Grimsehl
Lehrbuch der Physik

BAND 1

Mechanik · Akustik · Wärmelehre

Grimsehl
Lehrbuch der Physik

BAND 1

Mechanik · Akustik · Wärmelehre

22., neu bearbeitete Auflage mit 655 Abbildungen

BEGRÜNDET VON PROF. E. GRIMSEHL
WEITERGEFÜHRT VON PROF. DR. W. SCHALLREUTER
NEU BEARBEITET VON PROF. DR. K. ALTENBURG

LEIPZIG

BSB B. G. TEUBNER VERLAGSGESELLSCHAFT
1977

Vorwort

Am 16. 4. 1975 verstarb Herr Prof. Dr. W. Schallreuter, der langjährige Herausgeber dieses Lehrbuches. Ich bin gern der Aufforderung des Verlages nachgekommen, die Neubearbeitung des 1. Bandes dieses Werkes, das seit Jahrzehnten auf Grund seines bewährten didaktischen Aufbaus für die Ausbildung von Physikern, anderen Naturwissenschaftlern, Pädagogen und technischen Kräften wertvolle Dienste geleistet hat, zu übernehmen.

Die Notwendigkeit, das Buch drucktechnisch neu zu gestatten, ermöglichte gleichzeitig eine gründliche inhaltliche und stilistische Überarbeitung. Ziel dabei war es, das Bewährte zu übernehmen, die Entwicklung der Physik der letzten Jahre zu berücksichtigen sowie durch Straffung des Textes und durch zahlreiche Umstellungen eine klarere Darstellung des Stoffes zu erreichen. Manche Aussagen, die nur noch historische Bedeutung haben, wurden gestrichen; dadurch wurde Raum gewonnen, so daß einige Abschnitte, die das makroskopische Verhalten der Materie betreffen, aus Band 4 übernommen werden konnten.

Die SI-Einheiten und IUPAP-Empfehlungen wurden in allen Rechnungen konsequent angewandt; die übrigen heute noch gebräuchlichen Einheiten wurden der Vollständigkeit halber aufgeführt. Die Zahlenwerte aller Natur- und Materialkonstanten wurden überprüft.

Ich möchte dem Verlag, insbesondere Frau Dipl.-Met. Dietrich, Frau Voigt und Herrn Dipl.-Math. Neubert für ihre tatkräftige Unterstützung bei der Vorbereitung des Manuskriptes danken.

Berlin, im Juni 1976 K. Altenburg

22. Auflage
VLN 294-375/66/77 · LSV 1104
Lektor: Dipl.-Math. Hellmuth Neubert
Printed in the German Democratic Republic
Gesamtherstellung: INTERDRUCK
Graphischer Großbetrieb Leipzig – III/18/97
Bestell-Nr. 665 147 4
DDR 21,40 M

Inhalt

Einleitung

Physik bedeutete ursprünglich die Wissenschaft von der Natur überhaupt. Später wurde sie als die Wissenschaft von der unbelebten Natur bezeichnet. Sie wird heute als Wissenschaft von den Bewegungsformen der unbelebten Natur, die ohne stoffliche Veränderung verlaufen, und von den Kräften und deren Eigenschaften definiert. Die Erforschung, die systematische Zusammenfassung der Erscheinungen, die Aufdeckung der Zusammenhänge und die Zurückführung verwickelter Vorgänge auf einfache Gesetzmäßigkeiten ist ihre Aufgabe. Die Physik geht prinzipiell quantitativ vor, Gegenstand ihrer Forschung sind nur Dinge oder Vorgänge, die sich messen lassen.

Man kann bei der *Erforschung einer physikalischen Tatsache* drei Stufen unterscheiden. Zunächst handelt es sich meist darum, die Erscheinung hervorzubringen, da sehr viele Erscheinungen in reiner Form oder in merklichem Ausmaße nicht oder nur selten in der Natur vorkommen. Weiterhin muß die Erscheinung beobachtet werden, d. h., ihr Verlauf muß festgestellt und auf meßbare Größen zurückgeführt werden. Die dritte Stufe ist es, den Vorgang zu verstehen. Es muß festgestellt werden, welche Bedingungen für sein Zustandekommen wesentlich sind und welcher quantitative Zusammenhang unter den Bedingungen vorhanden sein muß, um die Erscheinung in einer gewissen quantitativen Form auftreten zu lassen. Wir verstehen eine Erscheinung, wenn wir sämtliche Bedingungen, die zu ihrem Zustandekommen notwendig sind, quantitativ kennen. Wir haben sie dann auf ihre einfacheren Bestandteile zurückgeführt. Haben wir eine Erscheinung verstanden, dann können wir sie jederzeit quantitativ wieder hervorbringen und die Anfangsbedingungen so wählen, daß der Vorgang einen gewollten Verlauf nimmt; d. h., wir können den zukünftigen Verlauf einer verstandenen Erscheinung voraussagen. Dies ist der hervorragende praktische Wert, den die Physik besitzt. Wie einschneidend die angewandte Physik unser Leben beeinflußt hat und in zunehmendem Maße umgestaltet, zeigen die aus ihr erwachsenen technischen Wissenschaften, z. B. die Wärme-, die Licht- und die Elektrotechnik und in jüngster Zeit die Atom- und die Raketentechnik, aber auch die ständig wachsende Anwendung physikalischer Gesetzmäßigkeiten im täglichen Leben, besonders in der Biologie und in der Medizin.

Die Zurückführung der Erscheinungen der unbelebten Welt leitet nun auf gewisse einfache Bestandteile hin, die sich selber nicht mehr auf einfachere beziehen lassen. Es sind dies einesteils solche *Grundbegriffe*, die wir als gegeben ansehen auf Grund des Erkenntnisvermögens unseres forschenden Geistes oder die sich ausgebildet haben durch die Art unserer Naturbetrachtung, durch jahrtausendelange Erfahrungen oder durch geschichtlich bedingte Zufälligkeiten oder Entwicklungsrichtungen. Zu den ersteren gehören etwa die Begriffe Raum und Zeit, zu den anderen etwa die Begriffe Kraft, Masse, Temperatur. Andernteils sind es gewisse Zusammenhänge, die wir (vielleicht derzeit) nicht in einfachere Bestandteile zerlegen können. Diese Zusammenhänge nennt man *Prinzipien*. Aus diesen einfachen Bestandteilen setzt sich nun das Bild des Physikers von der ihn umgebenden Wirklichkeit zusammen. Aus den von ihm ausgesonderten und ihm als menschlichem Geist gegebenen Elementen stellt er *Bilder* und *Modelle* der physikalischen Vorgänge auf, die, wie H. HERTZ es ausgesprochen hat, so beschaffen sein müssen, daß die denknotwendigen Folgen dieser Bilder stets wieder Bilder von den naturnotwendigen Folgen der abgebildeten Gegenstände sind. Dadurch ist der Naturforscher in der Lage, Zukünftiges vorauszusagen, und das Eintreffen der Voraussage ist wieder eine Prüfung der Bilder auf ihre Richtigkeit. Der Physiker wird bei seiner Forschung geführt durch das Empfinden, daß unsere Denkgesetze übereinstimmen mit den Gesetzmäßigkeiten im Ablauf der Eindrücke, die wir von der Außenwelt empfangen, daß es also Menschen möglich ist, durch reines Denken Aufschlüsse über jene Gesetzmäßigkeiten zu gewinnen (PLANCK).

Die historische Betrachtung der Entwicklung der Physik zeigt, daß je nach der menschlichen Eigenart des betreffenden Forschers zwei besondere Richtungen bei der Aufstellung derartiger Bilder feststellbar sind. Einerseits können sie sich ganz darin erschöpfen, quantitative Beziehungen zwi-

schen beobachtbaren Größen zu sein. Sie sind in diesem Falle vollkommen darstellbar in Gestalt mathematischer Formeln. Diese Art wurde von KIRCHHOFF die mathematische Beschreibung der Natur genannt, und es ist der Weg, den er und viele andere große Forscher, wie HELMHOLTZ u. a., bevorzugt haben. Daneben gibt es aber eine große Zahl anderer und mindestens ebenso erfolgreicher Forscher, die eine zweite Art der Darstellung bei ihren Entdeckungen bevorzugen. Es ist die, sich die Vorgänge bildlich als Bewegungen, dynamische Zustände, vorzustellen. Diese Art der Bilder gestattet, nicht nur das mathematische Denkvermögen, sondern auch die geometrische und dynamische Vorstellung zu verwerten. So gelangte FARADAY zu seinen Entdeckungen, auf denen das ganze Gebäude unserer heutigen Elektrizitätstheorie ruht, dadurch, daß er sich anschauliche Bilder über die elektrischen und magnetischen Kräfte machte. „Die Kraftlinien standen vor seinem geistigen Auge im Raume als Zustände desselben, als Spannungen, als Wirbel, als Strömungen, als was auch immer – das vermochte er selbst nicht anzugeben –, aber da standen sie, beeinflußten einander, schoben und drängten die Körper hin und her und breiteten sich aus, von Punkt zu Punkt einander die Erregung mitteilend" (H. HERTZ).

Auch bei der Übersetzung des Bildes FARADAYS in die Darstellung erster Art durch MAXWELL haben mechanische Modelle eine große Rolle gespielt. Besonders beim Vordringen in unbekannte Gebiete, wo es sich um probeweise gemachte Bilder handelt, sind solche Bilder dynamischer Art stets von außerordentlichem Wert gewesen. Man nennt solche provisorischen Bilder dann Arbeitshypothesen oder *Hypothesen* schlechthin. Ist ein Bild als richtig erkannt worden, so bildet die Gesamtheit der sich aus diesem Bilde logisch ergebenden, vor allem auch quantitativen Folgerungen eine *Theorie*.

Ein gutes Beispiel für die gleichzeitige Anwendung der zwei Arten von Bildern gibt die Wärmelehre. Während die Thermodynamik, nur mit beobachtbaren Größen arbeitend, ein vollendetes Beispiel der Bilder erster Art ist, gibt die mechanische Wärmetheorie unter dem Bilde der Bewegung der Moleküle ein ebenso vollendetes und ebenso quantitativ durchgebildetes Bild der zweiten Art. Ein Vergleich der beiden Beschreibungsarten wird jedem die Vor- und Nachteile dieser Darstellungsmethoden erkennen lassen, je nach dem Zweck, zu dem er sie verwenden will, und je nach seiner Veranlagung. Hierbei ist nicht zu leugnen, daß die eigentlichen Grenzen der Theorie und die Bedeutung vieler Begriffe erst durch die anschauliche Betrachtungsweise klargeworden sind. Das Bild, das wir uns heutzutage vom Standpunkt der Bilder zweiter Art von der physikalischen Wirklichkeit machen, weist einige Grundzüge auf, die im folgenden kurz dargelegt werden sollen.

Untersuchen wir die Erscheinungen, die uns umgeben, genauer, so erkennen wir, daß sie teils an greifbare, wie wir sagen, materielle Körper geknüpft sind (wie etwa Bewegung, Wärme, Schall), teils von solchen unabhängig sind (wie gewisse Erscheinungen der Elektrizität und des Lichtes). Alle greifbaren Körper lassen sich aus etwa 100 Grundstoffen, den sog. chemischen Elementen, aufbauen, und alles, was aus diesen Grundstoffen besteht, wollen wir Materie nennen.

Außerdem muß aber, wie Gravitations-, elektrische und magnetische Wirkungen zeigen, auch der leere Raum noch Träger physikalischer (insbesondere elektromagnetischer) Erscheinungen sein.

Die *Einteilung der Physik* hat sich zunächst nach den Einwirkungen der Außenwelt auf unsere Sinnesorgane vollzogen. Das genaue Studium der Erscheinungen hat aber Beziehungen enthüllt und Schlüsse erlaubt, die gänzlich außerhalb dieses Zusammenhangs stehen. So wird heute eine so spezifische Grundempfindung wie die Wärme auf eine reine Bewegungserscheinung zurückgeführt. Das gleiche gilt vom Schall. In beiden Fällen handelt es sich nur um verschiedene Arten der Bewegung ein und derselben Grundsubstanz, der Materie. Außerdem ist es gelungen, das Licht, das ähnlich wie Wärme und Schall eine Grundsinnesempfindung in uns auslöst, als einen elektromagnetischen Vorgang zu erklären, so wie es bereits vorher gelungen war, den Magnetismus als ein Teilgebiet der elektromagnetischen Gesamterscheinungen darzustellen.

Die Verschmelzung dieser beiden großen Grundgebiete der Physik zu einem Ganzen ist trotz vielerlei Verkettungen und Brücken noch nicht gelungen; es hat sich vielmehr gezeigt, daß die Zurückführung elektromagnetischer Erscheinungen auf mechanische Vorgänge nicht möglich ist und es andererseits auch nicht gelingt, mechanische Vorgänge elektrisch zu deuten. Daher muß die Einordnung der Gesamtheit der physikalischen Erscheinungsgruppen unter einem allumfassenden Gesichtspunkt künftiger Forschung vorbehalten bleiben. Auf Grund obiger Erkenntnisse kann

folgende Einteilung der Physik vorgenommen werden: 1. Die Beschreibung und Erforschung derjenigen Gesetzmäßigkeiten, die in der Wechselwirkung von Materie mit Materie bestehen. Es ist dies das Gebiet der *Mechanik* und aller derjenigen Erscheinungen, die sich rein mechanisch auffassen lassen, wie Wärme und Schall. Dieses Gebiet soll zunächst den Gegenstand unserer Betrachtungen in diesem Bande bilden. 2. Die Beschreibung und Erforschung des Gesamtgebietes der *elektromagnetischen Erscheinungen* (heute bereits der wesentlich größere Teil der Physik) und ihrer Wechselwirkung mit der Materie. Dies bildet den Gegenstand der folgenden Bände.

1. Maße und Messen

1.1. Die Grundlagen physikalischer Messungen

1.1.1. Das Messen physikalischer Größen

Das Ziel einer Messung ist die qualitative und quantitative Beschreibung eines Merkmals, einer (*physikalischen*) *Größe* eines physikalischen Objektes.

Eine Größe ist ein Merkmal eines physikalischen Objektes (Ding, Zustand oder Vorgang), das qualitativ charakterisiert und quantitativ bestimmt werden kann.

Die Messung einer *Größe* besteht in dem quantitativen Vergleich dieser Größe mit einer Größe gleicher Art, die durch Absprache als *Einheit* festgelegt ist. Die Zahl, die angibt, wie oft die Einheit in der betreffenden Größe enthalten ist, heißt *Zahlenwert* der Größe. Man kann deshalb jede Größe y als Produkt eines Zahlenwertes $\{y\}$ mit einer Einheit $[y]$ darstellen:

Größe = Zahlenwert · Einheit

oder

$$y = \{y\} \cdot [y].$$

Der Zahlenwert einer Größe ändert sich beim Übergang zu anderen Einheiten, die Größe ist unabhängig von der benutzten Einheit; sie ist *einheiteninvariant*.
Die Gesamtheit der Größen einer Art bezeichnet man als *Größenart*; Größenarten sind z. B. Länge, Masse, Druck usw.

1.1.2. Einheitensysteme

Um die Ergebnisse von Messungen, die zu verschiedener Zeit an verschiedenen Orten und von verschiedenen Personen ausgeführt werden, vergleichen zu können, ist es erforderlich, bestimmte Einheiten international festzulegen. Ein wesentlicher Schritt in dieser Richtung bildete die 1875 zwischen 17 Staaten abgeschlossene *Internationale Meterkonvention*, der Ende 1973 43 Staaten angehörten. Vertreter der an dieser Konferenz beteiligten Staaten treten mindestens alle 6 Jahre zur *Generalkonferenz für Maß und Gewicht* (Conférence Générale des Poids et Mesures, CGPM) zusammen. Auf diesen Konferenzen werden die entscheidenden Festlegungen für die Vereinheitlichung der Maßsysteme getroffen.
Auf der 11. CGPM wurde im Jahre 1960 ein Einheitensystem mit 6 Grundeinheiten angenommen, das den Namen „*Internationales Einheitensystem*" (Système International d'Unités), abgekürzt „*SI*", führt. Die Grundeinheiten dieses Systems sind: Meter für die Länge, Kilogramm für die Masse, Sekunde für die Zeit, Ampere für die elektrische Stromstärke, Kelvin für die Temperatur und Candela für die Lichtstärke.
Im Jahre 1971 wurde als weitere Grundeinheit der Stoffmenge das Mol eingeführt.

Wir werden im folgenden stets SI-Einheiten benutzen. Zum Verständnis der Literatur ist es notwendig, die wichtigsten, früher benutzten Einheitensysteme zu kennen, wobei wir uns auf jene Systeme beschränken wollen, die für die im Bd. I behandelten Probleme wesentlich sind.[1]) Für die Physik hatte insbesondere das von Gauss und Weber vorgeschlagene und 1881 eingeführte *cgs-System* große Bedeutung. Die Grundeinheiten dieses Systems sind Zentimeter, Gramm und Sekunde. 1901 schlug Giorgi ein Einheitensystem mit den 4 Grundeinheiten Meter, Kilogramm, Sekunde und einer elektrischen Einheit vor; dieses *Giorgische System* enthält bereits wesentliche Elemente des SI.
In der Technik benutzt man vielfach als Grundeinheiten das Meter, das Kilogramm für die Kraft[2]) und die Sekunde.

1.2. Längenmessung

1.2.1. Längeneinheit

Die Länge des *Urmeters*, eines im *Internationalen Büro für Maße und Gewichte* im Pavillon de Breteuil in Sèvres bei Paris aufbewahrten Stabes aus einer Legierung von 90% Platin und 10% Iridium, (Abb. 1.1) diente als Längeneinheit. Auf dem Grunde der Rinne sind je drei feine Striche eingerissen. Bis zur Einführung einer neuen Definition des Meters im Jahre 1960 (s. S. 15) galt folgende Definition:

---

[1]) Bezüglich der Einheitensysteme für elektrische Größen sei auf Bd. II verwiesen.
[2]) Die gleichzeitige Benutzung der Einheit „Kilogramm" für die Masse und für die Kraft hat zu vielerlei Schwierigkeiten geführt; man hat deshalb die Krafteinheit im technischen System mit kg* und später mit Kilopond bezeichnet. Im SI ist das Kilogramm die Grundeinheit der Masse, die Krafteinheit ist das Newton (N) (s. Abschn. 3.1.2), eine abgeleitete SI-Einheit.

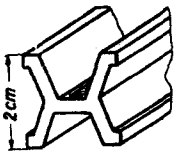

Abb. 1.1. Form des Urmeters [1])

Das Meter (Kurzzeichen m) ist der Abstand der Mittelstriche der auf dem Internationalen Meterprototyp angebrachten Strichgruppen bei der Gleichgewichtstemperatur zwischen Eis und reinem, luftgesättigtem Wasser unter dem Druck einer physikalischen Atmosphäre.

Ursprünglich sollte nach einem Vorschlag von HUYGENS die Länge des Sekundenpendels (S. 25) als Längeneinheit dienen; da aber die Länge eines solchen Pendels von der Lage des Ortes abhängt, beschloß man, die Längeneinheit mit einer unveränderlichen Naturgröße zu verketten: Man vereinbarte, den zehnmillionsten Teil des durch die Pariser Sternwarte gehenden Erdmeridianquadranten als Längeneinheit zu wählen. Trotz aller bei der grundlegenden Vermessung ausgeübten Sorgfalt ergaben spätere, von BESSEL[2]) ausgewertete genauere Messungen geringe Abweichungen[3]). Da nun mit zunehmender Verfeinerung der Meßtechnik jeder ältere Meßwert einmal hinfällig werden muß, außerdem aber die Länge des Meridians auch nicht völlig unveränderlich ist, hatte man von der ursprünglichen Festsetzung ganz abgesehen und die Längeneinheit in obiger Weise festgelegt.

Alle im Gebrauch befindlichen Meterstäbe waren mittelbar mit dem Urmeter verglichen worden. Um dies zu ermöglichen, hat man eine Anzahl von Stäben aus demselben Stoff und von derselben Form wie das Urmeter und von möglichst genau gleicher Länge mit den vollkommensten Hilfsmitteln hergestellt und ihre Längenabweichung durch wiederholtes sorgfältiges Vergleichen mit dem Urmeter ausgemessen. Dann sind die Kopien an die einzelnen Staaten verteilt worden. Sie dienen in diesen Staaten als *Normale* der Längeneinheit. Möglichst sorgfältig hergestellte Kopien der Normalen sind an die Eichämter verteilt worden, deren Aufgabe es ist, die Länge der Gebrauchsmaßstäbe durch direktes oder indirektes Vergleichen mit den ihnen amtlich gelieferten Normalen zu prüfen. Für technische Zwecke hat man sich auf eine Normaltemperatur von 20 °C zur Ausführung aller Messungen geeinigt. Demnach ist ein technischer Meterstab bei 20 °C genau so lang wie das Urmeter bei 0 °C.[4])

[1]) Die dargestellte eigenartige Form des Normalmeters ist absichtlich gewählt worden: Auch bei kleinen Biegungen des Stabes bleibt nämlich die Länge der Rinne unverändert, da sie in der „neutralen Faser" (vgl. 6.2 liegt).

[2]) FRIEDRICH WILHELM BESSEL, 1784 bis 1846, ursprünglich Kaufmann in Bremen, dann Professor der Astronomie in Königsberg, der durch peinlich genaue Messungen und überlegene theoretische Betrachtungsweisen führende Astronom des damaligen Deutschlands.

[3]) Die Länge der Meridianquadranten unter Zugrundelegung des 1924 international als Bezugsfläche festgesetzten Erdellipsoids beträgt 10002288,3 m

[4]) Zwischen einem technischen und einem physikalischen Maßstab ergibt sich somit (bei gleicher Temperatur) ein Unterschied von 0,233 mm je m.

Jeder Festkörper ist langsamen inneren Veränderungen unterworfen. Daher und um im Falle eines Verlustes des Urmetermaßstabes die Längeneinheit festhalten zu können, hat man sich bemüht, das Meter durch eine nach heutiger Kenntnis unveränderliche Naturgröße zu definieren; hierfür hat sich die Wellenlänge des Lichtes als geeignet erwiesen.

Auf der 11. Generalkonferenz für Maß und Gewicht wurde deshalb 1960 festgelegt:

Die Einheit der Länge ist das *Meter* (m):
Das Meter ist gleich 1 650 763,73 Vakuum-Wellenlängen der Strahlung, die dem Übergang zwischen den Niveaus $2p_{10}$ und $5d_5$ des Atoms Krypton-86 entspricht.

Über die angegebenen Atomzustände siehe Band III.

Zur Bildung von Vielfachen und Teilen von Einheiten benutzt man die in der Anlage in Tab. 2 zusammengestellten Vorsätze; speziell für die Länge werden folgende Einheiten verwandt:

1 Kilometer	= 1 km	= 1000 m	= 10^3 m
1 Zentimeter	= 1 cm	= 0,01 m	= 10^{-2} m
1 Millimeter	= 1 mm	= 0,001 m	= 10^{-3} m
1 Mikrometer	= 1 µm	= 0,000001 m	= 10^{-6} m
1 Nanometer	= 1 nm	= 0,000000001 m	= 10^{-9} m

In der Spektroskopie und der Atomphysik benutzt man daneben noch die Ångström-Einheit (Å):

$1\ \text{Å} = 10^{-10}\ \text{m} = 0{,}1\ \text{nm}.$

Für die Angabe von Entfernungen in der Luft- oder Seefahrt ist als Einheit auch die *Seemeile* (sm) zulässig:

1 sm = 1 Meridianminute = 1852 m.

In der Astronomie benutzt man als Längeneinheit für Entfernungsmessungen innerhalb des Sonnensystems die *astronomische Einheit* (AE), die gleich ist der mittleren Entfernung Sonne–Erde:

$1\ \text{AE} = 1{,}49600 \cdot 10^8\ \text{km}.$

Für die riesigen Entfernungen im Weltall dient das *Lichtjahr* als Einheit, d. h. die Strecke, die das Licht innerhalb eines Jahres zurücklegt. Es gilt

$1\ \text{Lichtjahr} = 1\ \text{lj} = 9{,}4605 \cdot 10^{12}\ \text{km}.$

Als neuere Einheit ist die *Parallaxensekunde* (Parsek oder Parsec) pc zu nennen; es ist dies die Entfernung, von der aus der Erdbahnhalbmesser unter dem Winkel (Parallaxe) von 1′ erscheint. Es gilt

$1\ \text{pc} = 206264{,}8\ \text{AE} = 30{,}875 \cdot 10^{12}\ \text{km}$
$= 3{,}26169\ \text{lj}.$

Abb. 1.2. Endmaßstäbe

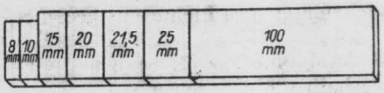

Abb. 1.3. Zusammenstellung aneinanderhaftende Endmaße

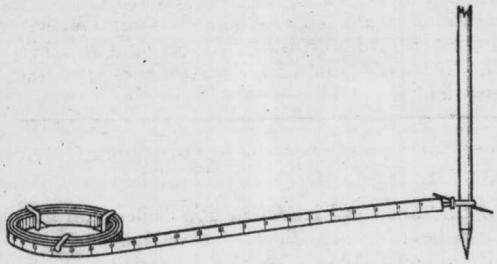

Abb. 1.4. Meßband mit Richtstab

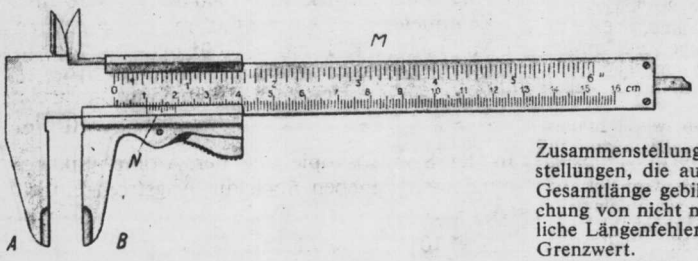

Abb. 1.5. Schieblehre

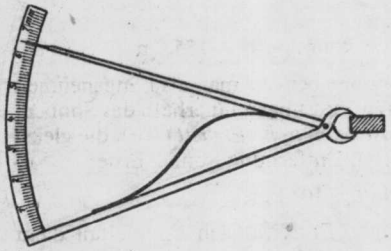

Abb. 1.6. Fühlhebel

1.2.2. Methoden zur Längenmessung

Die einfachste Art, eine Längenmessung auszuführen, besteht darin, daß man an die zu messende Länge unmittelbar einen eingeteilten Meterstab anlegt und nun vergleicht, wievielmal der Metermaßstab oder ein Teil desselben aneinandergelegt werden muß, damit eine Länge entsteht, die der zu messenden Länge gleich ist.

Maßstäbe soll man, um die von der Durchbiegung herrührenden Fehler zu vermeiden, in den sog. „günstigsten Punkten", nämlich in einer Entfernung von 0,2113 der Länge von den Enden (durch Schneide oder Rolle), unterstützen, wenn die Teilung auf der Oberfläche angebracht ist.

Endmaßstäbe sind meist aus Holz (Meßlatten) gefertigte Stäbe von rechteckigem Querschnitt, deren Endflächen man mit metallischen Bekleidungen (Endschuhen) versieht, um sie vor Beschädigung zu schützen. Man gibt den Endschuhen der Maßstäbe die Form einer stumpfen Schneide, von denen die eine beim flachen Auflegen des Stabes vertikal, die andere horizontal liegt. Legt man den horizontalen Endschuh des einen Maßstabes mit dem vertikalen Endschuh des in der Verlängerung des ersten Stabes liegenden zweiten Stabes zusammen, so kann man die Stäbe mit großer Genauigkeit ohne Zwischenraum aneinanderlegen (Abb. 1.2).

Zusammenstellbare Endmaße. Um in einfachster Weise, zugleich aber mit einer sehr hohen Genauigkeit besonders Maschinenteile auf ihre vorgeschriebenen Maße prüfen zu können, sind zusammenstellbare Endmaße, sog. *Parallel-Endmaße*, hergestellt worden. Diese Maße bestehen aus einer Anzahl von Einzel-Endmaßen aus gehärtetem Stahl mit parallelen Endflächen, die auf Hochglanz poliert sind. Durch Aneinanderdrücken solcher Endflächen treten außerordentlich hohe Kohäsionskräfte (s. 5.2) auf, die ein Haften der Einzel-Endmaße bewirken (sog. „Ansprengen"). Abb. 1.3 zeigt eine Zusammenstellung mehrerer Endmaße. Bei Zusammenstellungen, die aus 4 bis 5 Endmaßen bis zu 100 mm Gesamtlänge gebildet werden, wird eine größte Abweichung von nicht mehr als 0,001 mm verbürgt, der wirkliche Längenfehler bleibt meist erheblich unter diesem Grenzwert.

Meßband. Zum Messen größerer ebener Strecken bedient man sich häufig eines Meßbandes (Abb. 1.4). Dieses ist ein meist 20 oder 50 m langes Stahlband, das durch Lochung in Dezimeter geteilt ist.

Schieblehre. Die Schieblehre (Abb. 1.5) dient besonders zur Messung der Dicke von Körpern. Sie besteht aus einem Zentimetermaß *M* mit einem rechtwinkligen Ansatzstück *A*. An dem Maßstab ist ein Schieber mit dem Ansatzstück *B* angebracht. Wenn der Schieber so weit vorgeschoben ist, daß sich beide Ansätze *A* und *B* vollständig berühren, so muß eine auf dem Schieber angebrachte Marke auf Null zeigen. Bringt man zwischen den Schieber und das Ansatzstück den zu messenden Körper, so kann man seine Dicke an der Zentimeterteilung ablesen. Eine Verfeinerung der Ablesung erfolgt durch die Noniusteilung N (s. Abschn. 1.4).

Fühlhebel. Der Fühlhebel (Abb. 1.6) besteht aus zwei nach Art einer Zange miteinander verbundenen Hebeln, bei denen als Längenverhältnis der Hebelarme 1 : 10 gewählt wird (Zehntelmaß). Eine zwischen den Hebeln angebrachte elastische Feder sorgt dafür, daß die kür-

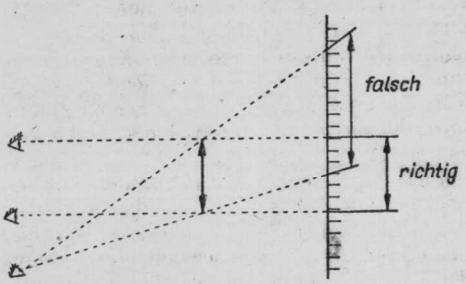

Abb. 1.7. Zur Parallaxe

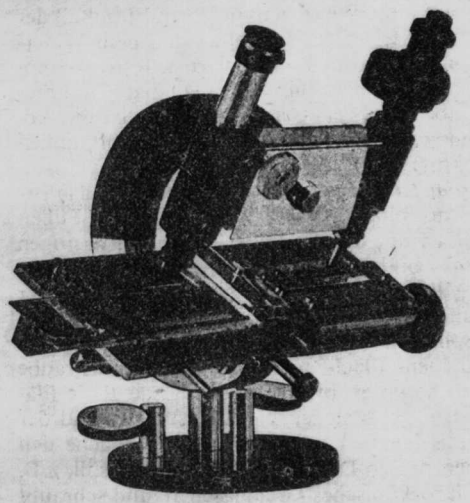

Abb. 1.8. Abbescher Komparator

zeren Hebelarme immer mit leichtem Druck aneinandergedrückt werden. Das Ende des einen langen Hebelarmes ist mit einer auf einem Kreisbogen ausgeführten Teilung versehen, während das Ende des anderen langen Hebelarmes als Zeiger über dieser Kreisteilung spielt. Die Kreisteilung ist eine Millimeterteilung. Zwischen die kürzeren Hebelarme wird der Körper, dessen Dicke gemessen werden soll, gebracht. Die an der Teilung abgelesene Dicke beträgt dann das Zehnfache der wahren Dicke des Körpers. Zu beachten ist, daß die Meßschenkel des Zehntelmaßes Sehnen messen, während an der Teilung Bogen abgelesen werden. Ein einwandfreies Zehntelmaß muß deshalb eine gegen das Ende verjüngte Teilung aufweisen.

Spiegelmaßstäbe. Kann man einen Maßstab nicht unmittelbar mit den Flächen des zu messenden Körpers in Berührung bringen, so muß man an den Endflächen entlang nach dem Maßstab visieren. Der Abstand der Endflächen des Körpers kann aber nur dann an dem Maßstab genau abgelesen werden, wenn die Visierlinien selbst auf dem Maßstab senkrecht stehen. Beim schrägen Visieren tritt eine scheinbare Verschiebung des Körpers gegen den Maßstab ein (Parallaxe[1])), die, wie aus Abb. 1.7 ersichtlich, das Meßergebnis wesentlich fälschen kann, und zwar um so mehr, je weiter Gegenstand und Maßstab auseinanderliegen.

Um den Parallaxenfehler zu vermeiden, legt man den Maßstab und den Körper auf einen Spiegel und visiert so an den Endflächen des Körpers vorbei, daß sich das Spiegelbild der Pupille des beobachtenden Auges mit der Endfläche des Körpers deckt. Auch bringt man den Maßstab unmittelbar auf einem Spiegel an oder hinterlegt den Maßstab mit einem Spiegel.

Komparatoren. Zur Messung horizontaler Entfernungen mit größerer Genauigkeit sind die Komparatoren geeignet, z. B. der in Abb. 1.8 wiedergegebene Abbesche Komparator, dessen Wirkungsweise folgende ist: Maßstab und zu messende Strecke liegen in einer Geraden auf einem gemeinsamen verschiebbaren Schlitten. Mit Hilfe des einen Mikroskops wird der eine Endpunkt der zu messenden Strecke, mit Hilfe des zweiten der entsprechende Wert auf dem Maßstab abgelesen. Hierauf wird der Schlitten verschoben, bis der zweite Endpunkt der zu messenden Strecke unter das erste Mikroskop kommt. Nach genauer Einstellung wird dann im zweiten Mikroskop der entsprechende Wert am Maßstab abgelesen. Die Differenz der abgelesenen Werte gibt die Verschiebung des Maßstabes und damit die Länge der Meßstrecke an.

Kathetometer[1]). Das Kathetometer (Abb. 1.9) dient zur Messung lotrechter Längen. Es besteht aus einer lotrechtstehenden prismatischen Säule, die mit einer Zentimeterteilung versehen ist. Längs der Säule kann man ein Fernrohr mit waagerechter Achse auf- und abschieben. Man beobachtet nun durch das mit einem Fadenkreuz versehene Fernrohr erst das eine, z. B. das obere Ende der zu messenden Höhe, und liest die Stellung des Fernrohres an der Säule ab. Dann verschiebt man das Fernrohr so lange, bis das andere Ende der zu messenden Höhe mit dem Fadenkreuz zur Deckung kommt, und liest an der Teilung wieder ab. Der Unterschied der Ablesungen ist die gesuchte Höhe.

Schraublehre. Die Schraublehre[2]) (Abb. 1.10) hat die Form einer Schraubzwinge. Die Schraube hat meist eine Ganghöhe von 0,5 mm. Dreht man die Schraube einmal herum, so bewegt sie sich um 0,5 mm vorwärts. Dreht man sie nur um einen Bruchteil einer Umdrehung, so bewegt sich das vordere Ende um die Hälfte desselben Bruchteils eines Millimeters vorwärts (*Mikrometerschraube*[3])). Man bringt an der Schraubenspindel einen in 50 Teile geteilten Teilkreis an, der die Ablesung des 50. Teiles einer Umdrehung ermöglicht. Ist die Schraube ganz eingeschraubt, so soll die Teilung auf 0 stehen. Bringt man in die Schraublehre einen Körper und bewegt man die Schraube so weit vorwärts, bis der Körper mit leichtem Druck festgeklemmt ist, so kann man

[1]) pará (gr.) = neben, allásso (gr.) = ich ändere.

[1]) katá (gr.) = herab, hetós (gr.) = gesendet.
[2]) Erfunden von dem Franzosen PALMER (1848).
[3]) mikrós (gr.) = klein.