 14. Schema des Luftthermometers.

Ein solches Gasthermometer ist das grundlegende Meßinstrument für Temperaturen, und jedes erstklassige Quecksilberthermometer muß, da es für die Anwendung viel bequemer ist, mit ihm verglichen, oder auf es reduziert sein. Die richtig bestimmten Null-punkte und Siedepunkte von Quecksilberthermometern fallen selbstverständlich bei beiden Thermometern zusammen. Ohne auch ein Luftthermometer zur Verfügung zu haben, kann man aber Quecksilberthermometer auf Luftthermometer reduzieren, wenn man das Quecksilberthermometer genau untersucht und richtig verwendet. Zu diesem Zwecke muß man wissen, daß seine Kapillare, in der das Quecksilber sich bewegt, überall gleich weit, so daß überall der Raum der Kapillare von einem Gradstrich zum anderen gleich groß ist. Das kann man prüfen, indem man Quecksilberfäden durch vorsichtiges Klopfen von der Hauptmasse des Quecksilbers in der Kugel lostrennt, in der Kapillare verschiebt, und beobachtet, ob sie überall gleiche Länge haben; durch ein geeignetes Beobachtungs- und Messungsverfahren kann man dann die Abweichungen der Kapillare von ihrer idealen Gestalt für die Beobachtung berücksichtigen. So kann man feststellen, was ein ideales Quecksilberthermometer anzeigen würde, bei dem jeder Grad genau der hundertste Teil des Abstandes von 0^0 bis 100^0 ist. Dann bleibt uns noch der Einfluß der Glassorte übrig. Für Thermometer ersten Ranges werden nur ganz bestimmte Glassorten verwendet, deren Zusammensetzung und Eigenschaften genügend konstant sind, so daß sie, wenn sie einmal mit ausreichender Genauigkeit bekannt sind, für alle Thermometer aus Tabellen entnommen werden können. In der vorhergehenden Tabelle ist einmal der Unterschied der Angaben eines Luftthermometers gegen ein Wasserstoffthermometer, und dann von Quecksilberthermometern aus dem französischen verre dure, sowie aus den deutschen Gläsern 16^{III} und 59^{III} des Glaswerks Schott u. Gen. in Jena dargestellt.

So kann man ein Thermometer prüfen und es auf ein Wasserstoffthermometer beziehen, und man könnte eine Temperaturmessung größter Genauigkeit machen. Aber so einfach ist es nicht. Und das beruht zum größten Teil auf den Eigenschaften des Glases. Jedes Glas, das über einer Flamme geformt ist, und Glas überhaupt ist veränderlich und verändert langsam seine Form. Das macht sich bei Thermometern insofern deutlich bemerkbar, als die Thermometerkugel, die die Hauptmasse des Quecksilbers enthält, sich jahrelang dauernd zusammenzieht. Infolgedessen zeigt jedes Thermometer langsam immer mehr an. Man eliminiert diese Fehler, indem man in gewissen Zwischenräumen den Nullpunkt des Thermometers nachprüft, indem man es in ein Gemisch von reinem Eis und destillierten Wasser taucht, ein Gemisch, das natürlich die Temperatur 0^0 hat. Dieses Aufrücken des Eispunktes und gleichzeitig auch des Siedepunktes um den gleichen Betrag erfolgt nach der Anfertigung zuerst schnell, dann langsamer, und kann nicht vollständig beseitigt werden, wenn man es auch verringern kann, indem man nach der Anfertigung das Thermometer häufig erwärmt und abkühlt. Es ist eine Alterungserscheinung des Glases, die wohl darauf zurückzuführen ist, daß das Glas durch das Schmelzen durch Zwang in einem amorphen, strukturlosen Zustand festgehalten wird, aber langsam in seinen natürlichen kristallinischen Zustand übergeht. Solche Änderungen können im Laufe der Jahre bis zu mehreren Zehntelgrad, je bis zu einem Grad anwachsen.

Noch eine andere Eigenschaft hat das Thermometerglas. Hat man einmal den Eispunkt bestimmt, nnd damit die beiden festen Punkte festgelegt, und erwärmt man dann das Thermometer, d. h. mißt man nun eine andere Temperatur, und bestimmt man danach sofort wieder den Eispunkt, so erhält man einen niedrigeren Punkt. Wie ist das zu erklären? Bei der Erwärmung hat sich die Kugel ausgedehnt, und diese Ausdehnung geht nicht so schnell wieder zurück, sondern braucht dazu einige Zeit, mehrere Stunden. Damit werden also die Ablesungen verfälscht. Es ist dieses eine thermische Nachwirkung im Glase, die man als Eispunktsdepression bezeichnet. Beides, das Wandern des Eispunkts, sowie die Depression, wird bei seinen Messungen berücksichtigt.

Das sind die wichtigsten Fehlerquellen, die man bei thermometrischen Messungen allgemein berücksichtigen muß. Bei der Anwendung hat man noch auf zwei Punkte zu achten. Zunächst darauf, daß die Temperatur des Thermometers mit der Temperatur des Körpers, die man messen will, übereinstimmt. Das ist recht schwer zu erreichen, nur so, daß man beide längere Zeit auf der gleichen Temperatur erhält. Ändert man die Temperatur, so weiß man nicht, wie schnell dieser Körper und das Thermometer die neue Temperatur annehmen, ob das Thermometer oder der Körper schneller Temperaturänderungen folgt, usw.

Ist das Thermometer nicht vollstäudig der zu messenden Temperatur ausgesetzt, sondern hat der Quecksilberfaden eine andere Temperatur, so werden damit die Temperaturangaben verfälscht. Steckt z. B. nur die Kugel in siedendem Dampf, und ist die mittlere Temperatur des Fadens nur 0^0, so zeigt das Thermometer etwa 1.55^0 zu niedrig an. So groß kann der Fehler durch den „herausragenden Faden" sein. Auch dieser Fehler kann natürlich rechnerisch berücksichtigt werden.

Endlich entstehen auch Unterschiede in der Angabe dadurch, ob das Thermometer vertikal oder horizontal liegt, indem bei vertikaler Stellung der Quecksilberfaden je nach seiner Länge auf das Quecksilber im Gefäß einen gewissen Druck ausübt, und die Kugel etwas aufweitet. Auch der äußere Druck, wenn es z. B. im Wasser eintaucht, macht sich bemerkbar; alles das muß berücksichtigt werden. Wie man sieht, ist eine feine Temperaturmessung mittels Quecksilberthermometers sehr schwer und erfordert eine Menge Vorsichtsmaßregeln. Andere Methoden der Temperaturmessung auf elektrischem Wege sollen später erörtert werden.

Wenden wir uns nun zu den Messungen von Wärmemengen. Nach der heutigen Auffassung müssen wir annehmen, daß ein Körper bei -273^0, dem absoluten Nullpunkt der Temperatur keine Wärme mehr enthält; wir sehen als Wärme den Bewegungszustand an, in welchem sich die einzelnen Molekeln befinden, daß diese also bei -273^0 keine Bewegung mehr haben. Da wir diese Temperatur nicht erreichen können, können wir keine absoluten Wärmemengen messen, den gesamten Wärmeinhalt eines Körpers, sondern nur Unterschiede im Wärmeinhalt, also die Wärmeaufnahme bei der Erwärmung um ein bestimmtes Temperaturintervall, oder der Wärmeverlust bei einer bestimmten Abkühlung, usw.

Abb. 15. Eiskalorimeter von Bunsen.

Ein Wärmemengenormal ist natürlich nicht möglich, da in seiner Definition die Temperatur eingeht; wenn man nicht als allgemein zugängliche Einheit die ansehen will, die der hundertste Teil der Wärmemenge ist, die erforderlich ist, um 1 kg Wasser von seinem Gefrierpunkt bis zu seinem Siedepunkt zu erhitzen.

Zur Messung von Wärmemengen benutzt man Kalorimeter der verschiedensten Form. In der einfachsten Form bestehen sie aus einem geeigneten Gefäß, das mit Wasser gefüllt ist Die Masse dieses Wassers wird durch Wägung festgestellt. Will man nun die Wärmemenge messen, die ein Körper aufnimmt, wenn er bis zu 100^0 erwärmt wird, so erwärmt man ihn, bis er diese Temperatur angenommen hat, und bringt ihn schnell, ehe er Wärme verliert, in das Wasser des Kalorimeters In dieses Wasser taucht ein Thermometer ein, dessen Temperaturanstieg man mißt. Das weitere ergibt dann die Rechnung. Sei die Anfangstemperatur des Kalorimeters 15^0, seine Endtemperatur nach Einbringen des Körpers 25^0, seine Wassermasse 500 g, so wissen wir dann, daß der auf 100^0 erwärmte Körper sich bis auf 25^0 abgekühlt hat, dabei hat er eine Wärmemenge verloren, die genügte, um 500 g Wasser von 15^0 auf 25^0, d. h. um 10^0, oder 1000 g Wasser = 1 kg um 5^0 zu erwärmen, er hat also bei der Abkühlung 5 Kalorien verloren, oder braucht zur Erwärmung von 25° auf 100° 5 Kalorien, oder zur Erwärmung um 1° $\frac{5}{75} = 0{,}0667$ Kalorien. Wägt man den Körper und findet nun seine Masse zu 0,55 kg, so kann man seine spezifische Wärme zu $\frac{0{,}0667}{0{,}55} = 0{,}12$ berechnen. Wenn man nicht wissen sollte, woraus der betreffende Körper besteht, kann man aus diesem Ergebnis schließen, daß es Stahl ist.

Feinere Messungen verlaufen nun nicht so einfach. Zunächst ist es schwer, wenn nicht unmöglich, die Anfangstemperatur konstant zu halten. Vielmehr wird das Kalorimeter stets im Wärmeaustausch mit der Umgebung stehen, von dort Wärme aufnehmen oder abgeben. Wird der zu untersuchende erwärmte Körper hineingebracht, so steigt die Temperatur an, gleichzeitig wird aber auch Wärme verloren gehen, indem das Kalorimeter sich über die Temperatur der Umgebung erwärmt, und die Wärme zum Teil ausstrahlt. Anfangs- und Endtemperatur sind also schwer präzise feststellbar. Wie man diese Schwierigkeit beseitigt, kann allgemein nicht erörtert werden. Man kann es durch den Kunstgriff machen, daß die Temperatur des Beobachtungsraumes in die Mitte zwischen Anfangs- und Endtemperatur legt, so daß es dann zu Beginn etwa ebensoviel Wärme aufnimmt, wie es zum Schluß abgibt.

Neben dem Wasser des Kalorimeters wird aber auch das Kalorimetergefäß selbst erwärmt, eine Tatsache, die man so berücksichtigt, daß man seine Masse bestimmt, diese mit der spezifischen Wärme des Stoffes multipliziert, und das Produkt der Masse des Wassers hinzufügt. Man hat so den „Wasserwert" des Gefäßes bestimmt. Auch der Wasserwert des Thermometers wird so berücksichtigt.

Im folgenden soll nun eine ganz andere Kalorimeterform beschrieben werden, die wohl die bei weitem genauesten Ergebnisse liefert. Es ist das Eiskalorimeter von Bunsen, das die Abb. 15 darstellt. Es besteht aus einem vollständig geschlossenen Gefäß, in das oben eine Röhre eingeschmolzen ist, und das sich unten in eine Rohre fortsetzt, die in eine feine Kapillare ausläuft. Das Gefäß ist mit Wasser angefüllt, unten wird es durch Quecksilber abgeschlossen, das auch in der Kapillare sich fortsetzt. Zum Gebrauch wird die eingeschmolzene Röhre mit einem Eismantel umgeben. Man macht das, indem man sie mit Äther füllt, und in diesen einen kräftigen Luftstrom hineinschickt. Die dabei entstehende starke Verdunstung kühlt ihn so ab, daß das Wasser in seiner Nähe gefriert. Hat man einen geeigneten Eismantel, etwa wie in der Abbildung, so wird das Instrument in einer Mischung von Eis mit Wasser, oder in

Wasser allein von 0° eingesetzt und ist zum Gebrauche fertig. Bringt man einen erwärmten Körper in die innere Röhre, so wird er auf die Temperatur seiner Umgebung, also 0° abgekühlt, die frei werdende Wärme dient dann zum Schmelzen eines Teiles des Eises. Dieses Schmelzen ist nun mit einer starken Volumenänderung verbunden, indem 1 ccm Eis nur 0,9167 ccm Wasser gibt. Das Quecksilber wird also in die Kapillare eingesogen werden. Ist nun deren Querschnitt gemessen und die Standänderung des Quecksilbers beobachtet, so kann man daraus die geschmolzene Eismenge berechnen, und daraus wieder, wenn man weiß, wieviel Kalorien erforderlich sind, um 1 kg Eis zu schmelzen, welche Wärmemenge der Körper abgegeben hat. Die Schmelzwärme des Eises, die Wärmemenge also, die erforderlich ist, um 1 kg Eis zu schmelzen; ist 80,1 Kilogrammkalorien, wie aus andern Untersuchungen bekannt ist.

Dieses Kalorimeter, das zu den feinsten kalorimetrischen Messungen verwendet wird, hat den Vorzug, daß es dauernd auf der gleichen Temperatur 0° bleibt, die durch eine geeignete Einpackung relativ leicht erhalten werden kann. Der einzige Wärmeverlust findet nach oben hin statt, und dieser muß durch eine geeignete Anordnung der Messungen berücksichtigt werden. Vielfach sind mit ihm die Messungen auch so angestellt worden, daß nicht die Standänderungen des Quecksilbers in der Kapillare beobachtet sind, sondern daß diese in ein geeignetes, mit Quecksilber gefülltes Gefäß eintauchte, bei dem die Änderung der darin befindlichen Quecksilbermasse durch Wägung verfolgt wurde, also eine Methode, die an sich großer Genauigkeit fähig ist.

Auf die sonstigen Formen der Kalorimeter und die Anwendungen der Kalorimetrie kann hier aus Platzmangel nicht eingegangen werden. Es seien dafür andere wichtigere Fragen allgemeiner Art behandelt.

Die Maßeinheiten der Wärmelehre sind der Temperaturgrad und die Kalorie. Welche Beziehungen bestehen zwischen diesen Maßen und und den mechanischen? Der Temperaturgrad, am Luftthermometer gemessen, ist im Grunde genommen schon bereits durch Anwendungen mechanischer Hilfsmittel, der Druckkräfte, erhalten, auch unter Zuhilfenahme des Wassers, und die Kalorie damit ebenfalls. Aber es ist ein etwas umständlicher Weg. Und es gibt einen näheren und viel wichtigeren, und er beruht auf dem Satze, daß jede mechanische Arbeit eine bestimmte Anzahl Kalorien erzeugen kann, und daß man mit einer Kalorie nur eine ganz bestimmte mechanische Arbeit leisten kann. Es ist der Satz, der kurz als Satz von der Äquivalenz von Wärme und Arbeit bezeichnet wird.[1]) Diesen Fundamentalsatz der neueren Physik verdanken wir dem Arzte J. R. Mayer, der ihn 1842 fand. Auf seine Bedeutung für die ganze Physik können wir hier nicht eingehen. Um das Resultat vorwegzunehmen, so besagt er einfach, daß 427,2 kgm äquivalent einer Kilogrammkalorie, oder 427,2 gm einer Grammkalorie ist. So ist auch die Brücke zwischen thermischen und mechanischen Maßen geschlagen. Es handelt sich nun darum, den Weg darzustellen, wie man zu dieser Zahl gekommen ist. Die Versuche, die man zu diesem Zwecke anstellen muß, müssen sich also darauf erstrecken, eine genau meßbare mechanische Arbeit zu erzeugen, diese vollständig in Wärme umzusetzen und die entstandene Wärmemenge zu messen. Von der Unzahl Messungsreihen über diesen Gegenstand sei eine der wichtigsten und ausführlichsten, die von Rowland aus dem Jahre 1880 genauer besprochen. Das Kalorimeter war zylindrisch mit senkrechter Achse und hing an einem Draht, der in der Mitte der oberen Kreisfläche befestigt war. Von unten her führte eine Welle in das Kalorimeter, die in seinem Inneren ein Schaufelrad trug. Diese Welle wurde durch eine Maschine gedreht, und das Schaufelrad setzte das Wasser in Bewegung und erwärmte es dabei. Aber auch das Kalorimeter selbst wird dabei gedreht, da es an dem einen Draht drehbar aufgehängt ist. Um dieses zu verhindern, befand sich an dem Kalorimeter eine Kreisscheibe mit genau gemessenem Durchmesser, dessen Achse ebenfalls der Draht war; um diese Scheibe waren Schnüre gelegt, die über Rollen geführt waren und Gewichte trugen, die so abgeglichen wurden, daß sie der Drehung durch das Schaufelrad genau das Gleichgewicht hielten. Daraus geht hervor, daß die auf die Reibung verwendete Arbeit durch diese Gewichte gemessen werden kann. Denn ohne diese würde das Kalorimeter mit einer der Reibung entsprechenden Kraft in Drehung versetzt sein, und diese Drehung wird durch die Gewichte kompensiert. Wie man ohne weiteres einsieht, ist die Reibungsarbeit bei einer Umdrehung des Schaufelrades gleich dem Produkt aus den Gewichten und dem Umfang der Scheibe. So konnte man die aufgewendete Arbeit berechnen, wenn man noch die Umdrehungen des Schaufelrades zählte. Die Temperaturen wurden an einem im Kalorimeter befindlichen Thermometer, das an das Luftthermometer angeschlossen war, gemessen. Weitere Einzelheiten der Versuche können hier nicht besprochen werden.

1) Vgl. ANuG 257. A. Stein: Die Lehre von der Energie, S. 23, wo man die ältesten Bestimmungen des mechanischen Wärmeäquivalents zusammengestellt findet, und S. 38, eine mehr theoretische Berechnung seines Zahlenwertes nach J. R. Mayer.

Als Resultat seiner Versuchsreihe erhielt Rowland als mechanisches Wärmeäquivalent bei 15^0 für die Schwere der Stadt Baltimore, wo er seine Versuche anstellte, 427,4 gm, oder in absolutes Maß umgerechnet 41 887 000 Erg. Auf weitere Versuchsreihen wollen wir hier nicht eingehen, es sei erwähnt, daß man jetzt als zuverlässigsten Wert aus allen vorliegenden Versuchsreihen der verschiedensten Beobachter 41890000 Erg als mechanisches Äquivalent für eine Grammkalorie, oder $4189 \cdot 10^7$ Erg für eine Kilogrammkalorie annimmt; zur Reduktion auf technisches Maß also auf Kilogrammeter ist die Zahl mit $\frac{10^{-5}}{981}$ zu multiplizieren; man erhält dann 427,01 kgm.

Im engen Zusammenhang mit diesem Problem steht dann noch ein anderes, das vielfach gleichzeitig mit diesem behandelt wird. Die Kalorie war definiert als die Wärmemenge, die das Einheitsquantum Wasser um 1^0 erwärmt. Ist es nun gleichgültig, ob diese Erwärmung von 0^0 bis 1^0, oder von 15^0 bis 16^0, oder von 99^0 bis 100^0 erfolgt, oder nicht; oder was die gleiche Fragestellung ist, ist die spezifische Wärme von Wasser für alle Temperaturen konstant? Bei Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents hatte z. B. Rowland schon festgestellt, daß er ein wenig verschiedene Zahlen erhielt, je nach der Ausgangstemperatur seines Kalorimeters, und er konnte aus diesen Zahlen ableiten, daß die spezifische Wärme des Wassers in der Nähe von 30^0 ein Minimum hat, d. h. daß bei 30^0 die geringste Arbeit erforderlich ist, um seine Temperatur um 1^0 zu erhöhen. Andere Beobachter haben ähnliche Resultate vorgefunden und es ist vielleicht von Interesse, eine solche Tabelle mitzuteilen: Nach den Beobachtungen von Callendar und Barnes ist das Wärmeäquivalent bei den Temperaturen

5^0	421,30	30^0	417,80	55^0	418,06	80^0	419,46
10^0	419,99	35^0	417,74	60^0	418,28	85^0	419,79
15^0	419,12	40^0	417,69	65^0	418,54	90^0	420,14
20^0	418,51	45^0	417,76	70^0	418,81	95^0	420,51.
25^0	418,05	50^0	417,85	75^0	419,12		

Man sieht also, daß das Minimum bei etwa 40^0 erreicht wird. Die Tabelle ist in 10^5 Erg und Grammkalorien als Einheit berechnet. Es sei noch darauf hingewiesen, daß diese beiden Beobachter einen von obigem ein wenig abweichenden Wert für das mechanische Wärmeäquivalent erhalten haben.

Man muß also bei genauen kalorischen Messungen sorgfältig berücksichtigen, mit welchem Wert des Wärmeäquivalents man arbeitet. Man pflegt mit dem von 0^0 oder von 15^0 zu rechnen, oder mit dem Mittelwert des ganzen Intervalles von 0 bis 100°. Für Messungen, die nicht die höchste Genauigkeit beanspruchen, ist diese Unterscheidung bedeutungslos. Sonst wird neuerdings fast immer die 15° Kalorie als Einheit gewählt.

Das ist der Weg, auf dem die thermische Einheit der Kalorie an die mechanische Einheit des Erg angeschlossen ist. Und damit ist auch die Temperatur mit mechanischen Einheiten in Verbindung gesetzt, da sie wiederum mittels der spezifischen Wärme mit der Wärmemenge eng verbunden ist. Der Wärmezustand eines Körpers ist wie früher erwähnt identisch mit dem Schwingungszustand der Molekeln des Korpers, ist damit tatsächlich also auf eine mechanische Bewegung zurückgeführt. Da diese Anschauung für praktische Metronomie bisher noch ohne Einfluß geblieben ist, soll auf sie nicht weiter eingegangen werden.

Optische Maße und Messungen.

Die Optik trägt zu den bereits besprochenen Maßeinheiten im Grunde genommen nur eine weitere bei, die indessen eine etwas eigenartige Stellung hat. Es ist die Einheit der Lichtstärke. Zunächst herrscht in der Frage nach einer allgemein anerkannten Einheit noch eine merkliche Verwirrung, so daß an eine internationale Regelung dieser Angelegenheit kaum noch gedacht werden kann. Es soll daher in der Hauptsache die in Deutschland angenommene Einheit besprochen werden.

Ursprünglich sah man als Einheit das Licht an, das eine gute Kerze aussandte. Bei genaueren Ansprüchen genügte das aber nicht mehr, und man versuchte eine Flamme sich herzustellen, die besser als Lichteinheit verwendbar, genauer herstellbar und besser reproduzierbar war. Als eine solche Einheit fand man die von v. Hefner-Alteneck im Jahre 1884 konstruierte Amylacetatlampe, kurz als Hefnerlampe bezeichnete. Die von ihr gelieferte Flamme stellt die Einheit der Lichtstärke dar, die Hefnerkerze, mit HK bezeichnet, oder auch als Kerzenstärke bezeichnet. Ihre Leuchtkraft entspricht etwa der einer guten Stearinkerze.

Eine Abbildung einer solchen Hefnerlampe gibt Abb. 16. Wie man sieht, besitzt sie unten einen Vorratsbehälter für den Brennstoff. Dieser ist Amylacetat, oder chemisch richtiger Essigsäure-Isoamyläther $C_7H_{14}O_2$, eine wasserhelle, stark riechende Flüssigkeit, von etwa 139° C Siedepunkt. Diese Flüssigkeit wird durch einen Docht durch den Brennerkopf hindurchgesogen und in das neusilberne Dochtrohr geführt, wo sie oben angezündet werden kann. Sie brennt mit einer etwas rötlichen Flamme.

Von größter Wichtigkeit ist die Höhe der Flamme, die durch entsprechende Einstellung des Dochtes reguliert werden kann; ihre Höhe wird durch geeignete Visiervorrichtungen, wie man sie in der Abbildung sieht, festgestellt.

Die vorgeschriebene *Flammenhöhe* beträgt 40 mm über der Oberkante des Dochtrohres. Eine Abweichung ihrer Höhe um 1 mm ändert ihre Lichtstärke um etwa 2,7 Prozent, es ist also durchaus erforderlich, die Flammenhöhe sehr genau am vorgeschriebenen Wert zu halten, eine Vorschrift, die wegen der wenig scharfen Grenze einer Flamme nicht leicht zu erfüllen ist.

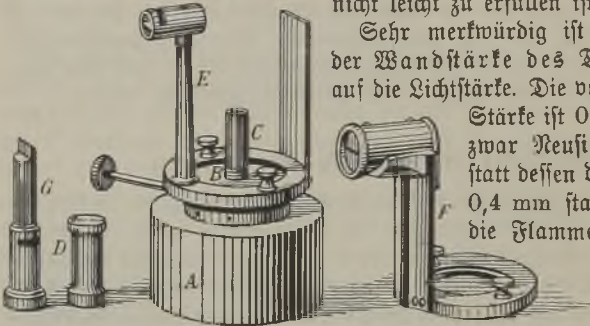

Abb. 16. Hefnerlampe.

Sehr merkwürdig ist der Einfluß der *Wandstärke des Dochtrohres* auf die Lichtstärke. Die vorgeschriebene Stärke ist 0,15 mm, und zwar Neusilberblech. Ist statt dessen das Dochtrohr 0,4 mm stark, so brennt die Flamme bei gleicher Flammenhöhe um 4 Proz. dunkler. Nimmt man statt des neusilbernen ein silbernes Dochtrohr, so wird die Flamme um 5 Prozent dunkler. Man kann diese Erscheinungen wohl so erklären, daß die Abkühlung der Flamme durch eine Änderung des Dochtrohres eine andere, und damit auch ihre Leuchtkraft verändert wird.

Weiter ist von großer Wichtigkeit für das vorschriftsmäßige Brennen der Lampe der *Zustand der umgebenden Luft*. Zunächst ist es selbstverständlich, daß sie in normaler Luft brennen muß, nicht etwa in solcher, die durch starken Kohlensäuregehalt oder Staub verunreinigt ist. Der Einfluß der Abweichung des Luftdruckes von dem normalen von 760 mm macht sich so bemerkbar, daß eine Änderung um 1 mm einer Lichtschwächung von 0,011 Prozent entspricht, bei einer Änderung um 50 mm, dem äußersten, was man wohl erwarten kann, brennt eine solche Lampe um etwa 0,5 Prozent dunkler.

Ebenso verändert ein anormaler Kohlensäuregehalt die Lichtstärke; der normale Gehalt an Kohlensäure ist etwa 0,6—0,9 l auf 1 cbm Luft. Verschlechtert sich die Luft so, daß sie etwa 1 l Kohlensäure mehr enthält, so brennt ebenfalls die Lampe dunkler und zwar um 0,7 Prozent. Endlich ändert auch ein Feuchtigkeitsgehalt die Leuchtkraft so, daß jedes Liter Wasserdampf in einem Kubikmeter Luft die Lichtstärke um 0,5 Prozent herabsetzt. Als normaler Feuchtigkeitsgehalt, für den die Hefnerlampe den Lichtstärkenwert 1 gibt, wird nach den Vorschriften der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, welche diese Lampe prüft, der Wert 8,8 l Wasserdampf auf 1 cbm Luft angenommen. Bei trockener Luft brennt die Lampe zu hell, bei feuchter zu dunkel.

Aus den mitgeteilten Zahlen wird man schon entnommen haben, daß den Lichtstärkenmessungen eine sehr große Genauigkeit nicht zukommen kann. Es bestehen indessen neben der Hefnerlampe noch eine ganze Reihe von Vorschlägen für Lichteinheiten, von denen auch ein großer Teil in anderen Ländern in praktischer Verwendung ist. Sie verwenden verschiedene Materialien als Brennstoffe, zum Teil auch Gase, schließen die Verwendung eines Dochtes aus usw. Ein Teil ist auch mit Rücksicht darauf konstruiert, daß die übliche Lichtstärke von einer Kerze für die technischen Anwendungen recht klein ist, und gibt Lichtstärken von etwa 10 Kerzen.

Eine ganze Reihe von anderen Vorschlägen definiert die Lichtstärkeneinheit ganz anders. Violle definiert als Einheit die Lichtstärke einer Oberfläche von 1 qcm chemisch reinen Platins im flüssigen Zustande, und zwar, da diese nicht eindeutig definiert ist, in dem Moment, wenn es in den festen Zustand übergeht. Diese Einheit entspricht etwa 20—25 Hefnerkerzen, ist aber sehr schwer herstellbar, sodaß W. v. Siemens vorschlug, die eine ähnliche Einheit zu wählen, aber nicht im Moment des Erstarrens, sondern in dem Augenblick, in welchem ein Platinblech schmilzt, d. h. das Licht verlöscht. Durch eine geeignete Vorrichtung sollte dann schnell ein neues Blech eingesetzt werden, so daß man diesen Vorgang nach Belieben wiederholen kann. Praktisch ist die Anwendung einer solchen Einheit natürlich mit beträchtlichen Schwierigkeiten verbunden.

Sehen wir also von einer Erörterung aller dieser Vorschläge ab, und wenden wir uns zu der Frage, wie Lichtstärken gemessen werden. Die dazu verwendeten Instrumente sind die Photometer. Das einfachste Photometer ist das sog. Schattenphotometer nach Rumford und besteht aus einem Stab, der sich in einiger Entfernung vor einer weißen Fläche befindet. Die beiden zu vergleichenden Lichtquellen werden dann so aufgestellt, daß die von ihnen entworfenen Schatten des Stabes auf der weißen Fläche gleich dunkel sind. Dann mißt man die Abstände der beiden Lichtquellen von den von ihnen entworfenen Schatten und kann daraus ihr Lichtstärkenverhältnis berechnen. Man muß dabei berücksichtigen, daß eine Lichtquelle in doppeltem Abstand nur den vierten Teil, in dreifachem Abstande nur den neunten Teil des Lichtes liefert, so daß also die Abnahme der Lichtstärke einem quadratischen Gesetze folgt. Steht also in diesem Falle die Normallichtquelle in 100 cm Abstand von ihrem Schatten, die zu messende in 150 cm, so ist die Lichtstärke dieser gleich $\frac{150^2}{100^2}$ der ersteren, also, wenn die Normallichtquelle eine Hefnerkerze ist, so ist sie 2,25 HK.

Ein solches Photometer ist indessen zu ungenau, und vergrößert die von der Normallichtquelle herrührenden Unsicherheiten noch mehr. In der Praxis wird deswegen ein anderes Photometer viel verwendet, der sog. Photometerwürfel von Lummer und Brodhun, den wir aus der Unzahl der vorliegenden Konstruktionen hervorheben wollen. Wie aus der schematischen Abb. 17 hervorgeht besteht er aus einem undurchsichtigen rein weißen Gipsschirm A, der von beiden Seiten her von den zu vergleichenden Flammen L und L' beleuchtet wird. Diese diffus reflektierenden Flächen senden das Licht in die beiden Spiegel B und B' und von ihnen gelangt es durch den eigentlichen Photometerwürfel aus Glas C in die Beobachtungslupe D. Der Photometerwürfel besteht aus zwei rechtwinkeligen Prismen, bei denen die eine Hypotenusenfläche des linken bis auf ein Mittelfeld kugelig abgeschliffen und mit diesem Mittelfeld an das andere angesetzt ist. Das vom rechten Spiegel B' her kommende Licht durchdringt das rechte Prisma, tritt durch diese Kreisfläche in das zweite Prisma ein, und gelangt zur Beobachtungslupe, in der man die Berührungsstelle der Prismen als eine mehr oder weniger helle Ellipse sieht; das von links (B) kommende Licht fällt auf die Hypotenuse des linken Prismas, und der Teil, der auf die mittlere Kreisfläche fallt, geht hindurch und wird zur Beobachtung nicht benutzt. Der andere Teil, der sie außerhalb dieses Kreises trifft, wird vollständig reflektiert und gelangt so in die Lupe, wo er als elliptischer Ring erscheint, der die erste Fläche umgibt. Für die Messung stellt

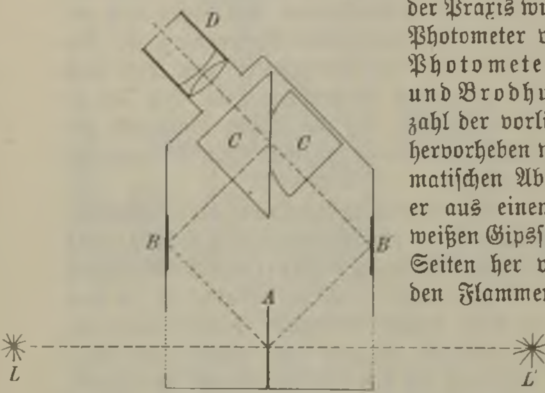

Abb. 17. Photometer nach Lummer und Brodhun.

man das Photometer in die Verbindungslinie der beiden zu vergleichenden Lichtquellen und verschiebt es so lange, bis der innere und der äußere Teil des Beobachtungsfeldes in der Lupe gleich hell erscheinen; das bedeutet, daß die beiden Seiten des Gipsschirmes gleich viel Licht empfangen, und man kann dann aus der Entfernung der beiden Lichtquellen von dem Schirme das Verhältnis ihrer Lichtstärken berechnen.

Andere Photometerkonstruktionen sollen hier nicht besprochen werden. Es soll nur darauf hingewiesen werden, daß die Vergleichung zweier Lichtstärken in den beiden Fällen ziemlich schwierig wird, wenn sie beide in ihrer Größe sehr verschieden sind, und wenn ihre Farben nicht übereinstimmen, man denke nur an die Unterschiede der Färbung der Flamme einer Kerze, eines Gasglühlichtbrenners, einer elektrischen Bogenlampe und einer Quecksilberlampe! Welche Methoden man in solchen Fällen anwendet, sei nicht weiter besprochen. Das Vorstehende mag genügen, es seien nur noch kurz einige praktisch wichtige Bezeichnungen erläutert. Unter Beleuchtung einer Fläche versteht man die Lichtmenge, die sie empfängt; sie hat die Beleuchtung 1, wenn sie von einer Hefnerkerze in 1 m Abstand getroffen wird. Man bezeichnet diese Beleuchtung als 1 Lux oder 1 Meterkerze. Eine kleine Fläche, die von einer 50kerzigen Glühlampe aus 3 m Abstand beleuchtet wird, hat also die Beleuchtung $\frac{50}{3^2} = 5{,}5$ Lux. Ein Körper, der Licht aussendet, oder durch Reflexion weitergibt, hat die Einheit der **Flächenhelle**, wenn ein Quadratzentimeter seiner Oberfläche eine Helligkeit von einer Hefnerkerze hat, wohlverstanden, senkrecht zu dieser Oberfläche gemessen! Bedecken wir die Fläche obigen Beispieles mit schwarzem Papier, das einen Ausschnitt von 1 qcm hat, und messen wir die Lichtstärke dieser Fläche, die sich zu 4,0 Kerzen ergeben möge, so sieht man also, daß die Fläche nicht alles Licht, das sie erhält, wieder zurückwirft, sondern nur $\frac{4{,}0}{5{,}5}$ oder 73 Prozent des Lichtes. Man nennt diese 73 Prozent die **Albedo** der Fläche. Ein vollkommen reflektierender Körper hat die Albedo 1, ein vollkommen absorbierender, der uns als schwarz erscheint, die Albedo 0.

Endlich ist bei photometrischen Messungen in der Praxis von Wichtigkeit, daß die verschiedenen Lichtquellen nicht nach allen Seiten ihr Licht gleichmäßig aussenden. Auf die verschiedenen Unterschiede der einzeln in der Praxis gebräuchlichen Leuchtmittel soll nicht eingegangen werden. Es genüge, zu erwähnen, daß die Hefnerlampe als Normal nur für ihre horizontale Lichtstrahlung gilt. In einer horizontalen Ebene strahlt sie nach allen Seiten gleichmäßig ihr Licht aus, während man leicht einsieht, daß es bei einer elektrischen Glühlampe mit schleifenförmigem Faden, oder einem Leuchtgas-Schnittbrenner nicht der Fall sein wird.

Ein Zusammenhang der Hefnerlampe mit anderen Maßeinheiten ist kaum feststellbar, oder eine Zurückführung der Hefnerkerze auf absolute Maße wird, man kann fast sagen, unmöglich sein. Es ist nämlich zu bedenken, daß für die Hefnerlampe ein physiologisches Moment in Frage kommt. Sie sendet Strahlen aller Art aus, Wärmestrahlen, chemisch wirksame Strahlen und Lichtstrahlen. Alle Strahlen sind Wellenbewegungen des Weltäthers, die sich nur so voneinander unterscheiden, daß sie verschiedene Wellenlängen haben. Die Wärmestrahlen sind die langwelligsten Strahlen, die Lichtstrahlen stehen in der Mitte, die chemisch-wirksamen Strahlen sind die mit kürzester Wellenlänge. Alle diese Strahlen führen als Wellenbewegung eine gewisse Energie mit sich, die wir messen können, wenn jene auf einen Körper auffallen, der sie alle verschluckt, absorbiert, und keine zurückwirft, reflektiert. Solche Körper kennen wir, es sind vollkommen schwarze Körper, und wir können die Energie der auf sie fallenden Strahlung messen, indem wir die Energiemengen messen, die sie absorbieren, diese wird in dem schwarzen Körper in Wärme umgesetzt und kann so einer exakten Messung zugänglich gemacht werden. Wie dieses geschieht, wird an anderer Stelle besprochen werden.

Diese Gesamtausstrahlung der Hefnerlampe interessiert uns aber für unsere Zwecke sehr wenig, denn von allen Strahlen, die sie aussendet, kommen photometrisch nur die in Frage, die sie als Licht aussendet, d. h. die Strahlen, die wir nach den physiologischen Eigenschaften unseres Auges als Licht wahrnehmen, also Strahlen, die etwa zwischen den Wellenlängen von 0,8 μ (äußerstes Rot) bis 0,3 μ (äußerstes Violett) liegen. Die anderen von ihr ausgehenden Strahlen sind physiologisch, als Lichtstrahlen bedeutungslos. Es ist nun schon sehr schwer festzustellen, von welcher Wellenlänge ab die Strahlen sich als Licht bemerkbar machen, und von wo ab sie als Lichtstrahlen nicht mehr zu betrachten sind. Man müßte also experimentell zur Messung der photometrisch wirksamen Lichtstrahlen diejenigen absondern, die außerhalb jenes Bereiches liegen, eine Aufgabe, die nicht leicht zu erfüllen ist, auch mit Rücksicht darauf, daß die Grenzen dieses Gebietes nicht feststehen. Das „mechanische Äquivalent der Hefnerkerze“, entsprechend wie das mechanische Äquivalent der Kalorie, kann also nicht wie jenes gemessen werden, ist nur mit sehr angenäherten Werten angebbar. Mißt man die Gesamtstrahlung der Hefnerlampe, so weiß man nicht, welcher Teil auf Lichtstrahlen entfällt; mißt man Teilstrahlungen, also Strahlungen im Gebiete bestimmter Wellenlängen, also z. B. von der Fraunhoferschen Linie *A* bis zur Linie *D* usw., so kann man aus den so gemessenen Energiebeträgen auch nicht ohne weiteres auf die photometrische Wirksamkeit einer Flamme schließen, und noch weniger sie aus solchen Messungen rekonstruieren, wie man es mit der Kalorie vermag. In dieser Weise steht die optische Einheit der Lichtstärke ganz vereinzelt unter allen physikalischen Maßeinheiten, und es bleibt abzuwarten, ob einmal später auf anderem Wege eine neue Lichteinheit gefunden werden wird, die energetisch genau definierbar ist. Die ersten Anfänge dazu liegen bereits vor. Sie führen uns aber von unserem eigentlichen Thema zu weit ab.

Wenn auch die photometrischen Messungen unter den übrigen physikalischen Messungen etwas abgesondert dastehen, so gibt uns doch die Optik eine ungeheuer wichtige Maßeinheit an die Hand, die von größter Bedeutung ist. Es ist die Lichtwelle. Das Licht ist eine Wellenbewegung des unendlich feinen, überall anwesenden Lichtäthers, wobei die Lichtstrahlen verschiedener Farbe durch die Wellenlänge dieser Ätherschwingungen genau definiert sind.[1] Beobachten wir im Spektralapparat das Spektrum verschiedener Körper, so finden wir, daß leuchtende Gase, z. B. in den bekannten Geißlerröhren, Spektren aussenden, die durch feine leuchtende Linien, die Fraunhoferschen Linien, gebildet sind. Jedes bessere Physikbuch gibt die Abbildungen solcher Spektren. Jeder Linie entspricht eine ganz genaue Wellenlänge im metrischen Maß. Nachstehend sollen einige Wellenlängen von Fraunhoferschen Linien des Sonnenspektrums mit ungefähren Werten und ihren Lagen im Spektrum angegeben werden.

A	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*	*G′*	*G*	*H*
0,760 μ	0,687 μ	0,656 μ	0,589 μ	0,527 μ	0,486 μ	0,432 μ	0,431	0,397 μ
rot	hellrot	rotgelb	gelb	gelbgrün	blaugrün	blau		violett

Nach diesen Angaben wird es möglich sein, später die ungefähre Farbe der Linie nach ihrer Wellenlänge festzustellen. Wie man sieht, sind die Wellenlängen recht kurz und bei den hellsten Linien, den gelben bis grünen, gehen etwa 2000 auf ein Millimeter. Für jede einzelne Linie ist nun ihre Lage im Spektrum genau angebbar, wenn man die umliegenden Linien berücksichtigt, und für jeden Stoff sind

1) Über die Wellennatur des Lichtes und die Interferenzen vgl. auch ANuG. 17, A. Graetz: Das Licht und die Farben. 3. Aufl., S. 53.

besondere Linien charakteristisch. Man hat nun keinen Grund zu der Annahme, daß die Wellenlängen dieser Linien irgendwie veränderlich sind, kann vielmehr mit einer an Gewißheit grenzenden Sicherheit annehmen, daß sie unveränderlich sind, und, da sie an nichts Materielles gebunden sind, auch zeitlich unveränderlich sind, eine Eigenschaft, die man gewöhnlicher Materie nicht ohne weiteres zuschreiben kann. Auf Grund solcher Überlegungen kam man zu der Einsicht, daß man in der Lichtwelle ein Längennormal idealster Art zur Verfügung hat, das einmal zur Kontrolle der Unveränderlichkeit der materiellen Maße dienen kann, und dann weiterhin auch für Meßzwecke vorzüglich verwendbar ist.

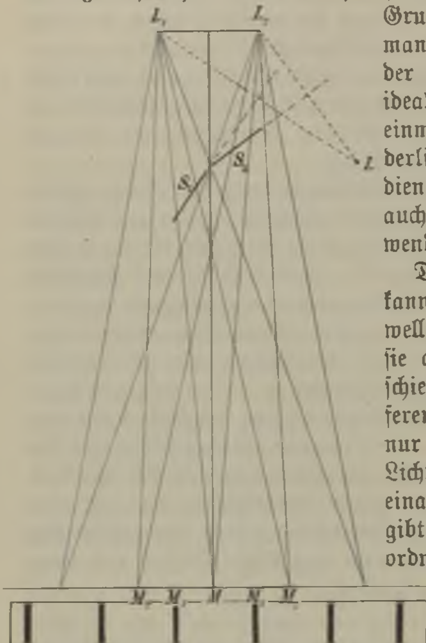

Abb. 18. Erzeugung von Lichtinterferenzen.

Die ganze Frage ist nun die, wie kann man mit der unsichtbaren Lichtwelle messen? Zunächst muß man sie also sichtbar machen. Das geschieht durch das Mittel der Interferenzen, das im Grunde genommen nur darin besteht, zwei getrennte Lichtstrahlen in geeigneter Weise miteinander zu vereinigen. Die Abb. 18 gibt eine von Fresnel erdachte Anordnung dazu, den sog. Fresnelschen Winkelspiegel. Zwei Spiegel S_1 und S_2 stoßen in einem sehr kleinen Winkel aneinander, und vor ihnen ist ein leuchtender Spalt L aufgestellt. Von ihm entstehen in den beiden Spiegeln zwei nahe aneinander liegende Bilder L_1 und L_2, die man als Ausgangspunkte von zwei Lichtwellenbewegungen auffassen kann. Auf dem Schirm kann dann die Wirkung der beiden Wellenbewegungen aufeinander beobachtet werden. Wie im Wasser zwei Wellenzüge miteinander interferieren, indem zwei Wellenberge und zwei Wellentäler sich verstärken, und Wellenberg und Wellental sich gegenseitig aufheben, so ist es auch bei der Lichtwelle. In der Mitte M haben die Lichtwellen immer genau den gleichen Weg zurückgelegt, es wird also dort immer Wellenberg mit Wellenberg, und Wellental mit Wellental zusammentreffen, die Mitte wird immer hell bleiben. Nach beiden Seiten zu wird endlich ein Punkt M_1 kommen, wo stets immer nur Wellenberg und Wellental zusammentreffen, d. h. der Punkt, der von dem einen leuchtenden Punkt eine halbe Wellenlänge weiter entfernt ist als vom anderen. Dort wird es immer dunkel sein, indem beide Wellenzüge sich vernichten. Dann kommt wieder ein Punkt M_2, der von dem einen leuchtenden Punkt eine ganze Wellenlänge weiter entfernt ist als vom anderen. Dort wird es wieder dauernd hell sein, dann bei Punkten, die $1\frac{1}{2}$ Wellenlängen Wegdifferenz haben, wieder dunkel usw. Das Bild, das wir auf dem Schirm erhalten, wird also aus einer Reihe von hellen Stellen, unterbrochen von dunklen Streifen bestehen, wie es in der Abbildung angedeutet ist. Der Abstand des Streifen muß von der Farbe des verwendeten Lichtes abhängen, und muß bei Licht größerer Wellenlänge größer sein als bei Licht kleinerer Wellenlänge. Jeder kann sich Interferenzstreifen leicht erzeugen, z. B. an Seifenblasen, wo die leuchtenden Farben durch Interferenz des Lichtes entstehen, das an der Vorderseite und an der Rückseite der dünnen Seifenhaut reflektiert wird. Es sind die sog. Farben dünner Blättchen. Oder man legt zwei gut ebene Glasplatten, oder eine Glasplatte auf eine ebene polierte Metallplatte mit sanftem Druck herauf, so entstehen schon bei Tageslicht, also bei Licht verschiedener Wellenlängen, besser aber noch bei einfarbigem Licht Interferenzkurven durch Reflexion an den beiden Grenzflächen der von den Platten eingeschlossenen Luftschicht. Die Kurven sind die Kurven gleicher Dicke dieser Luftschicht.

Wie man gesehen hat, ist bei dieser Sichtbarmachung der Wellenlänge die Einheit stets die halbe Wellenlange. Um indessen überhaupt Interferenzen von Lichtstrahlen zu erhalten, muß zwei Bedingungen genügt werden: Zunächst interferieren nicht zwei beliebige Lichtstrahlen gleicher Farbe miteinander, sondern die Strahlen müssen voneinander abhängig sein. Es muß also ein ursprünglicher Strahl in zwei zerlegt werden, die dann zur Interferenz kommen (Fall der Seifenblasen oder der Kurven gleicher Dicke) oder die beiden Strahlen müssen von der gleichen Lichtquelle ausgehen (leuchtender Spalt beim Fresnelschen Spiegel). Weiter müssen die Lichtstrahlen genügend homogen sein, d. h. sie müssen nur aus Strahlen einer ganz bestimmten Wellenlänge bestehen; die meisten Lichtstrahlen genügen dieser Bedingung nicht, sondern bestehen aus Wellenzügen verschiedener, nahe gleicher Wellenlänge. Dann werden sich die Interferenzen dieser einzelnen Wellenzüge übereinander lagern und ein schlechtes oder überhaupt kein Interferenzbild geben. Diese Bedingung ist von besonderer Wichtigkeit, wenn es sich um Interferenzen von zwei Strahlen handelt, die sehr verschiedene Wege zurückgelegt haben, wo der Weg des einen um mehrere tausend bis Millionen Wellenlängen länger ist als der des anderen, und es gibt nur sehr wenige Lichtarten, die so genügend homogen sind, daß sie für praktische Anwendung in der Metronomie Verwendung finden können.

Der erste Schritt müßte also sein, geeignete Lichtquellen ausfindig zu machen, die über lange Gangunterschiede scharfe Interferenzen geben. Der Amerikaner Michelson, dem wir die in folgendem dargestellte Untersuchung verdanken, fand dafür das Licht einer Geißlerröhre, die mit Kadmiumdämpfen gefüllt ist. (Kadmium ist ein Metall, das chemisch dem Zink sehr ähnlich ist.) Das Spektrum von Kadmium besteht aus hauptsächlich 4 Linien, einer roten mit 0,644 μ Wellenlänge, einer grünen mit 0,509 μ, einer blauen mit 0,480 μ und einer violetten mit 0,468 μ Wellenlänge, die über genügend weite Strecken bis zu 20 cm Länge Interferenzen geben. Neuerdings ist von Stratton festgestellt, daß Röhren, die mit dem seltenen Edelgase Neon gefüllt sind, auf noch längere Strecken Interferenzen liefern.

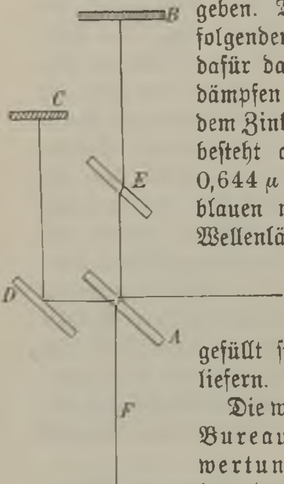

Abb. 19. Schema des Michelsonschen Interferometers.

Die wichtige von Michelson im Internationalen Bureau ausgeführte Arbeit besteht nun in der Auswertung der Meterlänge in Wellenlängen. Wie kann das nun ausgeführt werden? Eine schematische Anordnung seiner Methode gibt Abb. 19. Das von rechts kommende Licht fällt auf eine Glasplatte A, die schwach versilbert ist, so daß sie ebensoviel Licht durchläßt wie reflektiert, und teilt es in zwei Strahlen, der eine wird nach dem Spiegel B gelenkt, dort zurückgeworfen, und ein Teil dieses Lichtes gelangt dann durch die Glasplatte nach dem Beobachtungsfernrohr in F. Der zweite Teil gelangt über den Hilfsspiegel D nach dem Spiegel C und dann wiederum ein Teil ebenfalls nach F. Die Glasplatte E ist eingeschaltet, um beide Strahlen den gleichen Weg im Glas zurücklegen zu lassen. Die beiden in das Fernrohr gelangenden Strahlen können also miteinander interferieren, und die hier entstehenden Interferenzen können zur Messung benutzt werden. Michelson stellte sich neun „Maßstäbe“ der Form, wie sie Abb. 20 darstellt her. Wie man sieht, bestehen sie aus zwei Spiegeln (A, A′), die genau parallel sind. Der längste dieser Maßstäbe besaß 10 cm Spiegelabstand und trug seitwärts eine Strichmarke zur mikrometrischen Einstellung. Die Länge der einzelnen Maßstäbe war $2^{-8} \cdot 10\,\mathrm{cm} = 0{,}039\,\mathrm{cm}$, $2^{-7} \cdot 10\,\mathrm{cm}$, $2^{-6} \cdot 10\,\mathrm{cm}$ usw., $2^{-1} \cdot 10\,\mathrm{cm} = 5\,\mathrm{cm}$ und der oben erwähnte von 10 cm, jeder also doppelt so lang als der vorhergehende. Ein Schema der Versuchsordnung, in Übereinstimmung mit der Abb. 19 gibt die Abb. 21. Zuerst wurde der kleinste Maßstab in den Beobachtungsapparat gestellt und so einreguliert, daß sein unterer Spiegel, die Stelle des Spiegel B der Abb. 19 einnehmend, optisch mit dem Spiegel C, der „Referenzebene" zur Deckung gebracht war, d. h. also, daß die Lichtwege vom Spiegel nach dem Maßstabspiegel und der Referenzebene gleich lang waren. Daß diese Bedingung erfüllt war, konnte man an dem Aussehen der Interferenzstreifen feststellen. Nun wurde die Referenzebene nach rückwärts verschoben.

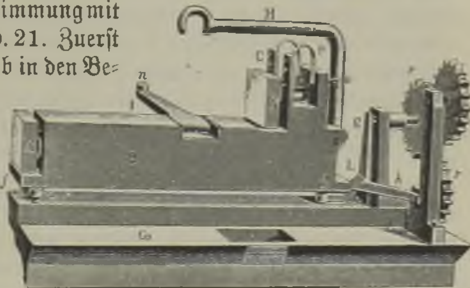

Abb. 20. Michelsonscher Maßstab von 10 cm Länge.

Für jede Verschiebung um eine halbe Wellenlänge des Kadmiumlichtes wanderte dann im Gesichtsfelde des Fernrohres ein Streifen vorbei, diese wurden gezählt und die Referenzebene so lange verschoben, bis sie optisch mit dem hinteren Spiegel zur Deckung gebracht war. Dann kannte man den Abstand der beiden Spiegel des Maßstabes in Wellenlängen. Vielfache Wiederholungen ergaben, daß seine Länge 1212 halbe Wellenlängen der roten Kadmiumlinien betrug. So viele Streifen waren vorbeigewandert. Wie man sieht, ist es schon eine schwere Aufgabe diese Streifen zu zählen.

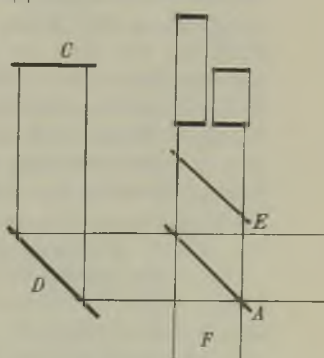

Abb. 21. Die Michelsonsche Versuchsanordnung.

Nun werden der kürzeste und der doppelt so lange Maßstab nebeneinander in den Apparat gestellt, wie es die Abb. 21 angibt, und diese beiden miteinander verglichen. Dazu sind folgende Einstellungen nötig: I. Beide vorderen Spiegel werden mit der Referenzebene optisch in Kontakt gebracht. II. Die Referenzebene wird verschoben, bis sie mit dem hinteren Spiegel des kürzeren Maßstabes optisch zusammenfällt.

III. Dieser wird verschoben, bis bei der jetzigen Stellung der Referenzebene sein vorderer Spiegel mit ihr zusammenfällt. IV. Die Referenzebene wird weiter nach hinten verschoben, bis sie mit dem hinteren Spiegel des kürzeren Maßes optisch zusammenfällt. Wie man leicht einsieht, muß sie das dann auch in großer Annäherung mit dem hinteren Spiegel des längeren Maßes tun, der Unterschied läßt sich leicht messen, und so kann man die genaue Länge des zweiten Maßstabes feststellen, unter Zuhilfenahme der bekannten Länge des ersten Maßstabes, ohne sich erst der schwierigen Arbeit des Zählens von rund 2400 Streifen zu unterziehen. So geht die Messung fort bis man zu dem Maßstab von 10 cm gelangt. Dieser trägt die Strichmarke und wird zehnmal verschoben, jedesmal unter Zuhilfenahme der Referenzebene in folgender Weise: I. Sein vorderer Spiegel wird mit der Referenzebene zur optischen Deckung gebracht. II. Diese wird verschoben, bis sie mit dem hinteren Spiegel zur Deckung gelangt. III. Der Maßstab wird verschoben, bis sein vorderer Spiegel mit jener zur Deckung kommt, usw. Dieses wird zehnmal wiederholt, und die Strichmarke hat dann einen Weg von rund einem Meter zurückgelegt. Vermittels Mikrometermikroskopen wird die Strichmarke in der ersten Stellung mit dem Anfangsstrich eines Meterstabes verglichen, und ebenso in ihrer letzten, zehnten Stellung. Die Länge des Spiegelmaßstabes von rund 10 cm Länge kennt man nun aus den vorhergehenden Messungen in Wellenlängen, man weiß also auch, wieviel Wellenlängen der zehnfachen Verschiebung entsprechen. Gleichzeitig hat man diese Verschiebung in metrischem Maß ausgemessen und so kennt man den Zusammenhang zwischen metrischem Maß und Lichtwellenlängen. Michelson fand folgendes:

Die Länge von 1 m wird dargestellt durch

	1 553 163,5	Wellenlänge der	roten	Kadmiumlinie
oder	1 966 249,7	„ „	grünen	„
oder	2 083 372,1	„ „	blauen	„

oder in anderer Weise:

Die Wellenlänge der	roten	Kadmiumlinie ist	0,64384722 μ
„ „ „	grünen	„ „	0,50858240 μ
„ „ „	blauen	„ „	0,47999107 μ.

Dieses wichtige Ergebnis ist die Frucht dieser umfangreichen mühevollen Untersuchungen, deren Schwierigkeiten aus diesen kurzem Bericht wohl nicht zu ersehen sind. Es ist damit das Meter in Verbindung mit einem Naturmaß gebracht, das wir im Gegensatz zu dem Erdumfang als ein wirklich unveränderliches Naturmaß betrachten können, und dessen Verwendung unendlich viel leichter ist als jenes.

Damit ist selbstverständlich die Entwickelung nicht abgeschlossen. Ein so wichtiges Ergebnis muß nachgeprüft werden, und es muß mit den Ergebnissen anderer Meßmethoden verglichen und weiter muß festgestellt werden, ob nun die Meterlänge, wie sie durch den Platiniridiumstab dargestellt wird, auch wirklich unveränderlich ist. Nach 7 Jahren wurde deswegen eine neue ebenso umfassende Messungsreihe angestellt. nach einer neuen Methode, die sich wesentlich von jener Michelsonschen unterschied und von Perot und Fabry herrührt. Die Arbeit selbst wurde von diesen beiden Gelehrten und Benoît, dem Direktor des Internationalen Bureaus, ausgeführt.

Bei der Michelsonschen Methode war der Länge der Maßstäbe mit 10 cm insofern eine Grenze gesetzt, als der Wegunterschied von 20 cm, der hierbei für einen Strahl herauskam, das äußerste war, bei dem die Kadmiumlinien Interferenzen geben. Ein Auszählen von Interferenzen ist außerdem auch äußerst schwierig, so daß auch darin der Methode Grenzen gesteckt sind. Perot und Fabry benutzten nun einen Kunstgriff, um die Kadmiumwellen auch über längere Strecken zur Interferenz zu bringen, indem sie die beiden Wege für beide Strahlen gleich lang machten. Sie stellten sich einen Maßstab von 1 m Länge her, der U-förmigen Querschnitt besaß, und der an beiden Enden mit Glasplatten verschlossen war, also Trogform hatte; oben auf der schmalen Kante der Glasplatten waren die Meterstriche gezogen. Außerdem stellten sie sich Hilfsmaße in gleicher Art von 50 cm, 25 cm, 12,5 cm und 6,25 cm Länge her. Zur Messung wurden nun der kürzeste und der vorletzte, so wie es Abb. 22 schematisch angibt, hintereinander gestellt, und ein Lichtstrahl hindurchfallen gelassen. An den vier inneren Glasflächen finden dann die verschiedenfachsten Reflexionen statt. Bezeichnen wir die Glasplatten des kürzesten Maßes mit I und II, und die des längeren mit III und IV, so kommen folgende Strahlen z. B. zur Interferenz. Der durch I hindurchgehende, an II reflektierte, dann von I, wieder von II und endlich von I nochmals reflektierte, der dann durch II, III und IV hindurchgeht, und der Strahl, der durch I, II und III hindurchgeht, von IV nach III reflektiert wird, und von III durch IV hindurchgeht. Da der Abstand III IV rund das Doppelte von I II ist, und in diesem eine vierfache, in jenem eine doppelte Reflexion stattfindet, ist die Weglänge beider Strahlen nahezu gleich, sie interferieren also sehr gut miteinander. So kann man jeden

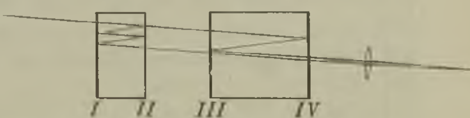

Abb. 22.
Schema der Versuche von Perot, Fabry und Benoit.

Maßstab mit dem nächst größeren vergleichen. Der kürzeste wurde ähnlich wie bei der Michelsonschen Anordnung direkt ausgezählt, aber nicht wie dort die einzelnen Interferenzstreifen, was kaum möglich gewesen wäre, sondern es wurden zwei Lichtstrahlen, von roter und grüner Farbe gleichzeitig angewendet, deren Interferenzen also gleichzeitig sichtbar waren. (Zur Erläuterung sei bemerkt, daß ein roter und ein grüner Strahl zusammen niemals Interferenzen geben können, weil ihre Wellenlängen zu verschieden sind.) Und man zählt nun nicht die Interferenzen selbst, sondern die Stelle, an denen ein roter und ein grüner Interferenzstreifen zusammenfiel, ein Fall, der sich selbstverständlich in gewissen Abständen wiederholen muß und etwa nach je fünf bis sechs roten Streifen eintritt. Man kann das durch eine kleine Rechnung leicht feststellen. Es falle ein roter und ein grüner Streifen genau zusammen; gelangt man dann zu dem fünften folgenden roten Streifen, so hat man damit einen Weg zurückgelegt von $5 \cdot \frac{0{,}64}{2}\,\mu$, wo $0{,}64\,\mu$ die Wellenlänge des roten Lichtes ist, oder $1{,}60\,\mu$; sechs Streifen im grünen Licht sind ebenso $6 \cdot \frac{0{,}51}{2}\,\mu$, oder $1{,}53\,\mu$. Man sieht also, daß fünf rote Streifen angenähert sechs grünen gleichkommen, womit obiges bewiesen ist. Die Interferenzstreifen bilden gewissermaßen einen langen Maßstab, wobei jeder Streifen gleichsam ein Teilstrich ist. Und wie bei einem gewöhnlichen Maßstab eine Unterteilung und Unterscheidung der einzelnen Striche durch verschieden lange Striche vorgenommen ist, so dient dafür bei Interferenzen das Zusammenfallen von Interferenzstreifen verschiedener Lichtfarben. Das Schema der Abb. 23 wird dieses veranschaulichen. Jeder der Streifen 1 bis 3 ist sozusagen ein Maßstab. Mit I sind die Stellen bezeichnet, an denen Striche des Streifen 1 und 2 fallen, mit II, wo Striche von 2 und 3, mit III, wo Striche von 1 und 3 zusammenfallen. Man sieht, wie diese Stellen sich in gewissen regelmäßigen Abständen wiederholen. Das Zusammenfallen aller drei Streifen, mit I, II, III bezeichnet, gibt endlich noch eine letzte Einteilung mit dem weitesten Zwischenraum. So würden die Interferenzen der Wellenlängen $0{,}4\,\mu$, $0{,}5\,\mu$ und $0{,}6\,\mu$ zusammenfallen. Das Zusammenfallen aller drei Farben wiederholt sich nach je 15 halben Wellenlängen der Länge $0{,}4\,\mu$, d. h. nach je $3{,}0\,\mu$. In der praktischen Anwendung, wobei

Abb. 23. Schema einer Wellenlangenskala.

die Wellenlängen nicht so einfache runde Zahlen sind, tritt ein solches Zusammenfallen natürlich nicht in so kurzen Abständen ein, was die Anwendung noch bequemer macht. Außerdem muß man bei allen Messungen mit optischen Interferenzen berücksichtigen, daß man fast stets die auszumessenden Entfernungen mit großer Annäherung kennt, und daß die Interferenzen mit dazu dienen, einen merklich genaueren Wert zu finden, als dieser bereits bekannte es ist. Man ist also fast stets in der Lage, die Interferenzbilder, die Anzahl der Streifen usw. vorher mit großer Annäherung auszurechnen, ein Umstand der die Arbeiten sehr erleichtert. Nehmen wir als Beispiel den oben erwähnten Fall, wo ein Zusammenfallen aller Interferenzenstreifen alle 3 μ eintritt. Kennt man also die zu messende Strecke auf etwa 1—2 μ genau, was nicht allzu schwer festzustellen ist, so braucht man nur einmal die Lage der Interferenzen zueinander zu messen, um die wirkliche Länge auf einige hunderstel μ genau zu erhalten. So bestimmten jene Beobachter zuerst die Wellenlängenzahl im kleinsten Maßstab und dann durch Vergleichung mit dem nächstgrößeren fortschreitend die Wellenzahl in dem 1 m-Maßstab, wie man sieht auf eine im Vergleich zu der Michelsonschen Anordnung viel einfacherer Weise. Als Hilfsgröße wurde dann noch der Strichabstand auf den beiden Glasplatten gemessen, wenn diese direkt zusammengelegt wurden, und endlich wurde der 1 m-Maßstab mit einem Normalmeter mikrometrisch verglichen. Als Resultat ergab sich für die rote Kadmiumlinie die Meterlänge zu 1553164,13 Wellenlängen. Vergleiche man nun diesen Wert mit dem Michelsonschen. Jener muß, um mit ihm verglichen werden zu können, noch eine kleine Korrektion erfahren, um beide Werte auf gleiche Luftfeuchtigkeit zu reduzieren und wird dann 1553164,03. Er weicht von ihm nur um 0,10 Wellenlängen, d. h. 0,06 μ ab, ein Unterschied, der durch die zufälligen Beobachtungssicherheiten mehr wie genug erklärt ist. Man kann also sagen, daß beide Messungsreihen, die in einem Abstand von rund 7 Jahren ausgeführt sind, nach ganz verschiedenen Methoden, genau den gleichen Wert ergeben haben. Man kann also einmal daraus schließen, daß in dieser Zeit eine meßbare Veränderung der Meterlänge nicht eingetreten ist. Weiter kann man aber auch schließen, daß die optischen Methoden ausreichend sind, um die Meterlänge mit der Genauigkeit zu reproduzieren wie es erforderlich ist. Wir haben oben auf S. 35 gesehen, daß die Meterlänge auch als Strichmaß bestimmt ist, das die Strecke von einem Meter auf etwa 0,1 μ genau ist. Eine größere Genauigkeit ist nach der Definition des Meters ausgeschlossen, aber die optischen Methoden genügen für diese Genauigkeit, ja sie würden noch eine höhere Genauigkeit zulassen, wenn es für Meßzwecke erforderlich sein sollte. Das ist bei allen Messungen zu beachten, daß man die Genauigkeit nicht höher treiben soll als unbedingt notwendig ist, und bis jetzt ist in der Wissenschaft kein Grund vorhanden, genauere Messungen anzustellen, als nach der jetzigen Definition der Maßeinheiten möglich ist.

Neben diesen Längenmessungen sind auch die Lichtwellen zu andern Messungsreihen größter Wichtigkeit benützt. Wir haben oben auf S. 51 die Messung von Guillaume besprochen, bei der er die Masse eines Kubikdezimeters Wasser bestimmte, und den dazu erforderlichen Körper mittels Kontakteinrichtungen mikrometrisch ausmaß. Es lag nun der Gedanke nahe, diesen Körper mittels Wellenlängen auszumessen, und damit in der Genauigkeit weiter zu kommen. Dieses wurde zuerst von Chappuis ausgeführt, der dazu in der Hauptsache den Michelsonschen Apparat verwendete. Er stellte sich zu diesem Zwecke vier sehr genau gearbeitete Würfel aus Glas her, die etwa 4, 5 und 6 cm Kantenlänge hatten. Die „Maßstäbe" des Michelsonschen Apparates ersetzte er durch einen einzigen großen Spiegel, vor den er den zu messenden Würfel aufstellte. Um nun seine Dicke auszumessen, brauchte er nur den Abstand dieses Spiegels von der hinteren ihm ganz nahe befindlichen Würfelseite zu messen und von der entgegengesetzten vorderen, also 4, 5 oder 6 cm weiteren Fläche. Er benutzte dazu, genau wie Michelson die verschiebbare Referenzebene des Apparates. Es bedarf weiter wohl keiner Erläuterung, wie die Messung im einzelnen ausgeführt werden mußte. Die Würfel wurden natürlich an verschiedenen Punkten in allen drei möglichen Richtungen gemessen, denn es ist wohl selbstverständlich, daß ein solcher Würfel niemals mathematisch richtig hergestellt werden kann. Sodann wurden dann diese Würfel, wie früher beschrieben, in Wasser und in Luft gewogen, und danach dann das Volumen eines Kilogramms Wasser berechnet. Um zu zeigen, bis zu welcher Genauigkeit diese Versuche zu führen sind, seien die Resultate genauer mitgeteilt:

Der Würfel von 4 cm Kantenlänge ergab das Volumen von 1 kg Wasser bei 4° C und 760 mm Barometerstand zu 1,0000287 cdm

der von 5 cm vor endgiltiger Bearbeitg. seiner Flächen zu	1,0000269	„
aus der ersten Messungsreihe	1,0000211	„
aus der zweiten Messungsreihe	1,0000216	„
nach nochmaliger Bearbeitung	1,0000269	„
der von 6 cm Kantenlänge	1,0000304	„

Im Mittel ergab sich also 1,000026 cdm.

Eine Messungsreihe nach einer andern Methode ist dann noch von Macé de Lépinai, Buisson und Benoît ausgeführt. Sie verwendeten zwei Würfel aus Quarz, von 4 und 5 cm Kantenlänge. Sie gingen zur Ausmessung dieser nach einer ganz andern Methode vor. Zur Erläuterung dieser muß eingeschaltet werden, daß die Lichtwellen nur im Vakuum absolut konstante Längen sind, im übrigen hängen diese Längen von dem Medium ab, in dem jene sich fortpflanzen; gehen wir von jener Wellenlänge im Vakuum aus, so muß man, um ihre Längen in Luft zu erhalten, diese Zahl mit dem Quotienten der Lichtgeschwindigkeiten im Vakuum und in der Luft multiplizieren, oder in einer ganz einfachen Formel dargestellt:

$$\begin{matrix}\text{Wellenlänge}\\ \text{im Vakuum}\end{matrix} = \begin{matrix}\text{Wellenlänge}\\ \text{in Luft}\end{matrix} \times \frac{\text{Lichtgeschwindigkeit im Vakuum}}{\text{Lichtgeschwindigkeit in Luft.}}$$

Das gleiche gilt für alle Stoffe, durch die Licht hindurchdringen kann. Den Bruch rechts nennen wir den Brechungsexponenten der Luft in bezug auf das Vakuum. Genau wie oben ist nun auch

$$\begin{matrix}\text{Wellenlänge}\\ \text{in Luft}\end{matrix} = \begin{matrix}\text{Wellenlänge}\\ \text{in Quarz}\end{matrix} \times \frac{\text{Lichtgeschwindigkeit in Luft}}{\text{Lichtgeschwindigkeit in Quarz.}}$$

Der Bruch ist wieder der Brechungsexponent im Quarz, dieses Mal in bezug auf Luft. Diese Brechungsexponenten lassen sich nun nach verschiedenen Methoden bestimmen, und zur Erläuterung sei bemerkt, daß der für Luft etwa 1,00029 ist, der für Quarz etwa 1,6 ist. Bei dieser Untersuchung sollten nun die Interferenzen von zwei Strahlen entstehen, die an zwei gegenüberliegenden Würfelflächen reflektiert werden. Deswegen mußten sie notgedrungenerweise sich zum Teil im Quarz selbst bilden, also von seinem Brechungsexponenten abhängen. Um diesen zu bestimmen, wurden zwei verschiedene Interferenzerscheinungen beobachtet und gemessen. Zunächst wurde ein Strahlenbündel senkrecht auf die eine Würfelfläche fallen gelassen, und ein Teil wurde hier sofort reflektiert, ein anderer drang in den Würfel ein, und wurde zum Teil an der gegenüberliegenden Fläche reflektiert, und interferierte dann mit dem ersten reflektierten Bündel; das gab die eine Interferenzerscheinung, wobei die Anzahl der Wellen im Quarz vollständig von dessen Brechungsexponenten abhängt. Die zweite Interferenzerscheinung wurde so erhalten, daß ein Strahlenbüschel senkrecht auf eine Würfelfläche geworfen wurde, aber so, daß ein Teil am Würfel außen vorbeiging. Dann interferierte der außen vorbeigehende Teil, der unbeeinflußt vom Würfel war, mit dem durch den Würfel hindurchgehenden Teil und bildeten als Interferenzfigur die sogenannten Talbotschen Streifen. (Es sei bemerkt, daß die Talbotschen Streifen kein reines Interferenzphänomen, sondern tatächlich etwas anderer Art sind. Schwierigkeiten mathematischer Art verbieten indessen hier die Erläuterung. Im vorliegenden Fall können sie ohne Fehler als Interferenzen aufgefaßt werden.) Durch Beobachtung der Streifenläge bei verschiedenen Farben konnten dann wieder die Entfernungen der Würfelflächen gemessen, und damit der Rauminhalt bestimmt werden. Die Methode unterscheidet sich noch insofern wesentlich von der Anordnung von Chappuis, als hier nur die Messung der Würfeldicke ganz in der Nähe des Randes vorgenommen werden konnte. Indessen wurde auch nach der Mitte der Würfelflache zu die Dicke nachgeprüft werden, um festzustellen, ob dort keine merklichen Abweichungen vorhanden sind. — An diese optische Messung schloß sich dann wieder die Wägungsreihe genau wie früher. Man erhielt jetzt für den Würfel mit 4 cm Kantenlänge als Volumen

von 1 kg Wasser bei 4^0 C und 760 mm Druck 1,0000259
für den mit 5 cm Kantenlänge 1,0000271

im Mittel also 1,000027.

Vergleicht man nun die drei vorliegenden Werte von Guillaume zu 1,00029, Chappuis zu 1,000026 Macé de Lepinai, Buisson und Benoît zu 1,000027, so wird man sagen, daß die Übereinstimmung mit Rücksicht auf die ganz bedeutenden Schwierigkeiten der Messungen ganz vorzüglich ist. Man kann sagen, daß nach dem mittleren Ergebnis aller Messungen das Kilogramm dargestellt ist als Masse eines Würfels Wasser in seinem Zustande größter Dichte und bei 760 mm Barometerstand von 1,000028 cdm Inhalt, oder einen Würfel von 1,000009 dm, oder 100,009 mm Kartenlänge. Der Würfel weicht also nur um 9 μ von dem urspünglichgeplanten Definitionswert ab, ein Beweis dafür, wie sorgfältig, trotz der im Vergleich zu den heutigen sehr primitiven Hilfsmitteln, von Lefevre-Gineau und Fabbroni gearbeitet war.

Aber noch eines ist dabei zu bedenken. Das Internationale Kilogramm ist auf etwa $^1/_{100\,000\,000}$ seines Wertes zuverlässig. Diese hier besprochenen Messungen, die es auf die Längeneinheit zurückführen, sind erst auf etwa $^1/_{1\,000\,000}$ genau, also etwa 100 mal ungenauer. Um diesen Zusammenhang mit der gleichen Genauigkeit zu bestimmen, wird also noch eine gewaltige Arbeit nötig sein, wenn man nicht überhaupt sagt, daß eine genaue Kenntnis dieses Zusammenhanges nur theoretisches Interesse hat. Aber jede Länge kann nicht genauer als auf $^1/_{10\,000\,000}$ etwa ihres Wertes bestimmt werden, das liegt in der Meterdefinition, also das Volumen eines Würfels nicht genauer als auf etwa $^3/_{10\,000\,000}$, und da man eben mit den Längenmessungen nicht weiter kommen kann, so ist tatsächlich statt der 100 fachen Genauigkeit nur noch die 3 fache erforderlich, um alles zu leisten, was überhaupt möglich ist; und dieser kleine Sprung dürfte leicht erreichbar sein, wenn die Versuche einmal wiederholt werden sollten.

Damit wollen wir das Kapitel über die optischen Maße und Messungen abschließen.

Elektrische Maße und Messungen.

Bei der Besprechung der elektrischen Maßeinheiten wollen wir von den absoluten Einheiten ausgehen. Die grundlegende Einheit ist hier die Elektrizitätsmenge, das Quantum elektrischen Fluidums, wenn man so sagen darf, das sich in einem elektrisch geladenen Körper befindet. Die Anwesenheit und die Wirkungen der Elektrizität können wir nur aus ihren Kraftäußerungen feststellen, wenn wir sehen, daß Körper angezogen oder abgestoßen werden, oder wenn sie in einem Funken die Luft durchschlägt. Zur Messung der Einheit müssen wir also auch eine Kraftäußerung anwenden, und so definieren wir als elektrostatische[1]) oder mechanische Einheit die Elektrizitätsmenge, die ein gleiches Quantum in der Entfernung 1 cm mit der Kraft 1 Dyn abstößt. Die Kraftäußerung der Elektrizität erfolgt nach dem Coulombschen Gesetze in gleicher Form wie die der Gravitation, d. h. also, im doppelten Abstand wirkt sie nur mit dem vierten Teil der Kraft, im dreifachen mit dem neunten Teil, usw. Eine Elektrizitätsmenge e wird also eine andere e_1, in der Entfernung r cm mit $\frac{e\,e_1}{r^2}$ Dynen abstoßen, oder, ist $e = e_1$ mit $\frac{e^2}{r^2}$ Dyn. Oder es ist in absolutem Maß $e^2 = r^2\,[\mathrm{cm\,g\,sec^{-2}}]$, oder $e = r\,[\mathrm{cm^{\frac{1}{2}}g^{\frac{1}{2}}sec^{-2}}]$, und für $r = 1$ cm, $e = [\mathrm{cm^{\frac{3}{2}}g^{\frac{1}{2}}sec^{-1}}]$. Das ist die Dimensionsformel der Einheit der Elektrizitätsmenge Die Praxis verwendet, da diese Einheit zu klein ist, eine andere, die $300 \cdot 10^8$ mal so groß ist, das Coulomb. Laden wir eine Kugel mit dem Halbmesser 1 cm mit der Einheit der Elektrizitätsmenge, so hat sie die elektrostatische Spannung 1, d. h. zwischen ihr und der Erde, der wir die Spannung 0, zuschreiben, herrscht die Spannungsdifferenz oder Potentialdifferenz 1. Wir konnen keine absoluten Spannungen messen, sondern stets nur Spannungsdifferenzen zweier Punkte gegeneinander, und ähnlich wie wir bei der praktischen Temperaturskala den Schmelzpunkt des Eises als Null bezeichnen, bezeichnen wir hier die Span-

1) elektrostatisch, weil die Maße von der Elektrizität im Ruhezustand ausgehen.

nung der Erde als Null. Eine elektrisch geladene Kugel, die die Spannung 1 hat, wird von der Erde mit einer gewissen Kraft angezogen, unabhängig, ob sie die Spannung + 1 oder — 1 hat, dieses Vorzeichen bestimmen wir aus der Qualität der elektrischen Ladung, indem wir, alter Gewohnheit folgend, die Glaselektrizität mit positiver, die Hartgummielektrizität mit negativer Elektrizität bezeichnen.

Zu dem wichtigen Begriff der Potentialdifferenz können wir auch noch auf einem anderen Weg gelangen Stellen wir uns ein elektrisches Quantum vor, so wird dieses auf jedes elektrische Einheitsquantum in seiner Umgebung eine (abstoßende oder anziehende) Kraft ausüben, je nach der Entfernung, in der es sich befindet. Das ganze nennen wir ein elektrisches Kraftfeld. Nehmen wir den Fall der abstoßenden Kraft, d. h. beide sind gleichnamig. Ist der Abstand der beiden Mengen r_1, und die erste Menge selbst q, so ist die abstoßende Kraft $\frac{q}{r_1^2}$, nähern wir das Einheitsquantum auf die Entfernung r_2, so wird die Kraft in diesem Punkte $\frac{q}{r_2^2}$ sein, bei der Näherung werden wir im Mittel die Kraft $\frac{q}{r_1 r_2}$ zu überwinden haben und nach Seite 48 die Arbeit $\frac{q}{r_1 r_2}(r_1 - r_2)$ zu leisten haben, worin $(r_1 - r_2)$ die Wegstrecke bedeutet, die wir zurückgelegt haben. Für jenen Ausdruck können wir auch $q\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}\right)$ schreiben. Nehmen wir nun an, daß das Einheitsquantum sich anfangs in sehr großer Entfernung von q befunden hat, so daß man also $\frac{1}{r_1}$ als Null betrachten kann, so wird die geleistete Arbeit $\frac{q}{r_2}$, und das nennen wir das Potential der Elektrizitätsmenge q an dem Punkte, der von ihr um r_2 Zentimenter entfernt ist, es ist also die Arbeit die erforderlich ist, das Einheitsquantum von unendlichen, bzw. einem Punkte mit dem Potential Null in die Entfernung r_2 von der Elektrizitätsmenge q zu befördern[1]). Analog nennen wir Potentialdifferenz die Arbeit, die erforderlich ist um das Einheitsquantum von der Stelle geringeren zu einer Stelle höheren Potentials zu bringen. Allgemein können wir also das Potential a von einem Punkte als den Quotienten aus der Elektrizitätsmenge und ihrem Abstand von diesem Punkte definieren. Seine Dimensionsformel wird demnach $\frac{\left[cm^{\frac{3}{2}} g^{\frac{1}{2}} sec^{-1}\right]}{[cm]} = \left[cm^{\frac{1}{2}} g^{\frac{1}{2}} sec^{-1}\right]$. Haben

1) Über den Zusammenhang zwischen Potential und Arbeit vgl. auch ANuG 257: A. Stein: Die Lehre von der Energie S. 114.

wir zwischen den Endpunkten einer Strecke die Potentialdifferenz v, und befördern wir das elektrische Quantum q über diese Strecke, so brauchen oder gewinnen wir die Arbeit $q \times v$. Auch hier ergibt sich die gleiche Dimensionsformel [Arbeit] $= [\mathrm{cm}^2\,\mathrm{g}\,\mathrm{sec}^{-2}] = \left[\mathrm{cm}^{\frac{3}{2}}\,\mathrm{g}^{\frac{1}{2}}\,\mathrm{sec}^{-1}\right] \times v$, oder $v = \left[\dfrac{\mathrm{cm}^2\,\mathrm{g}\,\mathrm{sec}^{-2}}{\mathrm{cm}^{\frac{3}{2}}\,\mathrm{g}^{\frac{1}{2}}\,\mathrm{sec}^{-1}}\right] = \left[\mathrm{cm}^{\frac{1}{2}}\,\mathrm{g}^{\frac{1}{2}}\,\mathrm{sec}^{-1}\right]$. Auch ohne weitere mathematische Erörterungen wird man daraus ersehen können, daß alle Definitionen auf das gleiche herauskommen. Das wichtigste dabei ist jedenfalls die Erkenntnis, daß es sich bei dem Begriffe der Potentialdifferenz um einen Energiebegriff handelt, man bezeichnet sie deswegen auch, analog einer mechanischen Bezeichnung, als potentielle Energie.

Oben haben wir gesagt, daß die Einheit der Spannung erhalten wird, wenn man eine Kugel, deren Radius 1 cm ist, mit der Elektrizitätsmenge 1 ladet. Ladet man einen anderen Körper anderer Größe mit dieser Menge, so erhält er eine andere Spannung; man sagt, jene Kugel hat die **Kapazität** 1; eine Kugel vom Radius r hat die Kapazität r. Allgemein ist also die Kapazität eines Körpers der Quotient aus Elektrizitätsmenge und Spannung, auf die er durch jene Elektrizitätsmenge gebracht wird. Ihre Dimensionsformel ergibt sich demnach zu $\dfrac{\left[\mathrm{cm}^{\frac{3}{2}}\mathrm{g}^{\frac{1}{2}}\mathrm{sec}^{-1}\right]}{\left[\mathrm{c}^{\frac{1}{2}}\mathrm{g}^{\frac{1}{2}}\mathrm{sec}^{-1}\right]}$ oder zu [cm], sie wird also absolut in Zentimetern gemessen.

Man wird nun fragen, wie man denn Elektrizitätsmengen usw. messen kann. Das dazu verwendete Instrument ist das **Elektrometer**, und zwar zu absoluten Messungen das von W. **Thomson** (Lord Kelvin) angegebene **Schutzringelektrometer**. Es besteht aus zwei kreisförmigen Platten, einer festen und einer beweglichen; diese ist an einer Wage aufgehängt, und steht jener in geringem Abstand gegenüber. Wird die feste Platte mit der Erde verbunden und damit auf die Spannung Null, und die bewegliche Platte auf die zu messende Spannung gebracht, so wird sie von jener angezogen werden, mit einer Kraft, die man an der Wage durch Auflegen von Gewichten messen kann. Aus der Kraft kann man die Größe der Spannung berechnen, wenn man die Größe der beweglichen Platte und ihren Abstand von der festen Platte kennt, Größen, die man also durch Linearmessungen feststellen kann. Da indessen die Elektrizität sich in der beweglichen Platte am Rande ansammelt, weil eben alle Elektrizitätsteilchen sich möglichst weit voneinander zu entfernen versuchen, und eine solche Erscheinung die Messungen beeinflußt, die eine gleichmäßige Verteilung der Elektrizität in der Scheibe bedingen, so umgibt man die bewegliche Scheibe mit einem feststehenden Schutzring, derart also, daß sie den mittleren beweglichen Teil einer größeren Kreisplatte bildet. Diesen Schutzring ladet man auf die gleiche Spannung wie die bewegliche Platte und erreicht damit, daß dann die Verteilung in dieser, da sie der mittlere Teil einer größeren Scheibe ist, jetzt gleichmäßig ist. So mißt man Spannungen, und da man die Kapazität im allgemeinen aus Linearmessungen berechnen kann, ist es auch möglich, mittels Spannungsmessungen auch Elektrizitätsmengen zu messen. Weiteres wird noch später erwähnt werden.

Wir haben bis jetzt nur Elektrizität im Ruhezustand betrachtet. Verbinden wir zwei geladene Körper durch einen Draht miteinander, so fließt durch diesen ein elektrischer Strom. Dieser Strom hat die Stärke 1, wenn in einer Sekunde die Elektrizitätsmenge 1 durch einen Querschnitt des Drahts fließt. Seine Dimensionsformel ist also:

$$\frac{[\mathrm{cm}^{\frac{3}{2}}\,\mathrm{g}^{\frac{1}{2}}\,\mathrm{sec}^{-1}]}{[\mathrm{sec}]} = [\mathrm{cm}^{\frac{3}{2}}\,\mathrm{g}^{\frac{1}{2}}\,\mathrm{sec}^{-2}].$$

Nun fehlt noch die Größe des elektrischen Widerstandes, die so definiert ist, daß ihre Einheit durch eine Leitung dargestellt ist, bei der eine Potentialdifferenz 1 an ihren Enden einen Strom 1 erzeugt. Seine Dimensionsformel ist also $\frac{[\mathrm{cm}^{\frac{1}{2}}\,\mathrm{g}^{\frac{1}{2}}\,\mathrm{sec}^{-1}]}{[\mathrm{cm}^{\frac{3}{2}}\,\mathrm{g}^{\frac{1}{2}}\,\mathrm{sec}^{-2}]} = [\mathrm{cm}^{-1}\,\mathrm{sec}^{1}]$, also 1 dividiert durch eine Geschwindigkeit, ein sehr merkwürdiges Resultat, das eine neue Definition des Widerstandes ergibt, nämlich daß er 1 dividiert durch die Geschwindigkeit ist, die das Einheitsquantum braucht, um ihn bei der Potentialdifferenz 1 zu passieren.[1])

Diese immerhin etwas theoretischen Erörterungen wollen wir damit abschließen, daß wir noch wenige Worte über magnetische Maßeinheiten sagen. Genau so wie das elektrostatische Einheitsquantum definiert man auch das magnetische Einheitsquantum, oder die Stärke der Einheit eines Magnetpoles, der einen gleichen aus der Entfernung 1 cm mit der Kraft 1 Dyn abstößt, und genau wie früher den Begriff des magnetischen Potentials.

1) Verwendet man statt des Begriffes Widerstand den Begriff Leitfähigkeit derart, daß die Leitfähigkeit $= \frac{1}{\text{Widerstand}}$ ist, so sieht man, daß nach obiger Definition die Leitfähigkeit gleich der Geschwindigkeit ist, mit der das Einheitsquantum den Leiter bei der Spannungsdifferenz 1 passiert.

Wir wollen indessen auf alles dieses nicht weiter eingehen, sondern uns zu praktisch wichtigen Dingen wenden. Wir werden auf das Obenstehende noch zurückkommen.

Bei der praktischen Anwendung der Elektrizität benutzt man nicht die Elektrizität im Ruhezustand, sondern im Zustand der Bewegung bei ihrem Fließen durch Drähte, und was das wichtigste ist, mit den dabei stets auftretenden magnetischen Erscheinungen, die ja bei Dynamomaschinen und Motoren eine genügend bekannte Anwendung finden. Für praktische Zwecke wird man also zu Messungen auf elektrischem Gebiet Einheiten zugrunde legen, die mit den elektromagnetischen Eigenschaften zusammenhängen, und so begründete man neben dem elektrostatischen Maßsystem das nahezu ausnahmslos in der Praxis verwendete elektromagnetische System, das als Grundeinheit den elektrischen Strom ansetzt.

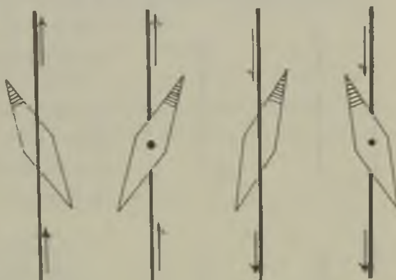

Abb. 24. Ablenkung von Magneten durch elektrische Ströme.

Die Grundlage der elektromagnetischen Maße bildet das Biot-Savartsche Gesetz, das aussagt, daß ein elektrischer Strom i, der einen Kreis vom Radius r durchfließt, auf einen im Mittelpunkt befindlichen Magnetpol der Stärke m die Kraft $R = \frac{2\pi \cdot r \cdot m \cdot i}{r^2}$ ausübt. π ist die bekannte Zahl 3,14159265..., die angibt, wieviel mal der Kreisumfang länger ist als der Durchmesser. Man definiert dann als Stromeinheit jenen Strom, der in einem Kreise mit dem Radius 1 cm fließend auf einen magnetischen Einheitspol, in dem Mittelpunkt dieses Kreises die Kraft 2π Dyn ausübt; oder, was genau das gleiche ist, jener Strom, der einen Kreisbogen von der Länge 1 cm durchfließt, auf jenen Pol die Kraft 1 Dyn ausübt. Die Richtung der Kraft wird durch die Abb. 24 angedeutet. Die Dimension der elektromagnetischen Stromstärke ist also $\frac{\text{Länge} \times \text{Kraft}}{\text{Magnetpol}}$, und wie eine einfache Rechnung zeigt, gleich $[\mathrm{cm}^{\frac{1}{2}}\,\mathrm{g}^{\frac{1}{2}}\,\mathrm{sec}^{-1}]$. Der Magnetpol wird genau wie die Elektrizitätsmenge definiert zu $[\mathrm{cm}^{\frac{3}{2}}\,\mathrm{g}^{\frac{1}{2}}\,\mathrm{sec}^{-1}]$.

Mittels der Einführung des Begriffes eines Magnetpoles hängen beide Maßsysteme wiederum zusammen. Man kommt indessen von dem

Zusammenhange frei, wenn man als Grundlage das Amperesche Gesetz über die Kraft zwischen zwei stromdurchflossenen Leitern zugrunde legt. Nach diesem Gesetz wirken zwei geradlinige l cm lange Drähte, die von einem Strome i durchflossen werden, und in der Entfernung R voneinander senkrecht auf ihrer Verbindungslinie parallel zueinander stehen, mit einer Kraft $k = \frac{i \cdot l \times i \cdot l}{R^2} = \frac{i^2 \cdot l^2}{R^2}$ aufeinander. Für die Entfernungen 1 und die Kraft 1 ergibt sich dann der Einheitsstrom zu $\sqrt{\frac{[\text{Kraft}]\,[\text{Länge}]}{[\text{Länge}]}} = \sqrt{[\text{Kraft}]} = [\mathrm{cm}^{\frac{1}{2}}\,\mathrm{g}^{\frac{1}{2}}\,\mathrm{sec}^{-1}]$ genau wie vorher. Die Richtung der Anziehungskraft veranschaulicht Abb. 25. Diese Definition ist vom elektrostatischen Maßsystem unabhängig.

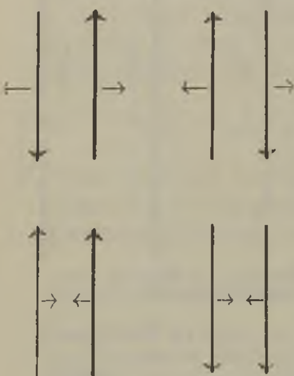

Abb. 25. Kraftwirkung zweier Ströme aufeinander.

Diese Stromstärke ist für die Bedürfnisse der Praxis zu groß. Für ihre Zwecke nimmt man den zehnten Teil der Stromstärke als Einheit, die Stromstärke, die man als 1 Ampere bezeichnet, es ist also 1 Amp. $= 0{,}1\ [\mathrm{cm}^{\frac{1}{2}}\,\mathrm{g}^{\frac{1}{2}}\,\mathrm{sec}^{-1}]$.

Die Einheit der Elektrizitätsmenge ist die Menge, die vom Strom 1 in einer Sekunde durch einen Leiter befördert wird, also $[\mathrm{cm}^{\frac{1}{2}}\,\mathrm{g}^{\frac{1}{2}}\,\mathrm{sec}^{-1}][\mathrm{sec}] = [\mathrm{cm}^{\frac{1}{2}}\,\mathrm{g}^{\frac{1}{2}}]$. Praktische Einheit ist die Menge, die 1 Ampere in einer Sekunde befördert, man bezeichnet sie als Coulomb. Es ist also 1 Coul = 1 Amperesecunde $= 0{,}1\ [\mathrm{cm}^{\frac{1}{2}}\,\mathrm{g}^{\frac{1}{2}}]$.

Die Einheit der Potentialdifferenz oder Spannung oder elektromotorischen Kraft, alles drei Begriffe, die im wesentlichen als identisch anzusehen sind, wird wie im statischen Maßsystem definiert. Um die elektromagnetische Menge q durch einen Leiter zu befördern, zwischen dessen Enden die Potentialdifferenz e herrscht, ist die Arbeit $e \cdot q$ erforderlich. Das gibt die Einheit der Potentialdifferenz zu

$$\frac{[\text{Arbeit}]}{[\text{elektromagnetische Elektrizitätsmenge}]} = \frac{[\mathrm{cm}^2\,\mathrm{g}^1\,\mathrm{sec}^{-2}]}{[\mathrm{cm}^{\frac{1}{2}}\,\mathrm{g}^{\frac{1}{2}}]} = [\mathrm{cm}^{\frac{3}{2}}\,\mathrm{g}^{\frac{1}{2}}\,\mathrm{sec}^{-2}].$$

Diese Einheit ist für die Praxis viel zu klein. Man wählt das 10^8 dieser Einheit, das Volt, hat also: 1 Volt $= 10^8\,[\mathrm{cm}^{\frac{3}{2}}\,\mathrm{g}^{\frac{1}{2}}\,\mathrm{sec}^{-2}]$. Endlich die Widerstandseinheit ist aus Stromstärke und Spannung nach dem

Ohmschen Gesetz bestimmt, derart, daß der Widerstand $= \frac{\text{Spannung}}{\text{Stromstärke}}$ ist, also die Widerstandseinheit zu $\frac{[\text{cm}^{\frac{3}{2}}\,\text{g}^{\frac{1}{2}}\,\text{sec}^{-2}]}{[\text{c}^{\frac{1}{2}}\,\text{g}^{\frac{1}{2}}\,\text{sec}^{-1}]} = [\text{cm}^1\,\text{sec}^{-1}]$. Er hat also die Dimension einer Geschwindigkeit! Zur Erläuterung davon sei folgendes bemerkt: Bewegt man einen geschlossenen Draht in der Nähe eines Magneten, in einem magnetischen Felde, so wird bekanntlich in dem Draht ein Induktionsstrom erzeugt, dessen Stärke natürlich von dem Material des Drahtes abhängig ist. Sie ist natürlich auch von der Geschwindigkeit abhängig, mit welcher der Draht im Felde bewegt wird. (Man denke an das Beispiel einer langsam und einer rasch laufenden Dynamomaschine!) Man wird also einsehen, daß man bei zwei verschiedenen Drähten gleicher Form den mit größerem Widerstand wird schneller bewegen müssen, um in beiden einen gleich starken Strom zu erzielen. So kann man den elektrischen Widerstand direkt durch eine Geschwindigkeit darstellen.

Die praktische Einheit des Widerstandes ist das Ohm $= \frac{1\ \text{Volt}}{1\ \text{Amp}}$

$$= \frac{10^8[\text{cm}^{\frac{3}{2}}\,\text{g}^{\frac{1}{2}}\,\text{sec}^{-2}]}{0{,}1\,[\text{cm}^{\frac{1}{2}}\,\text{g}^{\frac{1}{2}}\,\text{sec}^{-1}]} = 10^9[\text{cm}\,\text{sec}^{-1}].$$

Das praktisch wichtigste an den elektrischen Strömen ist die Energie, die sie leisten können. Deswegen sind auch die Definitionen der elektromagnetischen Energie von großer Bedeutung. Sie ist bestimmt durch das Joulesche Gesetz. Nach diesem erzeugt ein Strom i in einem Widerstand w während der Zeit t eine Wärmemenge $Q = i^2 \cdot w \cdot t$. Ein Strom erzeugt also in einem gegebenen Draht in einer Sekunde eine gewisse Anzahl Kalorien, ein doppelt so starker Strom die vierfache Anzahl, ein dreifacher die neunfache Zahl usw. Die Stromarbeit ist damit nun wieder ein mechanisches Maß und wird wie diese in Erg gemessen. In diesem Fall ist eben die erzeugte Stromwärme das Äquivalent der geleisteten Arbeit. Die Dimension der Stromarbeit ist nach jenem Gesetz $[\text{cm}^{\frac{1}{2}}\,\text{g}^{\frac{1}{2}}\,\text{sec}^{-1}]^2 \cdot [\text{cm}^1\,\text{sec}^{-1}] \cdot [\text{sec}^1] = [\text{cm}^2\,\text{g}^1\,\text{sec}^{-2}]$, hat also, wie es auch nicht anders zu erwarten war, die Dimension einer Arbeit. In der Praxis ist die Stromarbeit wiederum das Produkt des Quadrates der Stromstärke, des Widerstandes und der Zeit, also Amp^2 · Ohm · Sekunden, oder für die Zeiteinheit berechnet $0{,}1^2[\text{cm}^{\frac{1}{2}}\,\text{g}^{\frac{1}{2}}\,\text{sec}^{-1}] \times 10^9\,[\text{cm}^1\,\text{sec}^{-1}] = 10^7$ elektromagnetische Einheiten. Diese Einheit nennt man 1 Joule, sie ist also nichts weiter als 10^7, d. h. Zehn-millionen Erg. Die Arbeitsleistung, oder die Arbeit für die Zeiteinheit berechnet, d. h. die Arbeit von 1 Joule in einer Sekunde nennt man 1 Watt [$cm^2\, g^1\, sec^{-3}$]; es hat, wie man sieht, selbstverständlich die Dimension einer Leistung. Man kann auch 1 Watt definieren als die Leistung von 1 Volt-Ampere, und das ist die Bezeichnungsweise, die in der Praxis herrschend ist. Mathematisch ist dann also in den verschiedenen Möglichkeiten die Anzahl der Watt $q = e \cdot i = \frac{e^2}{w} = i^2 w$. Der Begriff einer Wattstunde, also einer Arbeit, ist wohl danach ohne weiteres klar als die Arbeit, die 1 Watt in einer Stunde leisten kann. Es sind also $10^7 \cdot 3600 = 36 \cdot 10^9$ Erg. 1 Wattsekunde ist einfach 10^7 Erg. Mit Kilowatt bezeichnet man 1000 Watt.

Da ein Watt also $10^7 \frac{\text{Erg}}{\text{sec}}$ ist, ein Kilogrammgewichtmeter gleich $100\,000 \cdot g$ Erg, worin g die Schwerkraft bedeutet, so ist also im Mittel auf der gesamten Erdoberfläche 1 Watt gleich 0,1019 Kilogrammgewichtmeter pro Sekunde. Die Pferdekraft sind 75 Kilogrammeter pro Sekunde, entspricht also 736 Watt oder 0,736 Kilowatt. Da endlich 1 Grammkalorie äquivalent $4{,}19 \cdot 10^7$ Erg ist, so ist 1 Watt äquivalent 0,24 Grammkalorien pro Sekunde. Ein Strom von 1 Ampere erzeugt also in jeder Sekunde in einem Drahte vom Widerstande 1 Ohm 0,24 Grammkalorien Wärme.

Soviel über die wichtigsten grundlegenden Einheiten und ihre Beziehungen zueinander. In dieser Form sind sie indessen für die Bedürfnisse der Praxis nicht verwendbar. Diese verlangt Maße, die sie bequem anwenden kann, ohne jedesmal erst auf die absoluten Grundeinheiten zurückgehen zu müssen. Es müssen also Normale geschaffen werden. Für die Stromstärke ist selbstverständlich ein Normal nicht denkbar, wohl aber für die Spannung oder elektromotorische Kraft, und für den Widerstand. Bei der Stromstärke muß man sich anders helfen.

Zunächst sei die Schaffung einer Widerstandseinheit kurz besprochen. 1 Ohm ist definiert als das 10^9 der elektromagnetischen Einheit. Nahezu alle Methoden zur Ohmbestimmung beruhen darauf, daß die Erde ein magnetisches Feld bildet. Die Erde ist ein großer Magnet und bringt also in ihrer Umgebung magnetische Wirkungen hervor (Kompaß!), erzeugt ein magnetisches Kraftfeld. Ein idealer Magnet mit zwei magnetischen Einheitsquanten Nord- und Südmagnetismus wird also an jedem Ort mit einer bestimmten Kraft in einer bestimmten Richtung festgehalten. Die Kraft, die auf einen Einheitspol ausgeübt wird, nennen wir die magnetische Feldstärke an diesem

Ort. $\left[\text{Dimension}\ \frac{[\text{Kraft}]}{[\text{Polstärke}]} = [\text{cm}^{-\frac{1}{2}} \text{g}^{\frac{1}{2}} \text{sec}^{-1}]\right]$. Da bei den meisten Messungen mittels Magneten diese sich nur in einer horizontalen Ebene einstellen können, wie bei Kompassen, Galvanometern, wirkt auf solche Magnete nicht die ganze Feldstärke mit ihrer Richtkraft, sondern nur der Teil, der in die horizontale Ebene fällt, die Horizontalintensität des Erdmagnetismus. Es sei erwähnt, daß in unserer Breite eine ganz frei bewegliche Magnetnadel sich um ungefähr 66° nach unten neigt und daß also nur ein dieser Neigung entsprechender Teil der Gesamtintensität auf die Horizontalkomponente entfällt. Die Gesamtintensität beträgt für die Mitte des Jahres 1911 in Potsdam 0,46872 $[\text{cm}^{-\frac{1}{2}} \text{g}^{\frac{1}{2}} \text{sec}^{-1}]$ und die Horizontalintensität 0,18816 $[\text{cm}^{-\frac{1}{2}} \text{g}^{\frac{1}{2}} \text{sec}^{-1}]$. Die magnetische Horizontalintensität jedes Ortes kann man durch Messungen an Stabmagneten bestimmen, deren Schwingungsdauer man mißt, und die man durch andere Magnete aus ihrer Einstellung in den magnetischen Meridian ablenkt. Genauer soll auf diese Messungen nicht eingegangen werden, es sei nur erwähnt, daß man aus Messungen an verschiedenen Orten der Erdoberfläche für jeden beliebigen Ort die Horizontalintensität berechnen kann, indessen kommen überall noch lokale Abweichungen von dem gewissermaßen idealen Wert vor, die durch magnetisches Material, Gesteine unter der Erdoberfläche, und in Gebäuden bisweilen in ganz bedeutendem Maße durch Eisenkonstruktionen und Maschinen hervorgerufen werden. Feine Messungen bedingen deswegen stets die gesonderte Feststellung dieser Größe. Hiermit hat man dann bereits aus rein mechanischen Messungen eine absolute Größe erhalten.

Für die Bestimmung eines Widerstandes in absolutem Maß verfuhr nun W. Weber z. B. so, daß er einen rechteckigen Rahmen von bekannten Dimensionen schnell drehte. Durch das magnetische Erdfeld wurden dann in diesem Rahmen Induktionsströme erzeugt, und diese so erzeugten Elektrizitätsmengen mittels eines Galvanometers gemessen. Die Elektrizitätsmenge kann aus den mechanischen Eigenschaften des Galvanometers, der Größe seines Ausschlages und der Horizontalintensität berechnet werden, und aus den so erhaltenen Daten kann dann der Widerstand des ganzen Stromkreises in absoluten Einheiten ausgedrückt werden.

Bei einer anderen Methode verfuhr Weber so, daß er einen Magnetstab in einer Drahtrolle schwingen ließ. Durch die Schwingungen werden in ihr Induktionsströme erzeugt, die wieder auf die Schwingungen des Magnetes zurückwirken. Hieraus wird dann der Widerstand des Drahtes der Rolle berechnet.

Wegen der Schwierigkeiten der Darstellung dieser Methoden ohne Anwendung höherer Mathematik sei auf ein weiteres Eingehen verzichtet. Neben diesen Methoden gibt es noch eine ganze Reihe anderer, von den verschiedensten Forschern erdacht, und als Mittelwert aller Werte ist erhalten, daß der Widerstand 1 Ohm dargestellt wird durch den Widerstand einer Quecksilbersäule von überall 1 qmm Querschnitt und 1062,89 mm Länge, bei der Temperatur von 0° C. Ein solcher Widerstand wird hergestellt durch ein gerades Glasrohr von überall 1 qmm lichter Weite mit reinem Quecksilber gefüllt, dessen Enden in große Ansatzstücke tauchen, durch die der Strom hindurchgeleitet wird.

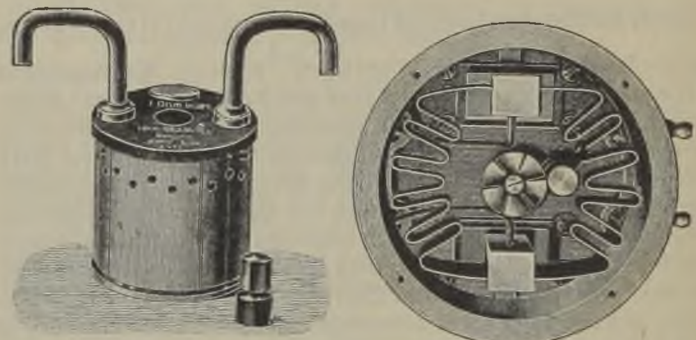

Abb. 26. Normalwiderstand.

Für die technischen, und die allergrößte Zahl der wissenschaftlichen Anwendungen ist der Wert des Ohms gesetzlich festgelegt, schon mit Rücksicht darauf, daß obige Zahl durch weitere Versuche noch um geringe Beträge verändert werden kann. Es gelten hier die gleichen Überlegungen wie für das Meter und das Kilogramm. Für das Deutsche Reich ist gesetzlich bestimmt, daß das Ohm dargestellt wird durch den Widerstand einer Quecksilbersäule von der Temperatur des schmelzenden Eises, deren Länge bei durchweg gleichem, einem Quadratmillimeter gleichzuachtenden Querschnitt 106,3 cm und deren Masse 14,4521 g beträgt. Die schwierige Bestimmung der Weite des Rohres wird hierbei durch die einfachere der Masse seiner Quecksilberfüllung ersetzt.

Für den wirklichen praktischen Gebrauch wird von solchen Widerstandsnormalen abgesehen, und diese werden durch Drahtwiderstände, wie in Abb. 26 abgebildet, ersetzt. Als Draht verwendet man Metalllegierungen, deren Widerstandswerte von der Temperatur möglichst unabhängig sind. Im allgemeinen nimmt der Widerstand aller Körper mit der Temperatur zu, und in der nachstehenden Tabelle ist eine Zusammenstellung von spezifischen Widerstandswerten viel verwendeter Materialien gegeben, berechnet für den Widerstand eines Drahtes von 1 cm Länge und 1 qmm Querschnitt. Daneben dann sein elektrischer Temperaturkoeffizient, die Zahl, die angibt, um wieviel sich der Widerstand von 1 Ohm des betreffenden Stoffes bei einer Temperaturerhöhung um 1^0 vergrößert. Die gebräuchlichsten Materialien für gute Wider-

	Elektrischer Widerstand	Temperaturkoeffizient des Widerstandes			
Aluminium	0,028 Ohm	+ 0,004	Silber	0,016	+ 0,004
Blei	0,195 „	+ 0,004	Zink	0,057	+ 0,004
Eisen: Gußeisen	0,600 „	+ 0,005	Zinn	0,100	+ 0,004
Stahl	0,200 „	+ 0,005	Messing	0,075	+ 0,003
Gold	0,021 „	+ 0,003	Neusilber	0,250	+ 0,0004
Kupfer	0,017 „	+ 0,004	Konstantan	0,500	— 0,00003
Nickel	0,070 „	+ 0,003	(60% Kupfer u. 40% Nickel)		
Platin	0,108 „	+ 0,004	Manganin	0,400	0,00000
Quecksilber	0,958 „	+ 0,0009	(84% Kupfer, 12% Mangan, 4% Nickel)		

stände sind Manganin und Konstantan. Feine Widerstandsmessungen verlangen also eine genaue Messung der Temperatur. Außerdem ist dabei zu beachten, daß nicht die dicken Ansatzstücke, an die der eigentliche Widerstandsdraht angelötet ist, durch ihre eigenen Widerstände Fehler in der Messung verursachen

Die Messung eines Widerstandes besteht also im wesentlichen in der Vergleichung mit einem Normalwiderstand. Die dazu verwendete Schaltung findet man schematisch in Abb. 27 dargestellt, es ist die sogenannte Wheatstonesche Brückenschaltung. N ist der Normalwiderstand, W der zu messende, S eine Stromquelle, z. B. ein Akkumulator, G ein Galvanometer und AB ein ausgespannter gleichmäßiger Draht mit einem verschiebbaren Kontakt c. Der von S kommende Strom verteilt sich durch $N + W$ und AB. Die

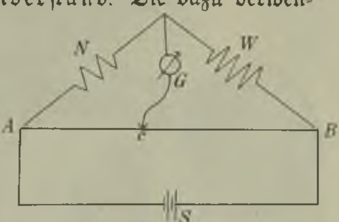

Abb. 27.
Wheatstonesche Brückenschaltung.

Spannung fällt auf den Meßdraht von A bis B entsprechend seinem Widerstande, in diesem Fall also seiner Länge, ab, und ebenso auf $N + W$ entsprechend den Widerständen. Sind N und W genau gleich, so wird der bewegliche Kontakt c genau in der Mitte stehen, im anderen Fall wird, wie man leicht einsieht, die Beziehung

$\frac{N}{W} = \frac{A c}{B c}$ bestehen, aus der der Wert von W einfach durch Rechnung zu ermitteln ist.

Galvanometer unterscheidet man in zwei Typen, die Nadelgalvanometer, bei dem der zu messende Strom durch ein oder mehrere Drahtspulen gesandt wird und eine im Innern befindliche Magnetnadel ablenkt, oder Drehspulgalvanometer, die einen festen Magneten enthalten, zwischen dessen Polen sich eine rechteckige Spule befindet, durch die der zu messende Strom mittels eines Aufhängefadens und einer Feder hindurchgeführt wird. Unter dem Einfluß des Stroms wirkt die Spule wie ein Magnet und wird sich quer zu dem magnetischen Felde einzustellen versuchen, bis die Gegenkraft des Aufhängefadens ihre Bewegung hemmt. Die Messung der Drehung erfolgt bei beiden mittels der Gauß-Poggendorffschen Methode. Die beiden Abb. 28 und 29 zeigen zwei Instrumente beider Typen.

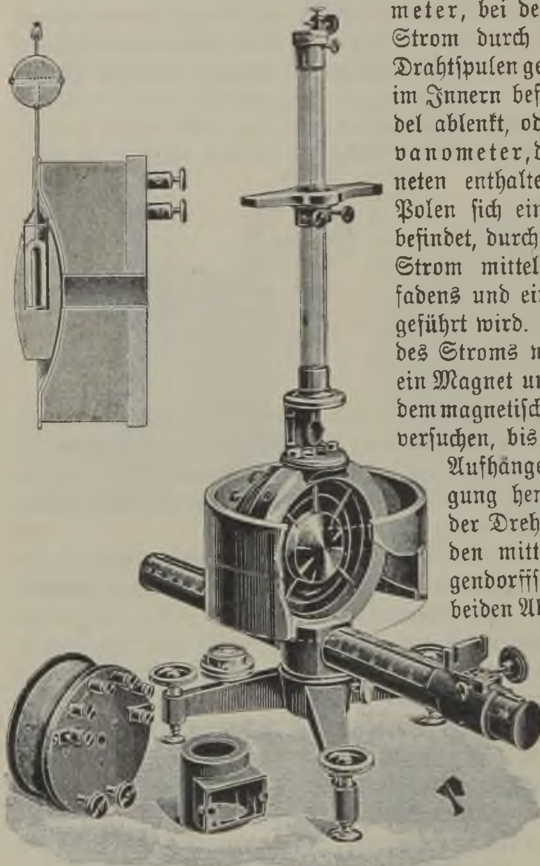

Abb. 28. Wiedemannsches Nadelgalvanometer.

Ein Normal für Stromstärke kann man wie oben gesagt nicht schaffen. Man muß hier zur Definition der Stromeinheit einer seiner Wirkungen verwenden und man benutzt seine chemische Wirkung. Geht ein elektrischer Strom durch eine Lösung von Silbernitrat ($AgNO_3$, als Höllenstein bekannt) in Wasser, so scheidet sich an dem negativen Pol metallisches Silber ab, und die Menge des abgeschiedenen Metalls gilt als Maß der Stromstärke, denn nach dem Faradayschen Gesetz der Elektrolyse ist bei einer elektrolytischen Ausscheidung die Menge des ausgefällten Materials proportional der hindurchgegangenen Elektrizitätsmenge, also auch der Stromstärke. Das dazu benutzte in Abb. 30 (S. 94) dargestellte Instrument ist das Voltameter. Es besteht aus einem Platintiegel, der den Silberniederschlag an seinen Wänden aufnimmt und mit der Silbernitratlösung gefüllt ist; in ihn ragt ein Pol aus reinem Silber herein, der das aus der Lösung ausgefällte Silber wieder ersetzt; der Strom tritt durch ihn in die Lösung ein und verläßt sie durch den Platintiegel. Dieser wird zuerst leer gewogen, dann, nachdem er im Voltameter verwendet ist, ausgegossen, getrocknet und dann wieder gewogen. Der Unterschied der Gewichte ist die Masse des durch den Strom niedergeschlagenen Silbers. Um eine genaue zuverlässige Messung zu erhalten, existieren eine Reihe von ausführlichen Vorschriften, die sich im wesentlichen auf die Konzentration des Silbernitrats und die maximale Stromstärke beziehen, die durch ein Voltameter hindurchgesandt werden darf. Da sie rein praktisches Interesse haben, sei auf sie nicht weiter eingegangen.

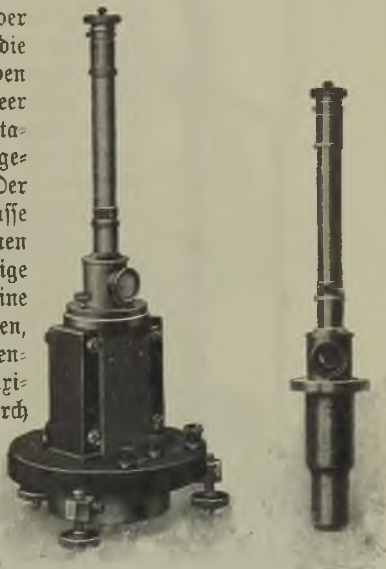

Abb. 29. Drehspulgalvanometer.

Um nun eine Stromstärke in absolutem Maß zu messen, braucht man die Kenntnis der Menge Silber, die der Strom 1 $[cm^{\frac{1}{2}} g^{\frac{1}{2}} sec^{-1}]$ in einer Sekunde, oder was das gleiche ist, die Menge Silber, die die Elektrizitätsmenge 1 $[cm^{\frac{1}{2}} g^{\frac{1}{2}}]$ ausfällt, oder, für die Praxis. die 1 Coulomb ausfällt. Es müssen also Versuche angestellt werden, bei denen die Elektrizitätsmenge bzw. die Stromstärke auf irgendeine Weise in absolutem Maß gemessen und gleichzeitig die niedergeschlagene Menge Silber gemessen wird. Zur Messung der Stromstärke gebraucht man bei diesen Versuchen fast ausnahmslos die Tangentenbussole, ein Instrument wie Abb. 31 (S. 95). Sie besteht aus einem großen Ring, von einer oder mehreren Windungen, die der zu messende Strom durchfließt. In der

Mitte befindet sich eine kleine Magnetnadel. Es sind also hiermit nahezu die idealen Bedingungen des Biot-Savartschen Gesetzes erfüllt. Der Ring wird in die Nord-Süd-Richtung gestellt. Man mißt auf anderem Wege die magnetische Horizontalintensität des Ortes, was sehr genau geschehen muß, und kann dann, nachdem man die Dimensionen des Instruments linear ausgemessen hat, die Kraftwirkung berechnen, die ein Strom auf die Magnetnadel ausüben muß, indem er sie aus dem magnetischen Meridian um einen bestimmten Winkel ablenkt. Man beobachtet die tatsächliche Ablenkung und kann dann die tatsächlich vorhandene Stromstärke in absolutem Maß berechnen. Dieser Strom wird gleichzeitig durch das Voltameter gesandt. Ausführliche mit mehr oder weniger guten Hilfsmitteln ausgeführte Messungsreihen ergaben als Mittel das Resultat, daß 1 Coulomb, oder 1 Ampere in einer Sekunde oder aber 10 absolute Einheiten der Elektrizitätsmenge $(10\,\mathrm{cm}^{\frac{1}{2}}\,\mathrm{g}^{\frac{1}{2}})$ 1,1183 Milligramm Silber ausfallen.

Abb. 30. Silbervoltameter.

An Stelle des Silbervoltameters verwendet man vielfach zu absoluten Strommessungen die sogenannte Stromwage von Rayleigh. Sie besteht aus einer oder zwei parallelen festen Spulen und symmetrisch und parallel hierzu einer beweglichen, die an einem Wagebalken aufgehängt ist. Der zu messende Strom wird durch die Spulen hindurchgesandt und verursacht je nach der Schaltung eine Anziehung oder Abstoßung der beweglichen Spule, deren Größe mittels der Wage gemessen wird. Die Stromwage ist indessen zu kompliziert und wird daher meistens durch das Voltameter ersetzt, so daß sich wohl ein genaueres Eingehen auf sie erübrigt.

In der Praxis ist es nun nicht so einfach, die Messung mittels Silbervoltameter durchzuführen, denn einmal ist es zur Erzielung guter Ergebnisse erforderlich, den Strom möglichst lange hindurchzuleiten, weil sonst die Fehler in der Zeitbestimmung zu großen Einfluß erhalten, und dann muß der Strom die ganze Zeit über genau konstant gehalten werden, eine Bedingung, die sehr schwer zu erfüllen ist. Ist dieses nicht der Fall, so kann man aus der Messung am Silbervoltameter nur die durchschnittliche Stromstärke, die durch es hindurchgegangen ist, berechnen. Praktisch wird also dieses Instrument nicht anwendbar sein.

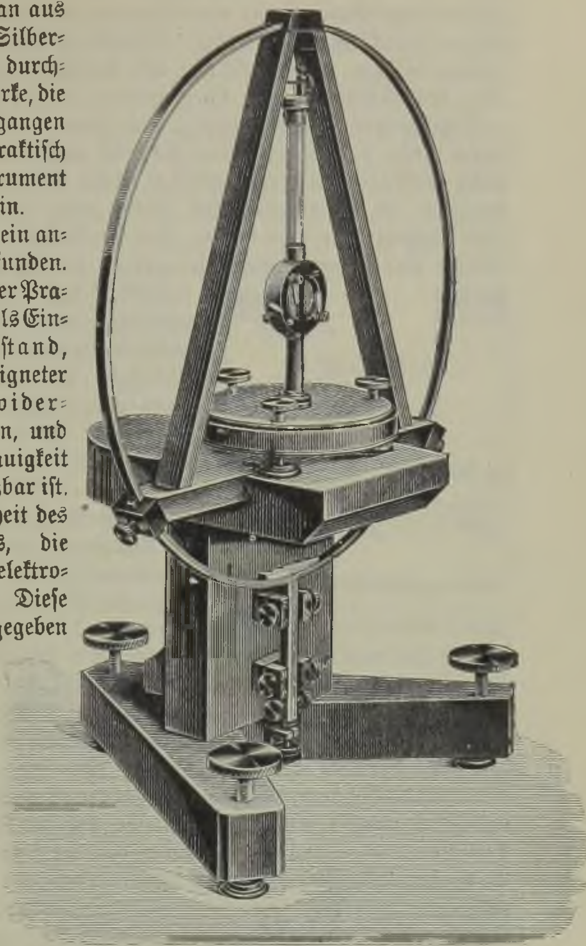

Abb. 31. Tangentenbussole.

Da hat man nun ein anderes Hilfsmittel gefunden. Für Messungen in der Praxis verwendet man als Einheiten den **Widerstand**, den man stets in geeigneter Form als **Drahtwiderstand** benutzen kann, und der mit großer Genauigkeit herstellbar und meßbar ist. und die dritte Einheit des Ohmschen Gesetzes, die Spannung oder die elektromotorische Kraft. Diese wird als Einheit gegeben durch die elektromotorische Kraft zwischen den Polen eines **galvanischen Elementes**. Als geeignetes Element verwendet man das sogenannte **Weston-Normal-Element**, das Abb. 32 (S. 96) wiedergibt Es besteht aus einem *H* förmigen Glas, in das unten zwei Platindrähte, welche die Pole bilden, eingeschmolzen sind. Der eine Schenkel enthält unten metallisches Quecksilber, in das der Platindraht eintaucht, darüber eine zähe Paste aus Kadmiumsulfat ($CdSO_4$), Merkurosulfat (Hg_2SO_4), beides schwefelsaure Salze von Kadmium und Quecksilber sowie metallischem Quecksilber. Der andere Schenkel enthält eine Paste aus Kadmiumamalgam, einer Legierung von Kadmium und Quecksilber. Der Rest des Gefäßes ist mit konzentrierter Lösung von Kadmiumsulfat in destilliertem Wasser angefüllt, und, damit die Lösung stets konzentriert bleibt, sind in dem einen Schenkel noch eine Anzahl fester Kristalle enthalten. An dem Quecksilber ist der positive, an dem Kadmiumamalgam ist der negative Pol. Wenn man sich ein solches Element nach ausführlichen Vorschriften über die Reinheit der einzelnen Substanzen usw. zusammenstellt, so gibt es eine ganz bestimmte elektromotorische Kraft zwischen seinen Polen, nämlich 1,0183 Volt, oder 0,10183 absolute elektromagnetische Spannungseinheiten. Die elektromotorische Kraft eines solchen Elementes ist in geringem Maße von der Temperatur abhängig, derart, daß diese durch die Formel $E = E_{20°} - 0{,}0000408\,(t - 20^0)$ dargestellt werden kann. Eine Änderung der Temperatur um 1^0 ändert also seine Spannung um nun 0,00004 Volt. Für die größte Zahl der technischen Messungen kann das Element als unabhängig von der Temperatur gesehen werden.

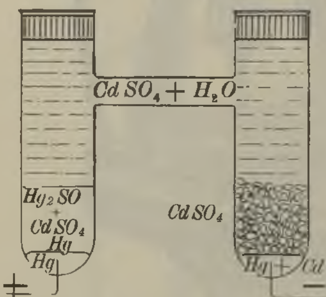

Abb. 32. Weston-Normal-Element.

Wie hat man nun jene Zahl gefunden? Man benutzt von anderen Untersuchungen her bekannte Widerstände und das Silbervoltameter. Man sendet einen Strom von etwa 1 Amp. z. B. durch einen Widerstand von 1 Ohm und gleichzeitig durch das Voltameter. Aus den Messungen an diesem kann man dann die genaue Stromstärke, die durch den Widerstand hindurchgegangen ist, berechnen. Nehmen wir an, sie sei genau 1,0000 Amp. gewesen, und der Widerstand sei genau 1,00000 Ohm, so wissen wir dann, daß die Spannung zwischen den Enden des Widerstandes genau 1,0000 Volt sein muß. Andererseits messen wir aber diese Spannung mit Hilfe der Spannung des Westonelementes und finden, daß sie 0,98193 dieser Spannung ist. Die tatsächliche Spannung des Elementes muß also $\frac{1 \text{ Volt}}{0{,}98193} = 1{,}0183$ Volt sein.

Es bleibt dabei also noch übrig zu erläutern, wie man die Spannungen miteinander verglichen hat. Die Schaltung hierfür gibt die Abb. 33. E ist eine Stromquelle, z. B. ein Akkumulator, sein Strom fließt durch einen langen dünnen Draht AB, der an sich einen Maßstab trägt. Die zu messende Spannung, z. B. das Normalelement V wird an B und unter Zwischenschaltung eines empfindlichen Galvanometers G an einen verstellbaren Schleifkontakt C angeschlossen, so daß die Pole der Stromquelle so liegen. wie in der Figur gezeichnet ist. Nehmen wir an, das Element V hätte die Spannung Null, so würde der Strom, der von E durch AB fließt, zum Teil über V, G nach A gelangen. Dieser Strom wird nun aber tatsächlich durch den Strom kompensiert, den V liefert. Man verschiebt nun den beweglichen Schleifkontakt C so lange, bis durch das Galvanometer überhaupt kein Strom mehr fließt, was man an dem Fehlen eines Ausschlages erkennen kann. Diese Stellung C liest man ab. Dann ersetzt man V durch die zweite zu messende Stromquelle V', also z. B. den stromdurchflossenen Widerstand, der oben erwähnt ist, den man auch als Stromquelle ansehen kann, und verschiebt C bis zu dem Punkte C', bis in G wieder Stromlosigkeit eintritt. Dann müssen die Spannungen von V zu der von V' sich wie die Länge BC zu BC' verhalten, die Spannungsvergleichung ist also auf Längenmessungen zurückgeführt. Man kann sich die Anordnung auch so klarmachen: die Spannung E fällt von B bis A ab, zwischen den Punkten B und C wird dann die Spannung $E \cdot \frac{CB}{AB}$ herrschen; die Spannung zwischen dem — Pol des Elementes V und dem Punkt B ist natürlich V. In dem Fall also, wenn $V = E \cdot \frac{CB}{AB}$ ist, ist die Spannung am Punkte C gleich der am — Pol des Elementes V, d. h. die Spannung an beiden Enden des Leitungsteiles CGV ist gleich, durch die Leitung fließt kein Strom. Das wichtigste bei dieser Methode, der **Kompensationsmethode**, ist, daß aus V tatsächlich kein Strom entnommen wird, und das ist insofern von großer Bedeutung, als das Normalelement durch die Entnahme einer großer Stromstärke unbrauchbar gemacht wird.

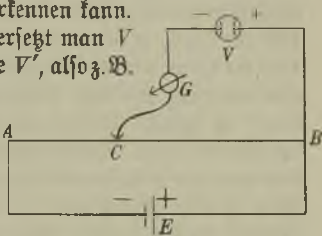

Abb. 33. Kompensationsmethode zur Spannungsmessung.

Man hat nun also tatsächlich für die drei wichtigen elektrischen Grundeinheiten drei relativ einfache Maße bzw. Meßmethoden, die, wenigstens die Widerstands- und Spannungseinheit, für die Praxis mit leichter Mühe verwendbar sind. Wie man diese nun praktisch bei Messungen anwendet, soll an einigen Beispielen gezeigt werden, die gleichzeitig einige bereits früher angedeutete Ergänzungen geben.

Die Messung von **Temperaturen** wurde nach dem bisher Besprochenen mittels Luftthermometer und Quecksilberthermometer ausgeführt. Man kann sie aber auch sehr genau, und z. T. viel bequemer mittels Elektrizität messen. Einmal auf dem Wege, indem man die Eigenschaft der Metalle benutzt, ihren Widerstand mit der Temperatur zu verändern. Man benutzt Widerstandsthermometer, bestehend aus einem dünnen Draht aus Platin, Nickel usw., selbstverständlich Metallen, die einen möglichst hohen Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstandes haben. Manganin wäre also in diesem Falle gemäß der obigen Tabelle das ungeeignetste Material. Nehmen wir an, ein solches Widerstandsthermometer aus Platin habe bei 0° C einen Widerstand von 100,00 Ohm, so verändert er sich bei einer Erwärmung auf + 1° auf 100,40 Ohm, bis + 50° auf 120 Ohm und bis 100° auf 140 Ohm, also um ganz merkliche Beträge, die man vorzüglich messend verfolgen kann, da gerade Widerstandsmessungen sich mit großer Genauigkeit ausführen lassen. Die Widerstandsmessung selbst nimmt man vor, indem man das Widerstandsthermometer an die Stelle W der Wheatstoneschen Brücke schaltet und N durch einen Normalwiderstand von etwa gleicher Größe ersetzt. Dann sind die Einstellungen des beweglichen Kontaktes direkt ein Maß der Temperatur von W. Oder man sendet durch das Widerstandsthermometer und einen Normalwiderstand, indem man sie hintereinander schaltet, den gleichen Strom hindurch und vergleicht nach der Kompensationsmethode die Spannungsdifferenz zwischen den Enden dieses Thermometers mit der zwischen den Enden des Normalwiderstandes. Ein Widerstandsthermometer muß natürlich mit Hilfe von Luft- oder Quecksilberthermometern geeicht sein. Für wissenschaftliche Zwecke findet fast ausnahmslos als Widerstandsmaterial reiner Platindraht Anwendung. Sein Verhalten ist von Callendar und Barnes genau untersucht, so daß man nur für jeden Platinwiderstand seinen Widerstand bei 0° zu messen braucht, um dann die Widerstände für alle Temperaturen berechnen zu können. Für genaueste Messungen untersucht man einen solchen Widerstand bei 0° und bei 100°. Die aus diesem Werte direkt erhaltenen Temperaturen bezeichnet man als Platintemperaturen. Ihren Zusammenhang mit dem Werte eines Wasserstoffthermometers gibt die nachstehende Tabelle.

Wasserstofftemperatur	Platintemperatur	Wasserstofftemperatur	Platintemperatur
0°	0,000	60°	60,370
10°	10,141	70°	70,323
20°	20,246	80°	80,246
30°	30,323	90°	90,141
40°	40,370	100°	100,000
50°	50,385		

Eine ganz andere Methode der Temperaturmessung ist die thermoelektrische. Als Thermoelektrizität bezeichnet man die Erscheinung, daß bei zwei verschiedenen Metalldrähten, die an einem Ende zusammengelötet sind, bei Erwärmung dieser Lötstelle eine Spannungsdifferenz zwischen ihren freien Enden auftritt. Man geht also so vor, daß man die Lötstelle der zu messenden Temperatur aussetzt, und die beiden freien Enden in geeigneter Weise in schmelzendes Eis eintaucht und von dort Drähte weiterführt, die zur Spannungsmeßeinrichtung führen. Als Thermoelemente verwendet man am meisten einen Platindraht gegen einen Platinrhodiumdraht, der bei einem Temperaturunterschied von 1^0 eine Spannungsdifferenz von 10 Mikrovolt (1 Mikrovolt = 1 Millionstel Volt) gibt, oder Eisen-Konstantan mit 53 Mikrovolt, Eisen-Nickel mit 32 Mikrovolt, und eine ganze Reihe anderer Kombinationen. Die vorhergehende Eichung solcher Elemente mittels Thermometer ist natürlich erforderlich. Die Messung der Spannung, die sie erzeugen, erfolgt meistens nach der Kompensationsmethode, oder indem man die Elemente direkt an ein geeignetes Galvanometer anschließt, durch Messung seines Ausschlages. Sein Ausschlag ergibt die vom Element gelieferte Stromstärke, und, da sein Widerstand als unveränderlich anzusehen ist, kann man daraus die Spannung des Thermoelementes berechnen. Die Messung läßt sich in allen Fällen recht genau ausführen, man muß indessen darauf Rücksicht nehmen, daß nicht an anderen Stellen unbeabsichtigt thermoelektrische Erscheinungen auftreten, denn jede Verbindungsstelle, an der zwei verschiedene Metalle zusammenstoßen, also hauptsächlich Klemmschrauben, sind ebenfalls kleine Thermoelemente, und liefern eine gewisse, wenn auch sehr kleine Spannung, wenn sie sich über die Temperatur der Umgebung erwärmt. Bei allen elektrischen Messungen, bei denen nur kleine Ströme in Frage kommen muß hierauf genau geachtet werden.

Dagegen ist für manche Zwecke ein Thermoelement unentbehrlich. Denn jeder Körper, dessen Temperatur gemessen werden soll, muß einen Teil seiner Wärme an das Thermometer abgeben, das zur Messung verwendet wird, und hat man nur geringe Mengen des Körpers zur Verfügung, oder ist seine spezifische Wärme nur klein, so ist diese so abgegebene Wärmemenge nicht immer ohne Bedeutung, und da hilft das Thermoelement, da bei ihm nur eine kleine Lötstelle erwärmt zu werden braucht, wozu eine Wärmemenge gehört, die stets vernachlässigbar ist; außerdem ist es in der Lage, Schwankungen der Temperatur ganz wesentlich schneller zu folgen als ein Quecksilberthermometer, das man im allgemeinen etwa mindestens 10 Minuten der zu messenden Temperatur aussetzen soll, ehe man annehmen kann, daß es nun auch diese richtig anzeigt. Endlich sei noch erwähnt, daß ein Thermoelement die Temperaturverteilung im Innern aller Körper punktweise bequem zu messen gestattet, Aufgaben, bei dem ein Quecksilber-, und noch mehr ein Gasthermometer notwendig versagen muß.

Mit Anwendung der Elektrizität ist es auch vielfach unternommen worden, das mechanische Wärmeäquivalent zu bestimmen. Aus dem früher S. 87 Erörterten weiß man, daß ein Volt-Ampere, oder ein Watt 10^7 Erg leistet. Diese Arbeit setzt man in Wärme um, etwa so, daß man ein Ampere durch einen Draht von genau 1 Ohm Widerstand strömen läßt. Die Spannungsdifferenz an den Enden dieses Drahtes beträgt dann 1 Volt, und die im Draht in Wärme umgesetzte Leistung beträgt also ein Watt. Die entstehende Wärmemenge muß kalorimetrisch gemessen werden. Eine solche umfassende Messungsreihe hat z. B. Dieterici ausgeführt. Er verwendet das S. 59 beschriebene Eiskalorimeter. Den Draht brachte er in dem inneren Gefäß dieses unter, und er maß die in einer bestimmten Zeit hindurchgeflossene Elektrizitätsmenge mittels des Silbervoltameters. Gleichzeitig bestimmte er den Widerstand des Drahtes durch Vergleich mit einem Normalwiderstand in der Wheatstoneschen Brückenschaltung. So hatte er die Daten zur Berechnung der aufgewendeten elektrischen Energie zur Verfügung, die noch insofern eine Korrektion erfahren mußten, als durch die Zuleitungen des eigentlichen Widerstandsdrahtes eine gewisse Wärmemenge aus dem Kalorimeter durch Leitung entfernt wurde. Die entstandene Wärmemenge maß er durch Wägung des in das Kalorimeter eingesaugten Quecksilbers, das einem vorher genau gewogenen Quecksilbergefäß entnommen wurde, in das die Kapillare des Kalorimeters hineinragte. Zur tatsächlichen Berechnung der erzeugten Wärmemenge braucht er dann noch die Zahl der Kalorien, die erforderlich ist, um 1 g Eis zum Schmelzen zu bringen, d. h. die Schmelzwärme des Eises, die nach Versuchen z. B. von Bunsen genau bekannt war. Dieser hatte kalorimetrisch diese Zahl zu 80,025 gefunden, indem er nach den früher besprochenen Methoden ein Stück Eis, das er gewogen hatte, in ein mit Wasser gefülltes Kalorimeter legte, und dessen Temperaturabfall maß. Außer dieser Zahl war noch die Kenntnis der Volumenänderung des Eises beim Schmelzen erforderlich (vgl. S. 60), die z. B. von Bunsen bestimmt wurde, und zwar in einem Apparat, der seinem Eiskalorimeter sehr ähnlich war. In einem zylindrischen Rohre ließ er eine gewogene Masse Wasser gefrieren, füllte den übrigen Teil mit Quecksilber und verschloß es mit einer feinen Kapillare, genau so wie das Eiskalorimeter. Dann brachte er das Eis zum Schmelzen, und da Eis eine kleinere Dichte als Wasser hat, was man daran sieht, daß es auf der Oberfläche vom Wasser schwimmt, wurde der vom Wasser eingenommene Raum kleiner, und es wurde Quecksilber eingesogen. Damit konnte die Volumenänderung beim Schmelzen von 1 g Eis berechnet werden, sie beträgt etwa 0,0909 ccm, d. h. 1 ccm Wasser von 0^0 nimmt, wenn es gefroren ist, den Raum von 1,0909 ccm ein.

Mit diesen Zahlen konnte dann Dieterici die erzeugte Wärmemenge messen. Da nun gemäß der früheren Definition 1 Watt gleich 10^7 Erg ist, und die von 1 Watt entwickelte Wärmemenge gemessen ist, konnte so der Zusammenhang beider oder das mechanische Wärmeäquivalent berechnet werden. Er fand als Mittel aller seiner Versuche, daß eine Grammkalorie äquivalent $4{,}2436 \cdot 10^7$ Erg ist. Rowland hatte (S. 62) dafür $4{,}1887 \cdot 10^7$ Erg gefunden, der heute angenommene Wert ist 4,189 mal 10^7 Erg. Bei den Schwierigkeiten der Untersuchungen sind diese immerhin geringen Abweichungen wohl erklärlich.

Endlich sei als letztes Beispiel der Anwendungen der elektrischen Maße bei anderen Messungen noch die schon früher angedeutete Bestimmung des mechanischen Lichtäquivalentes durch Ångström kurz besprochen, oder die Messung der Strahlung einer Hefnerlampe. Als Meßinstrument benutzte Ångström das Pyrheliometer, oder das Bolometer, wie es heute meistens genannt wird. Das Bolometer besteht aus ganz dünnem Platinblech, dessen Dichte je nach der gewünschten Empfindlichkeit bis auf ein bis zwei Tausendstel Millimeter heruntergeht. Man erhält es, indem man ein Platinblech zwischen zwei Silberbleche legt, diese drei Bleche gleichzeitig möglichst dünn auswalzt, und dann auf die gewünschte Form ausschneidet, im allgemeinen Gitterform. Dann wird das Silber durch Salzsäure, die das Platin ja nicht angreift, weggeätzt, so daß dieses allein übrigbleibt. Durch geeignete Dicke der Bleche kann man jede beliebige Feinheit dieser Streifen erhalten.

Ein solches Bolometer ist eins der empfindlichsten Instrumente zur Messung der Wärme- und Lichtstrahlungen. Es genügt ja eine ganz verschwindend geringe Wärmemenge, um die feinen Platinstreifen zu erwärmen, und damit ihren elektrischen Widerstand zu verändern, und so mißt man auch die Wärmestrahlung. Man stellt das Instrument so auf, daß es von der zu messenden Strahlung, also z. B. der einer Hefnerlampe aus 1 m Abstand getroffen wird, und mißt seine Widerstandsänderung infolge seiner Erwärmung. Sodann entfernt man diese Lampe und sendet durch das Bolometer einen Hilfsstrom, dessen Stärke man so bemißt, daß der Bolometerwiderstand um den gleichen Betrag wie vorher verändert wird. Aus der Stromstärke des hierzu erforderlichen Stromes und dem Bolometerwiderstand kann man dann die aufgewendete Energie berechnen, und weiß so, daß sie die gleiche ist, wie die durch die Hefnerlampe erzeugte. Das von Angström verwendete Bolometer hatte eine Oberfläche von 4 qcm, er maß also stets die Energie, die auf eine Fläche dieser Größe auffällt. Er maß so einmal die Gesamtstrahlung, also Licht- und Wärmestrahlung, und dann die reine Lichtstrahlung, indem er zwischen Lampe und Bolometer eine Wasserschicht brachte, welche die Wärme vollständig verschluckt und nur die Lichtstrahlen durchläßt. Er erhielt so das Ergebnis, daß die Gesamtstrahlung einer Hefnerlampe auf einer Oberfläche von 1 qcm in 1 m Abstand 0,00129 Grammkalorien pro Minute, oder 0,0000215 Grammkalorien pro Sekunde oder 900 Erg pro Sekunde, oder auf eine Fläche von 1 qm in 1 m Abstand fällt in der Sekunde eine Gesamtstrahlung von $900 \cdot 10^4$ Erg, d. h. 0,9 Watt. Hiervon sind aber nur 0,0081 Watt leuchtende Strahlen. Der Rest von 0,8919 Watt sind für das Auge unsichtbare Wärmestrahlen. Nur der hundertste Teil der bei der Verbrennung entstehenden Energie wird also bei dieser Flamme in Licht umgesetzt, der Rest geht als Wärmeenergie nutzlos verloren. Eine Kugel mit 1 m Radius hat bekanntlich eine Oberfläche von $4\,\pi$ qm ($\pi = 3{,}14159$) oder $4\,\pi$ mal 10^4 qcm. Die Gesamtstrahlung einer Hefnerlampe nach allen Richtungen im Raum ist also in der Sekunde $4\,\pi \cdot 10^4$. $0{,}0000215 = 2{,}7$ Grammkalorien, oder 1,13 Watt.

Nehmen wir zum Vergleich einmal die Sonne heran. Diese strahlt, wenn sie im Zenit steht, auf 1 Quadratmeter der Erdoberfläche in der Sekunde $^1/_3$ Kilogrammkalorien = 333 Grammkalorien. Ihre Strahlung auf dieses Stück der Erdoberfläche ist also, wohl gemerkt ohne den großen Betrag, der in der Atmosphäre absorbiert wird, $^1/_3$ mal 427 kgm = 142 kgm = 1,9 Pferdestärken. Solche Energiemengen könnte man also theoretisch der Sonnenstrahlung entnehmen. Die Gesamtstrahlung der Sonne ist, wie hier noch mitgeteilt sein mag 0,184 mal 10^{27} Kilogrammkalorien in der Sekunde, man braucht also eine recht große Anzahl Hefnerlampen, um durch diese die Sonne zu ersetzen, eine Zahl die durch 68 mit 24 Nullen dargestellt wird. Die Lichtstärke der Sonne ist etwa 10^{27} Hefnerkerzen.

Wir haben früher gesehen, daß in der Elektrizitätslehre zwei Maßsysteme nebeneinander bestehen, die in ihren Einheiten verschieden sind, das elektrostatische, das von den Anziehungskräften zweier Elektrizitätsmengen ausgeht, und das elektromagnetische, das von den Wirkungen zweier Ströme, also fließender Elektrizitätsmengen ausgeht. In beiden sind die gebräuchlichen Einheiten enthalten, Elektrizitätsmengen, Stromstärken, Spannungen und Widerstände. Andere haben wir, als für uns ohne Bedeutung, nicht erwähnt. Wie hängen nun diese Einheiten untereinander zusammen? Stellen wir einmal die einzelnen Dimensionsformeln zusammen.

	Elektrostatisches Maßsystem	Elektromagnetisches Maßsystem	Quotient beider
Elektrizitätsmenge	$\left[cm^{\frac{3}{2}} g^{\frac{1}{2}} sec^{-1}\right]$	$\left[cm^{\frac{1}{2}} g^{\frac{1}{2}}\right]$	$[cm\,sec^{-1}]$
Stromstärke	$\left[cm^{\frac{3}{2}} g^{\frac{1}{2}} sec^{-2}\right]$	$\left[cm^{\frac{1}{2}} g^{\frac{1}{2}} sec^{-1}\right]$	$[cm\,sec^{-1}]$
Spannung	$\left[cm^{\frac{1}{2}} g^{\frac{1}{2}} sec^{-1}\right]$	$\left[cm^{\frac{3}{2}} g^{\frac{1}{2}} sec^{-2}\right]$	$[cm^{-1} sec^{1}]$
Widerstand	$[cm^{-1} sec^{1}]$	$[cm\,sec^{-1}]$	$[cm^{-2} sec^{2}]$.

Man sieht, der Quotient ist in den beiden ersten Fällen eine Geschwindigkeit, im dritten $\left(\frac{1}{[cm\,sec^{-1}]}\right)$ eins dividiert durch eine Geschwindigkeit, im letzten $\left(\frac{1}{[cm\,sec^{-1}]^2}\right)$ eins dividiert durch das Quadrat einer Geschwindigkeit. Allgemein ist, wenn wir diese Geschwindigkeit mit v bezeichnen, jede Maßeinheit des einen Systems aus der entsprechenden des anderen durch Multiplikation mit v, v^2, $\frac{1}{v}$ oder $\frac{1}{v^2}$ abzuleiten. Kennt man diese Geschwindigkeit, so ist sofort jede Umrechnung möglich. Man sieht sofort, daß

eine	elektrostatische	Einheit	d. Elektrizitätsmenge	gleich	v	elektromagnetischen	ist,
„	„	„	„ Stromstärke	„	v	„	„
„	„	„	„ Spannung	„	$\frac{1}{v}$	„	„
„	„	„	„ Widerstandes	„	$\frac{1}{v^2}$	„	„

Diese Geschwindigkeit läßt sich experimentell bestimmen, indem man eine der elektrischen Größen nach beiden Maßsystemen absolut mißt.

Weber und Kohlrausch stellten zuerst diese Messungen an und zwar mittels Elektrizitätsmenge. Sie luden eine der bekannten Leidener Flaschen und bestimmten mittels Elektrometers, also nach einer elektrostatischen Methode, die Spannungsdifferenz der äußeren gegen die innere Belegung. Dann berührten sie die innere Belegung mit einer isolierten Metallkugel und nahmen so einen Teil ihrer Ladung fort.

Aus der Veränderung der Elektrometerablesung konnten sie dann die Spannungsänderung berechnen und gleichzeitig auch die in der Flasche vorhandene Elektrizitätsmenge. Jetzt verbanden sie die beiden Belegungen durch ein Galvanometer, die beiden Elektrizitätsmengen glichen sich momentan durch dieses aus, und das Galvanometer gab einen momentanen Ausschlag. Aus diesem Ausschlag konnte die hindurchgeflossene Elektrizitätsmenge berechnet werden, natürlich nach elektromagnetischen Einheiten. Die vorher durch die Metallkugel entnommene Elektrizitätsmenge wurde dann elektrostatisch gemessen. Ihre Ladung wurde so, daß man sie mit einer anderen isolierten Kugel berührte, geteilt und die Abstoßung gemessen, die sie aufeinander ausübten, wobei man also den Fall hat, der fast vollständig dem Coulombschen Gesetz entspricht. So hat man also zwei bekannte Elektrizitätsmengen, die eine elektromagnetisch, die andere elektrostatisch gemessen, und kann so aus beiden die gesuchte Geschwindigkeit berechnen.

Um nun die vielfachen Methoden nicht einzeln besprechen zu müssen, sei nur das Prinzip kurz noch erläutert, auf dem sie zum größten Teil beruhen. Man verwendet eine galvanische Batterie deren Spannung man absolut nach elektromagnetischen Einheiten mißt, also indem man ihre Pole durch einen Widerstand schließt, der absolut gemessen ist, und die Stromstärke in ihm nach absolutem Maß, also z. B. mittels Tangentenbussole, mißt. So ermittelt man die Spannung der Batterie in elektromagnetischen Einheiten. Um sie in elektrostatischen Einheiten zu bestimmen, verwendet man z. B. ein Thomsonsches Schutzringelektrometer, indem man den einen Pol mit der festen, den anderen mit der beweglichen Schutzringplatte verbindet und die Kraft feststellt, mit der sich beide anziehen. Der Quotient der beiden so gefundenen Spannungen gibt dann ebenfalls v.

Als Resultate haben nun alle Beobachter, unabhängig nach welchen Methoden sie arbeiteten, einen eigenartigen Wert gefunden, nämlich im Mittel aus allen Beobachtungen, die bis jetzt vorliegen $3 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm\,sec^{-1}}$, oder eine Geschwindigkeit von 300000 km in der Sekunde. Das ist aber ein in der Naturwissenschaft schon lange genau bekannter Wert, nämlich die Geschwindigkeit, mit der sich die Lichtwellen fortpflanzen, und ebenso die elektrischen Wellen. Diese universelle Naturkonstante, die also die Geschwindigkeit angibt, mit der sich Schwingungen in dem Äther, der uns Licht- und elektrische Wellen übermittelt, fortpflanzen, finden wir hier an einer sicherlich ganz unerwarteten Stelle wieder.

Schließen wir damit diesen Abschnitt, und stellen wir nun noch einmal mit Hilfe dieser Konstante die Beziehungen der Einheiten zueinander fest:

1 Volt	$= 10^8$	elektro-	$= \frac{1}{300}$	elektro-
1 Ampere	$= 10^{-1}$	magnetische	$= 3 \cdot 10^9$	statische
1 Ohm	$= 10^9$	Einheiten	$= \frac{1}{9} \cdot 10^{-11} = \frac{1}{3^2} \cdot 10^{-11}$	Einheiten.
1 Coulomb	$= 10^{-1}$		$= 3 \cdot 10^9$	

Schluß.

Überblicken wir nun noch in Kürze einmal, was das Ergebnis der ganzen Erörterungen ist. Wir haben gesehen, daß wir alle physikalischen Größen auf nur drei Grundeinheiten zurückführen können, auf eine Längeneinheit, eine Masseneinheit und eine Zeiteinheit. Diese drei Grundeinheiten an sich sind voneinander unabhängig. Alle drei sollten ursprünglich ein Naturmaß sein, die Zeiteinheit ist es tatsächlich auch, da sie dauernd aus der Rotation der Erde wiederhergestellt und überwacht wird. Die Längeneinheit sollte aus dem Erdumfang abgeleitet sein, entwickelte sich aber zu einem Maß, das wir heute als unabhängig von dem Erdumfang ansehen müssen, das nur noch insofern mit ihm zusammenhängt, als es nahezu der $4 \cdot 10^7$. Teil des Erdumfanges ist. Die Masseneinheit ist mit Hilfe der Längeneinheit und des Wassers und seiner Eigenschaften ursprünglich auch als Naturmaß geplant, ist aber auch von dieser Definition unabhängig geworden, und hängt auch nur noch lose mit dieser zusammen. Als Prototypmaße gelten somit heute für Länge und Masse nicht mehr Naturmaße, sondern die beiden Maße, die in Paris im Internationalen Maß- und Gewichtsbureau deponiert sind. Die Aufgabe der Metronomie ist es nun, abgesehen von ihren umfassenden Aufgaben der Vergleichung anderer Maße untereinander und mit diesen, und der Vervollkommnung der Meßmethoden, jene Prototypmaße mit anderen Maßen zu vergleichen, die wir als Naturmaße ansehen können, und die wir ihrem Wesen nach als unveränderlich betrachten müssen, eine Eigenschaft, die künstlich hergestellte Maße nicht zu haben brauchen und auch in den allermeisten Fällen nicht haben. Als ein solches Naturmaß ist nun zunächst die Lichtwellenlänge gefunden, für eine spektroskopisch genau bestimmbare Farbe. Auf dieser Grundlage sind die Auswertungen des Meters in Wellenlängen ausgeführt. Eine Masseneinheit, die wir als Naturmaß ansprechen können, kennen wir nicht, deswegen ist zunächst, auf dem gleichen Wege, wie das Kilogramm ursprünglich geschaffen ist, das Kilogramm durch Zuhilfenahme des Wassers und seiner Eigenschaften an die Längeneinheit angeschlossen. Das sind die Messungen über das

Volumen eines Kilogramms Wasser oder die Masse eines Kubikdezimeters Wasser.

Die *mechanischen* Maßeinheiten lassen sich ausnahmslos auf jene drei Grundeinheiten zurückführen. Neue Einheiten treten dann hinzu bei den anderen Gebieten der Naturwissenschaft. Die *Wärmemenge* und die *Temperatur* sind scheinbar neue Einheiten, sie werden aber ebenfalls unter Zuhilfenahme des Wassers und seiner Eigenschaften miteinander verbunden, und durch das mechanische Wärmeäquivalent auf die Grundeinheiten zurückgeführt. Die Optik bringt als einzige neue Einheit die *Lichtstärke*, die, von physiologischen Gesichtspunkten beherrscht, sich nicht ohne weiteres den Grundeinheiten einordnen läßt. Das Wichtigste, die *Energie* der Strahlung, sei es Licht- sei es Wärmestrahlung, läßt sich ohne weiteres mechanisch, wie beim Bolometer, messen und dem Maßsystem einordnen. Die elektrischen Maßeinheiten beruhen in ihren Definitionen ausnahmslos auf den mechanischen Kraftwirkungen der Elektrizitätsmengen, Magnetpolen oder Strömen aufeinander, sind damit von Anbeginn an auf die Grundeinheiten zurückgeführt. Andere Wissensgebiete, in denen Messungen vorgenommen werden, die Astronomie, Chemie usw., bedürfen keiner neuen Maßeinheiten mehr. Sämtliche Maße sind in jenen enthalten.

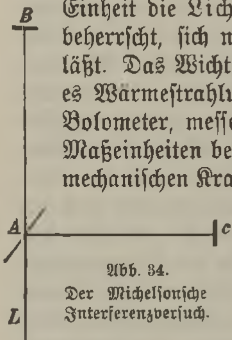

Abb. 34. Der Michelsonsche Interferenzversuch.

Dieses ganze System nennt man nach dem Vorgang seiner Begründer *Gauß* und *Weber* das *absolute* Maßsystem; absolut nur insofern, als alle Maße der verschiedensten Gebiete auf gewisse Grundmaße, die allen Gebieten sozusagen übergeordnet sind, zurückgeführt werden.

Die Praxis kann natürlich nicht immer jene absoluten Einheiten ohne weiteres verwenden, weil sie zu schwer zu messen, oder zu unpraktisch anzuwenden sind. Für sie werden besser verwendbare eingeführt, es sei nur z. B. an die Normalelemente erinnert, die wiederum durch die absoluten Maßeinheiten in ihren Werten festgelegt und überwacht werden. Hier liegt auch das umfangreiche Gebiet, wo nicht die Maße selbst angewendet werden, sondern die *Meßinstrumente*, die ohne direkte Anwendung einer Maßeinheit gesuchte Größen sofort zu messen gestatten. Das bekannteste solcher Instrumente ist ja das Thermometer. Es ist wohl selbstverständlich, daß zu jeder Messung neben den Maßen auch Meßinstrumente gehören. Die Praxis verwendet von diesen Meßinstrumenten nun mit Vorliebe solche, welche die zu messende Größe direkt abzulesen gestatten, ich erinnere nur an die elektrischen Meßinstrumente, die Stromstärken, Spannungen oder Leistungen direkt an einer

Skala angeben. Alle solche Meßinstrumente müssen natürlich mittels der Maßeinheiten geeicht sein.

So ist das ganze Meßsystem der Naturwissenschaften einheitlich und in sich geschlossen.

Zum Abschluß dieses Werkchens sei nun noch auf einen Punkt flüchtig hingewiesen, der erst in den letzten Jahren zur Bedeutung gelangt ist. Das ist die von Lorentz und Einstein begründete Relativitätstheorie. Da sie in ihren Grundlagen indessen von dem Inhalt des Vorgetragenen zu weit abweicht, sei nur in einem Punkte auf sie eingegangen, in dem sie mit der Metronomie zusammenhängt. Den Anstoß zur Untersuchung der von ihr behandelten Probleme bildete ein Versuch Michelsons in einer Anordnung wie Abb. 34. Er ließ einen Lichtstrahl L auf eine Glasplatte A unter 45^0 fallen und von dort nach einem zweiten c reflektieren, von dort wurde der Lichtstrahl wieder zurückgeworfen, und gelangte so wieder nach L zurück. Von dem ursprünglichen Strahl gelangte aber auch ein Teil nach einem zweiten Spiegel B und von dort nach L zurück. Diese beiden zurückkehrenden Strahlen müssen nun miteinander interferieren. Michelson untersuchte nun, ob die Erdbewegung auf diese Interferenzerscheinung von Einfluß sei, denn stehe AB in Nordsüd-, Ac in Ostweftrichtung, also der Richtung, in der sich die Erde dreht, so ist, wenn der Strahl in der Ostwestrichtung wieder zum Ausgangspunkt zurückkehrt, der Spiegel infolge der Erdumdrehung tatsächlich nicht mehr genau an der ursprünglichen Stelle, sondern um einen, wenn auch nur sehr kleinen Betrag nach c zu verschoben. Denn der Lichtstrahl braucht doch auch eine kleine Zeit, um diese Strecke zurückzulegen. Der Versuch war so angeordnet, daß jeder Lichtstrahl einen Weg von etwa 22 m zurücklegen mußte, d. h. daß die Spiegelentfernung 11 m war. Um keine längere Rechnung einzufügen, sei erwähnt, daß mathematisch eine Verschiebung des Interferenzbildes um 0,4 Streifenbreiten erwartet wurde, es wurde aber keine Verschiebung beobachtet, trotzdem eine solche von etwa 0,01 Streifenbreiten hätte wahrgenommen werden müssen. Zur Erläuterung sei darauf hingewiesen, daß das einer scheinbaren Längenänderung der Lichtwege von rund $\frac{1}{4 \cdot 10^9}$ entspricht. Desgleichen trifft der von B zurückkommende Lichtstrahl nicht mehr die ursprüngliche Stelle des Spiegels, sondern sein Schnittpunkt muß sich um einen kleinen Betrag nach links verschoben haben. Stellen wir uns nun das Interferenzbild vor, gleichgiltig in welcher Art es auftritt, und dann drehen wir die ganze Anordnung so, daß jetzt Ac in die Südnordrichtung fällt und AB in die Ostweſtrichtung. Die Spiegel ſind ſo befeſtigt, daß bei der Drehung ihre Abſtände ſich nicht ändern. Dann wird nun infolge der Erddrehung der Strahl AB in ſeiner Weglänge verändert und Ac ſeitwärts abgelenkt, d. h. das Interferenzbild wird anders. Nun beobachtete aber Michelſon, daß dieſe Veränderung nicht eintrat. Eine Erklärung dafür fehlte vollſtändig. Dieſe will die Relativitätstheorie geben. Sie behauptet, daß alle Körper unter dem Einfluß der Bewegung, in der ſie ſich befinden, alſo hier der Erdbewegung, im Weltenraume eine Veränderung ihrer Dimenſionen erfahren. Ein Beobachter, der ſich mit ihnen in der gleichen Geſchwindigkeit mitbewegt, merkt indeſſen von dieſer Veränderung nichts, dieſe kommt nur einem Beobachter zum Bewußtſein, der ſelbſt in Ruhe ſich befindet. Die Größe der Veränderung der Dimenſionen iſt gegeben durch $\frac{1}{c\sqrt{1-\frac{c^2}{v^2}}}$, wobei c die Geſchwindigkeit bedeutet, mit der ſich der Körper bewegt, und v die Lichtgeſchwindigkeit, die größte, die überhaupt möglich ſein ſoll.

Bei unſeren Maßen und Meſſungen, wie wir ſie beſchrieben haben, liegt nur ſtets der Fall vor, daß ſich Beobachter, Maße und Meßinſtrumente ſtets mit gleicher Geſchwindigkeit bewegen, nämlich mit der Erdgeſchwindigkeit. Uns können alſo ſolche Dimenſionsänderungen nicht zum Bewußtſein kommen, und die Metronomie kann bis auf weiteres die Ergebniſſe der Relativitätstheorie, die, ſo widerſinnig ſie auch erſcheinen, nicht ohne Bedeutung ſind, ohne Berückſichtigung laſſen, ohne damit unrichtige Ergebniſſe zu erlangen.

Register.

Druck von B. G. Teubner in Leipzig

N

E 11,90

57,12