EINFÜHRUNG IN DIE PHYSIK

ERSTER BAND

R. W. POHL

MECHANIK · AKUSTIK UND WÄRMELEHRE

ZWÖLFTE AUFLAGE

MECHANIK · AKUSTIK UND WÄRMELEHRE

VON

ROBERT WICHARD POHL
EM. PROFESSOR DER PHYSIK
AN DER UNIVERSITÄT GÖTTINGEN

ZWÖLFTE VERBESSERTE UND ERGÄNZTE AUFLAGE

MIT 575 ABBILDUNGEN
DARUNTER 15 ENTLEHNTEN

SPRINGER-VERLAG
BERLIN · GÖTTINGEN · HEIDELBERG
1953

MEINER LIEBEN FRAU

TUSSA POHL

GEB. MADELUNG

Vorwort zur zwölften Auflage.

Das Buch mußte neu gesetzt werden. Das gab die Möglichkeit, einige Abschnitte viel gründlicher umzuarbeiten als bei der Benutzung eines vorhandenen Satzes. Das ist besonders den Kapiteln XI. (Schwingungslehre) und XII. (Wellen und Strahlung) zugute gekommen, z. B. in den Ohr, Sprache und sprechende Maschinen betreffenden Paragraphen. Auch sonst finden sich mancherlei Änderungen, Streichungen und Zusätze, z. B. in den §§ 5, 18 bis 21, 73, 86, 97, 159, 176, 177, 186. Durch die gründliche Überarbeitung hat sich der Umfang des Buches um 11 Seiten vermindert. Die Zahl der Abbildungen beträgt jetzt 575, von ihnen sind 100 neu, darunter die Schlierenphotographie hochfrequenter Schallwellen, die von einer kleinen Pfeife in freier Zimmerluft erzeugt werden (S. 201). Die Abbildungen eines Buches lassen am einfachsten erkennen, ob seine Darstellung überwiegend anderen Büchern entnommen, oder an Hand eigener Beobachtungen erarbeitet worden ist.

Der seit einigen Jahrzehnten übliche Name Großdyn für die Krafteinheit 1 kg m/sec^2 = 10^5 dyn ist aufgegeben und durch den neuerdings international benutzten Namen Newton ersetzt worden. Es heißt also jetzt z. B. Newtonmeter = Wattsekunde und 1 Kilopond = 9,81 Newton.

Alle Gleichungen sind als Größengleichungen mit vier Grundgrößen geschrieben, d. h. es wird außer drei mechanischen die thermische der Temperatur benutzt. Ich verzichte also in der Wärmelehre auf die (ja meist stillschweigend vorgenommene) Einführung einer fünften Grundgröße, nämlich der Stoffmenge Z, und benutze die Mole als individuelle Masseneinheiten. Ich sehe keinen Vorteil darin, neben dem spezifischen Volumen V_s = Volumen V/Masse M noch die weitere Größe Molvolumen V = Volumen V/Stoffmenge Z einzuführen. Mir genügt z. B. für Zimmerluft die Angabe des spezifischen Volumen $V_s = 0{,}776\ \mathrm{m^3/kg} = 22{,}4$ Liter/mol. Endlich habe ich mich bemüht, vieldeutige Worte, wie z. B. Masse und Menge, immer nur in derselben Bedeutung zu bringen und alle abgeleiteten Größen und ihre Einheiten durch Gleichungen zu definieren. Dabei möchte ich besonders auf die zweite Hälfte des § 16 hinweisen.

Dankbar gedenke ich der Hilfe meiner Mitarbeiter Dr. H. Dorendorf (jetzt München), Dr. W. Martienssen, Dr. H. Pick, Dr. F. Stöckmann (jetzt Darmstadt), der Mechanikermeister W. Nabel und W. Sperber und meines Sohnes R. O. Pohl.

Göttingen, November 1952.

R. W. Pohl.

Aus dem Vorwort zur ersten Auflage.

(1930)

Dies Buch enthält den ersten Teil meiner Vorlesung über Experimentalphysik. Die Darstellung befleißigt sich großer Einfachheit. Diese Einfachheit soll das Buch außer für Studierende und Lehrer auch für weitere physikalisch interessierte Kreise brauchbar machen.

Die grundlegenden Experimente stehen im Vordergrund der Darstellung. Sie sollen vor allem der Klärung der Begriffe dienen und einen Überblick über die Größenordnungen vermitteln. Quantitative Einzelheiten treten zurück.

Eine ganze Reihe von Versuchen erfordert einen größeren Platz. Im Göttinger Hörsaal steht eine glatte Parkettfläche von $12 \times 5\,\mathrm{m}^2$ zur Verfügung. Das lästige Hindernis in älteren Hörsälen, der große, unbeweglich eingebaute Experimentiertisch, ist schon seit Jahren beseitigt. Statt seiner werden je nach Bedarf kleine Tische aufgestellt, aber ebensowenig wie die Möbel eines Wohnraumes in den Fußboden eingemauert. Durch diese handlichen Tische gewinnt die Übersichtlichkeit und Zugänglichkeit der einzelnen Versuchsanordnungen erheblich. Die meisten Tische sind um ihre vertikale Achse schwenkbar und rasch in der Höhe verstellbar. Man kann so die störenden perspektivischen Überschneidungen verschiedener Anordnungen verhindern. Man kann die jeweils benutzte Anordnung hervorheben und sie durch Schwenken für jeden Hörer in bequemer Aufsicht sichtbar machen.

Die benutzten Apparate sind einfach und wenig zahlreich. Manche von ihnen werden hier zum ersten Male beschrieben. Sie können, ebenso wie die übrigen Hilfsmittel der Vorlesung, von der Firma Spindler & Hoyer, G. m. b. H. in Göttingen, bezogen werden.

Der Mehrzahl der Abbildungen liegen photographische Aufnahmen zugrunde. Viele Bilder sind als Schattenrisse gebracht. Diese Bildform eignet sich gut für den Buchdruck, ferner gibt sie meist Anhaltspunkte für die benutzten Abmessungen. Endlich erweist ein Schattenriß die Brauchbarkeit eines Versuches auch in großen Sälen. Denn diese verlangen in erster Linie klare Umrisse, nirgends unterbrochen durch nebensächliches Beiwerk, wie Stativmaterial u. dgl.

Über die Schreibweise der Gleichungen.

Alle Gleichungen der Mechanik sind als *Größengleichungen* für drei Grundgrößen geschrieben, die der Wärmelehre ebenso für vier Grundgrößen. — Für jeden Buchstaben sind also Zahlenwert *und* Einheit einzusetzen. Damit wird die früher notwendige Unterscheidung eines physikalischen und eines technischen Maßsystems gegenstandslos. Die Wahl der Einheiten steht frei. Die unter manchen Gleichungen genannten sind nur als Beispiele zu betrachten.

Bei der Anwendung von Größengleichungen wird nur noch die Einsicht erwartet, daß man z. B. Kilopondmeter und Kalorie ebensowenig addieren und in Zähler und Nenner eines Bruches gegeneinander wegheben kann, wie etwa Deutsche Mark und Dollar.

Viele physikalischen Größen sind ihrer Natur nach Vektoren. Der Vektorcharakter soll oft besonders betont werden: Dann wenden wir für die Größen sowohl in den Zeichnungen als auch in den Gleichungen Frakturbuchstaben an. Das geschieht z. B. immer bei der Kraft und bei den Feldvektoren der Elektrizitätslehre, gelegentlich bei Geschwindigkeit, Beschleunigung usw.

Trotz des häufigen Gebrauches von Frakturbuchstaben sollen die Gleichungen dieses Buches, und zwar aller drei Bände, normalerweise als Betragsgleichungen gelesen werden. Dabei sind nur zwei Punkte zu beachten: +- oder —-Zeichen zwischen Frakturbuchstaben bedeuten die geometrische Summe gemäß S. 12; auf entgegengesetzte Richtungen von Vektoren wird auch in Betragsgleichungen durch —-Zeichen verwiesen. Als Beispiel sei genannt die Gleichung für die zum Kreismittelpunkt hin gerichtete Radialbeschleunigung $b_r = -u^2/r$. Sie ist zur Einführung weniger bedenklich als die Vektorgleichung mit dem Betrage des Radius im Nenner und seinem Einheitsvektor im Zähler.

Viele Gleichungen werden auch den an die Vektorschreibweise gewöhnten fortgeschrittenen Leser zufriedenstellen. So ist z. B. das äußere Vektorprodukt stillschweigend durch ein schräges Kreuz eingeführt worden. Dadurch umfassen die Gleichungen mehr als nur die im Text behandelten Sonderfälle. Der mit der Vektorschreibweise noch nicht Vertraute wird das Kreuz nur als „Malzeichen" lesen und nicht weiter beachten.

Jede das Gesamtgebiet der Physik umfassende Darstellung hat mit einer äußeren Schwierigkeit zu kämpfen, nämlich der geringen Zahl der verfügbaren Buchstaben. In den drei Bänden dieser Einführung ist der Bedeutungswechsel der einzelnen Buchstaben weitgehend eingeschränkt. Das ließ sich aber nur durch einen Verzicht erreichen: es konnte nicht der Betrag jedes Vektors einheitlich durch einen Antiquabuchstaben wiedergegeben werden. Doch ist das kein Unglück. Jede allzu weit getriebene Einheitlichkeit erschwert die Übersicht: man denke an die Anwendung eines Frakturbuchstabens für die Erdbeschleunigung oder die Winkelgeschwindigkeit.

Inhaltsverzeichnis.

A. Mechanik.

B. Akustik.

C. Wärmelehre.

A. Mechanik.

I. Einführung, Längen- und Zeitmessung.

§ 1. Einführung. Die Physik ist eine Erfahrungswissenschaft. Sie beruht auf experimentell gefundenen Tatsachen. Die Tatsachen bleiben, die Deutungen wechseln im Laufe des historischen Fortschritts. Tatsachen werden durch Beobachtungen gefunden, und zwar gelegentlich durch zufällige, meist aber durch planvoll angestellte. — Beobachten will gelernt sein, der Ungeübte kann leicht getäuscht werden. Wir geben zwei Beispiele:

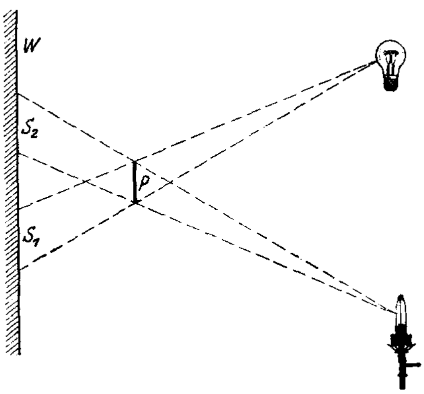

Abb. 1. Farbige Schatten.

a) *Die farbigen Schatten.* In Abb. 1 sehen wir eine weiße Wand W, eine Gasglühlichtlampe und eine elektrische Glühlampe. P ist ein beliebiger undurchsichtiger Körper, etwa eine Papptafel. — Zunächst wird nur die elektrische Lampe eingeschaltet. Sie beleuchtet die weiße Wand *mit Ausnahme* des Schattenbereiches S_1. Dieser wird irgendwie markiert, etwa mit einem angehefteten Papierschnitzel. — Darauf wird allein die Gaslampe angezündet. Wieder erscheint die Wand weiß, diesmal *einschließlich* des markierten Bereiches S_1. Ein schwarzer Schatten der Papptafel liegt jetzt bei S_2. — Nun kommt der eigentliche Versuch: Während die Gaslampe brennt, wird die elektrische Lampe eingeschaltet. Dadurch ändert sich im Bereiche S_1 physikalisch oder objektiv nicht das geringste. Trotzdem hat sich für unser Auge das Bild von Grund auf gewandelt. Wir sehen bei S_1 einen lebhaft *olivgrünen* Schatten. Er unterscheidet sich stark von dem (jetzt rotbraunen) Schatten S_2. Dabei gelangt von S_1 nach wie vor nur Licht der Gaslampe in unser Auge. Der Bereich S_1 ist lediglich durch einen hellen *Rahmen* eingefaßt worden, herrührend vom Lichte der elektrischen Lampe. Dieser Rahmen allein vermag die Farbe des Bereiches S_1 so auffallend zu ändern.

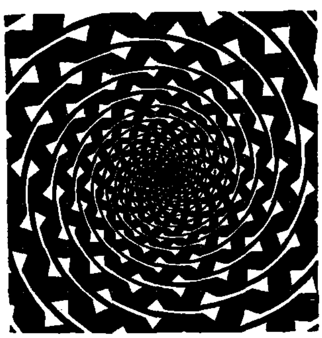

Abb. 2. Spiraltäuschung.

Der Versuch ist für jeden Anfänger lehrreich: *Farben* sind kein Gegenstand der Physik, sondern der Psychologie bzw. der Physiologie! Nichtbeachtung dieser Tatsache hat vielerlei unnütze Arbeit verursacht.

b) *Die Spiraltäuschung.* Jedermann sieht in Abb. 2 ein System von Spiralen mit gemeinsamem Mittelpunkt. Trotzdem handelt es sich in Wirklichkeit um konzentrische Kreise. Davon kann man sich sofort durch Umfahren einer Kreisbahn mit einer Bleistiftspitze überzeugen.

Solche und vielerlei andere durch unsere Sinnesorgane bedingte Erscheinungen bereiten geübten Beobachtern nur selten Schwierigkeiten. Aber sie mahnen doch zur Vorsicht. Wie mancher andere uns heute noch unbekannte subjektive Einfluß mag noch in unserer physikalischen Naturbeobachtung stecken! Verdächtig sind vor allem die allgemeinsten, im Laufe uralter Erfahrung gebildeten Begriffe, wie Raum, Zeit, Kraft usw. Die Physik wird hier noch mit manchem Vorurteil und mancher Fehldeutung aufzuräumen haben.

§ 2. Messung von Längen. Echte Längenmessung. Ohne Zweifel haben Experiment und Beobachtung auch bei nur *qualitativer* Ausführung neue Erkenntnisse, oft sogar von großer Tragweite, erschlossen. Trotzdem erreichen Experiment und Beobachtung erst dann ihren vollen Wert, wenn sie Größen in Zahl und Maß erfassen. Messungen spielen in der Physik eine wichtige Rolle. Die physikalische Meßkunst ist hoch entwickelt, die Zahl ihrer Verfahren groß und Gegenstand eines umfangreichen Sonderschrifttums.

Unter der Mannigfaltigkeit physikalischer Messungen finden sich mit besonderer Häufigkeit Messungen von Längen und Zeiten, oft allein, oft zusammen mit der Messung anderer Größen. Man beginnt daher zweckmäßig mit der Messung von Längen und Zeiten, und zwar einer Klarlegung ihrer Grundlagen, nicht der technischen Einzelheiten ihrer Ausführung.

Jede wirkliche oder echte Längenmessung beruht auf dem Anlegen und Abtragen eines Maßstabes. Dieser Satz erscheint zwar im ersten Augenblick trivial. Trotzdem ist die in ihm ausgedrückte Erkenntnis recht jungen Datums. Ohne ihre folgerichtige Anwendung spotten etliche der berühmtesten physikalischen Entdeckungen jedes Deutungsversuches.

Mit dem Vorgang der Messung selbst, hier also mit dem Abtragen des Maßstabes, ist es nicht getan. Es muß die Festlegung einer Einheit hinzukommen. —

Jede Festlegung von physikalischen Einheiten ist vollständig willkürlich. Das wichtigste Erfordernis ist stets eine möglichst weitreichende internationale Vereinbarung. Erwünscht sind ferner leichte Reproduzierbarkeit und bequeme Zahlengrößen bei den häufigsten Messungen des täglichen Lebens.

In der Elektrizitätslehre sind die beiden Einheiten Ampere und Volt in allen Ländern gebräuchlich. Bei den Einheiten der Längenmessung aber findet sich ein trostloses Durcheinander vieler verschiedener Längeneinheiten. Hier macht das physikalische Schrifttum eine rühmliche Ausnahme. Die Physik legt ihren Längenmessungen mit großer Mehrheit ein- und dieselbe Längeneinheit zugrunde, das *Meter*[1].

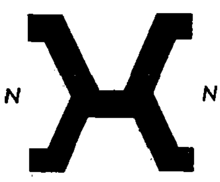

Abb. 3. Profil des Pariser Normalmeters. Höhe etwa 2 cm.

Das Meter ist z. Z. noch eine *verkörperte* Einheit. Es ist durch einen bei Paris im „Bureau des Poids et Mesures“ aufbewahrten Maßstab festgelegt. Es ist ein Metallstab aus einer Legierung von 90% Platin und 10% Iridium. Der Stab hat einen eigentümlichen x-förmigen Querschnitt gemäß Abb. 3. Auf der mit *NN* bezeichneten Fläche sind zwei Marken eingeritzt. Ihr Abstand (bei einer Temperatur von 0°!) wird als das Meter definiert. Durch den x-förmigen Querschnitt wird der Abstand der Marken von unvermeidlichen Durchbiegungen des Stabes unabhängig („neutrale Faser“, vgl. S. 105). Von diesem Normalmeterstab sind 31 Kopien hergestellt und an die am internationalen Meterabkommen beteiligten Staaten durch das Los verteilt worden.

[1] Für die Bedürfnisse des täglichen Lebens ist das Meter zu groß, sein Tausendstel, das Millimeter, zu klein. Zum Schätzen der zehntel Millimeter ist die Strichteilung der handelsüblichen Maßstäbe zu grob. Eine technisch brauchbare Einheit in der ungefähren Größe von Elle oder Fuß, eingeteilt in 100 Teile, hätte sich unzweifelhaft international in der Praxis durchgesetzt.

Für Eichzwecke werden Längen-Normale in den Handel gebracht. Sie werden als „*Endmaßstäbe*" ausgeführt: Das sind kistenförmige Stahlklötze mit planparallelen, auf Hochglanz polierten Endflächen. Zusammengesetzt haften sie aneinander (vgl. Abb. 225). Mit ihnen kann man Längen innerhalb 10^{-3} mm = 1 μ, sprich 1 Mikron, reproduzieren.

Zur praktischen Längenmessung dienen *geteilte* Maßstäbe und mancherlei Meßgeräte. Bei den Maßstäben soll die Länge der Teilstriche gleich dem $2^1/_2$fachen ihres Abstandes sein. Dann schätzt man die Bruchteile am sichersten.

Bei den Längen-Meßgeräten wird das Ablesen der Bruchteile durch mechanische oder optische Hilfseinrichtungen erleichtert. Die mechanischen benutzen irgendwelche Übersetzungen mit Hebeln, mit Schrauben („Schraubenmikrometer"), mit Zahnrädern („Meßuhren") oder mit Spiralen.

Unter den optischen Hilfseinrichtungen steht die Beobachtung mit dem Mikroskop an erster Stelle. Dabei handelt es sich noch durchaus um echte Längenmessungen. Als Beispiel messen wir vor einem großen Hörerkreis die Dicke eines Haares.

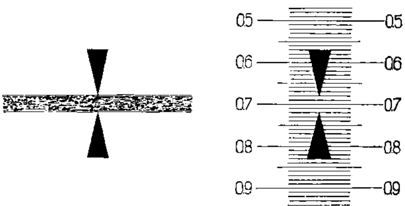

Abb. 4a u. b. Längenmessung unter dem Mikroskop.

Mittels eines einfachen Mikroskopes wird ein Bild des Haares auf einen Schirm geworfen. Auf diesem Bild wird die Dicke des Haares durch zwei Pfeilspitzen eingegrenzt, Abb. 4a. Dann wird das Haar entfernt und durch einen kleinen auf Glas geritzten Maßstab (Objektmikrometer) ersetzt, etwa ein Millimeter geteilt in 100 Teile. Das Gesichtsfeld zeigt jetzt das Bild der Abb. 4b. Wir lesen zwischen den Pfeilspitzen 4 Skalenteile ab. Die Dicke des Haares beträgt also $4 \cdot 10^{-2}$ mm oder 40 μ.

Die Fehlergrenze der Längenmessung kann mit optischen Hilfsmitteln bis auf etwa $\pm$ 0,1 μ herabgesetzt werden. Mechanische Hilfsmittel führen bis auf $\pm$ 1 μ. Das unbewaffnete Auge muß sich mit $\pm$ 50 bis 30 μ (d. h. Haaresbreite!) begnügen.

§ 3. Erhaltung der Längeneinheit. Für echte Längenmessungen kann man Maßstäbe mit äußerst feiner, selbst für das bewaffnete Auge nicht mehr erkennbarer Teilung benutzen. Das soll mit Abb. 5 erläutert werden. — An dem festen und an dem verschiebbaren Teile einer „Schublehre" ist je ein Maßstab befestigt. Beide Maßstäbe bestehen aus gitterförmig geteilten Glasplatten. Sie sind, vom Beschauer aus gesehen, hintereinander angeordnet, und daher überdecken sie sich in einem großen Bereich. Die schwarzen Striche und die klaren Lücken sind gleich breit (in Wirklichkeit z. B. je $^1/_{20}$ mm).

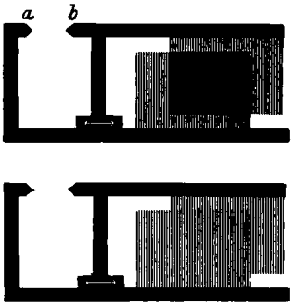

Abb. 5. Für Schauversuche vergröbertes Interferenzmikrometer.

In der Nullstellung mögen die Striche des einen Maßstabes auf die Lücken des anderen fallen. Dann ist der Überdeckungsbereich undurchsichtig, er erscheint dunkel. Darauf wird der Taster *b* mit seinem Maßstab langsam nach rechts gezogen: Währenddessen wird der Überdeckungsbereich periodisch aufgehellt und wieder verdunkelt. Jede neue Verdunkelung bedeutet eine Vergrößerung des Abstandes *a*—*b* um einen Teilstrichabstand (im Beispiel also $^1/_{10}$ mm). Folglich kann man durch Abzählen der Verdunkelungen mit der unsichtbaren feinen Teilung eine echte Längenmessung ausführen. Es handelt sich, kurz gesagt, um eine Längenmessung mit geometrischer „*Interferenz*".

Zu dieser Interferenz-Längenmessung gibt es ein optisches Analogon: In der Optik kann man die von Menschenhand hergestellten Teilungen durch eine von der Natur gegebene ersetzen. Als solche benutzt man die Wellen einer bestimmten von leuchtendem Cd-Dampf ausgesandten Spektrallinie. Ihre Wellenlänge („Teilung“) hat man mit dem Pariser Normalmeterstab verglichen. Im Jahre 1913 war der Abstand der Metermarken gleich 1553164,13 dieser Wellenlängen ($\lambda = 0{,}6438\,\mu$ gemessen bei normalem Luftdruck und 15° C).

Auf diese Weise hofft man, den Sinn des Wortes Meter auch späteren Geschlechtern erhalten zu können. Der Normalmeterstab ist trotz aller erdenklichen Sorgfalt bei seiner Behandlung ein unbeständiges Gebilde. Im Laufe langer Zeiten ändern sich alle Maßstäbe. Das ist eine Folge innerer Umwandlungen im mikrokristallinen Gefüge aller festen Körper. Aus diesem Grunde hat man beschlossen, die internationale Definition des Meters radikal zu ändern. Man will seine Definition in Zukunft ganz auf eine bestimmte Lichtwellenlänge eines Hg-Isotopes gründen: 1 Meter soll ein vereinbartes Vielfaches dieser Wellenlänge werden, und zwar unter genau vereinbarten Bedingungen von Luftdruck, Feuchtigkeit und Temperatur. Damit wird dann in naher Zukunft das Meter, die Einheit der Länge, aus der Gruppe der *verkörperten* Einheiten ausscheiden.

§ 4. Unechte Längenmessung bei sehr großen Längen. Standlinienverfahren, Stereogrammetrie. Sehr große Strecken sind oft nicht mehr der *echten* Längenmessung zugänglich. Man denke an den Abstand zweier Berggipfel oder den Abstand eines Himmelskörpers von der Erde. Man muß dann zu einer unechten Längenmessung greifen, z. B. dem bekannten, in Abb. 6 angedeuteten Verfahren der Standlinie. Die Länge BC der Standlinie wird nach Möglichkeit in echter Längenmessung ermittelt. Dann werden die Winkel β und γ gemessen. Aus Standlinienlänge und Winkeln läßt sich der gesuchte Abstand x durch Zeichnung oder Rechnung ermitteln.

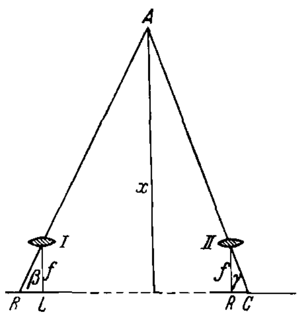

Abb. 6. Zur Längenmessung mit einer Standlinie und zur stereogrammetrischen Längenmessung.

Dies aus dem Schulunterricht geläufige Verfahren ist nicht frei von grundsätzlichen Bedenken. Es identifiziert die bei der Winkelmessung benutzten Lichtstrahlen ohne weiteres mit den geraden Linien der Euklidischen Geometrie. Das ist aber eine Voraussetzung, und über die Zulässigkeit dieser Voraussetzung kann letzten Endes nur die Erfahrung entscheiden. — Zum Glück brauchen uns derartige Bedenken bei den normalen physikalischen Messungen auf der Erde nicht zu beschweren. Sie entstehen erst in Sonderfällen, z. B. bei den Riesenentfernungen der Astronomie. Trotzdem muß schon der Anfänger von diesen Schwierigkeiten hören. Denn er sieht in der Längenmessung keinerlei Problem und hält sie für die einfachste aller physikalischen Messungen. Diese Auffassung trifft aber nur für die echte Längenmessung zu, das Anlegen und Abtragen eines Maßstabes.

Zum Abschluß der knappen Darlegungen über Längenmessungen sei noch eine elegante technische Ausführungsform der Standlinien-Längenmessung erwähnt, die sogenannte *Stereogrammetrie*. Sie dient in der Praxis vorzugsweise der Geländevermessung, insbesondere in Gebirgen. In der Physik braucht man sie u. a. zur Ermittlung verwickelter räumlicher Bahnen, z. B. von Blitzen.

In Abb. 6 wurden die Winkel β und γ mit irgendeinem Winkelmesser (z. B. Fernrohr auf Teilkreis) bestimmt. Die Stereogrammetrie ersetzt die beiden Winkelmesser an den Enden der Standlinie durch zwei photographische Apparate. Ihre Objektive sind mit I und II angedeutet. Die Bilder B und C desselben Gegenstandes A sind gegen die Plattenmitten um die Abstände BL bzw. CR verschoben. Aus BL oder CR einerseits und dem Gesamtabstand BC andererseits läßt sich die gesuchte Entfernung x des Gegenstandes A berechnen. Das ist geometrisch einfach zu übersehen. Für eine gegebene Standlinie I—II und gegebenen Linsenabstand f läßt sich eine Eichtabelle zusammenstellen.

So weit böte das Verfahren nichts irgendwie Bemerkenswertes. Erst jetzt kommt eine ernstliche Schwierigkeit: Es wäre zeitraubend und oft unmöglich, beispielsweise für den ver-

schlungenen Weg eines Blitzes die einander entsprechenden Bilder B und C der einzelnen Wegabschnitte herauszufinden. Diese Schwierigkeit läßt sich vermeiden. Man vereinigt die beiden photographischen Aufnahmen in bekannter Weise in einem Stereoskop zu *einem* räumlich erscheinenden Gesichtsfeld. Man sieht in Abb. 7 die beiden einzelnen photographischen Aufnahmen in ein Stereoskop eingesetzt. Und nun kommt der entscheidende Kunstgriff, die Anwendung einer „wandernden Marke".

Die wandernde Marke erhält man mit Hilfe zweier gleichartiger Zeiger *1* und *2*. Sie können in Höhe und Breite gemeinsam über die Bildflächen hin verschoben werden. Die Beträge dieser Verschiebungen werden an den Skalen S_1 und S_2 abgelesen. Außerdem läßt sich der gegenseitige Abstand der beiden Zeiger in meßbarer Weise (S_3 mit Skalentrommel) verändern.

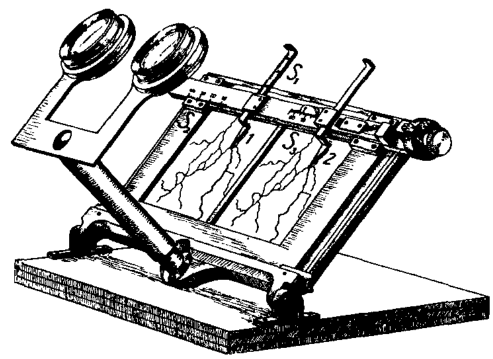

Abb. 7. Stereoskop mit wandernder Marke. Auf den Bildern verästelte Blitzbahnen.

Ins Stereoskop blickend, sehen wir diese beiden Zeiger, zu *einem* vereinigt, frei im Gesichtsraume schweben. Verändern wir den Abstand der beiden Zeiger (S_3), so wandert die Marke im Gesichtsraum auf uns zu oder von uns fort. Man kann die Marke bei Benutzung aller drei Verschiebungsmöglichkeiten (S_1, S_2, S_3) auf jeden beliebigen Punkt im Gesichtsraum einstellen, also auf eine Bergspitze, auf eine beliebige Stelle einer verschlungenen Blitzbahn usw. Es ist ein außerordentlich eindrucksvoller Versuch. Aus den Skalenablesungen liefert uns dann eine Eichtabelle bequem die den Punkt festlegenden Längen in Tiefe, Breite und Höhe. (Seine drei Koordinaten.)

§ 5. Winkelmessung. An die Messung der Längen schließt sich die Messung von Flächen, Rauminhalten und Winkeln an. Zu bemerken ist nur etwas zur Messung von Winkeln.

Ebene Winkel (Abb. 8) werden durch das Verhältnis $\frac{\text{Bogenlänge } b}{\text{Radius } r}$ gemessen, *räumliche* Winkel (Abb. 9) durch das Verhältnis $\frac{\text{Kugelflächenstück } f}{(\text{Radius } r)^2}$. Somit werden alle Winkel durch reine *Zahlen* gemessen.

Das mit dem Zeichen $^\circ$ geschriebene Wort *Grad* ist nur eine dem Dutzend entsprechende Zähleinheit, definiert durch die Gleichung

$$^\circ = \frac{{}^1\!/_{360}\text{ Kreisumfang}}{\text{Radius}} = \frac{2r\pi/360}{r} = \frac{\pi}{180} = 0{,}01745\ldots \tag{1}$$

π ist eine Kürzung für die Zahl 3,1415... Entsprechend ist $^\circ$ eine Kürzung für die Zahl 0,01745... Daher ist z. B. $\alpha = 100^\circ$ identisch mit $\alpha = 100 \cdot 0{,}0175 = 1{,}75$.

Die Einheit aller Winkel ist die Zahl 1. Als Einheit eines ebenen Winkels nennt man die Zahl 1 oft zweckmäßig *Radiant* (gekürzt Rad, englisch radian), als Einheit des räumlichen Winkels (Radiant)^2. Treten diese Namen der Zahl 1 in irgendwelchen Einheiten auf, so erkennt man, daß in dem benutzten Meßverfahren die Messung eines Winkels enthalten ist.

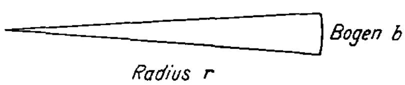

Abb. 8. Zur Definition des ebenen Winkels.

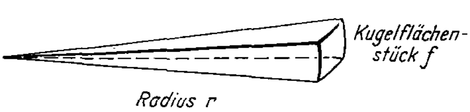

Abb. 9. Zur Definition des räumlichen Winkels.

Beispiel: Für die Strahlungsdichte der Sonnenoberfläche S^* gilt

$$S^* = \frac{\text{Strahlungsleistung}}{\text{Raumwinkel}} \Big/ \text{strahlende Fläche} = 1{,}95 \cdot 10^4 \frac{\text{Kilowatt}}{\text{Rad}^2} \Big/ \text{m}^2.$$

Die Gleichung 1 Radiant = 57,3° formuliert die Identität

$$1 \text{ Radiant} = 57{,}3 \cdot 0{,}0175 = 1 .$$

Ein Kegel mit dem Öffnungswinkel $2u$ schneidet aus einer um seine Spitze beschriebenen Kugel das Flächenstück $f = 2r^2\pi\,(1 - \cos u)$ heraus.

Für $u = 32{,}8°$ wird der räumliche Winkel $\varphi = 1 = \text{Rad}^2$. Er schneidet aus der Kugel das Flächenstück $f = r^2$, also den Bruchteil $r^2/4\pi r^2 = 1/4\pi = 7{,}96\%$ heraus.

Der Einheit Grad für den ebenen Winkel entspricht für den räumlichen Winkel die Einheit Quadratgrad. Es ist

$$1\,\square^\circ = (\pi/180)^2 = 3{,}05 \cdot 10^{-4}. \qquad (2)$$

§ 6. Zeitmessung. Echte Zeitmessung. Registrierung. Die Grundlage jeder Zeitmessung sind gleichmäßig wiederkehrende Bewegungen, und diese lassen sich stets auf eine gleichförmige Drehung zurückführen. Dabei läßt sich „gleichförmig“ zunächst nur gefühlsmäßig definieren. Denn die strenge Definition „gleiche Winkel in gleichen Zeiten“ setzt bereits den Besitz einer Zeitmessung voraus.

Als Zeiteinheit dient der *Sterntag*. Der Sterntag ist definiert als die Zeit, die am Beobachtungsort zwischen zwei aufeinanderfolgenden Meridiandurchgängen des gleichen Fixsternes verstreicht.

Noch strengere Definitionen erfordern große astronomische Kenntnisse.

Der Sterntag wird eingeteilt in $24 \cdot 60 \cdot 60 = 86400$ Sternzeitsekunden. Aus der Sternzeitsekunde wird die mittlere Sonnenzeitsekunde durch Multiplikation mit 366,25/365,25 hergeleitet. Dieser Sonnentag ist länger als der Sterntag. Denn die Sonne bewegt sich zwischen zwei Meridiandurchgängen gegenüber den Fixsternen rückwärts von West nach Ost. Ein Jahr besteht aus 366,25 Sterntagen, aber nur 365,25 Sonnentagen.

Die physikalische Literatur benutzt, ebenso wie die Technik und das tägliche Leben, als „Sekunde“ nur die mittlere Sonnenzeitsekunde.

Die zur praktischen Zeitmessung benutzten Uhren können als bekannt gelten. Die Gleichförmigkeit ihres Ganges wird durch mechanische Schwingungsvorgänge erzielt. Entweder schwingt ein hängendes Pendel im Schwerefeld (z. B. Wanduhren) oder ein Drehpendel an einer elastischen Schneckenfeder (z. B. „Unruhe“ unserer Taschenuhren). Es bleibt zu zeigen, daß sich die Schwingungen dieser Pendel auf gleichförmige Drehung zurückführen lassen.

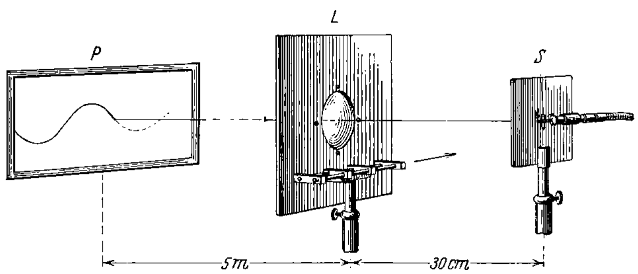

Abb. 10. Zusammenhang von Kreisbewegung und Sinuslinie. Vor dem vertikalen Spalt S sitzt ein horizontaler Stift am Rande eines horizontal gelagerten Zylinders. Dieser rotiert, von einer biegsamen Welle angetrieben, um eine horizontale, der Spaltebene parallele Achse.

Eine Pendelbewegung verläuft, kurz gesagt, *wie eine von der Seite betrachtete Kreisbewegung.* In der Ebene der Kreisbahn blickend, sehen wir einen umlaufenden Körper nur Hin- und Herbewegungen ausführen. Ihr zeitlicher Ablauf ist genau der gleiche wie der der Pendelbewegungen. Das zeigt besonders anschaulich eine optische Registrierung. Sie verwandelt das zeitliche Nacheinander in ein räumliches Nebeneinander und stellt uns die Bewegung durch einen Kurvenzug dar.

Zur Registrierung dieses Kurvenzuges dient die in Abb. 10 erläuterte Anordnung: Ein Spalt S wird mittels der Linse L auf dem Schirm P abgebildet. Die den Spalt beleuchtende Lichtquelle (Bogenlampe) ist nicht mitgezeichnet worden.

Die Linse L wird während der Belichtung auf einem Schlitten gleichförmig in Richtung des Pfeiles bewegt. Dadurch läuft das Bild des Spaltes über den Schirm P hinweg. Der Schirm ist mit einem phosphoreszierenden Kristallpulver überzogen. Ein solches Pulver vermag nach kurzer Lichteinstrahlung längere Zeit nachzuleuchten (Optik § 158). Vor den vertikalen Spalt S setzen wir nacheinander

1. einen Metallstift, der eine Kreiszylinderfläche mit einer horizontalen, der Spaltebene parallelen Achse umfährt (Abb. 10), und

2. einen seitlich an einem Schwerependel befestigten Draht (vgl. Abb. 11, Metronompendel).

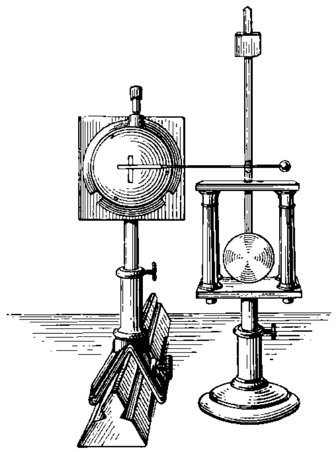

Abb. 11. Ein mit einem Metronompendel verbundener Metallstift vor einem Spalt. Diese Anordnung wird an Stelle von S in Abb. 10 eingesetzt.

In beiden Fällen erhalten wir tiefschwarz auf hellgrün leuchtendem Grunde den *gleichen* Kurvenzug: das Bild der Sinuslinie.

Dieser innige Zusammenhang von Kreisbewegung, Pendelbewegung und Sinuslinie spielt in den verschiedensten Gebieten der Physik eine wichtige Rolle. Mathematisch formal folgt der Zusammenhang aus der in Abb. 12 ersichtlichen Skizze. Bei der großen Wichtigkeit dieses Zusammenhanges dürfte jedoch der obige, sehr anschauliche Versuch nicht überflüssig sein. Er liefert uns zugleich ein einfaches Beispiel für eine Bewegungsanalyse mit optischer Registrierung.

Registrierungen sind bei vielen rasch ablaufenden Vorgängen erwünscht und zuweilen unentbehrlich. Für Registrierungen ist das BRAUNsche Rohr[1] (Elektrik Abb. 325) ein äußerst bequemes, von der Industrie gut durchkonstruiertes Hilfsmittel. — Manche technische Museen großer Städte haben Sonderabteilungen für Kinder eingerichtet. In ihnen können schon Kinder mit dem BRAUNschen Rohr experimentieren. Es kann daher bald als ebenso bekannt vorausgesetzt werden, wie Taschenuhr und Kinokamera.

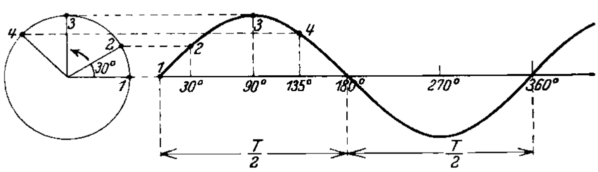

Abb. 12. Zusammenhang von Kreisbewegung und Sinuslinie. T = Umlaufzeit oder Periode.

§ 7. Moderne Uhren; persönliche Gleichung. Einzelheiten im Bau moderner Uhren sind für uns ohne Belang. Die Technik liefert heute sehr bequeme Stoppuhren für direkte Ablesung von $^1/_{50}$ oder gar $^1/_{100}$ Sekunde. Abb. 13 zeigt eine derartige Uhr. Ihr Zeiger macht in einer Sekunde einen vollen Umlauf. — Bei ihrem Lauf ist man jedesmal von neuem von der großen Länge einer Sekunde überrascht!

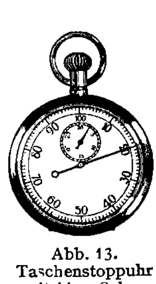

Abb. 13. Taschenstoppuhr mit $^1/_{100}$ Sekundeneinteilung. Ein Umlauf gleich 1 Sekunde.

Eine solche Uhr soll uns zur Messung einer oft wichtigen Größe dienen, der sog. „*persönlichen Gleichung*". Wir bringen auf dem Uhrglas eine Marke an, etwa einen Papierstreifen in Sektorform. Dann versuchen wir den Zeiger abzustoppen, wenn wir ihn gerade hinter der Marke hervorkommen sehen. Regelmäßig läuft dabei der Zeiger erheblich über die Marke heraus, meist um etwa $^1/_{10}$ Sekunde. Diese Zeitspanne heißt die „persönliche Gleichung".

[1] Leider oft Elektronen-Oszillograph genannt.

Ihre Bedeutung ist leicht zu übersehen: Das optische Signal unseres Auges muß ins Gehirn geleitet werden. Das Gehirn muß via Rückenmark die Fingermuskeln verständigen. Beide Vorgänge zusammen brauchen eine endliche Zeit, eben die „persönliche Gleichung".

Beim Abstoppen von Zeitdauern soll man Anfang und Schluß mit dem gleichen Sinnesorgan beobachten. Dann ist die persönliche Gleichung in beiden Fällen praktisch die gleiche; sie fällt daher im Endergebnis heraus.

BRAUNsche Rohre (§ 6, Ende) lassen sich mit einfachen elektrischen Schaltungen in Uhren für die Messung kurzer Zeiten umwandeln. Man kann mit ihnen Zeitdauern bis herab zu 10^{-8} sec messen.

§ 8. Periode und Frequenz. Stroboskopische Messungen. Wie überall im Leben bestehen auch in der Physik viele Vorgänge in einer regelmäßigen Folge periodisch wiederkehrender Ereignisse, z. B. Umläufe, Drehungen, Schwingungen usw. Es möge eine Anzahl n derartiger Ereignisse innerhalb der Zeit t erfolgen. Dann definiert man

$$\nu = n/t \text{ als } \textit{Frequenz} \tag{3}$$

und den Kehrwert

$$1/\nu = T = t/n \text{ als } \textit{Periode} \tag{4}$$

des Vorganges. —

Beispiel. Im Hörsaal gebrauchte Elektromotoren haben meist Drehfrequenzen in der Größenordnung $\nu = 2000/\text{Minute} \approx 33/\text{sec}$; ihre Periode oder Umdrehungsdauer T ist also $\approx 0{,}03$ sec.

In der Technik bezeichnet man die Frequenz von Maschinen leider häufig als Drehzahl. Man benutzt also das gleiche Wort für die Anzahl n der Umdrehungen und für den Quotienten aus dieser Anzahl n und der Zeit t.

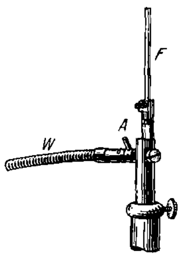

Abb. 14. Eine Blattfeder F zur Vorführung der stroboskopischen Zeitmessung. Schwingungsbild dieser Blattfeder in Abb. 358. Zum Antrieb dient eine biegsame Welle und eine durch den Stift A einseitig belastete Achse. Näheres in § 109 unter „erzwungene Schwingungen".

Perioden sind oft sehr kurze Zeiten, ihre Messung gestaltet sich aber wesentlich einfacher als die Messung kurzer Zeiten *ohne* periodische Wiederkehr. Als Beispiel bringen wir die stroboskopische Zeit- oder Frequenzmessung.

Die Abb. 14 zeigt uns eine Blattfeder, wir lassen sie mit einer hohen, unbekannten Frequenz ν_x schwingen, die Abb. 358 auf S. 182 gibt uns ihr Bild. Dies Bild wird mit intermittierendem Licht, einer gleichmäßigen Folge einzelner Lichtblitze, an die Wand geworfen. Eine solche Beleuchtung erzielt man am einfachsten mit einer Drehscheibe mit beispielsweise 20 Schlitzöffnungen. Sie wird an geeigneter Stelle in den Strahlengang des Lichtes eingeschaltet.

Die Frequenz ν_D der Drehscheibe ist unschwer durch Abzählen zu ermitteln; bei 20 Schlitzen ist dann die Frequenz der Lichtblitze $\nu_L = 20\,\nu_D$.

Wir beginnen mit hoher Frequenz der Scheibe und verkleinern sie allmählich. Bei einer bestimmten Belichtungsfrequenz ν_L (im Beispiel $= 50/\text{sec}$) trifft jeder der einander folgenden Lichtblitze die Blattfeder an beliebiger, aber stets gleicher Stelle ihrer Bahn. Dann sehen wir die Blattfeder an dieser Stelle (und zwar nur an dieser!) stillstehen. Jetzt ist ihre Frequenz $\nu_x = \nu_L$, im Beispiel also $\nu_x = 50/\text{sec}$, und ihre Periode $T_x = 0{,}02$ sec.

Man kann auch den zeitlichen Abstand zweier Lichtblitze *etwas* größer oder kleiner als die Schwingungsdauer der Blattfeder machen. Dann wird die Blattfeder nacheinander nicht an dem gleichen, sondern an jeweils eng benachbarten Punkten ihrer Bahn beleuchtet. Infolgedessen sehen wir das Bild der Blattfeder langsam im einen oder anderen Sinne vorrücken. Man sieht, wie bei einer kinematographischen Zeitdehnung, die Schwingungsbewegung stark verlangsamt. Diese „*stroboskopische Zeitdehnung*" ist oft sehr nützlich.

§ 9. Unechte Zeitmessung. Grundsätzliche Schwierigkeiten unserer heutigen Zeitmessung. Statt der heutigen echten, auf gleichförmigen Rotationen oder Schwingungen beruhenden Zeitmessungen benutzte man früher unechte Zeitmessungen, z. B. mit Wasser- oder Sanduhren. Sie haben in der Frühgeschichte der Mechanik (z. B. bei GALILEI, § 13) eine große Rolle gespielt. Heute sind sie nur in der Kümmerform der Eieruhren erhalten.

Man ist zuweilen geneigt, die Hilfsmittel früherer Zeiten zu belächeln. Doch sollen wir bescheiden sein. Auch unsere heutige Zeitmessung ist keineswegs vollkommen. Mit der Festlegung unserer Zeiteinheit ist es im Grunde nicht besser bestellt als mit der Festlegung der Längeneinheit durch einen im Laufe der Jahrtausende vergänglichen Normalmeterstab. Das erläutert der folgende Versuch. Abb. 15 zeigt uns einen Menschen auf einem Drehschemel sitzend. Durch einen Anstoß wird er in Drehung versetzt. Jede Näherung der Arme an den Körper erhöht, jede Entfernung vom Körper erniedrigt die Winkelgeschwindigkeit (Näheres später, § 62). Entsprechendes gilt für die Drehung unserer Erdkugel um ihre Achse. Jede größere Verlagerung von Gesteinen, z. B. die Entstehung eines Gebirges oder ein Schrumpfen der ganzen Erdkugel, beeinflußt die Umlaufszeit der Erdkugel und somit die Länge des Sterntages. Der Gang der besten modernen Uhren scheint heute gleichförmiger zu sein als die Umdrehung der Erde.

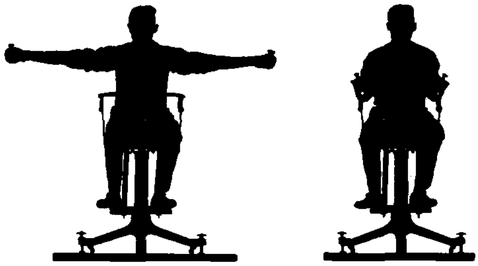

Abb. 15. Gestaltsänderungen bewirken Änderung der Winkelgeschwindigkeit.

Diese modernen Uhren beruhen entweder auf den mechanischen Schwingungen von Kristallen (z. B. Quarzuhren, § 106) oder auf den optischen Schwingungen von Molekülen (z. B. Ammoniak-Uhr). In beiden Fällen werden die sehr großen Frequenzen nach den Methoden der Wechselstromtechnik auf kleine bekannte Bruchteile heruntergesetzt.

Schwierigkeiten grundsätzlicher Art entstehen der Zeitmessung im Gebiet großer, mit der des Lichtes vergleichbarer Geschwindigkeiten. Die als Relativitätsprinzip zusammengefaßten *Erfahrungstatsachen* stellen die Zeitmessung vor ganz neue Aufgaben. Man vgl. § 160 des Elektrizitätsbandes.

Wir haben für Länge und Zeit nur Meßverfahren angegeben, aber nicht versucht, die beiden Begriffe zuvor qualitativ mit Sätzen zu definieren. Beide Begriffe haben sich auf Grund uralter und äußerst mannigfacher Erfahrungen und Erlebnisse entwickelt. Der Physiker stützt sich nur auf eine enge Auswahl. Für die Zeit beispielsweise vermag er folgendes zu sagen:

Jede physikalische Messung verlangt mindestens zwei „Ablesungen"; bei der Längenmessung muß Anfang und Ende „abgelesen" werden, bei elektrischen Meßinstrumenten Nullpunkt und Ausschlag usw. Zwischen der ersten und zweiten Ablesung schlägt unser Herz oder tickt eine Uhr. Alle Beobachtungen lassen sich einer von zwei Gruppen zuteilen. In der ersten Gruppe ist das Meßergebnis davon abhängig, wie oft zwischen der ersten und der zweiten Ablesung das Herz geschlagen oder die Uhr getickt hat, in der zweiten Gruppe hingegen ist das für das Meßergebnis gleichgültig. Dann heißt es: Die zur ersten Gruppe gehörigen Vorgänge hängen von einer Größe ab, die wir Zeit nennen und durch Abzählen der Schläge oder des Tickens messen. Damit ist ja gewiß nicht der Begriff Zeit erschöpfend erfaßt, aber es ist wenigstens kein leerer Wortkram.

II. Darstellung von Bewegungen, Kinematik.

§ 10. Definition von Bewegung. Bezugssystem. Als Bewegung bezeichnet man die Änderung des Ortes mit der Zeit, beurteilt von einem festen, starren Körper („Bezugssystem") aus. Der Zusatz ist durchaus wesentlich. Das zeigt ein beliebig herausgegriffenes Beispiel: Der Radfahrer sieht vom Sattel seines Fahrrades aus seine Fußspitzen Kreisbahnen beschreiben. Der auf dem Bürgersteig stehende Beobachter sieht ein ganz anderes Bild. Für ihn durchlaufen die Fußspitzen des Radfahrers eine wellenartige Bahn, nämlich die in Abb. 16 skizzierte Trochoide.

Abb. 16. Bahn eines Fahrradpedales für einen ruhenden Beobachter.

Der feste starre Körper, von dem aus wir die Bewegungsvorgänge in Zukunft betrachten wollen, ist die Erde oder der Fußboden unseres Hörsaales. Dabei lassen wir die tägliche Umdrehung der Erde bewußt außer acht. (In Wirklichkeit treiben wir Physik auf einem großen Karussell. Auch ist die Erde nicht starr, sondern verformbar.)

Später werden wir gelegentlich unsern Beobachtungsstandpunkt oder unser Bezugssystem wechseln. Wir werden in manchen Zusammenhängen die Erdumdrehung berücksichtigen. Auch werden wir gelegentlich Verformungen der Erde in Rechnung setzen. Das alles wird dann aber jedesmal ganz ausdrücklich betont werden. Sonst gibt es, insbesondere bei den Drehbewegungen, eine heillose Verwirrung.

Zur Darstellung oder Beschreibung aller Bewegungen gehören Messungen von Längen und Zeiten. Diese Messungen erlauben die Definition der beiden Begriffe *Geschwindigkeit* und *Beschleunigung*. Mit ihnen beginnen wir.

§ 11. Definition von Geschwindigkeit. Beispiel einer Geschwindigkeitsmessung. Ein Körper rücke innerhalb des Zeitabschnittes Δt um die Wegstrecke Δs vor. Dann definiert man

$$u_m = \frac{\text{Wegzuwachs } \Delta s}{\text{Zeitzuwachs } \Delta t} \tag{5}$$

als *mittlere* Geschwindigkeit längs des Wegzuwachses Δs. Dieser Quotient *ändert* sich im allgemeinen, wenn man den Wegzuwachs Δs mehr und mehr verkleinert. Allmählich aber sinken die Änderungen unter die Grenze der Meßgenauigkeit. Den dann gemessenen, nur noch vom Ausgangspunkt abhängigen Wert von u_m bezeichnet man als Geschwindigkeit u im Ausgangspunkt. Mathematisch erhält man also die Geschwindigkeit u als Grenzwert von u_m durch den Grenzübergang $\Delta t \to 0$. Man ersetzt das Symbol Δ durch ein d und erhält so als Geschwindigkeit

$$\boxed{u = \frac{ds}{dt}} \tag{6}$$

d. h. den Differentialquotienten des Weges nach der Zeit.

Diese Definition verlangt in vielen Fällen die Messung recht kleiner Zeiten. Als Beispiel soll die *Mündungsgeschwindigkeit* einer Pistolenkugel gemessen werden.