LEHRBUCH DER

PHYSIK

OBERSCHULE TEIL IIA

VOLK UND WISSEN VOLKSEIGENER VERLAG BERLIN

Lehrbuch der Physik

für die Oberschule

TEIL IIA

11. Schuljahr

Mit 182 Abbildungen

VOLK UND WISSEN VOLKSEIGENER VERLAG BERLIN

1953

Herausgegeben von
Rudolf Girke und Dr. Werner Stein in Berlin

Berichtigter Nachdruck der vierten Auflage (1949)

Bestell-Nr. 6014 2,— DM · 152.—166. Tausend · Lizenz Nr. 203 · 1000/52-AIc-4/52
Satz: B. G. Teubner, Leipzig (III/18/154)
Druck: VEB Berliner Druckhaus, Prenzlauer Allee (87/10 I)

Inhaltsverzeichnis

Elektrizitätslehre

I. Grundbegriffe und Grundgesetze

§ 1. Elektrische Spannung und Stromstärke 5
§ 2. Elektrischer Widerstand. Ohmsches Gesetz 9

II. Das elektromagnetische Feld

A. Das unveränderliche elektrische Feld 15
§ 3. Die Formen des elektrischen Feldes 15
§ 4. Elektrische Spannung und Feldstärke 17
§ 5. Elektrische Feldstärke und Ladung 21
§ 6. Das Maß der Ladung 24
§ 7. Die Kapazität. Der Kondensator 27
§ 8. Materie im elektrischen Feld 30
§ 9. Das Grundgesetz des elektrischen Feldes 33
§ 10. Die Energie des elektrischen Feldes 34

B. Das unveränderliche magnetische Feld 38
§ 11. Die Form des magnetischen Feldes 38
§ 12. Die magnetische Feldstärke 40
§ 13. Vergleichende Betrachtung elektrischer und magnetischer Felder ... 43
§ 14. Materie im magnetischen Feld ... 45
§ 15. Magnetische Kraftwirkungen 48
§ 16. Das magnetische Feld der Erde .. 52

C. Das elektromagnetische Feld und die elektromagnetische Induktion 53
§ 17. Die induzierte elektrische Spannung 53
§ 18. Die Grundgesetze des elektromagnetischen Feldes 59
§ 19. Induktionsströme 61
§ 20. Die Selbstinduktion eines Leiters 66

D. Starkstromtechnik und elektrische Energiewirtschaft 69
§ 21. Generator und Motor für Gleichstrom 69
§ 22. Generator und Motor für Wechselstrom 74
§ 23. Der Wechselstromkreis 76
§ 24. Übertragung und Umformung elektrischer Energie 81
§ 25. Fernleitung und Speicherung elektrischer Energie 84

III. Elektrische Leitungsvorgänge

A. Elektrische Leitung in Flüssigkeiten 86
§ 26. Die Ionenleitung in Elektrolyten 86
§ 27. Galvanisches Element und Akkumulator 89

B. Elektrische Leitungsvorgänge in Gasen und im Vakuum 91
§ 28. Die Kathodenstrahlen 91
§ 29. Die Kanalstrahlen 94
§ 30. Glüh- und Photoelektronen, Glühkathodenröhre 96
§ 31. Leitung in Gasen 100

C. Elektrische Leitung in festen Körpern 103
§ 32. Die Leitfähigkeit fester Körper .. 103
§ 33. Elektrische Vorgänge in Grenzflächen fester Leiter 104
§ 34. Telegraphie- und Fernsprechströme 106
§ 35. Niederfrequenzverstärker und Gleichrichter 108

D. Radioaktivität und atmosphärische Elektrizität 110
§ 36. Radioaktivität 110
§ 37. Das ungestörte elektrische Feld der Erde 113
§ 38. Das gestörte elektrische Feld der Erde 114

Sachverzeichnis 116

ELEKTRIZITÄTSLEHRE

I. Grundbegriffe und Grundgesetze

§ 1. Elektrische Spannung und Stromstärke

1. Elektrische Spannung. Die Erfahrungen, die wir durch Experimente mit der Elektrizität[1]) gewonnen haben, wollen wir ergänzen und vervollständigen. Dabei sollen sich unsere Bestrebungen darauf richten, die Erscheinungen nicht nur qualitativ zu verfolgen, sondern nach Möglichkeit überall quantitative Messungen der elektrischen Größen vorzunehmen. Die Elektrizitätswerke beliefern unsere Häuser mit Strom, in neuerer Zeit gewöhnlich mit Wechselstrom (vgl. § 22). Wir brauchen aber zunächst für unsere Versuche Gleichstrom von etwa 100 Volt Spannung. Steht kein Gleichstrom aus dem Netz zur Verfügung, so kann man z. B. eine Anodenbatterie verwenden. Mit dem Ausdruck, daß Spannung vorhanden ist, soll nur gesagt werden, daß bei Anschluß eines Verbrauchsgerätes Strom geliefert wird, was man z. B. am Aufleuchten einer Glühlampe erkennen kann. Spannung ist also gleichbedeutend mit „Bereitschaft zur Stromlieferung".

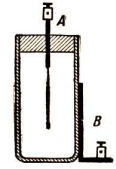
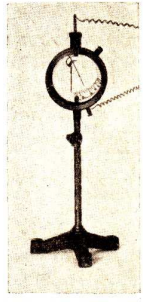


Abb. 1. Elektroskop

Man stellt das Vorhandensein einer Spannung gelegentlich unfreiwillig fest, wenn man die beiden Pole einer Steckdose mit den Fingern berührt; doch ist vor derartigen Unachtsamkeiten zu warnen, da sie mit Lebensgefahr verbunden sind. Wir verbinden die Klemmen *A* und *B* eines empfindlichen Elektroskopes (Abb. 1) mit den Polen unserer Gleichstromquelle; das Blättchen des Instrumentes nähert sich *B*. Benutzen wir ein Braunsches Elektrometer mit einer Skala (Abb. 2), so können wir den Versuch in folgender Weise zu einer Messung der Spannung ausgestalten:


Abb. 2
Braunsches Elektrometer

2. Die Einheit und Messung der Spannung. Abstufungen von Spannungen erhalten wir in übersichtlicher Weise durch Batterien von Akkumulatoren[2]) oder galvanischen Elementen. Wir überzeugen uns zunächst, daß die beiden Pole einer Akkumulatorenbatterie sich verschieden verhalten, indem wir zwei Drähte anschließen und deren voneinander getrennte Enden in angesäuertes Wasser tauchen. Dann treten an den Drahtenden Gasbläschen auf, und zwar ist die Gasentwicklung an dem einen Ende besonders lebhaft. Wir nennen

1) ēlektron (griech.) = Bernstein 2) accumulator (lat.) = Anhäufer

den Pol der Stromquelle, mit dem dieses Ende verbunden ist, willkürlich den negativen und den anderen den positiven Pol. Die Pole sind äußerlich an der Farbe der zugehörigen Platten der Batterie zu unterscheiden: Die Platte am positiven Pol ist braun, die am negativen grau.

Verbindet man zwei ungleichartige Pole zweier Akkumulatoren miteinander, so hat man eine Batterie von zwei hintereinander geschalteten Akkumulatoren. In den Taschenlampenbatterien sind in der Regel drei, in den Anodenbatterien 50 und mehr Trockenelemente hintereinander geschaltet. Der freie, etwa negative Pol des ersten Elementes und der freie, dann positive Pol des letzten Elementes sind die Pole der Batterie. Die Spannung zwischen den Polen eines einzelnen Akkumulators ist zu gering, als daß sie einen Ausschlag am Braunschen Elektrometer hervorriefe. Schalten wir aber 10 Akkumulatoren hintereinander, so schlägt das Elektrometer aus. Bei einer Batterie von 15 Akkumulatoren ist der Ausschlag größer. Dieselben Ausschläge wie die 10 bzw. 15 Akkumulatoren liefern 13 bzw. 20 hintereinander geschaltete Elemente einer Anodenbatterie. Durch Hintereinanderschaltung mehrerer Elemente können wir also höhere Spannungen erzielen. Wir setzen nun die Spannung einer Batterie der Anzahl der hintereinander geschalteten Elemente proportional, eine Festsetzung, deren Zweckmäßigkeit später (vgl. S. 11) ihre Begründung finden wird.

Die Maßeinheit, in der wir Spannungen messen, ist das Volt (V).

Diese Einheit ist festgelegt durch die internationale Übereinkunft, daß die Spannung des Weston-Elementes bei 20° C 1,0183 Volt beträgt (§ 27).

Die Spannung 1 Volt ist auch nahezu gleich der Spannung eines Elementes, das aus einer Zink- und einer Eisenplatte besteht, die in 40prozentige Natronlauge getaucht sind.

Dann hat eine Batterie von 20 derartigen hintereinander geschalteten Elementen nach unserer Festsetzung eine Spannung von 20 Volt. Dieselbe Spannung haben 10 hintereinander geschaltete Akkumulatoren; die Spannung eines Akkumulators beträgt also 2, genauer 2,04 V (sie ist vom Ladungszustand abhängig). Das einzelne Element einer Anodenbatterie liefert uns 1,5 V. Ein Zink-Kupfer-Element hat die Spannung 1,06 V; die Spannungseinheit kann mit oft brauchbarer Annäherung also auch durch die Spannung eines Zink-Kupfer-Elementes dargestellt werden.

Mit einer genügend großen Anodenbatterie oder einer größeren Anzahl von Akkumulatoren können wir nun unsere Elektrometer eichen, d. h. mit einer Skala versehen, die uns die Spannung in Volt angibt.

Das Braunsche Instrument wird nicht von Strom durchflossen, eine Glühlampe in der Zuführung leuchtet nicht auf (von dem kurzen Stromstoß, der das Elektrometer wie einen Kondensator auflädt (S. 22), sehen wir hier ab):

es ist ein statisches[1]) Voltmeter. Bequemer im Gebrauch, vor allem für niedrige Spannungen, sind andere, stromdurchflossene Spannungsmesser, die wir bald kennenlernen werden (§ 2, 8).

3. Elektrische Stromstärke. Verbinden wir die beiden Pole einer Steckdose durch Drähte mit einer Glühlampe, so leuchtet sie auf. Wir sagen: durch die Lampe fließt ein elektrischer Strom. Die Lampe leuchtet auch, wenn ein Teil der Verbindung durch Salzwasser oder verdünnte Schwefelsäure hergestellt ist. Sie leuchtet aber nicht, wenn ein Teil der Verbindung aus einem trockenen Bindfaden oder einem Holzstab besteht. Wir unterscheiden demgemäß Leiter und Nichtleiter (Isolatoren[2]) des elektrischen Stromes. Die Leiter werden weiter unterteilt in Leiter erster Klasse, die sich wie die Metalle bei Stromdurchgang stofflich nicht ändern, und Leiter zweiter Klasse. Diese werden bei Stromdurchgang chemisch verändert. Leiter zweiter Klasse sind alle verdünnten Säuren, Basen und Salzlösungen.

Wenn wir ein geeignetes Glühlämpchen an einen Akkumulator schalten, glüht es, bei einer Batterie von zwei hintereinander geschalteten Akkumulatoren leuchtet es hell, bei drei Akkumulatoren schmilzt der Faden des Lämpchens durch. Mit der Spannung wächst hier offensichtlich eine Wirkung, die zwar mit der Spannung zusammenhängt, aber nicht identisch mit ihr ist; denn wir beobachten sie nicht, wenn wir dieselbe Spannung an ein Elektrometer legen. Wir wollen die hier beobachteten, mit Leuchterscheinungen verbundenen Wärmewirkungen mit dem Begriff der „Stromstärke" beschreiben. Wir wollen also sagen, die Stromstärke sei um so größer, je größer solche beobachteten Wirkungen sind. Damit ist die Stromstärke nur ungefähr und vor allem noch nicht zahlenmäßig festgelegt. Wir müssen uns nun genauere Meßverfahren für die Stromstärke überlegen.

4. Die Einheit und Messung der Stromstärke. Außer den Wärmewirkungen übt erfahrungsgemäß ein elektrischer Strom auch magnetische und chemische Wirkungen aus. Wir gründen auf jede dieser drei Wirkungsarten den Bau eines Meßinstrumentes.

a) Zwischen den Klemmen A und B ist ein dünner Draht, der Hitzdraht, ausgespannt (Abb. 3). In seinem Mittelpunkt greift ein zweiter Draht an, der um eine Rolle R einmal herumgelegt ist und durch eine Feder F gespannt wird. Fließt infolge einer angelegten Spannung Strom durch den Hitzdraht AB, so erwärmt er sich und wird dadurch länger. Sein Mittelpunkt wird dann durch die Kraft der Feder F nach unten gezogen, und die Rolle R dreht sich im Uhrzeigersinn um ihre Achse. Der Betrag der Drehung ist an dem Zeiger zu erkennen und gestattet verschieden starke Ströme durch ihre verschiedene Wärmewirkung zu vergleichen. Das Gerät wird Hitzdrahtinstrument genannt.

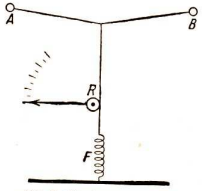


Abb. 3. Hitzdrahtinstrument (schematisch)

1) statós (griech.) = stehend, ruhend
2) isola (ital.) = Insel

b) Wir halten einen gestreckten Draht dicht über eine freischwebende Magnetnadel, ihr parallel. Schicken wir den von einem Akkumulator gelieferten Strom durch den Leiter, so wird der Draht erwärmt und die Nadel abgelenkt; bei einer Batterie von zwei hintereinander geschalteten Akkumulatoren ist die Erwärmung und die Ablenkung größer. Wir können also auch die Ablenkung der Magnetnadel benutzen, um die Stärke des Stromes festzulegen.

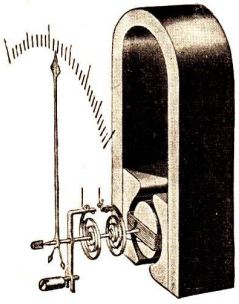


Abb. 4. Drehspulinstrument

Bei den Drehspulinstrumenten nimmt man umgekehrt einen unbeweglichen Magneten und macht den stromführenden Draht beweglich (Abb. 4). Zwischen den Polen eines starken Hufeisenmagneten ist drehbar eine Spule gelagert, die aus vielen Windungen dünnen Drahtes besteht. Sie wird durch zwei Spiralfedern so festgehalten, daß die Ebenen der Windungen parallel zu den Kraftlinien des Magnetfeldes sind. Durch die Federn wird der Strom der Spule zu- bzw. von ihr fortgeleitet. Fließt infolge einer angelegten Spannung Strom durch die Spule, so dreht sie sich. Die Spiralfedern wirken der Drehung entgegen. Ist der Strom stark, so dreht er die Spule gegen die Federkraft weiter, als wenn er schwach ist. Auf der Achse der Spule sitzt ein Zeiger, der auf einer Skala anzeigt, wie weit sich die Spule dreht. Zwischen den Polen des Magneten befindet sich zur Verstärkung des Magnetfeldes ein feststehender Eisenkern.

c) Von den chemischen Wirkungen des elektrischen Stromes ist am bekanntesten die Elektrolyse des angesäuerten Wassers. Wir fangen das sich entwickelnde Wasserstoff-Sauerstoff-Gemisch, Knallgas genannt, in einem mit einer Teilung versehenen Gefäß auf. Oder wir berechnen die zu erwartende Knallgasmenge, indem wir die im Hofmannschen Zersetzungsapparat gemessene Wasserstoffmenge mit $\frac{3}{2}$ multiplizieren, denn es entwickelt sich halb soviel Sauerstoff wie Wasserstoff. So stellen wir fest, daß in gleichen Zeitspannen um so mehr Knallgas entsteht, je mehr Wärme der Strom in derselben Zeit entwickelt und je stärker die magnetische Wirkung des Stromes ist. Die chemischen Wirkungen des Stromes benutzen wir nun zur Festsetzung der Einheit der Stromstärke:

Ein Strom, der aus verdünnter Schwefelsäure in einer Minute 10,44 cm³ Knallgas von 0° C und 760 Torr abscheidet, hat die Stärke 1 Ampere (A).

Eine genauere Messung ist möglich, wenn man die aus einer Metallsalzlösung abgeschiedene Menge Metall wägt; deshalb ist gesetzlich bestimmt:

1 Ampere ist die Stärke eines Stromes, der aus einer Silbernitratlösung in einer Sekunde 1,118 mg Silber ausscheidet.

Wir setzen die Stromstärke proportional der ausgeschiedenen Stoffmenge. Scheidet ein Strom in einer Sekunde 3,354 mg Silber aus, so beträgt seine Stärke also 3 A.

Es mag verwunderlich erscheinen, daß man die Maßeinheit der Stromstärke nicht auf eine ganze Zahl, etwa 1 mg, bezogen hat. Auch die Maßeinheit der Spannung erscheint sehr willkürlich. Man hatte aber ursprünglich für die Messung der Spannung und Stromstärke andere Maßeinheiten festgelegt, auf die dann die später in der Technik eingeführten Einheiten Volt und Ampere zurückgeführt wurden.

Wir können jetzt unser Hitzdraht- und unser Drehspulinstrument nach Ampere eichen, indem wir sie mit einem elektrolytischen Strommesser in ein und denselben Stromkreis schalten. Dabei benützen wir die Erfahrung, daß die Stromstärke an jeder Stelle des Kreises denselben Wert hat, also ein Meßinstrument überall den gleichen Ausschlag zeigt. Wenn wir daran denken, daß durch den Querschnitt einer Rohrleitung je Sekunde an jeder Stelle gleiche Wassermengen fließen, so finden wir in dieser Ähnlichkeit eine Rechtfertigung, auch bei der Elektrizität von einem „Strom" und einer „Stromstärke" zu sprechen. Geeichte Strommesser nennt man Amperemeter. Für sehr schwache Ströme bestimmte, also sehr empfindliche Strommesser heißen Galvanometer.

Ströme gleicher Amperezahl haben also gleiche chemische, magnetische und thermische Wirkungen. Je größer die Amperezahl, um so größer sind diese Wirkungen (vgl. S. 86, 42 und 36).

Zur Übung: 1. Wieviel Gramm Silber werden von einem Strom von 10 A in 1 h ausgeschieden? — 2. Wieviel Gramm Kupfer werden von einem Strom von 5 A in 30 min ausgeschieden, wenn ein Strom von 1 A in 1 s 0,329 mg Kupfer ausscheidet?

§ 2. Elektrischer Widerstand. Ohmsches Gesetz

1. Der elektrische Widerstand. Wir untersuchen nun den Einfluß, den die leitende Verbindung auf den Strom ausübt. Wir schließen ein Amperemeter und einen Draht, der auf einen Schieferblock gewickelt ist (Abb. 5), an die Spannungsquelle an. Durch einen beweglichen Schieber ändern wir die Länge des eingeschalteten Drahtes. Wir finden: Verlängern wir den Draht, so wird der Strom schwächer; verkürzen wir ihn, dann wird er stärker. Es ist so, als ob der Draht dem Fließen des Stromes einen „Widerstand" entgegensetzte.



Abb. 5. Schiebewiderstand

Man bezeichnet leider nicht nur diese besondere Eigenschaft des Drahtes, sondern auch den Draht selbst als elektrischen Widerstand. Wenn man die Größe eines Widerstandes regeln kann, nennt man ihn auch „Rheostat". Das von uns benutzte Gerät heißt Schiebewiderstand oder Schiebe-Rheostat.

Wir ersetzen jetzt den Widerstand durch einen anderen, den wir so abpassen, daß das Amperemeter dieselbe Stromstärke anzeigt. Dann schreiben wir dem zweiten Draht denselben Widerstand wie dem ersten zu. Wir setzen also fest:

Zwei Leiter haben den gleichen Widerstand, wenn man in einem Stromkreis den einen durch den anderen ersetzen kann, ohne daß sich die Stromstärke ändert.

Vermehren wir die Zahl der eingeschalteten Drahtwindungen, bis das Amperemeter bei gleicher angelegter Spannung nur noch die Hälfte der Stromstärke anzeigt, so sagen wir, der Draht habe den doppelten Widerstand. Allgemein definieren wir:

Der Widerstand R eines Leiters ist bei unveränderter Spannung an seinen Enden der Stromstärke I umgekehrt proportional, $R \sim \frac{1}{I}$.

2. Der Widerstand eines Drahtes. Verdoppeln wir die Länge einer in einen Stromkreis eingeschalteten Spule, so zeigt das Amperemeter nur die halbe Stromstärke; dann ist also der Widerstand des Leiters doppelt so groß geworden. Allgemein gilt:

Der Widerstand eines Leiters ist seiner Länge l proportional, $R \sim l$.

Schalten wir zwei gleiche Drahtspulen nicht hintereinander, sondern nebeneinander, so steigt die Stromstärke auf das Doppelte der Stromstärke bei einer Spule. Dasselbe geschieht, wenn wir einen gleichlangen Draht aus demselben Material aber mit doppeltem Querschnitt nehmen. Das ist leicht einzusehen; denn stellen wir uns vor, daß die Spulen zu je einem Draht auseinandergezogen sind, so können wir die beiden Drähte auch als einen Draht von doppeltem Querschnitt auffassen. Es ändert sich an der Leitung nichts, wenn wir die Drähte in ihrer ganzen Ausdehnung zur Berührung bringen. Hiernach sinkt der Widerstand eines Leiters auf die Hälfte, wenn sein Querschnitt (bei gleicher Länge) verdoppelt wird. Allgemein gilt:

Der Widerstand eines Leiters ist seinem Querschnitt q umgekehrt proportional,

$$R \sim \frac{1}{q}.$$

Durch Einschaltung von Drähten gleicher Länge und gleichen Querschnittes, aber verschiedenen Materials (Kupfer, Eisen, Nickel, Manganin[1]) weisen wir nach, daß die Stromstärke in ihnen bei gleicher Spannung verschieden groß ist. Der Widerstand eines Leiters hängt also auch vom Stoff des Leiters ab. Wir messen die Länge eines Drahtes in Metern und seinen Querschnitt in Quadratmillimetern und bezeichnen den Widerstand je 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt als spezifischen Widerstand (ϱ). Nach unseren Versuchen ist der Widerstand R eines Drahtes von der Länge l m und dem Querschnitt q mm²

$$R = \varrho \cdot \frac{l}{q}.$$

1) Legierung aus Kupfer, Mangan und Nickel, deren Widerstand fast unabhängig von der Temperatur ist

3. Abhängigkeit zwischen Spannung und Stromstärke. Wir bilden einen Stromkreis aus einem Akkumulator, einer Drahtspule R und einem Amperemeter A und messen die Stromstärke. Ersetzen wir den Akkumulator durch eine Batterie von zwei oder drei hintereinander geschalteten Akkumulatoren, verdoppeln oder verdreifachen wir also die Spannung U, so verdoppelt oder verdreifacht sich auch bei sonst unverändertem Stromkreis die Stromstärke.

In einem Stromkreise aus metallischen Leitern sind Stromstärke und Spannung proportional: $I \sim U$.

4. Einheit des Widerstandes. Wir müssen nun ein Maß für den Widerstand festlegen. Wir fassen die beiden Tatsachen, daß die Stromstärke der Spannung proportional und dem Widerstande umgekehrt proportional ist, in die eine Gleichung $I \sim \frac{U}{R}$ zusammen oder, wenn k einen Proportionalitätsfaktor bedeutet, $I = k \cdot \frac{U}{R}$. Wir messen I in Ampere und U in Volt; über die Maßeinheit des Widerstandes R können wir noch frei verfügen; wir wählen sie zweckmäßig so, daß in der vorstehenden Gleichung $k = 1$ wird, indem wir festsetzen:

Die Widerstandseinheit besitzt ein Leiter, durch den ein Strom von 1 A fließt, wenn zwischen seinen Enden eine Spannung von 1 V herrscht. Diese Einheit heißt 1 Ohm (Ω).

Dann ist bei der Spannung $U = 1\,\mathrm{V}$ und dem Widerstande $R = 1\,\Omega$ die Stromstärke $I = 1$ A, so daß tatsächlich $k = 1$ wird. Genaue Messungen ergaben:

Die Widerstandseinheit 1 Ohm (Ω) besitzt ein Quecksilberfaden von 106,3 cm Länge und 1 mm² Querschnitt bei 0° C.

Drähte und andere Körper von 1 mm² Querschnitt und 1 m Länge haben bei 18° C den Widerstand:

Silber	0,016 Ω	Eisen	0,098 Ω	Kohle (Bogenlampe)	40···100 Ω
Kupfer	0,017 Ω	Manganin....	0,43 Ω	Verdünnte Schwefelsäure	
Aluminium...	0,027 Ω	Quecksilber..	0,96 Ω	(für Akkumulatoren)	50000 Ω

5. Das Ohmsche Gesetz für einen Leiterkreis. Nach der Festsetzung der Widerstandseinheit können wir nun das Gesetz des elektrischen Stromes, das die drei Größen Spannung, Stromstärke und Widerstand verbindet, in folgender Form schreiben:

$$\textbf{Ohmsches Gesetz: } I = \frac{U}{R}$$

Die Stromstärke in einem Stromkreis ist gleich der Spannung dividiert durch den Widerstand.

Hierbei ist zu beachten, daß der Widerstand des Leiters noch von der Temperatur abhängt. In dieser einfachen Form des Ohmschen Gesetzes kann man schon eine Rechtfertigung der Festsetzung von S. 6 sehen, daß die Spannung der Zahl der hintereinander geschalteten Elemente proportional sein soll.

6. Das Ohmsche Gesetz für Leiterstücke. An eine Spannungsquelle von $U = 220\,\mathrm{V}$ seien die drei Widerstände $R_1 = 200\,\Omega$, $R_2 = 350\,\Omega$, $R_3 = 400\,\Omega$ hintereinander angeschlossen (Abb. 6). In der Leitung befinde sich ein Amperemeter mit dem Widerstand $R_4 = 50\,\Omega$. Der Strommesser zeigt $I = 0{,}22$ A. Daraus ergibt sich der Gesamtwiderstand $R_0 = \frac{220\,\mathrm{V}}{0{,}22\,\mathrm{A}} = 1000\,\Omega$. Der Gesamtwiderstand R_0 ist also gleich der Summe der hintereinander geschalteten Widerstände. Allgemein und mathematisch ausgedrückt gilt: $R_0 = \sum_n R_n$.

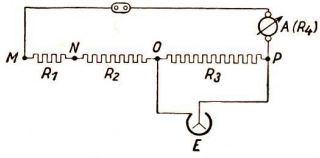


Abb. 6. Ohmsches Gesetz für Leiterstücke

Legen wir ein empfindliches Elektrometer E nacheinander an die Punkte M und N, N und O, O und P und an die Klemmen des Amperemeters, so zeigt es in jedem Falle eine bestimmte Spannung an, und zwar verhalten sich diese Spannungen $U_1 = 44\,\mathrm{V}$, $U_2 = 77\,\mathrm{V}$, $U_3 = 88\,\mathrm{V}$ und $U_4 = 11\,\mathrm{V}$ wie $4 : 7 : 8 : 1$. Dieses Verhältnis ist gleich dem Verhältnis der vier Widerstände $200\,\Omega : 350\,\Omega : 400\,\Omega : 50\,\Omega$. Also ergibt sich:

Die Spannung zwischen zwei Punkten eines unverzweigten Leiters ist dem Widerstand zwischen diesen Punkten proportional.

Da die Stromstärke in der ganzen Leitung dieselbe ist, unabhängig von der Lage des Strommessers (in unserem Beispiel ist $I = 0{,}22$ A), so folgt:

Das Ohmsche Gesetz gilt auch für jedes Leiterstück, nicht nur für den ganzen Stromkreis.

7. Die Gesetze der Stromverzweigung. Verzweigt sich ein stromdurchflossener Leiter im Punkt A, und laufen die Leiterzweige, die die Widerstände R_1 und R_2 haben mögen, in B wieder zusammen, so fließt ein Teil des Stromes durch den einen und der übrige durch den anderen Zweig (Abb. 7). Die Zweigwiderstände sind „parallel" geschaltet. Messen wir die Stromstärken I im unverzweigten Leiter, I_1 im ersten und I_2 im zweiten Leiterzweig, so finden wir durch wiederholte Versuche mit verschiedenen Werten für R_1, R_2 und für die Spannung U die folgenden Gesetze:

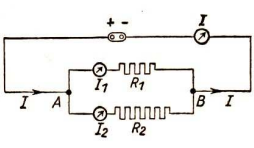


Abb. 7. Stromverzweigung

a) Bei einer Stromverzweigung ist die Summe der Stromstärken in den Zweigen gleich der Stromstärke in der Zu- und Ableitung.

$$I = I_1 + I_2,$$

allgemein gilt bei einer beliebigen Zahl von Zweigen

$$I = \sum_n I_n.$$

b) Bei einer Stromverzweigung verhalten sich die Stromstärken in den Zweigen umgekehrt wie die Widerstände:

$$I_1 : I_2 = R_2 : R_1 .$$

Diese Beziehungen heißen die Stromverzweigungsgesetze von Kirchhoff. Das erste Gesetz ist nichts anderes als die Bedingung für eine stationäre Strömung: In A und B muß genau soviel Elektrizität ab- wie zufließen. Das zweite Gesetz ergibt sich aus dem Ohmschen Gesetz $U = I \cdot R$. Zwischen den Enden der beiden Leiterzweige besteht nämlich dieselbe Spannung U, also ist $I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_2 = U$ (allgemein $I_n \cdot R_n = U$) oder $I_1 : I_2 = R_2 : R_1$. Man kann sich die Zweigleitungen durch eine Leitung ersetzt denken, deren Widerstand so groß ist, daß durch sie bei gleicher Spannung U dieselbe Gesamtstromstärke I fließt. Der Widerstand R_0 dieser Leitung heißt Ersatzwiderstand. Es gilt dann $I = \frac{U}{R_0}$ neben $I_1 = \frac{U}{R_1}$ und $I_2 = \frac{U}{R_2}$, und aus dem ersten Kirchhoffschen Gesetz folgt $\frac{U}{R_0} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$,

$$\frac{1}{R_0} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2},$$

allgemein: $\frac{1}{R_0} = \sum_n \frac{1}{R_n}$.

Der Kehrwert des Ersatzwiderstandes einer Stromverzweigung ist gleich der Summe der Kehrwerte der Zweigwiderstände.

8. Voltmeter. Wir können auf Grund des Ohmschen Gesetzes mit jedem Amperemeter Spannungen messen, wenn wir den Widerstand des Instrumentes kennen. Beträgt dieser Widerstand 50 Ω, so fließt ein Strom von 0,04 A, wenn man das Instrument unmittelbar mit den Polen eines Akkumulators von 2 V Spannung verbindet. Der Zeiger zeigt auf eine bestimmte Marke der Skala. Würde man nur eine Spannung von 1 V benutzen, so würde der Zeiger bei 0,02 A stehen. Bei 5 V Spannung würde er bei 0,1 A stehen. Man kann also mit dem Instrument nicht nur ablesen, wieviel Strom fließt, sondern auch feststellen, wie hoch die Spannung an den Polen der Stromquelle ist. Spielt z. B. der Zeiger auf 0,05 A ein, so kann man an Hand derselben Skala berechnen, daß die Spannung 2,5 V herrscht. Schreibt man das Rechenergebnis, also den Voltbetrag, gleich auf die Skala, so hat man ein „Voltmeter". Man kann also ein Amperemeter außer nach Ampere auch nach Volt eichen und es dann als Spannungsmesser, als Voltmesser, benutzen. Ein Voltmeter muß mit seinen beiden Zuleitungen an die Stellen des Stromkreises angelegt

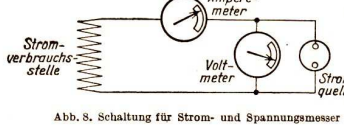


Abb. 8. Schaltung für Strom- und Spannungsmesser

werden, zwischen denen es die Spannung messen soll. Es bildet also einen sog. Nebenschluß zu dem Hauptstromkreis. Das Amperemeter dagegen muß unmittelbar in den Hauptstromkreis geschaltet werden, wenn es die gesamte Stromstärke messen soll. Damit das Voltmeter nur wenig Strom verbraucht und die Spannung, die es messen soll, nur wenig beeinflußt, wird es mit hohem Widerstand gebaut, und zwar muß sein Widerstand sehr viel größer sein (etwa 100 mal) als der an der Stromverbrauchsstelle. Ein Amperemeter dagegen soll dem Strom nur einen geringen Widerstand entgegensetzen; dieser muß daher sehr viel kleiner sein als der des Stromverbrauchers. Abb. 8 gibt ein Schema für die Schaltung von Strom- und Spannungsmessern.

9. Erweiterung des Meßbereiches eines Strommessers. Einen Strommesser, der nur für geringe Stromstärken gebaut ist, kann man zur Messung stärkerer Ströme herrichten, wenn man parallel zu den Klemmen des Instrumentes (Abb. 9) einen Widerstand R_2 schaltet, der geringer ist als der Widerstand R_1 des Meßwerkes. Ist z. B. $R_2 = \frac{1}{9} R_1$ und fließt durch R_1 der Strom I_1, so ist nach den Kirchhoffschen Gesetzen $I_2 = 9 \cdot I_1$, und der Strom in der unverzweigten Leitung hat die Stärke $I = I_1 + I_2 = 10\, I_1$. Der Meßbereich des Instrumentes ist also verzehnfacht. Entsprechendes gilt, wenn man einen Nebenwiderstand $R_2 = \frac{1}{99} R_1$ verwendet. Dann ist $I = 100\, I_1$. Einen derartig abgeglichenen Nebenwiderstand bezeichnet man auch als „Shunt".

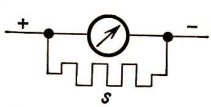


Abb. 9. Amperemeter mit Shunt S

Zur Übung: 1. Welche Längen haben Drähte von 1 mm² Querschnitt aus Silber, Kupfer, Aluminium, Eisen, die gerade 1 Ω Widerstand besitzen? — 2. Wie groß ist der elektrische Widerstand einer Kupferleitung von 3 mm² Querschnitt und 200 m Länge? — 3. Wie groß ist der elektrische Widerstand einer Leitung von 10 km Länge, die aus Aluminiumdraht von 12 mm² Querschnitt besteht? — 4. Welchen Querschnitt muß eine 1 km lange Leitung aus Aluminiumdraht haben, die einen Widerstand von 3 Ω haben soll? Wie groß ist das Gewicht der Leitung? — 5. Wie verteilt sich die Spannung von 110 V in einem Stromkreis, in dem die Widerstände 15, 25, 10 Ω hintereinander geschaltet sind? — 6. Welche Ströme fließen durch eine Stromverzweigung, deren Widerstände sich wie 3:5 verhalten, wenn der Gesamtstrom $I = 2$ A ist? — 7. Eine Stromverzweigung besteht aus den Widerständen 15,3 und 22,5 Ω. Wie stark sind die Ströme, die durch die Zweige fließen, wenn der Gesamtstrom 1 A beträgt? — 8. Welcher Strom fließt durch ein Voltmeter, das 75 V anzeigt, und einen inneren Widerstand von 20 000 Ω besitzt?

II. Das elektromagnetische Feld

A. Das unveränderliche elektrische Feld

§ 3. Die Formen des elektrischen Feldes

1. Das elektrische Feld. In den Raum zwischen zwei isolierten Metallplatten A und B, die mit den Polen einer Influenzmaschine oder einer anderen Quelle hoher Spannung leitend verbunden sind, stellen wir eine kleine, auf einer Nadelspitze leicht drehbare Papierfahne (Abb. 10). Wenn wir die Influenzmaschine in Betrieb setzen oder die Spannungsquelle einschalten, zeigt die Fahne senkrecht von einer Platte zur anderen. Sie wird aus jeder anderen Stellung in diese gedreht. Wir können diese Richtwirkung wieder aufheben, indem wir die Verbindungen zur Spannungsquelle unterbrechen und die beiden Platten kurzzeitig durch einen Draht verbinden. Die Fahne bleibt jetzt in jeder beliebigen Richtung stehen, in die wir sie drehen. Stellen wir bei Wiederholung des Versuches die Papierfahne an anderen Stellen zwischen den Platten auf, so ist auch dort diese Richtwirkung wahrnehmbar. — Bringen wir viele Papierfahnen gleichzeitig in den Raum, so nehmen wir wahr, daß sie zunächst kreuz und quer durcheinander zeigen (Abb. 11), aber beim Anlegen der Spannung derart geordnet werden, daß man sich Linien denken kann, längs deren sich die Fähnchen ausrichten. In unserem Falle sind diese Linien Geraden, die auf beiden Platten senkrecht stehen (Abb. 12). Wir schließen aus den Versuchen:

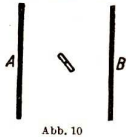
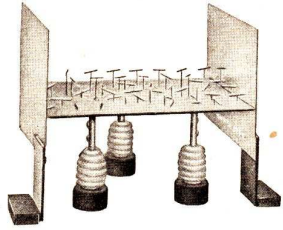


Abb. 10
Papierfahne zwischen Metallplatten

a) In dem Augenblick, in dem die Platten mit einer Spannungsquelle verbunden werden, geht eine Veränderung in bestimmten Teilen des Raumes vor sich. Längliche, dorthin gebrachte Körper stellen sich in bestimmter Richtung ein und weisen dadurch auf die Veränderung hin.

Diesen in der Richtwirkung, also durch Kräfte sich äußernden Zustand des Raumes nennen wir „elektrisch".


Abb. 11. Versuchsanordnung mit Papierfahnen (ohne Feld, ungeordnet)

b) Die im Raum vorhandene Luft hat keinen wesentlichen Einfluß auf diesen Zustand, die Versuche würden im luftleeren Raum ebenso verlaufen.
Auch ein nicht mit Stoff erfüllter Raum kann mithin elektrische Eigenschaften besitzen. Es können in ihm Kräfte auftreten, die auf Probekörperchen, wie etwa die Fähnchen, wirken.

c) Von Gebieten, in denen solche Kräfte auftreten, sagen wir, in diesem Raum bestehe ein „elektrisches Feld". Die Linien, längs deren sich die beweglichen, länglichen Körper einstellen, bezeichnen wir als „elektrische Feldlinien". Die Form des elektrischen Feldes ist durch den Verlauf seiner Feldlinien gegeben. Die Richtung eines Papierfähnchens nennt man die „Feldrichtung" in diesem Punkt. Man findet sie aus der Feldlinie, indem man in diesem Punkt die Tangente an die Feldlinie zeichnet.

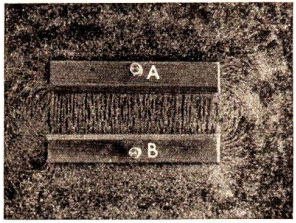


Abb. 12

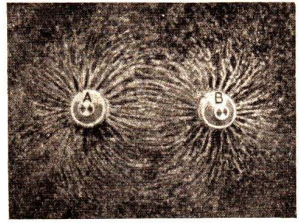


Abb. 13

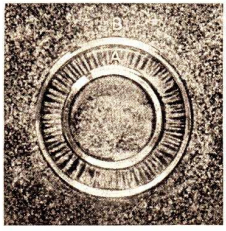


Abb. 14

Abb. 12 bis 15
Elektrische
Feldlinienbilder

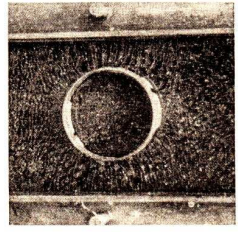


Abb. 15

2. Feldlinienbilder. Besser als Papierfahnen lassen auf Glas gestreute pulverisierte Gipskristalle oder kleine in Öl aufgeschwemmte längliche Körperchen (Suppengrieß in Rizinusöl) die Form eines elektrischen Feldes erkennen. Abb. 12 bis 14 zeigen Formen elektrischer Felder zwischen zwei parallelen Metallstreifen, zwischen zwei kleinen Metallzylindern und zwischen zwei Ringen (jeweils mit *A* und *B* bezeichnet). Wenn auch die großen Grießkörner nicht überall die Form des Feldes einwandfrei deutlich machen, so geht doch aus Bildern dieser Art und anderen Erfahrungen hervor:

Die elektrischen Feldlinien verlaufen von dem einen Metallstreifen zum anderen; sie stehen senkrecht auf den Metallflächen; sie durchkreuzen einander nirgends.

Kreuzten sich die Feldlinien, so würden ja in dem Kreuzungspunkt für die Einstellung länglicher Körper (Fähnchen, Grießkörner) zwei Richtungen möglich sein; das ist aber nie beobachtet.

Es ist auf diese Weise nicht genau festzustellen, wie weit sich das elektrische Feld erstreckt, weil die Stärke der Richtwirkung in einiger Entfernung von den Metallflächen rasch abnimmt. Man kann sich aber auch dort die Feldlinien fortgesetzt denken. Felder, deren Feldlinien parallel zueinander verlaufen, nennen wir „homogen“[1]) (Abb. 12). Nicht homogene Felder nennen

1) homogenés (griech.) = gleicher Art

wir auch „inhomogen" (Abb. 13 und 14). Solche Felder, deren Feldlinien wie die Radien einer Kugel auseinandergehen, heißen „radial" (Abb. 14). Radiale Felder sind inhomogen.

Da durch jeden Punkt des Feldes eine Feldlinie geht, müßte man eigentlich in einer Abbildung unendlich viele Feldlinien zeichnen, denn zwischen zwei Feldlinien lassen sich immer noch weitere einfügen. Man kann aber natürlich nur endlich viele zeichnen. Das genügt aber auch, um den allgemeinen Richtungsverlauf kenntlich zu machen. Auch beim experimentellen Sichtbarmachen hängt die Zahl der angedeuteten Feldlinien von der oft zufälligen Zahl der Probekörper an jeder Stelle ab. Man erfährt daher aus Feldlinienbildern nie etwas über die „wirkliche Zahl", sondern zunächst nur über die Richtungen von Feldlinien. (Über weitere Folgerungen vgl. § 9!)

3. Das Metall als Schirm gegen das elektrische Feld. Legen wir einen Metallring zwischen die Metallstreifen eines homogenen Feldes, so nehmen wir wahr, daß im Raum innerhalb des Ringes keine Richtwirkungen, also keine elektrischen Feldlinien auftreten (Abb. 15). Dieser Versuch zeigt uns:

Elektrische Felder werden „abgeschirmt" durch metallische Körper. Im Innern eines solchen Körpers setzt sich das außerhalb erzeugte elektrische Feld nicht fort.

§ 4. Elektrische Spannung und Feldstärke

1. Elektrische Spannung und selbständiges elektrisches Feld. Verbinden wir zwei isolierte Metallplatten, zwischen denen ein elektrisches Feld herrscht, mit einem elektrostatischen Spannungsmesser, einem Elektroskop, so zeigt dies einen Ausschlag. Wir sehen, daß zwischen solchen Körpern eine elektrische Spannung besteht. Der Ausschlag geht auf Null zurück, wenn das elektrische Feld verschwindet, und kehrt wieder, wenn das Feld wieder hergestellt wird. Elektrische Spannung und elektrisches Feld sind also zwei zusammengehörige Erscheinungen.

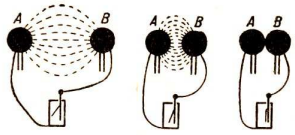


Abb. 16. Spannung und Feldlinienlänge

Wir stellen weitere Versuche an, die diesen Zusammenhang aufklären. Wir verbinden zwei durch Luft getrennte, isolierte Metallkugeln A und B (Abb. 16) mit den Polen einer Gleichstromsteckdose oder einer Anodenbatterie. Ein Elektroskop, das mit A und B leitend verbunden ist, zeigt dann eine elektrische Spannung an. Wir wissen, daß zwischen A und B ein elektrisches Feld herrscht, dessen Feldlinien zwischen A und B verlaufen. Unterbrechen wir die Verbindung zur Steckdose, ohne die Drähte leitend zu berühren, so bleiben die Spannung und das elektrische Feld zwischen A und B erhalten.

Zwischen zwei isolierten Leitern kann also ein elektrisches Feld erzeugt werden, das bestehen bleibt, wenn die leitende Verbindung zur Steckdose unterbrochen ist. Ein derartiges Feld nennen wir ein **selbständiges elektrisches Feld.**

Solange die Kugeln A und B dabei ihre gegenseitige Lage nicht ändern, zeigt das Elektroskop eine unveränderte Spannung. Nähern wir die Kugeln einander, so sinkt die Spannung. Entfernen wir sie voneinander, so steigt die Spannung. Anscheinend hängt die Erhöhung der Spannung mit der Verlängerung der Feldlinien zusammen. Berühren sich die Kugeln, so werden die Spannung und das Feld vernichtet (Abb. 16).

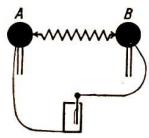


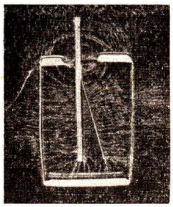
Abb. 17
Zerstören eines Feldes

Man kann den Zerfall des elektrischen Feldes auch dadurch herbeiführen, daß man die beiden feldbegrenzenden Metallkugeln miteinander verbindet (Abb. 17). Stoffe, bei denen dann das elektrische Feld in sehr kurzer Zeit verschwindet, nennen wir Leiter (z. B. Metalle), die anderen Nichtleiter oder Isolatoren (z. B. Glas, Hartgummi usw.) (vgl. § 1, 3).

Es ergibt sich daraus:

Ein selbständiges elektrisches Feld kann nur zwischen zwei gegeneinander isolierten Körpern bestehen.

Zwischen den Teilen ein und desselben Leiters kann kein selbständiges Feld bestehen (das nicht sofort verschwände). Zwischen ihnen kann daher auch keine elektrische Spannung herrschen (die nicht sofort zurückginge).


Abb. 18
Feldlinienbild des Elektroskops

Machen wir eine der leitenden Grenzflächen des elektrischen Feldes beweglich, wie z. B. bei einem Elektroskop (Abb. 18), so nehmen wir wahr, daß der bewegliche Teil (hier das Blättchen des Elektroskops) und die feste Grenzfläche (hier das Gehäuse) sich anziehen. Allgemein gilt:

Körper, zwischen denen eine elektrische Spannung besteht, ziehen sich an.

Bringen wir an zwei beliebige Punkte eines elektrischen Feldes zwei kleine metallische Körper (Sonden) und verbinden wir sie mit einem Elektrometer, so zeigt dies im allgemeinen durch seinen Ausschlag eine Spannung an. Berühren wir die Grenzflächen mit den beiden Körpern, so erhalten wir die Gesamtspannung des Feldes. Zwischen zwei beliebigen Punkten innerhalb des Feldes ist die mit den Sonden gemessene Spannung kleiner. Diese Teilspannung nennen wir die Spannung zwischen diesen beiden Punkten. Sie kann für bestimmte Punkte auch Null sein.

Im elektrischen Feld herrscht i. a. zwischen zwei Punkten eine elektrische Spannung.

Ein einfacher Versuch mit dem Elektroskop zeigt uns:

Zwischen zwei Leitern herrscht dieselbe Spannung, gleichgültig welche ihrer Punkte wir mit dem Elektroskop verbinden. Die Spannung eines selbständigen elektrischen Feldes zwischen den Leitern wird größer, wenn sie voneinander entfernt, und kleiner, wenn sie einander genähert werden. Sie ist aber jedesmal zwischen verschiedenen Punkten der Leiter dieselbe. Auch zwischen Gehäuse und Blättchen eines Elektroskops herrscht also dieselbe Spannung wie zwischen den Punkten des Feldes, mit denen sie leitend verbunden sind.

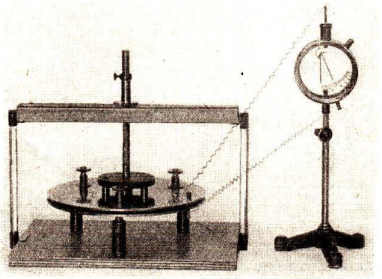


Abb. 19. Spannung und Feldlinienlänge im homogenen Feld

2. Elektrische Spannung im homogenen Feld. In welcher Weise sich die Spannung mit der Verlängerung oder Verkürzung der Feldlinien ändert, sei am homogenen Feld erläutert. Wir erzeugen zwischen zwei ebenen Platten ein selbständiges elektrisches Feld von 110 V (Abb. 19). Wenn wir den Abstand d der Platten 1 mm groß wählen, herrscht zwischen den Platten ein starkes und außerhalb dieses Raumes nur ein kaum merkbares Feld. Vergrößern wir den Abstand der Platten auf 2 mm, so steigt die Spannung auf 220 V.

Aus weiteren Versuchen (vgl. Tab.) ergibt sich (wenigstens annähernd):

Die Spannung U eines selbständigen homogenen Feldes wächst proportional dem Abstand seiner Grenzflächen

$$U \sim d.$$

d mm	U Volt	$\frac{U}{d}$
1	110	110
2	220	110
3	320	107
4	420	105
5	510	102

Dieses Gesetz gilt nur für homogene Felder. Homogen ist das Feld aber nur, wenn die Platten einen Abstand haben, der viel kleiner ist als ihr Durchmesser. Daher kommt es auch, daß die Zahlen der Tabelle für wachsende Abstände bereits kleine Abweichungen vom Gesetz für homogene Felder zeigen. Diese Abweichungen werden aber um so kleiner, je größer der Durchmesser der Platten im Verhältnis zu ihrem Abstand ist. Daraus schließt man, daß im (nie ganz zu verwirklichenden) Idealfall „unendlich" großer Platten, also in einem völlig homogenen Felde $U \sim d$ gilt.

3. Die elektrische Feldstärke. Wir haben gesehen, daß im Feld zwischen zwei Punkten eine Spannung herrscht. – Wir messen nun mit dem Elektrometer die Spannungen zwischen den Punkten A und B, dann zwischen B und C und schließlich zwischen A und C und stellen fest: Die Spannung zwischen

den Punkten A und C ist gleich der Summe der Spannungen zwischen den Punkten A und B und B und C. Man kann beliebig viele Zwischenpunkte auf einer beliebigen Linie zwischen A und C annehmen, immer ist die Spannung zwischen A und C gleich der Summe aller Teilspannungen zwischen den Zwischenpunkten.

Da zwischen den Begrenzungen des Feldes stets dieselbe Spannung besteht, ist die Summe aller Teilspannungen auf einer beliebigen Linie zwischen den Begrenzungen immer dieselbe. Das gilt also auch, wenn unsere Linie eine Feldlinie ist. Die Feldlinien sind aber dadurch vor jeder anderen Linie ausgezeichnet, daß sich die Spannung beim Fortschreiten auf ihnen je Längeneinheit am stärksten ändert, wie uns ein Versuch mit dem Elektrometer lehrt.

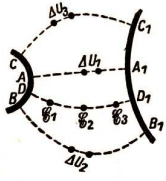


Abb. 20
Elektrische Feldstärke längs verschiedener Feldlinien

Betrachten wir die Spannungsstufen zwischen zwei um 1 cm voneinander entfernten Punkten bei verschiedenen Feldlinien (Abb. 20), so können wir feststellen: Die durchschnittliche Spannungsstufe ΔU_1 längs der Feldlinie $A A_1$ ist größer als ΔU_2 auf $B B_1$ und größer als ΔU_3 auf $C C_1$, denn von diesen Feldlinien, zwischen deren Enden dieselbe Spannung herrscht, ist $A A_1$ die kürzeste. Bisher konnten wir mit Hilfe des Feldlinienbildes nur die Form des elektrischen Feldes beschreiben; diese Form blieb ungeändert, auch wenn die Gesamtspannung zwischen den Grenzflächen des Feldes geändert wurde. Mit Hilfe der „Spannung je cm Feldlinie" können wir nun verschieden starke Felder gleicher Form voneinander unterscheiden, denn mit der Gesamtspannung müssen sich ja auch die Werte der Spannungsstufen ändern, aus denen sie sich zusammensetzt. Wir definieren die elektrische Feldstärke folgendermaßen:

Unter der elektrischen Feldstärke $\mathfrak{E}$, die an einer Stelle des elektrischen Feldes herrscht, verstehen wir die an dieser Stelle festgestellte „Spannung je cm Feldlinie".

Spannung und Feldstärke sind also verschiedene Begriffe. Sie unterscheiden sich ähnlich wie die Arbeit A von der Kraft P. Wollen wir aus der Arbeit A und dem Weg s die Kraft P bestimmen, so bilden wir den Quotienten $\frac{\Delta A}{\Delta s}$, weil $\Delta A = P \cdot \Delta s$. Wollen wir die elektrische Feldstärke messen, so dividieren wir die Spannungsstufe ΔU durch den Abstand Δs der Punkte der Feldlinie, zwischen denen sie besteht. Es ist also die

$$\textbf{Feldstärke } \mathfrak{E} = \frac{\Delta U}{\Delta s} \text{ (längs einer Feldlinie).}$$

Die Spannung U wird in Volt, die Feldstärke $\mathfrak{E}$ in $\frac{\text{Volt}}{\text{cm}}$ gemessen. Im homogenen Feld, in dem alle Feldlinien parallel zueinander verlaufen und dieselbe Länge besitzen, weist die Proportionalität der Spannung mit dem Abstand d

der Platten darauf hin, daß auch die Feldstärke längs ein und derselben Feldlinie überall dieselbe ist. Für das homogene Feld gilt $\Delta U \sim \Delta s$ oder $\frac{\Delta U}{\Delta s} = \text{const}$. Nach der Definition ist $\frac{\Delta U}{\Delta s} = \mathfrak{E}$, also in unserem Falle $\mathfrak{E} = \text{const}$. Diese Aussage steht im Einklang mit allen Messungen und Folgerungen, die daraus gezogen werden. Es ergibt sich daher:

Im homogenen Feld ist die elektrische Feldstärke überall dieselbe. Sie beträgt

$$\mathfrak{E} = \frac{U}{d}.$$

§ 5. Elektrische Feldstärke und Ladung

1. Der Aufbau des elektrischen Feldes. Soll zwischen zwei voneinander isolierten Metallplatten ein selbständiges elektrisches Feld erzeugt oder „aufgebaut" werden, so bedarf man einer „Spannungsquelle", wie sie uns in einem Element, einem Akkumulator, einer Anodenbatterie, einem Anschluß an ein elektrisches Gleichstromnetz oder an eine Influenzmaschine zur Verfügung steht. Man kann dabei in folgender Weise verfahren:

a) Unmittelbarer Aufbau. Man verbindet die Pole der Spannungsquelle leitend mit den beiden Platten A und B und hebt dann die Verbindung wieder auf, ohne die Drähte oder Platten leitend zu berühren (Abb. 21). Das zwischen den Polen der Spannungsquelle bestehende Feld dehnt sich zunächst auf den Raum zwischen den beiden Platten aus, die mit ihnen leitend verbunden sind. Es bleibt dann dort bestehen, wenn die leitende Verbindung unterbrochen wird.

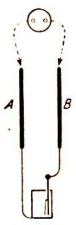


Abb. 21
Unmittelbarer Aufbau eines Feldes

b) Stufenweiser Aufbau. Man kann das Feld auch stufenweise aufbauen. Berührt man mit je einer kleinen isolierten Metallkugel K_1 und K_2 (elektrischen Löffeln) die Enden S_1 und S_2 der Drähte, die mit den Polen der Spannungsquelle verbunden sind, so entsteht zwischen K_1 und K_2 ein elektrisches Feld. Dieses Feld kann man (Abb. 22) auf den Raum zwischen A und B übertragen. Führt man die Kugeln wiederholt von S_1 und S_2 zu A und B über, so kann man mit dem Elektrometer nachweisen, daß die Spannung zwischen A und B stufenweise auf die Spannung der Spannungsquelle wächst.

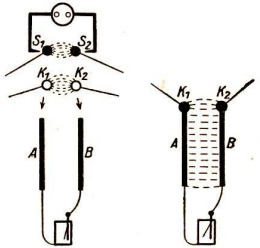


Abb. 22
Stufenweiser Aufbau eines Feldes

2. Der Zerfall des Feldes. Soll ein elektrisches Feld zerstört werden, so kann man in folgender Weise verfahren:

a) Stufenweiser Zerfall. Man berührt mit einer isolierten Kugel K die leitende Fläche A und führt dann die Kugel nach der anderen Grenzfläche B, bis sie diese berührt (Abb. 23), oder

man läßt eine an einem Seidenfaden hängende Kugel zwischen A und B hin und her schwingen. Berührt die Kugel K die Grenzfläche A, so wird sie zu einem Teil dieser Grenzfläche. Es gehen dann von ihr Feldlinien aus, die nach B hinlaufen (Abb. 24). Wird die Kugel von A getrennt und nach B geführt, so zerfällt das Feld zwischen K und B, und es bildet sich ein neues zwischen K und A usw. bis zum vollständigen Verschwinden des Gesamtfeldes.

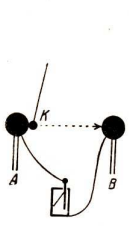


Abb. 23

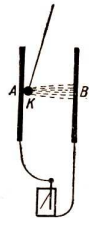


Abb. 24

Stufenweiser Zerfall eines Feldes

b) Unmittelbarer Zerfall. Das elektrische Feld zwischen A und B zerfällt sofort und vollständig, wenn man die Grenzflächen leitend durch L verbindet (Abb. 25). Wir wissen aus Erfahrung, daß dann in dem Leiter ein elektrischer Strom fließt (er ist z. B. am Aufblitzen eines Glühlämpchens erkennbar). Solange noch ein Feld vorhanden ist, das zerfallen kann, fließt ein Strom.

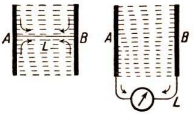


Abb. 25. Unmittelbarer Zerfall eines Feldes

Der elektrische Strom, der in einem Leiter fließt, und der Feldzerfall, der sich durch den Leiter vollzieht, sind miteinander verknüpft.

Auch beim unmittelbaren Aufbau eines Feldes durch Anschluß an eine geeignete Gleichstromquelle, können wir durch ein Strommeßinstrument einen elektrischen Strom nachweisen. Ein Strom fließt solange, bis das Feld seinen Endzustand, nämlich die Spannung der Quelle erreicht hat.

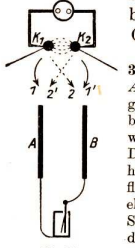


Abb. 26
Stufenweiser Aufbau und Abbau eines Feldes

3. Der Richtungssinn der Feldlinien. Wir bauen ein Feld zwischen A und B (Abb. 26) stufenweise auf. Führen wir, nachdem ein Feld aufgebaut ist, bei der weiteren Übertragung K_1 nicht mehr nach A, wie bisher, sondern nach B und K_2 nach A, so wird das Feld abgebaut. Es wird nach und nach vollständig abgebaut und dann wieder aufgebaut. Diese Befunde lassen sich auf folgende Weise erklären: Elektrische Felder haben ihren Ursprung in elektrischen Ladungen. Der Zu- oder Abfluß solcher Ladungen beim unmittelbaren Aufbau oder Abbau eines elektrischen Feldes zwischen Grenzflächen macht sich als elektrischer Strom bemerkbar. Man kann aber auch die Ladungen nach und nach mit dem elektrischen Löffel auf die Grenzflächen bringen. Es gibt zwei verschiedene Sorten von Ladungen, die wir mit den Namen „positive" und „negative" Ladung oder auch kurz mit den Zeichen + (plus) und — (minus) unterscheiden. Der Aufbau des elektrischen Feldes besteht in der Trennung der beiden Ladungssorten, der Abbau in ihrer Vereinigung. Aus dem schnellen Abbau eines elektrischen Feldes zwischen zwei leitend verbundenen Grenzflächen, der ohne zusätzliche Kraftquelle von selbst vor sich geht, schließen wir:

1. Positive und negative Ladungen vereinigen sich, wenn ihnen die Möglichkeit dazu gegeben wird; sie ziehen sich also an.

2. Durch einen Leiter können sich elektrische Ladungen schnell ausgleichen, er hat einen kleinen Widerstand.

3. Durch einen Isolator können sich die Ladungen nur langsam oder gar nicht ausgleichen, er hat einen großen Widerstand.

Positiv nennt man nun denjenigen Ladungszustand, der z. B. auf einem Glasstab durch Reiben mit einem Lappen entsteht; negativ elektrisch ist ein geladener Körper, der von einem solchen Glasstab angezogen wird. Ein geriebener Hartgummistab ist z. B. negativ geladen. Von dem positiven Pol einer Spannungsquelle (S. 6) erhält man positive, von dem negativen Pol negative Ladungen.

Weiter können wir feststellen: Geladene Körper, z. B. isoliert aufgehängte Probekügelchen, die von ein und demselben geladenen Körper angezogen werden, stoßen sich gegenseitig ab. Also:

Zwischen gleichnamigen Ladungen wirken abstoßende Kräfte, zwischen ungleichnamigen Ladungen wirken anziehende Kräfte.

Das elektrische Feld entsteht durch Überlagerung der Kräfte der an seinem Aufbau beteiligten Ladungen. Um bei der Beschreibung eines Feldes zwischen zwei Grenzflächen A und B durch Feldlinien die beiden Möglichkeiten zu unterscheiden, daß

1. A positiv geladen und B negativ geladen,
2. A negativ geladen und B positiv geladen ist,

geben wir den Feldlinien einen Richtungssinn, indem wir festsetzen, daß sie von der positiv zur negativ geladenen Grenzfläche verlaufen, und deuten gelegentlich in Zeichnungen diesen Richtungssinn durch einen Pfeil an. In Richtung des Pfeils gelangen wir also zur negativ geladenen Grenzfläche. Bei Feldlinien, die aus der Ebene der Zeichnung senkrecht heraustreten, kennzeichnet man die Richtung nach vorn durch ⊙, die entgegengesetzte durch ⊗. Das Vorhandensein elektrischer Ladungen, ihre Eigenschaften und ihr Zusammenhang mit dem elektrischen Strom wurde hier aus wenigen Versuchsanordnungen gefolgert. In Wahrheit wurden diese Begriffe sehr mühevoll aus sehr verschiedenartigen Versuchen und Erfahrungen gewonnen. Dazu gehören auch die Erkenntnisse der Atomphysik. Diese Erscheinungen lassen sich besser verstehen, wenn wir vorwegnehmen (s. Bd. II B, Abschn. E), daß die Metalle, wie alle Stoffe, aus Atomen aufgebaut sind. Die Atome enthalten ihrerseits die sog. **Elektronen,** das sind negativ geladene Teile. **Ihre Masse ist $9{,}1 \cdot 10^{-28}$ g, also etwa $\frac{1}{2000}$ der Masse des Wasserstoffatoms.** Löst sich ein Elektron von einem Metallatom ab, so wird das Atom zu einem positiv geladenen Ion, da es vorher zusammen mit dem Elektron elektrisch neutral war. Zwischen dem Ion und dem abgelösten Elektron besteht ein elektrisches Feld. (Weiteres über Elektronen und Ionen in § 26.)

Wir beschränken uns weiterhin auf die Betrachtung derjenigen elektrischen Felder, die durch Metalle begrenzt sind.

4. Die Ladung der Grenzflächen des elektrischen Feldes. In den Metallen sind nur die (negativ geladenen) Elektronen frei beweglich. Wir stellen uns die

Zustände in den Metallen, zwischen denen ein elektrisches Feld besteht, in folgender Weise vor:

Wird ein elektrisches Feld zwischen A und B erzeugt, so werden der Platte A Elektronen aus dem negativen Pol der Spannungsquelle zugeführt und der Platte B Elektronen entzogen, indem sie in den positiven Pol der Spannungsquelle abfließen. Auf der Oberfläche der Platte A sitzen dann frei bewegliche Elektronen (Abb. 27) und auf der Oberfläche von B an den Ort gebundene Metallionen. Bei der Übertragung des Feldes werden der Platte B soviel Elektronen entzogen, wie der Platte A zugeführt werden (aber nicht dieselben). Sie werden von denjenigen Atomen des Metalls B abgegeben, die an der Oberfläche gegenüber A sitzen und dadurch zu positiven Ionen werden. Die leichte Beweglichkeit der Elektronen hat zur Folge, daß die Elektronen und Ionen über die ganze Oberfläche verteilt sind.

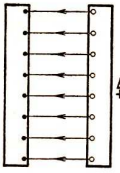


Abb. 27. Feldlinien zwischen Elektronen und Metallionen

Werden beim Aufbau eines elektrischen Feldes der einen Grenzfläche Elektronen zugeführt, dann sagt man, diese Grenzfläche wird **„negativ geladen"**. Werden dabei der anderen Grenzfläche Elektronen entzogen, so sagt man, sie wird **„positiv geladen"**. Man spricht von der „positiven und negativen Ladung" der Metallplatten, die das Feld begrenzen. Man gebraucht auch die Ausdrucksweise „positive oder negative Elektrizitätsmenge".

Negative Ladung bedeutet Überschuß an Elektronen, positive Ladung Mangel an Elektronen, oder:

Die elektrischen Ladungen rühren her von Elektronen oder Ionen, die auf einem Leiter im Überschuß vorhanden sind.

„Ungeladen" ist ein Leiter, wenn keine Feldlinien von ihm ausgehen. Er enthält dann gleichviel Ionen und Elektronen.

5. Die Größe der Ladung. Wie wir in § 30 sehen werden, besteht kein Unterschied zwischen den einzelnen Elektronen in bezug auf ihre Masse und ihre elektrische Ladung. Die Größe der elektrischen Ladung eines isolierten metallenen Leiters ist also nur davon abhängig, wieviel Elektronen er mehr oder weniger im Vergleich zum ungeladenen Zustand enthält.

Man kann die elektrische Ladung durch die Zahl der überschüssigen Elektronen oder Ionen messen. Meist aber verwendet man andere Maße für die Ladung, weil die Zahl der überschüssigen Elektronen sich direkt nicht bestimmen läßt (§ 6, 3).

§ 6. Das Maß der Ladung

1. Der elektrische Stromstoß. Zerfällt ein elektrisches Feld dadurch, daß man die Grenzflächen leitend verbindet, so entsteht ein elektrischer Strom, der so lange fließt, bis das Feld zerfallen ist. Die Dauer Δt dieses Stromes ist in der Regel sehr kurz. Man spricht daher von einem „Stromstoß", der durch den Leiter fließt. Maßgebend für die Größe des Stromstoßes sind die Stromstärke und die Stromdauer. Die Stromstärke ist veränderlich, I möge den

Durchschnittswert während der Zeit Δt bedeuten. Der Ausschlag des Amperemeters, mit dem wir den Stromstoß messen können, hängt von $I \cdot \Delta t$ ab. Da das Maß für die Stromstärke das Ampere und für die Zeit die Sekunde ist, ergibt sich:

Das Maß für den elektrischen Stromstoß $I \cdot \Delta t$ ist die Amperesekunde (As).

2. Spannung, Ladung und Stromstoß. Beim Zerfall des elektrischen Feldes vereinigen sich die positiven und negativen Ladungen der Grenzflächen. Die Stärke des Stromes und seine Dauer sind daher zweifellos von der Ladung der Grenzflächen abhängig. Wäre die Größe des Stromstoßes lediglich von der Ladung abhängig, so könnten wir die Ladung der Grenzflächen durch den Stromstoß messen, der beim Feldzerfall entsteht. Möglich ist aber, daß die Größe des Stromstoßes auch von der Spannung zwischen den Grenzflächen abhängt. Ob es der Fall ist, beantwortet folgender Versuch:

Zwischen zwei großen ebenen Platten A und B von 1 mm Abstand erzeugen wir ein selbständiges Feld von 110 V. Wir lassen es zerfallen, indem wir die Platten leitend verbinden. In die leitende Verbindung ist außer einem Widerstand R ein Spiegelgalvanometer, das ist ein sehr empfindlicher Strommesser, eingeschaltet. Infolge des entstehenden Stromstoßes schlägt es aus. Läßt man auf ein solches Galvanometer einen Stromstoß $I \cdot \Delta t$ einwirken, der kürzer ist als seine Schwingungsdauer, so ist sein Ausschlag nicht ein Maß für I (wie bei einem Dauerstrom), sondern für $I \cdot \Delta t$. Ein so stoßweise benutztes Galvanometer nennt man ein „ballistisches". Wir stellen den ersten Ausschlag des Zeigers fest. — Wir erzeugen von neuem dasselbe selbständige Feld. Bevor wir aber das Feld zerstören, entfernen wir die Platten einige Millimeter voneinander. Dadurch wird die Spannung zwischen ihnen wesentlich vergrößert, ohne daß sich die Ladungen auf ihnen ändern, denn es kann keine Ladung zu- oder abfließen (Abb. 28). Verbinden wir dann die Platten leitend, so zeigt das Galvanometer genau denselben Ausschlag wie vorher. **Bei hoher Spannung fließt ein starker Strom kurze Zeit, bei niedriger Spannung ein schwacher Strom längere Zeit.** $I \cdot \Delta t$ ist in beiden Fällen gleichgroß. Eine Änderung des Widerstandes R ändert den Ausschlag nicht. Wir schließen daraus:

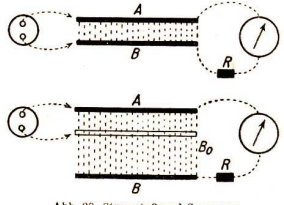


Abb. 28. Stromstoß und Spannung

Die Größe $I \cdot \Delta t$ des beim Feldzerfall entstehenden elektrischen Stromstoßes ist lediglich abhängig von der Ladung Q auf den Grenzflächen, nicht aber von der Spannung zwischen den Grenzflächen und auch nicht von dem in der Verbindungsleitung liegenden Widerstand.

3. Das Maß der Ladung. Der beim Zerfall auftretende elektrische Stromstoß kann zum Messen der Ladung Q der Grenzflächen des Feldes dienen.

Maßvergleichung: Ladungen nennen wir gleich, wenn beim Feldzerfall derselbe Stromstoß entsteht.

Maßeinheit: Die Ladungseinheit ist dann gegeben, wenn beim Feldzerfall der Stromstoß 1 Amperesekunde auftritt. Diese Einheit wird auch **1 Coulomb (C)** genannt (nach dem französischen Physiker Coulomb).

Maßeichung: Ist der Stromstoß n mal so groß wie bei 1 Amperesekunde, so ist die damit gemessene Ladung Q gleich n Amperesekunden.

Ladung und Stromstoß werden also mit derselben Einheit (As) gemessen.

Bei dieser Festsetzung hat sich dann erwiesen, daß gleiche Ladungen tatsächlich gleichen Elektronen- oder Ionenüberschuß bedeuten.

4. Das Verfahren der Messung. Zwei Möglichkeiten gibt es, den Stromstoß zu messen.

a) Messung des Einzelstromstoßes. Ein kurz dauernder Strom, der durch ein Galvanometer fließt, bewirkt, daß der Zeiger stoßartig ausschlägt. Wird derselbe Stromstoß ausgeübt, so schlägt der Zeiger wie beim ersten Ausschlag bis zu derselben Marke aus. Will man Stromstöße verschiedener Größe messen, so muß man das Galvanometer vorher eichen. Man läßt z. B. während $\frac{1}{20}$ s Ströme verschiedener Stärke I_1, I_2, I_3 ... Ampere durch das Galvanometer fließen und stellt die Ausschläge des Zeigers fest. Auf diese Weise erfährt man, wie weit der Zeiger bei $\frac{I_1}{20}$, $\frac{I_2}{20}$, $\frac{I_3}{20}$, ... ausschlägt, und kann so Stromstöße messen.

b) Messung durch Stromstoßfolge. Ein anderer Weg, den Stromstoß zu messen, besteht darin, in einer Sekunde eine große Zahl Stromstöße, z. B. 40, nacheinander durch das Galvanometer zu schicken, so daß der Zeiger dauernd ausschlägt und einen bestimmten unveränderlichen Strom I Ampere anzeigt. Dann ist jeder einzelne Stromstoß $\frac{I}{40}$ Amperesekunden. Die Platten müssen dann in jeder Sekunde 40 mal mit der Spannungsquelle verbunden, von ihr getrennt und dann über das Galvanometer leitend verbunden werden. Das wird von einem rotierenden Schalter, wie ihn Abb. 29 darstellt, bewirkt. Dreht sich der Schalter, eine Scheibe aus Hartgummi, im Gegenzeigersinn, so kommen nacheinander die Kontakte 1, 2, 3 ... 12 mit der Feder F, die mit der Platte A verbunden ist, in Berührung. Alle Kontakte 2, 4, 6 ... 12 stehen durch einen auf der Rückseite der Scheibe angebrachten Schleifring S_1 mit der Steckdose, alle Kontakte 1, 3, 5 ... 11 durch einen auf der Vorderseite sitzenden Schleifring S_2 mit dem Galvanometer G in Verbindung. Der zweite Pol der Steckdose ist mit der Platte B verbunden; ebenso das Galvanometer. Berührt die Feder F die Kontakte 2, 4, 6 ..., so wird das Feld zwischen A und B aufgebaut, berührt sie die Kontakte 1, 3, 5, ..., so bricht es in einem Stromstoß zusammen. Aus der sechsfachen Umlaufszahl des Schalters ergibt sich die Anzahl der in 1 s durch das Galvanometer fließenden Stromstöße. Diese Methode hat den Vorteil, daß man statt eines ballistischen Galvanometers ein gewöhnliches Amperemeter verwenden kann. Zeigt dies bei 30maliger Entladung je Sekunde wegen seiner Trägheit einen Dauerausschlag von 0,003 A, so wird bei jeder Entladung der Platten eine Ladung von $\frac{0{,}003}{30}$ As $= 10^{-4}$ As abgeleitet. So groß war also auch die elektrische Ladung, die beim Aufladen mit der Spannung U auf die Platten floß.

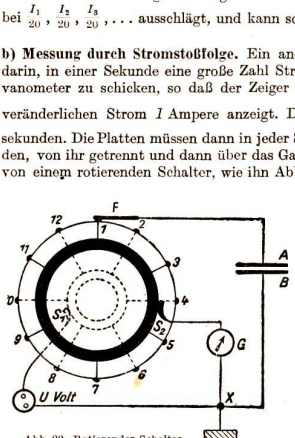


Abb. 29. Rotierender Schalter

§ 7. Die Kapazität. Der Kondensator

1. Ladung und Spannung eines Kondensators. Wir nennen zwei irgendwie geformte, gegeneinander isolierte Leiter, zwischen denen ein elektrisches Feld entstehen kann, einen Kondensator und sein Aufnahmevermögen für Ladung Kapazität. Sind diese beiden Leiter im besonderen zwei parallel gegenüberstehende ebene Platten, so nennt man diese Anordnung einen Plattenkondensator.

Wir wissen vom stufenweisen Aufbau eines Feldes, daß die Spannung U eines Kondensators wächst, wenn die Ladung Q größer wird. Nachdem wir nun gelernt haben, die Ladung zu messen, fragen wir: In welchem Verhältnis stehen Q und U zueinander bei demselben Kondensator?

Wir lassen das bei verschiedenen Spannungen U erzeugte Feld eines Kondensators zerfallen und messen die Ladung Q durch den Stromstoß. Wir stellen fest:

Das Verhältnis $\frac{Q}{U}$ ein und desselben Kondensators ist für verschieden große Spannungen und Ladungen dasselbe.

Je größer dieses Verhältnis bei verschiedenen Kondensatoren ist, desto mehr Ladung enthält ein Kondensator bei bestimmter Spannung. $\frac{Q}{U}$ gibt also ein Maß für die Aufnahmefähigkeit des Kondensators für Ladung. Indem wir für diese Aufnahmefähigkeit das Wort „Kapazität" benutzen, definieren wir eindeutig:

Die Kapazität C eines Kondensators wird durch das Verhältnis seiner elektrischen Ladung Q zu seiner Spannung U gemessen.

$$C = \frac{Q}{U}.$$

Das Maß der Kapazität ist $\frac{\text{Coulomb}}{\text{Volt}}$. Dem englischen Physiker Faraday zu Ehren wird die Einheit der Kapazität „Farad" (F) genannt.

$$\textbf{1 Farad} = \frac{\textbf{1 Coulomb}}{\textbf{1 Volt}}.$$

Die Kapazität 1 Farad besitzt also ein Kondensator, der bei 1 V Spannung die Ladung 1 Amperesekunde oder 1 Coulomb aufnimmt. Bei den üblichen Anordnungen wird nie eine so große Kapazität erreicht. Man benutzt deshalb den millionten oder sogar den billionten Teil eines F als Einheit: 1 μF (1 Mikrofarad) = 10^{-6} F, 1 pF (1 Picofarad) = 10^{-12} F.

2. Die Kapazität eines Plattenkondensators. Wir prüfen nach, in welcher Weise die Ladung Q bei bestimmter Spannung U von der Innenfläche F einer

Platte und dem Abstand d der Platten abhängig ist. Stehen die Platten einander dicht gegenüber, so kommt das äußere Feld gegenüber dem Feld zwischen den Platten kaum in Betracht. Dann ist das Feld im Innern homogen.

Wir benutzen gleich gebaute Kondensatoren, deren Plattenabstand 1 mm groß ist und deren Flächen sich zueinander wie 1 : 2 : 3 usw. verhalten. Wir laden sie auf 110 V Spannung auf und entladen sie über ein Galvanometer. Aus der nachstehenden Tabelle, die das Versuchsergebnis wiedergibt, läßt sich schließen:

Die Ladung Q eines Plattenkondensators ist bei konstanter Spannung U proportional der Größe der Fläche F einer Platte.

Wir benutzen dann Kondensatoren, deren Platten dieselbe Größe haben, bei denen aber der Abstand d der Platten verschieden ist. Wir messen die Ladung in derselben Weise durch den Stromstoß und finden:

Die Ladung Q eines Plattenkondensators ist bei konstanter Spannung U umgekehrt proportional dem Abstand d der Platten.

Fläche F	Ladung Q	$\frac{Q}{F}$
1	7	7
2	14	7
3	20,5	6,83
4	27,8	6,96
5	34,8	6,96

Abstand d	Ladung Q	$Q \cdot d$
1	23,7	23,7
2	11,7	23,4
3	8	24
4	6,2	24,8
5	5	25

Wir stellen also für die Ladung und die Kapazität eines Plattenkondensators mit homogenem Feld die Beziehungen fest: $Q \sim \frac{F}{d}$ und daher auch

$$C \sim \frac{F}{d}.$$

Führen wir einen Proportionalitätsfaktor ε ein, dessen Größe wir im folgenden noch bestimmen, so finden wir:

Die Kapazität C eines Plattenkondensators ist

$$\boldsymbol{C = \varepsilon \cdot \frac{F}{d}}.$$

F bedeutet die Größe der Fläche einer Platte und d den Abstand der Platten. Wegen der Voraussetzung der Homogenität des Feldes gilt diese Gleichung um so genauer, je größer $\frac{F}{d}$ ist.

3. Die Größe der absoluten Dielektrizitätskonstante. Wir betrachten einen Plattenkondensator, zwischen dessen Platten ein luftleerer Raum besteht. Der Proportionalitätsfaktor der Kapazitätsformel sei dann ε_0. Dann haben wir zwei Ausdrücke zur Angabe der Kapazität eines Plattenkondensators:

$$C = \frac{Q}{U} \quad \text{und} \quad C = \varepsilon_0 \frac{F}{d}.$$

Es ist also für den Plattenkondensator

$$\frac{Q}{U} = \varepsilon_0 \frac{F}{d} \quad \text{oder} \quad \varepsilon_0 = \frac{Q}{U} \cdot \frac{d}{F}.$$

Wir können ε_0 aus einem Versuch berechnen, bei dem wir Q, U, F und d messen[1]). Ein solcher ergibt z. B.: Der von kreisförmigen Platten von 25 cm Durchmesser gebildete Kondensator hatte die Fläche $F = 491$ cm², den Plattenabstand $d = 0{,}1$ cm und die Spannung $U = 10$ V. Er wurde in 1 s 32,5 mal aufgeladen. Der Dauerstrom betrug $1{,}4 \cdot 10^{-7}$ A. Seine Ladung betrug $Q = 4{,}31 \cdot 10^{-9}$ Coulomb. Durch Einsetzung in die Formel finden wir

$$\varepsilon_0 = \frac{4{,}31 \cdot 10^{-9} \cdot 0{,}1}{10 \cdot 491} \frac{\text{Coulomb}}{\text{Volt} \cdot \text{cm}} = 8{,}8 \cdot 10^{-14} \frac{\text{Coulomb}}{\text{Volt} \cdot \text{cm}}.$$

Genaue Messungen haben für ε_0 den Wert ergeben

$$\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-14} \frac{\text{Coulomb}}{\text{Volt} \cdot \text{cm}}.$$

ε_0 wird auch die Influenzkonstante oder die absolute Dielektrizitätskonstante des Vakuums genannt.

Ein Plattenkondensator mit $F = 100$ cm² und $d = 0{,}1$ cm besitzt also eine Kapazität von $8{,}85 \cdot 10^{-11}$ Farad $= 8{,}85 \cdot 10^{-5}\,\mu$F.

4. Die Größe der (relativen) Dielektrizitätskonstante. Ändert sich die Kapazität, wenn das Feld eines Kondensators sich nicht im Vakuum, sondern in einem isolierenden Stoff ausbildet, wenn man also z. B. zwischen die Platten eines Plattenkondensators eine den Zwischenraum ausfüllende Glasplatte schiebt? Erfahrungen an solchen Experimenten bejahen diese Frage (Abb. 30).

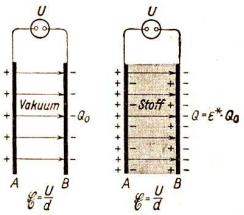


Abb. 30
Kondensator ohne und mit Dielektrikum

Wir messen bei Plattenkondensatoren von gleicher Fläche F, gleichem Abstand d, gleicher Spannung U die Ladung Q, wenn Luft oder andere Isolatoren den Raum zwischen den Platten ausfüllen. Wir finden Q für Luft fast ebenso groß wie für das Vakuum, für Hartgummi etwa 3 mal, für Glas etwa 6 mal so groß wie für das Vakuum. Da F, d und U unverändert waren, ist auch die Kapazität für Hartgummi etwa 3 mal, für Glas etwa 6 mal so groß, für einen beliebigen Isolator ε^* mal so groß wie für das Vakuum. Wir können diese Ergebnisse in der Form schreiben: $\frac{Q}{U} = C = \varepsilon^* \cdot \varepsilon_0 \frac{F}{d}$, oder indem wir $\varepsilon^* \cdot \varepsilon_0 = \varepsilon$ setzen, $C = \varepsilon \frac{F}{d}$. Wir nennen ε die absolute, ε^* die (relative) Dielektrizitätskonstante des Stoffes. ε^* ist eine reine Zahl.

1) Wir verwenden in der Elektrizitätslehre neben den Grundmaßen Ampere und Volt zur Messung von Längen, Flächen und Rauminhalten die Einheiten cm, cm² und cm³.

Relative Dielektrizitätskonstanten für verschiedene Stoffe

Stoff	ε^*	Stoff	ε^*
Glas	5···16	Paraffinöl	2,3
Quarzglas	3,7	Petroleum	2···2,3
Porzellan	6,0	Wasser	81
Hartgummi	2,5···3,5	Äthylalkohol	24
Bernstein	2,8	Luft	1,0006

Die Größe der absoluten Dielektrizitätskonstante ε in der Formel für die Kapazität ergibt sich aus

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon^*.$$

Da für das Vakuum $\varepsilon^* = 1$ ist, so ist $\varepsilon_{\text{Vak}} = \varepsilon_0$, womit für ε_0 die Bezeichnung „absolute Dielektrizitätskonstante des Vakuums" gerechtfertigt ist. Bei Messungen, bei denen die Genauigkeit 1 ‰ nicht übersteigt, können wir die Dielektrizitätskonstanten der meisten Gase gleich der des Vakuums setzen.

Zur Übung: 1. Ein Elektroskop ist zu eichen. – 2. Es ist die Abhängigkeit der Kapazität eines Plattenkondensators von Abstand und Fläche zu bestimmen. – 3. Man bestimme die relative Dielektrizitätskonstante von Hartgummi, paraffinierter Pappe, Plexiglas. – 4. Die Kapazität eines Kondensators ist mit einem geeichten Elektrometer zu bestimmen.

Aufgaben. a) Eine Leidener Flasche von 12 cm Durchmesser ist innen und außen bis zu 20 cm Höhe mit Stanniol beklebt. Die Glasdicke beträgt 3 mm, $\varepsilon^* = 6$. Welche Kapazität besitzt sie? – b) Welcher Stromstoß entsteht, wenn ein Kondensator von 60 Mikrofarad, der auf 150 Volt aufgeladen ist, entladen wird?

§ 8. Materie im elektrischen Feld

Wir prüfen die Frage, welchen Einfluß Materie und Feld aufeinander ausüben, durch folgende Versuche, deren Anordnung Abb. 31 zeigt.

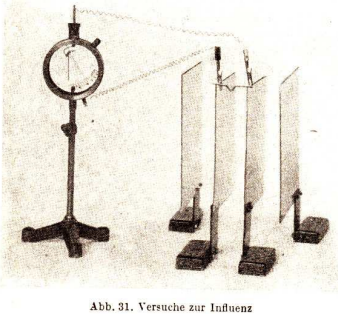


Abb. 31. Versuche zur Influenz

1. Ein Leiter im Feld. Wir laden einen Plattenkondensator auf, trennen ihn von der Spannungsquelle und messen seine Spannung mit dem Elektrometer. In den Raum zwischen den Platten A und B führen wir eine dicke Metallplatte so ein, daß sie senkrecht zu den Feldlinien steht, ohne A und B (Abb. 32) zu berühren.

Die Spannung sinkt beim Einführen der Platte und steigt beim Herausnehmen wieder auf den früheren Betrag an. Im homogenen Feld gilt $U = \mathfrak{E} d$. Eine Verringerung von U kann

eine Abnahme von $\mathfrak{E}$ oder d oder beider bedeuten. Nun sinkt aber U gerade um den Betrag, der sich ergibt, wenn man den ursprünglichen Abstand d um die Dicke Δd der eingeschobenen Platte verringert: $U = \mathfrak{E}(d - \Delta d)$. Außerdem zeigen Messungen, daß die Feldstärke $\mathfrak{E}$ sich nicht geändert hat. Wir schließen also allein auf eine Verkürzung der Feldlinien. Dies wird bestätigt durch folgenden Versuch.

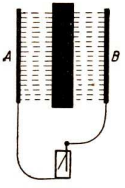


Abb. 32

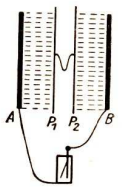


Abb. 33

Leiter im elektrischen Feld

Wir führen zwei miteinander leitend verbundene Platten P_1 und P_2 in das Feld (Abb. 33) ein. Entfernen wir sie voneinander, so sinkt die Spannung mit zunehmendem Abstand. Was dabei vorgegangen ist, offenbart das Feldlinienbild in Abb. 34. Zwischen P_1 und P_2 besteht kein Feld. Die Feldlinien sind gewissermaßen zerschnitten worden und haben sich um den Abstand zwischen P_1 und P_2 verkürzt. Die von A ausgehenden Feldlinien enden auf P_1 und die auf B endenden gehen von P_2 aus.

Ein senkrecht zu den Feldlinien stehender Leiter zerschneidet das Feld in zwei getrennte Teile.

Da bisher die Feldlinien stets an Ladungen endeten, vermuten wir zunächst und werden es im folgenden bestätigen:

Auf den Schnittflächen treten entgegengesetzte elektrische Ladungen auf.

Diesen Vorgang nennt man **Influenz.**

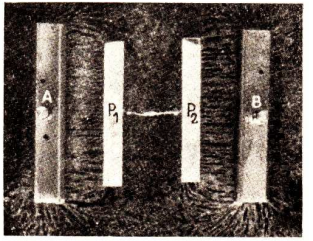


Abb. 34. Influenz im Feldlinienbild

2. Die influenzierten Ladungen. Bei der Influenz werden auf ein und demselben Leiter entgegengesetzte Ladungen getrennt.

Wir prüfen nach, ob wirklich P_1 und P_2 entgegengesetzte Ladungen tragen, indem wir die leitende Verbindung zwischen P_1 und P_2 aufheben, während die Platten im Feld stehen. Zerstören wir dann das Feld zwischen A und B (Abb. 35), oder ziehen wir die Platten P_1 und P_2 aus dem Feld heraus (Abb. 36), so bemerken wir, daß tatsächlich P_1 und P_2 entgegengesetzt zueinander geladen sind.

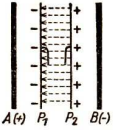


Abb. 35

Trennung der influenzierten Ladungen

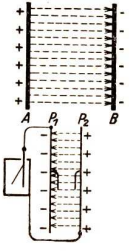


Abb. 36

Nachweis der influenzierten Ladungen

Zwischen den eingelagerten Platten P_1 und P_2 besteht, so lange sie im Feld stehen, ein influenziertes Feld, das zu dem ursprünglichen Feld entgegengesetzt gerichtet ist. Die Feldstärken beider Felder sind gleich. Sie heben einander auf, so daß der Raum zwischen den Platten feldfrei ist (Abb. 37).

Ein elektrisches Feld ruft in einem eingelagerten Leiter ein influenziertes Feld hervor, dessen Feldstärke gleich und entgegengesetzt gerichtet zu seiner eigenen Feldstärke ist.

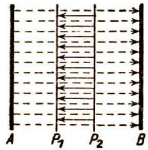


Abb. 37
Das Gegenfeld der influenzierten Ladungen

Das Innere des influenzierten Leiters ist deshalb feldfrei. Damit haben wir auch eine Erklärung für den Versuch in Abb. 15.

3. Ein Nichtleiter im Feld. Stellt man (Abb. 38) eine dicke Paraffinplatte, eine Glas- oder Hartgummiplatte senkrecht zu den Feldlinien auf, so bemerkt man ebenfalls, daß die Spannung sinkt. Sie steigt wieder an, wenn man die Platte herausnimmt. Während aber bei einem Leiter die Spannung so stark abnimmt, als ob die Feldlinien um seine Gesamtdicke Δd verkürzt wurden, ist bei einem Isolator die Abnahme der Spannung deutlich geringer. Es ist, als ob die Feldlinien bei einem Isolator nur um einen Teil seiner Dicke gekürzt wurden. Für dieses Verhalten des Nichtleiters gibt es folgende Erklärung:

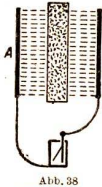


Abb. 38
Nichtleiter im Feld

Leiter und Nichtleiter bestehen aus Molekülen und Atomen, die sich innerlich wie Leiter verhalten. In dem festen Leiter befinden sich zwischen diesen kleinsten Teilchen frei bewegliche Elektronen, die Verbindungen zwischen ihnen herstellen, so daß alle Atome und Moleküle zusammen wie ein einziger großer Leiter wirken. In den Nichtleitern besteht keine leitende Verbindung zwischen den einzeln gelagerten Atomen und Molekülen, da die Elektronen fest gebunden sind. Abb. 39 und 40 zeigen an einem Modellversuch diese Unterschiede. In Abb. 39 sind die Atome durch metallische Scheiben dargestellt; sie sind untereinander leitend verbunden.

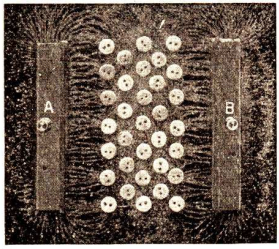


Abb. 39. Modellversuch: Leiter im Feld

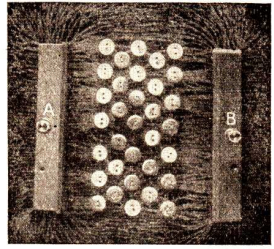


Abb. 40. Modellversuch: Nichtleiter im Feld

In Abb. 40 sind die metallischen Scheiben ohne leitende Verbindung nebeneinander angeordnet (kein Elektronenübergang). Abb. 39 zeigt, daß das gesamte Innere des Leiters feldfrei ist, und Abb. 40, wie sich im Nichtleiter das Feld zwischen den Molekülen oder Atomen fortsetzt.

In Molekülen und Atomen eines Nichtleiters treten durch elektrische Influenz im Feld elektrische Ladungen auf.

In einem Isolator werden die Feldlinien daher um den Betrag gekürzt, den sie im Inneren der etwa als leitende Kugeln gedachten Atome zurücklegen würden. Ist das nur ein Drittel der Gesamtdicke, so gilt, wenn der Isolator den ganzen Innenraum des Kondensators ausfüllt: $U = \mathfrak{E} \cdot 2/3\, d$. Ohne Isolator galt $U_0 = \mathfrak{E} d$, also ist $\varepsilon^* = \frac{U_0}{U} = \frac{1}{2/3} = 3/2 = 1{,}5$.

§ 9. Das Grundgesetz des elektrischen Feldes

Die absolute Dielektrizitätskonstante des Vakuums ε_0 hat folgende allgemeine Bedeutung: Für das homogene Feld eines Plattenkondensators gilt die Beziehung (§ 7)

$$\varepsilon_0 = \frac{Q}{U} \cdot \frac{d}{F}.$$

Schreiben wir diesen Ausdruck in der Form

$$\frac{Q}{F} \cdot \frac{d}{U} = \varepsilon_0,$$

so können wir statt $\frac{U}{d}$ die Feldstärke $\mathfrak{E}$ einsetzen und $\frac{Q}{F}$ als die Dichte $\mathfrak{D}$ der Ladung bezeichnen. Es ist also

$$\frac{\mathfrak{D}}{\mathfrak{E}} = \varepsilon_0.$$

Wie im vorigen Paragraphen gezeigt wurde, werden in einem elektrischen Feld auf einem Plattenpaar entgegengesetzte Ladungen influenziert. Diese kann man nachweisen, indem man die Platten und damit die Ladungen im Feld trennt und sie dann mit einem geeichten Elektrometer mißt. Teilen wir die so in Amperesekunden festgestellte Ladung durch die in cm² gemessene Fläche der Platten, so erhalten wir die influenzierte Ladungsdichte. Diese steht in engem Zusammenhang mit dem Feldlinienbild. Im homogenen Feld, wo die Feldlinien parallel verlaufen, ist die auf dem Metall der senkrecht zu den Feldlinien stehenden Platten influenzierte Ladungsdichte überall gleich. Im Plattenkondensator mit homogenem Feld mißt man an allen Stellen die Ladungsdichte der Kondensatorplatten; denn diese Ladungsdichte ergibt sich notwendig, wenn man mit einer Probeplatte die Kondensatorplatte berührt, sie also zu einem Teil der Oberfläche dieser Kondensatorplatte macht, und weil das Feld homogen ist, mißt man überall dieselbe Ladungsdichte. In einem inhomogenen Feld (§ 3) nimmt die influenzierte Ladungsdichte um so stärker ab, je mehr die Feldlinien auseinanderlaufen. Denkt man sich die Feldlinien gleichmäßig dicht aus den Grenzflächen heraustretend, so nimmt ihre Dichte dort ab, wo sie auseinanderlaufen und dort zu, wo sie zusammenlaufen. Genau proportional zu dieser Dichte ändert sich die influenzierte Ladungsdichte $\mathfrak{D}$ der senkrecht zu

den Feldlinien stehenden Platte. Das gilt nicht nur für radiale, sondern für alle anderen inhomogenen Felder. Für diese so für jeden Punkt (wenn man mit genügend kleinen Platten mißt) eines Feldes feststellbare Ladungsdichte $\mathfrak{D}$, die an seinen Grenzen mit der Ladungsdichte der Grenzfläche übereinstimmt, gilt, wie Messungen allgemein zeigen, im Vakuum das Gesetz

$$\mathfrak{D} = \varepsilon_0 \mathfrak{E}.$$

Je größer die Dichte $\mathfrak{D}$ an einer Stelle eines Feldes ist, desto größer ist dort auch die Feldstärke $\mathfrak{E}$. Aus Feldlinienbildern können wir daher auch auf die räumliche Änderung der Feldstärke schließen.

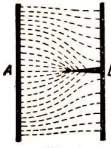


Abb. 41
Inhomogenes Feld in der Nähe einer Spitze

Wird ein elektrisches Feld zwischen einer Spitze und einer Platte (Abb. 41) erzeugt, so ist die Feldstärke in der Nähe der Spitze außerordentlich groß und es kann dadurch auch zu einer sichtbaren Erscheinung kommen, die man Spitzenentladung nennt (Elmsfeuer).

Längs einer und derselben Feldlinie herrscht im inhomogenen Feld nicht überall dieselbe Feldstärke.

Die Dichte der Feldlinien im Felde eines Plattenkondensators außerhalb des Innenraumes (im sogenannten Streufeld) ist bei geringem Plattenabstand sehr klein, daher ist auch die Feldstärke außen gering.

Diese Erkenntnis gibt uns Aufklärung über manche Frage, die für uns offen geblieben ist.

Ladet man einen Plattenkondensator im Vakuum mit der Spannung U_0, so ergibt sich zwischen den Platten ein homogenes Feld mit der Feldstärke $\mathfrak{E}_0$ und auf seinen Platten eine bestimmte Ladungsdichte $\mathfrak{D}$. Diese bleibt erhalten, wenn man die Spannungsquelle abschaltet. Bringt man jetzt einen Stoff mit der Dielektrizitätskonstante ε^* in den Zwischenraum, so mißt man mit einem Plattenpaar in jedem Spalt senkrecht zu den Feldlinien dieselbe Ladungsdichte $\mathfrak{D}$. Gleichzeitig sinkt aber U_0 auf $U = \frac{U_0}{\varepsilon^*}$, und weil die Feldstärke der Spannung proportional ist, sinkt auch $\mathfrak{E}_0$ auf $\frac{\mathfrak{E}_0}{\varepsilon^*} = \mathfrak{E}$. Für das Feld im Isolator gilt also $\mathfrak{D} = \varepsilon_0 \mathfrak{E}_0 = \varepsilon_0 \varepsilon^* \mathfrak{E}$. Wir beobachten, daß die Größe $\mathfrak{D}$ und $\mathfrak{E}$ durch die Gleichung

$$\mathfrak{D} = \varepsilon \mathfrak{E}$$

verbunden sind. Diese Beziehung gilt in jedem beliebigen elektrischen Feld.

§ 10. Die Energie des elektrischen Feldes

Das Blättchen eines geladenen Elektroskops besitzt Energie der Lage, die es durch das elektrische Feld erlangt hat. Wenn ein Feld zerfällt, entsteht ein elektrischer Strom, der im Draht Wärme erzeugt. Diese Beispiele zeigen, daß im elektrischen Feld Energie gespeichert ist. Daher kann man auch jeder felderzeugenden Spannungsquelle Energie entnehmen.

1. Das Maß der elektrischen Energie. Verbinden wir die Pole der Steckdose (unter Einschaltung eines Widerstandes) während der Zeit t durch einen Draht, so fließt in dem Draht ein dauernder Strom und erzeugt dabei Wärme.

Die Energie des Feldes wandelt sich in Wärme um. Die im Draht entwickelte Wärme können wir messen, indem wir den Draht in einem Kalorimeter in Öl einbetten. Werden m g Öl, dessen spezifische Wärme c ist, bei dem Versuch von der Temperatur ϑ_1 auf die Temperatur ϑ_2 erwärmt, so ist die entwickelte Stromwärme $W_w = m \cdot c \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1)$ cal.

Versuche dieser Art, bei denen man die Spannung U, die Stromstärke I und die Zeit t variiert, ergeben, daß die entwickelte, in Kalorien gemessene Wärmemenge immer dieselbe ist, wenn das Produkt $U \cdot I \cdot t$ dasselbe ist. Wird die gesamte elektrische Energie in Wärme umgewandelt, was für diesen Versuch zutrifft, dann ergibt sich, daß das Maß für die elektrische Energie das Produkt $U \cdot I \cdot t$ ist.

Wir finden den Satz:

Fließt in einem Leiter, zwischen dessen Enden die elektrische Spannung U herrscht, während der Zeit t der Strom I, so ist die freiwerdende elektrische Energie

$$W_e = U \cdot I \cdot t.$$

Da die Spannung U in Volt und die Ladung $I \cdot t = Q$ in Amperesekunden oder Coulomb gemessen werden, ergibt sich als Maß der elektrischen Energie:

Die elektrische Energie wird in Voltamperesekunden (VAs) gemessen.

Die Einheit der elektrischen Energie wird nach dem englischen Physiker Joule (J) genannt. Es ist

1 Joule = 1 Voltcoulomb = 1 Voltamperesekunde = 1 Wattsekunde.

Für einen Kondensator gilt, daß der mittlere Entladungsstrom gleich der halben ursprünglich vorhandenen Ladungsmenge Q je Sekunde ist, also $I = \frac{Q}{2t}$. Die in seinem Feld gespeicherte Energie ist daher $W_e = U \cdot I \cdot t = \frac{UQ}{2}$.

2. Das elektrische Wärmeäquivalent. Messen wir die elektrische Energie W_e in Voltamperesekunden und die beim Feldzerfall entwickelte Wärme W_w in cal, so ergibt sich aus den Versuchen das elektrische Wärmeäquivalent:

$$\frac{W_w}{W_e} = 0{,}239 \frac{\text{cal}}{\text{VAs}} = 0{,}239 \frac{\text{cal}}{\text{J}}.$$

Zwischen der elektrischen Energie und der Wärmeenergie besteht das Umwandlungsverhältnis

1 J = 0,239 cal.

3. Mechanische und elektrische Energie. Ziehen wir die Grenzflächen eines selbständigen elektrischen Feldes auseinander, so leisten wir Arbeit. Dabei wächst die Spannung U des Feldes (§ 4) und Q bleibt unverändert. Die Energie des Feldes $\frac{UQ}{2}$ nimmt also dabei zu. – Ist die eine Platte eines geladenen Kondensators beweglich, so nähert sie sich der anderen. Wir haben gesehen, daß elektrisch geladene Körper, weil sie Kräfte aufeinander ausüben, sich bewegen, falls sie nicht daran gehindert werden. Bei der Annäherung wird vom Feld Arbeit geleistet. Dessen Energie nimmt ab, weil U kleiner wird.

Mechanische Energie kann unmittelbar in elektrische und elektrische Energie in mechanische umgewandelt werden.

Aus geeigneten Versuchen, am sichersten aber aus dem elektrischen und mechanischen Wärmeäquivalent (1 cal = 0,427 kpm), ergibt sich:

Zwischen der elektrischen Energie und der mechanischen Energie besteht das Umwandlungsverhältnis

$$1\ \mathrm{J} = 10^7\ \mathrm{erg} = 0{,}102\ \mathrm{kpm}$$

Für die Bewegung geladener Körper im elektrischen Felde gilt:

Im elektrischen Felde bewegt sich ein positiv geladener Körper in der Richtung der elektrischen Feldstärke, ein negativ geladener entgegengesetzt zu ihr.

Bei diesen Vorgängen wird **elektrische Energie in Bewegungsenergie der bewegten Körper** verwandelt. Wirkt auf einen metallenen Leiter ein elektrisches Feld, so werden die Elektronen des Leiters entgegengesetzt zur Richtung der Feldstärke bewegt. Sie erlangen eine gewisse Bewegungsenergie. Treffen sie bei ihrer Bewegung auf die Atome des Leiters, so erteilen sie diesen Stöße. Die Folge ist, daß die Bewegungsenergie der Atome wächst, der Körper sich folglich erwärmt. So erklärt sich die Wärmewirkung des elektrischen Stromes.

4. Die Stromwärme. Die in einem Leiter auf elektrischem Wege erzeugte Wärme W_w kann man nach folgender Gleichung berechnen:

Fließt durch einen Leiter bei der Spannung U der Strom I während der Zeit t, so wird die Stromwärme W_w

$$W_w = 0{,}239 \cdot U \cdot I \cdot t \quad \text{oder} \quad W_w = 0{,}239 \cdot I^2 \cdot R \cdot t$$

erzeugt, wenn U in Volt, I in Ampere, t in Sekunden und W_w in Grammkalorien gemessen werden.

Die zweite Gleichung ergibt sich aus der ersten, wenn man für U den Wert $U = I \cdot R$ einsetzt. (R ist der Widerstand des Leiters.)
Man nennt die in 1 Sekunde erzeugte oder verbrauchte elektrische Energie die Stromleistung. Sie wird gemessen in Watt (W):

$$1\ \mathrm{Watt} = 1\ \mathrm{Voltampere} = 1\ \frac{\mathrm{Joule}}{\mathrm{Sekunde}}.$$

Das 1000-fache dieser Einheit der Stromleistung ist das Kilowatt (kW):

1 Kilowatt = 1000 Watt.

Da 1 Watt gleichwertig mit 0,102 kpm/s ist, entspricht 1 Kilowatt der Leistung $0{,}102 \cdot 1000 = 102$ kpm/s $= 1{,}33$ PS.

Als Maß für die elektrische Energie wird in der Technik die Kilowattstunde benutzt. **1 Kilowattstunde** ist diejenige elektrische Energie, die während einer Stunde bei der Stromleistung 1 kW frei wird:

1 Kilowattstunde (kWh) = 1000 Watt während einer Stunde,

das sind also $1000 \cdot 60 \cdot 60$ Joule $= 3{,}6 \cdot 10^6$ Joule.
1 kWh entspricht der Wärmeenergie $W_w = 1000 \cdot 0{,}239 \cdot 60 \cdot 60 = 8{,}6 \cdot 10^5$ cal oder 860 kcal und der mechanischen Arbeit $A_m = 0{,}102 \cdot 1000 \cdot 60 \cdot 60 = 3{,}67 \cdot 10^5$ kpm.

5. Die Verwendung der Stromwärme. Die Erzeugung von Wärme durch den elektrischen Strom besitzt vor der Erzeugung durch Verbrennung den Vorzug, daß sie in der Handhabung sehr bequem ist und bei ihr auf kleinstem Raum eine hohe Temperatur hervorgerufen werden kann. Sie findet Verwendung u. a.

1. zur Lichterzeugung in den Glühlampen und Bogenlampen;

2. zum Schweißen und zum Schmelzen schwer schmelzbarer Stoffe im elektrischen Lichtbogen. Ein Lichtbogen entsteht z. B., wenn man zwei Kohlenstäbe, zwischen denen eine Spannung von 50–60 Volt herrscht, bis zur Berührung nähert und dann trennt, nachdem die Spitzen glühend geworden sind. Die Temperatur im Lichtbogen beträgt über 4000° C;

3. zur Sicherung der elektrischen Leitungen gegen Überlastung (Kurzschluß-Schmelzsicherung);

4. zum Heizen und Kochen da, wo die elektrische Energie billig ist oder, wie beim Plätteisen und ähnlichen Haushaltgeräten, die bequeme Handhabung eine höhere Ausgabe rechtfertigt. Die Heizplatten des Herdes, die Kochplatte, der Brotröster, der Tauchsieder, das Plätteisen, die Heizsonne und der elektrische Ofen sind mit Heizkörpern ausgestattet, die durch den Strom erwärmt werden.

Wir können jetzt auch das Hitzdrahtinstrument (Abb. 3) genauer verstehen. Der Draht zwischen A und B hat einen Widerstand R. Fließt durch ihn ein Strom I während der Zeit t, so wird die Wärmemenge $W_w = 0{,}239 \cdot I^2 \cdot R \cdot t$ cal erzeugt. Läßt man den Strom sehr lange fließen, so müßten nach dieser Gleichung, die Wärmemenge, die Temperatur des Drahtes, seine Ausdehnung und schließlich der Ausschlag immer größer werden. Tatsächlich stellt sich aber schnell ein bestimmter Endausschlag ein, der sich auch bei beliebig langer Belastung nicht mehr ändert. Dem Draht wird nämlich nicht nur durch den Strom Wärme zugeführt, sondern er verliert auch Wärme durch Wärmeleitung und Wärmestrahlung, und zwar umsomehr, je höher die Temperatur ist. Bei einer bestimmten Temperatur halten sich daher die je Sekunde zu- und abgeführten Wärmemengen das Gleichgewicht, und dieser Temperatur entspricht der Zeigerausschlag.

Zur Übung: 1. Welche Wärmemenge entwickelt eine Glühlampe, die bei 110 V Spannung mit 0,5 A Stromstärke brennt, in 10 Minuten, wenn alle Energie in Wärme umgewandelt wird? — 2. In einer Wohnung brennen drei Lampen für je 25 und eine für 40 W Leistung. Welcher Strom fließt durch den elektrischen Zähler, wenn die Spannung 110 V beträgt? — 3. Ein Bügeleisen verbraucht 500 W. Die Kilowattstunde kostet 20 Pf. Wieviel kostet die Energie, die in drei Stunden zum Bügeln verbraucht wird? — 4. Wie hoch stellen sich die stündlichen Kosten für den Verbrauch an elektrischer Energie bei Glühlampen von 25, 60 und 100 W bei einem Preis von 40 Pf. für die Kilowattstunde? — 5. Ein Zimmer wird durch einen Ofen geheizt, in dem 8 kg Kohle während eines Tages verbrennen. Der Preis der Kohle betrage DM 4.— für 100 kg, ihr Heizwert 8000 kcal/kg; davon werden 50% ausgenutzt. Dieselbe Wärmemenge soll elektrisch erzeugt werden. Die Kilowattstunde kostet 10 Pf. Alle elektrische Energie werde in Wärme übergeführt. Welche Heizung ist billiger? Wie steht es mit dem Verhältnis, wenn die Kilowattstunde 4 Pf. und die Kohle DM 6.— kostet?

B. Das unveränderliche magnetische Feld

§ 11. Die Form des magnetischen Feldes

1. Das magnetische Feld. Befindet sich eine Magnetnadel in der Nähe eines Leiters, so stellt sie sich in dem Augenblick, in dem ein elektrischer Strom durch den Leiter fließt, in ganz bestimmter Richtung ein (Abb. 42). Sind viele Magnetnadeln in der Umgebung des stromdurchflossenen Leiters aufgestellt, so werden sie alle in bestimmter Weise gerichtet. Die Richtwirkung dauert so lange, wie der Strom fließt. Nicht nur auf die Magnetnadel, sondern auch auf Eisenfeilspäne wird diese Wirkung ausgeübt. Wir schließen aus den Beobachtungen:

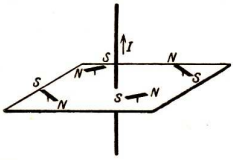


Abb. 42. Magnetnadeln im magnetischen Feld eines Leiters

a) In dem Augenblick, in dem ein elektrischer Strom durch einen Leiter fließt, geht in dem Raum, der den Leiter umgibt, eine Zustandsänderung vor sich. Kleine Magnete und Eisenfeilspäne werden in ihm in bestimmter Weise gerichtet.

Diesen in der Richtwirkung sich äußernden Zustand des Raumes nennen wir „magnetisch".

b) Die im Raum vorhandene Luft hat keinen wesentlichen Einfluß auf die Richtwirkungen. Auch im materiefreien Vakuum würden dieselben Erscheinungen auftreten. Stellen wir irgendwo solche magnetische Kräfte fest, so sagen wir, im Raum besteht ein „magnetisches Feld". Die Linien, längs deren sich die Magnete tangential einstellen, bezeichnen wir als „magnetische Feldlinien". Sie lassen die Form des Magnetfeldes erkennen.

Wir können ein magnetisches Feld von einem elektrischen dadurch unterscheiden, daß wir die Einwirkung auf andere Stoffe untersuchen, die im elektrischen Feld ausgerichtet werden. Finden wir dabei Stoffe, auf die das Magnetfeld nicht einwirkt, so sind wir sicher, es nicht mit einem elektrischen verwechselt zu haben.

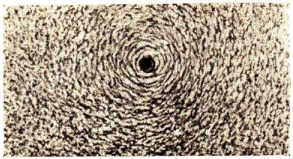


Abb. 43. Feld quer zu einem geradlinigen Leiter

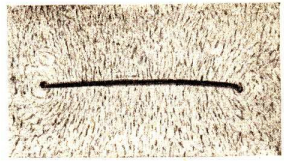


Abb. 44. Feld quer zu einer Kreiswindung

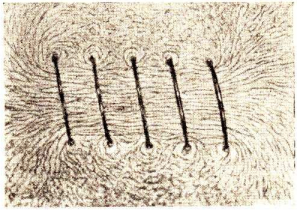


Abb. 45. Feld einer weitgewickelten Spule

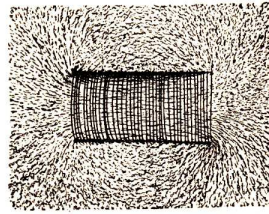


Abb. 46. Feld einer enggewickelten Spule

2. Magnetische Feldlinienbilder. Mit Hilfe von Eisenfeilspänen lassen sich magnetische Feldlinienbilder erzeugen, aus denen man die Form des Feldes erkennen kann. Die Abb. 43–47 zeigen Felder verschiedener Art. Aus solchen Bildern und anderen Erfahrungen hat man verallgemeinernd geschlossen:

Die magnetischen Feldlinien sind in sich geschlossene Kurven, d. h. sie besitzen weder Anfang noch Ende.

Sie durchkreuzen einander nirgends, d. h. in jedem Punkt gibt es nur eine Einstellrichtung.

Sie umschlingen den stromdurchflossenen Leiter.

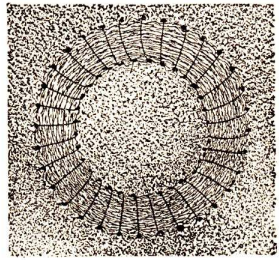


Abb. 47. Feld einer Ringspule

Durch die Form der Feldlinien sind ausgezeichnet: das homogene Feld im Inneren einer gestreckten Spule (parallele, geradlinige Feldlinien), das ringförmige Feld in einer Ringspule (kreisförmige Feldlinien) und das Feld um einen geradlinigen Leiter (kreisförmige Feldlinien).



Abb. 48



Abb. 49

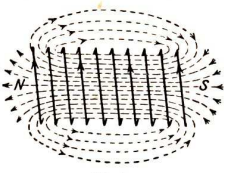


Abb. 50



Abb. 51

Stromrichtung und Feldlinienrichtung

In Abb. 48 und 49 rechts geht die Stromrichtung aus der Papierebene senkrecht nach vorn, in Abb. 49 links senkrecht nach hinten

3. Der Richtungssinn der Feldlinien. Jede Magnetnadel stellt sich tangential zu den Feldlinien so ein, daß ihr Nordpol in eine ganz bestimmte Richtung zeigt. Diese Richtung geht in die entgegengesetzte über, wenn die Stromrichtung umgekehrt wird (Abb. 48–51).

Die magnetischen Feldlinien besitzen einen Richtungssinn.

Als positive Richtung gilt diejenige, in die der Nordpol der Magnetnadel, von der Nadelmitte aus gesehen, weist.

Der Nordpol einer Magnetnadel weist nach dem geographischen Norden, weil die Erdkugel selbst ein großer Magnet ist, dessen Südpol sich in der Nähe des geographischen Nordpols befindet. (Ungleichnamige magnetische Pole ziehen sich an.)

Die Richtungen der magnetischen Feldlinien und des elektrischen Stromes sind durch die Rechte-Hand-Regel (Abb. 51) bestimmt:

Umschließen die Finger der rechten Hand den Stromleiter, so daß der Daumen in die Richtung des elektrischen Stromes zeigt, dann verlaufen die Feldlinien in der Richtung, in welche die vier Finger zeigen.

§ 12. Die magnetische Feldstärke

1. Die Feldstärke im homogenen Feld. Bringt man eine allseits bewegliche Magnetnadel an irgend eine Stelle eines magnetischen Feldes, so zeigt sie die Richtung der dort verlaufenden magnetischen Feldlinien an. Sie läßt aber noch eine andere Eigenschaft des magnetischen Feldes erkennen.

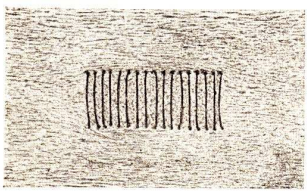


Abb. 52. Stromdurchflossene Spule im Magnetfeld

Ehe sie sich tangential zur Feldlinie einstellt, schwingt sie einige Male hin und her. Die Frequenz dieser Schwingungen ist nicht an allen Stellen des Feldes dieselbe. Eine höhere Frequenz zeigt an, daß an der betreffenden Stelle eine größere Kraft auf die Magnetnadel einwirkt. Die sich in der Kraftwirkung auf eine Magnetnadel äußernde Eigenschaft des magnetischen Feldes kennzeich-

net man durch den Begriff der magnetischen Feldstärke. Die Größe der einwirkenden Kraft können wir als Maß für die Größe der Feldstärke nehmen. Wir können aber auch auf einem anderen Wege ein Maß für die Feldstärke festlegen. In einer stromdurchflossenen Spule I befinde sich eine stromdurchflossene Spule II. Die Magnetfelder beider Spulen überlagern sich. Die beiden Ströme mögen entgegengesetzt gerichtet sein. Man kann nun durch Änderung der Stromstärken das Feld im Innern der kleinen Spule verschwinden lassen. In Abb. 52 ist zu erkennen, daß Eisenfeilicht im Innern der kleinen Spule in diesem Falle nicht gerichtet wird. Analog zum elektrischen Feld (vgl. § 8, 2) definieren wir:

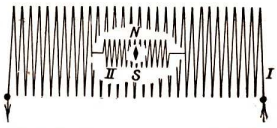


Abb. 53. Messung der magnetischen Feldstärke

Magnetische Feldstärken sind einander gleich, wenn der Raum, in dem sie entgegengesetzt zueinander gerichtet verlaufen, feldfrei ist (Maßvergleichung).

Stellen wir eine Magnetnadel in einem solchen Raum auf (im Inneren der kleinen Spule, Abb. 53), so wird sie von den Spulenfeldern nicht gerichtet. Da aber die Erde von einem magnetischen Feld umgeben ist, folgt sie der Richtwirkung des Erdfeldes, als ob die beiden Felder, die einander aufheben, nicht vorhanden wären. Stellen wir die Spulen so auf, daß das magnetische Feld der Erde senkrecht zu den Feldlinien im Innern der Spulen verläuft, dann spielt die Nadel in dieser Richtung ein. Sie wird aber aus der senkrechten Lage mehr oder weniger abgelenkt, wenn die Felder im Innern der Spulen nicht genau entgegengesetzt gleich stark sind. Auf diese Weise können wir die Feldstärken von beliebigen Spulen I mit der Feldstärke der Spule II vergleichen.

Durch die innere Spule II fließt ein unveränderter Strom, der ein konstantes Magnetfeld erzeugt. Als äußere Spulen benutzen wir nacheinander mehrere 30 cm lange Spulen, die sich durch ihre Windungszahl w unterscheiden. Durch jede dieser Spulen lassen wir einen Strom solcher Stärke fließen, daß das Innere der kleinen Spule feldfrei wird. Aus der ersten Tabelle ergibt sich, daß die Feldstärken im Innern der Spulen I einander gleich sind, wenn $I \cdot w$ eine Konstante ist. Dieses Produkt bezeichnen wir als „Amperewindungen" (Aw). Wir verwenden dann als äußere Spulen solche von gleicher Windungszahl w aber verschiedener Länge l und verfahren wie vorher. Es ergibt sich aus der zweiten Tabelle, daß die Feldstärken im Innern von I dieselben sind, wenn der Quotient I/l eine Konstante ist.

Windungszahl w	Stromstärke I Ampere	Amperewindungen $I \cdot w$
60	3,5	210
120	1,7	204
180	1,15	207
355	0,59	209

Länge l cm	Stromstärke I Ampere	$\frac{I}{l}$
48	6,0	0,125
38	4,6	0,121
29	3,6	0,124
20,5	2,6	0,122

In einer dritten Versuchsreihe nehmen wir als äußere Spulen solche, die sich nur durch ihren Querschnitt, nicht aber in Länge und Windungszahl unterscheiden. Wir finden, daß die Feldstärke im Innern einer Spule unabhängig davon ist, wie groß ihr Querschnitt ist, sofern ihr Durchmesser immer noch klein gegenüber ihrer Länge ist.
Wir gelangen also zu folgendem Ergebnis:

Feldstärken in Spulen sind einander gleich, wenn für sie die Zahl der Amperewindungen je cm denselben Wert besitzt. Dieser ist gegeben durch $\frac{Iw}{l}$.

Maßeichung. Benutzen wir bei gleicher Stromstärke statt einer äußeren Spule zwei oder mehrere (n) Spulen, die wir ineinanderstecken (oder eine Spule, die zwei oder n gleiche Wicklungen trägt), so schreibt man den entstehenden Feldern die doppelte oder n-fache Feldstärke zu. Ändern wir nun den in der inneren Spule fließenden Strom so lange, bis ihr Inneres feldfrei ist, dann finden wir:

Die magnetische Feldstärke $\mathfrak{H}$ in einer Spule ist proportional der Stromstärke I.

Untersuchungen zeigen, daß es gleichgültig ist, an welcher Stelle im Innern der großen Spule wir messen. Überall herrscht die gleiche Feldstärke. Solche Felder nennen wir homogen. Nur in Spulen, die im Verhältnis zu ihrem Querschnitt lang sind, oder in geschlossenen Ringspulen treten homogene Felder auf. Für die Feldstärke kommt es nicht auf die Windungszahl und die Länge der Spule an sich an, sondern nur auf das Verhältnis w/l der Windungszahl zur Spulenlänge. Wir nennen $w_1 = w/l$ die „Windungszahl je cm" und finden dann als Gesetz

$$\mathfrak{H} \sim w_1 \cdot I.$$

Maßeinheit. Man hat festgesetzt: Die Einheit der Feldstärke herrscht im Innern einer Spule, die eine Windung je 1 cm Länge besitzt und vom Strom 1 A durchflossen wird. Dieses Maß der Feldstärke bezeichnen wir mit dem in der Technik gebrauchten Ausdruck: **Amperewindung/Zentimeter (Aw/cm).** Wir erhalten dann das Gesetz:

Die magnetische Feldstärke $\mathfrak{H}$ im Innern einer stromdurchflossenen Spule von der Länge l und der Windungszahl w, die vom Strom I Ampere durchflossen wird, ist

$$\mathfrak{H} = \frac{w}{l} \cdot I.$$

2. Die Feldstärke an verschiedenen Stellen des Feldes einer Spule. Stellen wir die kleine Spule an verschiedenen Stellen des Feldes der großen Spule auf, so finden wir:

Wo die Feldlinien im Innern parallel zueinander verlaufen, ist die Feldstärke überall dieselbe.

Sie ist in der Nähe der Enden der Spule wesentlich kleiner. Dort laufen die Feldlinien auseinander, wie das Feldlinienbild zeigt (Abb. 46 und 50).

3. Torsionsmagnetometer. Zum Messen der Feldstärke ist auch ein Torsionsmagnetometer geeignet. Wir benutzen die Drehwirkung, die das Magnetfeld einer Spule auf eine Magnetnadel ausübt. Die auf den Nordpol der Nadel wirkende Kraft betrachten wir als Maß für die an der betreffenden Stelle herrschende magnetische Feldstärke $\mathfrak{H}$.

Wir bringen in die Spule das Torsionsmagnetometer, wie es in Abb. 54 von vorn gesehen und in der Mitte der Abb. 55 von der Seite gesehen dargestellt ist. Es besteht im wesentlichen aus einer Magnetnadel M, die an einem lotrecht ausgespannten Draht D befestigt ist. Auf ein in

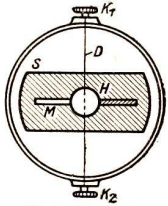


Abb. 54. Magnetometer
M Magnet, D Torsionsdraht, H Hohlspiegel, K_1 und K_2 Stellschrauben, S Glimmerscheibe zur Dämpfung der Schwingungen

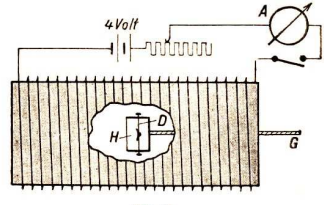


Abb. 55
Magnetometer in einer stromdurchflossenen Spule.
D Torsionsdraht, H Hohlspiegel, G Handgriff

ihrer Mitte angebrachtes Hohlspiegelchen H läßt man ein Bündel paralleler Lichtstrahlen fallen, dessen Ablenkung man beobachtet. Man stellt die Nadel senkrecht zur Spulenachse ein und schickt dann einen Strom durch die Spule. Wir können das Magnetometer im Inneren einer Spule eichen (Abb. 55). Bei kleinen Drehwinkeln ist der Winkelausschlag der magnetischen Feldstärke proportional. Nun können wir beliebige Felder ausmessen. Z. B. ergibt sich wieder, daß im Innern einer langen Spule die Feldstärke überall dieselbe ist.

§ 13. Vergleichende Betrachtung elektrischer und magnetischer Felder

1. Die Form des unveränderlichen Feldes. a) Die elektrischen Feldlinien besitzen Anfang und Ende, d. h. es gibt elektrische Ladungen.

Die magnetischen Feldlinien sind in sich geschlossene Kurven. Es gibt also keine „magnetischen Ladungen".

b) Die elektrischen Feldlinien enden senkrecht auf der Oberfläche eines geladenen Leiters.

Die magnetischen Feldlinien umschlingen einen stromdurchflossenen Leiter.

c) Elektrische ebenso wie magnetische Feldlinien durchkreuzen einander nirgends und haben einen bestimmten Richtungssinn. Sie laufen im homogenen Feld geradlinig und parallel zueinander, während sie in einem inhomogenen Feld nichtparallel (oder als konzentrische Kreise) verlaufen. (Abb. 12, 43, 47).

Im magnetischen Feld kann sich die Feldstärke senkrecht zu den Feldlinien ändern, auch wenn die Feldlinien parallel verlaufen. Ein Beispiel dafür ist das magnetische Feld um einen stromdurchflossenen geraden Draht, wo die Feldlinien konzentrische Kreise sind und die Feldstärke nach außen hin abnimmt (vgl. S. 40, Abb. 48).

2. Beziehungen zwischen Spannung und Feldstärke. Elektrische Spannung herrscht nicht nur zwischen den Enden, sondern auch zwischen zwei beliebigen Punkten einer Feldlinie. Unter der Feldstärke $\mathfrak{E}$ an einer bestimmten Stelle des Feldes versteht man den Quotienten aus dem Spannungsunterschied ΔU und dem Abstand Δs der Punkte der Feldlinie, zwischen denen die Spannung besteht. Es ist (§ 4):

$$\mathfrak{E} = \frac{\Delta U}{\Delta s}.$$

Entsprechend kann man eine magnetische Spannung ΔV zwischen zwei Punkten einer magnetischen Feldlinie, die den kleinen Abstand Δs haben, definieren, indem man festsetzt

$$\Delta V = \mathfrak{H} \Delta s.$$

Es gilt dann entsprechend dem elektrischen Feld

$$\mathfrak{H} = \frac{\Delta V}{\Delta s}.$$

Zwischen zwei beliebigen Punkten einer Feldlinie erhält man die Spannung, indem man die Feldlinie in viele kleine Abschnitte Δs unterteilt, die Teilspannungen $\Delta V = \mathfrak{H} \Delta s$ bestimmt und dann alle diese ΔV-Werte addiert. Da die magnetische Feldstärke in Aw/cm und Δs in cm gemessen wird, mißt man magnetische Spannungen in Amperewindungen (Aw).
Die Einheit der magnetischen Spannung hat also dieselbe Dimension wie die Einheit der Stromstärke.

3. Die Spannung. In einem konstanten elektrischen Feld ist die Spannung zwischen den Enden einer jeden Feldlinie dieselbe, auch wenn sie verschiedene Länge besitzen (Abb. 56). Auch in einem konstanten magnetischen Feld besitzen die Feldlinien verschiedene Länge (Abb. 57), und auch hier gilt, wie man durch Messungen nachweisen kann:

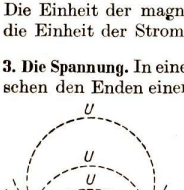


Abb. 56
Gleiche Spannung längs verschiedener elektrischer Feldlinien

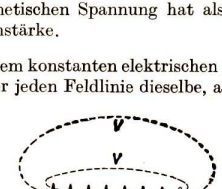


Abb. 57
Gleiche Spannung längs verschiedener magnetischer Feldlinien

In allen Feldlinien ein und desselben magnetischen Feldes herrscht dieselbe Spannung.

Bestimmt man nämlich, wie eben gezeigt wurde, mit Hilfe der magnetischen Feldstärke die magnetische Spannung $V = \mathfrak{H}_1 \Delta s_1 + \mathfrak{H}_2 \Delta s_2 + \ldots . \mathfrak{H}_n \Delta s_n$, indem man die ganze geschlossene Feldlinie in n Teilstrecken Δs unterteilt, so daß die letzte Strecke wieder an die erste grenzt, so erhält man für V immer denselben Wert, gleichgültig für welche Feldlinie man die Bestimmung ausführt. Und zwar erhält man, wenn die Feldlinie m Leiter, in denen

die Ströme I_1, $I_2 \ldots I_m$ fließen, einschließt, $V = (I_1 + I_2 + \cdots I_m)$ Amperewindungen. Dabei sind entgegengesetzt fließende Ströme negativ zu nehmen, also abzuziehen.

Für die kreisförmigen Feldlinien um einen geradlinigen Draht, in dem der Strom I fließt, ergibt also diese Bestimmung $V = I = 2\pi r \cdot \mathfrak{H}$, für eine Feldlinie im Abstand r (also den Kreis mit dem Umfang $2\pi r$), längs der die Feldstärke (schon aus Symmetriegründen) den konstanten Wert $\mathfrak{H}$ hat, also

$$\mathfrak{H} = \frac{I}{2\pi r}.$$

Da dies für jede Feldlinie gilt, ist also die Feldstärke $\mathfrak{H}$ umgekehrt proportional dem Abstand r.

§ 14. Materie im magnetischen Feld

1. Eisen im Magnetfeld. Wir stellen eine Magnetnadel auf den Experimentiertisch. Sie spielt nach Norden ein. Senkrecht zu ihr wird, wie Abb. 58 zeigt, eine Spule aufgestellt. Sobald Strom durch die Spule fließt, wird die Nadel durch das Magnetfeld der Spule aus ihrer Ruhelage herausgezogen. Wir wählen den Abstand der Spule von der Nadel so groß, daß sie nur schwach abgelenkt wird. – Stecken wir dann einen Eisenstab oder ein Bündel Eisendrähte in die stromdurchflossene Spule, so wird die Magnetnadel sehr stark nach der Spule hingezogen. Das magnetische Feld der Spule, das die Nadel abgelenkt hatte, wird also durch das Eisen erheblich verstärkt. – Ziehen wir den Eisenstab heraus, so ist das Feld wieder so schwach wie vorher. Stecken wir ihn wieder in die Spule, so wird es wieder verstärkt. – Die Richtung des auf die Nadel einwirkenden Feldes ist durch die Richtung des Stromes bedingt, der durch die Spule fließt. Untersuchen wir dann mit Hilfe von Eisenfeilicht das magnetische Feld einer von demselben Strom durchflossenen Spule mit und ohne Eisenkern (Abb. 46, 59), so finden wir keinen Unterschied im Verlauf der Feldlinien. Wir haben aber erkannt, daß die von der Spule mit Eisenkern ausgeübte Richtwirkung wesentlich stärker ist. Das Ergebnis der Untersuchung können wir in folgender Weise aussprechen:

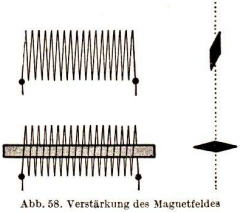


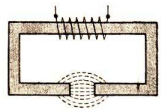
Abb. 58. Verstärkung des Magnetfeldes durch Eisen

Der in das homogene Feld einer Spule gebrachte Eisenstab verhält sich, solange Strom durch die Spule fließt, wie eine stromdurchflossene Spule von hoher Amperewindungszahl je Zentimeter.

Geben wir dem durch die Spule gesteckten Eisenstab die in den Abbildungen 60, 61 und 62 wiedergegebenen Formen, dann lassen uns die Feldlinienbilder folgendes erkennen:


Abb. 59


Abb. 60


Abb. 61

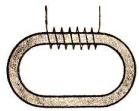
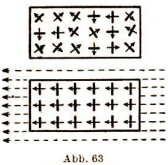

Abb. 62

Abb. 59–62. Feldlinienbilder von Spulen mit verschieden geformten Eisenkernen

Eisen, das in das Innere einer stromdurchflossenen Spule gebracht wird und über die Spule hinausragt, verhindert, daß die Feldlinien am Ende der Spule sofort zerstreut werden. Besitzt es die Form eines in sich geschlossenen Ringes, so verlaufen die magnetischen Feldlinien fast nur im Eisen. Sie bilden im Eisen in sich geschlossene Kurven wie in einer ringförmigen stromdurchflossenen Spule (Abb. 47).

2. Molekularströme im Eisen. Dieses Verhalten des Eisens erklärt man in folgender Weise: Man nimmt an, daß in den Molekülen oder Atomen des Eisens dauernd elektrische Kreisströme von unveränderlicher Stärke fließen. Man nennt diese Ströme Molekularströme. Zu jedem Molekularstrom gehört ein magnetisches Feld. Die Feldlinien der Molekularströme überlagern sich.

Herrscht völlige Unordnung in der Lage der Moleküle, so heben sich die Wirkungen der einzelnen Molekularmagnetfelder gegenseitig auf. Nach außen dringen dann keine Feldlinien. Das Eisen ist „unmagnetisch", obwohl es außerordentlich viele Molekularmagnetfelder enthält (Abb. 63 oben).


Abb. 63
Gleichrichtung der Molekularströme

Wird der Eisenstab aber in ein Magnetfeld gebracht, so werden die Moleküle gedreht, bis die Feldlinien der Molekularströme dieselbe Richtung besitzen wie die Feldlinien des von außen wirkenden Feldes (Abb. 63 unten). Ist das Feld schwach, so wird zunächst nur ein kleiner Teil der Moleküle „gleichgerichtet". Wird das von außen einwirkende Feld stärker, so wird die Zahl der gleichgerichteten Molekularströme immer größer. Die gleichgerichteten Molekularströme liegen dann wie die gleichgerichteten Windungen einer Spule hinter- und nebeneinander. Auf diese Weise entsteht im Innern des Eisens ein sehr starkes magnetisches Feld, dessen Feldlinien parallel zu denjenigen Feldlinien verlaufen, die richtunggebend auf die Molekularströme wirken. An der einen Stirnfläche des Eisenstabes treten diese Linien aus, an der anderen treten sie ein; außen schließen sie sich.

Hört die Einwirkung des äußeren Feldes auf, so gleiten entweder die Moleküle in die ungeordnete Lage zurück – der Eisenstab ist dann wieder un-

magnetisch – oder ein Teil der Molekularströme bleibt gleichgerichtet – das Eisen ist dann noch magnetisch. Es zeigt **„remanenten Magnetismus"**. Diese Eigenschaft besitzen viele der gebräuchlichen Sorten des Eisens und ein großer Teil von ferromagnetischen Legierungen. Starken remanenten Magnetismus zeigt z. B. Stahl. Alle Legierungen mit hoher Remanenz eignen sich zur Herstellung von Dauermagneten. Den zurückbleibenden Magnetismus des Eisens kann man oft schon dadurch beseitigen, daß man das Eisen mit einem Hammer klopft. Auch dies spricht für die oben gegebene Erklärung. Jeder permanente Magnet gleicht einer gleich langen Spule mit sehr hoher Amperewindungszahl. Abb. 64 deutet an, wie die magnetischen Feldlinien in einem Hufeisenmagneten verlaufen. Auf diese Weise wird mit Hilfe der Annahme von Molekularströmen die starke magnetische Wirkung des Eisens erklärt. Es ist experimentell nachgewiesen worden, daß die Molekularströme wirklich existieren und von Elektronen hervorgerufen werden. – Nach dieser Theorie sind alle konstanten Magnetfelder mit elektrischen Strömen verknüpft, so wie alle konstanten elektrischen Felder mit elektrischen Ladungen.

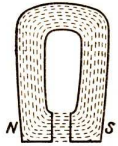


Abb. 64. Verlauf der Feldlinien im Hufeisenmagneten

3. Die vom Magnetfeld auf Eisen ausgeübte Richtwirkung. Die Molekularströme im Eisen werden nicht nur im Innern einer stromdurchflossenen Spule, sondern in jedem Magnetfeld gleichgerichtet.

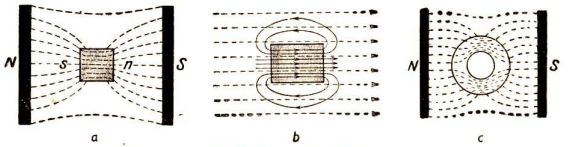


Abb. 65. Eisen im Magnetfeld

Es entsteht an der Stelle, wo das Eisen ist, ein resultierendes Feld, das sich aus dem ursprünglichen Feld und dem im Eisen erzeugten Feld zusammensetzt. Abb. 65a zeigt, in welcher Weise sich ein homogenes Feld ändert, wenn ein Eisenstück hineingebracht wird. Abb. 65b deutet den Verlauf der Feldlinien beider Felder an, die sich überlagern und dadurch schwächen oder verstärken, Abb. 65c zeigt, welche Veränderung ein Eisenring im homogenen Feld hervorruft. Das Innere des Rings ist frei von Feldlinien. Aus diesem Verhalten des Eisens erklärt sich die auf Eisenfeilicht ausgeübte Richtwirkung des Feldes: Die Späne werden durch das Feld magnetisiert und wie kleine Magnetnadeln ausgerichtet.

4. Andere Stoffe im Magnetfeld. Jeder Stoff, in dem Molekularströme wie im Eisen durch ein Magnetfeld gleichgerichtet werden, muß sich im Magnet-

feld ähnlich wie Eisen verhalten. Untersucht man die Stoffe in dieser Hinsicht, indem man sie als kleine, leicht drehbare Stäbchen in ein starkes Magnetfeld hängt, dann ergibt sich: Die Stoffe lassen sich nach ihren magnetischen Eigenschaften in drei Gruppen einteilen:

a) Ferromagnetische Stoffe. Sie werden stark magnetisch, wenn auch nicht immer so stark wie Eisen selbst. Zu ihnen gehören die Metalle Kobalt und Nickel sowie einige einfache Legierungen, u. a. aus Mangan und Kupfer, und auch viele Legierungen mit Eisen, Nickel oder Kobalt.

b) Paramagnetische Stoffe. Sie erfahren eine sehr schwache Beeinflussung im Magnetfeld, die der Richtung nach der auf Eisen ausgeübten Wirkung gleicht. Stäbchen aus paramagnetischen Stoffen stellen sich in Richtung der Feldlinien. Alle Stoffe dieser Art, also auch Flüssigkeiten in einem Glasröhrchen werden in Gebiete größerer Feldstärke hineingezogen. Paramagnetisch sind Platin, Uran, Mangan, Hartgummi, Sauerstoff und Eisenchloridlösungen.

c) Diamagnetische Stoffe. Sie zeigen eine schwache, dem Verhalten des Eisens entgegengesetzte Beeinflussung. Stäbchen aus festen diamagnetischen Stoffen stellen sich senkrecht zu den Feldlinien. Alle Stoffe dieser Art werden aus Gebieten höherer Feldstärke herausgedrängt. Wismut, Steinsalz, Kupfer, Glas, Wasser gehören zu dieser Gruppe. Das diamagnetische Verhalten findet man bei weit mehr Stoffen als das paramagnetische.

§ 15. Magnetische Kraftwirkungen

1. Feldstärke und Feldlinienzahl. Wie das elektrische Feld, so besitzt auch das magnetische Feld Energie, die sich z. B. in mechanische Energie umwandelt, wenn ein Magnet ein Eisenstück anzieht.

Aus Feldlinienbildern und der Messung der Feldstärke $\mathfrak{H}$ mit dem Magnetometer wissen wir, daß die Feldstärke an den Stellen groß ist, wo die Feldliniendichte groß ist (Abb. 66 $\mathfrak{H} > \mathfrak{H}_1$).

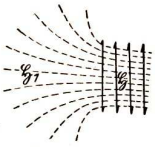


Abb. 66. Feldlinien am Ende einer Magnetspule

Wir haben ferner gefunden, daß die Feldstärke $\mathfrak{H}$ in einer weiten Spule genau so groß wie in einer engen ist, vorausgesetzt, daß die Spulen in w/l, der Windungszahl je Zentimeter, übereinstimmen und von demselben Strom I durchflossen werden. In Abb. 67 sind eine weite quadratische Spule und vier enge Spulen gezeichnet, die genau denselben Raum einnehmen. Stimmen sie in w, l und I überein, so herrscht in der weiten Spule dieselbe Feldstärke wie in dem Raum jeder der vier engen Spulen.

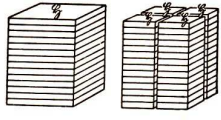


Abb. 67. Zusammensetzung einer Magnetspule aus mehreren einzelnen

Zur Veranschaulichung des Magnetfeldes einer Spule kann man Feldlinien in der Weise einzeichnen, daß die Anzahl der Linien je Flächeneinheit des Querschnittes der Spule der Feldstärke an der betreffenden Stelle proportional ist. Die Wahl des Proportionalitätsfaktors ist dabei willkürlich.

Zeichnen wir nach dieser Vereinbarung das Feldlinienbild der kleinen Spulen, also in jeder der vier Spulen gleich viel Feldlinien, da ja die Felder in ihnen gleich sind und die Spulen gleiche Querschnitte haben, so sind in diesem Bild in der großen Spule, die man sich aus den vier kleinen zusammengesetzt denken kann, viermal so viel Feldlinien vorhanden, wie in jeder der vier kleinen. Wir nennen nun das Produkt aus der magnetischen Feldstärke $\mathfrak{H}$, dem Querschnitt q der Spule und einer festen, aber noch unbestimmten Zahl k anschaulich „Feldlinienzahl" N. Dann ist in der großen Spule bei gleicher Feldstärke die Feldlinienzahl viermal so groß wie in jeder der kleinen Spulen. Obwohl der Name Feldlinienzahl bequem ist, darf man nicht übersehen, daß wir nicht in der Lage sind, Feldlinien zu zählen, denn das Feld besteht nicht aus einzelnen, endlich vielen Feldlinien, sondern zwischen zwei Feldlinien kann man sich immer wieder neue gezeichnet denken. Deshalb können wir auch über k noch verfügen. Wir werden in § 17 eine exaktere, bequem meßbare Größe kennenlernen, die auch dem Produkt $\mathfrak{H} \cdot q$ proportional ist, nämlich den induzierten Spannungsstoß. Dann werden wir den hier noch unbestimmten Faktor k festlegen.

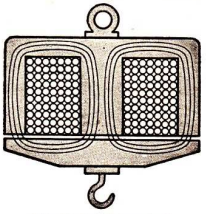


Abb. 68. Feldlinienverlauf in einem Elektromagneten

2. Feldstärke und Permeabilität[1]. Elektromagnete üben große Kräfte aus. Abb. 68 stellt den Verlauf der magnetischen Feldlinien eines Elektromagneten dar. Die Kraftwirkung hängt ab von der Größe der Feldstärke, dem Querschnitt der Spule und dem Stoff in ihrem Inneren. Das Eisen, daß die stromdurchflossenen Spulen erfüllt und umhüllt und durch den Anker zu einem geschlossenen Doppelring gestaltet ist, wirkt wie eine Spule von hoher Amperewindungszahl. Es vermehrt die Zahl der magnetischen Feldlinien außerordentlich stark.

Man nennt die Zahl μ^*, die angibt, wievielmal so groß die magnetische Feldstärke unmittelbar vor dem Ende einer langgestreckten stromdurchflossenen Spule wird, wenn die Spule von einem Stoff ausgefüllt wird, die (relative) Permeabilität des Stoffes.

Die nebenstehende Tabelle macht einige Angaben über die Größe von μ^*, (auf die genaueren Meßverfahren können wir hier nicht eingehen). Aus ihr ersehen wir, daß Eisen eine besonders große Permeabilität besitzt. (Diese ist allerdings stark von der Feldstärke im Innern der leeren Spule abhängig, vgl. § 19.)

Permeabilität einiger Stoffe

Stoff		Permeabilität μ^*
Eisen	ferromagnetisch	bis 5 000
Nickel	ferromagnetisch	bis 300
Kobalt	ferromagnetisch	bis 170
Platin	paramagnetisch	1,000 36
Aluminium	paramagnetisch	1,000 023
Hartgummi	paramagnetisch	1,000 014
Wismut	diamagnetisch	0,999 824
Kupfer	diamagnetisch	0,999 991
Glas	diamagnetisch	0,999 987

1) permeabilis (lat.) = durchdringbar

3. Die Bewegung eines Stromleiters im Magnetfeld. Im Felde eines Hufeisenmagneten (Abb. 69a und b) befinden sich zwei waagerecht gelagerte Metallstäbe. Über diese ist ein gerader, zylindrischer Draht AB gelegt. Wird in

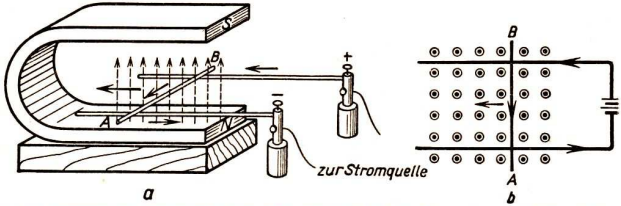


Abb. 69. Bewegung eines Stromleiters im Magnetfeld. Beim Einschalten des Stromes bewegt sich AB nach links

der angedeuteten Weise Strom eingeschaltet, so bewegt sich der Leiter AB nach links, bei der Umkehrung der Stromrichtung nach rechts. Er wird also senkrecht zu den Kraftlinien des Feldes und senkrecht zu seiner Längsrichtung bewegt und schneidet dabei die Feldlinien.

Die Ablenkung beruht auf der Wechselwirkung der Magnetfelder des Hufeisenmagneten und des stromdurchflossenen Leiters AB.

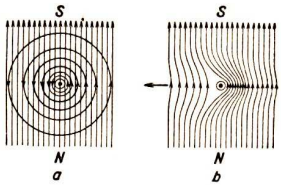


Abb. 70. Überlagerung der Feldlinien von Magnetfeld und Leiter

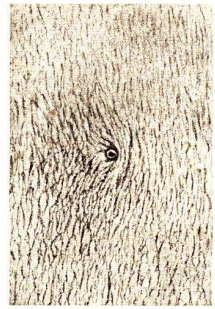


Abb. 71. Feldlinienbild zur Ablenkung eines stromdurchflossenen Leiters

In Abb. 70a sind die parallel verlaufenden Feldlinien des Hufeisenmagneten und die aus konzentrischen Kreisen bestehenden Feldlinien des stromdurchflossenen Leiters AB gezeichnet. Der Leiter steht senkrecht auf der Ebene der Abb. Der Strom ist nach vorn gerichtet. Die beiden Magnetfelder überlagern sich. Links vom Leiter wirken sie gegeneinander und schwächen sich, rechts vom Leiter haben alle Feldlinien die gleiche Richtung, dort wird also

das Feld verstärkt. In Abb. 70b ist der Verlauf der Feldlinien des durch Überlagerung entstandenen resultierenden Feldes dargestellt, Abb. 71 zeigt das durch Eisenfeilicht sichtbar gemachte Feld. Man erkennt in Übereinstimmung mit Abb. 70b, wie sich die Feldlinien auf der rechten Seite des Leiters zusammendrängen und gleichsam wie gespannte Fäden den Leiter nach der Seite des schwächeren Feldes hin drücken.

Bei der Ablenkung eines Stromleiters in einem Magnetfelde kann man im Sinne der folgenden Merkregel den Strom als die Ursache, das Magnetfeld als die Vermittlung und die Bewegung als die Wirkung ansehen. Die Richtung der Ablenkung kann man sich mittels der Dreifingerregel der rechten Hand nach folgender Vorschrift merken:

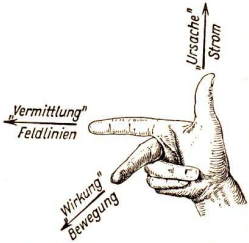


Abb. 72. Dreifingerregel der rechten Hand

Man halte (Abb. 72) den Daumen, den Zeigefinger und den Mittelfinger der rechten Hand so, daß sie rechte Winkel miteinander bilden. Bringt man dann:

den Daumen in die Richtung der Ursache, also in die Richtung des Stromes,

den Zeigefinger in die Richtung der Vermittlung, also in die Richtung der Kraftlinien, so zeigt

der Mittelfinger in die Richtung der Wirkung, also in die Richtung der Bewegung.

Diese gedächtnismäßige Verknüpfung von Ursache, Vermittlung und Wirkung bezeichnet man auch als U-V-W-Regel. Sie wird uns noch an anderer Stelle begegnen (§ 17).

4. Anziehungs- und Abstoßungsgesetz. Befindet sich ein Dauermagnet N S in einem Magnetfeld, so lagert sich das Feld seiner Molekularströme über das andere. In Abb. 73 wird das Feld rechts vom Dauermagneten verstärkt und auf der linken Seite geschwächt. Der Nordpol des Dauermagneten bewegt sich auf den Südpol des Feldmagneten zu. Umgekehrt wird S immer von N angezogen. Es gilt:

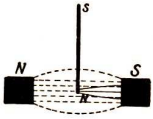


Abb. 73
Dauermagnet im Magnetfeld

Gleichartige Pole stoßen einander ab, ungleichartige ziehen einander an.

Dabei wird Feldenergie in Bewegungsenergie umgewandelt.

§ 16. Das magnetische Feld der Erde

1. Der Verlauf der Feldlinien des magnetischen Erdfeldes. Mit Hilfe einer um eine horizontale und vertikale Achse beweglichen Magnetnadel kann man den Verlauf der Feldlinien des magnetischen Erdfeldes bestimmen. Im Winkelmaß gemessen, heißt

die **Deklination** ihre Abweichung von der Nordsüdrichtung,
die **Inklination** ihre Abweichung von der Horizontalen.

Das magnetische Feld der Erde

Nördliche Breite	Länge östlich Greenwich 3°	6°	9°	12°	15°	18°
	Deklination (westlich) in Grad					
52°	8,1	6,7	5,0	3,6	2,5	1,3
48°	7,7	6,3	4,7	3,7	2,5	1,3
	Horizontalintensität in Oersted (s. unten)					
52°	0,182	0,183	0,183	0,184	0,184	0,184
48°	0,202	0,203	0,203	0,204	0,205	0,205
	Inklination in Grad					
52°	67,1	67,2	67,3	67,1	67,1	67,2
48°	64,3	64,2	64,0	63,9	63,9	63,9

Die Werte der Tabelle sind für das Jahr 1945 gültig. (Mitgeteilt vom Geophysikalischen Institut Potsdam.)

Über die Größe der Deklination und Inklination in Mitteleuropa gibt die voranstehende Übersicht Auskunft.

2. Die Horizontalintensität des Erdmagnetismus. Eine um eine vertikale Achse drehbare Magnetnadel schwingt in einer horizontalen Ebene hin und her. Da die Feldstärke des Erdfeldes schräg gegen den Boden gerichtet ist, wirkt nur ihre horizontale Komponente bewegend auf die Magnetnadel ein. Diese Komponente wird Horizontalintensität genannt. Hat man die Größe der Horizontalintensität $\mathfrak{H}^*$ mit einem Magnetometer bestimmt, so kann man mit Hilfe des Inklinationswinkels i die Totalintensität $\mathfrak{H}_0$, d.h. die wahre Größe der Erdfeldstärke, berechnen (Abb. 74). Es ist

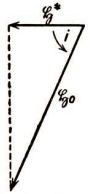


Abb. 74. Berechnung der Totalintensität aus Horizontalintensität und Inklinationswinkel i

$$\mathfrak{H}^* = \mathfrak{H}_0 \cdot \cos i.$$

Die Tafel macht Angaben über die Horizontalintensität des erdmagnetischen Feldes in Mitteleuropa in Oersted (Ø). In der Technik und in diesem

Buch wird im allgemeinen als Maß der Feldstärke Amperewindung/cm gebraucht, das etwas größer ist als das oben benutzte Maß Oersted.

$$1 \text{ Amperewindung/cm (Aw/cm)} = 1{,}257 \text{ Oersted (Ø)}.$$

$$1\,Ø = \frac{10}{4\pi} \text{ Aw/cm}.$$

Die Totalintensität des Erdmagnetismus beträgt in Deutschland etwa 0,36 Aw/cm oder 0,45 Ø.

3. Die Veränderlichkeit des Erdmagnetismus. Die Vorgänge, welche die Entstehung des magnetischen Erdfeldes bewirken, sind noch nicht restlos geklärt. Elektrische Ströme, die um die Erde laufen, und die Verteilung des Eisens auf der Erde spielen eine Rolle. Aber auch außerirdische Einflüsse (z. B. der Einfluß der Sonnenstrahlung) wirken mit. Dies ergibt sich deutlich aus den Veränderungen, welche die Größen des Erdmagnetismus erfahren. Sie ändern sich mit dem Wechsel von Tag und Nacht, mit den Jahreszeiten und der Sonnenfleckenperiode. Starke plötzliche Änderungen sind meist von Nordlichterscheinungen begleitet. Die in der Tabelle angegebenen Werte der Deklination verringern sich jährlich um etwa 10 Winkelminuten. Weniger stark sind die jährlichen Änderungen der Inklination und der Horizontalintensität.

C. Das elektromagnetische Feld und die elektromagnetische Induktion

§ 17. Die induzierte elektrische Spannung

1. Induktion durch Bewegen eines Leiters in einem Magnetfeld. Wir ersetzen in der Anordnung der Abb. 69 die Stromquelle durch ein Galvanometer und hängen den Leiter $A\,B$ nach Art einer Schaukel auf. (Abb. 75.) Bewegen wir ihn von außen zwischen die Schenkel des Magneten, so schneidet er die magnetischen Feldlinien. An dem Ausschlag des Galvanometers erkennen wir, daß während der Bewegung ein Stromstoß im Leiter entsteht. Führen

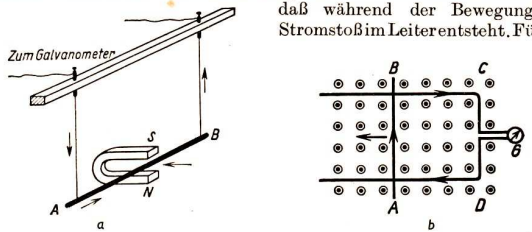


Abb. 75. Induktion durch Bewegen eines Leiters im Magnetfeld

wir den Leiter auf dem umgekehrten Wege aus dem Magnetfeld heraus, so entsteht ein Stromstoß in der entgegengesetzten Richtung. In beiden Fällen muß also im Leiter eine Spannung aufgetreten sein. Man bezeichnet den Vorgang als Induktion und spricht von einer Induktionsspannung und einem Induktionsstrom. Der Leiter bildet mit den Zuleitungen eine Leiterschleife. Achtet man auf die Beziehungen zwischen Leiterschleife und Magnetfeld während der Induktion, so ergibt sich:

In einer Leiterschleife fließt ein Induktionsstrom, wenn die „Zahl" der durch die Schleife hindurchtretenden magnetischen Feldlinien durch Bewegung des Leiters geändert wird.

Lassen wir den Leiter AB zwischen den Polen des Magneten pendeln, so zeigt das Galvanometer Wechselstrom an.
Bewegen wir ihn in der Richtung der magnetischen Feldlinien, so entsteht kein Induktionsstrom. In diesem Falle wird auch die Zahl der durch die Windungsfläche des Leiters hindurchtretenden Feldlinien nicht geändert. Abb. 75b zeigt den Querschnitt durch ein homogenes Magnetfeld mit der Feldstärke $\mathfrak{H}$. Die Feldlinien treten senkrecht durch die Leiterschleife $ABCD = q$ hindurch. Das Leiterstück AB ist beweglich. Bewegt man es in der Richtung des Pfeiles, so wird die Fläche q innerhalb der Leiterschleife vergrößert, und es entsteht im Leiter ein Stromstoß, der durch das Galvanometer G angezeigt wird. Aus Versuchen erkennt man, daß dieser Stromstoß mit der Vergrößerung Δq der Fläche q und mit der Vergrößerung der Feldstärke $\mathfrak{H}$ wächst, und zwar ist im ganzen genommen der Stromstoß der Änderung des Produktes $\mathfrak{H} \cdot q$ proportional. Man bezeichnet das Produkt $k \cdot \mathfrak{H} \cdot q$, wobei k noch einen unbestimmten Faktor bedeutet, anschaulich als magnetischen Kraftfluß N durch die Fläche q. An früherer Stelle (§ 15) hatten wir dieses Produkt als „Zahl" der magnetischen Feldlinien bezeichnet. Wir werden sehen, daß bei passender Wahl von k der magnetische Kraftfluß besonders bequem zu messen ist.



Abb. 76. Dreifingerregel der rechten Hand

2. Die Richtung des induzierten Stromes. Bei den Versuchen nach Abb. 75 verläuft der Leiter AB senkrecht zu den magnetischen Feldlinien und wird auch senkrecht zu ihnen bewegt. Die Richtung des Induktionsstromes kann man durch die Dreifingerregel der rechten Hand (U-V-W-Regel, vgl. § 15) angeben (Abb. 76). Im Sinne der Merkregel gilt diesmal die Bewegung als Ursache und das Fließen eines Induktionsstromes als Wirkung. Das Magnetfeld wird wieder als Vermittlung aufgefaßt. Es entsprechen sich also:

Daumen — Ursache — Richtung der Bewegung
Zeigefinger — Vermittlung — Richtung der magnetischen Feldlinien
Mittelfinger — Wirkung — Richtung des Induktionsstromes

3. Induktion durch Zerfall oder Aufbau eines Magnetfeldes. a) In einer ringförmigen Spule mit Eisenkern erzeugen wir ein starkes magnetisches Feld (Abb. 77). Durch die Spule führen wir einen Draht *bc*, dessen Enden wir über ein Galvanometer leitend verbinden. Unterbrechen wir den Strom, der das Magnetfeld erzeugt, dann zerfällt das Magnetfeld und gleichzeitig entsteht in dem Leiter *abcd* ein elektrischer Stromstoß. Das Galvanometer schlägt aus. Wir beachten dabei, daß das Magnetfeld im Eisenkern der Spule die vom Leiter *abcd* begrenzte Fläche in einer Richtung durchsetzt.

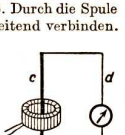


Abb. 77. Nachweis der elektrischen Induktion

Da der im Leiter auftretende Stromstoß nichts anderes als ein zerfallendes elektrisches Feld ist (§ 5), muß beim Zerfall des Magnetfeldes ein elektrisches Feld entstanden sein, das im Leiter *abcd* zerfällt. Wir finden also:

Zerfällt ein magnetisches Feld, so entsteht ein elektrisches Feld.

Das entstandene elektrische Feld wird hier dadurch nachgewiesen, daß es im Leiter einen Stromstoß hervorruft. Man sagt auch in diesem Fall, in dem Leiter wird ein elektrischer Stromstoß induziert. Wir beobachten in unserem Versuch eine mehrfache Energieumwandlung: Die Energie des magnetischen Feldes geht in die eines elektrischen Feldes und diese wieder in die der Stromwärme über.

b) Wir beobachten weiterhin, daß in der Schleife *abcd* ein elektrischer Stromstoß entsteht, wenn das Magnetfeld des Ringes aufgebaut wird. Dieser Stromstoß fließt in entgegengesetzter Richtung zu dem Stromstoß, der beim Zerfall des Magnetfeldes entsteht.

Wesentlich ist also die „Änderung" des Magnetfeldes, das den Leiter *abcd* umschlingt. Solange die Änderung dauert, fließt der Strom. Bleibt das Magnetfeld unverändert, so wird kein Strom induziert.

Ändert sich ein Magnetfeld mit Feldlinien, die einen Leiter umschlingen, so wird im Leiter ein elektrischer Stromstoß induziert (vgl. § 20,2).

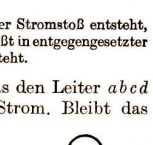


Abb. 78
In dieser Lage wird kein Strom induziert

c) Legen wir den in sich geschlossenen Leiter *abcd* so durch die ringförmige Spule, wie Abb. 78 zeigt, dann wird weder beim Entstehen noch beim Zerfall des Magnetfeldes ein Strom induziert, denn die in der Schleife entstehenden Stromstöße heben einander auf. Benutzen wir statt des Ringes einen offenen, hufeisenförmig gebogenen Elektromagneten zur Erzeugung des Magnetfeldes, dann nehmen wir folgendes wahr: Liegt der Draht so, wie Abb. 79 angibt, dann treten induzierte Stromstöße beim Entstehen und Zerfall des Magnetfeldes auf. Befindet sich der Draht außerhalb (Abb. 80) des Elektromagneten, dann sind die induzierten Stromstöße sehr schwach. Stülpen wir in dieser Lage einen hufeisenförmig gebogenen Eisenstab über die Pole des erregten Magneten (Abb. 81), dann tritt ein starker Stromstoß auf. Über-

brücken wir die Pole durch Eisen (Abb. 82), so entsteht beim Erregen des Elektromagneten ein stärkerer Stromstoß als ohne die Brücke. Im Fall der Abb. 80 durchsetzt nur ein schwaches Streufeld des Magneten (vgl. Abb. 60) die Drahtschleife, während durch den Eisenschluß in den Abb. 81 und 82 (ähnlich wie in den Abb. 61 und 62) das gesamte Feld durch die Drahtschleife geleitet wird. Umschließt der Draht beide Schenkel des Magneten, so tritt kein Stromstoß auf. Versuche dieser Art lassen uns erkennen:

Ein magnetisches Feld, das einen Leiter „umschlingt", erzeugt bei seiner Änderung im Leiter einen um so stärkeren Induktionsstrom, je stärker das Feld ist.



Abb. 79 Abb. 80 Abb. 81 Abb. 82

Abb. 79—82. Induktionsversuche mit einem Hufeisenmagneten

Da jeder stromdurchflossene Leiter in sich geschlossen ist, also mindestens eine Windung besitzt, kann man auch sagen:

Wird ein magnetisches Feld, dessen Linien nur in einer Richtung durch die Windungsfläche eines Leiters treten, geändert, so fließt ein Induktionsstrom im Leiter.

4. Der in der Spule induzierte Stromstoß. Legen wir einen Draht in zwei Windungen um den Elektromagneten (Abb. 83), dann ist der in ihm beim Entstehen und Zerfall des Magnetfeldes hervorgerufene Stromstoß doppelt so groß wie bei einer Windung. Bei Vergrößerung der Windungszahl wächst der Stromstoß proportional der Zahl der Windungen.

Da der Widerstand des Leiters unverändert bleibt, wenn der Draht in einer oder mehreren Windungen um den Elektromagneten gelegt wird, kann das Anwachsen des Stromstoßes nur auf eine entsprechend größere Spannung zurückgeführt werden, die im Leiter wirksam wird.

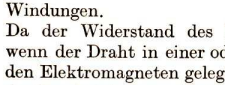


Abb. 83
Induktionsversuch mit mehreren Drahtwindungen

Beim Entstehen oder Zerfall eines Magnetfeldes, dessen Feldlinien eine Spule von w Windungen umschlingen, wird in der Spule eine w mal so große Spannung wie in einer einzigen Windung induziert.

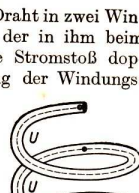


Abb. 84. Die in mehreren Drahtwindungen induzierte Spannung

Man kann sich das folgendermaßen erklären: Das induzierte elektrische Feld besitzt für jeden geschlossenen Umlauf eine gewisse elektrische Spannung (Abb. 84). Diese wird in jeder Windung des Leiters wirksam. In einer Spule

von w Windungen ist die zwischen den Enden entstehende Spannung w mal so groß wie in einer einzigen Windung, weil das magnetische Feld, das der Leiter umschlingt, w-fach wirkt.

5. Induktion und Spannungsstoß. Aus den Versuchen kann man folgern, daß um ein magnetisches Feld herum ein elektrisches Feld entsteht, solange sich das Magnetfeld ändert. Die Spannung U dieses elektrischen Feldes bewirkt, daß in einem Leiter, der die magnetischen Feldlinien umschlingt, ein Stromstoß auftritt. Der Stromstoß ist also erst eine Folgeerscheinung der zuvor entstandenen elektrischen Spannung. Wir beschreiben die Vorgänge also genauer, wenn wir sagen:

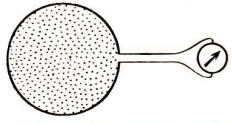


Abb. 85. Beziehung zwischen Spannungsstoß und Änderung der Feldlinienzahl

Beim Zerfall eines magnetischen Feldes in der Zeit Δt entsteht ein elektrischer Spannungsstoß $U \cdot \Delta t$.

U bedeutet dabei die mittlere Spannung und Δt die Zeit, in der sie wirksam ist. Je größer der Spannungsstoß $U \cdot \Delta t$ ist, desto größer ist auch der Stromstoß $I \cdot \Delta t = \frac{U}{R} \Delta t$, den wir im Leiter mit dem Widerstand R wahrnehmen.

Wir haben ferner beobachtet, daß die Stärke des Stromstoßes von der Zahl ΔN der entstehenden oder zerfallenden magnetischen Feldlinien, d.h. von der Änderung des magnetischen Kraftflusses $k \mathfrak{H} q$ abhängig ist. Daher muß auch der Spannungsstoß $U \cdot \Delta t$ von der Änderung ΔN des magnetischen Kraftflusses, d.h. von der Änderung der Zahl der magnetischen Feldlinien abhängen, die einen Leiter umschlingen. Umgekehrt kann man aus der Größe des Spannungsstoßes $U \cdot \Delta t$, den man durch den Stromstoß (Abb. 85) mißt, auf den Kraftfluß schließen. Man kann $\mathfrak{H} q$ auf diese Weise messen, wie sich aus den Versuchen unter 6 ergibt.

6. Das Verfahren der Messung. Zwei Verfahren sind zur Messung geeignet.

a) Messung des einzelnen Spannungsstoßes. In einer großen Spule I erzeugt man ein homogenes Feld von der Feldstärke $\mathfrak{H}$ (Abb. 86). In sie hinein stellt man senkrecht zu den magnetischen Feldlinien eine Spule II von w Windungen und vom Querschnitt q, deren Enden mit einem nach Stromstößen $I \cdot \Delta t$ geeichten Galvanometer verbunden sind. Schaltet man den Strom in I aus oder ein, so entsteht in II ein Spannungsstoß. Kennt man den Gesamtwiderstand R der kleinen Spule und des Galvanometers, so ist der Spannungsstoß $U \cdot \Delta t = R \cdot I \Delta t$. Benutzen wir Spulen von verschiedener Windungszahl w, verschiedenem Querschnitt q und Felder verschiedener Feldstärke $\mathfrak{H}$, so ergeben die Messungen im Vakuum $U \cdot \Delta t \sim \Delta (w \cdot q \cdot \mathfrak{H})$. Wir

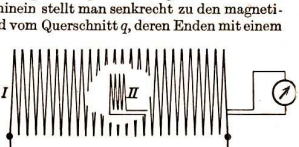


Abb. 86. Quantitative Messung der Induktion durch einen einzelnen Spannungsstoß

nennen den sich hier ergebenden Proportionalitätsfaktor μ_0 und ermitteln ihn aus Messungen von $R \cdot I \cdot \Delta t$, w, $\mathfrak{H}$ und q. Dann ist also

$$U \cdot \Delta t = \Delta (\mu_0 \cdot w \cdot q \cdot \mathfrak{H}),$$

und weiterhin ergibt sich, wenn U in Volt, $\mathfrak{H}$ in Aw/cm und q in cm² gemessen wird,

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{Aw} \cdot \text{cm}} = 1{,}256 \cdot 10^{-8} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{Aw} \cdot \text{cm}}$$

μ_0 heißt auch absolute Permeabilität des Vakuums oder Induktionskonstante. Weiter folgt, daß der durch die Windungszahl dividierte oder mit einer Windung erhaltene Spannungsstoß proportional $\mathfrak{H}\, q$ ist

$$\frac{U \Delta t}{w} = \Delta (\mu_0 \, \mathfrak{H} q).$$

Wir nannten in § 15,1 das Produkt $k \cdot \mathfrak{H} \cdot q = N$ anschaulich magnetische Feldlinienzahl und oben auch „magnetischen Kraftfluß". Dabei war der Wert des Faktors k noch offengeblieben. Wir sehen nun, daß es zweckmäßig (aber nicht notwendig) ist, $k = \mu_0$ zu setzen, d.h. den Spannungsstoß je Windung der Spule „Feldlinienzahl" oder „magnetischen Kraftfluß" zu nennen. Wir haben dann eine bequeme Methode, $\mathfrak{H} q$ und damit auch $\mathfrak{H}$ zu messen. Wir setzen also fest:

Unter der magnetischen Feldlinienzahl N in einer Fläche des Feldes oder dem magnetischen Kraftfluß durch eine Fläche des Feldes verstehen wir den Spannungsstoß, der beim Entstehen oder Verschwinden des Feldes in einer einzelnen Leiterschleife induziert wird, die diese Fläche umrandet.

$$N = \mu_0 \cdot q \cdot \mathfrak{H}.$$

Da die Spannung in Volt und die Zeit in Sekunden gemessen wird, ergibt sich:

Die Einheit der magnetischen Feldlinienzahl (oder des magnetischen Kraftflusses) ist die Voltsekunde.

Wir kehren zu dem Meßverfahren zurück und beschreiben nachstehend eines, das die Feldlinienzahl mit Hilfe eines Voltmeters zu messen gestattet. Wir können dann durch Vergleich ein Galvanometer in Voltsekunden eichen.

b) Messung der Dauerspannung. Man kann die Spule II auch durch einen Motor in rasche Drehung versetzen (Abb. 87). Dreht sie sich aus der Querstellung in die Stellung längs der magnetischen Feldlinien, so nimmt die Zahl N der von einer Windung umschlossenen Feldlinien ab; es entsteht ein Spannungsstoß. Bei einer vollen Umdrehung treten 4 und bei x Umdrehungen $4x$ derartige Spannungsstöße gleicher absoluter Größe auf. Da die induzierte Spannung nach jeder halben Umdrehung ihre Richtung wechselt, verwendet man noch einen Umschalter $F_1 F_2$ wie bei der Gleichstromdynamomaschine, um die Spannungsstöße gleichzurichten. Die vielen Spannungsstöße wirken wie eine unveränderte Spannung U. Man liest sie am Voltmeter ab. Der bei einer Vierteldrehung auftretende Spannungsstoß ist dann gleich $\frac{U \cdot \Delta t}{4x}$, wenn Δt gleich der Zeit von x Umdrehungen ist. Im übrigen verläuft die Messung wie bei a).

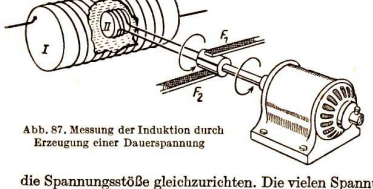


Abb. 87. Messung der Induktion durch Erzeugung einer Dauerspannung

7. Das Gesetz der Induktion. Was unter 5 für die in einer Spule induzierte Spannung nachgewiesen ist, gilt ganz allgemein für die durch Induktion erzeugte elektrische Spannung. Es gilt für das Vakuum das **Induktionsgesetz:**

Ändert sich der Kraftfluß $N = \mu_0 \mathfrak{H} q$ eines Magnetfeldes durch eine Leiterschleife um den Betrag ΔN in der Zeit Δt, so entsteht die elektrische Spannung $\frac{\Delta N}{\Delta t}$.

Für die Fläche q darf man dabei nur die Projektion der von der Schleife umrandeten Fläche in Feldrichtung nehmen, d.h. die Fläche, die man zu sehen glaubt, wenn man in Richtung der Feldlinien blickt. Ist die Schleife eben und liegt ihre Fläche parallel zur Feldrichtung, so wird keine Spannung induziert. Für $\Delta t \to 0$ ergibt sich die Spannung

$$U = \frac{dN}{dt},$$

$U = \mu_0 \frac{d(q\mathfrak{H})}{dt}$, oder wenn q konstant ist, $U = \mu_0 q \frac{d\mathfrak{H}}{dt}$.

Bei einer stofferfüllten Leiterschleife ist erfahrungsgemäß μ_0 durch $\mu = \mu_0 \cdot \mu^*$ zu ersetzen. Dann ist der Kraftfluß $N = \mu \cdot q \cdot \mathfrak{H}$ und die induzierte Spannung $U = \frac{dN}{dt}$.

§ 18. Die Grundgesetze des elektromagnetischen Feldes

1. Die Form des induzierten elektrischen Feldes. Nachdem wir durch das Gesetz der Induktion etwas über die Größe der Spannung des induzierten Feldes erfahren haben, interessiert es uns, seine Form kennenzulernen. Da das induzierte Feld im leeren Raum um das Magnetfeld herum auftritt, fehlt jeder Anhalt dafür, wo die Anfänge und Enden der elektrischen Feldlinien sein könnten, da keine elektrischen Ladungen zu beobachten sind. Man gewinnt den Eindruck, als ob die elektrischen Feldlinien des induzierten elektrischen Feldes in sich geschlossene Kurven (ohne Anfang und Ende) wären. Steht diese Vorstellung nicht im Widerspruch zu dem, was wir in § 5 erkannt haben? – Dies ist insofern nicht der Fall, als wir dort nur durch ruhende Ladungen erzeugte elektrische Felder, **elektrostatische Felder**, betrachtet haben.

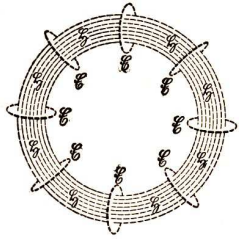


Abb. 88. Lage der elektrischen Feldlinien bei Änderung des magnetischen Feldes

Eine zweite Möglichkeit, elektrische Felder zu erzeugen, besteht in der Änderung von Magnetfeldern. Die so erzeugten Felder haben ihren Ursprung nicht in den Ladungen selbst, sondern haben in sich geschlossene Feldlinien.

Das durch Induktion erzeugte elektrische Feld besitzt in sich geschlossene elektrische Feldlinien, welche die magnetischen Feldlinien umschlingen.

Abb. 88 gibt dieser Auffassung bildlichen Ausdruck. Ob die Annahme berechtigt ist, wird hier wie bei so vielen physikalischen Fragen dadurch ent-

schieden, daß nachgeprüft wird, ob die Folgerungen mit der Erfahrung in Einklang stehen.

2. Die Maße der grundlegenden Größen. Die Maße Volt und Ampere sind zur Messung der grundlegenden elektrischen und magnetischen Größen verwendbar. Gemessen wird

im elektrischen Feld:	im magnetischen Feld:
die Spannung U in Volt,	**die Spannung V in Amperewindungen,**
die Ladung Q in Amperesekunden oder Coulomb,	**der Kraftfluß (die Feldlinienzahl) N in Voltsekunden.**

3. Die Verknüpfungen zwischen den Grundgrößen. Der Kraftfluß N durch die Fläche q, die senkrecht zu den Feldlinien eines Magnetfeldes liegt, beträgt im Vakuum (§ 17):

$$N = \mu_0 \cdot q \cdot \mathfrak{H}.$$

Schreiben wir diese Gleichung in der Form

$$\frac{N}{q} = \mu_0 \cdot \mathfrak{H},$$

so bedeutet $\frac{N}{q}$ in ihr die Dichte $\mathfrak{B}$ der magnetischen Feldlinien (oder des magnetischen Kraftflusses), da die Fläche q senkrecht von den Feldlinien durchsetzt wird. Wir erhalten für diese sog. magnetische Induktion $\mathfrak{B}$ demnach die Beziehung

$$\mathfrak{B} = \mu_0 \cdot \mathfrak{H},$$

die an jeder Stelle des magnetischen Feldes gilt. Wir können daher feststellen: In elektrischen und magnetischen Feldern gelten im Vakuum die Beziehungen

$$\frac{\mathfrak{D}}{\mathfrak{E}} = \varepsilon_0 \quad \text{und} \quad \frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{H}} = \mu_0$$

im elektrischen Feld **im magnetischen Feld.**

Entstehen Felder in einem Stoff mit der (relativen) Dielektrizitätskonstante ε^* oder der (relativen) Permeabilität μ^*, so gilt entsprechend

$$\frac{\mathfrak{D}}{\mathfrak{E}} = \varepsilon_0 \varepsilon^* = \varepsilon \qquad \frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{H}} = \mu_0 \mu^* = \mu.$$

Für elektrische Felder ist uns der Zusammenhang zwischen $\mathfrak{D}$ und $\mathfrak{E}$ schon bekannt (§ 9). Für magnetische Felder kann man ihn durch Induktionsversuche nachweisen, wenn das Magnetfeld durch eine stoffgefüllte Spule erzeugt wird. Ergibt der Induktionsversuch mit der stoffgefüllten Spule eine μ^*-mal höhere induzierte Spannung (und damit auch einen μ^*-mal größeren Stromstoß), so hat der Stoff die (relative) Permeabilität μ^*. Diese Meßvorschrift ist bequemer, als die auf Grund der Definition von μ^* in § 15.

4. Die Merkmale des elektromagnetischen Feldes. Wir stellen uns einen geladenen Plattenkondensator vor. Zwischen seinen Platten besteht ein elektrisches Feld. Verbinden wir sie durch einen leitenden Draht, so verschwindet das elektrische Feld, und dafür entsteht um den in dem Draht fließenden Entladungs-

strom ein magnetisches Feld. Das Magnetfeld umschließt die jetzt im Draht zerfallenden Feldlinien. Wenn der Kondensator entladen ist, hört an sich die stromerzeugende Kraft auf. Infolge des entstandenen Magnetfeldes besitzt der Strom aber eine Trägheit, wodurch er weiterfließt (s. Teil II B, § 13), bis der Kondensator entgegengesetzt aufgeladen wird. Durch die Abnahme des Stromes ändert sich nämlich das Magnetfeld, wodurch ein elektrisches Feld induziert wird, das den Strom in seiner alten Richtung weitertreibt, bis die entgegengesetzte Ladung des Kondensators erreicht ist. Dann beginnt der Vorgang in umgekehrter Richtung von neuem und würde nie aufhören, wenn nicht die im Draht entstehende Stromwärme ihm fortgesetzt Energie entzöge. Dadurch klingt dieser elektrische Schwingungsvorgang mehr oder weniger schnell ab, er ist gedämpft. Diesen Schwingungsvorgang, bei dem fortgesetzt elektrische in magnetische Energie umgesetzt wird, kann man gut mit den Schwingungen eines Pendels vergleichen, wobei kinetische Energie (bei B) in potentielle Energie (bei L) verwandelt wird (Abb. 89). Hier wirkt die wärmeerzeugende Luftreibung dämpfend.

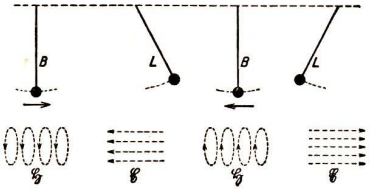


Abb. 89. Umwandlung magnetischer und elektrischer Felder

Felder, bei denen elektrische und magnetische Feldlinien miteinander verknüpft sind, heißen **„elektromagnetische Felder"**. Wir werden später sehen, daß sie sich unter bestimmten Bedingungen vom Leiter loslösen und im Raum ausbreiten können.

5. Stoffe im elektromagnetischen Feld. Da zwischen zwei Punkten eines elektrischen Feldes eine Spannung herrscht, so müssen in einem Leiter, der in ein elektromagnetisches Feld gebracht wird, Ströme fließen, wodurch sich diese Spannung vermindert und das Feld an dieser Stelle geändert wird. Bei einem Nichtleiter werden durch das Feld in den Molekülen entsprechende Ladungen influenziert, wodurch sich das Feld im Innern des Isolators ändert. In beiden Fällen erwärmen sich die Stoffe im elektromagnetischen Feld. Die dazu notwendige Energie wird dem Feld entzogen.

§ 19. Induktionsströme

Auf den Eigenschaften des elektromagnetischen Feldes beruht die Bedeutung, welche die Elektrizität für die Energiewirtschaft und als Nachrichtenmittel besitzt, denn die Verknüpfung von elektrischen und magnetischen Feldern ermöglicht der Technik, mechanische Energie und damit auch (über Dampf-

maschine oder Verbrennungsmotor) Wärmeenergie in elektrische Energie umzuwandeln und zu übertragen.

1. Erzeugung elektrischer Energie durch Induktion. In einem Leiter werden Spannungsstöße und damit Induktionsströme erzeugt, wenn man ihn so bewegt, daß seine Windungsfläche abwechselnd senkrecht und parallel zu den magnetischen Feldlinien steht. Dabei wird mechanische Arbeit geleistet, die in die elektrische Energie des Induktionsstroms umgewandelt wird. Auch hier gilt das Gesetz der Erhaltung der Energie. Das Magnetfeld ist Mittler der Umwandlung und bleibt ungeändert. Die Maschinen bestehen aus dem feld-

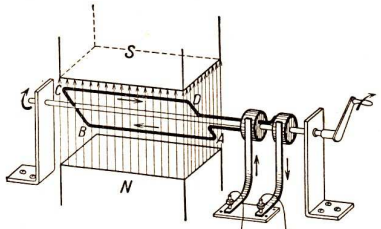


Abb. 90
Grundgedanke der Generatorwirkung

erregenden Magneten und der drehbaren Spule (Anker) als wesentlichen Teilen. Sie heißen Generatoren (§ 21). In Abb. 90 bedeutet NS den Feldmagneten und die Leiterschleife $ABCD$ den „Anker".

2. Spannung und Stromstärke eines Wechselstroms. In den Windungen des Ankers des in Abb. 90 schematisch dargestellten Generators fließt ein Induktionsstrom, dessen Spannung und Stromstärke sowohl in der Größe als auch in der Richtung regelmäßig wechselt. Es fließt „Wechselstrom". Abb. 91 zeigt eine Windung der Ankerwicklung im Querschnitt und von der Seite. Dreht sie sich in einem homogenen Magnetfeld, so ändert sich die Zahl der magnetischen Feldlinien, die durch die Windung hindurchtreten. Umgrenzt die Windung die Fläche q und hat das Magnetfeld die Feldstärke $\mathfrak{H}$, so ist der Kraftfluß N der induzierenden Feldlinien, der durch die Windung hindurchtritt, wenn ihre Ebene senkrecht zum Magnetfeld steht,

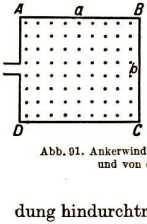


Abb. 91. Ankerwindung im Querschnitt und von der Seite



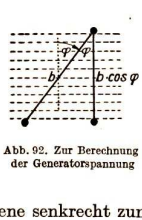


Abb. 92. Zur Berechnung der Generatorspannung

$$N = \mu \cdot q \cdot \mathfrak{H}.$$

In dieser Lage ist $q = a \cdot b$ (Abb. 91). Dreht sich das Rechteck $ABCD$ um den Winkel φ, so ist der wirksame Querschnitt der Windung, durch den die

Feldlinien hindurchtreten können, kleiner als q. In der Richtung der Feldlinien gesehen, erscheint b verkürzt (Abb. 92). Seine Länge beträgt nur noch $b \cdot \cos\varphi$. In einer beliebigen Lage ist daher der wirksame Querschnitt $q \cdot \cos\varphi$ und der induzierende Kraftfluß, der durch die Windung hindurchtritt,

$$N = \mu \cdot q \cdot \mathfrak{H} \cdot \cos\varphi.$$

Dreht sich die Windung in der Zeit t um den Winkel φ und in der Zeit T um 360^0 oder 2π, so ist

$$\varphi : 2\pi = t : T,$$

$$\varphi = \frac{2\pi}{T} \cdot t.$$

Die Zahl der Umdrehungen in der Sekunde ist die Frequenz f. Es ist $f = \frac{1}{T}$. Den Faktor $\frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot f$ nennt man die „Kreisfrequenz ω" der Drehung.

Es ist also

$$\varphi = \frac{2\pi}{T} \cdot t = \omega \cdot t.$$

Führen wir diesen Wert oben ein, so ergibt sich

$$N = \mu \cdot q \cdot \mathfrak{H} \cdot \cos\omega t.$$

In dieser Gleichung erscheint N als Funktion der Veränderlichen t. Die induzierte Spannung (§ 17) ist gleich dem Differentialquotienten

$$\frac{dN}{dt} = \frac{d(\mu \cdot q \cdot \mathfrak{H} \cdot \cos\omega t)}{dt} = -\omega \cdot \mu \cdot q \cdot \mathfrak{H} \cdot \sin\omega t.$$

Hat die Ankerwicklung w Windungen, so ist die im Zeitpunkt t induzierte Spannung $U = w\frac{dN}{dt}$, also

$$U = -\omega \cdot \mu \cdot w \cdot q \cdot \mathfrak{H} \cdot \sin\omega t.$$

Ist $t = 0$, so ist $U = 0$. Ist $t = \frac{T}{4}$, so ist $\omega t = \frac{\pi}{2}$ und $U = -\omega \cdot \mu \cdot w \cdot q \cdot \mathfrak{H}$. Dann besitzt U abgesehen vom Vorzeichen den größten Wert, den es annehmen kann. Wir bezeichnen ihn mit U_0. Ist $t = \frac{T}{2}$, so ist $\omega t = \pi$ und $U = 0$. Ist $t = 3\frac{T}{4}$, so ist $\omega t = 3\frac{\pi}{2}$ und $U = -U_0$.

Führen wir U_0 in die Formel ein, so erhalten wir

$$U = U_0 \cdot \sin\omega t.$$

Die in der Spule induzierte elektrische Spannung ist jederzeit gleich der mit dem Sinus des Drehwinkels multiplizierten Höchstspannung.

Kann man in der Verbrauchsleitung von Selbstinduktion und Kapazität absehen (vgl. § 23), enthält der Stromkreis also im wesentlichen nur einen

Ohmschen Gesamtwiderstand R, so ist der in der Spule fließende elektrische Strom I jederzeit gegeben durch $I = \frac{U}{R}$.

$$\frac{U}{R} = \frac{U_0}{R} \cdot \sin \omega t.$$

Bezeichnen wir die maximale Stromstärke $\frac{U_0}{R}$ mit I_0, so ist

$$\boldsymbol{I = I_0 \cdot \sin \omega t.}$$

Auch der in der Spule fließende elektrische Induktionsstrom ist proportional dem Sinus des Drehwinkels.

Abb. 93 gibt graphisch die Beziehungen zwischen der Spannung U und der Stromstärke I einerseits und der Umlaufzeit T des Ankers andererseits wieder. Den Ausdruck ωt unter der sin-Funktion nennt man **Phase des Wechselstroms** oder **Phase der Wechselspannung.** Im besprochenen Fall haben also Strom und Spannung die gleiche Phase ωt.

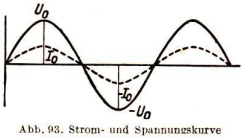
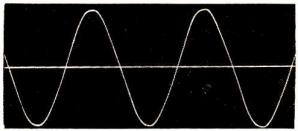
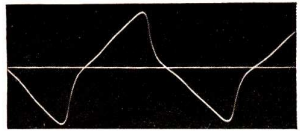


Abb. 93. Strom- und Spannungskurve eines Wechselstromgenerators

Abb. 94 zeigt einen sinusförmigen, Abb. 95 einen nichtsinusförmigen Wechselstrom. Ein solcher entsteht z. B., wenn die Spule nicht gleichförmig gedreht wird.


Abb. 94. Sinusförmiger Wechselstrom einer Wechselstrommaschine (Oszillogramm)


Abb. 95. Nichtsinusförmiger Wechselstrom eines Kurbelinduktors (Oszillogramm)

3. Umformung elektrischer Ströme durch Induktion. Zwei Spulen I und II sind durch einen in sich geschlossenen Eisenkern, wie Abb. 96 zeigt, miteinander verbunden. Ist das Eisen magnetisch, so werden sie beide von demselben magnetischen Feld umschlungen. Das magnetische Feld möge durch einen durch die Spule I fließenden Strom erregt sein. Ändert sich dieses Feld, so entstehen in der Spule II Induktionsströme.

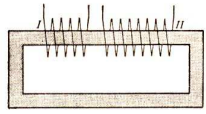


Abb. 96
Magnetisch gekoppelte Spulen

Der Strom in I kann dadurch geändert werden, daß

a) ein Gleichstrom oftmals unterbrochen wird (z. B. bei einem Funkeninduktor);

b) ein Gleichstrom geschwächt oder verstärkt wird (z. B. in einem Mikrophon);

c) ein Wechselstrom fließt.

Eine solche Anordnung, bei der die Spannungs- und Stromänderungen in einer Spule mittels Induktion auf eine andere übertragen werden, nennt man einen Transformator. Seine Funktion und Anwendung wird in § 24, 2 besprochen.
Das Magnetfeld ist auch in diesem Falle nur Mittler.

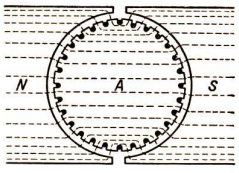


Abb. 97
Feldlinien in einem Generator

4. Das Magnetfeld elektrischer Maschinen. Je stärker das Magnetfeld, desto stärker ist die erreichbare Induktion. Elektrische Maschinen, die durch Induktion wirken, besitzen daher kräftige Magnetfelder. Die stromdurchflossenen Spulen sind grundsätzlich von Eisen ausgefüllt, und man sorgt dafür, daß der Weg der Feldlinien im Eisen so wenig wie möglich unterbrochen wird. (Schmaler Schlitz zwischen dem Feldmagneten und dem Eisenkern A des Ankers, Abb. 97.) Die in Abb. 81 und 82 angedeuteten Experimente zeigen nämlich, daß die Induktion um so größer wird, je kleiner ein etwaiger Luftspalt ist. Aus technischen Gründen kann man den Luftspalt bei den Maschinen leider nicht ganz verschwinden lassen.

Wir haben in § 15 erfahren, daß die magnetische Feldstärke im Eisen eine starke magnetische Induktion hervorruft, doch ist die Permeabilität μ^* des Eisens von der Feldstärke $\mathfrak{H}$ der Spule abhängig, welche die Molekularströme gleichrichtet. Die nachstehende Tabelle macht einige Angaben darüber für Dynamoblech.

$\mathfrak{H}$	μ^*
0,5	1600
1	6200
10	1280
100	136
1000	20
2000	10
3000	7

Die Abnahme von μ^* bedeutet, daß bei sehr hohen Feldstärken in Eisen Sättigung eintritt und dadurch der Unterschied zwischen den Magnetfeldern mit und ohne Eisen immer geringer wird.
Ähnlich wie im elektrischen Feld unterscheiden wir zwischen der relativen Permeabilität μ^* eines Stoffes und der absoluten Permeabilität μ. Für das Vakuum gilt:

$$\mu_0 = 1{,}256 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Voltsekunden}}{\text{Amperewindungen} \cdot \text{Zentimeter}}.$$

Es ist in dem mit Eisen ausgefüllten Feld stets (§ 17 u. 18)

$$\mathfrak{B} = \mu \cdot \mathfrak{H} = \mu_0 \cdot \mu^* \cdot \mathfrak{H}.$$

5. Die durch Induktion erzeugten Wirbelströme. Durchdringen die Feldlinien eines veränderlichen Magnetfeldes einen massiven Leiter, so entstehen in ihm elektrische Felder, deren Feldlinien die magnetischen umschlingen. Elektrische Felder in einem Leiter haben aber einen Strom zur Folge (Abb. 98). Es entstehen elektrische Ströme, die im Leiter in sich geschlossen sind und wegen des geringen Widerstandes eine große Stromstärke besitzen. Sie werden nach ihrer Form „Wirbelströme" genannt. In den massiven Metallteilen der elektrischen Maschinen sind sie unerwünscht, weil ihre Erzeugung Energie erfordert, die sich in Wärme

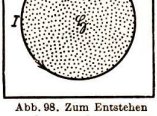


Abb. 98. Zum Entstehen der Wirbelströme

umwandelt. Man baut daher die Kerne aus gebündelten, gegeneinander isolierten Eisenblechen auf, in denen die Ströme nicht kreisen können.

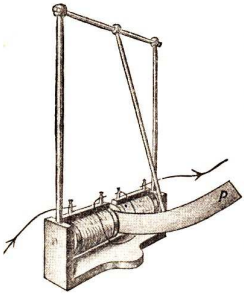


Abb. 99a

Dämpfung durch Wirbelströme

Derartige Wirbelströme entstehen auch, wenn ein Leiter sich durch ein konstantes Magnetfeld bewegt. Abb. 99a stellt dar, wie ein Pendel, dessen Masse P aus einer dicken Kupferscheibe besteht, durch ein Magnetfeld schwingt und dabei die magnetischen Feldlinien schneidet (Abb. 99b). Die Kupferscheibe ist ein Leiter, der quer zu den Feldlinien durch das Magnetfeld bewegt wird. In ihm entsteht ein elektrischer Stromstoß, der Wirbelströme hervorruft. Abb. 100 deutet an, wie durch Schlitzung von P die Wirbelströme vermieden werden können. Die Energie dieser

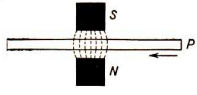


Abb. 99b



Abb. 100. Vermeidung der Wirbelströme durch Schlitzung

starken Wirbelströme wird aus der kinetischen Energie des Pendels entnommen. Dabei wird das Pendel im Feld stark gebremst. Bewegte sich das Magnetfeld, dann würde die Kupferscheibe mitgezogen. Davon macht man beim Drehstrommotor Gebrauch, dem man einen Kurzschlußanker gibt (§ 22).

§ 20. Die Selbstinduktion eines Leiters

1. Grundlegende Versuche. a) Eine Spule mit vielen Windungen, die einen Eisenkern umschließen und ein Amperemeter A sind in Reihe geschaltet (Abb. 101). Durch den Schalter U kann man die Spannung der Batterie B anlegen oder einen geschlossenen Leiterkreis ohne Stromquelle herstellen. Man beobachtet

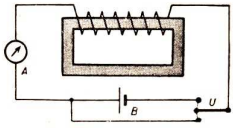


Abb. 101

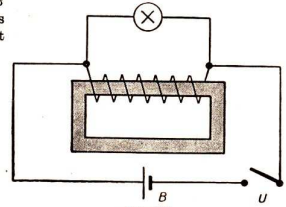


Abb. 102

Versuche zur Selbstinduktion

beim Einschalten, daß der Strom, der durch das Amperemeter fließt, ganz allmählich anwächst. Es dauert einige Sekunden, bis er seine volle Stärke erhält. Beim Ausschalten geht der Zeiger des Amperemeters nicht sofort zurück. Wir bemerken vielmehr, daß noch einige Zeit ein allmählich abnehmender Strom in derselben Richtung fließt.

b) Wir schalten (Abb. 102) in Nebenschluß zur großen Spule eine Glimmlampe für 220 V. Schicken wir dann durch die Stromverzweigung einen Strom, der von einem Akkumulator

von 2 V gespeist wird, dann glüht die Lampe nicht. Unterbrechen wir aber den Strom in U, dann entsteht ein kurzzeitiger Stromstoß, dessen Spannung so hoch ist, daß die Lampe aufleuchtet. Dieser Stromstoß fließt entgegengesetzt zur bisherigen Stromrichtung durch die Lampe (wie man durch den Ausschlag eines Amperemeters (Vorsicht!) zeigen könnte). Den beiden Versuchen ist gemeinsam, daß beim Einschalten des Stromes in der Spule ein starkes Magnetfeld aufgebaut wird, und daß dieses Feld beim Ausschalten zerfällt.

2. Die Richtung des induzierten Stromstoßes. Zur Erklärung der Vorgänge betrachten wir nochmals die Richtung des Magnetfeldes bei der Induktion. In den Abb. 103 und 104 sind zwei Fälle der Induktion skizziert.

a) Durch Nähern und Entfernen eines Stabmagneten wird in einer Spule II ein Induktionsstrom erzeugt. Dieser erzeugt ein magnetisches Feld. Wir stellen in jedem Falle die Richtung der Feldlinien des induzierten magnetischen Feldes fest.

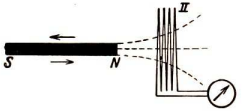


Abb. 103

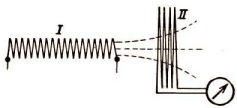


Abb. 104

Gegenseitige Induktion

b) Anstelle des permanenten Magneten benutzen wir eine Spule I und erzeugen durch Einschalten und Ausschalten ein Magnetfeld, das die Spule II umschlingt. Wir stellen in jedem Falle die Richtung der induzierten magnetischen Feldlinien fest. Wir finden:

Der in der Spule induzierte Strom ist stets so gerichtet, daß er den Vorgang, der ihn hervorgerufen hat, zu hemmen sucht (Lenzsches Gesetz).

Wird das induzierende Magnetfeld schwächer (durch Entfernen oder Ausschalten), dann verlaufen die induzierten magnetischen Feldlinien gleichsinnig zu den verschwindenden; wird es stärker, dann verlaufen sie in entgegengesetzter Richtung zu den auftretenden Feldlinien. Wie die Spule I auf II wirkt, so übt II durch ihr Feld einen Einfluß auf I aus. Es wird daher, durch die Anwesenheit der Spule II, das entstehende Magnetfeld in I im Anwachsen gehemmt und das vergehende im Abnehmen aufgehalten.

3. Die Selbstinduktion. Genau so wie zwei Spulen müssen sich die Windungen einer einzigen Spule gegenseitig beeinflussen, denn innerhalb jeder einzelnen Windung entstehen magnetische Feldlinien, welche die anderen Windungen umschlingen. Beachten wir dies, dann können wir das Ergebnis unserer eingangs erwähnten Versuche verstehen.

Wird der Stromkreis geschlossen, so wandelt sich elektrische Energie in magnetische Energie um. Der Strom kann nicht sofort in voller Stärke fließen, weil jedes Anwachsen des magnetischen Feldes eine elektrische Gegenspannung induziert.

Daher wächst der Strom und mit ihm das Magnetfeld allmählich an. Er überwindet gewissermaßen von Stufe zu Stufe die Gegenspannungsstöße, bis er die höchste Stärke erreicht, die er nach dem Ohmschen Gesetz haben

kann. – Wird die Stromquelle abgeschaltet, so zerfällt das magnetische Feld, das den Leiter umgibt. Dabei entsteht eine elektrische Spannung, die der unterbrochenen Spannung gleichgerichtet ist. Daher fließt nach Ausschaltung der Stromquelle der Strom in derselben Richtung weiter wie vorher. Da die erzeugte Spannung von $\frac{dN}{dt}$ (§ 17) abhängt, also von der Geschwindigkeit, mit der die Zahl der Feldlinien sich ändert, so ist die Gegenspannung oft recht groß. Man nennt diesen Vorgang Selbstinduktion. Mit demselben Wort bezeichnet man auch eine meßbare Eigenschaft des Leiters. Die Versuche zeigen:

Induktion wird auch im eigenen Leiter wirksam. Die Selbstinduktion des Leiters verzögert bei Spannungsänderungen das Anwachsen oder Abnehmen des im Leiter fließenden Stromes.

Selbstinduktion tritt in jedem Leiter auf, wenn der Strom, der durch ihn fließt, sich ändert. Selbstinduktion besitzen also nicht nur Spulen, sondern auch geradlinige Leiter. Ihre Wirkung gleicht der Wirkung der Masse bei Bewegungsvorgängen. Wie die träge Masse eines Eisenbahnzuges verhindert, daß die Zugkraft der Lokomotive sofort dem Zug die größtmögliche Geschwindigkeit gibt und daß der Zug beim Bremsen sofort anhält, so verhindert die Selbstinduktion, daß ein elektrischer Strom beim Einschalten sofort in voller Stärke fließt und beim Ausschalten sofort aufhört. Es bedarf, mit anderen Worten, einer gewissen Zeit, bis das Magnetfeld, das einen Stromleiter umgibt, aufgebaut ist und einer gewissen Zeit, bis es zerfällt. Diese Zeit wird durch die Selbstinduktion geregelt.

4. Der Selbstinduktionskoeffizient. Je größer die Energie des Magnetfeldes bei gleicher Stromstärke ist, desto größer ist die Selbstinduktion des Leiters, und desto längert dauert es, bis das Magnetfeld beim Einschalten des Stromes seinen Endwert erreicht oder beim Ausschalten zerfällt. Die Energie des magnetischen Feldes, das einen Leiter umgibt, ist bei derselben Stromstärke für eine Spule mit vielen Windungen wesentlich größer als für einen geradlinigen Leiter. Für die Größe der durch Selbstinduktion hervorgerufenen Spannung ist daher die Form des Leiters von Bedeutung. Ändert sich die Stromstärke I in dem Leiter in der Zeit Δt um ΔI, so ist die Größe der durch Selbstinduktion hervorgerufenen Gegenspannung U von einem Koeffizienten L abhängig, der für einen Leiter bestimmter Form einen unveränderlichen Wert besitzt.

Die Gegenspannung U, die in einem Leiter vom Selbstinduktionskoeffizient L hervorgerufen wird, ist

$$U = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Der Selbstinduktionskoeffizient wird in **Henry** (H) gemessen.

1 Henry ist der Selbstinduktionskoeffizient eines Leiters, in dem bei der Änderung des Stromes um 1 A in 1 s die Gegenspannung 1 V induziert wird.

Für eine langgestreckte Spule, die w Windungen vom Querschnitt q auf der Länge l und einen Kern mit der Permeabilität μ^* enthält, ist der Selbstinduktionskoeffizient

$$L = 4\pi \cdot 10^{-9}\, \mu^* \frac{w^2 q}{l}.$$

Hier ist l in cm, q in cm² und L in Henry gemessen.

In anderer Form lautet die oben angegebene Gleichung (vgl. S. 49 und 58):

$$L = \mu_0 \cdot \mu^* \cdot \frac{w^2 \cdot q}{l} = \mu \cdot \frac{w^2 \cdot q}{l}.$$

Zur Übung: Aufgaben: a) Eine eisenfreie Spule hat 200 Windungen von 5 cm² Querschnitt und eine Länge von 15 cm. Wie groß ist der Selbstinduktionskoeffizient? — b) Welche Spannung wird in einer Spule von 10 000 Windungen von 10 cm² Querschnitt und der Länge von 20 cm induziert, wenn sich die Stromstärke in $\frac{1}{10}$ s um 3 A ändert?

D. Starkstromtechnik und elektrische Energiewirtschaft

§ 21. Generator und Motor für Gleichstrom

Der Gleichstromgenerator besteht aus dem Feldmagnet NS (Abb. 105), der ein starkes Feld erzeugt, und dem drehbaren Anker A, der die Wicklungen trägt, in denen der Strom induziert wird. Als dritter wesentlicher Teil tritt noch der Kollektor, d. h. die Schaltvorrichtung K hinzu, durch welche die Enden der Wicklungen mit der äußeren Leitung verbunden sind. Der in Abb. 105 gezeichnete Schnitt gibt ein Bild eines Gleichstromgenerators mit einem Doppel-T-Anker. Der Name kennzeichnet den Querschnitt des Eisenkerns. Abb. 106 zeigt ein Modell eines solchen Ankers A mit dem Kollektor K_1 K_2.

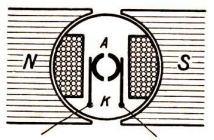


Abb. 105. Schnitt durch einen Gleichstromgenerator mit Doppel-T-Anker

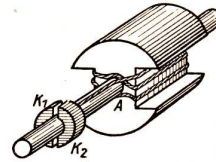


Abb. 106. Modell eines Doppel-T-Ankers

1. Die im Anker induzierte Spannung. Wie wir in § 19 gesehen haben, entsteht in einer Windung des Ankers in jedem Zeitpunkt t die Spannung

$$U = U_0 \cdot \sin \omega t.$$

t wird gerechnet von dem Augenblick an, in dem die Windungsfläche der Spule senkrecht zum Feld steht. Dann ist $U = 0$; dreht sie sich um 90°, so ist die induzierte Spannung am größten. Sie ist dann U_0. Dreht die Spule sich weiter, dann nimmt die Spannung ab und wird gleich Null, wenn

die Spule wieder senkrecht zu den Feldlinien steht. Bei weiterem Drehen tritt dann eine entgegengesetzt gerichtete Spannung auf, die ihren größten Wert bei 270° besitzt. Sie ist dann $-U_0$. Diese Spannung nimmt beim

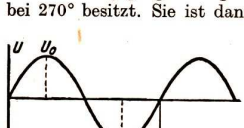


Abb. 107. Spannungskurve eines Generators

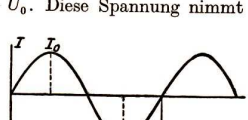


Abb. 108. Stromkurve eines Generators

Weiterbewegen des Ankers wieder ab, bis sie nach einer vollen Umdrehung wieder gleich Null ist. Stellen wir die Werte der Spannung und des Stromes graphisch dar, so erhalten wir (§ 19) Sinuskurven (Abb. 107 und 108). Die Zeit von O bis T entspricht der Umlaufzeit des Ankers.

Im Anker entsteht also eine Wechselspannung, in ihm und der angeschlossenen Leitung fließt ein Wechselstrom.

2. Der Umschalter (Kollektor). Man kann mit dem in Abb. 105, 106 und 109 enthaltenen Umschalter die Stromstöße so richten, daß sie in der äußeren Leitung in gleicher Richtung fließen und erhält damit „Gleichstromstöße" in ihr. Dieser Umschalter (Kollektor) besteht aus zwei Halbzylindern K_1 und K_2, die fest auf der Achse des Ankers angebracht und mit den Enden der Wicklung verbunden sind (Abb. 109). Sie sind gegeneinander isoliert. Auf ihnen schleifen am Dynamogehäuse befestigte Federn F_1 und F_2 (Bürsten), die mit der



Abb. 109
Gleichrichtung durch Kollektor

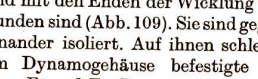


Abb. 110
Gleichgerichteter Wechselstrom

äußeren Leitung verbunden sind. Bei jeder halben Drehung des Ankers wechselt die Verbindung der Spulenenden mit den Enden der äußeren Leitung. Stehen die Federn so, daß der Wechsel gerade dann eintritt, wenn die Spannung im Anker ihre Richtung wechselt, so fließen in der äußeren Leitung Gleichstromstöße, wie Abb. 110 zeigt.

3. Die Größe der induzierten Spannung. Die in den Windungen des Ankers induzierte Spannung hängt von $\frac{\Delta N}{\Delta t}$, d. h. von der in der Zeit Δt sich ändernden Zahl ΔN der durch sie hindurchtretenden magnetischen Feldlinien ab.



Abb. 111
Anker mit 2 Wicklungen

In § 19 fanden wir, indem wir U aus $\frac{dN}{dt}$ berechneten,

$$U = -\mu \cdot \mathfrak{H} \cdot \omega \cdot w \cdot q \cdot \sin \omega t,$$

also für den Betrag von U_0

$$U_0 = \mu \cdot \mathfrak{H} \cdot \omega \cdot w \cdot q.$$

Kennt man nun die Umlaufgeschwindigkeit ω einer Maschine, die Windungszahl w, den Querschnitt q der Wicklungen und die Feldstärke $\mathfrak{H}$, so kann man daraus die Scheitelspannung U_0 berechnen.

4. Anker mit vielen Wicklungen. Ein Anker würde bei einer Wicklung und 50 Umdrehungen in der Sekunde 100 gleichgerichtete Spannungsstöße in der äußeren Leitung erzeugen. Bringt man mehrere voneinander


Abb. 112
Spannungsverlauf bei vier Ankerspulen

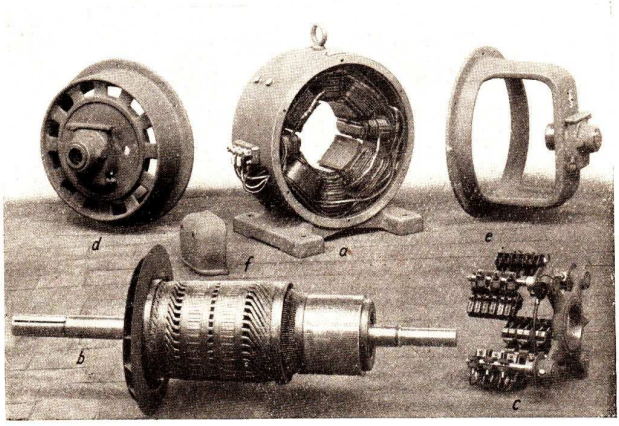


Abb. 113. Teile eines Gleichstrommotors
a) Magnetgestell, b) Anker mit Lüfterflügelrad zum Fördern der Kühluft (links) und Kollektor (rechts), c) Bürstenbrücke mit Bürstenhaltern, d) Linkes Lagerschild mit Öffnungen für Zutritt der Kühluft, e) Rechtes Lagerschild, f) Abdeckhaube der Anschlußklemmen

getrennte Wicklungen mit Umschalter auf dem Anker an (2 Spulen in Abb. 111), so wird die Zahl der Spannungsstöße größer. Die Spannung sinkt nicht mehr auf Null, wenn man immer nur aus der höchsterregten Spule Spannung durch die Federn entnimmt (4 Spulen in Abb. 112). Es wird dabei aber nur die Spannung einer einzigen Wicklung ausgenutzt. Verbindet man die Spulen miteinander, so wirken sie bei der Drehung teilweise gegeneinander. Das Problem, viele Ankerwicklungen anzubringen und alle so untereinander zu verbinden, daß sie nicht gegeneinander wirken, ist gelöst worden, indem die Wicklungen in geeigneter Weise auf dem Anker angeordnet wurden. Man nennt Anker, die solche Wicklungen tragen, Trommelanker (Abb. 113b).

5. Das Prinzip der Selbsterregung. Faraday hat schon 1832 Induktionsmaschinen gebaut, bei denen zur Erzeugung des Magnetfeldes Dauermagnete verwendet wurden. Da ihr Feld nur schwach war, hatten diese Maschinen keine große Wirkung. Das Wesentliche bei der Erfindung der Dynamomaschine durch Werner von Siemens und Charles Wheatstone war, daß sie statt der Dauermagnete Elektromagnete einführten und die Entdeckung machten, daß man den Strom zur Erregung der Elektromagnete beim Anlaufen der Maschine aus ihr selbst gewinnen konnte. In dem Eisen der Feldmagnete bleibt nämlich noch so viel Magnetismus zurück, daß ein schwaches Feld auf den Anker beim Anlaufen der Maschine einwirkt. Es entsteht dann im Anker ein recht schwacher Strom. Wird dieser aber durch die Windungen des Feldmagneten geleitet, so wird das Feld verstärkt. Infolgedessen wird auch der im Anker erzeugte Strom stärker usw. Induktionsstrom und Magnetfeld regen sich gegenseitig bis zur höchsten Wirkung an (Prinzip der Selbsterregung der Dynamomaschine).

Der vom Anker gelieferte Strom fließt also durch die Wicklungen der Feldmagnete. Wird der gesamte Strom durch diese Wicklungen geleitet, so spricht man von einer Hauptschlußmaschine; wird nur ein Teil abgezweigt, so nennt man die Maschine Nebenschlußmaschine. In der Regel werden Gleichstromgeneratoren als Nebenschlußmaschinen geschaltet.

6. Der Elektromotor. Jede Gleichstromdynamomaschine kann als Motor laufen, wenn man Gleichstrom zu den Bürsten F_1 und F_2 leitet. Die Leiter, in denen bei der Bewegung Strom induziert wird, werden nun durch den Strom, der durch sie fließt, in Bewegung gesetzt. Die Kraft, die den Anker bewegt, greift an der Wicklung, nicht am Anker selbst an! Abb. 113 zeigt die Teile eines Gleichstrommotors.

Mißt oder berechnet man die Kraft, welche auf die quer zu den magnetischen Feldlinien bewegten Teile der Wicklung des Ankers ausgeübt wird, so findet man:

Die Kraft, mit der ein vom Strom I durchflossener Leiter von der Länge l senkrecht zu dem Feld $\mathfrak{H}$ und dem Strom bewegt wird, ist in kp gemessen

$$P = 10{,}2 \cdot \mu \cdot \mathfrak{H} \cdot l \cdot I;$$

dabei ist I in Ampere, $\mathfrak{H}$ in Amperewindungen je Zentimeter und l in cm gemessen. Über μ vgl. § 18,3.

Rotiert der Anker des Motors im Magnetfeld, so wirkt er, obwohl er von einem Strom durchflossen ist, dennoch wie der Anker eines Gleichstromgenerators. In seiner Wicklung wird durch Induktion eine Wechselspannung U_1 erzeugt, die entgegengesetzt zu der Betriebsspannung U gerichtet ist. Je rascher er läuft, desto größer ist U_1. Größer als U kann natürlich U_1 nicht werden. Ist der Widerstand des Ankers R, so fließt durch den ruhenden Anker der Strom $I_r = \frac{U}{R}$. Wird bei der Bewegung die Gegenspannung U_1 erzeugt, so fließt in ihm der Strom $I = \frac{(U - U_1)}{R}$. Da die mechanische Leistung des Motors von der Größe des Produkts aus Spannung U und Stromstärke I abhängt, ergibt sich aus unserer Betrachtung, daß der Motor die Stärke des Stromes I seiner Belastung anpaßt. Wird er stark belastet, so rotiert er langsam (U_1 also klein) und verbraucht viel Strom; ist er wenig belastet, so läuft er schnell (U_1 also groß) und verbraucht wenig Strom. Entsprechend ändert sich seine Leistung $U \cdot I$. Die Drehzahl eines solchen Motors ist also stark von der Belastung abhängig. Durch besondere Schaltungen kann man diese Abhängigkeit verringern.

Wird der Motor in Betrieb gesetzt oder „angelassen", so fehlt diese selbständige Begrenzung der Stromstärke. Damit die Stromstärke beim Anlassen nicht zu groß wird, benutzt man beim Einschalten des Stromes Vorschaltwiderstände, wenigstens bei allen größeren Motoren. Diese Widerstände werden nach und nach ausgeschaltet, wenn sich der Anker in Bewegung gesetzt hat (z. B. bei der Straßenbahn).

7. Der Wirkungsgrad des Generators. Der Wirkungsgrad eines Generators (bis etwa 90%) ist besser als der einer Wasserkraftmaschine (bis etwa 80%). Er übertrifft den einer Wärmekraftmaschine (bis etwa 35 % beim Dieselmotor) ganz erheblich. Der Generator muß aber durch diese oder jene angetrieben werden. Energie geht bei ihm verloren durch Reibung und durch auftretende Wirbelströme. Energieverluste treten aber auch deshalb ein, weil die Molekularmagnete im Ankereisen bei der Drehung des Ankers dauernd ihre Lage ändern und dabei Wärme erzeugen. Je stärker der im Eisen zurückbleibende Magnetismus ist, desto größer ist die Hemmung und damit die Arbeit, die beim Drehen der Molekularmagnete geleistet werden muß. Diese Arbeit wandelt sich in eine Art innerer Reibungswärme um, welche die Eisenteile erhitzt. Auch in Transformatoren tritt aus diesem Grund im Eisen Wärme auf. Man verwendet daher für diese Maschinenteile Eisensorten mit möglichst geringen Ummagnetisierungsverlusten.

§ 22. Generator und Motor für Wechselstrom

1. Die Einphasenstrommaschine. Jede Gleichstrommaschine wirkt als Wechselstrommaschine, wenn man den Kollektor durch zwei Schleifringe A_1 und A_2 ersetzt (Abb. 114), die auf der Achse isoliert voneinander sitzen und mit den Enden der Wicklung verbunden sind. Durch die Schleiffedern F_1 und F_2 fließt dann ein Wechselstrom. An einem Generator unterscheidet man einen „Ständer" und einen „Läufer". Bei „Innenpolmaschinen" (Abb. 115) ist der Ständer ein feststehender eiserner Rahmen, der auf der Innenseite Induktionsspulen mit Eisenkernen trägt. Der Läufer ist ein drehbarer Eisenkranz, auf dem außen elektromagnetisch erregte Nord- und Südpole sitzen, deren Zahl der Zahl der Induktionsspulen entspricht. Durch zwei Schleifringe wird Gleichstrom zu den Elektromagneten geleitet. Dieser wird von einem auf der Achse des Läufers sitzenden besonderen Gleichstromgenerator erzeugt. Die Schaltung zeigt Abb. 115. Dreht sich der Läufer, so werden in den Induktionsspulen durch die Felder der Elektromagnete Ströme induziert. Diese wechseln ihre Richtung in dem Augenblick, in dem der Pol der Spule genau gegenübersteht. Die Schaltung ist so vorgenommen, daß alle Spulenenden, zu denen der Strom gleichzeitig hinfließt, untereinander verbunden sind. Bei einer Maschine mit vier Induktionsspulen fließt bei einer vollen Umdrehung des Läufers zweimal Strom in der einen und zweimal in der entgegengesetzten Richtung.

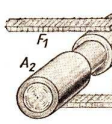


Abb. 114. Schleifringe

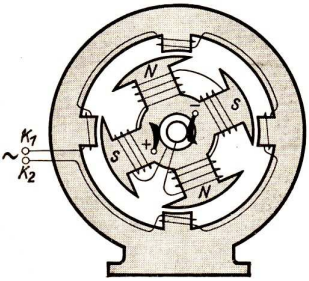


Abb. 115. Schema einer Wechselstrommaschine mit Innenpolen

Die Wechselstrommaschine wirkt in derselben Weise, wenn die Elektromagnete auf dem Ständer und die Induktionsspulen auf dem Läufer sitzen (Außenpolmaschinen). Meist verwendet man Innenpolmaschinen. Wechselstrommaschinen zur Kraft- und Lichterzeugung werden so gebaut, daß sie in der Sekunde 100 Stromwechsel hervorrufen, d. h. 50 periodischen Wechselstrom liefern. Für Bahnbetrieb benutzt man $16\frac{2}{3}$ Perioden. Wechselstrommaschinen, die von Turbinen von z. B. 20 000 PS-Leistung angetrieben werden, erzeugen höchstens die gleiche Leistung, also bei 5000 V höchstens 3000 A (1 kW = 1,36 PS), tatsächlich aber je nach dem Gesamtwirkungsgrad ($\approx 70\%$) entsprechend weniger.

2. Zweiphasenstrommaschine. Bringt man auf dem Ständer noch eine zweite Reihe von Induktionsspulen an, die zwischen den anderen sitzen und in gleicher Weise leitend miteinander verbunden sind, so erzeugt auch in ihnen der Läufer einen Wechselstrom. Er unterscheidet sich von dem ersten dadurch, daß die Spannung um $\frac{1}{4}$ Periode später oder früher ihren höchsten Wert besitzt. Eine solche Maschine, die zwei Ströme verschiedener Phase liefert, nennt man Zweiphasenstrommaschine und zum Unterschied von ihr die zuerst beschriebene Einphasenstrommaschine.

3. Wechselstrommotor. Es gibt Wechselstrommotoren, die wie ein Wechselstromgenerator gebaut sind. Sie laufen nicht von selbst an wie der Gleichstrommotor, weil der Antrieb, den ein Wechselstromstoß gibt, durch den folgenden entgegengesetzt gerichteten Wechselstromstoß vernichtet werden kann. Gehen aber die Pole des Läufers an den Spulen in demselben Takt wie in der Wechselstrommaschine vorbei, so wirkt jeder Stromimpuls als Antrieb. Derartige Motoren nennt man „Synchronmotoren". Sie laufen sehr gleichmäßig, bleiben aber stehen, wenn sie überlastet werden.
Wechselstrommotoren, die von selbst anlaufen, sind ähnlich wie ein Gleichstromgenerator gebaut. Durch die Wicklungen des Ankers und der Feldmagnete fließt dann derselbe Wechselstrom. Da in diesem Falle beim Stromwechsel die Stromrichtung im Anker und die Feldrichtung gleichzeitig wechseln, wirken die aufeinanderfolgenden Wechselstromstöße in derselben Richtung bewegend auf den Anker.

4. Der Dreiphasenstrom (Drehstrom). Im Betrieb der Bahn benutzt man heute meist **Einphasenstrom.** In den Elektrizitätswerken, die Strom für Industrie und Haushalt liefern, erzeugt man meist **Dreiphasenstrom,** der auch **Drehstrom** genannt wird. In die Haushalte wird nur eine Phase des Drehstroms geleitet, so daß dort einfacher Wechselstrom zur Verfügung steht (sofern nicht überhaupt Gleichstrom geliefert wird; dieser wird jedoch immer seltener).

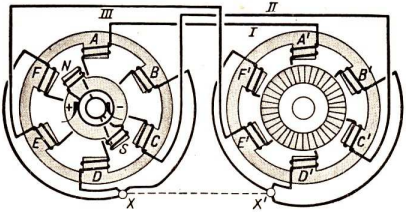


Abb. 116. Drehstromgenerator und -motor

a) Der Drehstromgenerator. Abb. 116 gibt das Prinzip der Erzeugung des Drehstroms und seine Verwendung zum Betrieb von Motoren wieder. Auf jeden Pol des Läufers kommen drei Induktionsspulen des Ständers. Einem Umlauf des Läufers entspricht in diesem Falle eine Periode des Wechselstroms, der in den Spulen A, B, C, D, E, F mit je $\frac{1}{6}$ Periode $\left(\frac{2\pi}{6}\right)$ Phasen-

verschiebung erzeugt wird. Die Spulen A und D, B und E, C und F sind so miteinander verbunden, daß sie von gleichsinnig gerichteten Strömen durchflossen werden. Die von A, C, E fortführenden Leitungen I, II und III sind dann von Wechselströmen I_1, I_2, I_3 durchflossen, die in ihren Phasen um $2 \cdot \frac{2\pi}{6} = \frac{2\pi}{3}$ voneinander verschieden sind. Beträgt die Phase für I_1 Null, so ist sie für I_2 $\frac{2\pi}{3}$ und für I_3 $\frac{4\pi}{3}$ (Abb. 117).

Die besondere Eigenart des Dreiphasenstromes besteht darin, daß die Summe der Stromstärken der drei Wechselströme in jedem Augenblick Null ist. In Abb. 117 sind die Kurven der drei Ströme gezeichnet. An jeder Stelle ist die Summe der Ordinaten gleich Null. Werden daher die Leitungen an der Erzeugungsstelle X und an der Verbraucherstelle X' in einem Punkt zusammengeführt, so ist die Summe der Ströme dort jederzeit gleich Null. Würde man X und X' miteinander verbinden, dann flösse in diesem Leiter zu keiner Zeit Strom. Infolgedessen ist die Rückleitung von X nach X' für die drei Wechselströme entbehrlich.

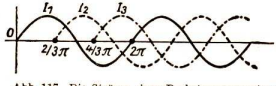


Abb. 117. Die Ströme eines Drehstromgenerators

Dreiphasenstrom kann mit drei Einfachleitungen übertragen werden.

b) Der Drehstrommotor. In Abb. 116 ist rechts ein Drehstrommotor als Stromverbraucher gezeichnet. Sein Ständer stimmt mit dem Ständer des Generators überein. Als Anker hat er einen Kurzschlußanker. Dreht sich der Nordpol des Läufers in dem Generator nacheinander an den Spulen A, B, C, D, E, F vorbei, so wird beim Nähern durch den Induktionsstrom zuerst in A, dann in B, dann in C usw. ein Nordpol erzeugt. In den gegenüberliegenden Spulen, denen sich der Südpol nähert, werden Südpole erzeugt. In dem Spulenkranz des Motors entstehen gleichzeitig durch Stromübertragung dieselben Polpaare, und es dreht sich dann genau wie im Generator ein Magnetfeld im Kreis. Der Nordpol wandert von A' nach B', C' usw., der Südpol von D' nach E', F' usw. In dem Kurzschlußanker werden dabei starke Wirbelströme erzeugt, die bewirken, daß er sich mit dem Feld dreht. Auf diese Weise können sehr große Kräfte entwickelt werden.

Weil sich das Feld im Motor dreht, nennt man den Strom auch Drehstrom. Drehstrommotoren laufen aus der Ruhe selbständig an.

§ 23. Der Wechselstromkreis

1. Die Wechselzahl (Frequenz) des Wechselstromes. Bei Wechselstrom von 50 Perioden sind die Helligkeitsschwankungen einer Glühlampe so schnell, daß kein Flackern des Lichtes zu erkennen ist. Stellt man aber eine mit Wechselstrom betriebene Kohlefadenlampe in ein magnetisches Feld, so schwingt der Faden im Takte der Stromwechsel heftig hin und her. Dreht

man eine abwechselnd in schwarze und weiße Sektoren eingeteilte Scheibe (z. B. als Kreisel), so scheinen bei Wechselstrombeleuchtung bei einer bestimmten Drehzahl die Sektoren stillzustehen, wenn sie nämlich durch die periodisch wechselnde Helligkeit stets in derselben Lage beleuchtet werden („Stroboskopischer Effekt"). Läßt man den Wechselstrom durch eine Spule fließen, in der ein Eisenkern steckt, so wird der Eisenkern im Takt der Stromwechsel ummagnetisiert. Steht seinem Ende eine Blattfeder aus Stahl gegenüber (Abb. 118), so wird sie in heftige Schwingungen versetzt, wenn ihre Eigenschwingungsdauer in Resonanz zu den Stromwechseln steht. Auf diese Weise kann man die Frequenz eines Wechselstromes messen. Man braucht dann zur genaueren Messung mehrere Blattfedern, deren Schwingungszahlen den Bereich der doppelten Wechselstromfrequenz, z. B. von 90 bis 110, überdecken.

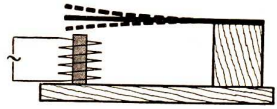


Abb. 118. Frequenzmesser

2. Spannung und Stromstärke im Wechselstromkreis. Von den Klemmen der Wechselstromleitung A und B (Abb. 119), deren Spannung wir durch ein Voltmeter messen, führen wir unter Einschaltung eines Amperemeters Drähte nach X und Y. Zwischen diesen beiden Punkten schalten wir ein:

a) drei parallel geschaltete Glühlampen;

b) drei parallel geschaltete Spulen verschiedener Selbstinduktion L und bekannten Widerstandes für Gleichstrom (Abb. 120);

c) drei parallel geschaltete Kondensatoren (Abb. 121).

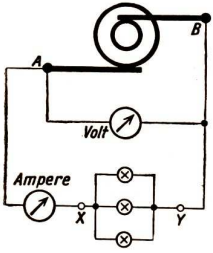


Abb. 119

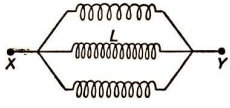


Abb. 120

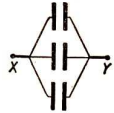


Abb. 121

Wechselstromkreis mit verschiedenen Widerständen

Wir lassen nacheinander den Strom durch 1, 2, 3 Glühlampen, Spulen oder Kondensatoren fließen, messen jedesmal Spannung und Strom und finden: Bei den Glühlampen ist das Ohmsche Gesetz $U = I \cdot R$ annähernd auch für Wechselstrom erfüllt. – Bei den Spulen zeigt sich, daß ihr Widerstand für Wechselstrom höher als für Gleichstrom ist. Je größer die Selbstinduktion der Spule ist, desto größer ist der Unterschied. – Beim Einschalten der Kondensatoren stellen wir fest, daß der Wechselstrom durch sie wie durch einen Leiter hindurchfließt, obwohl die Kondensatorbelege gegeneinander isoliert

sind, also für Gleichstrom ihr Widerstand praktisch unendlich groß ist. Die Stromstärke des Wechselstromes ist um so größer, je größer die Kapazität der Leitung ist.

Das für Gleichstrom gefundene Ohmsche Gesetz gilt nicht für Wechselströme.

Rechnungen, auf die wir hier nicht eingehen können, zeigen, daß für Wechselstrom ein ähnliches Gesetz wie das Ohmsche für Gleichstrom gilt. Haben wir in einem Wechselstromkreis hintereinander geschaltet einen Ohmschen Widerstand R, eine Spule mit der Selbstinduktion L und einen Kondensator mit der Kapazität C, so gilt für das Verhältnis der Spannungsamplitude U zur Stromamplitude I

$$\frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

ω ist die Kreisfrequenz des Wechselstromes, § 19.

Wir können dieses Gesetz leicht experimentell nachprüfen.

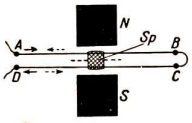


Abb. 122. Schleifenoszillograph

3. Spannungsphase und Stromphase des Wechselstromes. Zum Nachweis des zeitlichen Verlaufs eines Wechselstroms kann man einen „Schleifenoszillographen" benutzen. Er besteht aus einer Drahtschleife $ABCD$ (Abb. 122), die senkrecht durch ein Magnetfeld NS gelegt ist und in den Punkten A, B, C und D fest aufliegt. Zwischen den beiden parallelen Stücken AB und CD der Schleife ist ein kleiner Spiegel Sp befestigt. Fließt Strom durch die Drahtschleife, so wird AB nach oben bewegt, wenn CD nach unten abgelenkt wird, und umgekehrt. Fließt Wechselstrom durch sie, so schwingt der Spiegel im Takt der Stromwechsel hin und her. Läßt man (Abb. 123) einen Lichtstrahl auf den

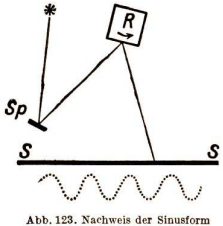


Abb. 123. Nachweis der Sinusform des Wechselstromes

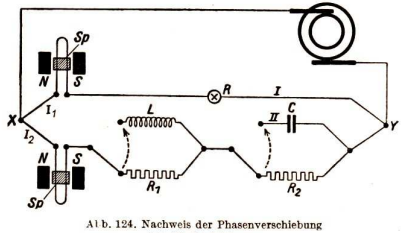


Abb. 124. Nachweis der Phasenverschiebung von Wechselströmen

Spiegel Sp fallen, der von ihm auf einen rotierenden Spiegel R reflektiert und von diesem auf einen Schirm S geworfen wird, so sieht man auf dem Schirm die sinusförmige Stromkurve des Wechselstromes.

Wir bilden nun eine Stromverzweigung, deren einer Zweig I einen Oszillographen und einen Glühlampenwiderstand R und deren zweiter Zweig II einen Oszillographen, eine Spule L mit großer Selbstinduktion und einen Kondensator C enthält (Abb. 124). Wir richten es so ein, daß wir für L und C selbstinduktionsfreie Widerstände R_1 bzw. R_2 einschalten können. Wir schalten in II R_1 und R_2 ein und richten die Lichtstrahlen so, daß die Stromkurven beider Zweige die in Abb. 125 dargestellte Lage besitzen. Die Ströme I_1 und I_2 fließen phasengleich. Schalten wir dann statt R_1 die Spule L ein, so zeigt sich das in Abb. 126 wiedergegebene Bild. Die Kurve des Stromes I_2 ist um φ verschoben. Sie bleibt hinter I_1

zurück. Schalten wir statt R_2 den Kondensator C ein, so entsteht die in Abb. 127 wiedergegebene Lage. Der Strom I_2 eilt dem Strom I_1 um φ voraus. Da der Strom I_1 annähernd das Ohmsche Gesetz befolgt (vgl. oben), stimmt der Strom I_1 mit der Spannung U in der Phase überein. Es ergibt sich daher:

Die Selbstinduktion eines Wechselstromkreises bewirkt, daß die Phase des Stromes gegenüber der Phase der Spannung zurückbleibt; die Kapazität bewirkt, daß die Phase des Stromes der Phase der Spannung vorauseilt.



Abb. 125. Phasengleiche Ströme verschiedener Amplitude



Abb. 126
Phasenverschiebung durch Selbstinduktion



Abb. 127
Phasenverschiebung durch Kapazität

Fließt I_2 nur durch eine Selbstinduktion ($R_2 = 0$), so bleibt der Strom gegenüber der Spannung genau um eine Viertelperiode ($\varphi = 90°$) zurück; wenn der Stromkreis *II* nur eine Kapazität ($R_1 = 0$) enthält, eilt er genau eine Viertelperiode voraus. Diese Fälle sind in den Abb. 126 und 127 gezeichnet.

4. Die Leistung eines Wechselstromes. Fließt während der Zeit Δt in einem Leiter bei der Spannung U der Gleichstrom I, so wird in dieser Zeit die elektrische Energie

$$\Delta A = U \cdot I \cdot \Delta t$$

zur Umwandlung in andere Energie frei (Abb. 128).

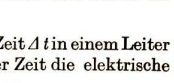


Abb. 128. Zur Berechnung der Arbeit eines Gleichstroms

Fließt durch den Leiter ein Wechselstrom, dessen Spannungs- und Stromphase übereinstimmen (Abb. 129), so ändern sich die Spannung U_1 und der in diesem Augenblick fließende Strom I_1 gleichsinnig. In der kurzen Zeit Δt wird dann die elektrische

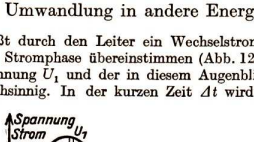


Abb. 129. Zur Berechnung der Arbeit eines phasengleichen Wechselstroms

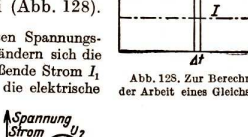


Abb. 130. Zur Berechnung der Arbeitsleistung eines phasenverschobenen Wechselstroms

Energie $\Delta A = U_1 \cdot I_1 \cdot \Delta t$ frei. Sie ist zu Beginn ($U_1 = 0$) sehr klein, wächst rasch an, weil sowohl U_1 als auch I_1 zunehmen, und sinkt dann wieder ab. Aus der Summe aller Produkte $U_1 \cdot I_1 \cdot \Delta t$ kann man die während einer Zeit t frei werdende elektrische Energie berechnen. Ist die Stromphase gegenüber der Spannungsphase verzögert (Wirkung der Selbstinduktion), so sind andere Werte von U_2 und I_2 einander zugeordnet (Abb. 130). Auch jetzt ist

$\Delta A = U_2 \cdot I_2 \ \Delta t$ die während der Zeit Δt frei werdende elektrische Energie. Gilt dies auch für die Zeit, in der der Strom I_3 in der bisherigen Richtung weiterfließt, die Spannung U_3 aber bereits in entgegengesetzter Richtung wirkt? Wird unter diesen Umständen (U und I entgegengerichtet) Energie frei? Die Frage können wir leicht beantworten, wenn wir an den Grundversuch der Bewegung einer Ladung im Felde eines Plattenkondensators (Abb. 131) denken. Baut der Kondensator durch Entladung sein Feld ab, indem sich die positiv geladene Kugel K von A nach B bewegt, so wird sie beschleunigt, und es wird Energie frei. Hat das Feld aber seine Richtung geändert, bevor K in B angelangt ist, und bewegt sich K trotzdem weiter in derselben Richtung, dann wird ein Feld aufgebaut und die Energie des Kondensators vergrößert. In unserem Falle wird also, wenn U und I einander entgegenwirken, die von der Wechselstrommaschine gelieferte Energie nicht verbraucht, sondern es wird Energie an die Maschine zurückgegeben.

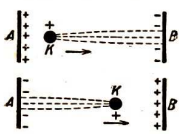


Abb. 131. Geladener Körper im Wechselfeld

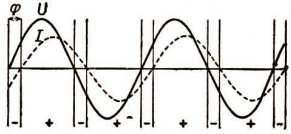


Abb. 132. Positive Leistung eines Wechselstroms geringer Phasenverschiebung

In Abb. 132 sind die Gebiete, in denen elektrische Energie zur Umwandlung in andere Energie frei wird, und die Gebiete, in denen sie an die Stromquelle zurückgegeben wird, mit vertikalen Strichen abgegrenzt und mit + bzw. — bezeichnet. Wir können feststellen, daß beim Phasenunterschied $\varphi \neq 0$ die Leistung des Wechselstroms kleiner als bei $\varphi = 0$ ist. Berechnet man die Leistung A aus den Gleichungen, so ergibt sich, wenn U' die Durchschnittsspannung und I' die Durchschnittsstromstärke bedeuten:

Die Leistung eines Wechselstromes ist $A = U' \cdot I' \cdot \cos \varphi$.

Die Durchschnittswerte von U und I erhalten wir, wenn wir Spannung und Strom mit einem Instrument messen, das wir vorher mit Gleichstrom geeicht haben, z. B. einem Hitzdrahtinstrument.

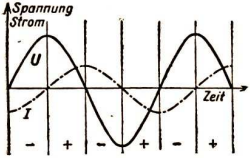


Abb. 133.
Strom mit 90° Phasenverschiebung leistet keine Arbeit

φ ist die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom. $\cos \varphi$ heißt der **Leistungsfaktor**. Beträgt $\varphi = 90°$ (wenn z. B. nur eine Kapazität oder nur eine Selbstinduktion in der Leitung ist), so ist die Leistung des Wechselstromes Null, d. h. es fließt zwar Strom, es wird aber keine Leistung abgegeben. Die während einer Viertelperiode von der Spannungsquelle abgegebene Energie wird während der folgenden wieder zurückgeliefert. Abb. 133 deutet dies an. Da immer Stromwärme entsteht, kann φ nicht genau 90° werden.

Für den Phasenunterschied φ zwischen Strom und Spannung gilt

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \dfrac{1}{\omega C}}{R}.$$

Hieraus folgt: Nur der Ohmsche Widerstand R ist ein Leistungsverbraucher. Nur wenn $R \neq 0$, ist $\operatorname{tg} \varphi \neq \infty$ und damit $\varphi \neq 90°$.

§ 24. Übertragung und Umformung elektrischer Energie

Elektrische Energie besitzt vor der mechanischen Energie und der Wärmeenergie den großen Vorzug, daß sie sich leicht verteilen und auf weite Entfernungen übertragen läßt. Ohne Verlust geht allerdings auch bei der elektrischen Energie die Übertragung nicht vor sich, und zwar deshalb nicht, weil jeder Strom in dem Leiter, durch den er fließt, Wärme erzeugt, oder anders ausgedrückt, weil jeder Leiter einen elektrischen Widerstand besitzt.

1. Energieverlust in der Zuleitung. Wir betrachten den Verlust an Energie an einem Beispiel. Das Elektrizitätswerk liefert Gleichstrom von der Spannung U. Die Zuleitung vom Werk zum Haus hat den Widerstand R_2, das eingeschaltete Bügeleisen den Widerstand R_1. Nach dem Ohmschen Gesetz ist

$$U = I \cdot (R_1 + R_2).$$

Die vom Elektrizitätswerk gelieferte Leistung ist

$$A = U \cdot I = I^2 \cdot (R_1 + R_2).$$

Es wird in diesem Falle sowohl in der Zuleitung als auch an der Verbrauchsstelle Wärme erzeugt. Sie ist proportional den beiden Anteilen der Leistung

$$A_1 = I^2 \cdot R_1 \text{ in dem Bügeleisen,}$$
$$A_2 = I^2 \cdot R_2 \text{ in der Zuleitung.}$$

Der Anteil A_2 ist der Leistungsverlust, der durch die Übertragung bedingt ist.

Besitzt das Bügeleisen den Widerstand 50 Ω und die Zuleitung den Widerstand 5 Ω, so ist bei 110 V Spannung die Stromstärke 2 A. Wir finden dann

$$A_1 = I^2 \cdot R_1 = 2^2 \cdot 50 \text{ W} = 200 \text{ W Nutzleistung,}$$
$$A_2 = I^2 \cdot R_2 = 2^2 \cdot 5 \text{ W} = 20 \text{ W Zuführungsleistung.}$$

Man hat natürlich das Bestreben, die Zuführungsleistung möglichst klein zu halten. Das kann man auf zweierlei Weise erreichen: Man baut die Zuleitung aus dickem Kupferdraht, so daß der Widerstand R_2 klein gegen R_1 ist. Das geschieht in der Praxis stets, und zwar schon deshalb, weil sich die Zuleitung nicht stark erhitzen darf.

Man kann aber auch die Spannung des Generators größer als 110 V machen, dann tritt folgendes ein: Ist die Spannung 1000 V, der Widerstand der Zuleitung wie vorher 5 Ω und der Widerstand an der Verbrauchsstelle 5000 Ω, so fließt der Strom 0,2 A in der Leitung. Wir finden:

$$A_1 = I^2 \cdot R_1 = 0{,}2 \cdot 0{,}2 \cdot 5000 \text{ W} = 200 \text{ W Nutzleistung,}$$
$$A_2 = I^2 \cdot R_2 = 0{,}2 \cdot 0{,}2 \cdot 5 \text{ W} = 0{,}2 \text{ W Zuführungsleistung.}$$

In diesem Falle wird also dieselbe Nutzleistung von 200 W übertragen. Der Aufwand für die Zuführung der Energie beträgt aber nur 0,2 W, also den 100. Teil dessen, was bei 110 V erforderlich ist.

Dieses Beispiel läßt sich auf die Übertragung elektrischer Energie durch Wechselstrom nicht ohne weiteres anwenden, weil für Wechselströme das Ohmsche Gesetz nicht gilt. Bei Wechselströmen ist die Selbstinduktion des Leiters neben dem Widerstand für die Übertragung wichtig. Auch bei Wechselströmen erzeugt aber der in der Leitung fließende Strom Wärme, und diese Wärme ist proportional dem Quadrat der Stromstärke. Bei sehr langen Leitungen fällt das erheblich ins Gewicht. Soll also die elektrische Energie wirtschaftlich, d. h. mit geringen Zuführungsverlusten übertragen werden, so muß man auch hier hohe Spannungen benutzen.

Die Übertragung elektrischer Energie erfolgt leistungssparend bei hohen Spannungen.

Hohe Spannungen sind aber wegen der Gefahren, die unbeabsichtigte Berührung der Leitungen in sich trägt, für den Anschluß der Verbrauchsgeräte ungeeignet. Man kann daher die bei hoher Spannung übertragene elektrische Energie nur ausnutzen, wenn die Spannung an der Verbrauchsstelle erniedrigt werden kann. Dies hat nur dann einen Zweck, wenn es in wirtschaftlicher Weise geschieht. Bei Wechselstrom ist das besonders einfach. Die Vorrichtungen, in denen er umgewandelt wird, heißen **Transformatoren.**[1])

2. Der Transformator. Der Transformator besteht aus einem aus Blechen zusammengesetzten Eisenrahmen, auf dem zwei Spulen I und II mit den Windungszahlen w_1 und w_2 sitzen (Abb. 134). Durch beide Spulen geht immer derselbe magnetische Kraftfluß $N = \mu \cdot q \cdot \mathfrak{H}$. Legt man an die Spule I eine Wechselspannung U_1', so ändert sich der Kraftfluß periodisch mit der Zeit. In den beiden Spulen werden dann die Wechselspannungen

$$U_1 = w_1 \frac{dN}{dt} \qquad \text{bzw.} \qquad U_2 = w_2 \frac{dN}{dt}$$

induziert.

Die induzierte Spannung U_1 muß nun der von außen angelegten Spannung U_1' nahezu das Gleichgewicht halten. Für die absoluten Beträge dieser Spannungen gilt daher $U_1' \approx U_1$. Es verhält sich also angenähert

$$U_1' : U_2 = w_1 : w_2$$

oder in Worten:

Legt man an die erste Spule die Wechselspannung U_1', so entsteht am Ausgang der zweiten Spule eine Wechselspannung U_2, die im Verhältnis der Windungszahlen der Spulen kleiner oder größer als U_1' ist.

Wird also z. B. die Spannung in einem Transformator von 3000 V auf 220 V herabgesetzt, so ist der der Spule mit niedriger Windungszahl entnommene Strom zur Verwendung im Haushalt geeignet.

---

1) transformare (lat.) = umformen

Die Transformatoren sind dauernd an das Hochspannungsnetz angeschlossen. Es fließt in der mit dem Netz verbundenen Spule I also dauernd Strom. In der Spule II fließt nur dann Strom, wenn irgendwo im Leitungsnetz Strom gebraucht und eingeschaltet wird. Ist es wirtschaftlich, wenn die Transformatorspule I dauernd mit dem Netz verbunden ist? Wird nicht dabei viel Energie verschwendet?

Darauf läßt sich antworten: Die aus dem Hochspannungsnetz in die Spule I fließende elektrische Energie wird nur zum geringen Teil in Wärme umgewandelt. Die verbrauchte Stromwärme ist gering. Ist der Stromkreis der Spule II (Abb. 134) nicht geschlossen (wird also dem Transformator keine Energie entnommen), so fließt in II kein Strom. In der Spule I fließt dann ein schwacher Strom mit großer Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom. Schwach ist er, weil eine Spule mit hoher Selbstinduktion (Transformatorspule mit Eisenkern) einen sehr großen Widerstand für Wechselstrom besitzt. Die Phase ist um nahezu 90° verschoben. Das folgt schon aus der Formel für tg φ von S. 80 (großes L, kleines R, $C = 0$). Die für den Aufbau des Magnetfeldes aufgewandte Leistung fließt bei seinem Zerfall als Leistung in die Spannungsquelle zurück. Ein geringer Betrag der Leistung wird für die Stromwärme im Ohmschen Widerstand R der Spule I und für die Ummagnetisierung des Spulenkerns, wobei auch Wärme entsteht, benötigt.

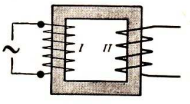


Abb. 134
Unbelasteter Transformator

Ist der Stromkreis der Spule II geschlossen (Abb. 135), wird also dem Transformator Energie entzogen, so fließt in II ein Strom, dessen Magnetfeld dem Magnetfeld der Spule I entgegenwirkt. Der Transformator nimmt mehr Energie aus dem Netz auf, weil der Teil der Energie des Magnetfeldes, der in der Spule II in elektrische Energie umgewandelt wird, nicht in das Netz zurückfließen kann. In I fließt in diesem Falle ein stärkerer Strom, bei dem Spannungs- und Stromphase wesentlich weniger gegeneinander verschoben sind.

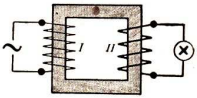


Abb. 135
Belasteter Transformator

Nennt man die in den Transformatorblechen in t Sekunden erzeugte Wärme $W \cdot t$ und mißt sie in Wattsekunden, so muß stets nach dem Satz von der Erhaltung der Energie gelten:

$$U_1 I_1 \cos\varphi_1 = U_2 I_2 \cos\varphi_2 + W.$$

Ist der Verlust W im Transformator gering und sind φ_1 und φ_2 beide klein, also $\cos\varphi_1$ und $\cos\varphi_2$ ungefähr 1, so gilt angenähert $U_1 I_1 \approx U_2 I_2$ und weil

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} \quad \text{oder} \quad U_1 = \frac{w_1}{w_2} U_2: \quad \frac{I_1}{I_2} \approx \frac{w_2}{w_1}.$$

Ein Transformator, der die Spannung heraufsetzt, setzt die Stromstärke im selben Verhältnis herab.

Abb. 136 stellt einen Drehstromtransformator dar, bei dem die 3 Transformatoren (je einer für jede Phase) in zunehmendem Montagezustand zu sehen sind: rechts der Eisenkern, in der Mitte der Eisenkern mit Spule I und links der Eisenkern mit Spule II (über Spule I). Abschließend wird der Transformator auch oben durch ein Eisenjoch magnetisch geschlossen.

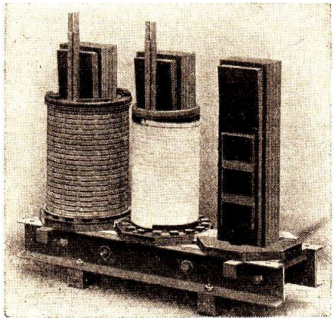


Abb. 136. Dreiphasenstromtransformator

3. Die Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom. Ein viel angewandtes Verfahren, Wechselstrom in Gleichstrom umzuwandeln, besteht darin, daß man den Wechselstrom zum Antrieb eines Wechselstrommotors benutzt, der mit einem Gleichstromgenerator gekoppelt ist. Man kann sogar den Gleichstrom aus einer Wicklung entnehmen, die auf dem Anker des Motors angebracht ist (Einankerumformer). Man kann aber auch den Wechselstrom gleichrichten (Glühkathodengleichrichter, Quecksilberdampfgleichrichter, elektrolytische Gleichrichter, Trockengleichrichter), d. h. so umformen, daß der Strom nur in einer Richtung fließt. Man erhält dann aus Wechselstrom von 50 Perioden Gleichstrom von 100 Stromstößen je Sekunde. (Weiteres darüber s. § 21 u. § 35.)

§ 25. Fernleitung und Speicherung elektrischer Energie

1. Überlandzentralen. Elektrische Energie kann wirtschaftlich auf viele hundert Kilometer übertragen werden. Sie wird an Orten erzeugt, wo Wasserkräfte oder Kohlengruben die Anlage von Kraftwerken vorteilhaft erscheinen lassen. Wasser- oder Dampfturbinen betreiben Einphasenstrom- oder Drehstromgeneratoren, deren Spannung einige tausend Volt und deren Leistung 10 bis 20 000 kW betragen. Dieser Wechselstrom wird in Transformatoren in Wechselstrom von 100 000 bis 200 000 V, neuerdings sogar von 380 000 V und mehr umgewandelt.

Von der Erzeugungsstelle wird er durch Fernleitungen, die an hohen Gittermasten an Porzellanisolatoren hängen, zu Umspannwerken (Abb. 137) geführt, wo der hochgespannte Strom auf eine geringere Spannung abgespannt (transformiert) wird. Vom Umspannwerk führen Freileitungen oder Kabel zu

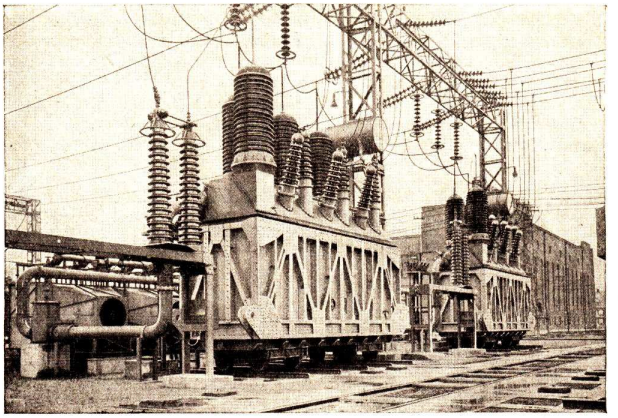


Abb. 137. Umspannwerk

den Transformatoren, die die Spannung auf die Gebrauchsspannung von 220 V herabsetzen, soweit nicht höhere Spannungen für Zwecke der Straßenbahnen oder der Industrie nötig sind. Die Überlandzentralen sind miteinander verbunden (vermascht), so daß der Strom beim Ausfall eines Werkes von einem anderen geliefert werden kann.

2. Die Belastungskurve. Die Generatoren eines Elektrizitätswerkes vermögen Tag und Nacht zu laufen. Dieser Möglichkeit, Tag und Nacht dieselbe Energie zu erzeugen, steht ein sehr unregelmäßiger Verbrauch gegenüber, wie Abb. 138 zeigt. (Begründung für den Verlauf!)

Das Elektrizitätswerk hat ein Interesse daran, daß seine Maschinen gleichmäßig ausgenutzt werden (billiger Nachtstrom!) und daß es die hohe Belastungsspitze am Abend in möglichst wirtschaftlicher Weise befriedigt. Das kann ebenfalls nur durch bessere Ausnutzung des Nachtstromes geschehen.

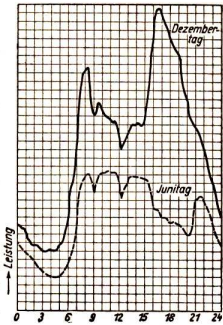


Abb. 138. Belastungskurve eines Elektrizitätswerkes

3. Speicherwerke. Besonders bei Wärmekraftwerken ist es vorteilhaft, der großen Beanspruchung in den Abendstunden anders als durch viele Reservemaschinen zu genügen. Es hat sich folgendes Verfahren als zweckmäßig erwiesen: Man hat zusätzlich Wasserkraftanlagen geschaffen, die nur Strom liefern, wenn die größte Leistung verlangt wird. In den stillen Zeiten wird dann der Strom, den das Hauptwerk liefert, zum Betrieb von Pumpen benutzt, die das Wasser wieder in die Höhe schaffen, so daß es am nächsten Abend wieder arbeitsfähig ist. Auf diese Weise „speichert" man Energie für die Hauptverbrauchszeit auf.

Zur Übung: Fragen: 1. Welche großen, durch Wärmekräfte betriebenen Elektrizitätswerke sind bekannt? — 2. Welche Wasserkraft-Elektrizitätswerke sind bekannt? — 3. Wo sind Umspannwerke in der Nähe des Schulortes? — 4. Woran ist zu erkennen, ob Drehstrom oder Einphasenstrom durch die Fernleitung übertragen wird?

III. Elektrische Leitungsvorgänge

A. Elektrische Leitung in Flüssigkeiten

§ 26. Die Ionenleitung in Elektrolyten

1. Die Faradayschen Gesetze. Wasser, in dem Salze, Säuren oder Basen gelöst sind, ist elektrisch leitend. Fließt Strom durch die Lösung, so werden die gelösten Stoffe durch den Strom zersetzt, und die primären oder sekundären Zersetzungsprodukte werden an den Elektroden ausgeschieden. Man nennt derartige Leiter Elektrolyte. Versuche ergeben:

An der Kathode (−Pol) wird stets das Metall oder der Wasserstoff ausgeschieden, an der Anode (+Pol) tritt der Molekülrest auf.

Quantitative Gesetze der Elektrolyse hat Faraday entdeckt. **Das erste Faradaysche Gesetz** lautet:

Die Masse m des an den Elektroden ausgeschiedenen Stoffes ist proportional der Stromstärke I und der Stromdauer t.

$$m = \ddot{A} \cdot I \cdot t.$$

Der Proportionalitätsfaktor $\ddot{A}$ dieses Gesetzes entspricht der in mg gemessenen Masse des Stoffes, der von 1 A in 1 s ausgeschieden wird.

$\ddot{A}$ wird das elektrochemische Äquivalent genannt.

Die nachstehende Tafel gibt die elektrochemischen Äquivalente für einige Stoffe an:

Stoff	Elektrochemisches Äquivalent $\ddot{A}$ mg/s	Atomgewicht A	Wertigkeit n	$\frac{A}{n}$	$\ddot{A} : \frac{A}{n}$
Silber[1])	1,118	108	1	108	0,010 35
Kupfer	0,329	63,6	2	31,8	0,010 31
Nickel	0,305	58,7	2	29,4	0,010 34
Wasserstoff.....	0,0104	1,008	1	1,008	0,010 32
Chlor	0,367	35,4	1	35,4	0,010 37

Aus den durch Versuche gewonnenen Zahlen der Tabelle erkennt man das **zweite Faradaysche Gesetz:**

Die elektrochemischen Äquivalente verschiedener chemischer Elemente verhalten sich wie die Quotienten aus ihrem Atomgewicht und ihrer Wertigkeit:

$$\ddot{A}_1 : \ddot{A}_2 = \frac{A_1}{n_1} : \frac{A_2}{n_2}.$$

2. Die Faradaysche Zahl. Beide Faradayschen Gesetze kann man in einem einzigen zusammenfassen. Es besagt, daß eine bestimmte Stoffmenge ausgeschieden wird, wenn eine bestimmte Ladung durch den Elektrolyten fließt. Der Strom I bewegt während der Zeit t die Ladung $Q = I \cdot t$. Sie wird in Amperesekunden (Coulomb) gemessen, wenn der Strom in A und die Zeit in s gemessen wird. Nach Spalte 6 der Tabelle werden von 1 Coulomb ausgeschieden: 0,000 010 34 g eines Stoffes vom Atomgewicht 1 und der Wertigkeit 1 oder $A \cdot 0{,}000\,010\,34$ g eines Stoffes vom Atomgewicht A und der Wertigkeit 1. Es scheiden dann 96 500 Coulomb A g eines Stoffes vom Atomgewicht A und der Wertigkeit 1 aus. A g eines Stoffes vom Atomgewicht A bezeichnet man als ein Grammatom. Es ergibt sich daher:

Bei der elektrolytischen Ausscheidung von 1 Grammatom eines n-wertigen Stoffes fließen $n \cdot 96500$ Coulomb (Faradaysche Zahl) durch den Elektrolyten.

3. Die Ionenleitung. Wird ein Salz, eine Säure oder eine Base in Wasser aufgelöst, so spalten sich die Moleküle des gelösten Stoffes, z.B. $CuSO_4$, $ZnSO_4$, H_2SO_4, NaOH in negativ und positiv geladene Teile, die **Ionen** genannt werden. Diese Erscheinung heißt Dissoziation. Die Ionen sind beweglich in der Flüssigkeit und durch Wassermoleküle getrennt. Wird mittels eines geladenen Plattenkondensators eine Spannung zwischen den Elektroden angelegt, so wandern die positiven Ionen dem Zug der Feldlinien folgend zur Kathode (Kationen) und die negativen Ionen zur Anode (Anionen). Berühren die Ionen die Elektroden, so geben sie, wenn sie negativ geladen sind, überschüssige Elektronen an die Anode ab, wenn sie positiv geladen sind, neutralisieren sie sich durch Aufnahme von Elektronen aus der Kathode. Dadurch entlädt sich der Kondensator.

1) Der Wert für Silber liegt bekanntlich der Definition des Ampere zugrunde (vgl. § 1).

Die Entladung durch den Elektrolyten ist also mit einem elektrischen Strom verbunden. Nimmt man an, daß gleiche Ionen die gleiche Ladung haben, so ist die an die Elektroden abgegebene Ladung proportional der Zahl der abgeschiedenen Ionen. So ist in einfacher Weise erklärt, daß die hindurchgeflossene Ladung proportional der Zahl der Ionen ist, die ausgeschieden werden.

4. Das elektrische Elementarquantum. Wenn mit der Ladung 96 500 Coulomb gleichzeitig 1 g Wasserstoff ausgeschieden wird, so sind dabei $6{,}02 \cdot 10^{23}$ Wasserstoffionen beteiligt, denn soviel Atome besitzt 1 g Wasserstoff (Teil I B, § 40). Trägt jedes Ion dieselbe Ladung e, so ist die Ladung eines Wasserstoffions

$$e = \frac{96\,500}{6{,}02 \cdot 10^{23}} = 1{,}60 \cdot 10^{-19}\,\text{Coulomb}.$$

Andere einwertige Ionen (z. B. die von Silber) besitzen dieselbe Ladung, zweiwertige Kupferionen besitzen die doppelte, dreiwertige Ionen die dreifache Ladung. Das erklärt die Faradayschen Gesetze. Die Ladung $e = 1{,}60 \cdot 10^{-19}$ Coulomb heißt die **elektrische Elementarladung.** Man hat die Größe der elektrischen Elementarladung direkt bestimmt: Man beobachtet mit dem Mikroskop ein winziges elektrisch geladenes Tröpfchen, das von einem elektrischen Felde gegen die Schwerkraft gerade in der Schwebe gehalten wird. Kennt man die Masse des Teilchens, so läßt sich aus der Feldstärke seine Ladung berechnen. Man fand nun, daß die Ladungen der Tröpfchen stets ein ganzzahliges Vielfaches der oben genannten Elementarladung waren.
Man kann nun auch feststellen, aus wievielen Molekülen ein Mol oder aus wievielen Atomen ein Grammatom eines Stoffes besteht. Denn wenn in den Faradayschen Versuchen ein Grammatom eines einwertigen Stoffes 96 500 Coulomb mit sich führt, so gibt der Quotient $\frac{96\,500}{1{,}60 \cdot 10^{-19}}$ die Zahl der Einzelteilchen an, aus denen das Grammatom zusammengesetzt ist. $N = \frac{96\,500}{1{,}60 \cdot 10^{-19}} = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ ist die Loschmidtsche Zahl, der wir bereits in der kinetischen Gastheorie (Teil I B, S. 109 und 196) begegnet sind. Man erhielt nach vielen verschiedenen Meßmethoden immer den gleichen Wert für diese Zahl. Darin liegt ein starker Beweis für die Richtigkeit der Atomvorstellung.

Ein Körper kann nur mit einem ganzzahligen Vielfachen von e geladen sein; kleinere Ladungen als e hat man bis jetzt nicht gefunden.

An einigen Beispielen geben wir durch die Zeichen + und − an, in welche Ionen die genannten Moleküle zerfallen und wieviel Elementarladungen sie tragen:

$CuSO_4 = Cu^{++} + SO_4^{--}$, $ZnSO_4 = Zn^{++} + SO_4^{--}$, $H_2SO_4 = H^+ + H^+ + SO_4^{--}$,
$ZnCl_2 = Zn^{++} + Cl^- + Cl^-$, $NaCl = Na^+ + Cl^-$, $H_2O = H^+ + OH^-$.

5. Die Beweglichkeit der elektrolytischen Ionen. Wegen der Reibung der Ionen in der Flüssigkeit tritt eine konstante Geschwindigkeit und keine Beschleunigung auf. Man kann das Vorrücken eines farbigen Ionenschwarmes im Elektrolyten beobachten und so die Geschwindigkeit der Ionen messen.

Sie ist der Feldstärke proportional und beträgt in einem Feld, dessen Feldstärke 1 V/cm ist, bei 20° C für das

Na-Ion 0,00045 cm/s, Cl-Ion 0,00067 cm/s, H-Ion 0,0032 cm/s.

Das Wasserstoffion besitzt unter allen elektrolytischen Ionen bei weitem die größte Beweglichkeit.

Unter nicht extremen Bedingungen gilt für die Elektrolyte das Ohmsche Gesetz.

§ 27. Galvanisches Element und Akkumulator

1. Das Entstehen der Spannung im Element. Taucht man Zink in verdünnte Schwefelsäure, so löst es sich teilweise auf, indem positiv geladene Zinkionen in die Flüssigkeit übertreten (Abb. 139). Zwischen dem durch die Ionenabgabe negativ aufgeladenen Zinkstab und der Flüssigkeit entsteht dabei ein elektrisches Feld. Je mehr Zinkionen gelöst werden, desto größer wird die Spannung zwischen dem Zink und der Flüssigkeit. Hat die Spannung eine gewisse Größe erreicht, so verwehrt das elektrische Feld weiteren Zinkionen den Übertritt in die Flüssigkeit.

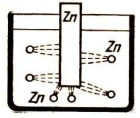


Abb. 139. Lösung von Zink in verdünnter Schwefelsäure

Taucht man zwei verschiedene Metalle, z. B. Zink und Kupfer, in verdünnte Schwefelsäure, so entsteht je eine Spannung zwischen Zink und Flüssigkeit und zwischen Kupfer und Flüssigkeit. Die Spannungen sind verschieden groß. Zwischen Zink und Kupfer entsteht dann eine Spannung, die dauernd erhalten bleibt (Galvanisches Element). Ähnlich verhalten sich andere Metalle und Elektrolyte.

Die Spannung der meisten galvanischen Elemente ändert sich schon bei geringer Stromentnahme. Eine äußerst konstante Spannung hat das Weston-Element (Spannung 1,018 30 V bei 20° C). Die Spannung dieses Normalelementes ist bis auf 1 Zehntausendstel reproduzierbar (§ 1).

Zur Übung: Miß die Spannung, die zwischen Aluminium, Zink, Blei, Eisen, Kupfer und Retortenkohle entsteht, wenn je zwei von ihnen in verdünnte Schwefelsäure getaucht werden.

Die Spannung zwischen Zink und Kupfer beträgt in verdünnter Schwefelsäure etwa 1,06 V, zwischen Zink und Kohle etwa 1,5 V.

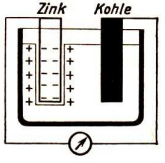


Abb. 140 Galvanisches Element

2. Der elektrische Stromkreis der Elemente. Tauchen Zink und Kohle in verdünnte Schwefelsäure, so sammeln sich um das Zink gelöste Zn-Ionen an, wie Abb. 140 andeutet. Zwischen dem Zinkstab und der Flüssigkeit, bzw. der sie berührenden Kohle, herrscht eine Spannung. Verbindet man die Kohle durch einen Leitungsdraht mit dem Zink, so fließt ein elektrischer Strom durch die Flüssigkeit und den Draht. In der Flüssigkeit wandern

dann die Zinkionen zur Kohle und im Draht Elektronen von dem Zinkstab zur Kohle. Dabei vermindert sich die Spannung. Sie wird aber sofort wieder erneuert, indem neue Zinkionen in Lösung gehen. In einem Element, das Strom liefert, wird also fortwährend Zink aufgelöst.

3. Die elektrische Polarisation. Bei der elektrolytischen Stromleitung ändert sich durch die Abscheidung der aus den Ionen entstehenden Moleküle die Oberfläche der Elektroden und damit ihre Spannung gegenüber der Flüssigkeit. Taucht man z. B. in eine Schwefelsäurelösung zwei Platindrähte, so ist zwischen diesen keine Spannung feststellbar, weil beide gegenüber der Lösung die gleiche Spannung haben. Leitet man aber eine Zeitlang einen Strom durch die Lösung, indem man die Platindrähte als Elektroden benutzt, so überzieht sich die Kathode durch die Wasserstoffabscheidung mit einer Wasserstoffhaut, während die Anode durch die Sauerstoffabscheidung verändert wird. Jetzt verhalten sich die Elektroden wie zwei verschiedene Stoffe, ähnlich wie Zink und Kohle. Nach Abschalten des Stromes kann man wie aus einem galvanischen Element einen Strom entnehmen, der dem Strom, der vorher durch den Elektrolyten floß, entgegengesetzt gerichtet ist, ihn also hemmte. Diese durch den Strom erzeugte Erscheinung an den Elektroden nennt man **Polarisation.** Sie tritt auch auf, wenn man die Platindrähte durch verschiedenartige Elektroden ersetzt.

In den Taschenlampen- und Klingelelementen beseitigt man die unerwünschte Minderung der Spannung infolge der Polarisation, indem man den Kohlepol des Elementes mit Braunstein umgibt. Dieser gibt leicht Sauerstoff ab, der sich mit dem abgeschiedenen Wasserstoff zu Wasser vereinigt.

4. Der Akkumulator. Leitet man elektrischen Strom durch eine elektrolytische Zelle, die aus zwei Bleiplatten besteht, die in verdünnte Schwefelsäure eintauchen, so wandern SO_4-Ionen zur Anode und Wasserstoffionen zur Kathode. Dabei überzieht sich die Anode mit Bleidioxyd. Die Elektroden werden auf diese Weise so stark verändert (polarisiert), daß sie wie zwei verschiedene Metalle wirken und ein Element bilden, das Strom liefern kann.



Abb. 141
Bleiakkumulator

Die technisch hergestellten Bleiakkumulatoren (Abb. 141) bestehen aus einer reinen und einer mit Bleidioxyd überzogenen (braunen) Bleiplatte, die in verdünnte Schwefelsäure tauchen. Zwischen den Platten entsteht eine Spannung von etwa 2 V. Sinkt die Spannung des Akkumulators auf 1,8 V, so muß er aufgeladen werden, indem man von neuem Strom durch ihn hindurchschickt, der dem entnommenen Strom entgegengesetzt gerichtet ist. Man braucht zum Laden von Akkumulatoren also Gleichstrom. Gute Bleiakkumulatoren geben 80 % der elektrischen Energie, die in sie hineingeschickt ist, wieder her. Sie müssen sorgfältig behandelt werden, dürfen also nicht angestoßen oder kurzgeschlossen werden.

Weniger empfindlich als Bleiakkumulatoren sind Eisen-Kadmium-Akkumulatoren. Ihr Wirkungsgrad ist aber nur etwa 40 bis 50 %. Alle galvanischen Elemente und Akkumulatoren liefern Gleichstrom. Die Ladung, die man in einem Akkumulator aufsspeichern und aus ihm wieder entnehmen kann, nennt man seine „Kapazität" (nicht zu verwechseln mit der Kapazität eines Kondensators) und gibt sie in Amperestunden an. Ein 2 V-Akkumulator mit einer Kapazität von 25 Amperestunden kann also 100 Stunden hindurch 0,25 A liefern und damit eine Energie von $2 \times 25 \times 3600 = 180000$ Wattsekunden oder rund 18000 kpm abgeben.

B. Elektrische Leitungsvorgänge in Gasen und im Vakuum

§ 28. Die Kathodenstrahlen

1. Die Eigenschaften der Kathodenstrahlen. Bei hoher Spannung (etwa 1000 Volt) fließt durch eine Röhre, in der die Luft auf weniger als $\frac{1}{100}$ Torr verdünnt ist, ein elektrischer Strom (Abb. 142). Dabei treten aus der Kathode Strahlen aus, die **Kathodenstrahlen** genannt werden. Versuche zeigen: Die Kathodenstrahlen selbst sind unsichtbar. – Sie bewirken, daß z. B. Glas, Kristalle, ein mit Leuchtmasse überzogener Schirm aufleuchten, wenn sie von ihnen getroffen werden. – Sie breiten sich geradlinig aus (Schatten auf der Glaswand der Röhre). – Sie werden durch ein magnetisches Feld senkrecht zur Richtung der Feldlinien abgelenkt. – In einem elektrischen Feld werden sie von der positiven Grenzfläche des Feldes angezogen. – Man kann sie durch eine dünne Aluminiumfolie in Luft normalen Druckes austreten lassen, in die sie je nach der angelegten Spannung bis zu mehreren Zentimetern tief eindringen können.

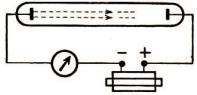


Abb. 142
Erzeugung von Kathodenstrahlen

Hat die Kathode z. B. die Form einer Kreisplatte (Abb. 143), so wird diese auf der Glaswand durch die austretenden Kathodenstrahlen scharf abgebildet. Das läßt sich nur so erklären, daß die Kathodenstrahlen, ohne einander zu durchkreuzen, senkrecht aus der Kathode K austreten und sich geradeaus auf die Glaswand zu bewegen.

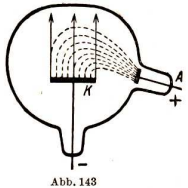


Abb. 143
Weg der Kathodenstrahlen

Bestehen sie aus negativ geladenen Teilchen, dann ist es möglich, daß sie dem Zug der Feldlinien folgend bei der hohen Spannung eine große Geschwindigkeit erlangen. Ihre Bewegungsrichtung muß dann anfangs senkrecht zur Kathode sein, weil die Feldlinien senkrecht aus ihr austreten. Besitzen die Teilchen eine Masse, so fliegen sie bei großer Geschwindigkeit geradeaus

und folgen wegen ihrer Trägheit nicht weiter dem Zug der Feldlinien nach der Anode A. Aus Versuchen und Überlegungen dieser Art ergibt sich:

Die Kathodenstrahlen bestehen aus Masseteilchen, die negativ geladen sind und sich durch ein elektrisches Feld beschleunigt von der Kathode fortbewegen. Diese negativ geladenen Masseteilchen heißen „Elektronen".

2. Das Verhältnis der Ladung zur Masse des Elektrons. Einen wichtigen Aufschluß über die Elektronen gibt der im folgenden angedeutete Versuch der Bestimmung des Verhältnisses der Ladung e zur Masse m der Elektronen. Er beruht auf folgenden Grundgedanken:

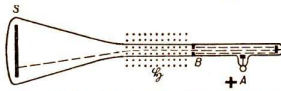


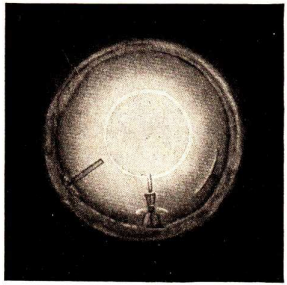
Abb. 144. Ablenkung der Kathodenstrahlen durch ein Magnetfeld

In der in Abb. 144 dargestellten Kathodenstrahlröhre kann man ein schmales Kathodenstrahlbündel erzeugen, indem man die von der Kathode K ausgehenden Elektronen durch eine Blende B treten läßt. Das Bündel trifft auf einen Leuchtschirm S. Hinter der Blende befindet sich ein homogenes Magnetfeld, durch das die Elektronen seitlich abgelenkt werden (vgl. b).

a) Herrscht zwischen der Kathode K und der Anode A die Spannung U, so beträgt die elektrische Energie $U \cdot e$, wenn sich das Elektron von K bis A bewegt. Aus dieser Energie gewinnt es kinetische Energie. Ist seine Masse m und erlangt es die Geschwindigkeit v, so ist die kinetische Energie

$$\tfrac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = k_{m,e} \cdot U \cdot e,$$

wobei $k_{m,e} = 0{,}1$ kpm/Joule das einzusetzende Energieäquivalent ist, und U in Volt, e in Coulomb gemessen sind.


Abb. 145. Elektronenring im Magnetfeld

Aus dieser Beziehung läßt sich hinsichtlich der Geschwindigkeit der Schluß ziehen:

Die Geschwindigkeit der Elektronen ist abhängig von der Spannung U der Röhre und von dem Verhältnis $\frac{e}{m}$ der Ladung und der Masse der Elektronen

$$v = \sqrt{2 \cdot k_{m,e} \cdot U \cdot \frac{e}{m}}.$$

b) Besitzen n über die Länge l verteilte Elektronen die Geschwindigkeit v, so wirken sie bei ihrer Bewegung wie ein Strom $I = n \cdot \frac{e \cdot v}{l}$. Einem einzelnen Elektron ist demnach nur der n-te Teil der Stromstärke zugehörig: $\frac{e \cdot v}{l}$. In einem homogenen Magnetfeld $\mathfrak{H}$ wird ein Strom stets senkrecht zu seiner Richtung abgelenkt. Da die ablenkende Kraft P unveränderlich ist (§ 21; $P = 10{,}2 \cdot \mu \cdot \mathfrak{H} \cdot l \cdot I$ oder $P = 10{,}2 \cdot \mu \cdot \mathfrak{H} \cdot e \cdot v$), so beschreibt das Elektron im Magnetfeld eine Kreisbahn. Aus der Ablenkung kann man den Radius r der Kreisbahn bestimmen. Man kann auch in einem geeigneten Gefäß die Elektronen so ablenken, daß sie einen vollständigen Kreis bilden (Abb. 145).

c) Da die Elektronen eine Masse m besitzen, muß eine Zentralkraft $Z = m \cdot \frac{v^2}{r}$ wirksam sein, wenn sie sich auf einem Kreis bewegen. Z ist gleich der ablenkenden Kraft P.

Mißt man in den Versuchen U, $\mathfrak{H}$ und r, so findet man aus den Beziehungen:

Das Verhältnis der Ladung e zur Masse m der Elektronen beträgt immer

$$\frac{e}{m} = 1{,}76 \cdot 10^8 \, \frac{\text{Coulomb}}{\text{g}}.$$

Dieses bei allen Elektronen gleiche Verhältnis von Ladung zu Masse nennt man die spezifische Ladung $\frac{e}{m}$.

3. Die Geschwindigkeit und die Masse der Elektronen. Die nachstehende Tabelle gibt die Werte der Geschwindigkeit an, die man aus der Gleichung für v erhält, wenn man den Wert $\frac{e}{m}$ einsetzt. Messungen hatten das zunächst unerwartete Ergebnis, daß Elektronen nicht gemäß der Gleichung beliebig große Geschwindigkeiten erreichen können. Vielmehr zeigte sich, daß die Masse der Elektronen nicht konstant ist, sondern mit der Geschwindigkeit anwächst. Je mehr sich die Elektronengeschwindigkeit der Lichtgeschwindigkeit nähert, um so größer wird ihre Masse und um so geringer daher ihre Beschleunigung. Bei Lichtgeschwindigkeit wird ihre Masse unendlich groß. Daher können Elektronen diese Geschwindigkeit nicht überschreiten. Die sogenannte Relativitätstheorie zeigte, daß dieses für Elektronen beobachtete Verhalten für alle Körper gilt.

Spannung V	Geschwindigkeit km/s
1	590
10	1 900
100	5 900
1 000	19 000
10 000	59 000

Die Geschwindigkeit der Elektronen in einer Kathodenstrahlröhre nähert sich bei hohen Spannungen der Lichtgeschwindigkeit.

Wir haben in § 26 erwähnt, daß die kleinste festgestellte Ladung eines Ions $1{,}60 \cdot 10^{-19}$ Coulomb beträgt. Da ein positives Ion durch Aufnahme eines Elektrons neutralisiert werden kann, müssen auch die Elektronen alle dieselbe Ladung wie die einwertigen Ionen besitzen. Es gilt also:

Die Ladung des Elektrons ist $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb.

Setzen wir diesen Wert in die Gleichung für $\frac{e}{m}$ ein, so finden wir für die Masse

$$m = \frac{1{,}6 \cdot 10^{-19}}{1{,}76 \cdot 10^8} = 9{,}1 \cdot 10^{-28}\,\text{g}.$$

Die Masse eines Elektrons ist $9{,}1 \cdot 10^{-28}$ g.
1 g Wasserstoff enthält $6 \cdot 10^{23}$ Atome (§ 26). 1 Atom Wasserstoff hat also die Masse $\frac{1}{6 \cdot 10^{23}}\,\text{g} = 1{,}7 \cdot 10^{-24}$ g.

Vergleichen wir die Massen des Elektrons und des Wasserstoffatoms, so ergibt sich:

Die Masse eines Elektrons ist der 1840 ste Teil der Masse des Atoms kleinsten Atomgewichts.

4. Das Elektron als Erzeuger von Röntgenstrahlen. Von den Vorgängen, die durch schnell bewegte Elektronen hervorgerufen werden, sei zunächst die Erzeugung der Röntgenstrahlen erwähnt, weil wir von Röntgenstrahlen im folgenden wiederholt sprechen müssen, bevor wir sie eingehend behandeln. Abb. 146 stellt eine Röntgenröhre alter Bauart dar. In der stark ausgepumpten Röhre fallen von der hohlspiegelförmigen Kathode K die Kathodenstrahlen auf die Antikathode AK, die aus Platin oder Wolfram besteht. Von der Stelle, an der die schnellen Elektronen gebremst werden, gehen die Röntgenstrahlen nach allen Seiten aus. Sie bewirken, daß das Glas der Röhre, das sie durchdringen, gelbgrünes Licht aussendet. Sie schwärzen die photographische Platte, breiten sich geradlinig aus, lassen sich durch elektrische und magnetische Felder nicht ablenken und durchdringen undurchsichtige Körper von ganz erheblicher Dicke. Im einzelnen ist von ihren Eigenschaften noch später die Rede (Teil II B, § 24). Praktisch sind sie so wichtig geworden, weil sie dem Arzt zur Durchleuchtung des menschlichen Körpers und in der Technik zur Untersuchung der Werkstoffe dienen.

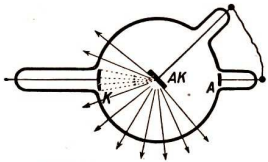


Abb 146. Röntgenröhre alter Bauart

§ 29. Die Kanalstrahlen

1. Die Eigenschaften der Kanalstrahlen. Es war naheliegend, daß die physikalische Forschung festzustellen suchte, ob auch von der Anode Strahlen ausgingen. Versuche, die diesem Zweck dienten, hatten erst Erfolg, nachdem man Röhren mit durchlöcherten Kathoden baute und im Raum hinter der Kathode nach Strahlen suchte. Goldstein stellte 1886 fest, daß durch die Kanäle der Kathode Strahlen kommen, die sich geradlinig ausbreiten (Abb. 147). Er nannte sie **„Kanalstrahlen"** und nicht Anodenstrahlen, weil sich herausstellte, daß sie nicht von der Anode ausgingen, sondern aus dem Raum vor der Kathode stammten.

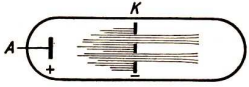


Abb. 147. Kanalstrahlen

Die Kanalstrahlen bewirken, daß Gase, Glas, Leuchtmasse, die von ihnen getroffen werden, aufleuchten. – Sie sind magnetisch ablenkbar. – Sie werden im elektrischen Feld von der negativen Grenzfläche angezogen.

Durch Ablenkungsversuche hat Wilhelm Wien (1864–1928) festgestellt: Das Verhältnis der Ladung e der Kanalstrahlteilchen zu ihrer Masse m ist wesentlich kleiner als bei den Elektronen. Ihre Masse entspricht der Masse der Atome des Füllgases der Röhre. Ihre Geschwindigkeit beträgt bei den in der Röhre herrschenden Spannungen etwa 100 km/s. Zusammenfassend ergibt sich:

Die Kanalstrahlen sind schnell bewegte positiv geladene Atome.

2. Massenspektrograph. Im Jahre 1919 hat der Engländer Aston die Ablenkbarkeit der Kanalstrahlen benutzt, um genaue Atomgewichtsbestimmungen auszuführen. In dem zu untersuchenden Gas erzeugte er Kanalstrahlen, aus denen durch zwei Blenden B (Abb. 148) ein sehr schmales Bündel ausgesondert wurde. Dieses Bündel lenkte er durch ein elektrisches Feld und ein magnetisches Feld so ab, daß auf einer photographischen Platte Strahlen derselben Masse und derselben Ladung genau in einem Punkt, Strahlen verschiedener Masse und derselben Ladung in verschiedenen Punkten vereinigt wurden. Auf der entwickelten photographischen Platte zeigten sich dort schwarze Flecke.

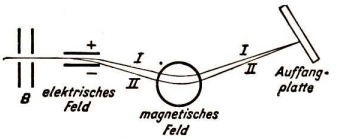


Abb. 148. Massenspektrograph. Bahnen eines schnellen Teilchens (I) und eines langsamen Teilchens (II) von gleicher Masse und Ladung

Abb. 149 gibt eine Aufnahme der Flecke wieder, die durch die Atome des Gases Krypton erzeugt sind. Das Atomgewicht des Kryptons beträgt 82,9. Aus der Aufnahme stellte Aston fest, daß Krypton Atome des Atomgewichts 78, 80, 82, 83, 84, 86 enthält. Die Flecke



Abb. 149. Massenspektrum des Kryptons

sind scharf gegeneinander abgegrenzt. Es kommen nur ganzzahlige Atomgewichte vor. Krypton besteht also aus Atomen verschiedenen Atomgewichts. Der Anteil jeder Gruppe an der Gesamtzahl ist so groß, daß sich im Durchschnitt das chemische Atomgewicht 82,9 ergibt.

Man hat die Versuchseinrichtung Massenspektrograph genannt, weil die Massen verschiedener Größe auf der Platte wie Spektrallinien nebeneinander geordnet erscheinen und aus der Stärke und dem Abstand der Flecke auf die Anzahl und die Masse der Atome geschlossen werden kann. Die weit links auftretenden Flecke rühren von Atomen her, die zweifach geladen sind.

3. Isotope. Die Massenspektren anderer Elemente zeigen ähnliche Ergebnisse. Auch Wasserstoff und Sauerstoff bestehen aus Atomen verschiedener Masse. Es gibt Wasserstoff mit Atomen vom Atomgewicht 1 und 2 (leichten und schweren Wasserstoff). Sauerstoff enthält neben Atomen vom Atomgewicht 16 solche vom Atomgewicht 17 und 18. Man nennt Atome verschiedener Masse, aber mit gleichen chemischen Eigenschaften, Isotope. Die meisten chemischen Elemente haben sich als Mischungen aus Isotopen erwiesen (Teil II B, Abschn. E).

§ 30. Glüh- und Photoelektronen, Glühkathodenröhre

1. Elektronenaustritt bei hoher Temperatur. An Glühlampen ohne Füllgas hatte Edison vor etwa 50 Jahren folgende Beobachtung gemacht, die sich leicht nachprüfen läßt: Man wickelt einen Kupferdraht um die Glaswand der Lampe und führt das Ende zum Blättchen eines Elektroskops (Abb. 150). Wird das Elektroskop positiv geladen, dann fällt der Ausschlag sofort zusammen, wenn die Lampe eingeschaltet wird. Ist es negativ geladen, dann wird es beim Einschalten der Lampe nicht entladen. Edison stellte fest, daß auf der Glaswand gegenüber dem glühenden Faden negative Ladung auftritt, wenn die Lampe brennt. Die positive Ladung des Elektroskops wird von ihr angezogen. Sie wird daher dem Elektroskop entzogen. Der Ausschlag nimmt ab. Bei negativer Ladung tritt eine abstoßende Wirkung ein. Der Ausschlag kann daher nicht abnehmen.

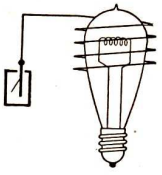


Abb. 150. Edisons Versuch

30 Jahre später hat man folgendes festgestellt: In einer Röhre mit hohem Vakuum erhitzt man die Elektrode D durch einen von einem Akkumulator gelieferten Strom zu heller Glut (Abb. 151). Verbindet man A und D, ohne daß eine Spannung angelegt wird, dann fließt ein Strom von A nach D. Der Strom fließt nur dann, wenn die Elektrode D glüht. Je heller die Glut ist, desto stärker ist der Strom. Da die Vorgänge nur durch die Veränderung des Zustandes der Elektrode D bedingt sind, so kann der in der Röhre fließende elektrische Strom nur dadurch verursacht sein, daß aus D Ladungen austreten, die nach A wandern. Weitere Versuche (vgl. § 30,3) zeigen:

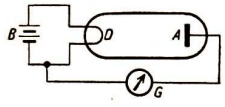


Abb. 151
Glühkathodenröhre mit 2 Elektroden

Aus einem glühenden Metall treten Elektronen aus.

2. Glühkathodenröhre mit drei Elektroden. Noch eingehender kann man dies mit einer Dreielektrodenröhre nachweisen. Sie enthält als dritte Elektrode ein zwischen D und A angebrachtes „Gitter" S, das Gitterelektrode genannt wird. Diese besteht meist aus einer Drahtwendel, die wie ein weitmaschiges Gitter wirkt.

Erhitzt man die Glühelektrode, so wandert ein Elektronenschwarm von D durch das Gitter S nach A. Er ist durch den Strom nachweisbar, der durch das zwischen A und D eingeschaltete Galvanometer fließt (Abb. 152). Berührt man die Gitterzuführung mit der Hand, so wird der Strom stärker.

Dies ist einfach zu erklären. Das isolierte Gitter fängt Elektronen auf und lädt sich negativ. Die negative Ladung von S wirkt hemmend auf die Bewegung der Elektronen nach A. Nimmt man die Ladung des Gitters durch Berührung mit der Hand weg, so können sie ungehemmt wandern. Der Strom wird dann stärker.

Schaltet man zwischen D und S einen Akkumulator (Abb. 153) ein, so daß zwischen D und S ein elektrisches Feld besteht, dann ergibt sich folgendes: Ist S negativ und D positiv geladen, so wirkt das Feld hemmend auf die Bewegung der Elektronen nach A, und außerdem wird der Austritt der Elektronen in D gehemmt. Ist S positiv und D negativ geladen, so wird beides begünstigt. Man bemerkt einen starken Strom, obwohl man doch hätte erwarten können, daß die Elektronen nicht nach A, sondern nur nach S wandern. Wenn wir aber berücksichtigen, daß Elektronen in einem Feld von 2 V/cm etwa 1000 km/s Geschwindigkeit erlangen, dann versteht man, daß die meisten Elektronen infolge ihrer Trägheit durch die Maschen des Gitters hindurch nach A fliegen. D ist die Kathode (Glühkathode), A die Anode der Röhre.

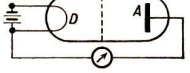


Abb. 152. Dreielektrodenröhre

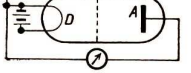


Abb. 153. Dreielektrodenröhre mit angelegter Gitterspannung

Der auf die Anode fließende Strom heißt Anodenstrom.

Je nach der Richtung des Feldes spricht man kurzweg von positiver oder negativer Gitterspannung. Aus den Versuchen ergibt sich:

Negative Gitterspannung hemmt, positive fördert den Anodenstrom.

Schaltet man zwischen die Anode A und die Glühkathode D eine Batterie von 100 V ein (Abb. 154), so fließt ein stärkerer Strom durch das Amperemeter, wenn D mit dem negativen Pol der Batterie verbunden ist. Ist A mit dem negativen Pol verbunden, dann fließt überhaupt kein Strom durch die Röhre.

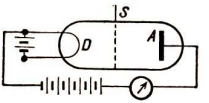


Abb. 154
Nachweis des Anodenstromes

Legt man gleichzeitig zwischen Gitter S und Heizdraht D und zwischen Anode A und Heizdraht D Spannung an, so kann man den Anodenstrom durch die Gitterspannung beeinflussen. Glühkathodenröhren mit drei Elektroden haben folgende für ihre Verwendung wichtige Eigenschaften:

In Glühkathodenröhren fließt der Strom nur in einer Richtung. Der Anodenstrom ist durch die Gitterspannung regelbar.

Einfache Glühkathodenröhren mit drei Elektroden haben die in Abb. 155 wiedergegebene Form. Der Glühfaden D besteht aus einem Wolframdraht (Wolfram hat einen hohen

Schmelzpunkt, ist daher hoch erhitzbar); das Gitter S ist als Wendeldraht um die Glühkathode gelegt; die Anode ist ein dünnes Blech, das zylindrisch gebogen ist und S und D umgibt. Durch den Sockel der Röhre, die luftleer gepumpt ist, führen die Zuleitungen zu den Elektroden.

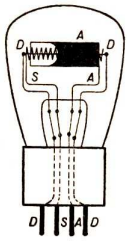


Abb. 155. Einfache Dreielektrodenröhre

3. Die Eigenschaften der Glühelektronen. Unsere Auffassungen können erst als gesichert gelten, wenn die aus heißen Körpern austretenden Teilchen sich wirklich als Elektronen erweisen. Dieser Nachweis kann dadurch geführt werden, daß man für die Teilchen, die **Glühelektronen**, das Verhältnis e/m bestimmt (§ 28).

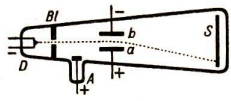


Abb. 156. Röhre zum Nachweis der elektrischen Ablenkung der Glühelektronen

In Abb. 156 ist eine Röhre mit geringer Gasfüllung gezeichnet, deren Glühkathode aus einem Platinblech besteht, das einen Bariumoxydfleck trägt. Aus ihm treten die Elektronen besonders leicht aus. A ist die seitlich angebrachte Anode. Bl ist eine Lochblende. Wird die Glühkathode geheizt, so treten aus ihr Elektronen aus. Das Glas der Röhre leuchtet schwach bläulich auf, wo es von Elektronen getroffen wird. Wird zwischen A und D eine hohe Spannung angelegt, so bewegen sich die Elektronen mit großer Geschwindigkeit geradlinig durch die Blendenöffnung. Auf dem am Ende der Röhre angebrachten Leuchtschirm S erscheint dann ein heller Fleck, der durch den auftreffenden Elektronenstrahl hervorgerufen wird. Erzeugt man zwischen den Kondensatorplatten a und b ein elektrisches Feld, so wird der Elektronenstrahl abgelenkt. Aus der Größe der Ablenkung kann man $\frac{e}{m}$ berechnen (vgl. § 28, 2). Messungen ergeben:

Das Verhältnis $\frac{e}{m}$ der Glühelektronen ist dasselbe wie $\frac{e}{m}$ der Kathodenstrahlen.

Glühelektronen und Kathodenstrahlelektronen sind also gleichartig. Treten aus dem glühenden Draht Elektronen aus, so hat der Vorgang eine gewisse Ähnlichkeit mit der Dissoziation der Moleküle in einem Elektrolyten, nur handelt es sich hier nicht um eine Spaltung der Moleküle, sondern um eine Spaltung der Atome. Die Masse eines Elektrons ist etwa $\frac{1}{100\,000}$ der Masse eines Metallatoms. Das Elektron ist ein Bestandteil des Metallatoms, der durch ein elektrisches Feld mit dem Atom verbunden ist. Der Atomrest muß positiv geladen zurückbleiben, wenn das Elektron aus dem Atom austritt. Der Austritt aus einem Atom kann bedingt sein durch hohe Spannung oder starke Wärmebewegung im Metall (Glühelektronen) oder andere Energieübertragung auf das Elektron. Die Richtigkeit dieser Auffassung hat sich bestätigt.

Das Elektron ist ein Bestandteil des Atoms.

Dies erklärt auch folgende Erscheinung:

4. Der lichtelektrische Effekt, Photoelektronen. Wir verbinden eine Metallplatte A mit dem Blättchen eines Elektroskops und bestrahlen sie mit Röntgen-

strahlen (Abb. 157). Wir bemerken an dem mit ihr verbundenen Elektroskop, daß sich die Platte stark positiv auflädt. Verbinden wir sie durch ein Galvanometer mit der Erde, so fließt ein Strom, solange die Platte bestrahlt wird. Die gleiche Wirkung ruft ultraviolettes Licht hervor, das auf Metallplatten fällt. Sie ist im Vakuum besonders stark. Kennzeichnend ist, daß das bestrahlte Metall sich als positiv geladen erweist.

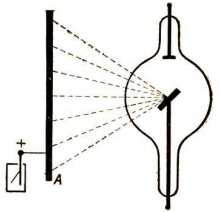


Abb. 157. Austritt der Photoelektronen

Diesen Vorgang bezeichnet man als lichtelektrischen Effekt. Er läßt sich in folgender Weise erklären: Durch die Strahlen werden Elektronen aus den Atomen, in denen sie durch elektrische Felder gebunden sind, herausgerissen. An Stelle der thermischen Energie, die Glühelektronen auslösen kann, ist hier die Energie der Röntgen- und ultravioletten Strahlen wirksam. Das Metall muß dann positiv geladen zurückbleiben. Daß es sich auch in diesem Falle um Elektronen handelt, hat man durch Messung der spezifischen Ladung $\frac{e}{m}$ nachgewiesen.

Elektronen, die durch Licht oder Röntgenstrahlen aus Metallen ausgelöst werden, nennt man Photoelektronen.

Geräte, in denen man durch Licht Elektronen zum Austreten aus Metallen veranlaßt, nennt man **Photozellen.** Lichtschwankungen werden in Photozellen in elektrische Stromschwankungen umgewandelt.

5. Lichtdruck. Die auffallende Tatsache, daß die Kometenschweife stets von der Sonne fort gerichtet sind, hatte bereits Kepler (1609) zu der Vermutung geführt, daß hier ein Druck der Sonnenstrahlen wirksam sein müßte. Erst sehr viel später konnte ein derartiger Einfluß des Lichtes theoretisch begründet und experimentell nachgewiesen werden. Nach der Maxwellschen Theorie (II B, S. 98) muß das Licht, wenn es die Oberfläche eines Körpers trifft, auf diesen einen Druck ausüben. Auf einen Körper, der nur nach einer Seite strahlt, muß eine Kraft in der den Strahlen entgegengesetzten Richtung wirken, ähnlich wie der Rückstoß beim Abfeuern eines Geschützes. Dieser theoretisch vorausgesagte Lichtdruck konnte von dem russischen Physiker Lebedew (um 1900) durch sinnreiche Versuche experimentell gemessen werden. Der Druck der Sonnenstrahlen auf die Oberfläche der Erde beträgt etwa 0,5 mp/qm. Die durch das Licht auf die Erde ausgeübte Druckkraft ist also verschwindend klein gegenüber der Anziehungskraft der Sonne auf die Erde. Diese Größenbeziehung bleibt aber nicht bestehen, wenn die Sonnenstrahlen auf sehr kleine Körperchen einwirken, denn die Kraftwirkung des Lichtdruckes ist der getroffenen Fläche, die der Gravitation aber der Masse und daher auch dem Volumen des Körpers proportional. Der auf eine kleine Kugel wirkende Lichtdruck nimmt daher mit dem Quadrat des Radius, die Anziehungskraft der Sonne aber mit der dritten Potenz des Radius der Kugel ab. Bei genügend kleinen Körperchen kann also die Wirkung des Lichtdruckes die der Gravitation übersteigen. Dann werden die Teilchen durch den Strahlungsdruck von der Sonne fortgetrieben. Nimmt man an, daß die Hülle eines Kometen aus sehr feinem kosmischem Staub besteht, dann lassen sich alle an den Kometenschweifen beobachteten Erscheinungen durch den Lichtdruck erklären, und zwar das Auftreten der Schweife, ihr Wachsen bei der Annäherung des Kometen an die Sonne und ihre mit dem Stande zur Sonne veränderliche Richtung (vgl. Teil I B, § 42).

§ 31. Leitung in Gasen

1. Unselbständige Leitung in Gasen. Gase sind unter gewöhnlichen Umständen gute Isolatoren. Sie können aber auch gut leitend werden. Verbinden wir z.B. die Platten eines Kondensators (Abb. 158) mit dem Blättchen und dem Gehäuse eines Elektroskops und laden sie dann auf, so bleibt der Ausschlag des Elektroskops unverändert, weil die Luft zwischen den Kondensatorplatten nicht leitet. Das wird sofort anders, wenn wir z. B. ein brennendes Streichholz unter den Kondensator halten, so daß die heiße Luft zwischen den Platten emporsteigt. Das Elektroskop entlädt sich rasch. Zwischen den Platten fließt ein elektrischer Strom, wenn stark erhitzte Luft oder heiße Verbrennungsgase in das elektrische Feld des Kondensators eindringen. – Das gleiche beobachtet man, wenn der Raum zwischen den Platten mit ultraviolettem Licht oder Röntgenstrahlen bestrahlt wird (Abb. 159). – Schnelle Kathoden- und Kanalstrahlen und radioaktive Strahlen wirken genau so (§ 36). Andere Gase verhalten sich ebenfalls wie die Luft, wenn sie der Einwirkung dieser Strahlen ausgesetzt werden.

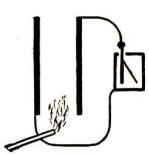


Abb. 158

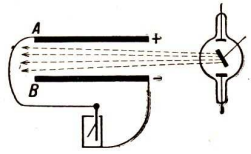


Abb. 159

Versuche zur Leitung in Gasen

Gase werden elektrisch leitend, wenn sie stark erhitzt oder mit Röntgenstrahlen, Kathodenstrahlen, ultraviolettem Licht, radioaktiven Strahlen bestrahlt werden. Sie werden dabei „ionisiert", d.h. die neutralen Moleküle werden in entgegengesetzt geladene Teile gespalten. Dabei treten Ionen und Elektronen auf.

Die erzeugten Ionen bewegen sich im elektrischen Feld auf die Grenzflächen zu und führen so den Ladungstransport herbei. Weil äußere Mittel angewandt werden und das Gas nur so lange leitend ist, wie sie wirksam sind, spricht man in diesem Falle von einer unselbständigen Leitung der Gase.

Physikalisch gesehen ist es kein großer Unterschied, ob mit den erwähnten Energiearten in einem festen Körper oder in Gasen Elektronen von den Atomen losgelöst werden. Auf jeden Fall ist eine Arbeit nötig, um Elektronen von Atomen oder Molekülen abzutrennen.

2. Gasionen. Alle Beobachtungen sprechen dafür, daß durch die erwähnte Bestrahlung im Gas positiv und negativ elektrisch geladene Moleküle entstehen, die man Gasionen nennt. Wird z.B. Röntgenlicht von einem Molekül absorbiert, dann kann ein Elektron aus ihm herausgeworfen werden.

Es tritt also eine photoelektrische Wirkung auf. Das Molekül bleibt positiv geladen zurück. Das befreite Elektron kann entweder frei bleiben oder auf ein anderes Molekül treffen und von ihm festgehalten werden. So entstehen negativ geladene Gasmoleküle. Auch die Gasionen bleiben nicht immer selbständig. Oft lagern sich ungeladene Moleküle an sie an, die influenziert werden und dann dadurch an dem geladenen Molekül haften. So entstehen größere Ionen, die als Kern ein Gasion besitzen, an das eine Anzahl ungeladener Moleküle gelagert ist.

Einfache Gasionen und Ionen, die an die Moleküle angelagert sind, haben in elektrischen Feldern verschiedene Geschwindigkeiten. Einfache Gasionen bewegen sich wegen ihrer geringen Masse wesentlich rascher als größere Gasionen. Am schnellsten bewegen sich in elektrischen Feldern die freien Elektronen.

3. Ionisation und Neutralisation. Bei gewöhnlicher Temperatur sind Gase praktisch nicht leitend, obwohl ihre Moleküle mit großer Geschwindigkeit aufeinanderstoßen. Ionisation erfolgt erst bei den viel heftigeren Stößen der Moleküle sehr heißer Gase oder bei der großen Energie, die Ionen und Elektronen in starken elektrischen Feldern erhalten. Gleichzeitig mit der Erzeugung von Ionen erfolgt der Vorgang der Wiedervereinigung von Gasionen verschiedener Ladung zu neutralen Molekülen. Diese Wiedervereinigung geht so rasch vor sich, daß nach einer Sekunde der größte Teil der Ionen wieder verschwunden ist, wenn durch Ionisation nicht neue erzeugt werden. Man kann die Beweglichkeit der Ionen messen und berechnen und findet: In einem Feld, dessen Feldstärke 1 V/cm beträgt, wandern die Luftionen bei Atmosphärendruck mit einer Geschwindigkeit von rund 1 cm/s. Wasserstoffgasionen besitzen eine Beweglichkeit von 5 bis 10 $\frac{\text{cm/s}}{\text{Volt/cm}}$. Ionen, an die Moleküle angelagert sind, besitzen nur den 1000. bis 100. Teil der Beweglichkeit der Gasionen. Dagegen haben Elektronen wegen ihrer geringen Masse eine etwa 2000mal so große Beweglichkeit als Wasserstoffionen.

Ionen kann man in übersättigtem Wasserdampf sichtbar machen. Sie bilden die Kerne, an denen sich kleine Wassertröpfchen niederschlagen. Auf diese Weise kann die Spur der Röntgenstrahlen oder der radioaktiven Strahlen sichtbar gemacht werden (§ 36).

4. Selbständige Leitung in Gasen. In einer Röhre von etwa 40 cm Länge mit zwei Elektroden verdünnen wir die Luft. Bei Drucken von etwa 40 Torr bis herab zu 0,02 Torr beobachtet man dann Leuchterscheinungen, wenn man eine Gleichspannung von etwa 1000 Volt oder mehr anlegt (Abb. 160). Das Gas in der Röhre leuchtet, sobald die Spannung angelegt wird, ohne Ionisierung von außen. Es liegt also eine selbständige Leitung vor. Dennoch spielt auch hier die Ionisierung eine Rolle. Sie leitet den Vorgang ein, auf dem die Leitfähigkeit des Gases beruht. Das Gas in der Röhre ist stark verdünnt. Die Weglänge, die die Moleküle zwischen ihren Zusammen-

stößen frei zurücklegen, ist größer als bei normalem Luftdruck. Die Feldstärke ist in der Nähe der Kathode besonders groß. Dort werden positive Gasionen, die immer in der Luft, z. B. durch Radioaktivität, vorhanden sind, stark beschleunigt gegen die Kathode bewegt. Durch den Aufprall werden aus dem Metall Elektronen ausgelöst, die in entgegengesetzter Richtung stark beschleunigt werden. Sie sprengen, wenn sie auf Moleküle treffen, Elektronen aus ihnen heraus, ohne bei ihrer großen Geschwindigkeit selbst eingefangen zu werden. Jedes Elektron befreit andere, diese ihrerseits wieder andere, ihre Zahl wächst lawinenhaft an. Das Gas in der Röhre wird ionisiert. Die in der Röhre herrschende hohe Feldstärke beschleunigt die Elektronen und Ionen. Die Zusammenstöße zwischen ihnen und neutralen Molekülen werden durch ihre hohe Geschwindigkeit so heftig, daß die Moleküle und Ionen (wie in stark erhitzten Gasen) Licht aussenden. Die Zahl der so „angeregten" Moleküle ist groß genug, um intensives Licht zu erzeugen, das z. B. in den Leuchtröhren benutzt wird. In den dunklen Räumen (z. B. vor der Kathode) werden die Elektronen und Ionen beschleunigt.

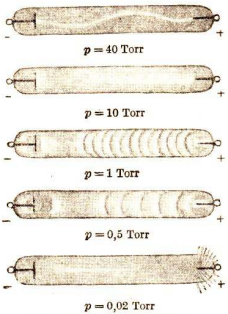
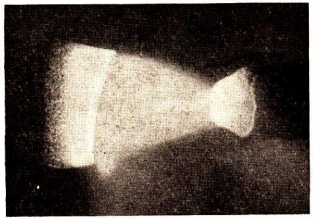


Abb. 160. Leuchten in Röhren bei verschiedenen Gasdrucken p

Auch das Leuchten des elektrischen Funkens erklärt sich auf diese Weise, endlich auch das Entstehen des Lichtbogens zwischen zwei Kohlestäben (Abb. 161). Sind die Spitzen der Kohlestäbe durch die Stromwärme glühend geworden, so treten zahlreiche Glühelektronen aus dem negativen Pol aus und ionisieren durch Stoß die Luftmoleküle. Der Grad der Ionisation, der dabei in der erhitzten Luft erreicht wird, ist so groß, daß die Luft nur einen geringen Widerstand besitzt. Es entsteht eine Temperatur von über 4000° C, wodurch ebenfalls Moleküle ionisiert werden. Die hohe Temperatur der Elektroden und des Gases zwischen ihnen liefert so viele Ladungsträger, daß man auf hohe Spannungen und Feldstärken verzichten kann. Ein Bogen braucht daher nur ungefähr 50 Volt, um zu brennen, die Gasentladung bei kalten Elektroden aber über 500 Volt.


Abb. 161. Elektrischer Lichtbogen

C. Elektrische Leitung in festen Körpern

§ 32. Die Leitfähigkeit fester Körper

1. Die elektrische Leitung in Metallen. Sinnreiche Experimente und die durch Versuche bestätigte Theorie der Elektrizitätsleitung in Metallen haben gezeigt, daß der in einem Leiter fließende elektrische Strom aus Elektronen besteht, die sich in Richtung des Feldes bewegen.

Die elektrischen Ströme in Metallen beruhen auf der Wanderung von Elektronen durch das Gefüge des Metalles.

Man beachte: Die Bewegungsrichtung der negativen Elektronen ist der als positiv definierten Stromrichtung entgegengesetzt.

Die Zahl der Elektronen, die in einem metallenen Leiter einem elektrischen Feld folgen können, also „frei" sind, ist außerordentlich groß. Rechnet man auf jedes Atom nur ein freies Elektron, so enthält 1 g Kupfer etwa 10^{22} leicht verschiebbare Elektronen. Ein Kupferdraht von 1 mm² Querschnitt und 1 m Länge besitzt das Volumen 1 cm³ und die Masse 8,9 g. Er enthält also etwa $9 \cdot 10^{22}$ solcher Elektronen und jedes Stück von 1 mm Länge $9 \cdot 10^{19}$ Elektronen. Bewegen sich die Elektronen, so fließt durch den Draht ein Strom. Da jedes Elektron die Ladung $1{,}60 \cdot 10^{-19}$ C besitzt, ergibt sich bei 1 mm/s Geschwindigkeit die Stromstärke $9 \cdot 10^{19} \cdot 1{,}60 \cdot 10^{-19}$ C/s oder rund 14 A. Diese Stromstärke wird erreicht, wenn die Spannung an den Enden des 1 m langen Leiters 0,25 V beträgt. Es genügt also eine sehr geringe Geschwindigkeit der Elektronen, um starke Ströme zu erzeugen. Diese Überschlagsrechnung zeigt uns:

Die Geschwindigkeit der in metallenen Leitern strömenden Elektronen ist sehr gering.

2. Die Leitfähigkeit metallener Leiter. Die Leitfähigkeit der Metalle ist durch den reziproken Wert ihres spezifischen Widerstandes gegeben (vgl. § 2). Der Widerstand metallener Leiter ist abhängig von ihrer Temperatur. Er nimmt mit steigender Temperatur zu, für 1° um etwa 0,4 bis 0,6 %.

Man benutzt diese Eigenschaft des elektrischen Widerstandes zur Temperaturmessung. Die **Widerstandsthermometer** bestehen aus dünnen Drähten oder Folien geeigneter Metalle, z. B. Platin, Nickel, Eisen usw. Man bringt die in geeigneter Form angeordneten Metalldrähte in wärmeleitende Berührung mit den Körpern, deren Temperatur gemessen werden soll, schließt an eine Stromquelle an und bestimmt aus Strom- und Spannungsmessung den Widerstand. Die diesem Widerstand zugeordnete Temperatur entnimmt man der vorher aufgenommenen Eichkurve des Widerstandsthermometers. In der Nähe des absoluten Nullpunktes der Temperatur wird der Widerstand der Metalle sehr klein. Bei vielen Stoffen, z. B. Blei, verschwindet der Widerstand einige Grad über dem absoluten Nullpunkt plötzlich und vollständig. Diese Erscheinung nennt man Supraleitung.

3. Elektrische Leitung in Nichtmetallen und Isolatoren. Alle festen Körper sind mehr oder weniger elektrisch leitend, auch die Isolatoren, nur ist ihre Leitfähigkeit sehr gering, nimmt aber mit wachsender Temperatur im allgemeinen zu.

Den Grad der Leitfähigkeit schlechter Leiter kann man auf folgende Weise messen. Man bildet aus einem Kondensator C von etwa 4 Mikrofarad, einer Glimmlampe G (Abb. 162) und

einem Telephon T einen Stromkreis. Zu den Punkten A und D leitet man eine Gleichspannung. Schaltet man nun zwischen A und B einen schlechten Leiter, z. B feuchtes Holz, einen feuchten Bindfaden, Marmor, Schiefer usw. ein, so lädt sich der Kondensator C auf. Sobald seine Spannung gleich der Zündspannung der Lampe geworden ist, entlädt er sich über sie und über das Telephon. Im Telephon entsteht ein Knacken, die Lampe leuchtet auf. Aus der mehr oder minder raschen Aufeinanderfolge der Glimmentladungen kann man auf die Größe des Widerstandes des Leiters zwischen A und B schließen. — Leitet er so gut, daß die Zahl der Glimmentladungen nicht mehr zählbar ist, dann hört man im Telephon einen Ton, dessen Höhe von dem Widerstand abhängt. Glas ist bei gewöhnlicher Temperatur ein guter Isolator. Erhitzt man es zur hellen Rotglut, so wird es ein guter Leiter. — Selen besitzt die Eigenschaft, seine Leitfähigkeit zu ändern, wenn es von Licht getroffen wird (weil dann im Inneren durch Photoeffekt Elektronen abgelöst werden und nun wie die freien Elektronen bei der Leitung in Metallen wirksam sind). Man benutzt die Selenzellen, um Lichtströme zu messen.

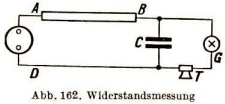


Abb. 162. Widerstandsmessung bei schlechten Leitern

§ 33. Elektrische Vorgänge in Grenzflächen fester Leiter

1. Der Thermostrom. Erhitzt man die Löt- oder Schweißstelle zweier verschiedener Metalle, so entsteht an ihr eine elektrische Spannung. Es fließt ein Strom durch die Grenzfläche.

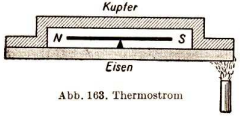


Abb. 163. Thermostrom

Man erhält einen starken Strom, wenn man zwei dicke Metallstäbe (Abb. 163) aus Kupfer und Eisen oder Kupfer und Konstantan[1]) so zusammenlötet, daß sie einen geschlossenen Leiterkreis bilden. So lange die eine Lötstelle heißer als die andere ist, fließt ein elektrischer Strom durch den Leiterkreis. Er lenkt eine Magnetnadel ab.

Man nennt einen elektrischen Strom, der durch Erhitzen oder Abkühlen der Berührungsstelle zweier verschiedener Metalle entsteht, einen Thermostrom.

Die erwärmte Lötstelle wirkt wie ein Element. Man spricht deshalb von einem Thermoelement. Die elektrische Spannung des Thermoelements hängt ab von der Art der verbundenen Metalle und dem Temperaturunterschied zwischen der erwärmten Lötstelle und der Stelle, wo die Metalle wieder miteinander verbunden sind. Erhitzt man die eine Lötstelle auf 100° und hält die andere auf 0°, so beträgt die Spannung (Thermokraft) für

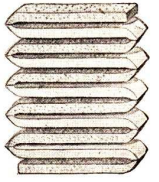
Wismut — Antimon	0,011 V	Nickel — Eisen	0,0032 V
Konstantan — Eisen	0,0053 V	Kupfer — Eisen	0,0010 V
Kupfer — Konstantan ...	0,0041 V	Platin — Platinrhodium ..	0,0006 V

1) constans (lat.) = beständig; eine Legierung aus Nickel und Kupfer, deren Widerstand fast unabhängig von der Temperatur ist

Obwohl die Spannung sehr gering ist, fließen in Thermoelementen aus dicken Metallstäben bei 200° bis 300° Temperaturunterschied sehr starke Ströme, die bei ein bis zwei Windungen kräftige Magnetfelder erzeugen (Abb. 164). Lötet man Streifen aus verschiedenen Metallen abwechselnd aneinander und ordnet die Lötstellen so an, daß auf der einen Seite die ungeraden, auf der anderen die geraden nebeneinander liegen (Abb. 165), dann kann man z. B. die ungeraden gemeinsam erwärmen und die geraden gemeinsam abkühlen. Man erhält dann eine Thermobatterie, deren Spannung entsprechend der Zahl der darin enthaltenen Einzelelemente vergrößert ist. Thermoelemente dienen zur Messung geringer Wärmemengen (z. B. der Wärmewirkung im Spektrum), zur Bestimmung sehr geringer Temperaturunterschiede (bis millionstel Grade) und zur Messung hoher Temperaturen.



Abb. 164. Thermoelement als Stromquelle für einen Elektromagneten


Abb. 165 Thermobatterie

2. Mikrophon[1]) und Detektor[2]). Die Wirkung des Mikrophons und des Detektors beruht auf dem Widerstand, den die Elektronen beim Durchgang durch die Grenzfläche zweier Körper finden. Die im Mikrophon lose aneinander liegenden Kohlekörner bieten den Elektronen nur wenige Brücken zwischen der Membran M und dem Kohleblock B. In dem Maße, wie sie aneinandergedrückt werden, vermehrt sich die Zahl der Brücken. Daher wechselt der Widerstand und damit die Stromstärke im Kohlemikrophon mit den Druckschwankungen, die die Schallwellen beim Auftreffen auf die Membran hervorrufen (Abb. 166).



Abb. 166 Kohlemikrophon

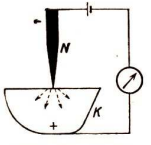


Abb. 167. Kristalldetektor, schematisch

Der Kristalldetektor (Abb. 167) besteht aus einer Nadel N, deren Spitze unter leichtem Druck gegen einen Kristall K (Bleiglanz PbS, Pyrit FeS_2) gerichtet ist. Die Elektronen treten viel leichter aus der metallenen Spitze in den Kristall als aus dem Kristall in die Spitze über. Der Unterschied ist so stark, daß der Detektor sehr schwache Wechselströme praktisch nur in einer Richtung hindurchläßt.

Zur Übung: Aufgaben: a) Welche Stromstärke fließt in einem Thermostromkreis, der aus einem Kupferstab von 10 cm und einem Eisenstab von 30 cm Länge gebildet wird, wenn die beiden Lötstellen eine Temperaturdifferenz von 300° besitzen? Der Durchmesser der Stäbe betrage 1 cm. Es werde angenommen, daß die Thermospannung bis 300° C proportional der Temperatur wächst. — b) Welcher Strom fließt in einem Kupfer-Konstantan-Element bei einer Temperaturdifferenz von $\frac{1}{100}$°, wenn der Stromkreis einen Widerstand von 10 Ω besitzt?

1) mikros (griech.) = klein, phōné (griech.) = Ton 2) detector (lat.) = Aufdecker

§ 34. Telegraphie- und Fernsprechströme

1. Leitungen. Bei der Telegraphie[1]) über Draht sind beide Stationen durch zwei Leitungen, Hin- und Rückleitung, verbunden. Für einen der beiden Wege kann man die Erde als Leiter benutzen. Man führt dann die Leitung einmal isoliert gegen die Erde von einer Station zur anderen und stellt auf jeder Station eine leitende Verbindung zu einer im Boden eingegrabenen Metallplatte (Erdstecker) her. Die Leitfähigkeit der Erde ist zwar gering, sie genügt aber bei dem großen Querschnitt, den der Strom benutzen kann, durchaus, um kräftige Ströme zu übertragen (Abb. 168).

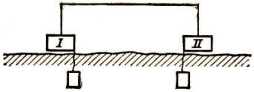


Abb. 168. Rückleitung durch Erde

2. Telegraphieströme. Beim Telegraphieren werden kurzdauernde Stromstöße durch die Leitung gesandt, welche die beiden Stationen verbindet. Es kommt dabei darauf an, daß die Ströme rasch zu voller Stärke anwachsen und rasch wieder abnehmen, damit die aufeinanderfolgenden Zeichen sich scharf voneinander abheben (Abb. 169). Die deutliche Übertragung wird daher durch die Selbstinduktion und die Kapazität der Telegraphenleitung wesentlich beeinflußt.


Abb. 169. Stromstöße beim Telegraphieren

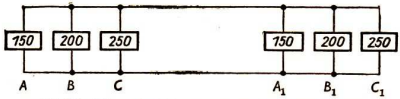


Abb. 170. Schema der Mehrfachtelegraphie auf einer Leitung

Für die Telegraphie in Überseekabeln, die eine sehr große Kapazität besitzen, verwendet man nicht gleichgerichtete Stromstöße, sondern Stromstöße wechselnder Richtung, aus denen man die Zeichen zusammensetzt. Man kann auch mit Wechselströmen telegraphieren, wenn man die Ströme beim Empfang gleichrichtet. In diesem Falle ist es sogar möglich, mehrere Telegramme auf einer Leitung gleichzeitig zu geben. Die zugeordneten Sender und Empfänger benutzen dann Wechselströme verschiedener Frequenz (Abb. 170). Sendet A mit der Frequenz 150, dann wird dieser Strom durch Resonanz nur von A_1 aufgenommen, nicht von B_1 oder C_1. Entsprechend wird die Sendung von B nur von B_1, und von C nur von C_1 empfangen, wenn sie Stromwechsel von 200 bzw. 250 Hz benutzen.

3. Fernsprechströme auf Einfachleitungen. Nachrichtenverkehr auf Einfachleitungen ist stets abhörbar, weil der elektrische Strom durch die Erde von einer zur anderen Station fließt. Zwei Stationen A und B seien durch

1) tēle (griech.) = fern, graphein (griech.) = schreiben

eine einfache Leitung miteinander verbunden (Abb. 171). Die zweite Leitung wird durch die Erde ersetzt, die durch Erdstecker in den Stromkreis mit einbezogen wird (vgl. Abb. 168). Ein zweites, in gleicher Weise miteinander verbundenes Stationspaar C, D liege zwischen A und B oder in der Nachbarschaft. Es ist dann ohne weiteres möglich, daß die Erdströme des einen Stationspaares in die Leitung des anderen gelangen und dort den Sprechverkehr durch Fremdempfang stören.

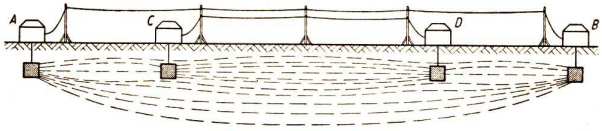


Abb. 171. Fernsprechen mit Einfachleitungen

4. Fernsprechströme auf Doppelleitungen. Im Fernsprechverkehr der Post werden nur Doppelleitungen verwendet, die entweder als Freileitungen an Masten aufgehängt sind oder in Kabeln verlaufen. Auch Doppelleitungen müssen gegen das Abhören oder Mithören gesichert werden, denn ein Wechselstrom, der in einer Leitung fließt, ruft in einer ihm benachbarten Leitung durch Induktion einen Wechselstrom hervor, dessen Richtung und Stärke sich in demselben Takte wie beim induzierenden Strom ändern. Diesen Einfluß kann man aufheben, indem man die Fernsprechdoppelleitungen in dem Kabel verdrillt oder die Leitungen an dem Gestänge so führt, daß sie abschnittsweise gegeneinander versetzt sind.

Bei Gesprächen auf große Entfernungen ist der Ohmsche Widerstand der Leitungen so groß, daß nur schwache Ströme im Hörer ankommen, denn im Mikrophon kann man nur Ströme benutzen, die über eine bestimmte Stärke nicht hinausgehen. Will man daher auf große Entfernungen sprechen, so muß man die Ströme unterwegs so verstärken, daß sie an der entfernten Sprechstelle die erforderliche Lautstärke im Telephon hervorbringen. Dies geschieht mit Hilfe der Glühkathodenröhre in der in § 35 geschilderten Weise. Noch wichtiger für eine gute Übertragung der Sprache ist aber, daß die Laute und Töne verzerrungsfrei übertragen werden. Die in der Fernsprechleitung übertragenen elektrischen Wechselströme besitzen nicht dieselbe Geschwindigkeit. Schnell wechselnde elektrische Ströme (hohe Töne) besitzen eine geringere Geschwindigkeit als langsamer wechselnde Ströme (tiefe Töne). Daher kommen unter Umständen Laute, die nacheinander gesprochen werden, aber verschieden im Klang sind, auf einer entfernten Sprechstelle gleichzeitig an. Die Sprache kann dann nach Verstärkung laut vernehmbar sein, sie ist aber nicht verständlich. Von einer guten Fernsprechübertragung muß verlangt werden, daß sie „verzerrungsfrei" erfolgt. Das wird erreicht, indem man abschnittsweise in 1 bis 3 km Entfernung in der

Leitung Spulen (Pupinspulen[1])) einschaltet, die durch ihre induktive Trägheit alle Wellen eines Frequenzbereiches gleichmäßig dämpfen und ihnen somit gleiche Geschwindigkeit verleihen und außerdem die Dämpfung vermindern. Mit Hilfe von Pupinspulen und Verstärkern (§ 35), die etwa alle 75 km in die Leitung eingebaut sind, kann man über jede beliebige Entfernung durch Drahtverbindung telephonieren.

§ 35. Niederfrequenzverstärker und Gleichrichter

1. Die Glühkathodenröhre als Verstärker. Das einfachste Gerät, Wechselströme mit Tonfrequenzen wahrnehmbar zu machen, ist das Telephon. Es spricht auf einzelne Stromstöße und auf Wechselströme bis zu 3000 Hz gut an. Oft sind aber die Wechselströme, die man wahrnehmen will, zu schwach, um die Membran des Telephons zu bewegen. Das ist z. B. bei Ferngesprächen auf langen Leitungen, beim Empfang von entfernten Rund-

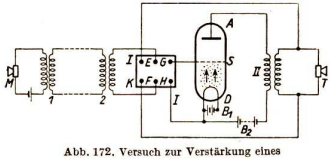


Abb. 172. Versuch zur Verstärkung eines Fernsprechstromes

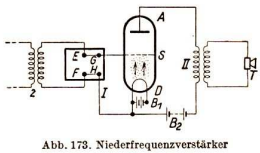


Abb. 173. Niederfrequenzverstärker

funksendern usw. der Fall. Mit Hilfe der Glühkathodenröhre gelingt es, schwachen, im Telephon nicht wahrnehmbaren Strömen die erforderliche Stärke zu geben. Wie dies geschieht, deuten die Abb. 172 und 173 an.

M stellt ein Mikrophon dar, auf dessen Sprechtrichter z. B. eine Taschenuhr gelegt werden kann, damit ein Geräusch von gleichbleibender Lautstärke auf die Mikrophonmembran wirkt. Der Mikrophonstrom wird im Transformator 1 umgeformt und nach dem Transformator 2 der Empfangsstation geleitet. Dort ist ein Umschalter angebracht, durch den das Telephon T entweder unmittelbar an die Sekundärspule des Transformators 2 (wenn E mit I und F mit K verbunden ist) oder unter Einschaltung einer Dreielektrodenröhre an die Sekundärspule des Transformators 2 angeschlossen werden kann (wenn E mit G und F mit H verbunden ist). Man hört im ersten Falle ein leises und im letzteren ein starkes Ticken im Telephon.

Diese Wirkung erklärt sich in folgender Weise (Abb. 173). Fließen im Stromkreis I die im Mikrophon erzeugten Wechselströme, so wechselt das elektrische Feld zwischen dem Gitter S und der Kathode D seine Richtung. Ist D negativ und S positiv, so werden die aus D austretenden negativen Elektronen durch Anziehung beschleunigt; ist D positiv und S negativ, so werden sie durch Abstoßung zurückgehalten. Liegt nun im Stromkreis II zwischen der Anode A und der Kathode D eine Gleichstromspannung B_2 von etwa 100 V, so fließt im ersten Falle ein starker Strom durch die Röhre und den Stromkreis II, während er im letzteren Falle stark geschwächt wird. Es entsteht im Stromkreis II ein im Takte der Gitterspannung pulsierender Gleichstrom, dessen Schwankungen größer sind als ohne Verstärkerröhre. Er wird durch die Wechselspannungen zwischen Gitter und Glühkathode gesteuert. Seine Energie stammt aus B_2 und ist größer als die Energie des Wechselstromes in I. Fließt

1) Nach Michael Pupin benannt

er durch einen Transformator und wird er von ihm auf ein Telephon T übertragen, so wirkt ein Strom von etwa 10facher Stärke auf die Membran. Leitet man den Strom im Kreise II wie vorher den Strom im Kreise I in eine zweite Röhre, so kann die Stromenergie auf das Hundertfache, durch eine dritte Röhre auf das Tausendfache gesteigert werden.

Verstärker dieser Art nennt man **Niederfrequenzverstärker,** weil sie dazu dienen, Wechselstromschwingungen niederer Frequenz, die den Frequenzen der Sprachschwingungen (30 bis 5000 Hz) entsprechen, zu verstärken. Von Hochfrequenzverstärkern ist später (Teil II B, § 15) die Rede.

2. Die Glühkathodenröhre als Gleichrichter. Einrichtungen, die dazu dienen, Wechselstrom in Gleichstrom umzuwandeln, nennt man Gleichrichter. Im Grunde genommen ist schon der Stromwender der Gleichstrommaschine ein Gleichrichter. Ein elektrolytischer Gleichrichter ist die Aluminiumgleichrichterzelle. Sie besteht aus einem Element, das Blei und Aluminium als Metalle enthält, die in eine Lösung eines Borsalzes eingetaucht sind. Durch dieses Element fließt der Strom in der Richtung Blei–Aluminium ungehindert, nicht aber in der umgekehrten Richtung, weil sich dabei das Aluminium mit einer isolierenden Schicht überzieht (Polarisation). Ein Gleichrichter ist auch der in § 33 beschriebene Detektor.

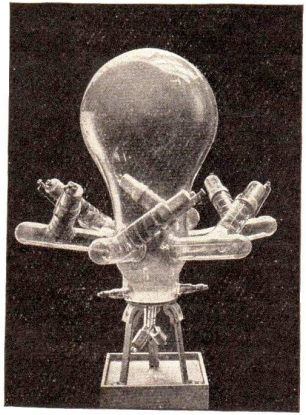


Abb. 174. Quecksilberdampfgleichrichter

Außerdem gibt es Quecksilberdampfgleichrichter (Abb. 174), die zur Gleichrichtung sehr starker Ströme benutzt werden. Dabei ist von der Tatsache Gebrauch gemacht, daß ein Lichtbogen im Dampf zwischen einer Eisenelektrode und Quecksilber nur brennt, wenn die Eisenelektrode Anode ist.

Ein sehr gut wirkender Gleichrichter ist die Glühkathodenröhre. Wird Wechselstromspannung an die Elektroden D und A einer Glühkathodenröhre gelegt (Abb. 151), so fließt nur dann Strom in der Leitung, wenn D negativ und A positiv ist. Eine Phase des Wechselstromes wird also unterdrückt. An Stelle des Wechselstromes fließen Gleichstromstöße durch die Leitung. Man kann beide Phasen gleichrichten, wenn man bei geeigneter Schaltung zwei Röhren oder ein Rohr mit zwei Anoden benutzt.

Die Glühkathodenröhre wird beim Rundfunkempfang sehr häufig als Gleichrichter verwendet.

D. Radioaktivität und atmosphärische Elektrizität

§ 36. Radioaktivität

Im Jahre 1896 beobachtete Becquerel, daß Verbindungen des Elementes Uran eine Strahlung aussenden, die auf die photographische Platte einwirkt. Das Ehepaar Curie hat gezeigt, daß das aus Uranerz gewonnene Element **Radium** in viel höherem Maße als Uran strahlt. Nach dem Radium nennt man die Elemente, die ein ähnliches Verhalten zeigen, radioaktiv. Solche Elemente sind z. B. Polonium, Thorium (Abb. 175), Aktinium.



Abb. 175. Radiographie eines Glühstrumpfes, Wirkung der Strahlung von Thoriumoxyd auf eine photographische Platte

1. Die Eigenschaften der Strahlen. Radiumstrahlen wirken durch verschiedene Körper hindurch in verschiedenem Grade auf die photographische Platte ein. Blei verschluckt die Strahlen stark, Aluminium läßt sie leichter hindurchtreten. Im allgemeinen schwächt ein Stoff die radioaktive Strahlung um so stärker, je größer sein Atomgewicht ist. Wie wir bereits in § 31 gesehen haben, wirken Radiumstrahlen ionisierend auf die Luft. Treffen sie auf einen fluoreszierenden Schirm, so leuchtet er auf. In Abb. 176 ist eine Büchse abgebildet, die auf einer Nadelspitze in A eine winzige Menge eines radioaktiven Stoffes enthält. S ist ein kleiner Leuchtschirm und L eine Lupe, durch die man das Leuchten des Schirmes betrachtet. Mit gut ausgeruhtem Auge nimmt man im Dunkeln ein fortgesetztes Flimmern des Schirmes wahr. Läßt man die von einer Radiumverbindung (R) ausgesandten Strahlen durch ein Magnetfeld gehen, so stellt man die in Abb. 177 wiedergegebene Erscheinung fest. Einige Strahlen werden wie positiv geladene bewegte Teilchen abgelenkt, andere wie negativ geladene, und ein dritter Teil der Strahlen geht unbeeinflußt durch das Feld hindurch.

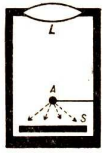


Abb. 176. Leuchten eines von Radiumstrahlen getroffenen Leuchtschirms

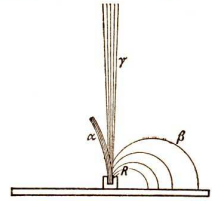


Abb. 177. α-, β- und γ-Strahlung einer Radiumverbindung (R) im Magnetfeld

Die Strahlen positiver Ladung heißen α-Strahlen.
Die Strahlen negativer Ladung heißen β-Strahlen.
Die nicht abgelenkten Strahlen heißen γ-Strahlen.

Über die Eigenschaften dieser Strahlen gibt folgende Übersicht Auskunft:

	α-Strahlen	β-Strahlen	γ-Strahlen
Durchdringungsvermögen wie	schnelle Kanalstrahlen	schnelle Kathodenstrahlen	sehr kurzwellige Röntgenstrahlen
Ladung	positiv	negativ	—
Masse (für H = 1)	4	$\frac{1}{1836}$	—
Natur der Strahlen....	Heliumionen mit 2 positiven Elementarladungen, also Heliumkerne	Elektronen	elektromagnetische Wellen sehr kurzer Wellenlänge
Geschwindigkeit	bis 30 000 km/s	bis 280 000 km/s	300 000 km/s

2. Die Bahnen der Strahlen. Eine wesentliche Hilfe bei der Untersuchung der radioaktiven Strahlen hat folgende Erscheinung geboten, die wir schon in § 31 erwähnt haben. Wenn α-Strahlen, β-Strahlen oder γ-Strahlen in ein Gas eindringen, so erzeugen sie Ionen. Ist das Gas mit Wasserdampf übersättigt, so kondensiert sich der Dampf an den Ionen. Dies kann man benutzen, um die Bahnen der Strahlen sichtbar zu machen. Abb. 178 stellt Aufnahmen der Bahnen von α-Strahlen dar. Die Spuren, die β-Strahlen in einem übersättigten Dampf hinterlassen, sind ganz anders geartet. Auch die Anordnung der durch Röntgenstrahlen erzeugten Kondensationskerne ist kennzeichnend. So kann man schon aus der Photographie der Bahnen auf die Natur der Strahlen schließen. Stellt man die Bahnen im Magnetfeld fest, dann kann man aus einer etwaigen Ablenkung erkennen, ob es sich bei den ausgesandten Strahlen um positive oder negative bewegte Ladungen handelt.

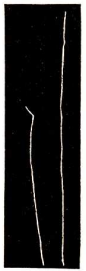


Abb. 178
Spuren von α-Strahlen

3. Die Reichweite der α-Strahlen. Eine andere auffällige Erscheinung, auf die man bei der Untersuchung stieß, besteht darin, daß die α-Strahlen in Luft von Atmosphärendruck eine ganz bestimmte Reichweite besitzen. α-Strahlen, die vom Radium-C (Teil II B, Abschn. E) ausgesandt werden, dringen etwa 6,96 cm weit in die Luft von 15° C ein (Abb. 179). α-Strahlen anderer radioaktiver Stoffe haben ebenfalls eine kennzeichnende „Reichweite". Diese Erscheinung läßt

darauf schließen, daß die kinetische Energie, mit der die Strahlen ausgesandt werden, für ein und denselben Stoff gleich groß ist, da sie auf der gleichen Strecke verbraucht wird, für verschiedene Stoffe dagegen verschiedene Werte hat.

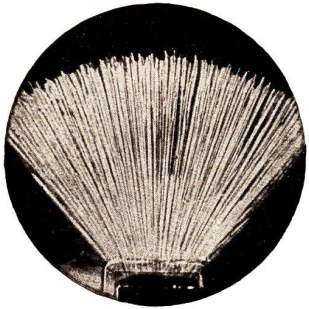


Abb. 179. Reichweite der α-Strahlen

4. Der statistische Charakter des radioaktiven Zerfalls. Beobachtet man den zeitlichen Ablauf des radioaktiven Prozesses, indem man jedes ausgesandte α-Teilchen etwa durch ein Knacken in einem Lautsprecher registriert, so stellt man fest, daß die Knackgeräusche völlig unregelmäßig aufeinander folgen. Es gelingt nicht, die Registrierung eines einzelnen α-Teilchens vorauszusagen. Dagegen kann man über eine größere Zahl von Registrierungen sehr genaue Angaben machen. So sinkt die Zahl der in einer längeren Zeit ausgesandten α-Teilchen bei jedem radioaktiven Stoff in einer genau bestimmbaren Zeit auf die Hälfte ab. Diese Zeit nennt man die Halbwertszeit. Sie beträgt z. B. für Radium 1580 Jahre. Bei manchen Stoffen beträgt sie nur Bruchteile von Sekunden. Eine derartige Gesetzmäßigkeit, die nur für eine größere Zahl von Ergebnissen gilt, nennt man auch ein statistisches Gesetz.

5. Die Energie der Radiumstrahlen. Man kann die Energie der Radiumstrahlung durch die Wärme messen, die sie bei der Absorption in einem Körper erzeugt. Man findet:

1 g Radium sendet in 1 Stunde eine Energie von 134 cal aus.

Da die Strahlung des Radiums erst in 1580 Jahren auf die Hälfte sinkt, ist die Energie, die 1 g insgesamt auszustrahlen imstande ist, sehr groß. Sie beträgt rund 4 000 000 kcal und übertrifft damit die Energie von 8 kcal, die 1 g Kohle bei der Verbrennung liefert, um das 500 000fache.

Diese Zahlen zeigen, daß der zum Aufbau eines Radiumatoms notwendige und daher im Atom aufgespeicherte Energiebetrag millionenmal so groß ist wie der Betrag, den wir aus der Verbrennungswärme der hauptsächlich verwertbaren irdischen Energiequelle, der Kohle, in der Masseneinheit gewinnen können.

§ 37. Das ungestörte elektrische Feld der Erde

1. Der Nachweis des elektrischen Erdfeldes. Hält man einen langen Draht, der oben in einer Spitze A ausmündet und unten mit dem Blättchen B eines Elektroskops verbunden ist, an einer langen Holzstange in die Höhe, so kann man auf diese Art nachweisen, daß zwischen A und B in der Luft eine Spannung herrscht (Abb. 180). Besteht vom Boden nach oben ein elektrisches Feld, so muß der vertikal ausgespannte Draht in dem Feld influenziert werden. Sind die Feldlinien von oben nach unten gerichtet, so muß in B positive und in A negative Ladung angesammelt werden. Stellt man unter der Spitze A des Drahtes eine kleine Flamme auf, so wird die Umgebung von A leitend. Dann bleibt auf dem Draht nur die in B erregte Influenzladung zurück. Man kann auf diese Weise messen, wie die Größe der Spannung mit der Höhe zunimmt. Erweist sich das Elektroskop als positiv geladen, so ist das Feld von oben nach unten gerichtet. Der Versuch bestätigt es, und deshalb können wir feststellen:

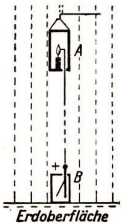


Abb. 180. Nachweis des elektrischen Feldes der Erde

Die Erde ist von einem elektrischen Feld umgeben, dessen negative Grenzfläche an der Erdoberfläche liegt.

Die Ursache dieses Feldes ist noch nicht eindeutig geklärt. Manche sehen sie in der in § 38 besprochenen Gewittertätigkeit.

2. Die Feldstärke des Erdfeldes. Über dem Meere beträgt die elektrische Feldstärke im Winter etwa 135, im Sommer etwa 117 V/m. Über dem Festland sind die Schwankungen erheblich größer.
In größeren Höhen ist die elektrische Feldstärke kleiner. Sie beträgt in 50 m Höhe über dem Boden nur noch durchschnittlich 55 V/m, in 1000 m Höhe 42 V/m, in 3 km Höhe 25 V/m, in 12 km Höhe 2,3 V/m. In etwa 60 bis 80 km Höhe erreicht das Feld praktisch ein Ende.
Das elektrische Feld der Erde erstreckt sich also etwa über denselben Raum, in dem der Atmosphärendruck bis auf etwa 1 Torr abnimmt. Dicht an der Erdoberfläche ist die Feldstärke am größten.

3. Die Leitfähigkeit der Atmosphäre. Die Atmosphäre wird am Boden durch **radioaktive Stoffe** ionisiert, die überall im Boden in geringer Menge verbreitet sind. In viel höherem Maße werden die oberen Luftschichten von der Strahlung der Sonne ionisiert. Die Sonnenstrahlung enthält viel **ultraviolettes Licht,** das in den oberen Luftschichten stark verschluckt wird. Die Luft wird dabei so stark ionisiert, daß sie in etwa 100 km Höhe (Heavisideschicht) fast so gut leitet wie der Erdboden. Nur ein Teil des ultravioletten Lichtes gelangt bis zum Erdboden. Ionisierend wirken auch die Elektronen, die die Sonne gelegentlich ausstößt und zur Erde sendet.

Endlich erzeugt auch die sehr energiereiche **Höhenstrahlung** noch unbekannter Herkunft überall Ionen. Die Gasionen lagern sich an Moleküle oder Staubteilchen an, so daß sie sich nur langsam bewegen. Deshalb ist die Leitfähigkeit der Luft gering, obwohl in der Nähe des Erdbodens etwa 1000 Ionen im cm^3 vorkommen, und über Städten diese Zahl noch ansteigt.

§ 38. Das gestörte elektrische Feld der Erde

1. Die Störungsursachen. Das elektrische Feld der Erde ist fast niemals ungestört. Die Störungen rufen oft Feldstärken hervor, die die normale Feldstärke von 1 V/cm oder 100 V/m um das Tausendfache übertreffen. Sie beruhen in der Regel darauf, daß sich die in der Luft enthaltenen oder erzeugten Ionen an gewissen Stellen anhäufen und auf diese Weise starke Felder zwischen den verschieden geladenen Ionenwolken entstehen.

Wird Staub oder Schnee durch starken Wind aufgewirbelt, so werden kleinste Staubpartikel oder Schneekristalle von den größeren losgerissen und weiter fortgetragen als die schweren Staubkörner oder Schneekristalle. In der Regel sind diese kleinsten Teilchen dann negativ geladen. Die schweren Teilchen bleiben positiv geladen zurück. Etwas Ähnliches geschieht, wenn Wasser in einem Wasserfall zu feinsten Wassertröpfchen zerstäubt wird oder wenn ein heftiger Wind Regentropfen so durcheinanderwirbelt und aufpeitscht, daß sie in kleine und kleinste Tröpfchen zerfallen. Dann sind die kleinsten Teile in der Regel negativ, die größeren positiv geladen. Da der Wind die leichten von den schweren trennt, entstehen auf diese Weise bei den betrachteten Vorgängen Wolken von entgegengesetzt geladenen Teilchen und zwischen ihnen ein elektrisches Feld, dessen Feldlinien von der positiven Ladung der gröberen Teilchen ausgehen und in der negativen Ladung der feineren münden.

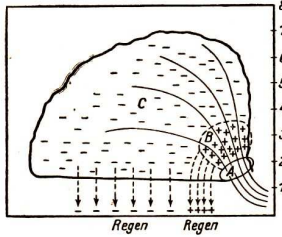


Abb. 181. Elektrisches Feld einer Gewitterwolke

Regen und Schnee, die sich aus diesen Wolken bilden, sind negativ oder positiv geladen. Gewitter- und Böenregen erweisen sich weit stärker geladen als Landregen.

2. Das Gewitter. Ein Gewitter entsteht dann, wenn durch starke Sonneneinstrahlung und instabile Luftschichtung aufsteigende Luft rasch bis in mehrere tausend Meter Höhe vordringt (vgl. Teil I B, § 67). Dabei kühlt sie sich stark ab. Ihr Wasserdampf kondensiert sich und fällt als Regen aus. Erlangt dabei im Bezirk *A* (Abb. 181) der aufsteigende Wind eine Geschwindigkeit von 8 m/s und mehr (es kommen Geschwindigkeiten über 25 m/s vor), so kann der Regen nicht mehr fallen. Die Wassertropfen werden hochgewirbelt und zer-

stäubt. Der Wind trägt die negativ geladenen kleinsten Tröpfchen, die eine sehr geringe Fallgeschwindigkeit haben, aus dem Bereich der schweren Tropfen hinaus. In dem Bereich B sammeln sich die positiv geladenen schweren Tropfen. Die negativ geladenen leichten verteilen sich über die ganze Wolke C, die im Bereich der aufsteigenden Luftmassen entsteht. In der Grenzfläche von B und C ist das elektrische Feld am stärksten, weil hier dicht nebeneinander Wolken von positiven und negativen Ionen liegen. Auch zwischen der Erde und der positiven Wolke B entsteht ein starkes Feld. Da, wo das Spannungsgefälle am stärksten wird, also zwischen B und C oder zwischen B und der Erde, kommt es zu ausgleichenden elektrischen Entladungen in Form von Blitzen.



Abb. 182. Nordlicht

3. Der Blitz. Ein Blitz tritt erst auf, wenn die elektrische Feldstärke in der Wolke auf über 10000 V/cm angewachsen ist. Dann erfahren die Elektronen, die bei dieser hohen Feldstärke aus den Wasser- oder Luftmolekülen austreten, eine solche Beschleunigung, daß sie andere Moleküle ionisieren und damit jene lawinenhafte Vermehrung der Elektronen und Ionen auftritt, von der wir bei den Entladungsröhren gesprochen haben. Die Länge der Blitze beträgt meist 2 bis 3 km. Es sind aber schon Blitze der 10fachen Länge einwandfrei beobachtet worden. Die Zeitdauer beträgt zwischen $\frac{1}{50}$ und $\frac{1}{1000}$ s. Die Stromstärke ist außerordentlich groß, bis 10000 Ampere. Zur Entladung kommen dabei aber nur Elektrizitätsmengen von etwa 10 Coulomb. Die Energie eines durchschnittlichen Blitzes kann man zu $2 \cdot 10^9$ kpm angeben. Bei hohen elektrischen Feldstärken entsteht auf dem Meere und im Hochgebirge oft das Elmsfeuer, eine Glimmentladung, wie man sie bei der Influenzmaschine wahrnimmt, wenn man sie im Dunkeln betreibt. Die Durchschnittszahl der Blitze auf der ganzen Erde wird auf 100/s (!) geschätzt.

4. Das Nordlicht. Gleichzeitig mit Störungen im normalen elektrischen und vor allem im magnetischen Erdfeld treten oft Nordlichter auf, die sich bis in 700 km Höhe erstrecken und besonders in den Polgebieten der Erde sichtbar sind. Das Nordlicht zeigt Strahlen, Draperien, Bogen, pulsierende Flächen, die grünlich leuchten (Abb. 182). Es beruht darauf, daß Elektronenschwärme von der Sonne in die Erdatmosphäre eindringen und dabei durch ihren Stoß die Luftmoleküle zum Leuchten anregen. Sie bewegen sich im magnetischen Feld der Erde um die magnetischen Feldlinien schraubenförmig kreisend und gelangen so vor allem in die Polargebiete.

Sachverzeichnis

Abstoßung, elektrische 23
—, magnetische 51
Akkumulator 90
Alphastrahl 111
Ampere (A) 8
Amperemeter 9
Amperesekunde (As) 25
Amperewindung (Aw) 41
Anion 87
Anker eines Generators 62, 69
—, Trommelanker 72
Anode 86
Antikathode 94
Anziehung, elektrische 23
—, magnetische 51
Äquivalent, elektrochemisches 86
Arbeit, elektrische 36

Batterie 5
Betastrahl 111
Bleiakkumulator 90
Blitz 115

Coulomb (C) 25

Dauermagnet 47
Deklination, magnetische 52
Detektor 105, 109
Diamagnetismus 48
Dielektrizitätskonstante 29
Dissoziation 87, 98
Drehspulinstrument 8
Drehstrom 75
Drehstromgenerator 75
Drehstrommotor 76
Dreifingerregel, Bewegung des Stromleiters im Magnetfeld 51
—, Richtung des Induktionsstromes 54
Dreiphasenstrom 75
Dynamomaschine, Gleichstrom- 72

Elektrische Feldlinie 15
— Feldstärke 20
— Spannung 5
— Stromstärke 7
Elektrische Elementarladung 88
— Leitfähigkeit 103
Elektrischer Widerstand 9, 103
Elektrisches Feld 115
— —, Aufbau 21
— — der Erde 113
— —, homogenes 19
— —, selbständiges 17
— —, Zerfall 21
— Wärmeäquivalent 35
Elektrizitätsmenge 24
—, Einheit 25
Elektrochemisches Äquivalent 86
Elektrolyse 8, 86
Elektrolytischer Leiter 86
Elektromagnet 49
Elektromagnetisches Feld 59
Elektromechanisches Äquivalent 36
Elektrometer 5
Elektromotor 72, 74, 76
Elektron 23, 92, 93, 111
Elektronenröhre s. Glühkathodenröhre
Elektroskop 5, 18
Element, galvanisches 6, 89
Elementarladung 88
Elmsfeuer 115
Energie, elektrische 34
Erdfeld, elektrisches 113
—, magnetisches 41, 52
Erdmagnetismus, Veränderlichkeit 53
Ersatzwiderstand einer Stromverzweigung 13

Farad (F) 27
Faradaysches Gesetz, erstes 86
— —, zweites 87
Feld, elektrisches 15, 59
—, elektromagnetisches 59
—, elektrostatisches 15
—, magnetisches 38
Feldlinien im elektromagnetischen Feld 59
Feldlinien, elektrische 15
— —, Richtungssinn 23
—, magnetische 38
— —, Richtungssinn 40
Feldlinienzahl, magnetische 49, 57
Feldstärke, elektrische 20, 44
—, magnetische 40, 44
Fernleitung 84
Fernsprechverkehr 106
Ferromagnetismus 48
Frequenz 76
Frequenzmesser, magnetischer 77

Galvanisches Element 6, 89
Galvanometer 9
Gammastrahl 111
Gasion s. Ion
Generator 62, 69
Gewitter 114
Gleichrichter 84
—, Aluminium- 109
—, Glühkathoden- 109
—, Quecksilberdampf- 109
Gleichstrom 5
Gleichstromgenerator 69
Gleichstrommotor 72
Glühelektron 96
Glühkathodenröhre 96
— als Gleichrichter 109
— als Verstärker 108
Grammäquivalent 87
Grammatom 87

Hauptschlußmaschine 72
Heavisideschicht 113
Henry (H) 68
Hintereinanderschaltung von Elementen 6
Hitzdrahtinstrument 7
Horizontalintensität 52

Induktion, elektrische 53
—, magnetische 60
Induktionsgesetz, elektromagnetisches 59

Induktionsstrom 53, 61
—, Richtung 54
Influenz 31
Inklination, magnetische 52
Ion, elektrolytisches 87
—, Gas- 100
—, Metall- 23
Ionenbeweglichkeit 88
Ionisierung von Gasen 100
Isolator 7, 22
Isotop 95

Joule (J) 35

Kanalstrahlen 94
Kapazität (Kondensator) 27
— (Akkumulator) 91
Kathode 86
Kathodenstrahlen 91
Kathodenstrahlröhre 97
Kation 87
Kilowatt (kW) 37
Kilowattstunde (kWh) 37
Kirchhoffsche Gesetze 13
Kollektor 69, 70
Kondensator 27
Kraftfluß, magnetischer 57
Kreisfrequenz 63
Kurzschlußanker 76

Ladung 21
—, spezifische 93
— —, Einheit 25
— —, positive und negative 22
Ladungsdichte 33
Leidener Flasche 30
Leistungsfaktor bei Wechselstrom 80
Leistungsverlust in elektrischen Leitungen 81
Leiter 7, 22
—, metallische 103
Leitung, elektrolytische 86
— in Gasen 100
Leitfähigkeit
von Metallen 103
von Nichtmetallen 108
Lenzsches Gesetz 67
Lichtbogen 102
Lichtelektrische Zelle 99
Loschmidtsche Zahl 88

Magnet, permanenter 47
Magnetfeld der Erde 52
Magnetisches Feld 38
Magnetismus, remanenter 47
Magnetnadel 38, 52
Magnetometer 43
Magnetpole 51
—, Anziehung und Abstoßung 51
Massenspektrograph 95
Mikrofarad (μF) 27
Mikrophon 105
Molekularströme im Eisen 46
Motor, Gleichstrom- 72
—, Wechselstrom- 75
—, Drehstrom- 76

Nebenschluß 14
Nebenschlußmaschine 72
Nichtleiter 7
Niederfrequenzverstärker 108
Nordlicht 115
Normalelement 6, 89

Oersted (Ø) 52, 53
Ohm (Ω) 11
Ohmsches Gesetz 11
Oszillograph 78

Paramagnetismus 48
Permeabilität 49, 58, 65
Phase des Wechselstroms 64
Phasenverschiebung 79
Photoelektronen 98
Photozelle 99
Plattenkondensator 27
Polarisation, elektrolytische 90

Radioaktivität 110
Rechte-Hand-Regel, s. Dreifingerregel
—, Stromrichtung und Magnetfeldrichtung 40
Reichweite radioaktiver Strahlen 111
Rheostat 9
Röntgenröhre 94
Röntgenstrahlen 94

Schalter, rotierender 26
Schiebewiderstand 9
Selbsterregung der Dynamomaschine 72
Selbstinduktion 67
Selbstinduktionskoeffizient 68
Selen 104
Spannung, elektrische 5
—, Einheit 6
— und Feldstärke 20
Spannungsmesser 13
Spannungsstoß 57
Speicherwerk 86
Statistisches Gesetz 112
Strahl, α- 111
—, β- 111
—, γ- 111
Stromkreis 10
Strommesser 7
—, Erweiterung des Meßbereichs 14
Stromstärke, elektrische 7
—, Einheit 8
Stromstoß 25
—, induzierter 55, 67
Stromverzweigung 12
Stromwärme 36
Supraleitung 103
Synchronmotor 75

Telegraphie 106
Thermoelement 104
Thermostrom 104
Torsionsmagnetometer 43
Totalintensität 52
Transformator 82

Überlandzentrale 84
Ultraviolettes Licht 113
Umformer, Einankerumformer 84

Verstärker 108
Volt (V) 6
Voltmeter 13

Wärmeäquivalent, elektrisches 36
Watt (W) 36
Wechselspannung 62
Wechselstrom 62
—, Frequenz 76
—, Leistung 79
—, Phase 64, 78
—, Umwandlung in Gleichstrom 84
Wechselstromgenerator 74
Wechselstrommotor 75
Widerstand, elektrischer 9, 103
—, spezifischer 10
— —, Einheit 11
— —, im Wechselstromkreis 80
Widerstandsthermometer 103
Wirbelströme 65
Wirkungsgrad eines Generators 73