

EINFÜHRUNG IN DIE ELEKTRIZITÄTSLEHRE

VON

ROBERT WICHARD POHL

O. Ö. PROFESSOR DER PHYSIK AN DER UNIVERSITÄT GÖTTINGEN

DREIZEHENTE UND VIERZEHNTE AUFLAGE

MIT 497 ABBILDUNGEN
DARUNTER 20 ENTLEHNTEN



BERLIN · GÖTTINGEN · HEIDELBERG
SPRINGER-VERLAG

1949

Aus dem Vorwort zur vierten Auflage.

Verbesserungen und Einschaltungen hatten die Gliederung des Stoffes beeinträchtigt, und als Schlimmstes erschien die Gefahr einer Umfangsvergrößerung, dieses nie trüglichen Zeichens für das Veralten eines Buches. — Zur Behebung dieser Übelstände habe ich das Buch diesmal in einigen wesentlichen Teilen vollständig neu angelegt und geschrieben. Dabei ist manche unnötige Weit-schweifigkeit in Wegfall geraten und Platz für heute wichtige Dinge geschaffen worden. Der Stoff ist jetzt auf 16 statt bisher auf 11 Kapitel verteilt worden. Seine Gliederung ist nach wie vor in allen wesentlichen Punkten die der histo-rischen Entwicklung geblieben. Doch scheue ich mich nirgends vor den tech-nischen Hilfsmitteln unserer Tage. Das ist nur eine zeltersparende Äußerlichkeit. Ich habe ja auch Gesänge Homers aus einem gedruckten Texte gelernt und nicht nach dem festlichen Vortrag eines Rhapsoden.

Der schon früher geringe Aufwand an experimentellen Hilfsmitteln¹ ist weiter verringert worden.

¹ Bezugsquelle Spindler & Hoyer, G. m. b. H., Göttingen.

Vorwort zur 13./14. Auflage.

Seit dem Erscheinen des Buches im Jahre 1927 ist immer stehengebliebener Satz benutzt worden. Dieses Mal mußte das Buch vollständig neu gesetzt werden, infolgedessen konnten auch bisher zurückgestellte Änderungen ausgeführt werden. Alle Einfügungen sind durch Streichungen ausgeglichen worden. Herrn Dr. Heinz Pick und Herrn Dr. Fritz Stöckmann danke ich sehr für mancherlei Hilfe, Herrn cand. phys. K. Zückler für Korrekturlesen.

Göttingen, Oktober 1948.

R. W. Pohl.

Inhaltsverzeichnis.

I. Meßinstrumente für Strom und Spannung	1
II. Das elektrische Feld	15
III. Kräfte und Energie im elektrischen Feld	37
IV. Kapazitive Stromquellen und einige Anwendungen elektrischer Felder	49
V. Materie im elektrischen Feld.	57
VI. Das magnetische Feld	65
VII. Verknüpfung elektrischer und magnetischer Felder	74
VIII. Kräfte in magnetischen Feldern	89
IX. Materie im Magnetfeld	103
X. Anwendungen der Induktion, insbesondere induktive Stromquellen und Elektromotoren	119
XI. Trägheit des Magnetfeldes und Wechselströme	129
XII. Mechanismus der Leitungsströme	153
XIII. Elektrische Felder in der Grenzschicht zweier Substanzen	216
XIV. Die Radioaktivität	236
XV. Elektrische Wellen	253
XVI. Das Relativitätsprinzip als Erfahrungstatsache	276
Anhang: Die elektrischen Einheiten	284
Vergleichende Übersicht über die Schreibweise einiger Gleichungen	287
Sachverzeichnis	288
Periodisches System der Elemente	296
Magnetische Feldvektoren und Einheiten. Nebenbegriffe	297
Oft gebrauchte Gleichungen	298
Längeneinheiten, Kräfteinheiten, Druckeinheiten, Energieeinheiten	299
Winkelmessung. Wichtige Konstanten	300
Ergänzungen	301
Berichtigungen	302

Alle Gleichungen sind als Größengleichungen geschrieben. Neben Länge, Zeit, Masse und Temperatur wird eine fünfte Grundgröße, eine elektrische, benutzt und außerdem die rationale Schreibweise. Für jeden Buchstaben sind demnach ein Zahlenwert und eine Einheit einzusetzen. (Beispiel unter Abb. 103.) Die Wahl der Einheiten ist frei. Die unter manchen Gleichungen genannten sind keineswegs notwendig, sondern nur bequem. Gelegentlich in rechteckigen Klammern angefügte Einheiten bilden keinen Bestandteil der Gleichungen. Sie sollen nur die Dimension der dargestellten Größen an Hand geläufiger Einheiten erläutern.

Wegen der Verwendung von Frakturbuchstaben in den Gleichungen wird auf die Vorbemerkung zum Mechanikband verwiesen.

I. Meßinstrumente für Strom und Spannung.

§ 1. **Vorbemerkung.** Bei einer Darstellung der Mechanik beginnt man mit den Begriffen Länge, Zeit und Masse. Man erläutert kurz die im täglichen Leben erprobten Meßinstrumente, also unsere heutigen Maßstäbe, Uhren und Waagen, und nimmt sie gleich in Benutzung. Niemand bedient sich für die ersten Experimente einer Sonnen- oder Wasseruhr oder gar eines pulszählenden Sklaven. Niemand legt zunächst die ganze historische Entwicklung der Sekunde klar. Jedermann greift ohne Bedenken zu einer Taschenuhr oder einer modernen Stoppuhr mit Hundertstelsekundenteilung. Man kann sich einer Uhr bedienen auch ohne Kenntnis ihrer Konstruktionseinzelheiten und ohne Kenntnis ihrer historischen Entwicklung.

Beim Übergang zur Wärmelehre führt man allgemein den neuen Begriff der Temperatur ein. Man bespricht am Anfang kurz die heute jedem bekannten Thermometer und verwendet diese vertrauten Hilfsmittel schon bei den ersten Experimenten.

In entsprechender Weise knüpfen wir auch in der Elektrizitätslehre an alltägliche Erfahrungen des praktischen Lebens an. Wir beginnen mit den heute allgemein gebräuchlichen Begriffen elektrischer Strom und elektrische Spannung und den Instrumenten für ihre Messung. Als Ausgangspunkt unserer Experimente dient uns die Existenz der chemischen Stromquellen, der Taschenlampenbatterien, Akkumulatoren usw.

§ 2. **Der elektrische Strom.** Wir sprechen im täglichen Leben von einem elektrischen Strom in Leitungsdrähten oder Leitern. Wir wollen die Kennzeichen des Stromes vorführen. Dazu erinnern wir zunächst an zwei altbekannte Beobachtungen:

1. Zwischen dem „Nordpol“ und dem „Südpol“ eines Stahlmagneten kann man mit Eisenfeilicht ein Bild magnetischer Feldlinien herstellen. Wir legen z. B. einen Hufeisenmagneten auf eine glatte Unterlage und streuen auf diese unter leichtem Klopfen Eisenfeilspäne. Wir erhalten das Bild der Abb. 1.

2. Ein Magnet übt auf einen anderen Magneten und auf weiches Eisen mechanische Kräfte aus. In beiden Fällen geben uns die mit Eisenfeilspänen dargestellten Feldlinien recht eindrucksvolle Bilder. In Abb. 2 „sucht“ ein Hufeisenmagnet eine Kompaßnadel zu drehen. In Abb. 3 zieht ein Hufeisenmagnet ein Stück weiches Eisen (Schlüssel) an sich heran. Wir bedienen uns hier absichtlich einer etwas primitiven Ausdrucksweise.

Nach dieser Vorbemerkung bringen wir jetzt die drei Kennzeichen des elektrischen Stromes:

1. Der Strom erzeugt ein Magnetfeld. Ein vom Strom durchflossener Draht ist von ringförmigen magnetischen Feldlinien umgeben. Die Abb. 4 zeigt diese Feldlinien mit Eisenfeilspänen auf einer Glasplatte. Der Draht stand senkrecht zur Papierebene. Er ist nachträglich aus dem Loch in der Mitte herausgezogen worden. — Dies Magnetfeld des Stromes kann mannigfache mechanische Bewegungen hervorrufen. Wir bringen sechs verschiedene Beispiele (a bis f).

a) Parallel über einem geraden Leitungsdraht KA hängt ein Stabmagnet (Kompaßnadel) NS (Abb. 5). Beim Einschalten des Stromes wirkt ein Drehmoment auf den Magneten, der Magnet stellt sich quer zum Leiter.

b) Der Vorgang läßt sich umkehren. In Abb. 6a wird der Stabmagnet *NS* festgehalten. Neben ihm hängt ein leicht bewegliches, gewebtes Metallband *K A*. Beim Stromdurchgang stellt sich der Leiter quer zum Magneten: das Band wickelt sich spiralförmig um den Magneten herum (Abb. 6b).

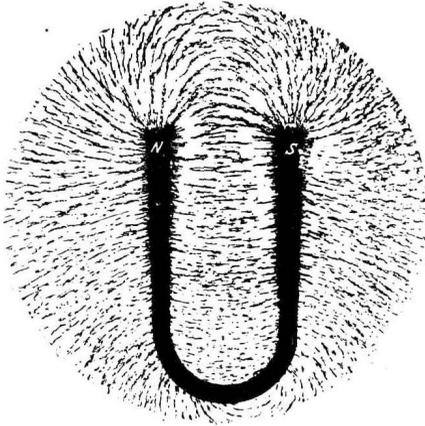


Abb. 1. Magnetische Feldlinien, dargestellt mit Eisenteilspanen.



Abb. 2. Magnetische Feldlinien. Der Hufeisenmagnet *NS* dreht die Kompaßnadel gegen den Uhrzeiger.

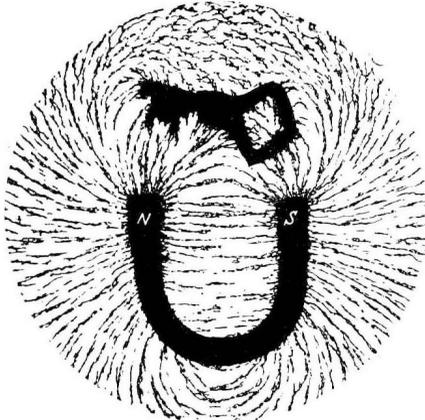


Abb. 3. Magnetische Feldlinien. Anziehung eines eisernen Schlüssels durch einen Hufeisenmagneten.

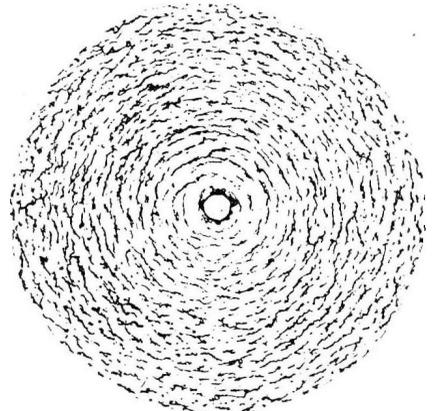


Abb. 4. Kreisförmige magnetische Feldlinien eines stromdurchflossenen Drahtes.

c) Wir bringen einen geraden Leiter *K A* in das Magnetfeld des Hufeisenmagneten *NS* (Abb. 7a). Der Leiter ist wie eine Trapezschaukel aufgehängt. Beim Stromschluß bewegt er sich in einer der Richtungen des Doppelpfeiles (Abb. 7b).

d) Wir ersetzen den geraden Leiter durch einen aufgespulten Leiter. Bei Stromschluß dreht sich die Leiterspule um die Achse *K A* (Abb. 8a und b).

e) Bisher wirkte stets das Magnetfeld eines Leiters auf das Magnetfeld eines Stahlmagneten. Man kann das Magnetfeld des letzteren durch das eines zweiten stromdurchflossenen Leiters ersetzen. In Abb. 9a und b gabelt sich der bei *K* zufließende Strom in zwei Zweigströme. Bei *A* vereinigen sie sich wieder. Die Leiterstrecken *K A* bestehen aus zwei leicht gespannten, gewebten Metallbändern.

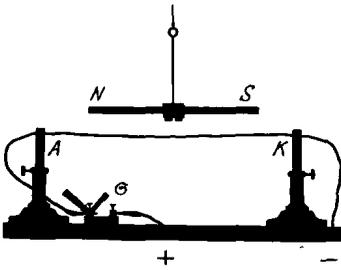


Abb. 5. Starr befestigter Leiter KA und beweglich aufgehängter Stabmagnet NS . Ohne Strom zeigt das Ende N nach Norden. Man nennt es daher den Nordpol des Magneten. Beim Stromschluß tritt der Nordpol auf den Beschauer zu aus der Papierebene heraus.

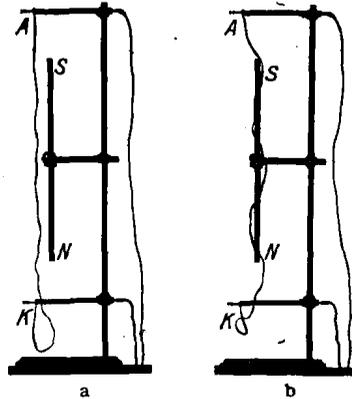


Abb. 6a, b. Starr befestigter Stabmagnet NS und beweglicher, biegsamer Leiter KA aus gewebtem Metallband.

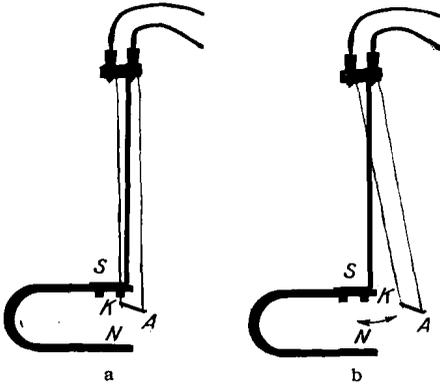


Abb. 7a, b. Feststehender Hufeisenmagnet NS und beweglicher gerader Leiter KA , an gewebten Metallbändern trapezartig aufgehängt. Zugleich Schema eines „Saitenstrommessers“ oder „Saitengalvanometers“.

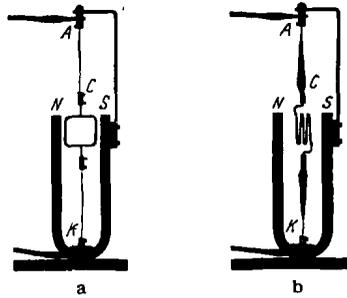


Abb. 8a, b. Feststehender Hufeisenmagnet NS und drehbarer Leiter KA in Spulenform. Zuleitungen zur „Drehspule“ aus gewebtem Metallband. Zugleich Schema eines „Drehspulstrommessers“ oder „Drehspulgalvanometers“.

Ohne Strom verlaufen sie einander angenähert parallel. Bei Stromdurchgang klappen sie bis zur Berührung zusammen.

Die Abb. 10 zeigt eine oft technisch ausgenutzte Abart dieses Versuches. Die beiden beweglichen Bänder sind durch eine feste und eine drehbare Spule ersetzt. Beide werden vom gleichen Strom durchflossen (Abb. 10 oben). Die bewegliche Spule stellt sich parallel der festen (Abb. 10 unten).

f) Endlich nehmen wir (in Analogie zu Abb. 3) in Abb. 11 ein Stück weiches

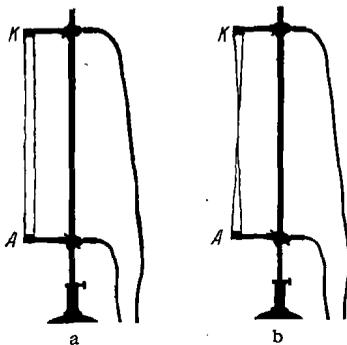


Abb. 9 a, b. Gegenseitige Anziehung zweier stromdurchflossener Leiter (Metallbänder).

Eisen Fe . Es wird in das Magnetfeld eines aufgespulten Leiters hineingezogen — So weit unsere Beispiele für mechanische Bewegungen im Magnetfeld eines Stromes

2. Der vom Strom durchflossene Leiter wird erwärmt. Er kann bis zur Weißglut erhitzt werden. Das zeigt jede Glühlampe. Die Abb. 12 gibt einen einfachen Versuch über die Ausdehnung des Drahtes infolge der Stromwärme. —

Das alles bezog sich auf feste Leiter wir haben Metalldrähte benutzt.

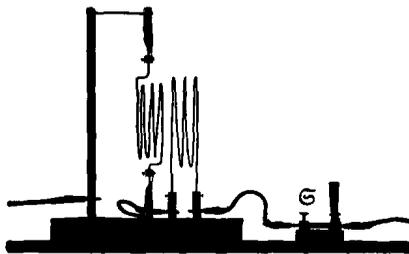
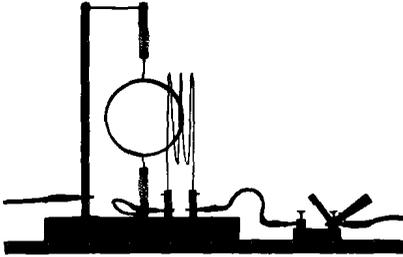


Abb. 10. Rechts eine feste, links eine drehbare Spule. Zuleitungen zur „Drehspule“ aus gewebtem Metallband, zugleich Schema der „Dynamometer“ genannten Meßinstrumente für Strom und Spannung.

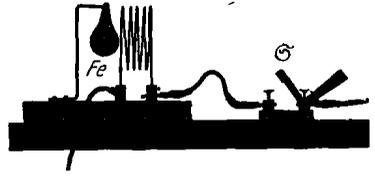


Abb. 11. Feststehende Spule und drehbar aufgehängtes weiches Eisen Fe

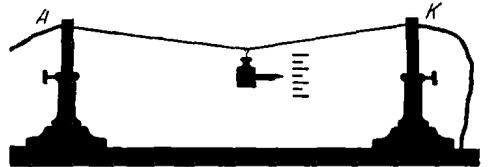


Abb. 12. Langenausdehnung eines vom Strom erwärmten Drahtes $K A$.

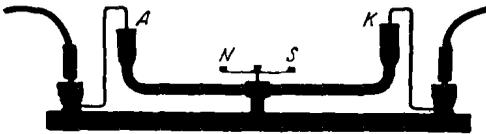


Abb. 13. Das Magnetfeld eines Stromes in einem flüssigen Leiter (angesäuertes Wasser) wird mit einer Kompaßnadel NS nachgewiesen; an den Nadelenden Papierfahnen.

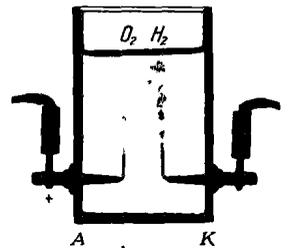


Abb. 14. Abscheidung von Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) beim Durchgang des Stromes durch verdünnte Schwefelsäure. (Momentbild 2 Sekunden nach Stromschluß.)

Ein flüssiger Leiter zeigt in gleicher Weise Magnetfeld und Warmewirkung. Zum Nachweis des Magnetfeldes benutzt man in Abb. 13 ein mit angesäuertem Wasser gefülltes Glasrohr. Auf ihm befindet sich eine kleine Kompaßnadel. Zur Zu- und Ableitung des Stromes dienen zwei Drähte K und A . — Außer dem Magnetfelde und der Warmewirkung beobachten wir bei flüssigen Leitern noch eine dritte Wirkung:

3. Der Strom ruft in flüssigen Leitern chemische Vorgänge hervor. Man nennt sie elektrolytische. — Beispiele:

a) In ein Gefäß mit angesäuertem Wasser sind als „Elektroden“ zwei Platindrähte K und A eingeführt (Abb. 14). Beim Stromdurchgang steigen von der Elektrode A Sauerstoffbläschen auf, von der Elektrode K Wasserstoffbläschen. Vereinbarungsgemäß nennt man die Wasserstoff liefernde Elek-

trode *K* den negativen Pol. Der andere Pol *A* heißt der positive Pol. Wir definieren also den Unterschied von negativem und positivem Pol elektrolytisch.

b) In ein Gefäß mit wässriger Bleiazetatlösung ragen als Elektroden zwei Bleidrähte hinein. Bei Stromdurchgang bildet sich vor unseren Augen am negativen Pol *K* ein zierliches, aus Kristallblättern zusammengesetztes „Bleibäumchen“ (Abb. 15). In diesem Fall besteht also die elektrolytische Wirkung in der Ausscheidung eines Metalles.

Endlich nehmen wir statt eines festen und flüssigen Leiters ein leitendes Gas. In dem U-förmigen Rohr der Abb. 16 befindet sich das Edelgas Neon. Zur Zu- und Ableitung des Stromes dienen wieder zwei Metall-elektroden *K* und *A*. Oben auf dem Rohr trägt ein kleiner Reiter eine Kompaßnadel *NS*. Wir verbinden die Zuleitungen *A* und *K* mit der städtischen Zentrale. Sogleich sehen wir alle drei Wirkungen des Stromes. Die Magnetnadel schlägt aus. Das Rohr wird warm. Ein blendendes orangerotes Licht im ganzen Rohre verrät uns tiefgreifende Änderungen in den Gasmolekülen, wie wir sie sonst bei den chemischen Prozessen in Flammen beobachten.

Ergebnis dieses Paragraphen. Wir kennzeichnen den elektrischen Strom in einem Leiter durch drei Erscheinungen:

1. Das Magnetfeld
2. Die Erwärmung
3. „Chemische“ Wirkungen (in erweitertem Sinn)

in flüssigen und gasförmigen Leitern.

Oder anders ausgedrückt: Wir beobachten die drei genannten Erscheinungen in enger Verknüpfung und erfinden für ihre Zusammenfassung den Begriff „elektrischer Strom“. — Das ist eine qualitative Definition. Eine solche genügt aber nicht für physikalische Zwecke. Für diese muß unbedingt für jeden Begriff ein Meßverfahren definiert werden. Dabei hat man zwei Dinge auseinanderzuhalten:

1. die Vereinbarung eines Meßverfahrens,
2. den technischen Aufbau der Meßinstrumente.

Wir beginnen hier im Fall des elektrischen Stromes mit dem technischen Aufbau der Instrumente. Dieser kann einfach gehalten werden: Man baut Strommesser zur direkten Ablesung des Stromes auf einer Skala¹.

§ 3. Technische Ausführung von Strommessern oder Amperemetern. Für den Bau dieser Strommesser benutzt man sowohl die magnetische wie die Wärmewirkung des Stromes:

a) Strommesser auf magnetischer Grundlage (Zeichenschema in Abb. 18). Die mechanischen Kräfte drehen eine Achse mit einem Zeiger. Als Beispiel der Drehspulstrommesser. Er geht in leicht ersichtlicher Weise aus

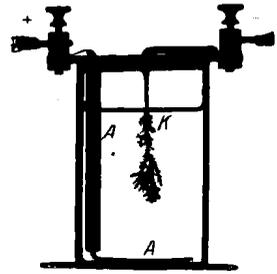


Abb. 15. Abscheidung von Bleikristallen beim Durchgang des Stromes durch wässrige Bleiazetatlösung.

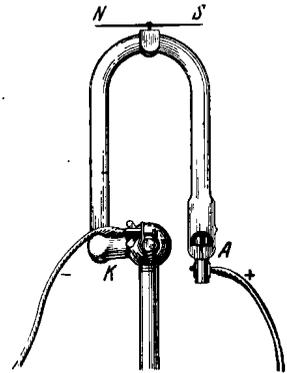


Abb. 16. Das Edelgas Neon als gasförmiger Leiter in einem U-förmigen Glasrohr. *K* und *A* metallische Zuleitungen. *NS* Kompaßnadel.

¹ Überflüssigerweise benutzt man bei quantitativen Angaben statt des Wortes Strom oft das Wort Stromstärke.

der in Abb. 8 gegebenen Anordnung hervor. Man denke sich an der Drehspule der Abb. 8 irgendeinen Zeiger befestigt. Die Abb. 17a zeigt die Spule eines solchen Strommessers mit einem mechanischen Zeiger. Statt seiner benutzt man bei empfindlichen Instrumenten einen „Lichtzeiger“: Der bewegliche Teil trägt einen Spiegel *R* zur Reflexion eines Lichtbündels (Abb. 17b). Solche Instrumente nennt man meistens Spiegelgalvanometer.

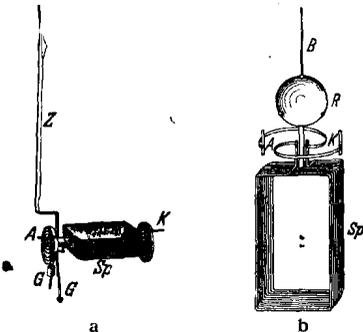


Abb 17 a, b Zwei Ausführungen der Drehspulen *Sp* von Drehspulstrommessern a) mit mechanischem Zeiger *Z* und Spitzenlagerung, wie in den Strommessern der Abb 35, 36 und 310, *G* sind Klotze zum Auswuchten der Spule; b) mit Spiegel *R*, Lichtzeiger und Bandaufhängung *B*, wie bei den „empfindlichen Strommessern“ oder „Galvanometern“ in den Abb 37, 75 und 475. *K* und *A* sind spiralförmige Stromzuführungen *K* und *A* sind spiralförmige Stromzuführungen *K* und *A* liefern überdies die „Richtgröße“, d. h. drehen die Spule im stromlosen Zustand in die Nullstellung zurück.



Abb. 18. Zeichenschema eines Strommessers auf magnetischer Grundlage. Wird späterhin auch bei solchen Strommessern angewandt, die als Spannungsmesser oder Voltmeter umgeichtet sind

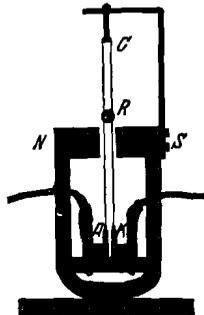


Abb 19 Attrappe eines Schleifenstrommessers oder Oszillographen. *A C K* gespannte Drahtschleife mit Spiegel *R*. (Die Drahtschleife darf keinesfalls in Resonanz mit dem zu registrierenden Wechselstrom stehen!)

Technische Abarten sind das Schleifengalvanometer (Abb. 19) und das Saitengalvanometer. Sie vereinigen hohe Empfindlichkeit mit großer Einstellungsgeschwindigkeit. Sie sind für Registrierapparate unentbehrlich (vgl. Mechanikband § 109). Beim Schleifengalvanometer („Oszillographen“) tritt an die Stelle der Spule eine gespannte Schleife mit ganz kleinem leichtem Spiegel. Beim Saitengalvanometer ist der Trapezleiter der Abb. 7 durch eine gespannte Saite ersetzt. Ihre Bewegung wird mikroskopisch beobachtet (s. Abb. 20).

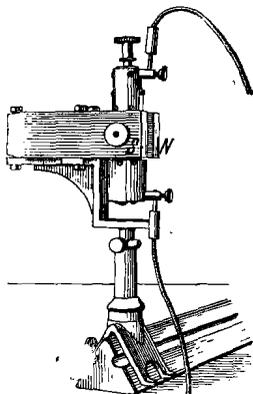


Abb. 20. Saitengalvanometer für Projektion. Links oberhalb von *S* das abbildende Mikroskopobjektiv.

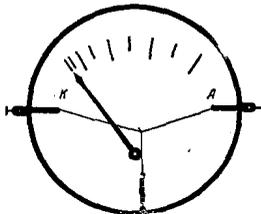


Abb. 21. Schema eines Hitzdrahtstrommessers. Man denke sich den Faden zwischen der gespannten Spiralfeder und dem Hitzdraht *KA* um die Achse des Zeigers herumgeschlungen.



Abb. 22. Zeichenschema eines Hitzdrahtstrommessers. Wird späterhin auch bei solchen Hitzdrahtstrommessern angewandt, die als Spannungsmesser oder Voltmeter umgeichtet sind.

b) Auf Wärmewirkung beruhende Strommesser. Der zu messende Strom erwärmt einen Draht $K A$. Dieser wird länger. Die Verlängerung wird irgendwie auf eine Zeigeranordnung übertragen: „Hitzdrahtstrommesser“ (Abb. 21 und 22).

§ 4. Die Eichung der Strommesser oder Amperemeter beruht auf der willkürlichen Festsetzung eines Meßverfahrens und einer Stromeinheit. Das für Verständnis und Unterricht einfachste Meßverfahren wird auf der elektrolytischen Wirkung des Stromes aufgebaut. Es benutzt das Verhältnis der elektrolytisch abgeschiedenen Stoffmenge M zur Flußzeit t als Maß des Stromes I . Ein Strom, der in jeder Sekunde 1,118 mg Silber abscheidet, wird als Einheitsstrom benutzt und „1 Ampere“ genannt¹. Alle elektrischen Ströme werden in Vielfachen des Einheitsstromes Ampere angegeben. Die seltenen Dezimalen entstammen historischen Rücksichten. Sie sollten die Umrechnung der Stromeinheit Ampere auf andere zuvor übliche mit einfachen Zehnerpotenzen ermöglichen. Weiteres auf S. 38.

Bei vielen Strommessern, insbesondere den Drehspulstrommessern, sind die Ausschläge dem Strom proportional; man findet ein konstantes Verhältnis:

$$D_I = \frac{\text{Strom}}{\text{Ausschlag}}, \text{ gemessen in } \frac{\text{Ampere}}{\text{Skalenteil}}$$

und nennt es die Stromempfindlichkeit des Instrumentes².

§ 5. Die elektrische Spannung. Wir sprechen im täglichen Leben von einer Spannung zwischen zwei Körpern, etwa zwischen den Polen einer Taschenlampenbatterie oder zwischen den beiden Steckkontakten der städtischen Zentrale. — Wir nennen die beiden Kennzeichen der elektrischen Spannung:

1. Die Spannung kann einen Strom erzeugen. — Das bedarf keiner weiteren Erläuterung.

2. Zwei Körper, zwischen denen eine elektrische Spannung herrscht, üben Kräfte aufeinander aus. Man nennt sie meist statische Kräfte.

Das läßt sich mit einem Kraftmesser, z. B. einer Waage vorführen. Wir sehen in Abb. 23 einen leichten Waagebalken aus Aluminium. Er ist auf der Metallsäule S gelagert. Am linken Arm befindet sich eine Metallscheibe K , auf dem rechten als Gegenlast Reiterchen R aus Papier. Unterhalb der Metallscheibe K befindet sich eine zweite, feste Metallscheibe A in einigen Millimetern Abstand. Man verbindet die Scheibe A und die Säule S durch je einen Draht mit den beiden Kontakten der städtischen Zentrale. Sogleich schlägt der Waagebalken aus. Die zwischen A und K herrschende Spannung erzeugt also eine Kraft.

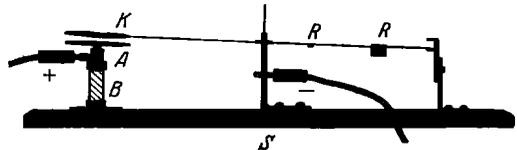


Abb. 23. „Spannungswaage“, B = Bernsteinisolator.

¹ Andere Ausdrucksweise: Man setzt $I = c M/t$ und vereinbart für Silber als Konstante $c = \frac{1 \text{ Ampere}}{1,118 \text{ mg/sec}}$. (Vgl. die analoge Definition für Wärmemenge und Kilokalorie in § 133 des Mechanikbandes, 10. Aufl.) Mit $c = 1$ würde der elektrische Strom als abgeleitete Größe gemessen werden und in höchst unzweckmäßiger Weise die gleiche Dimension [Masse/Zeit] erhalten wie etwa ein Luftstrom. (Mechanikband, Gl. 389.)

² Bei dieser altbewährten Definition entspricht einer großen Empfindlichkeit ein kleiner Zahlenwert.

So weit die qualitativen Kennzeichen der elektrischen Spannung. Für physikalische Zwecke muß auch für die Spannung ein Meßverfahren definiert werden. Auch hier ist der technische Aufbau der Meßinstrumente und die Vereinbarung eines Meßverfahrens getrennt zu behandeln. Auch hier beginnen wir mit dem Bau der Meßinstrumente. Man benutzt für diese die beiden Kennzeichen der elektrischen Spannung und unterscheidet demgemäß stromdurchflossene Spannungsmesser und statische Spannungsmesser („Elektrometer“). Wir behandeln beide Gruppen getrennt in den §§ 6 und 8.

§ 6. Technischer Aufbau statischer Spannungsmesser oder Voltmeter. Diese Instrumente benutzen die durch die Spannung hervorgerufenen „statischen“ Kräfte. Sie entsprechen dem Prinzip einer Briefwaage: Die von den Spannungen herrührenden Kräfte rufen Ausschläge hervor, und diese werden an einer Skala abgelesen. Wir nennen aus einer großen Reihe nur drei verschiedene Ausführungsformen:

a) Das „Goldblattvoltmeter“ (Abb. 24), altertümlich. In das Metallgehäuse *A* ragt, durch Bernstein *B* isoliert, ein Metallstift hinein. An diesem

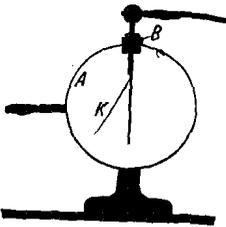


Abb. 24. Statischer Spannungsmesser mit einem Goldblattzeiger. (Instrumente mit Glasgehäuse sind unbrauchbar, § 16.)

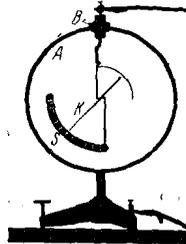


Abb. 25. Statischer Spannungsmesser mit einem Aluminiumzeiger in Spitzenlagerung. Brauchbar von einigen Hundert bis etwa 10000 Volt.

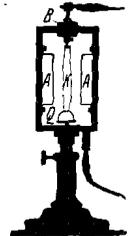


Abb. 26. Attrappe eines „Zweifadenelektrometers“ od. „Zweifadenvoltmeters“. Meßbereich etwa 30 bis 400 Volt.

befindet sich seitlich als beweglicher Zeiger ein Blättchen *K* aus Goldschaum. Zwischen *A* und *K* wird die Spannung hervorgerufen, z. B. durch Verbindung mit einer Stromquelle. Der Goldschaumzeiger wird von der Wand angezogen und die Größe des Ausschlags an einer Skala abgelesen.

b) Das „Zeigervoltmeter“ (Abb. 25). Alles wie bei a), nur ist das Goldblättchen durch einen zwischen Spitzen gelagerten Aluminiumzeiger *K* ersetzt. Diese Instrumente werden heute für Spannungen von 50 Volt aufwärts in sehr handlicher Form in den Handel gebracht. Die Abb. 28 zeigt ein Beispiel.

c) Das „Zweifadenvoltmeter“ (Abb. 26). Auch bei ihm ist ein Metallstift durch Bernstein *B* isoliert in ein Metallgehäuse *A* eingeführt. Am Stift hängt eine Schleife *K* aus feinem Platindraht. Sie wird unten durch einen kleinen Quarzbügel *Q* gespannt. Elektrische Spannungen zwischen *K* und *A* nähern die Fäden den Wänden oder genauer den an den Wänden sitzenden Drahtbügeln. Der Abstand der Fäden wird also größer. Man mißt die Abstandsvergrößerung mit einem Mikroskop. Abb. 27 gibt ein Bild des Gesichtsfeldes mit der Skala. Das Zweifadenvoltmeter ist vorzüglich zur Projektion geeignet. Es ist infolge seiner momentanen Einstellung ein ungemein bequemes Meß- und Vorführungsinstrument.

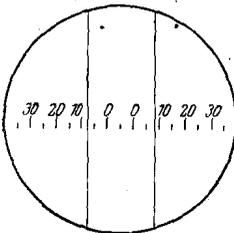


Abb. 27. Gesichtsfeld eines Zweifadenvoltmeters.

§ 7. Die Eichung der Spannungsmesser oder Voltmeter beruht auf der willkürlichen Festlegung eines Meßverfahrens und einer Spannungseinheit. Das einfachste Meßverfahren benutzt eine Reihenschaltung von n gleichgebauten Elementen (Abb. 30) und nennt die Spannung zwischen den Enden der Reihe n -mal so groß wie die eines Elementes. Aus der großen Zahl der chemischen Stromquellen wird ein bestimmtes Element als „Normalelement“ ausgewählt und seine Spannung heute 1,0186 Volt genannt. Man benutzt also als Spannungseinheit 1 Volt, und alle Spannungen werden in Vielfachen dieser Einheitsspannung angegeben.

Die Dezimalen beruhen auf internationalen Vereinbarungen. Sie sind außerordentlich zweckmäßig gewählt. Das wird man in § 28 erkennen. — Das heute benutzte Normalelement enthält als Elektroden nicht Zink und Kohle, wie die bekannten Elemente unserer Taschenlampen und Hausklingeln, sondern Quecksilber und Kadmium (§ 137).

§ 8. Stromdurchflossene Spannungsmesser oder Voltmeter sind im Prinzip umgezeichnete Amperemeter. Die Möglichkeit dieser Umzeichnung beruht auf einem festen Zusammenhang von Spannung und Strom in metallischen Leitern.

Man definiert allgemein für jeden Leiter als Widerstand¹ das Verhältnis

$$\frac{\text{Spannung } U \text{ zwischen den Enden des Leiters}}{\text{Strom } I \text{ im Leiter}}$$

Dieses als Widerstand definierte Verhältnis U/I hängt im allgemeinen in komplizierter Weise vom Strom ab. In Sonderfällen aber findet man für das Verhältnis U/I einen konstanten Wert. Diesen konstanten Wert bezeichnet man mit dem Buchstaben R und mit ihm formuliert man das Ohmsche Gesetz:

Die Spannung U zwischen den Enden des Leiters und der Strom I im Leiter sind einander proportional oder das Verhältnis beider, der Widerstand U/I , hat einen konstanten Wert R . In Gleichungsform

$$U = I \cdot R. \tag{1}$$

Einen solchen Sonderfall der Gültigkeit des Ohmschen Gesetzes findet man bei metallischen Leitern konstanter Temperatur.

Das zeigt man mit der in Abb. 31 gezeichneten Anordnung. Eine Stromquelle B schiebt einen Strom durch einen metallischen Leiter $K A$, z. B. von

¹ Das Wort „Widerstand“ wird in der Elektrizitätslehre in dreierlei verschiedenen Bedeutungen gebraucht. Erstens bezeichnet es das Verhältnis Spannung zu Strom, U/I , für einen beliebigen Leiter. Zweitens bezeichnet es einen Apparat, z. B. einen aufgespulten Draht, wie in Abb. 34. Im dritten Fall bedeutet Widerstand, wie im täglichen Leben, eine der Geschwindigkeit entgegengerichtete Kraft. Näheres auf S. 190.

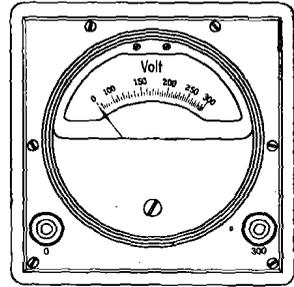


Abb. 28. Handlicher statischer Spannungsmesser für 50—300 Volt. Im Innern befindet sich eine zwischen Spitzen drehbar gelagerte, mit dem Zeiger verbundene Scheibe K . Sie wird in eine seitwärts angebrachte Metallkammer hereingezogen. Die Ruhelage wird durch eine an der Achse angreifende Schneckenfeder bestimmt. Schweizer Präzisionsarbeit.



Abb. 29. Zeichenschema eines „statischen Spannungsmessers“, „statischen Voltmeters“ oder „Elektrometers“. Ohne Eichung auch „Elektroskop“ genannt.



Abb. 30. Reihenschaltung von 6 Elementen.

Band- oder Streifenform. Das Amperemeter \mathcal{A} mißt den Strom I im Leiter, das Voltmeter \mathcal{B} die Spannung U zwischen den Enden des Leiters $K A$. — Wir benutzen der Reihe nach verschiedene Stromquellen (z. B. einige Elemente, die städtische Zentrale usw.) und verändern dadurch den Strom I . Dann dividieren wir zusammengehörige Zahlenwerte von U und I und finden U/I konstant. Man mißt also das als Widerstand definierte Verhältnis U/I in Volt/Ampere. Für das Verhältnis Volt/Ampere hat man international als Kürzung das Wort Ohm eingeführt.

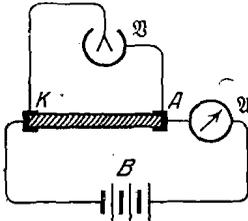


Abb. 31. Zur Vorführung des Ohmschen Gesetzes.

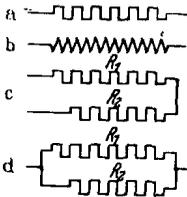


Abb. 32. Zeichenschema eines Widerstandes; a) mit verschwindend kleinem, b) mit endlichem Selbstinduktionskoeffizienten. Der Unterschied ist für den Leser erst ab S. 135 zu beachten. c) Zeichenschema für die Reihenschaltung zweier Widerstände. Der Gesamtwiderstand R ist gleich der Summe $R_1 + R_2$. d) Zeichenschema für die Parallelschaltung zweier Widerstände. Der Gesamtwiderstand R ergibt sich nach der Gleichung

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

(G. S. Ohm).

In Abb. 31 ergebe sich beispielsweise für unseren Leiter $K A$ das Verhältnis $U/I = 500$ Volt/Ampere. Also heißt es kurz: Der Leiter $K A$ hat einen Widerstand $R = 500$ Ohm. Der Widerstand eines Leiters wird in Zukunft oft für uns wichtig sein. Dann werden wir den Leiter in unseren Schaltskizzen nach einer der beiden aus Abb. 32 ersichtlichen Weisen darstellen. — So weit die Definition des Wortes Widerstand und das Ohmsche Gesetz.

Das Ohmsche Gesetz ermöglicht nun eine Umeichung eines Amperemeters in ein Voltmeter. — Wir erinnern zunächst an ein mechanisches Beispiel aus dem täglichen Leben, nämlich die Geldzählwaage.

Eine Briefwaage ist im allgemeinen auf Gramm geeicht. Wir können sie leicht auf Goldmark umeichen. Sie gibt uns dann sofort den Markbetrag eines Haufens auf die Waagschale geschütteter Goldstücke.

Wir kennen das Goldwert genannte Verhältnis

$$\frac{\text{Geldbetrag}}{\text{Masse des Goldes}} = 2,79 \frac{\text{Reichsmark}}{\text{Gramm}}$$

Folglich haben wir die Zahlen der Grammeichung nur mit einem konstanten Faktor, nämlich mit 2,79 Reichsmark/Gramm zu multiplizieren, um die Grammeichung in eine Markeichung zu verwandeln.

Genau entsprechend kann man bei der Umeichung der wichtigsten Strommesser verfahren, nämlich der Strommesser auf magnetischer Grundlage. Diese enthalten in ihrem Innern einen vom Strom durchflossenen Leitungsdraht, meist in Spulenform. Für den Draht kennen wir das Widerstand genannte Verhältnis

$$\frac{\text{Spannung}}{\text{Strom}} = x \frac{\text{Volt}}{\text{Ampere}} = x \text{ Ohm};$$

in ihm ist x ein Zahlenwert. Folglich haben wir nur die Ampereichung mit dem Faktor $R = x$ Volt/Ampere zu multiplizieren, um die Ampereichung in eine Volteichung zu verwandeln.

Bei Hitzdrahtstrommessern ist die Umeichung auf Volt nicht ganz so einfach wie bei den Strommessern auf magnetischer Grundlage. Durch die Erwärmung des Drahtes tritt an die Stelle der Gleichung (1) ein verwickelterer Zusammenhang von Spannung und Strom.

Wir wiederholen: die stromdurchflossenen Spannungsmesser sind grundsätzlich nichts anderes als umgeichtete Strommesser. Deswegen zeichnen wir sie in

unseren Schaltskizzen mit dem Schema der Abb. 18 oder 22, im Unterschied von Abb. 29, dem Schema eines statischen Voltmeters.

§ 9. Einige Beispiele für Ströme und Spannungen verschiedener Größe.

a) Spannungen von der Größenordnung 1 Volt herrschen zwischen den Klemmen der elektrischen Elemente für Hausklingeln usw.

b) Einige hundert Volt beträgt die Spannung zwischen den Kontaktschlüssen der städtischen Zentralen. In Göttingen sind es 220 Volt.

c) Bei Tausenden von Volt gibt es Funken. Rund 3000 Volt vermögen eine Luftstrecke von 1 mm zu durchschlagen.

d) Zwischen den Fernleitungen der Überlandzentralen benutzt man meistens Spannungen von etwa 15 000 Volt, neuerdings sogar bis zu 200 000 Volt.

e) Rund 10^9 Volt herrschen während eines Gewitters zwischen den Wolken und der Erde. Sie rufen die Blitze hervor.

Man braucht für viele Versuche veränderliche Spannungen. Diese kann man durch einen Kunstgriff als Bruchteile einer Höchstspannung herstellen. Man benutzt die Spannungsteilerschaltung (Abb. 33).

Man verbindet die beiden Klemmen der Stromquelle *B* durch einen „Widerstand“ *K A*. Das ist in praxi stets ein spiralig auf eine Trommel aufgewickelter, schlecht leitender Metalldraht aus bestimmten Legierungen. Dann herrscht zwischen den Enden *K A* des Widerstandes die volle Spannung der Stromquelle. Zwischen einem Ende des Widerstandes und der Mitte herrscht die halbe Spannung und so fort für die anderen Bruchteile. Wir schließen daher einen Draht *1* an ein Ende des Widerstandes, einen zweiten Draht *2* an einen metallischen Läufer *G*. Dann können wir durch Verschieben des Läufers *G* zwischen *1* und *2* jede Spannung zwischen Null und der Höchstspannung herstellen. — Die Abb. 34 zeigt eine handliche Ausführung eines solchen Widerstandes für Spannungsteilerschaltungen. Der Griff *G* dient zum Verschieben des Läufers.

Nunmehr ein paar Beispiele für Ströme in Ampere.

a) Ströme von der Größenordnung 1 Ampere, oft auch nur einigen Zehnteln, durchfließen die gewöhnlichen Glühlampen der Zimmerbeleuchtung.

b) 100 Ampere ist etwa der Strom für den Wagen einer elektrischen Straßenbahn.

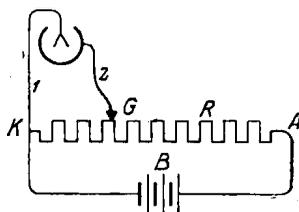


Abb. 33. Schema der Spannungsteilerschaltung.



Abb. 34. Technische Ausführung eines Widerstandes mit Gleitkontakt *G*. Der Draht ist auf einen isolierenden Zylinder aufgespult.

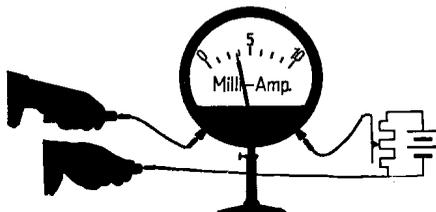


Abb. 35. Einschaltung einer Versuchsperson in einen Stromkreis. Strommesser nach dem Schema der Abb. 8. Die Handgriffe enthalten unsichtbare Schutzwiderstände. Sie verhindern auch bei Schaltungsfehlern eine Gefährdung der Versuchsperson.

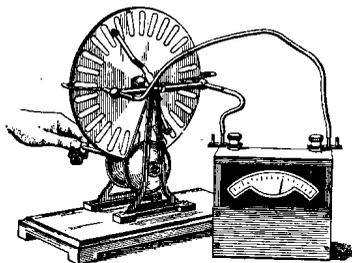


Abb. 36. Messung des von einer Holzschischen (!) Influenzmaschine gelieferten Stromes mit einem Drehspulamperemeter (Schema der Abb. 8).

c) 10^{-3} Ampere nennt man 1 Milliampere. Ströme von etlichen Milliampere (etwa 3 bis 5) vermag unser Körper gerade zu spüren. Das zeigt man mit der Anordnung der Abb. 35. Die Versuchsperson ist mittels zweier metallischer Handgriffe in den Strom eingeschaltet. Die erforderliche Spannung erhöht man langsam und gleichmäßig nach dem oben erläuterten Spannungsteilverfahren.

d) Ströme von etwa 10^{-5} Ampere liefert das als „Influenzmaschine“ bekannte Kinderspielzeug. Wir messen diesen Strom in Abb. 36 mit einem technischen Amperemeter. Man begegnet noch häufig einem seltsamen Vorurteil: Eine Influenzmaschine soll „statische Elektrizität“ liefern, ein Amperemeter aber nur „galvanische“ messen können. Einen Unterschied zwischen statischer und galvanischer Elektrizität gibt es nicht!

e) 10^{-6} Ampere nennt man 1 Mikroampere. Ströme dieser Größenordnung können wir leicht mit unserem Körper erzeugen. Wir umfassen in Abb. 37 mit

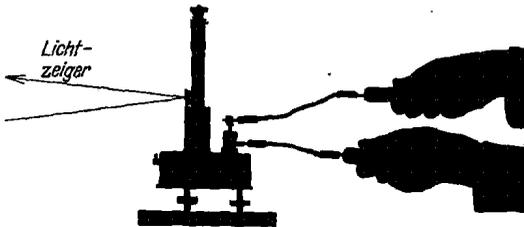


Abb. 37. Beobachtung schwacher Ströme beim Spannen der Fingermuskeln. Das Drehspulgalvanometer (Schema der Abb. 8) mit Spiegel und Lichtzeiger ist durch besonders kurze Schwingungsdauer ($T = 0,5$ sec) ausgezeichnet.

beiden Händen je einen metallischen Handgriff. Von den beiden Handgriffen führen Leitungsdrähte zum Amperemeter mit Spiegelablesung, meist Spiegelgalvanometer genannt. Bei zwangloser Haltung der Hände beobachten wir keinen Strom. Dann spannen wir die Fingermuskel der einen Hand und beobachten am Galvanometer einen Strom der Größenordnung 10^{-6}

Ampere. Beim Spannen der anderen Hand beobachten wir den gleichen Strom, aber in entgegengesetzter Richtung.

(Dieser Strom entsteht durch Vorgänge in der Haut und nicht im Muskel!)

f) Gute Spiegelgalvanometer lassen Ströme bis herab zu etwa $3 \cdot 10^{-12}$ Amper e messen.

Diese untere Grenze ist durch die Brownsche Molekularbewegung des bewegten Systems (Drehspule usw.) bestimmt. Bei noch größerer Empfindlichkeit (leichtere Spule oder feinere Aufhängung) bewegt sich der Nullpunkt des Instruments, wengleich viel langsamer, so doch genau so regellos wie ein Staubeilchen in Brownscher Bewegung. (Mechanikband § 152.)

§ 10. **Stromstöße und ihre Messung.** Sehr oft hat man es bei physikalischen Versuchen mit zeitlich konstanten Strömen zu tun. Dann stellt sich der Zeiger

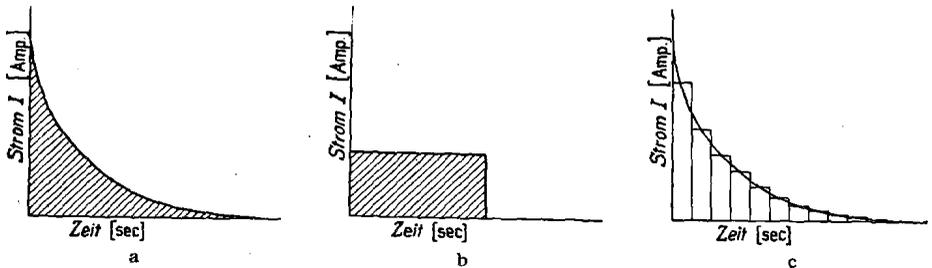


Abb. 38a-c. Drei Beispiele für „Zeitsummen des Stromes“ od. „Stromstöße“, gemessen in Amperesekunden.

eines Strommessers auf einen Skalenteil ein und verharrt dort mit einem Dauer-ausschlag. Bei vielen Messungen kommen jedoch auch kurzdauernde Ströme vor, beispielsweise mit dem in Abb. 38a skizzierten Verlauf: Der Strom sinkt

innerhalb einer Zeit t von seinem Anfangswert auf Null herunter. Die schraffierte Fläche hat die Bedeutung einer „Stromzeitsumme“ ($\int I dt$). Man gibt dieser Stromzeitsumme einen kurzen und treffenden Namen, nämlich „Stromstoß“. Dies Wort ist in Analogie zum „Kraftstoß“ ($\int \mathcal{R} dt$) in der Mechanik gebildet worden. Das einfachste Beispiel eines Stromstoßes zeigt uns die Abb. 38b: Ein konstanter Strom I fließt während der Zeit t . Die Größe dieses Stromstoßes wird durch das Produkt Strom mal Zeit bestimmt, beträgt also $I \cdot t$ [Amperesekunden]. In entsprechender Weise kann man auch durch Summenbildung (vgl. Abb. 38c) Stromstöße von beliebigem zeitlichem Verlauf in Amperesekunden auswerten. Das ist aber zu umständlich, und so macht man es auch nur auf dem Papier.

In Wirklichkeit ist ein Stromstoß eine ganz besonders bequem meßbare Größe. Man braucht zur Messung eines Stromstoßes nur eine einzige Zeigerablesung eines Strommessers. Der Strommesser muß in diesem Falle lediglich zwei Bedingungen erfüllen:

1. Bei konstanten Strömen müssen die Dauerausschläge des Zeigers dem Strom proportional sein. Das ist besonders weitgehend bei den Drehspulgalvanometern der Fall (§ 4).

2. Die Schwingungsdauer des Zeigers muß groß gegenüber der Flußzeit des Stromes sein. Dann reagiert der Strommesser auf einen Stromstoß mit einem Stoßausschlag. D. h. der Zeiger schlägt aus, kehrt um und geht sofort zum Nullpunkt zurück.

Für derartige Galvanometer ist der Stoßausschlag dem Stromstoß proportional. Den Grund für dies Verhalten findet man in § 48 des Mechanikbandes. — Man erhält also ein konstantes Verhältnis

$$\frac{\text{Stromstoß}}{\text{Stoßausschlag}} = B_1$$

und nennt es die ballistische Stromempfindlichkeit des Galvanometers.

Zur Vorführung benutzen wir einen Stromstoß von rechteckiger Gestalt (Abb. 38b). D. h. wir schicken während kurzer, aber genau gemessener Zeiten t bekannte Ströme I durch ein langsam schwingendes Galvanometer hindurch. Dazu dient uns ein in das Uhrwerk einer Stoppuhr eingebauter Schalter (Abb. 39). Dieser Schalter ist nur so lange geschlossen, wie die Uhr läuft.

Ein bekannter Strom I geeigneter Größe wird nach dem Schaltschema der Abb. 40 hergestellt. Mittels Spannungsteilung (S. 11) wird beispielsweise eine Spannung von $\frac{1}{100}$ Volt hergestellt. Diese Spannung treibt einen Strom durch das Galvanometer und durch einen Widerstand von 10^6 Ohm. Der durch das Galvanometer fließende Strom I beträgt dann nach dem Ohmschen Gesetz 10^{-2} Volt/ 10^6 Ohm = 10^{-8} Amp. Mit dieser Anordnung beobachten wir Ausschläge α für verschiedene Produkte It . Wir wiederholen die Messungen dann noch mit zwei größeren Strömen. Beide Male stoppen wir die Zeiten wieder beliebig zwischen einigen Zehnteln und etwa 2 Sekunden ab.

Dann bilden wir für die verschiedenen Messungen die Verhältnisse $B_1 = \text{Stromstoß } It / \text{Stoßausschlag } \alpha$ und erhalten in allen Fällen den gleichen Wert, im Beispiel

$$B_1 = 6 \cdot 10^{-9} \frac{\text{Amperesekunden}}{\text{Skalenteil}}$$

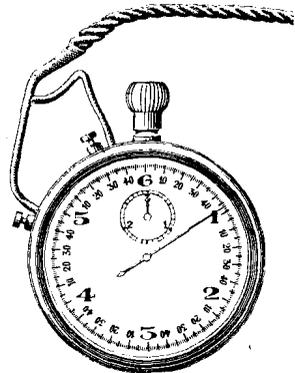


Abb. 39. Diese auf $\frac{1}{100}$ Sekunde ablesbare Stoppuhr schließt einen Stromkreis während der Laufzeit ihres Zeigers. Sie ermöglicht die bequeme Herstellung bekannter Amperesekunden. Ein kaum weniger bequemer Zeitschalter kann leicht mittels eines Grammophonuhrwerkes improvisiert werden.

Damit ist die Proportionalität von Stoßausschlag und Stromstoß für einen Stromstoß von rechteckiger Gestalt (Abb. 38b) erwiesen und gleichzeitig das Galvanometer ballistisch geeicht. Das Ergebnis läßt sich ohne weiteres verall-

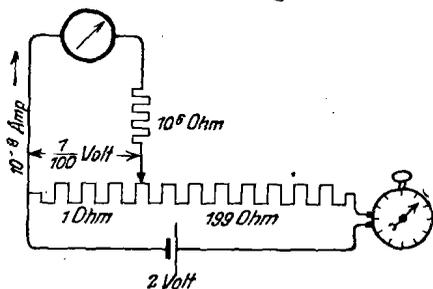


Abb. 40. Eichung der Stoßausschläge eines langsam schwingenden Strommessers in Amperesekunden.



Abb. 41. „Reibungselektroskopmaschine“. Gleiches Galvanometer wie in Abb. 75.

gemeinern: Jeder beliebige Stromstoß läßt sich gemäß Abb. 38c aus rechteckigen Stromstößen zusammensetzen.

Das so ballistisch in Amperesekunden geeichte Galvanometer wollen wir zur Messung eines unbekanntes Stromstoßes benutzen. Zu diesem Zweck improvisieren wir in Abb. 41 eine „Reibungselektroskopmaschine“. Statt Siegellack und Katzenfell nehmen wir die Hand des einen Beobachters und den Haarschopf des anderen. Einmal Streicheln gibt einen Stoßausschlag von etwa 16 Skalenteilen, also einen Stromstoß von rund 10^{-7} Amperesekunden.

§ 11. Schlußbemerkung. Wir können heute die elektrischen Erscheinungen in ihren zahllosen Anwendungen schlechterdings nicht mehr aus unserem Dasein fortdenken. Niemand von uns kann im täglichen Leben ohne die Begriffe elektrischer Strom und elektrische Spannung auskommen. Schon Kinder reden heute von Ampere und Volt. Wir knüpfen daher, wie überall in den Grundlagen der Physik, auch bei der Darstellung der Elektrizitätslehre an die nächstliegenden Erfahrungen des täglichen Lebens an. Den Ausgangspunkt unserer Experimente bildeten nicht geriebener Bernstein und Papierschnitzel, sondern chemische Stromquellen, wie Taschenlampenbatterien und Akkumulatoren. Mit ihrer Hilfe entwickelten wir die Begriffe Strom und Spannung und beschrieben für beide unabhängig voneinander je ein leicht verständliches elektrisches Meßverfahren. Wir messen fortan Strom und Spannung als elektrische Größen auch in elektrischen Einheiten, in Vielfachen eines Einheitsstromes (Ampere) und einer Einheitsspannung (Volt).

Man braucht für die elektrische Meßtechnik zwei spezifisch elektrische Größen. Nur mit zwei elektrischen Größen kann man den Anschluß an die mechanischen Begriffe Kraft und Arbeit gewinnen. Nach Herstellung dieses Anschlusses (§ 28) läßt sich die eine dieser beiden Größen als abgeleitete messen, die zweite muß als spezifisch elektrische Grundgröße beibehalten werden, sonst erscheinen in den Einheiten und Dimensionen elektrischer und magnetischer Größen nur mechanische Einheiten. Das ist höchst unzweckmäßig, denn es erschwert ohne jeglichen Nutzen die Übersicht.

Rückschauend muß uns in der geschichtlichen Entwicklung der Elektrizitätslehre die Schaffung der Begriffe „elektrischer Strom“ und „elektrische Spannung“ als eine entscheidende Leistung der wissenschaftlichen Pioniere erscheinen. Diese genial ersonnenen Begriffe sind für das tägliche Leben, für die Technik und für die Wissenschaft gleich brauchbar.