

LEHRBUCH DER
PHYSIK

OBERSCHULE TEIL II

Lehrbuch der Physik

für die Oberschule

TEIL II

Kursunterricht 11. und 12. Schuljahr

Mit 353 Abbildungen

1946

VOLK UND WISSEN VERLAGS-GMBH

BERLIN / LEIPZIG

Best.-Nr. 6002b

Herausgegeben von der physikalischen Lehrfachkommission
bei der Deutschen Verwaltung für Volksbildung
in der Sowjetischen Besatzungszone

Preis RM 4.20

Genehmigt unter Nr. G-19436 am 10. 9. 1946

Satz und Druck: B. G. Teubner, Leipzig M 109

Inhaltsverzeichnis

Elektrizitätslehre

I. Grundbegriffe und Grundgesetze

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

II. Elektromagnetische Felder und Energie

A. Das unveränderliche elektrostatische Feld 13

- § 3. Die Form des elektrischen Feldes. . . 13
- § 4. Elektrische Spannung und Feldstärke 15
- § 5. Elektrische Feldstärke und Ladung 19
- § 6. Das Maß der Ladung 22
- § 7. Die Kapazität. Der Kondensator 24
- § 8. Materie im elektrischen Feld 27
- § 9. Das Grundgesetz des elektrischen Feldes 30
- § 10. Die Energie des elektrischen Feldes 31

B. Das unveränderliche magnetische Feld 34

- § 11. Die Form des magnetischen Feldes 34
- § 12. Die magnetische Feldstärke 37
- § 13. Vergleichende Betrachtung elektrischer und magnetischer Felder ... 39
- § 14. Materie im magnetischen Feld ... 41
- § 15. Magnetische Kraftwirkungen 44
- § 16. Das magnetische Feld der Erde... 47

C. Das elektromagnetische Feld und die elektrische Induktion . 48

- § 17. Die induzierte elektrische Spannung 48
- § 18. Das Wesen des elektromagnetischen Feldes 53
- § 19. Induktionsströme 55
- § 20. Die Selbstinduktion eines Leiters.. 59

D. Starkstromtechnik und elektrische Energiewirtschaft 62

- § 21. Dynamomaschine und Motor für Gleichstrom 62

- § 22. Dynamomaschine und Motor für Wechselstrom 66
- § 23. Der Wechselstromkreis 69
- § 24. Übertragung und Umformung elektrischer Energie 73
- § 25. Fernleitung und Speicherung elektrischer Energie 76

III. Elektrische Leitungsvorgänge

A. Elektrische Leitung in Flüssigkeiten 78

- § 26. Die Ionenleitung in Elektrolyten .. 78
- § 27. Galvanisches Element und Akkumulatur 80

B. Elektrische Leitungsvorgänge in Gasen und im Vakuum 82

- § 28. Die Kathodenstrahlen 82
- § 29. Die Kanalstrahlen 85
- § 30. Glüh- und Photoelektronen, Glühkathodenröhre 87
- § 31. Leitung in Gasen 90

C. Elektrische Leitung in festen Körpern 93

- § 32. Die Leitfähigkeit fester Körper .. 93
- § 33. Elektrische Vorgänge in Grenzflächen fester Leiter 94
- § 34. Telegraphie- und Fernsprechröhrströme 96
- § 35. Lautverstärker und Gleichrichter 98

D. Radioaktivität und atmosphärische Elektrizität 100

- § 36. Radioaktivität 100
- § 37. Das ungestörte elektrische Feld der Erde 102
- § 38. Das gestörte elektrische Feld der Erde 103

Wellen im stoffgefüllten und leeren Raum

A. Wellen im stoffgefüllten Raum	106	C. Elektromagnetische Wellen	157
§ 39. Die Ausbreitung eines Stoßes im Stoff	106	§ 51. Elektrische Eigenschwingungen	157
§ 40. Grundbegriffe der Wellenlehre	111	§ 52. Erzeugung und Übertragung gedämpfter Schwingungen	161
§ 41. Interferenz von Seil-, Wasser- und Schallwellen	118	§ 53. Ungedämpfte elektrische Schwingungen	163
§ 42. Die Reflexion der Seil-, Wasser- und Schallwellen. Stehende Wellen	121	§ 54. Elektrische Wellen längs Drähten	165
§ 43. Das Gesetz der Ausbreitung der Wellen, Huygensches Prinzip	127	§ 55. Elektromagnetische Wellen im Raum	167
§ 44. Reflexion, Beugung und Brechung von Wasser- und Schallwellen nach dem Huygensschen Prinzip	129	§ 56. Die drahtlose Telegraphie und Telephonie	170
		§ 57. Drahtloser Nachrichtenverkehr, Rundfunk	174
		§ 58. Fernschreiben, Bildübertragung, Fernsehen	177
B. Lichtwellen	134	D. Elektromagnetische Strahlung	180
§ 45. Die Auffassungen vom Wesen des Lichtes	134	§ 59. Arten und Ausdehnung der Spektren	180
§ 46. Die Lichtgeschwindigkeit	136	§ 60. Das Licht als elektromagnetische Strahlung	184
§ 47. Die Wellenlänge des Lichtes	137	§ 61. Das Elektronenmikroskop	186
§ 48. Interferenz des Lichtes an durchsichtigen Platten	142	§ 62. Die Röntgenstrahlen	187
§ 49. Die Beugung des Lichtes	145	§ 63. Das elektromagnetische Spektrum	189
§ 50. Die Polarisation des Lichtes	152	§ 64. Aufbau der Materie	191
		§ 65. Geschichtliche Entwicklung	195
Sachverzeichnis	202		

ELEKTRIZITATSLEHRE

I. Grundbegriffe und Grundgesetze

§ 1. Elektrische Spannung und Stromstärke

1. Elektrische Spannung. Die Erfahrungen, die wir durch Experimente mit der Elektrizität¹⁾ 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 Messungen der elektrischen Größen vorzunehmen.

Die Elektrizitätswerke beliefern unsere Häuser mit Strom, in neuerer Zeit gewöhnlich mit Wechselstrom (Drehstrom). Wir gehen bei unseren Versuchen von der Annahme aus, daß uns Gleichstrom von etwa 100 Volt Spannung zur Verfügung steht. Mit dem Ausdruck, daß Spannung vorhanden ist, soll nur gesagt werden, daß bei Anschluß eines Verbrauchsgertes, z. B. einer Glühlampe, Strom geliefert wird. Spannung ist also gleichbedeutend mit „Bereitschaft zur Stromlieferung“.

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 überzeugen uns von der Existenz einer Spannung, indem wir ein empfindliches Elektroskop (Abb. 1) mit unserer Gleichstromquelle verbinden; das Blättchen des Instrumentes schlägt dann aus. Benutzen wir ein sog. Braunsches Elektrometer (Abb. 2), so können wir den Versuch in folgender Weise zu einer Messung ausgestalten:

2. Die Einheit der Spannung. Um Spannungen in übersichtlicher Weise in Abstufungen herstellen zu können, benutzen wir Akkumulatoren²⁾ oder galvanische Elemente. Wir überzeugen uns zunächst, daß die beiden Pole einer Akkumulatorenbatterie und einer Gleichstrom-Steckdose sich verschieden verhalten, indem wir zwei Drähte anschließen und deren voneinander getrennte Enden wir in angesäuertes Wasser

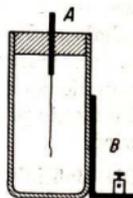


Abb. 1. Elektroskop



Abb. 2. Braunsches Elektrometer

1) elektron (griech.) = Bernstein.

2) accumulator (lat.) = Anhäufener.

tauchen. Dann tritt an dem einen Drahtende eine lebhafte Bildung von Gasbläschen auf; wir nennen den Pol der Stromquelle, mit dem es verbunden ist, willkürlich den negativen und den anderen den positiven Pol.

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 sog. 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 eines einzelnen Akkumulators ist zu gering, als daß sie einen Ausschlag am Braunschens 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 15 bzw. 23 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, die später ihre Begründung finden wird.

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

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

Dann hat eine Batterie von 20 derartigen hintereinander geschalteten Elementen eine Spannung von 20 Volt. Dieselbe Spannung haben 10 hintereinander geschaltete Akkumulatoren; die Spannung eines Akkumulators beträgt also 2, genauer 2,04 V. Das einzelne Element einer Anodenbatterie liefert uns 1,3 V. Ein Zink-Kupfer-Element hat die Spannung 1,06 V; die Spannungseinheit kann mit großer 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; es ist ein sog. statisches¹⁾ Voltmeter. Bequemer im Gebrauch, vor allem für niedrige Spannungen, sind andere, stromdurchflossene Spannungsmesser, die wir bald kennenlernen werden.

3. Elektrische Stromstärke. Verbinden wir die beiden spannungführenden Pole einer Steckdose 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 her-

1) *statós* (griech.) = stehend.

gestellt ist. Sie leuchtet aber nicht, wenn die Verbindung aus einem Bindfaden oder einem Holzstab besteht. Wir unterscheiden demgemäß Leiter und Nichtleiter (Isolatoren¹⁾) der Elektrizität. Die Leiter werden weiter unterteilt in Leiter 1. Klasse, die sich wie die Metalle bei Stromdurchgang nicht ändern und Leiter 2. Klasse; sie werden bei Stromdurchgang zerlegt; zu diesen gehören alle Säuren, Basen und Salzlösungen.

Wenn wir ein geeignetes Glühlämpchen an einen Akkumulator schalten, glüht es, bei einer Batterie von zwei Akkumulatoren leuchtet es hell, bei drei Akkumulatoren schmilzt der Faden des Lämpchens durch. Wir erklären diese Beobachtung dadurch, daß wir dem Strom eine bestimmte Stromstärke zuschreiben, die, wie wir sehen, zwar mit der Spannung der Stromquelle wächst, aber durchaus nicht mit ihr identisch ist; denn eine Spannung kann auch bestehen, ohne daß ein Strom fließt; wir zeigten das mit unserem Elektrometer.

Eine Spannung besteht auch zwischen zwei isoliert aufgestellten Konduktorkugeln, von denen die eine etwa mit Glas-, die andere mit Harzelektrizität geladen ist, oder die mit den Polen einer Elektrizität liefernden Influenzmaschine verbunden sind. Verbinden wir die Kugeln durch einen Draht, so treten in ihm und in seiner Umgebung dieselben Wirkungen auf wie in dem Schließungskreise eines Akkumulators, jedoch nur ganz kurzfristig, wenn nicht durch die Influenzmaschine dauernd neue Ladungen nachgeliefert werden.

4. Die Einheit der Stromstärke. Außer den Wärmewirkungen übt 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 sog. 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 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 ihren Mittelpunkt. Der Betrag der Drehung ist an dem Zeiger zu erkennen und gestattet verschieden starke Ströme zu vergleichen. Das Gerät wird Hitzdrahtstrommesser genannt.

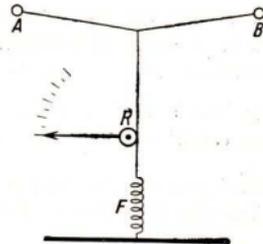


Abb. 3. Hitzdrahtinstrument (schematisch)

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 die Nadel abgelenkt; bei einer Batterie von zwei Akkumulatoren ist die Ablenkung größer. Wir können also aus der Ablenkung der Magnetnadel auf die Stärke des Stromes schließen.

Bei den sog. 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

1) isola (ital.) = Insel.

wird durch zwei Spiralfedern in einer Lage festgehalten, in der sie nicht senkrecht zu den Kraftlinien des Magnetfeldes steht. Durch die Federn wird der Strom der Spule zu- bzw. von ihr fortgeleitet. Fließt Strom durch die Spule, so dreht sie sich. Die Spiralfedern wirken der Drehung entgegen. Ist der

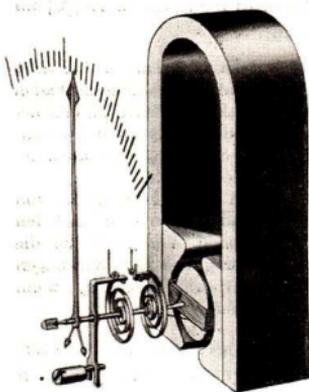


Abb. 4. Drehspulinstrument

Strom stark, so dreht er die Spule 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 im Hofmannschen Zersetzungsapparat das sich entwickelnde Wasserstoff-Sauerstoff-Gemisch, Knallgas genannt, in einem graduierten Gefäß auf. Oder wir berechnen die zu erwartende Knallgasmenge, indem wir die gemessene Wasserstoffmenge mit $\frac{8}{2}$ multiplizieren, denn es entwickelt sich halb so viel Sauerstoff wie Wasserstoff.

So stellen wir fest, daß in gleichen Zeitspannen umso mehr Knallgas entsteht, je mehr Akkumulatoren wir hintereinander schalten. Diesen Vorgang benutzen wir nun zur Festsetzung der Einheit der Stromstärke:

Ein Strom, der aus verdünnter Schwefelsäure in einer Minute $10,44 \text{ cm}^3$ Knallgas von 0° und 760 Torr abscheidet, hat die Stärke 1 Ampere (1 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 in einer Sekunde aus einer Silbernitratlösung $1,118 \text{ mg}$ Silber ausscheidet.

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

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 Bestimmung der Maßeinheiten Spannung und Stromstärke andere Wege eingeschlagen; später sind dann die in der Technik eingeführten Einheiten Volt und Ampere immer mehr in den Vordergrund getreten.

Wir können jetzt unser Hitzdraht- und unser Drehspulinstrument nach Ampere eichen, indem wir sie mit einem elektrolytischen Strommesser in ein und denselben Stromkreis schalten. Geeichte Strommesser nennt man

Amperemeter. Für sehr schwache Ströme bestimmte, also sehr empfindliche Strommesser, heißen **Galvanometer**.

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 1 A in 1 s 0,328 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 Stromquelle 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.

Wir bezeichnen nicht nur diese besondere Eigenschaft des Drahtes, sondern auch den Draht selbst als elektrischen Widerstand. Das von uns benutzte Gerät heißt **Schiebewiderstand**.



Abb. 5. Schiebewiderstand

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, in Zeichen $R \sim \frac{1}{I}$.

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

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. 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, denn 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. Hieraus folgt:

Der Widerstand eines Leiters ist seinem Querschnitt q umgekehrt proportional, in Zeichen $R \sim \frac{1}{q}$.

Versuche mit Drähten gleicher Länge und verschiedenen Querschnittes bestätigen diese Folgerung.

Durch Einschaltung von Drähten gleicher Länge und gleichen Querschnittes, aber verschiedenen Materials (Kupfer, Eisen, Nickel, Manganin¹⁾) 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, den ein Draht von 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt dem Strom bietet, mit q . Nach unseren Versuchen ist der Widerstand R eines Drahtes von der Länge l und dem Querschnitt q

$$R = q \cdot \frac{l}{q},$$

wobei l und q in den angegebenen Maßeinheiten gemessen sind.

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 Akkumulatoren, verdoppeln oder verdreifachen wir also die Spannung U , so verdoppelt oder verdreifacht sich auch die Stromstärke.

In einem Stromkreise 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).

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

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

Die Widerstandseinheit 1Ω besitzt ein Quecksilberfaden von 106,3 cm Länge und 1 mm^2 Querschnitt bei 0° .

Drähte und andere Körper von 1 mm^2 Querschnitt und 1 m Länge haben bei 18° den Widerstand:

Silber	0,016 Ω	Eisen	0,1 Ω	Kohle (Bogenlampe)	40—100 Ω
Kupfer	0,017 Ω	Manganin	0,42 Ω	Verdünnte Schwefelsäure	
Aluminium	0,032 Ω	Quecksilber	0,96 Ω	(für Akkumulatoren)	50 000 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:

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

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

Hierbei ist zu beachten, daß der Widerstand des Leiters von der Temperatur abhängt.

6. Das Ohmsche Gesetz für Leiterstücke. An eine Spannungsquelle von 110 Volt seien die drei Widerstände $R_1 = 200 \Omega$, $R_2 = 350 \Omega$, $R_3 = 400 \Omega$ angeschlos-

sen (Abb. 6). In der Leitung befinde sich ein Amperemeter mit dem Widerstand $R_4 = 50 \Omega$. Legen wir das Braunsche Elektrometer E nacheinander an die Punkte MN , NO , OP und an die Klemmen des Amperemeters, so zeigt es in jedem Falle eine bestimmte Spannung an, und zwar verhalten sich diese Spannungen wie 4 : 7 : 8 : 1. Dies Verhältnis ist gleich dem Verhältnis der vier Widerstände $200 \Omega : 350 \Omega : 400 \Omega : 50 \Omega$. Also ergibt sich:

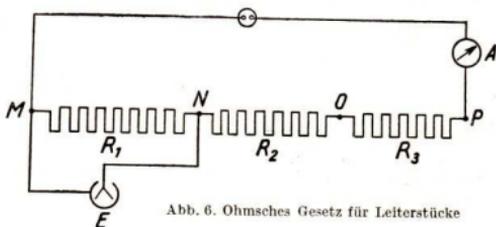


Abb. 6. Ohmsches Gesetz für Leiterstücke

stimmte Spannung an, und zwar verhalten sich diese Spannungen wie 4 : 7 : 8 : 1. Dies 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 Leiters ist dem Widerstand zwischen diesen Punkten proportional.

Da die Stromstärke in der ganzen Leitung dieselbe, nämlich in unserem Beispiel $0,11 \text{ A}$ ist, folgt hieraus:

Das Ohmsche Gesetz gilt auch für Leiterstücke, 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). Messen wir die Stromstärken I im unverzweigten Leiter, I_1 im ersten und I_2 im zweiten Leiterzweig, so finden wir die folgenden Gesetze:

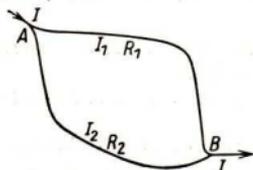


Abb. 7. Stromverzweigung

a) Der Gesamtstrom ist gleich der Summe der Zweigströme,

$$I = I_1 + I_2,$$

bei einer größeren Zahl von Zweigen gilt $I = \sum_n I_n$.

b) Die Zweigströme verhalten sich umgekehrt wie die Widerstände der Zweige.

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

Diese Gesetze heißen die Stromverzweigungsregeln von Kirchhoff. Die erste Regel ist nichts anderes als die Bedingung für eine stationäre Strömung: In A und B muß genau soviel Elektrizität ab- wie zufließen. Die zweite Regel ergibt sich aus dem Ohmschen Gesetz $U = I \cdot R$. Zwischen den Enden der beiden Leiterzweige besteht nämlich dieselbe Spannung U , also ist $I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_2$ 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 sich dadurch die zwischen den Verzweigungspunkten herrschende Spannung U nicht ändert. 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 der ersten Kirchhoffschen Regel folgt $\frac{U}{R_0} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$,

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

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

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 50Ω , so fließt ein Strom von $0,04 \text{ A}$, 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 $0,02 \text{ A}$ stehen. Bei 5 V Spannung würde er bei $0,1 \text{ A}$ 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 $0,05 \text{ A}$ ein, so kann man an derselben Skala bestimmen, daß die Spannung $2,5 \text{ V}$ herrscht.

Man kann also ein Amperemeter außer nach Ampere auch nach Volt eichen und es dann als Spannungsmesser, als Voltmeter, benutzen. Ein Voltmeter muß mit seinen beiden Zuleitungen an die Stellen des Stromkreises angelegt werden, zwischen denen es die Spannung messen soll. Es bildet also einen sog. Nebenschluß zu dem Hauptstromkreis. Das Amperemeter muß unmittelbar in den Hauptstromkreis geschaltet werden, wenn es den gesamten Strom messen soll. Damit das Voltmeter nur wenig Strom verbraucht und die Spannung, die es messen soll, nur wenig beeinflußt, wird es mit hohem

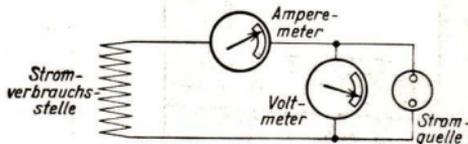


Abb. 8. Schaltung für Strom- und Spannungsmesser

Widerstand gebaut. Ein Amperemeter dagegen soll dem Strom nur einen geringen Widerstand entgegensetzen. Abb. 8 gibt ein Schema für die Schaltung.

Zur Übung: 1. Welche Längen haben Drähte von 1 mm^2 Querschnitt aus Silber, Kupfer, Aluminium, Eisen, die gerade 1Ω Widerstand besitzen? — 2. Wie groß ist der elektrische Widerstand einer Kupferleitung von 3 mm^2 Querschnitt und 200 m Länge? — 3. Wie groß ist der elektrische Widerstand einer Leitung von 10 km Länge, die aus Aluminiumdraht von 12 mm^2 Querschnitt besteht? — 4. Welchen Querschnitt muß eine 1 km lange Leitung aus Aluminiumdraht haben, die einen Widerstand von 3Ω 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 $15, 25, 10 \Omega$ hintereinandergeschaltet sind? — 6. Welcher Strom fließt durch eine Stromverzweigung, deren Widerstände sich wie $3 : 5$ verhalten, wenn der Gesamtstrom $I = 2 \text{ A}$ ist? — 7. Eine Stromverzweigung besteht aus den Widerständen $15,3$ und $22,5 \Omega$. 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 $20\,000 \Omega$ besitzt?

II. Elektromagnetische Felder und Energie

A. Das unveränderliche elektrostatische Feld

§ 3. Die Form des elektrischen Feldes

1. Das elektrische Feld. In den Raum zwischen zwei isolierten Metallplatten A und B , die mit den Polen einer Influenzmaschine leitend verbunden sind, stellen wir eine kleine, auf einer Nadelspitze leicht drehbare Papierfahne (Abb. 9). Wenn wir die Influenzmaschine in Betrieb setzen, 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 Influenzmaschine 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

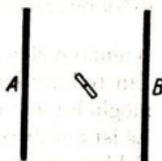


Abb. 9. Papierfahne im elektrischen Feld

wir wahr, daß alle gerichtet werden. Man erkennt, daß sie nicht kreuz und quer durcheinander zeigen, sondern geordnet gerichtet sind derart, daß man sich Linien denken kann, längs derer sich die Fähnchen ausrichten (Abb. 10). Wir schließen aus den Versuchen:

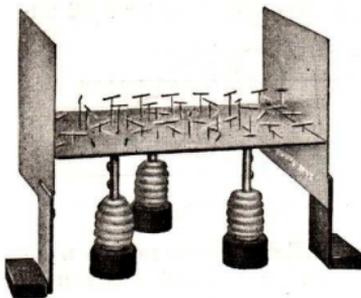


Abb. 10. Papierfahnen im elektrischen Feld

a) In dem Augenblick, in dem die Platten mit einer arbeitenden Influenzmaschine 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 äuernden Zustand des Raumes nennen wir „elektrisch“.

b) Die im Raum vorhandene Luft hat keinen wesentlichen Einfluß auf diesen Zustand, die Versuche würden im luftleeren Raum ebenso verlaufen.

Wir kommen daher zu dem Ergebnis, daß auch der leere Raum elektrische Eigenschaften besitzen kann, die wir durch Kräfte nachweisen, die er auf Probekörperchen, wie etwa die Fähnchen, ausübt.

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.

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. 11–13 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 hervor:

Die elektrischen Feldlinien verlaufen von dem einen Metallstreifen zum anderen; sie treten senkrecht aus der Metallfläche aus; 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 sinngemäß fortgesetzt denken. Felder, deren Feldlinien parallel zu-

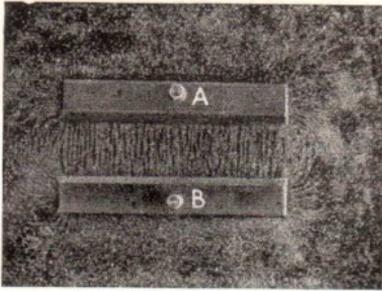


Abb. 11

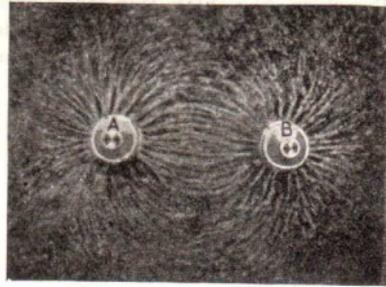


Abb. 12

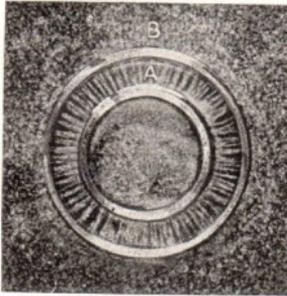


Abb. 13

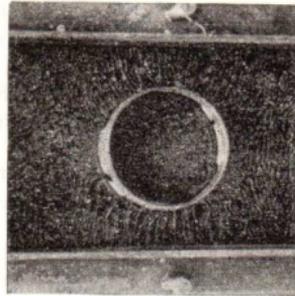
Abb. 11 bis 14
Elektrische
Feldlinienbilder

Abb. 14

einander verlaufen, nennen wir „homogen“¹⁾ (Abb. 11). Nicht homogene Felder nennen wir auch „inhomogen“ (Abb. 13). Solche Felder, deren Feldlinien wie die Radien einer Kugel auseinandergehen, heißen „radial“ (Abb. 12). Radiale Felder sind inhomogen.

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. 14). 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 selbstständiges elektrisches Feld. Verbinden wir zwei isolierte Metallplatten, zwischen denen ein elektrisches Feld herrscht, mit einem elektrostatischen Spannungsmesser, einem Elektroskop, so zeigt

1) homo (griech.) = gleich.

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

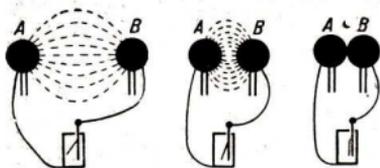


Abb. 15. Spannung und Feldlinienlänge

hergestellt wird. Elektrische Spannung und elektrisches Feld sind also zwei zusammengehörige Erscheinungen.

Wir stellen weitere Versuche an, die diesen Zusammenhang aufklären. Wir verbinden zwei durch Luft getrennte, isolierte Metallkugeln *A* und *B* (Abb. 15) 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 bleibt 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. Berühren sich die Kugeln, so werden die Spannung und das Feld vernichtet (Abb. 15).

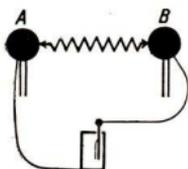


Abb. 16
Zerstoren eines Feldes

Man kann den Zerfall des elektrischen Feldes auch dadurch herbeiführen, daß man die beiden feldbegrenzenden Metalle miteinander verbindet (Abb. 16). Stoffe, bei denen dann das elektrische Feld in unmeßbar kleiner 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).

Machen wir eine der Grenzflächen des elektrischen Feldes beweglich, wie z. B. bei einem Elektroskop (Abb. 17), so nehmen wir folgendes wahr:

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

Bringen wir an zwei beliebige Punkte eines elektrischen Feldes zwei kleine metallische Körper und verbinden wir sie mit einem Elektroskop, so zeigt dies im allgemeinen einen Ausschlag, d. h. also:

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

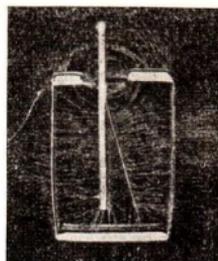


Abb. 17.
Feldlinienbild des Elektroskops

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 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, mit denen sie leitend verbunden sind.

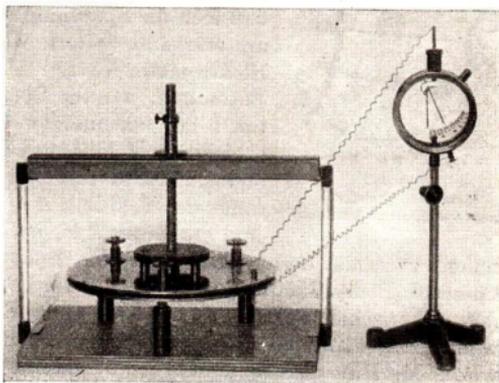


Abb. 18. Spannung und Feldlinienlänge im homogenen Feld

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. 18). 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. Wir können daher den außerhalb gelegenen Teil des Feldes unberücksichtigt lassen. Vergrößern wir den Abstand der Platten auf 2 mm, so steigt die Spannung auf 220 V usw. (vgl. Tab.). Aus den Versuchen ergibt sich:

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

$$U \sim d.$$

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

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

wachsende Abstände bereits kleine Abweichungen vom Gesetz für homogene Felder zeigen.

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

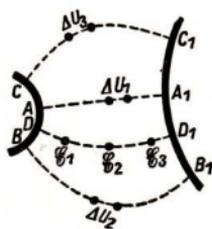


Abb. 19.
Elektrische Feldstärke
längs verschiedener Feldlinien

Begrenzungen immer gleich. 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 am stärksten ändert, wie uns ein Versuch mit dem Elektrometer lehrt.

Betrachten wir die Spannungsstufen zwischen zwei um 1 cm voneinander entfernten Punkten bei verschiedenen Feldlinien (Abb. 19), 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 Feld-

linien, 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 \mathcal{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 der Weg s von der Geschwindigkeit v . Wollen wir die Geschwindigkeit bestimmen, so bilden wir den Quotienten $\frac{\Delta s}{\Delta t}$. Wollen wir die elektrische Feldstärke messen, so dividieren wir die Spannungsstufe ΔU durch den Abstand Δd der Punkte der Feldlinie zwischen denen sie besteht. Es ist also die

$$\text{Feldstärke } \mathcal{E} = \frac{\Delta U}{\Delta d} \text{ (längs einer Feldlinie).}$$

Die Spannung U wird in Volt, die Feldstärke \mathcal{E} in $\frac{\text{Volt}}{\text{cm}}$ gemessen. Im homogenen Feld, in dem alle Feldlinien dieselbe Länge besitzen und parallel zueinander verlaufen, weist die Zunahme der Spannung mit dem Abstand der Platten darauf hin, daß auch die Feldstärke längs einer und derselben Feldlinie überall dieselbe ist, denn so ist am einfachsten erklärt, daß $U \sim d$ ist. 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

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

§ 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 in folgender Weise dabei 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. 20). Das zwischen den Polen der Spannungsquelle bestehende Feld dehnt sich zunächst auf den Raum zwischen den beiden Leitern aus, die mit ihnen leitend verbunden sind. Es bleibt dann dort bestehen, wenn die leitende Verbindung unterbrochen wird.

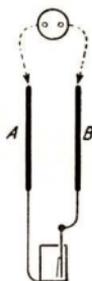


Abb. 20.
Unmittelbarer
Aufbau
eines Feldes

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 Spitzen S_1 und S_2 , die mit den Polen der Spannungsquelle verbunden sind, so entsteht zwischen K_1 und K_2 ein elektrisches Feld. Dieses Feld kann man (Abb. 21, 22) auf den

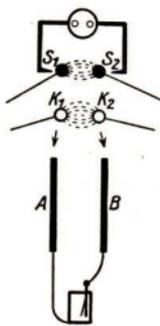


Abb. 21

Stufenweiser Aufbau eines Feldes

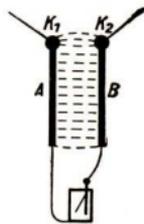


Abb. 22

Raum zwischen A und B übertragen. Führt man die Kugeln wiederholt von S_1 und S_2 zu A und B über, so wächst die Spannung zwischen A und B , was mit dem Elektrometer nachweisbar ist.

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.

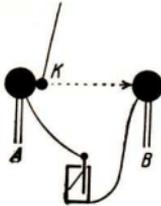


Abb. 23.
Stufenweiser Zerfall eines Feldes

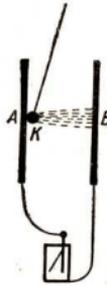


Abb. 24.

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

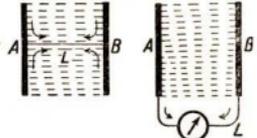


Abb. 25. Unmittelbarer Zerfall eines Feldes

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

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 erreicht hat.

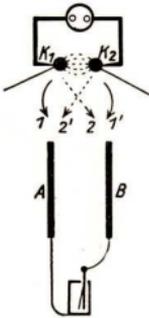


Abb. 26.
Stufenweiser Aufbau
u. Abbau eines Feldes

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. Jeder neue Wechsel in der Zuordnung bedingt einen Feldabbau. Diese Befunde lassen sich auf folgende Weise erklären: Elektrische Felder haben ihren Ursprung in sog. 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 die Ladungen nach und nach mit dem elektrischen Löffel auf die Grenzflächen bringen. Es gibt zwei verschiedene Sorten von Ladungen, die wir mit dem Namen „positive“ und „negative“ unterscheiden oder auch kurz mit den Zeichen $+$ (plus) und $-$ (minus). 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.

In Isolatoren können sich die Ladungen nur langsam oder gar nicht ausgleichen.

Positiv nennt man nun denjenigen Ladungszustand, der z. B. durch Reiben eines Glasstabes mit einem Lappen entsteht; negativ geladen ist ein elektrischer Körper, der von einem solchen Glasstab angezogen wird. Ein geriebener Hartgummistab ist z. B. negativ geladen.

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 verabreden, 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. Diese Erscheinungen lassen sich besser verstehen, wenn wir vorwegnehmen (s. § 64), 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 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. Zwischen dem Ion und dem abgelösten Elektron besteht ein elektrisches Feld. (Weiteres über Elektronen und Ionen in § 26.)

Wir beschränken uns zunächst 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:

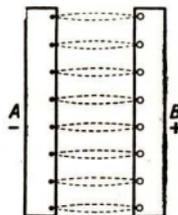


Abb. 27. Feldlinien zwischen Elektronen und Metallionen

Wird ein elektrisches Feld zwischen A und B erzeugt, so werden der Platte A Elektronen zugeführt und der Platte B Elektronen entzogen. 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. 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 Oberfläche verteilt sind.

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 Metallplatte, die das Feld begrenzt. Man gebraucht auch die Ausdrucksweise „positive oder negative Elektrizitätsmenge“.

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. Die Zahl der Ionen und Elektronen, die er enthält, ist dann gleich groß.

Negative Ladung bedeutet Überschuß an Elektronen, positive Ladung Mangel an 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.

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

Das Maß für den elektrischen Stromstoß $I \cdot \Delta t$ ist Amperesekunde.

2. Spannung, Ladung und Stromstoß. Beim Zerfall des elektrischen Feldes vereinigen sich die positiven und negativen Ladungen der Grenzflächen. Die Stärke des Stromstoßes und seine Dauer sind daher zweifellos von der Ladung der Grenzflächen abhängig. Wäre sie lediglich von ihr 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 elektrischen 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. 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.¹⁾ Wir schließen daraus:

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.

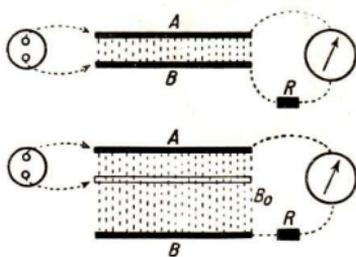


Abb. 28. Stromstoß und Spannung

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

Maßvergleichung: Ladungen sind 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 Amperesekunden, so ist die dabei zerfallende Ladung Q n mal so groß wie bei 1 Amperesekunde.

Die Ladung wird auch als Elektrizitätsmenge bezeichnet.

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

a) Messung des Einzelstromstoßes. Der kurze Stoß, 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 $I_1, I_2, I_3 \dots$ Ampere durch das Galvanometer fließen und stellt die Ausschläge des Zeigers fest. Auf diese Weise erfährt man, wie weit der Zeiger bei $\frac{I_1}{20}, \frac{I_2}{20}, \frac{I_3}{20}, \dots$ 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 $\frac{I}{40}$ Amperesekunde. Die Platten müssen dann in jeder Sekunde 40 mal mit der Spannungsquelle verbunden, von ihr getrennt und dann durch das Galvanometer leitend verbunden werden. Das wird

¹⁾ 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 gleich groß.

Die Kapazität 1 Farad besitzt also ein Kondensator, der bei 1 V Spannung die Ladung 1 Amperesekunde oder 1 Coulomb hat. Bei den üblichen Anordnungen wird nie eine so große Kapazität erreicht. Man benutzt deshalb die millionenfach kleinere Einheit $1 \mu\text{F} = 10^{-6}\text{F}$ oder die billionenfach kleinere Einheit 1pF (Picofarad) $= 10^{-12}\text{F}$.

2. Die Kapazität eines Plattenkondensators. Ein Plattenkondensator besitzt eine große Kapazität, wenn die Oberfläche der Platten groß und ihr Abstand klein ist. Stehen die Platten einander dicht gegenüber, so kommt das äußere Feld gegenüber dem Feld zwischen den Platten kaum in Betracht. Dann ist nur die Größe einer der Flächen von Bedeutung, die das homogene Feld zwischen den Platten begrenzen. 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.

Wir benutzen gleich gebaute Kondensatoren, deren Plattenbestand 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 gegebener 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 gegebener Spannung U umgekehrt proportional dem Abstand d der Platten.

Fläche f	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	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 die Beziehung fest

$$C \sim \frac{1}{d}.$$

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

Die Kapazität C eines Plattenkondensators ist

$$C = \varepsilon_0 \cdot \frac{f}{d}.$$

Dabei bedeuten f die Größe der Innenfläche einer Platte und d den Abstand.

3. Die Größe des Faktors ϵ_0 (der „absoluten“ Dielektrizitätskonstanten). Wir betrachten einen Plattenkondensator, zwischen dessen Platten ein völlig luftleerer Raum besteht. Der Proportionalitätsfaktor der Kapazitätsformel sei ϵ_0 . Dann haben wir zwei Ausdrücke zur Angabe der Kapazität eines Plattenkondensators

$$C = \frac{Q}{U} \quad \text{und} \quad C = \epsilon_0 \frac{f}{d}.$$

Es ist also für den Plattenkondensator

$$\frac{Q}{U} = \epsilon_0 \frac{f}{d} \quad \text{oder} \quad \epsilon_0 = \frac{Q}{U} \cdot \frac{d}{f}.$$

Wir können ϵ_0 aus einem Versuch berechnen, bei dem wir Q , f , U und d messen¹⁾. Ein solcher ergibt z. B.: Der von kreisförmigen Platten von 25 cm Durchmesser gebildete Kondensator hatte die Fläche 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

$$\epsilon_0 = \frac{4,31 \cdot 10^{-9} \cdot 0,1 \text{ Coulomb}}{10 \cdot 491 \text{ Volt} \cdot \text{cm}} = 8,8 \cdot 10^{-14} \frac{\text{Coulomb}}{\text{Volt} \cdot \text{cm}}.$$

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

Genauere Messungen haben für ϵ_0 den Wert ergeben

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-14} \frac{\text{Coulomb}}{\text{Volt} \cdot \text{cm}}.$$

ϵ_0 wird auch die absolute Dielektrizitätskonstante genannt.

4. Die Größe der relativen Dielektrizitätskonstante. Ist der Raum zwischen den Platten des Kondensators mit einem Isolator ausgefüllt, so sei der Pro-

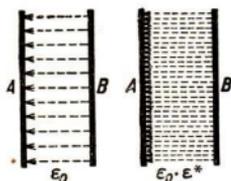


Abb. 30.
Dielektrizitätskonstante
und Dichte der Feldlinien

portionalitätsfaktor ϵ , also $C = \epsilon \cdot \frac{f}{d}$. Wir prüfen nach, welche Größe ϵ in diesem Falle besitzt (Abb. 30).

Wir messen bei Plattenkondensatoren von gleicher Fläche f , gleichem Abstand d , gleicher Spannung U den Unterschied der Ladung Q , wenn Luft oder andere Isolatoren den Raum zwischen den Platten ausfüllen. Wir finden Q für Hartgummi etwa 3mal, für Glas etwa 6mal, so groß wie für Luft. Da f , d und U unverändert waren, ist auch ϵ für Hartgummi etwa 3mal, für Glas etwa 6mal so groß wie ϵ_0 .

Ist der Faktor ϵ für einen Isolator ϵ^* mal so groß wie ϵ_0 , so nennen wir ϵ^* die relative Dielektrizitätskonstante des Isolators.

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.

Die Tabelle gibt eine Übersicht über ihre Größe für verschiedene Stoffe.

Stoff	ϵ^*	Stoff	ϵ^*
Glas	5—7	Paraffinöl	2,3
Quarzglas	3,7	Petroleum	2—2,3
Porzellan	6,0	Wasser	81
Hartgummi	2,7	Äthylalkohol	26
Bernstein	2,8	Luft	1,0006

Die Größe der Dielektrizitätskonstanten ϵ der Formel für die Kapazität ergibt sich aus

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon^*.$$

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 durch stufenweise Aufladung zu eichen. — 2. Durch stufenweise Aufladung ist die Abhängigkeit der Kapazität eines Plattenkondensators von Abstand und Fläche zu messen. — 3. Man bestimme die relative Dielektrizitätskonstante von Hartgummi, paraffinierter Pappe, Plexiglas durch stufenweise Aufladung. — 4. Man führe die Untersuchungen 2. und 3. durch stufenweise Entladung durch. — 5. Die Kapazität eines Kondensators ist mit einem geeichten Elektroskop 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, $\epsilon^* = 6$. 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 die Materie auf ein Feld ausübt, in das sie gebracht wird, durch folgende Versuche, deren Anordnung Abb. 31 zeigt.

1. Ein Leiter im Feld. Wir laden einen Plattenkondensator auf und messen seine Spannung mit dem Elektroskop. 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

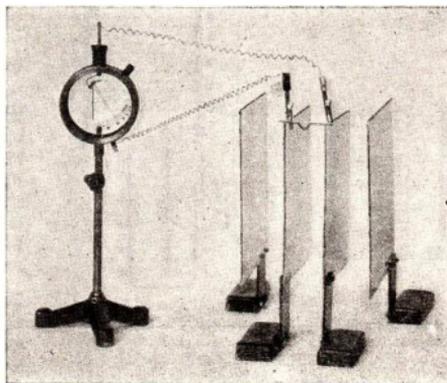


Abb. 31. Versuche zur Influenz

beim Herausnehmen wieder auf den früheren Betrag an. Aus der Abnahme der Spannung schließen wir auf eine Verkürzung der Feldlinien.

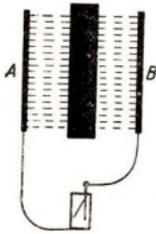


Abb. 32.

Leiter im elektrischen Feld

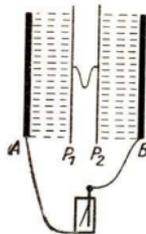


Abb. 33

Dies wird bestätigt durch folgenden Versuch.

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 aufgeschnitten worden und haben sich verkürzt. Die von A ausgehenden Feldlinien münden auf P_1 und die in B mündenden gehen von P_2 aus.

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

Auf den Schnittflächen treten entgegengesetzte elektrische Ladungen auf.

Diesen Vorgang nennt man **Influenz**.

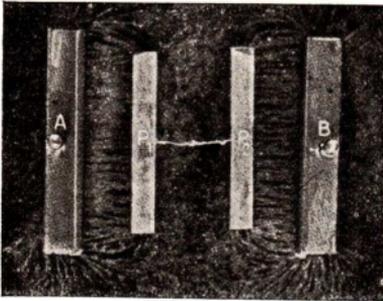
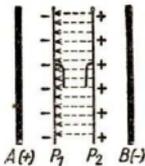
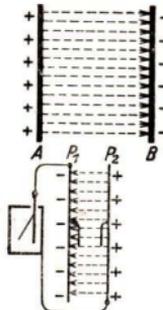


Abb. 34. Influenz im Feldlinienbild

2. Die influenzierten Ladungen. Bei der Influenz treten auf ein und demselben Leiter entgegengesetzte Ladungen auf. Steht das nicht in Widerspruch zu unseren bisherigen Beobachtungen?

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 LadungenAbb. 36.
Nachweis der influenzierten Ladung

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.

Das Innere des influenzierten Leiters ist deshalb feldfrei.

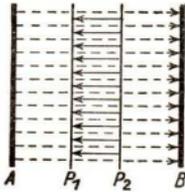


Abb. 37.
Das Gegenfeld der
influxierten Ladungen

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 das ursprüngliche Feld zerfällt, wenn er den ganzen Raum ausfüllt und damit die Grenzflächen berührt, bleibt beim Nichtleiter das Feld bestehen. Für dieses Verhalten des Nichtleiters gibt es folgende Erklärung:

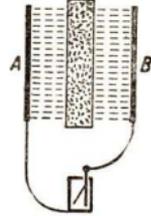


Abb. 38.
Nichtleiter im
Feld

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 Verbindungsmöglichkeit 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 metallische Scheiben, die die Atome darstellen sollen, zu sehen; sie sind untereinander leitend verbunden.

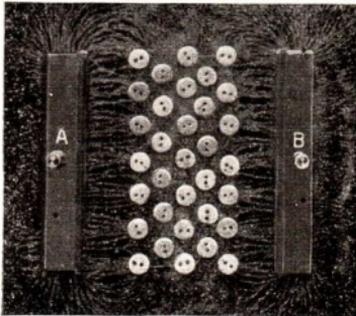


Abb. 39. Modellversuch: Leiter im Feld

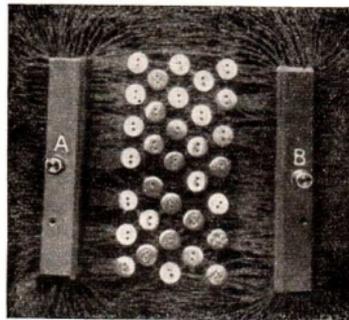


Abb. 40. Modellversuch: Nichtleiter im Feld

In Abb. 40 sind die metallischen Scheiben ohne leitende Verbindung nebeneinander gereiht (kein Elektronenübergang). Abb. 39 zeigt, wie 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.

§ 9. Das Grundgesetz des elektrischen Feldes

Der absoluten Dielektrizitätskonstanten kommt eine sehr große Bedeutung zu.

Für das homogene Feld eines Plattenkondensators gilt die Beziehung (§ 7)

$$\epsilon_0 = \frac{Q}{U} \cdot \frac{d}{f}.$$

Schreiben wir diesen Ausdruck in der Form

$$\frac{Q}{f} \cdot \frac{d}{U} = \epsilon_0,$$

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

$$\frac{\mathfrak{D}}{\mathfrak{E}} = \epsilon_0.$$

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 cm^2 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 überall 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 radialen, also inhomogenen Feld nimmt die influenzierte Ladungsdichte um so stärker ab, je mehr die Feldlinien auseinanderlaufen. Denkt man sich die Feldlinien gleichmäßig dicht aus den Grenzflächen heraus-treten, 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 inhomogenen Felder. Für diese so für jeden Punkt eines Feldes festgesetzte Ladungsdichte \mathfrak{D} , die an seinen Grenzen mit der Ladungsdichte der Grenzfläche übereinstimmt, gilt, wie Messungen allgemein zeigen, das Gesetz

$$\mathfrak{D} = \epsilon_0 \mathfrak{E}.$$

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 auf die Größe der Feldstärke schließen.

Wird ein elektrisches Feld zwischen einer Spitze und einer Platte (Abb. 41) erzeugt, so ist die Feldstärke in der Nähe der Spitze außerordentlich groß (Spitzenentladung).

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

Die Dichte der Feldlinien eines Plattenkondensator-Feldes außerhalb des Innenraumes 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.

Zeichnet man für ein elektrisches Feld in einem Stoff der Dielektrizitätskonstanten ϵ die Feldlinien so ein, daß sie mit konstanter Dichte aus der Grenzfläche heraustreten, so ist ihre Dichte (Zahl je cm^2 einer auf ihnen senkrecht stehenden Fläche) proportional der dort influenzierten Ladungsdichte \mathfrak{D} . Um \mathfrak{D} zu messen, müssen die Platten senkrecht von den Feldlinien durchsetzt werden.

Zwischen der Ladungsdichte \mathfrak{D} und der Feldstärke \mathfrak{E} gilt die Beziehung

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

§ 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 das elektrische Feld Energie besitzt.

1. Das Maß der elektrischen Energie. Wir betrachten die Energie des Feldes eines Kondensators, dessen Spannung U und dessen Ladung Q ist. Verbinden wir die Kondensatorplatten durch einen Draht, so zerfällt das Feld. Es entsteht der Stromstoß $Q = I \cdot \Delta t$. Aus der elektrischen Energie des Feldes wird Wärme, denn der Draht erwärmt sich durch den Stromstoß. Je größer U ist, desto größer ist Q , und je größer Q ist, desto stärker ist die Erwärmung des Drahtes. Die Energie des elektrischen Feldes ist also abhängig von U , I und Δt . Verbinden wir die Pole der Steckdose (unter Einschaltung eines Vorschaltwiderstandes) während der Zeit t durch einen Draht, so herrscht in dem Draht ein dauernder Feldzerfall. Besteht zwischen seinen Enden die Spannung U und fließt in ihm der Strom I , so hängt die Energie des zerfallenden Feldes von U , I und t ab. Diese Größen können wir leicht messen.

Die Energie des Feldes wandelt sich in Wärme um. Die im Draht entwickelte Wärme können wir messen, indem wir den Draht in Öl einbetten. Werden m gr 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.

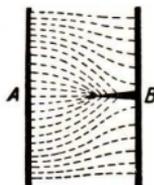


Abb. 41.
Inhomogenes
Feld in der Nähe
einer Spitze

Versuche dieser Art 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 Q in Ampere Sekunden oder Coulomb gemessen werden, ergibt sich als Maß der elektrischen Energie:

Die elektrische Energie wird in Voltampere Sekunden (VAs) gemessen.

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

1 Joule = 1 Voltcoulomb = 1 Voltampere Sekunde = 1 Wattsekunde.

2. Das elektrische Wärmeäquivalent. Messen wir die elektrische Energie W_e in Voltampere Sekunden 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

$$1 \text{ J} = 0,239 \text{ cal.}$$

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 nimmt also dabei zu. — Ist die 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 ergibt sich:

Zwischen der elektrischen Energie und der mechanischen Energie besteht das Umwandlungsverhältnis

$$1 \text{ J} = 10^7 \text{ erg} = 0,102 \text{ kgm.}$$

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 Formel berechnen:

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

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

erzeugt, wenn U in Volt, I in Ampere, t in Sekunden und W in Kalorien gemessen werden.

Die zweite Formel 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 verbrauchte elektrische Energie die Stromleistung. Sie wird gemessen in Watt (W):

$$1 \text{ Watt} = 1 \text{ Voltampere} = 1 \frac{\text{Joule}}{\text{Sekunde}}$$

Die größere Einheit der Stromleistung ist das Kilowatt (kW):

$$1 \text{ Kilowatt} = 1000 \text{ Watt.}$$

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

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:

$$1 \text{ Kilowattstunde} = 1000 \text{ Watt während einer Stunde,}$$

das sind also $1000 \cdot 60 \cdot 60 \text{ Joule} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Joule}$.

Sie entspricht der Wärmeenergie $W_w = 1000 \cdot 0,239 \cdot 60 \cdot 60 = 8,6 \cdot 10^5 \text{ cal}$ oder 860 kcal und der mechanischen Arbeit $A_m = 0,102 \cdot 1000 \cdot 60 \cdot 60 = 3,67 \cdot 10^5 \text{ kgm}$.

5. Die Verwendung der Stromwärme. Die Erzeugung von Wärme durch den elektrischen Strom besitzt vor der Erzeugung durch Verbrennung den Vorzug, daß bei ihr auf kleinstem Raum eine hohe Temperatur hervorgerufen werden kann. Sie findet Verwendung

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-Schmelz-Sicherung);

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 Brötröster, der Tauchsieder, das Plätteisen, die Heizsonne oder der elektrische Ofen sind mit Heizkörpern ausgestattet, die durch den Strom erwärmt werden.

Zur Übung: 1. Welche Wärmemenge entwickelt eine Glühlampe, die mit 110 Volt Spannung und 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 Watt Leistung. Welcher Strom fließt durch den elektrischen Zähler, wenn die Spannung 110 Volt beträgt? — 3. Ein Bügeleisen verbraucht 500 Watt. Die Kilowattstunde kostet 20 Rpf. Wieviel kostet der Strom, der 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 Watt bei einem Preis von 40 Rpf. 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 RM 4.— für 100 kg, ihr Heizwert 8000 kcal/kg; davon werden 50% ausgenutzt. Dieselbe Wärmemenge soll elektrisch erzeugt werden. Die Kilowattstunde kostet 10 Rpf. Alle elektrische Energie werde in Wärme übergeführt. Welche Heizung ist billiger? Wie steht es mit dem Verhältnis, wenn die Kilowattstunde 4 Rpf. und die Kohle RM 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

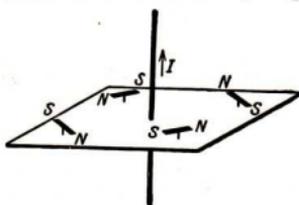


Abb. 42. Magnetnadeln im magnetischen Feld eines Leiters

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. Nur auf die Magnetnadel und magnetisiertes Eisen sowie andere magnetische Stoffe wird diese Wirkung ausgeübt. Wir schließen aus den Beobachtungen:

a) In dem Augenblick, in dem ein elektrischer Strom durch einen Leiter fließt, geht in dem Raum, der den Leiter umgibt, eine Veränderung vor sich. Kleine Magnete 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 Veränderungen, die in ihm auftreten, wenn Strom durch den Leiter fließt. 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

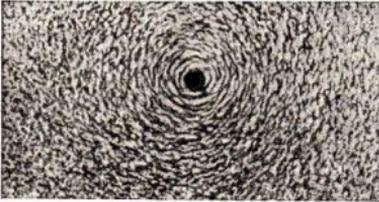


Abb. 43. Feld quer zu einem geradlinigen Leiter

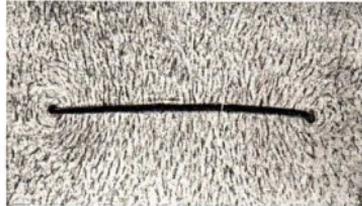


Abb. 44. Feld quer zu einer Kreiswindung

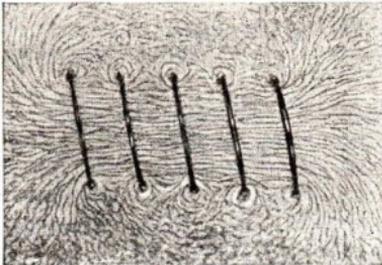


Abb. 45. Feld einer weitgewickelten Spule

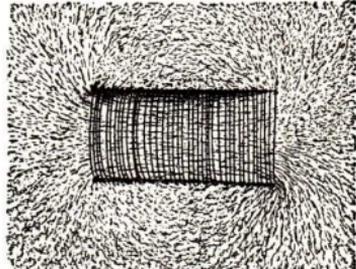


Abb. 46. Feld einer enggewickelten Spule

einstellen, bezeichnen wir als „magnetische Feldlinien“. Sie lassen erkennen:

Das magnetische Feld besitzt eine Form.

Kleine Magnetnadeln, die ins Feld gebracht werden, geben durch ihre Richtung seine Form an.

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.

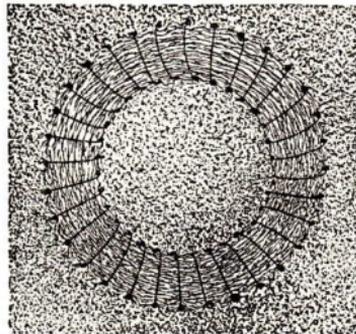


Abb. 47. Feld einer Ringspule

Wir erkennen aus ihnen:

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.

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

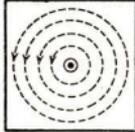


Abb. 48.

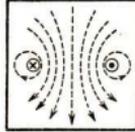


Abb. 49.

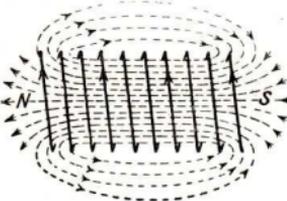


Abb. 50.



Abb. 51.

Stromrichtung und Feldlinienrichtung.

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

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. (Ungleichenamige magnetische Pole ziehen sich an.)

Die Richtungen der magnetischen Feldlinien und des elektrischen Stromes sind durch die erwähnte 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.

4. Übereinandergelagerte Magnetfelder. Erzeugt man mehrere Magnetfelder, so überlagern sich deren Wirkungen derart, daß die auf eine Magnetnadel ausgeübte Gesamtkraft sich aus den Einzelkräften nach dem Parallelogrammgesetz zusammensetzt. Dabei schwächen entgegengesetzt gerichtete Feldlinien das Feld, und gleich gerichtete verstärken es.

Das Magnetfeld einer Spule kann man sich durch Überlagerung der Felder ihrer Einzelwindungen entstanden denken.

Das resultierende Feld ist um so weniger inhomogen, je dichter die Windungen der Spule aneinander liegen.

§ 12. Die magnetische Feldstärke

1. Die Feldstärke im homogenen Feld. In einer stromdurchflossenen Spule *I* befindet sich eine stromdurchflossene Spule *II*. Sind die Feldlinien beider Spulen entgegengesetzt zueinander gerichtet, so ist das resultierende Feld im Innern der kleinen Spule schwächer als außerhalb. Sind außerdem die Feldstärken im Innern beider Spulen einander gleich, so ist das Innere der kleinen Spule feldfrei. In Abb. 52 ist zu erkennen, daß Eisenfeilicht im Innern der kleinen Spule in diesem Falle nicht gerichtet wird.

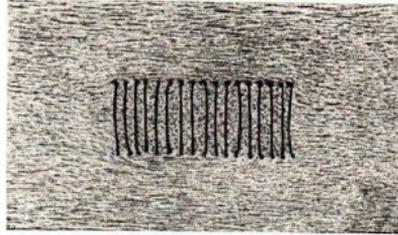


Abb. 52. Stromdurchflossene Spule im Magnetfeld

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

Stellen wir eine Magnetonadel in einem solchen Raum auf (Inneres 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 Richtung 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, wenn die Feldstärke beider Felder dieselbe ist. Sie wird aus der senkrechten Lage mehr oder weniger abgelenkt, wenn die Felder nicht genau gleich stark sind. Auf diese Weise können wir die Feldstärken von beliebigen Spulen *I* mit der Feldstärke der Spule *II* vergleichen.

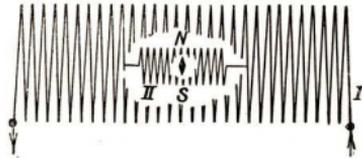


Abb. 53. Messung der magnetischen Feldstärke

a) Maßvergleichung. Durch die innere Spule *II* fließt ein unveränderlicher 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 beider Spulen einander gleich sind, wenn $w \cdot I$ eine Konstante ist. 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 dieselben sind, wenn der Quotient I/l eine Konstante ist.

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.

Windungs- zahl w	Ampere I	Ampere- windungen $w \cdot I$
60	3,5	210
120	1,7	204
180	1,15	207
355	0,59	209

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

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 $\frac{Iw}{l}$.

b) Maßeichung. Benutzen wir bei gleicher Stromstärke statt einer äußeren Spule zwei oder mehrere, die wir ineinanderstecken (oder eine Spule, die zwei oder mehrere gleiche Wicklungen trägt), so entstehen Felder der doppelten oder vielfachen Feldstärke. Ändern wir nun den in der inneren Spule fließenden Strom so lange, bis ihr Inneres feldfrei ist, dann finden wir:

Die magnetische Feldstärke in einer Spule ist proportional der Stromstärke I .

Unsere Untersuchungen gelten nur für homogene Felder. 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

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

e) Maßeinheit. Die Einheit der Feldstärke herrscht im Innern einer Spule, die 1 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**. 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. 45 und 50).

3. Torsionsmagnetometer. Zum Messen der Feldstärke ist auch ein Torsionsmagnetometer bequem. 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

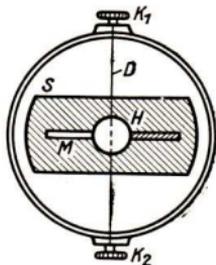


Abb. 54. Magnetometer.

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

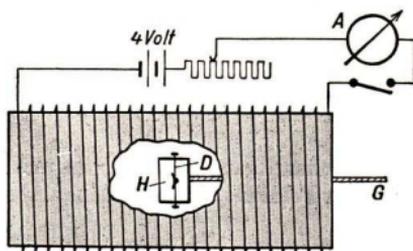


Abb. 55.

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. Bei kleinen Drehwinkeln ist der Winkelausschlag der magnetischen Feldstärke proportional.

Zunächst ergibt sich wieder, daß im homogenen Feld die Feldstärke überall dieselbe ist. Ferner bestätigen wir:

Die Feldstärke ist proportional der Stärke des Stromes und der Zahl der Windungen der Spule auf 1 cm; der Querschnitt der Spule erweist sich dabei als gleichgültig, wenn die Spule lang genug ist. Wir erhalten also

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

§ 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 auf der Oberfläche des Leiters und treten senkrecht aus der leitenden Fläche aus.

Die magnetischen Feldlinien umschlingen den stromdurchflossenen Leiter.

c) Elektrische ebenso wie magnetische Feldlinien durchkreuzen einander nirgends und haben einen bestimmten Richtungssinn. Sie laufen im homogenen Feld parallel zueinander und besitzen im inhomogenen Feld eine von Ort zu Ort wechselnde Dichte.

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 Draht, wo die Feldlinien konzentrische Kreise sind und die Feldstärke nach außen hin abnimmt.

2. Die 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, zwischen denen die Spannung besteht. Es ist

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

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

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

Es gilt dann entsprechend dem elektrischen Feld

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

Zwischen zwei beliebigen Punkten einer Feldlinie erhält man die Spannung, indem man die Feldlinie in viele kleine Abschnitte Δs unterteilt, die Teilspannungen $\Delta V = \mathfrak{S} \Delta s$ bestimmt und dann alle diese ΔV -Werte addiert. Da die Feldstärke in Amperewindungen pro Zentimeter gemessen wird, mißt man magnetische Spannungen in Amperewindungen.

3. Die Spannung. In einem konstanten elektrischen Feld ist die Spannung zwischen den Enden aller Feldlinien dieselbe, auch wenn sie verschiedene Länge

besitzen (Abb. 56).

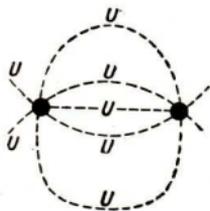


Abb. 56.

Gleiche Spannung längs verschiedener elektrischer Feldlinien

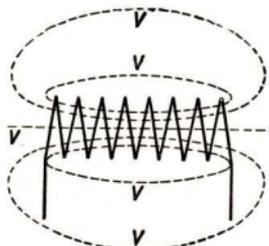


Abb. 57.

Gleiche Spannung längs verschiedener magnetischer Feldlinien

Auch in einem konstanten magnetischen Feld besitzen die Feldlinien verschiedene Länge (Abb. 57), und auch hier gilt, wie wir gleich zeigen:

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 $V = \mathfrak{S}_1 \Delta s_1 + \mathfrak{S}_2 \Delta s_2 + \dots + \mathfrak{S}_n \Delta s_n$, 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 $I_1, I_2 \dots I_m$ fließen, einschließt, $V = (I_1 + I_2 + \dots + I_m)$ Amperewindungen. Dabei sind entgegengesetzt fließende Ströme negativ zu nehmen, also abzuziehen.

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

$$\oint = \frac{I}{2 \pi r}.$$

Da dies für jede Feldlinie gilt, nimmt also die Feldstärke \oint mit wachsendem Abstand r ab.

§ 14. Materie im magnetischen Feld

1. Eisen im Magnetfeld. Auf dem Experimentiertisch stellen wir eine Magnetnadel auf. 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. 52, 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:

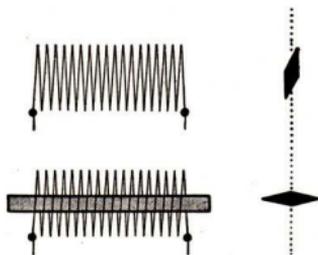


Abb. 58. Verstärkung des Magnetfeldes durch Eisen

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:

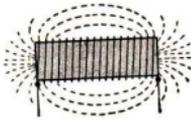


Abb. 59.



Abb. 60.

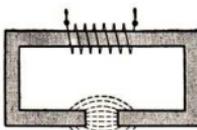


Abb. 61.

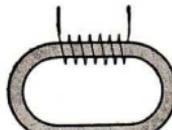


Abb. 62.

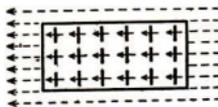
Abb. 59–62. Feldlinienbilder von Spulen mit verschieden geformten Eisenkernen

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.

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

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 des Molekülmagneten 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

Ende des Eisenstabes treten die Feldlinien aus, an dem anderen Ende treten sie wieder ein. Das Eisen ist nun magnetisch. Die Feldlinien verlaufen im Innern des Eisens in geschlossenen Kurven, die im Innern des Eisens ein sehr starkes magnetisches Feld erzeugen.

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 unmagnetisch – oder ein Teil der Molekularströme bleibt gleichgerichtet – das Eisen ist dann noch magnetisch. Es zeigt sog. „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 von uns 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. 1915 ist experimentell nachgewiesen worden, daß die Molekularströme wirklich existieren.



Abb. 64. Verlauf der Feldlinien im Hufeisenmagneten

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

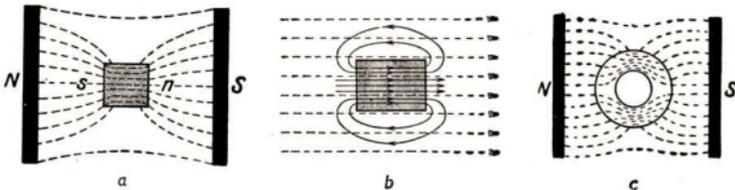


Abb. 65. Eisen im Magnetfeld

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.

4. Andere Stoffe im Magnetfeld. Jeder Stoff, in dem Molekularströme wie im Eisen durch ein Magnetfeld gleichgerichtet werden, muß sich ähnlich wie Eisen im Magnetfeld 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 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 auf Eisen ausgeübten Wirkung gleicht. Die Stäbchen stellen sich in Richtung der Feldlinien. Stoffe dieser Art sind Platin, Uran, Mangan, Hartgummi, Sauerstoff und Eisenchloridlösungen.

c) Diamagnetische Stoffe. Sie zeigen eine schwache, dem Verhalten des Eisens entgegengesetzte Beeinflussung. Stäbchen aus diesen Stoffen stellen sich senkrecht zu den Feldlinien. 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. Feldlinienzahl. Wie das elektrische Feld, so besitzt auch das magnetische Feld Energie, die sich z. B. in mechanische Energie umwandelt, wenn sich eine Spule aus elastischen Windungen unter der Einwirkung des Magnetfeldes zusammenzieht (Abb. 66). Die Wirkung

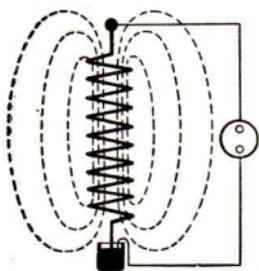


Abb. 66.

Nachweis der magnetischen Spannung

des Feldes ist nicht allein durch die in jeder magnetischen Feldlinie herrschenden Spannung V , sondern auch durch die magnetische Feldstärke \mathfrak{H} bedingt. Die Spannung V kann aus der Feldstärke \mathfrak{H} und der Länge der Feldlinien berechnet werden.

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. 67). 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. 68 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 der vier engen Spulen zusammen.

Zeichnen wir das Feldlinienbild dieser Spulen, und zwar in jeder der vier Spulen gleich viel Feldlinien, da ja die Felder in ihnen gleich sind, 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 und einer festen, aber noch unbestimmten Zahl k anschaulich „Feldlinienzahl“. Dann ist also in der großen Spule bei gleicher Feldstärke die Feld-

linienzahl 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 $\mathfrak{H}q$ proportional ist, nämlich den induzierten Spannungsstoß. Dann werden wir den hier noch unbestimmten Faktor k festlegen.

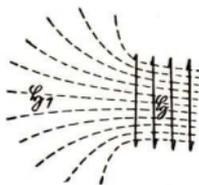


Abb. 67. Feldlinien am Ende einer Magnetspule

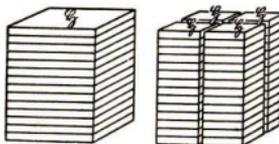


Abb. 68. Zusammensetzung einer Magnetspule aus mehreren einzelnen

2. Feldlinienzahl und Permeabilität ¹⁾. Elektromagnete üben große Kräfte aus. Abb. 69 stellt den Verlauf der magnetischen Feldlinien eines Elektromagneten dar, deren Spannung und Zahl die Kraftwirkung bedingt. Das Eisen, das die stromdurchflossenen Spulen 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.

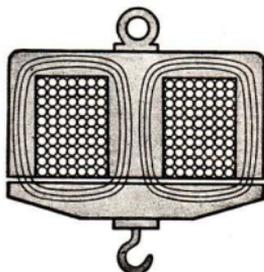


Abb. 69. Feldlinienverlauf in einem Elektromagneten

Man nennt die Zahl μ^* , die angibt, wievielfach so groß die magnetische Feldlinienzahl außerhalb einer Spule wird, wenn ein Stoff die Spule ausfüllt, die „Permeabilität“ des Stoffes.

Permeabilität einiger Stoffe

Die nebenstehende Tabelle macht einige Angaben über die Größe von μ^* . Aus ihr ersehen wir, daß Eisen eine besonders große Permeabilität besitzt, die allerdings stark von der Feldstärke abhängig ist.

Stoff		Permeabilität
Eisen	} ferromagnetisch	bis 50 000
Nickel		bis 300
Platin	} paramagnetisch	1,000 36
Aluminium		1,000 023
Hartgummi		1,000 014
Wismut	} diamagnetisch	0,999 824
Kupfer		0,999 991
Glas		0,999 987

1) permeabilis = durchdringbar.

3. Die Bewegung eines Stromleiters im Magnetfeld. Steht ein beweglicher Leiter senkrecht zu den Linien eines magnetischen Feldes (Abb. 70), so wird er senkrecht zu den Feldlinien und senkrecht zu seiner Längsrichtung abgelenkt, wenn Strom durch ihn fließt. Die Ablenkung beruht auf der Wirkung, die die beiden Magnetfelder aufeinander ausüben.

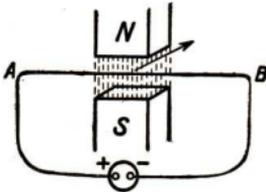


Abb. 70. Bewegung eines Stromleiters im Magnetfeld

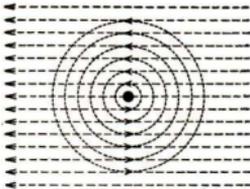


Abb. 71. Überlagerung der Feldlinien von Magnetfeld und Leiter

Abb. 71 zeigt den Verlauf der magnetischen Feldlinien, die sich übereinanderlagern. Abb. 72 gibt das Bild des resultierenden Feldes in Eisenfeilicht. Wir erkennen, daß

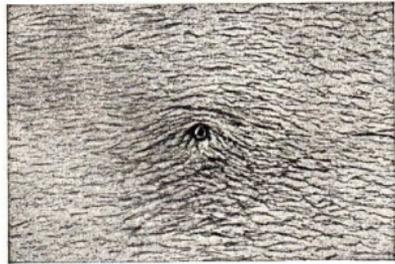


Abb. 72. Feldlinienbild zur Ablenkung eines stromdurchflossenen Leiters

die magnetischen Feldlinien nach oben ausgebogen sind, und zwar nach der Seite, wo die Feldstärken beider Felder gleichgerichtet sind.

Die Richtung der Ablenkung ist durch die in Abb. 73 dargestellte Dreifingerregel der rechten Hand gegeben. Es zeigen an:

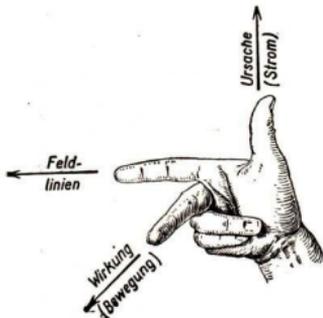


Abb. 73. Dreifingerregel

der Zeigefinger die Richtung der magnetischen Feldlinien, also die Richtung nach dem Südpol, der Daumen die Richtung der „Ursache“ (Stromrichtung), also nach dem Minuspol, der Mittelfinger die Richtung der Wirkung (Ablenkungsrichtung).

4. Anziehungs- und Abstößungsgesetz. Befindet sich ein Dauermagnet in einem Magnetfeld NS, so lagert sich das Feld seiner Molekularströme über das andere. In Abb. 74 wird das Feld rechts vom Dauermagneten verstärkt und

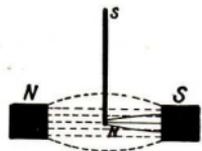


Abb. 74. Dauermagnet im Magnetfeld

auf der linken Seite geschwächt. Daher bewegt sich der Nordpol des Dauermagneten auf den Südpol des Feldmagneten zu.

Gleichartige Pole stoßen einander ab, ungleichartige ziehen einander an.

Messungen der Größe der Kraft, mit der zwei Magnetpole bei verschiedenem Abstand aufeinander einwirken (Abb. 75), zeigen:

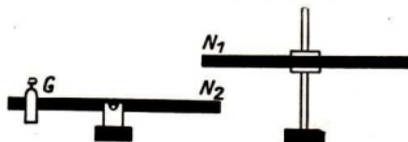


Abb. 75. Messung magnetischer Kräfte

Die zwischen den Polen wirkende Kraft ist umgekehrt proportional dem Quadrat des Abstands der Pole.

§ 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.

Länge östlich Greenwich		4°	7°	10°	13°	16°
Deklination	52° n. Br.	8,5	6,9	5,5	4,0	2,5
(westlich)	48° n. Br.	8,0	6,7	5,3	4,0	2,7
Inklination	52° n. Br.	67,2	67,1	67,0	66,9	66,8
(nördlich)	48° n. Br.	63,9	63,8	63,6	63,5	63,4
Horizontal-	52° n. Br.	0,144	0,145	0,146	0,147	0,148
intensität Aw/cm	48° n. Br.	0,160	0,160	0,161	0,162	0,162

Über die Größe der Deklination und Inklination in Mitteleuropa gibt die voranstehende Übersicht Auskunft (gültig für das Jahr 1940).

2. Die Horizontalintensität des Erdmagnetismus. Ein an einem Faden aufgehängtes Magnetometer 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 den Magneten ein. Diese Komponente wird **Horizontalintensität** genannt. Hat man die Größe der Horizontalintensität \mathfrak{H}^* mit dem Magnetometer bestimmt, so kann man mit Hilfe des Inklinationswinkels i die Gesamtintensität \mathfrak{H}_0 , d. h. die wahre Größe der Erdfeldstärke, berechnen (Abb. 76). Es ist

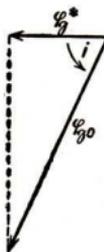


Abb. 76. Berechnung der Gesamtintensität aus Horizontalintensität und Inklinationwinkel i

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

Die Tafel macht Angaben über die Horizontalintensität des erdmagnetischen Feldes in Mitteleuropa in Amperewindung/Zentimeter. Häufig wird ein Maß der Feldstärke gebraucht, das etwas kleiner als das von uns benutzte Maß Amperewindung/cm ist.

$$1,256 \text{ Oersted (Oe)} = 1 \text{ Amperewindung/cm.}$$

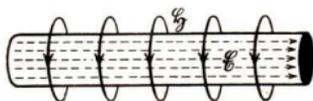
Die Totalintensität des Erdmagnetismus beträgt in Deutschland etwa 0,36 Amperewindungen/cm oder 0,45 Oe, die Horizontalintensität etwa 0,18 bis 0,19 Oe.

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 elektrische Induktion

§ 17. Die induzierte elektrische Spannung

Ein elektrischer Strom (ein zerfallendes elektrisches Feld) erzeugt ein magnetisches Feld. Wird der Strom unterbrochen, dann zerfällt das magnetische Feld. Was wird aus ihm und der Energie, die es enthält?



zerfallendes U , entstehendes V

Abb. 77



zerfallendes V , entstehendes U

Abb. 78

Als Erfahrungstatsache ist uns bekannt: **Zerfällt ein elektrisches Feld, dann entsteht ein magnetisches Feld**, dessen Feldlinien die (im Leiter) zerfallenden elektrischen Feldlinien umschlingen (Abb. 77).

Im folgenden werden wir als eine Erfahrungstatsache den Satz kennenlernen:

Zerfällt ein magnetisches Feld, dann entsteht ein elektrisches Feld, dessen Feldlinien die zerfallenden

magnetischen Feldlinien umschlingen (Abb. 78). An geeigneten Versuchen prüfen wir diesen Satz.

1. Nachweis des in einem Leiter induzierten Stromstoßes. a) In einer ringförmigen Spule mit Eisenkern erzeugen wir ein starkes magnetisches Feld (Abb. 79). Durch die Spule führen wir einen Draht bc , dessen Enden wir über ein Galvanometer leitend verbinden. Schalten wir den Strom aus, der das Magnetfeld erzeugt, dann zerfällt das Magnetfeld und gleichzeitig entsteht in dem Leiter $abcd$ ein elektrischer Stromstoß. Das Galvanometer schlägt aus.

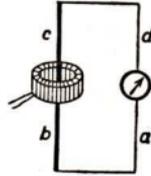


Abb. 79. Nachweis der elektrischen Induktion

Da der im Leiter auftretende Stromstoß nichts anderes als ein zerfallendes elektrisches Feld ist, 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 nachweisbar, weil es im Leiter einen Stromstoß hervorruft. Man sagt, in dem Leiter wird ein elektrischer Stromstoß „induziert“. Den Vorgang nennt man „elektrische Induktion“.

b) Wir machen weiterhin die Beobachtung, daß in der Schleife $abcd$ ein elektrischer Stromstoß entsteht, wenn das Magnetfeld des Rings 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, das einen Leiter umschlingt, so wird im Leiter ein elektrischer Stromstoß induziert.



Abb. 80.
In dieser Lage wird kein Strom induziert

c) Legen wir den in sich geschlossenen Leiter $abcd$ so durch die ringförmige Spule, wie Abb. 80 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 Rings einen offenen, hufeisenförmig gebogenen Elektromagneten zur Erzeugung des Magnetfeldes, dann nehmen wir folgendes wahr: Liegt der Draht so, wie Abb. 81 angibt, dann treten induzierte Stromstöße beim Entstehen und Zerfall des Magnetfeldes auf. Befindet sich der Draht außerhalb (Abb. 82) 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. 83), dann tritt ein starker Stromstoß auf. Überbrücken wir die Pole durch Eisen (Abb. 84), so entsteht ein stärkerer

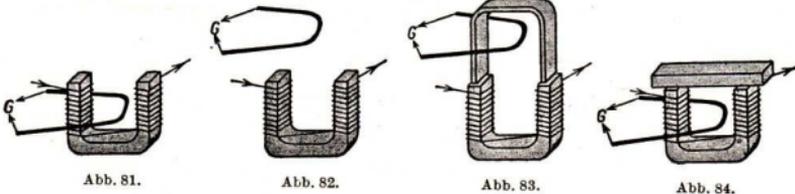


Abb. 81—84. Induktionsversuche mit einem Hufeisenmagneten

Stromstoß als ohne die Brücke. Umschließt der Draht beide Schenkel des Magneten, so tritt kein Stromstoß auf. Versuche dieser Art lassen uns erkennen:

Nur derjenige Teil des magnetischen Feldes, der den Leiter „umschlingt“, erzeugt bei seiner Änderung im Leiter einen Induktionsstrom.

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

Wird die Zahl N der magnetischen Feldlinien, die nur in einer Richtung durch die Windungsfläche eines Leiters tritt, geändert, so fließt ein Induktionsstrom im Leiter.

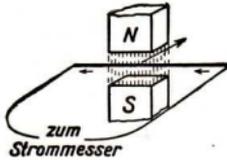


Abb. 85. Die Richtung des induzierten Stromes

d) Führen wir den Leiter A von außen zwischen die Schenkel des Elektromagneten, so entsteht während der Bewegung ein Stromstoß in dem Leiter. Nehmen wir ihn aus dieser Lage heraus, so entsteht ein Stromstoß in entgegengesetzter Richtung. Ein Induktionsstrom fließt in einem Leiter auch dann, wenn die Zahl der ihn umschlingenden magnetischen Feldlinien durch Bewegungen des Leiters geändert wird.

2. Die Richtung des induzierten Stromes. Bewegen wir einen Leiter senkrecht durch ein homogenes magnetisches Feld (Abb. 85), so entsteht ein Induktionsstrom, dessen Richtung von der Richtung der Bewegung abhängt. Bewegen wir ihn in der Richtung der magnetischen Feldlinien, so entsteht kein Strom, denn nur im ersten Falle wird die Zahl der durch die Windungsfläche des Leiters tretenden magnetischen Feldlinien geändert. Die Richtung des Induktionsstromes ist durch die in Abb. 86 dargestellte Dreifingerregel der rechten Hand gegeben. Es zeigen an:

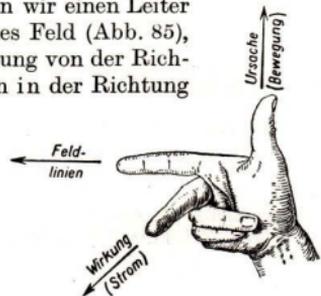


Abb. 86. Dreifingerregel der rechten Hand

der Zeigefinger die Richtung der magnetischen Feldlinien, der Daumen die Richtung der Ursache (Bewegungsrichtung), der Mittelfinger die Richtung der Wirkung (Stromrichtung).

3. Der in der Spule induzierte Stromstoß. Legen wir einen Draht in zwei Windungen um den Elektromagneten (Abb. 87), dann ist der in ihm beim Entstehen und Zerfall des Magnetfeldes hervorgerufene Stromstoß doppelt so groß. Bei 3, 4 und mehr Windungen wächst der Stromstoß entsprechend.

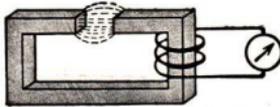


Abb. 87. Induktionsversuch mit mehreren Drahtwindungen

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.

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

Man kann sich das folgendermaßen erklären: Das induzierte elektrische Feld besitzt eine gewisse elektrische Spannung (Abb. 88). 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 jede magnetische Feldlinie, die der Leiter umschlingt, w -fach wirkt.

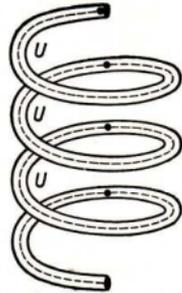


Abb. 88. Die in mehreren Drahtwindungen induzierte Spannung

4. Magnetische Feldlinienzahl und Spannungsstoß. Aus den Versuchen ergibt sich, 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:

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

U bedeutet dabei die 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 abhängig ist. Daher muß auch der Spannungsstoß $U \cdot \Delta t$ von der Änderung ΔN 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. 89) mißt, auf die Zahl der entstehenden oder zerfallenden magnetischen Feldlinien ΔN schließen. Man kann ΔN auf diese Weise messen, wie sich aus den Versuchen unter 5 ergibt.

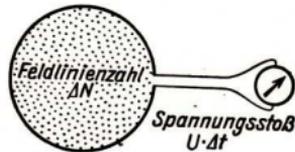


Abb. 89. Beziehung zwischen Spannungsstoß und Änderung der Feldlinienzahl

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

a) Messung des einzelnen Spannungsstoßes. In einer großen Spule I erzeugt man ein Feld der Feldstärke \mathfrak{H} (Abb. 90). 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 Stromstoßen $I \cdot \Delta t$ 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 zusammengefaßt

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

und weiterhin ergibt sich, wenn U in Volt, \mathfrak{H} in Amperewindung/cm und q in cm^2 gemessen wird,

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

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

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

In § 15 hatten wir verabredet, das Produkt $k \mathfrak{H} q = N$ magnetische Feldlinienzahl zu nennen. Dabei war der Wert des Faktors k noch offen geblieben. Wir sehen nun, daß es zweckmäßig (aber nicht notwendig) ist, $k = \mu_0$ zu setzen, d. h. den Spannungsstoß je Windung der Spule „Feldlinienzahl“ zu nennen. Wir haben dann eine bequeme Methode N zu messen. Wir setzen also fest:

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

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

Die Einheit der magnetischen Feldlinienzahl 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. 91). Dreht sie sich aus der

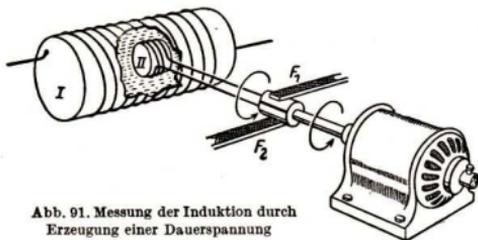


Abb. 91. Messung der Induktion durch Erzeugung einer Dauerspannung

Querstellung in die Stellung längs der magnetischen Feldlinien, so entsteht ein Spannungsstoß $U \cdot \Delta t$. Bei einer vollen Umdrehung treten 4 und bei x Umdrehungen $4x$ Spannungsstöße 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 V .

Man liest sie am Voltmeter ab. Der einzelne Spannungsstoß $U \cdot \Delta t$ ist dann gleich $\frac{V}{4x}$. Im übrigen verläuft die Messung wie bei a).

6. 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 das **Induktionsgesetz**:

Zerfallen ΔN Feldlinien eines Magnetfeldes in der Zeit Δt , so entsteht die elektrische Spannung

$$U = \frac{\Delta N}{\Delta t}.$$

§ 18. Das Wesen 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, d. h. Ladungen, sein könnten. 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 bisher erkannt haben? — Dies ist insofern nicht der Fall, als wir bisher nur durch ruhende Ladungen erzeugte elektrische Felder, sog. **elektrostatische Felder**, betrachtet haben. Eine zweite Möglichkeit, elektrische Felder zu erzeugen, besteht in der Änderung von Magnetfeldern. Da Magnetfelder stets durch elektrische Ströme einschließlich der Molekularströme erzeugt werden und sich mit diesen ändern, entstehen elektrische Felder auch durch elektrische Ströme, d. h. durch Beschleunigung oder Änderung der Zahl der im Strom bewegten Ladungsträger. 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. 92 gibt dieser Auffassung bildlichen Ausdruck. Ob die Annahme berechtigt ist, wird hier wie bei so vielen physikalischen Fragen dadurch entschieden, 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:

die Spannung U in Volt,
die Ladung Q in Amperesekunden oder Coulomb,

im magnetischen Feld:

die Spannung V in Amperewindungen,
die Feldlinienzahl N in Voltsekunden.



Abb. 92. Lage der elektrischen und magnetischen Feldlinien

3. Die Gesetze der Verteilung der Feldlinien. Die Zahl der einfach gezählten ($w = 1$) Feldlinien eines Magnetfeldes beträgt (§ 19)

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

Schreiben wir diese Formel in der Form

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

und nehmen wir an, daß die Fläche q senkrecht von den Feldlinien durchsetzt wird, so bedeutet $\frac{N}{q}$ in ihr die Dichte \mathfrak{B} der magnetischen Feldlinien. Wir erhalten für die sog. magnetische Induktion \mathfrak{B} die Beziehung

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

die für alle Teile des magnetischen Feldes gilt. Wir können daher feststellen: In elektrischen und magnetischen Feldern gelten die Gesetze

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

im elektrischen Feld im magnetischen Feld.

Entstehen Felder in einem Stoff mit der Dielektrizitätskonstante ε^* oder der Permeabilität μ^* , so gilt ebenfalls

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

Für elektrische Felder wissen wir das bereits. Für magnetische Felder kann man es durch Induktionsversuche zeigen, wenn das Magnetfeld durch eine stoffgefüllte Spule erzeugt wird.

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 Entladungsstrom 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. § 51), 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 weiterrückt, 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. Dieser Schwingungsvorgang, bei dem fortgesetzt elektrische in magnetische Energie umgesetzt wird, entspricht völlig

den Schwingungen eines Pendels, wobei kinetische Energie (bei B) in potentielle Energie (bei L) verwandelt wird (Abb. 93). Die Luftreibung wirkt dämpfend. 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 lösen und im Raum ausbreiten können.

5. Stoffe im elektromagnetischen Feld. Dazwischen 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.

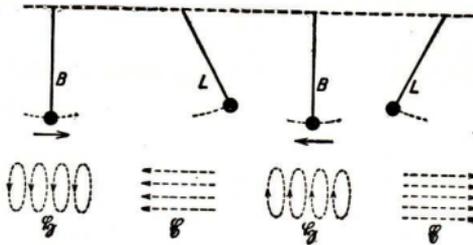


Abb. 93. Umwandlung magnetischer und elektrischer Felder.

§ 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 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. Das Magnetfeld ist nur Mittler der Umwandlung. Die Maschinen bestehen aus den felderregenden Magneten NS und der drehbaren Spule (Anker) als wesentlichen Teilen (Abb. 94). Sie heißen Dynamomaschinen¹⁾. In ihnen wird mechanische Energie in elektrische umgewandelt (§ 21).

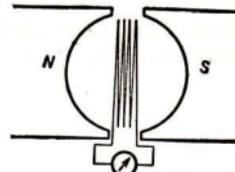


Abb. 94. Grundgedanke der Dynamowirkung

2. Spannung und Stromstärke eines Wechselstroms. In den Spulen des Ankers einer Dynamomaschine fließt ein Induktionsstrom, dessen Spannung und

1) *dýnamis* (griech.) = Kraft.

Stromstärke sowohl in der Größe als auch in der Richtung dauernd wechselt. Es fließt „Wechselstrom“.

Abb. 95 zeigt eine Ankerwicklung von w Windungen im Querschnitt und von der Seite. Dreht sie sich in einem homogenen Magnetfeld, so ändert sich die Zahl der magnetischen Feldlinien, die durch die Wicklung hindurchtreten. Besitzt die Wicklung den Querschnitt q und das Magnetfeld die Feldstärke \mathfrak{H} , so ist die Zahl N der induzierenden (w -fachen) Feldlinien, die in der zum Magnetfeld senkrechten Lage durch sie hindurchtritt,

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

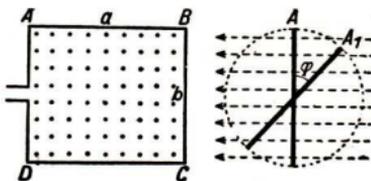


Abb. 95. Ankerwicklung im Querschnitt und von der Seite

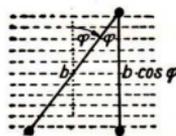


Abb. 96. Zur Berechnung der Dynamospannung

In dieser Lage ist $q = a \cdot b$ (Abb. 95). Dreht sich das Rechteck $ABCD$ um den Winkel φ , so ist der Querschnitt der Wicklung, durch den die Feldlinien hindurchtreten können, kleiner als q . In der Richtung der Feldlinien gesehen, erscheint b verkürzt (Abb. 96). Seine Länge beträgt nur noch $b \cdot \cos \varphi$. In einer beliebigen Lage ist daher der Querschnitt $q \cdot \cos \varphi$ und die induzierende Feldlinienzahl, die durch die Wicklung hindurchtritt,

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

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

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

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

Den Faktor $\frac{2\pi}{T}$ 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

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

In dieser Gleichung erscheint N als Funktion der Variablen t . Bilden wir den Differentialquotienten

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

so erhalten wir, weil $U = \frac{dN}{dt}$ ist, für die, im Zeitpunkt t , induzierte Spannung U den Wert

$$U = -\omega \cdot \mu \cdot w \cdot q \cdot \xi \cdot \sin \omega t.$$

Ist $t = 0$, so ist, wie sich aus der Formel ergibt, $U = 0$. Ist $t = \frac{T}{4}$, so ist $\omega t = \frac{\pi}{2}$ und $U = -\omega \cdot \mu \cdot w \cdot q \cdot \xi$.

Dann besitzt U 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 $t = \frac{3T}{4}$, so ist $\omega t = 3\frac{\pi}{2}$ und $U = -U_0$.

Führen wir den Wert der Höchstspannung 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.

Tritt keine Verzögerung im Zerfall der elektrischen Spannung ein (§ 20), 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

$$I = I_0 \cdot \sin \omega t.$$

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

Abb. 97 gibt graphisch die Beziehungen zwischen der Spannung U und der Stromstärke I einerseits und der Umlaufzeit T des Ankers andererseits wie-

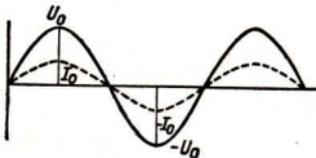


Abb. 97. Strom- und Spannungskurve einer Dynamomaschine

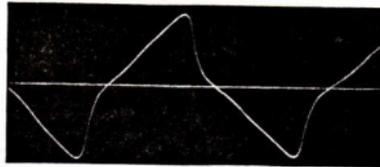


Abb. 98. Nichtsinusförmiger Wechselstrom eines Kurbelinduktors (Oszillogramm)

der. Den Ausdruck 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. 98 zeigt, daß es auch nichtsinusförmigen Wechselstrom gibt. Ein solcher entsteht z. B., wenn die Umdrehung der Spule nicht gleichmäßig erfolgt.

3. Umformung elektrischer Ströme durch Induktion. Zwei Spulen *I* und *II* sind durch einen in sich geschlossenen Eisenkern, wie Abb. 99 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 erzeugt sein. Ändert sich dieses Feld, so entstehen in der Spule *II* Induktionsströme.

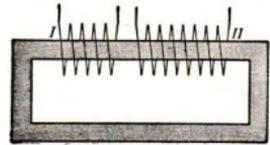


Abb. 99.
Magnetisch gekoppelte Spulen

Der Strom in *I* kann dadurch geändert werden, daß

- a) ein Gleichstrom oftmals unterbrochen wird (im Funkeninduktor);
- b) ein Gleichstrom geschwächt oder verstärkt wird (im Mikrophon);
- c) ein Wechselstrom fließt (im Transformator).

Das Magnetfeld ist auch in diesem Falle nur Mittler.

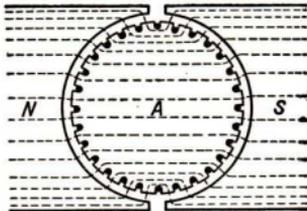


Abb. 100.
Feldlinien in einer Dynamomaschine

4. Das Magnetfeld elektrischer Maschinen. Je stärker der Mittler, desto stärker ist die durch ihn übertragene Wirkung. 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. (Schmäler Schlitz zwischen den Feldmagneten und dem Eisenkern des Ankers, Abb. 100.)

Wir haben in § 15 erfahren, daß Eisen die Zahl der magnetischen Feldlinien außerordentlich stark vermehrt, doch ist die Permeabilität μ^* des Eisens von der Feldstärke \mathcal{H} der Spule abhängig, welche die Molekularströme gleichrichtet. Die nachstehende Tabelle macht einige Angaben darüber für Dynamoblech.

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

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

Es ist in dem mit Eisen ausgefüllten Feld stets

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu^*.$$

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

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. Da diese ganz in einen Leiter eingebettet sind, zerfallen sie an Ort und Stelle (Abb. 101).

Es entstehen elektrische Ströme, die im Leiter in sich geschlossen sind und eine große Stromstärke besitzen. Sie werden nach ihrer Form „Wirbelströme“ genannt. Treten diese Ströme in den massiven Metallteilen der elektrischen Maschinen auf, so sind sie unerwünscht, weil ihre Erzeugung Energie erfordert, die sich in Wärme umwandelt. Man baut daher die Maschinen aus gebündelten, gegeneinander isolierten Eisenblechen auf, in denen die Ströme nicht kreisen können.

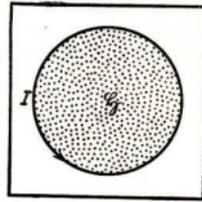


Abb. 101. Zum Entstehen der Wirbelströme

Derartige Wirbelströme entstehen auch, wenn ein Leiter sich durch ein konstantes Magnetfeld bewegt. Abb. 102 stellt dar, wie ein Pendel, dessen Masse P aus einer dicken Kupferscheibe besteht, durch ein Magnetfeld schwingt und dabei die magnetischen Feldlinien schneidet.

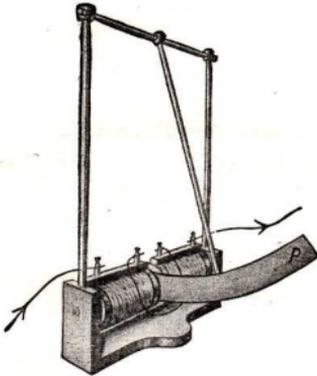


Abb. 102.

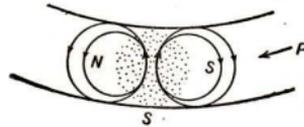
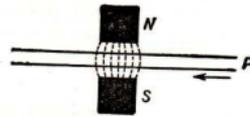


Abb. 103.

Nachweis der Wirbelströme

det. Die Kupferscheibe verhält sich wie ein Leiter, der quer zu den Feldlinien durch das Magnetfeld bewegt wird. In ihm entsteht ein elektrischer Stromstoß, der Wirbelströme hervorruft, wie Abb. 103 andeutet. Die Energie dieser starken Wirbelströme wird aus der kinetischen Energie des Pendels entnommen. Dabei wird das Pendel im Feld stark gebremst. Bewegt sich das Magnetfeld, dann würde die Kupferscheibe mitgezogen. Davon macht man beim Drehstrommotor Gebrauch, dem man einen sog. Kurzschlussanker gibt.

§ 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. 104). Durch den Schalter U kann man die Spannung der Batterie B anlegen oder einen geschlossenen Leiterkreis ohne Stromquelle herstellen. Man beobachtet 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 längere Zeit ein allmählich abnehmender Strom in derselben Richtung fließt.

b) Wir schalten (Abb. 105) in Nebenschluß zur großen Spule eine Glühlampe von 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 ,

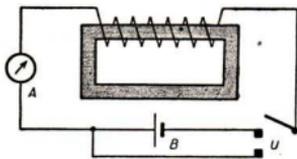


Abb. 104.

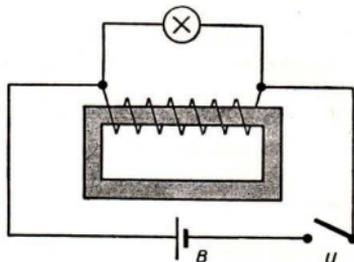


Abb. 105.

Versuche zur Selbstinduktion

dann entsteht ein Stromstoß, dessen Spannung so hoch ist, daß die Lampe aufleuchtet. Dieser Stromstoß fließt entgegengesetzt zur bisherigen Stromrichtung durch die Lampe. Den beiden Versuchen ist gemeinsam, daß beim Einschalten des Stromes in der Spule ein starkes Magnetfeld aufgebaut wird, und beim Ausschalten dieses Feld zerfällt.

2. Die Richtung des induzierten Stromstoßes. Zur Erklärung der Vorgänge betrachten wir nochmals die Richtung des Magnetfeldes bei der Induktion. In den Abb. 106 und 107 sind zwei Fälle der Induktion skizziert.

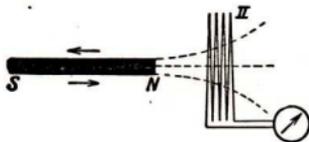


Abb. 106.

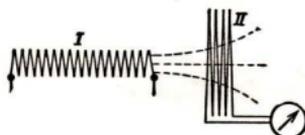


Abb. 107.

Gegenseitige Induktion

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.

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 so gerichtet, daß das von ihm erzeugte Magnetfeld der Änderung des induzierenden Magnetfeldes entgegenwirkt.

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 jede einzelne Windung erzeugt 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 zerfällt elektrische Energie und wandelt sich in magnetische Energie um. Der Strom kann nicht in voller Stärke sofort fließen, weil jedes Anwachsen des magnetischen Feldes eine elektrische Gegenspannung hervorruft.

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 $\frac{dN}{dt}$ abhängt, also von der Geschwindigkeit, mit der die Zahl der Feldlinien sich ändert, so ist die Gegenspannung beim Anwachsen gering, beim Unterbrechen aber oft recht groß. Die Versuche zeigen also:

Induktion wird auch im eigenen Leiter wirksam. Die Selbstinduktion des Leiters verhindert das rasche Anwachsen und Abnehmen eines 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. Je größer die Energie des Magnetfeldes bei gleicher Stromstärke ist, desto größer ist die Selbstinduktion des Leiters und desto länger dauert es, bis es seinen vollen Wert erreicht oder ganz zerfällt.

4. Der Selbstinduktionskoeffizient. 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 der Strom I in dem Leiter in der Zeit Δt , so ist die Größe der durch Selbstinduktion hervorgerufenen Gegenspannung U von dem Selbstinduktionskoeffizienten L ab-

hängig, 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 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 Spule, die w -Windungen vom Querschnitt q auf der Länge l und einen Kern mit der Permeabilität $\mu = \mu^* \cdot \mu_0$ enthält, ist der Selbstinduktionskoeffizient

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

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

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 der Strom in $\frac{1}{10}$ s um 3 A ändert?

D. Starkstromtechnik und elektrische Energiewirtschaft

§ 21. Dynamomaschine und Motor für Gleichstrom

Die Gleichstromdynamomaschine besteht aus dem Feldmagnet NS (Abb. 108), 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 Schaltungsvorrichtung K hinzu, durch welche die Enden der Wicklungen mit der äußeren Leitung verbunden sind.



Abb. 108.
Schnitt durch die Dynamomaschine
von W. von Siemens

Der in Abb. 108 gezeichnete Schnitt gibt ein Bild der ersten von Werner von Siemens 1857 erfundenen Dynamomaschine. Sie war mit einem Doppel- τ -Anker ausgestattet, der so nach dem Querschnitt des Eisenkerns des Ankers genannt wurde.

1. Die im Anker induzierte Spannung. Wie wir in § 19 gesehen haben, entsteht in einer Wicklung 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 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 entgegen-

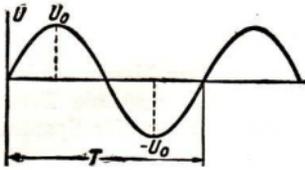


Abb. 109. Spannungskurve eines Dynamos

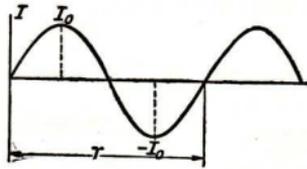


Abb. 110. Stromkurve eines Dynamos

gesetzte gerichtete Spannung auf, die ihren größten Wert bei 270° besitzt. Sie ist dann $-U_0$. Diese Spannung nimmt beim 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. 109 und 110). Die Zeit von O bis T entspricht der Umlaufzeit des Ankers.

Im Anker entsteht also eine Wechselspannung, in ihm fließt ein Wechselstrom.

2. Der Umschalter (Kollektor). Man kann mit dem in Abb. 108 enthaltenen Umschalter die Stromstöße so richten, daß sie in der äußeren Leitung in gleicher Richtung fließen und erhält damit „Gleichstromstöße“ in ihr. Dieser Umschalter besteht aus zwei Halbzylindern A_1 und A_2 , die fest auf der Achse des Ankers angebracht und mit den Enden der Wicklung verbunden

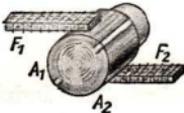


Abb. 111. Umschalter

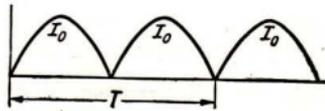


Abb. 112. Gleichgerichteter Wechselstrom

sind (Abb. 111). Sie sind gegeneinander isoliert. Auf ihnen schleifen am Dynamogehäuse befestigte Federn F_1 und F_2 (Bürsten), die mit der 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. 112 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.

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

$$U = -\mu \cdot \xi \cdot \omega \cdot w \cdot q \cdot \sin \omega t,$$

also für den Betrag von U_0

$$U_0 = \mu \cdot \xi \cdot \omega \cdot w \cdot q.$$

Kennt man nun die Umlaufgeschwindigkeit ω einer Maschine, die Windungszahl w , den Querschnitt q der Wicklungen und die Feldliniendichte ξ , so kann man daraus die größte Spannung U_0 berechnen.



Abb. 113.
Anker mit 2 Wicklungen

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 getrennte Wicklungen mit Umschalter auf dem Anker an (2 Spulen in Abb. 113), 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. 114). Es wird dabei aber nur die Spannung einer einzigen Wicklung ausgenutzt. Verbindet man die Spulen miteinander,



Abb. 114.
Spannungsverlauf bei vier Ankerspulen

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 schon 1873 gelöst worden, indem die Wicklungen in geeigneter Weise

auf dem Anker angeordnet wurden. Man nennt Anker, die solche Wicklungen tragen, Trommelanker (Abb. 115 vorn).

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 war, daß er statt der Dauermagnete Elektromagnete einführte und die Entdeckung machte, 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 größer usw. Induktionsstrom und Magnetfeld regen sich gegenseitig bis zur höchsten Wirkung an (Prinzip der Selbsterregung der Dynamomaschine).

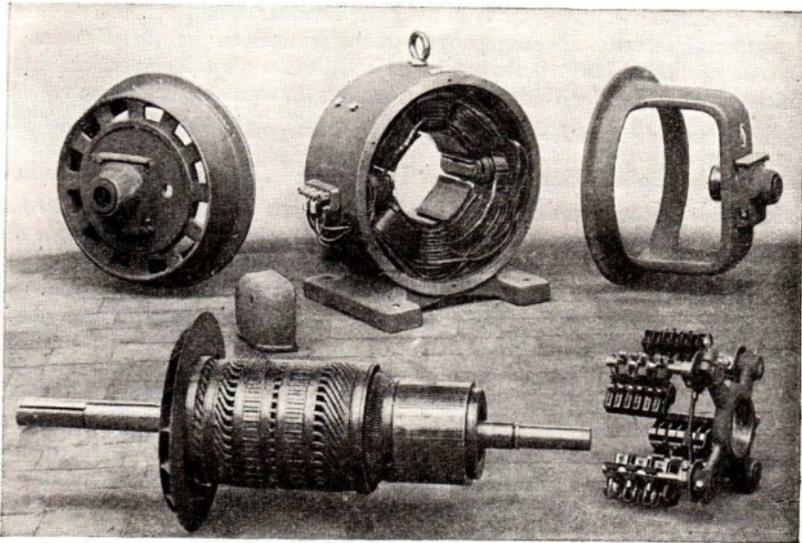


Abb. 115. Teile des Gleichstrommotors

Der vom Anker gelieferte Strom muß also unbedingt durch die Windungen der Feldmagnete fließen. Wird der gesamte Strom durch diese Windungen geleitet, so spricht man von einer Hauptschlußmaschine; wird nur ein Teil abgezweigt, so nennt man die Maschine Nebenschlußmaschine.

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. 115 zeigt die Teile eines Gleichstrommotors.

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

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

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

dabei ist I in Ampere, \mathfrak{H} in Amperewindungen je Zentimeter und l in cm gemessen.

Rotiert der Anker des Motors im Magnetfeld, so wirkt er, obwohl er von einem Strom durchflossen ist, dennoch wie der Anker einer Gleichstrom-

dynamomaschine. 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 $U \cdot I$.

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

7. Der Wirkungsgrad der Dynamomaschine. Der Wirkungsgrad der Dynamomaschine ist besser als der der Wasserkraftmaschinen. Er übertrifft den der Wärmekraftmaschinen ganz erheblich. Die Dynamomaschine muß aber durch diese oder jene angetrieben werden. Energie geht bei ihr verloren durch Reibung und durch auftretende Wirbelströme. Energieverluste treten aber auch deshalb ein, weil die Molekularströme des Eisens bei der Drehung des Ankers dauernd ihre Lage ändern. Je stärker der im Eisen zurückbleibende Magnetismus ist, desto größer ist die Arbeit, die beim Drehen der Molekularströme geleistet werden muß. Diese Arbeit wandelt sich in Wärme 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 geringem zurückbleibenden Magnetismus.

§ 22. Dynamomaschine und Motor für Wechselstrom

1. Die Einphasenstrommaschine. Jede Gleichstrommaschine wirkt als Wechselstrommaschine, wenn man den Umschalter durch einen Ringkollektor er-

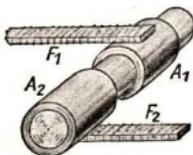


Abb. 116. Ringkollektor

setzt (Abb. 116). Er besteht aus zwei Ringen A_1 und A_2 , die auf der isolierenden Achse nebeneinandersitzen und mit den Enden der Wicklung verbunden sind. Durch die Schleiffedern F_1 und F_2 fließt dann nach außen ein Wechselstrom. Wechselstrommaschinen bestehen aus einem „Ständer“ und einem „Läufer“ (Abb. 117). Bei „Innenpolmaschinen“ ist der Ständer ein schwerer,

feststehender eiserner Kranz, 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 einen Ringkollektor wird Gleichstrom zu den Elektromagneten geleitet, der von einer auf der Achse des Läufers sitzenden besonderen Gleichstromdynamomaschine erzeugt wird. Die Schaltung zeigt Abb. 117. 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 Spulenden, zu denen der Strom gleichzeitig hinfließt, untereinander verbunden sind. Bei einer Maschine mit sechs Induktionsspulen fließt bei einer vollen Umdrehung des Läufers dreimal Strom in der einen und dreimal in der entgegengesetzten Richtung.

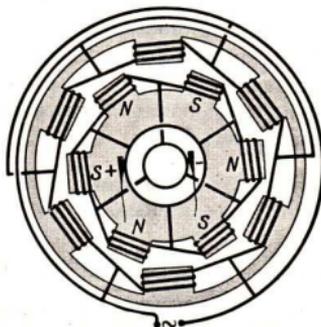


Abb. 117. Schaltung einer sechs-poligen Wechselstromdynamomaschine

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 ($1 \text{ kW} = 1,36 \text{ PS}$), tatsächlich aber je nach dem Wirkungsgrad ($\sim 80\%$) 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 Schwingungsphase liefert, nennt man Zweiphasenstrommaschine und zum Unterschied von ihr die zuerst beschriebene Einphasenstrommaschine.

3. Wechselstrommotor. Es gibt Wechselstrommotore, die wie eine Wechselstromdynamomaschine 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 Motore nennt man „Synchronmotore“. Sie laufen sehr gleichmäßig, bleiben aber stehen, wenn sie überlastet werden.

Wechselstrommotore, die von selbst anlaufen, sind ähnlich wie eine Gleichstromdynamomaschine gebaut, durch deren Anker und Wicklung derselbe Wechselstrom fließt. 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.

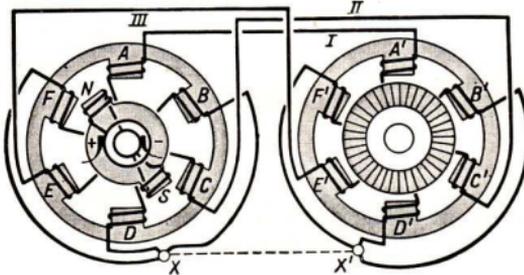


Abb. 118. Drehstromdynamomaschine und -motor

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 ($\frac{2\pi}{6}$) Phasenverschiebung 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 durchflossen,

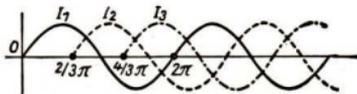


Abb. 119. Die Ströme eines Drehstromdynamomas

die in ihren Phasen um $2 \cdot \frac{2\pi}{6} = \frac{2\pi}{3}$ voneinander verschieden sind. Beträgt die Phase für I Null, so ist sie für II $\frac{2\pi}{3}$ und für III $\frac{4\pi}{3}$ (Abb. 119).

Die besondere Eigenart des Dreiphasenstromes besteht darin, daß die Summe der Stromstärken der drei Wechselströme in jedem Augenblick Null ist. In Abb. 119 sind die Kurven der drei Ströme mit $\frac{2\pi}{3}$ und $\frac{4\pi}{3}$ Phasenverschiebung 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.

Dreiphasenstrom kann mit drei Einfachleitungen übertragen werden.

b) Der Drehstrommotor. In Abb. 118 rechts ist ein Drehstrommotor als Stromverbraucher gezeichnet. Sein Ständer stimmt mit dem Ständer der Dynamomaschine überein. Als Anker hat er einen Kurzschlußanker. Dreht sich der Nordpol des Läufers in dem Dynamo nacheinander an den Spulen A, B, C, D, E, F vorbei, so wird beim Nähern 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 dreht sich dann genau wie in der Dynamomaschine 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. Drehstrommotore 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 gering, daß sie nicht am Flackern des Lichtes zu erkennen sind. Stellt man aber eine mit Wechselstrom betriebene Kohlefadenlampe in ein magnetisches Feld, so schwingt der Faden im Takte der Stromwechsel heftig hin und her. 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, 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 mehrere Blattfedern, deren Schwingungszahlen den Bereich der doppelten Wechselstromschwingungszahl, z. B. von 90 bis 110, überdecken (Abb. 120).

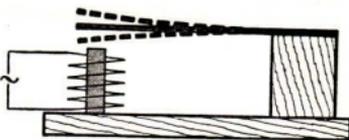


Abb. 120. Frequenzmesser

2. Spannung und Stromstärke im Wechselstromkreis. Von den Klemmen der Wechselstromleitung A und B , 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 (Abb. 121):

- a) drei parallel geschaltete gleiche Glühlampen;
 b) drei parallel geschaltete Spulen verschiedener Selbstinduktion L und bekannten Widerstandes für Gleichstrom (Abb. 122);

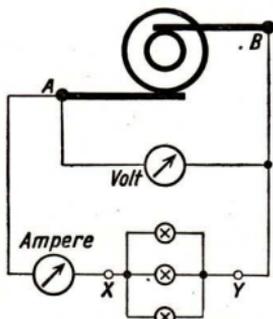


Abb. 121.

Wechselstromkreis mit verschiedenen Widerständen

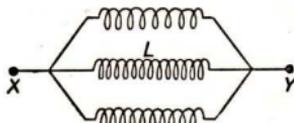


Abb. 122.

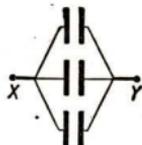


Abb. 123.

- c) drei parallel geschaltete Kondensatoren von etwa vier Mikrofarad (Abb. 123).

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.

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 einen Wechselstromkreis mit einem Ohmschen Widerstand R , einer Spule mit der Selbstinduktion L und einem Kondensator mit der Kapazität C , so gilt für das Verhältnis der Spannungsamplitude U zur Stromamplitude I

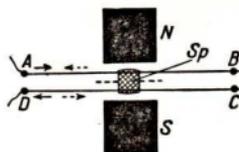


Abb. 124. Schleifenzillograph

$$\frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (\omega \text{ ist die Kreisfrequenz}).$$

3. Spannungsphase und Stromphase des Wechselstromes. Zum Nachweis des zeitlichen Verlaufs eines Wechselstromes kann man einen „Schleifenzillographen“¹⁾ benutzen. Er besteht aus einer Drahtschleife $ABCD$ (Abb. 124), 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

1) oscillatio = das Schaukeln.

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 Schwingungen hin und her. Läßt man (Abb. 125) einen Lichtstrahl auf den

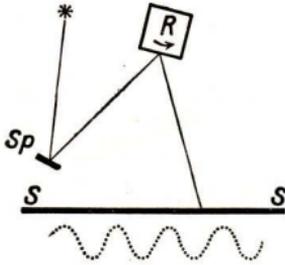


Abb. 125. Nachweis der Sinusform der Wechselstromschwingung

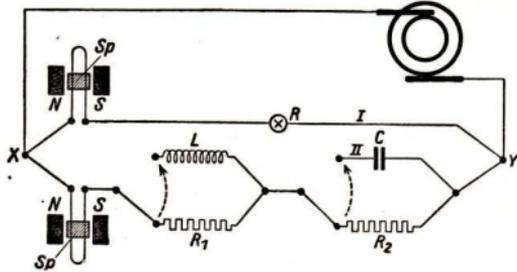


Abb. 126. Nachweis der Phasenverschiebung von Wechselströmen

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. 126). 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. 127 dargestellte Lage besitzen. Die Ströme in I und II fließen phasengleich. Schalten wir dann statt R_1 die Spule L ein, so zeigt sich das in Abb. 128 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 besteht die in Abb. 129 wiedergegebene Lage. Der Strom I_2 eilt dem Strom I_1

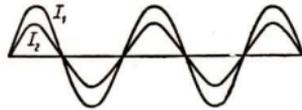


Abb. 127. Phasengleiche Ströme verschiedener Amplitude

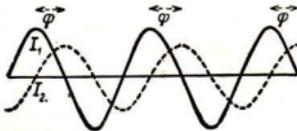


Abb. 128. Phasenverschiebung bei Selbstinduktion

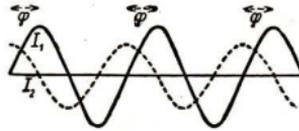


Abb. 129. Phasenverschiebung bei Kapazität

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 Schwingungsphase 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 vauseilt.

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

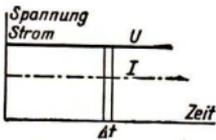


Abb. 130. Zur Berechnung der Arbeit eines Gleichstroms

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

zur Umwandlung in andere Energie frei (Abb. 130).

Fließt durch den Leiter ein Wechselstrom, dessen Spannungs- und Stromphase übereinstimmen (Abb. 131), 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 Energie $\Delta A = U_1 \cdot I_1 \cdot \Delta t$ frei. Sie ist zu Beginn der Schwingung sehr klein, wächst rasch an, weil sowohl U als auch I zunehmen, und sinkt dann wieder ab. Aus der Summe aller Produkte $U_1 \cdot I_1 \cdot \Delta t$ kann man die während eines Stromstoßes frei werdende

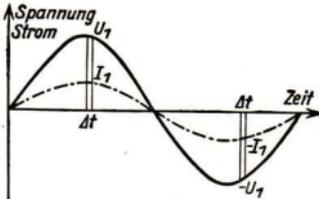


Abb. 131. Zur Berechnung der Arbeit eines phasengleichen Wechselstroms

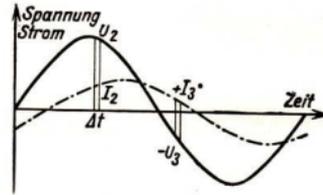


Abb. 132. Zur Berechnung der Arbeitsleistung eines phasenverschobenen Wechselstroms

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. 132). Auch jetzt ist $\Delta A = U_2 \cdot I_2 \cdot \Delta t$ 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 des elektrischen Feldzerfalls (Abb. 133) denken. Zerfällt das Feld eines Kondensators, 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

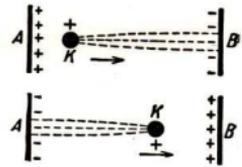


Abb. 133. Geladener Körper im Wechselfeld

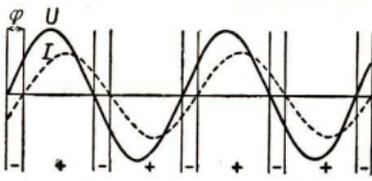


Abb. 134. Positive Leistung eines Wechselstroms geringer Phasenverschiebung

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, nicht die Energie verbraucht, welche die Wechselstrommaschine liefert, sondern an die Maschine Energie zurückgegeben.

In Abb. 134 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 φ die Leistung des Wechselstroms kleiner als bei $\varphi = 0$ ist. Berechnet man die

Leistung A aus den Formeln, so ergibt sich, wenn U' die Durchschnittsspannung und I' die Durchschnittsstromstärke bedeuten:

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

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.

φ ist die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom. $\cos \varphi$ heißt der Leistungsfaktor. Beträgt $\varphi = 90^\circ$, so ist die Leistung des Wechselstromes Null, d. h. es fließt zwar Strom, es findet aber keine Leistung statt. Abb. 135 deutet dies an. Da immer Stromwärme entsteht, kann φ nicht genau 90° werden.

Für den Phasenunterschied φ zwischen Strom und Spannung gilt

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

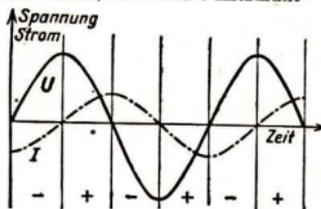


Abb. 135.
Strom mit 90° Phasenverschiebung
leistet keine Arbeit

§ 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 einfachen Beispiel. Das Elektrizitätswerk liefert Gleichstrom von U Volt. 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

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

Sie wird in diesem Falle sowohl in der Zuleitung als auch an der Verbrauchsstelle in Wärme umgewandelt. Sie besteht aus den beiden Anteilen

$$A_1 = I^2 \cdot R_1 \text{ in dem Bügeleisen,}$$

$$A_2 = I^2 \cdot R_2 \text{ in der Zuleitung.}$$

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

Besitzt das Bügeleisen den Widerstand 50Ω und die Zuleitung den Widerstand 5Ω , so ist bei 110 V Spannung der fließende Strom 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 auf zweierlei Weise geschehen. 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 der Dynamomaschine 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 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 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 hohe Spannungen benutzen.

Die Übertragung elektrischer Energie erfolgt 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 Maschinen, in denen er umgewandelt wird, heißen **Transformatoren**.

2. Der Transformator¹⁾. Der Transformator besteht aus einem aus Dynamo-blechen zusammengesetzten Eisenrahmen, auf dem zwei Spulen I und II mit den Windungszahlen w_1 und w_2 sitzen (Abb. 136). Durch jede der beiden Spulen geht dieselbe Zahl magnetischer Feldlinien. Ändert sich die Zahl der Feldlinien um dN in der Zeit dt , so sind die in den beiden Spulen erzeugten Spannungen ihrer Größe nach

$$U_1 = w_1 \frac{dN}{dt} \quad \text{und} \quad U_2 = w_2 \frac{dN}{dt}.$$

Es verhält sich also $U_1 : U_2 = w_1 : w_2$.

1) transformare (lat.) = umformen.

Herrscht in der ersten Spule die Wechselfspannung U_1 , so entsteht in der zweiten Spule ein Wechselstrom gleicher Periode, dessen Spannung U_2 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.

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 also gering. Ist der Stromkreis der Spule II (Abb. 136) 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 (Transformator mit Eisenkern) einen viel größeren Widerstand für Wechselstrom als für Gleichstrom besitzt. Die Phase ist um nahezu 90° verschoben, weil das Magnetfeld des Transformators, das beim Anwachsen der Spannung entsteht, bei der Abnahme der Spannung zerfällt und sich in elektrische Energie verwandelt, die in das Leitungsnetz zurückfließt. Die Leistung ist (abgesehen von der Wärme) gleich Null (§ 23).

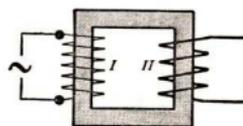


Abb. 136.
Unbelasteter Transformator

Ist der Stromkreis der Spule II geschlossen (Abb. 137), 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.

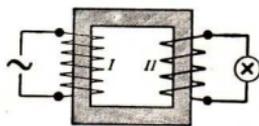


Abb. 137.
Belasteter Transformator

Nennt man die in den Transformatorblechen in der Sekunde erzeugte Wärme W und mißt sie in Watt, so muß stets nach dem Satz von der Erhaltung der Energie gelten:

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

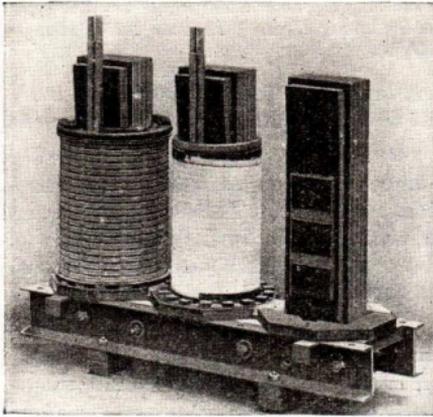


Abb. 138. Dreiphasenstromtransformator

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

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} \quad \text{oder} \quad U_1 = \frac{w_1}{w_2} U_2$$

$$\frac{I_1}{I_2} \sim \frac{w_2}{w_1}$$

Ein Transformator, der die Spannung heraufsetzt, setzt die Stromstärke herab.

Abb. 138 stellt einen Drehstromtransformator dar, bei dem

rechts der Eisenkern, in der Mitte der Eisenkern mit Spule I und links der Eisenkern mit Spule II zu sehen sind.

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 einer Gleichstromdynamomaschine gekoppelt ist. Man kann sogar den Gleichstrom aus einer Wicklung entnehmen, die auf dem Anker des Motors angebracht ist (Einankerumformer). Man kann aber auch die Wechselstromphasen 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. (Weiteres darüber s. § 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 Drehstromdynamomaschinen, deren Spannung einige tausend Volt und deren Leistung 10–20 000 kW betragen. Dieser Wechselstrom wird in Transformatoren in Wechselstrom von 100 000–200 000 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. 139) geführt, wo der hochgespannte Strom auf eine geringere Spannung abgespannt

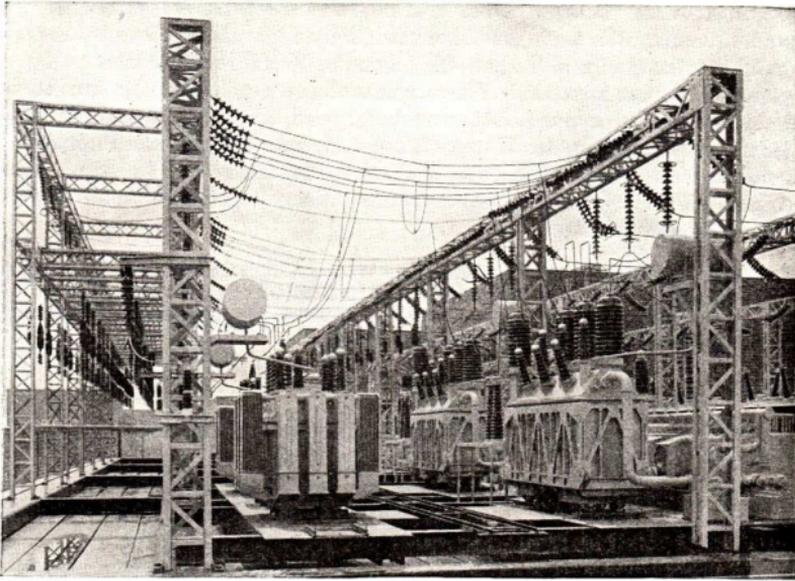


Abb. 139. Umspannwerk

(transformiert) wird. Vom Umspannwerk führen Freileitungen oder Kabel zu den Transformatoren, welche 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 Dynamomaschinen 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. 140 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.

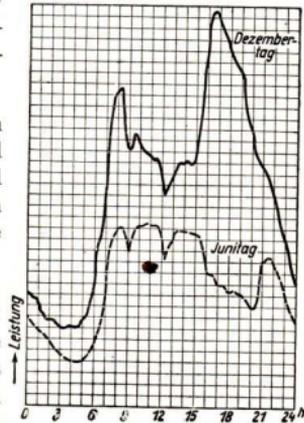


Abb. 140. Belastungskurve eines Elektrizitätswerkes

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 Zersetzungsprodukte werden an den Elektroden ausgeschieden. Man nennt derartige Leiter Elektrolyte. Versuche ergeben:

An der Kathode¹⁾ (–Pol) wird stets das Metall oder der Wasserstoff ausgeschieden, an der Anode²⁾ (+Pol) tritt der Molekülrest auf.

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

Das Gewicht G des an den Elektroden ausgeschiedenen Stoffes ist proportional der Stromstärke I und der Stromdauer t .

$$G = \bar{A} \cdot I \cdot t.$$

Der Proportionalitätsfaktor \bar{A} dieses Gesetzes entspricht dem in mg gemessenen Gewicht des Stoffes, der von 1 A in 1 s ausgeschieden wird.

\bar{A} wird das elektrochemische Äquivalent genannt.

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

1) káthodos (griech.) = das Hinabgehen.

2) ánodos (griech.) = Eingang.

Stoff	Elektrochemisches Äquivalent \bar{A} mg/s	Atomgewicht A	Wertigkeit n	$\frac{A}{n}$	$\bar{A} : \frac{A}{n}$
Silber	1,118	108	1	108	0,010 35
Kupfer	0,328	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:

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

2. Das elektrische Grammäquivalent. 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. Fließt der Strom I während der Zeit t , so ist 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 $n \cdot 96 500$ Coulomb durch den Elektrolyten.

3. Die Ionenleitung. Wird ein Salz, eine Säure oder eine Base in Wasser aufgelöst, so spalten sich einige Moleküle des gelösten Stoffes, z. B. CuSO_4 , ZnSO_4 , H_2SO_4 , NaOH in negativ und positiv geladene Teile, die Ionen genannt werden. Sie sind leicht beweglich in der Flüssigkeit und durch Wassermoleküle getrennt (Abb. 141). Zwischen ihnen bestehen elektrische Felder (Abb. 142). Wird eine Spannung etwa mittels eines geladenen Plattenkondensators 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 ihre Ladungen ab.

Die Entladung durch den Elektrolyten ist also mit einer zeitlichen elektrischen Strömung verbunden. Dadurch entlädt sich der Kondensator.

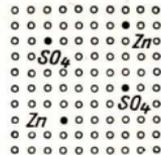


Abb. 141. Dissoziation

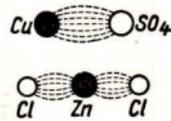


Abb. 142. Feldlinien zwischen Ionen

Nimmt man an, daß gleiche Ionen die gleiche Ladung haben, die sie an die Elektroden abgeben, 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.

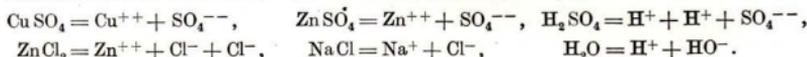
4. Das elektrische Elementarquantum. Wenn mit der Ladung 96 500 Coulomb gleichzeitig 1 g Wasserstoff ausgeschieden wird, so sind dabei $6 \cdot 10^{23}$ Wasserstoffionen beteiligt, denn soviel Atome besitzt 1 g Wasserstoff. Trägt jedes Ion dieselbe Ladung e , so ist die Ladung eines Wasserstoffions

$$e = \frac{96\,500}{6,0 \cdot 10^{23}} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb.}$$

Andere einwertige Ionen (z. B. Silber) besitzen dieselbe Ladung, zweiwertige Ionen (z. B. Kupfer) besitzen die doppelte, dreiwertige Ionen die dreifache Ladung. Das erklärt die Faradayschen Gesetze. Die Ladung $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$ Coulomb heißt das **elektrische Elementarquantum**.

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 Elementarquanten sie tragen:



5. Die Beweglichkeit der elektrolytischen Ionen. 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° 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.

§ 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 geladene Zinkionen in die

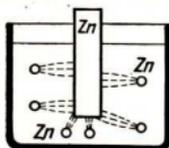


Abb. 143. Lösung von Zink in verdünnter Schwefelsäure

Flüssigkeit übertreten (Abb. 143). Zwischen dem durch die Ionenabgabe aufgeladenen Zinkstab und der Flüssigkeit, die die Zinkionen aufgenommen hat, 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.

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 nach kurzem Gebrauch. Eine äußerst konstante Spannung hat das sog. Weston-Element (Spannung 1,018 30 V bei 20°). Die Spannung dieses sog. Normal-elementes ist bis auf 1 Zehntausendstel reproduzierbar.

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 1,35 V.

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. 144 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 zerfällt 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.

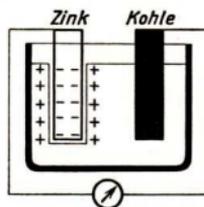


Abb. 144.
Galvanisches Element

3. Die elektrische Polarisation. Bei der elektrolytischen Stromleitung ändern sich durch die Abscheidung der aus den Ionen entstehenden Moleküle an den Elektroden deren Oberfläche 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 geändert wird. Jetzt verhalten sich die Elektroden wie zwei verschiedene Stoffe, etwa wie Zink und Kohle. Nach Abschalten des Stromes kann man umgekehrt aus diesem so entstandenen 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 bei Elementen mit verschiedenen Elektroden auf.

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 Bleidioxid. Die Elektroden werden auf diese Weise so stark verändert, daß sie wie zwei verschiedene Metalle wirken und ein Element bilden, das Strom liefern kann. Die technisch hergestellten Bleiakumulatoren (Abb. 145) bestehen aus einer reinen und einer mit Bleidioxid 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

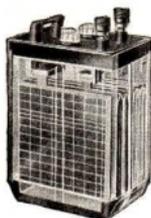


Abb. 145.
Bleiakkumulator

neuem Strom durch ihn hindurchschickt, der dem entnommenen Strom entgegengesetzt gerichtet ist. Gute Bleiakumulatoren geben 80% der elektrischen Energie, die in sie hineingeschickt ist, wieder her. Sie müssen sorgfältig behandelt werden, dürfen nicht angestoßen oder kurzgeschlossen werden.

Weniger empfindlich als Bleiakumulatoren sind Eisen-Kadmium-Akkumulatoren. Ihr Wirkungsgrad ist aber nur etwa 40 bis 50%. Alle galvanischen Elemente und Akkulatoren liefern Gleichstrom, letztere müssen auch mit Gleichstrom geladen werden.

B. Elektrische Leitungsvorgänge in Gasen und im Vakuum

§ 23. Die Kathodenstrahlen

1. Die Eigenschaften der Kathodenstrahlen. Bei hoher Spannung fließt durch eine Röhre, in der die Luft auf weniger als $\frac{1}{100}$ Torr verdünnt ist, ein elektrischer Strom (Abb. 146). Dabei treten aus der Kathode Strahlen aus, die **Kathodenstrahlen** genannt werden. Versuche zeigen:

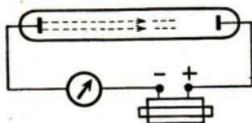


Abb. 146.
Erzeugung von Kathodenstrahlen

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 quer zur Richtung der Feldlinien abgelenkt. —

In einem elektrischen Feld werden sie von der positiven Grenzfläche des Feldes angezogen – Sie dringen in Luft von normalem Luftdruck etwa 2–3 cm tief ein.

Hat die Kathode eine bestimmte Form (z. B. Kreisring, Abb. 147), so wird diese auf der Glaswand durch die austretenden Kathodenstrahlen 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. 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 nicht weiter dem Zug der Feldlinien nach der Anode A . Aus Versuchen und Überlegungen dieser Art ergibt sich:

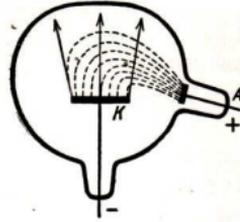


Abb. 147.
Weg der Kathodenstrahlen

Die Kathodenstrahlen bestehen aus Masseteilchen, die negativ geladen sind und sich mit großer Geschwindigkeit von der Kathode fortbewegen. Diese negativ geladenen Masseteilchen heißen „Elektronen“.

2. Das Verhältnis der Ladung zur Masse des Elektrons. Eine Vorstellung von der Größe der Elektronen gibt der im folgenden angedeutete Versuch der Bestimmung des Verhältnisses der Ladung e zur Masse m der Elektronen. Er beruht auf folgenden Grundgedanken:

In der in Abb. 148 dargestellten Kathodenstrahlröhre kann man ein schmales Kathodenstrahlbündel erzeugen, indem man die von der Kathode K ausgehenden Elektronen durch eine Blende B treten läßt. Bei S trifft das Bündel auf einen Leuchtschirm. Hinter der Blende befindet sich ein homogenes Magnetfeld, durch das die Elektronen seitlich abgelenkt werden.

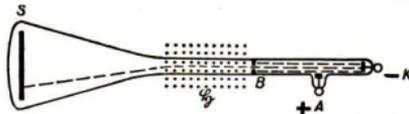


Abb. 148. Ablenkung der Kathodenstrahlen durch ein Magnetfeld

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

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

wobei $k_{m,e} = 0,1$ kgm/Joule das einzusetzende Energieäquivalent ist.

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) Besitzt das Elektron die Geschwindigkeit v , so wirkt es bei seiner Bewegung wie ein Strom

$$I = \frac{ev}{l}$$

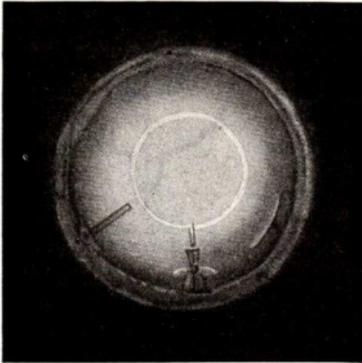


Abb. 149. Elektronenring im Magnetfeld

wird ein Strom stets quer zu seiner Richtung abgelenkt. Da die Kraft P , die ihn ablenkt, unveränderlich ist (sie beträgt $P = \mu \cdot \mathfrak{H} \cdot l \cdot I \cdot 10,2$ oder $P = \mu \cdot \mathfrak{H} \cdot e \cdot v \cdot 10,2$), so beschreibt das Elektron im Magnetfeld eine Kreisbahn. Aus der Ablenkung kann man den Radius der Kreisbahn bestimmen. Man kann auch in einer geeigneten Röhre die Elektronen so ablenken, daß sie einen vollständigen Kreis bilden (Abb. 149).

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

Mißt man daher 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

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

Alle Elektronen der Kathodenstrahlen haben dieselbe Masse und dieselbe Ladung.

3. Die Geschwindigkeit und die Masse der Elektronen. Die nachstehende Tabelle gibt die Werte der Geschwindigkeit an, die man aus der Formel für v erhält, wenn man den Wert $\frac{e}{m}$ einsetzt.

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 $1,60 \cdot 10^{-19}$ C beträgt. Die Untersuchung hat gezeigt, daß 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.

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

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

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

Das Gewicht eines Elektrons ist $9,1 \cdot 10^{-28}$ g.

1 g Wasserstoff enthält $6 \cdot 10^{23}$ Atome (§ 26). 1 Atom Wasserstoff wiegt also $1 : 6 \cdot 10^{23}$ g = $1,7 \cdot 10^{-24}$ g.

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

Das Gewicht eines Elektrons ist 1840 mal so klein wie das Gewicht 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. 150 stellt eine Röntgenröhre alter Bauart dar. In der stark ausgepumpten Röhre fallen von einer hohlspiegelförmigen Kathode die Kathodenstrahlen auf die sog. Antikathode, die aus Platin oder Wolfram besteht. Von der Stelle, an der die schnellen Elektronen aufgehalten werden, gehen Strahlen 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 und durchdringen undurchsichtige Körper von ganz erheblicher Dicke. Im einzelnen ist von ihren Eigenschaften noch später die Rede (§ 62). Praktisch sind sie so wichtig geworden, weil sie dem Arzt zur Durchleuchtung des menschlichen Körpers und der Technik zur Untersuchung der Werkstoffe dienen.

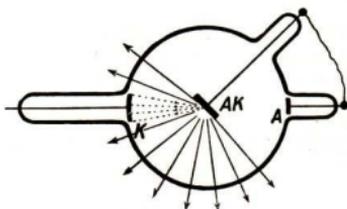


Abb 150. Röntgenröhre alter Bauart

§ 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 dienen, hatten erst Erfolg, nachdem man Röhren mit durchlöcherter Kathode baute und im Raum hinter der Kathode nach Strahlen suchte. Goldstein stellte 1886 fest, daß durch die Kanäle der Kathode Strahlen

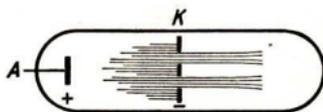


Abb. 151. Kanalstrahlen

kommen, die sich geradlinig ausbreiten (Abb. 151). Er nannte sie „Kanalstrahlen“ und nicht Anodenstrahlen, weil sich herausstellte, daß sie nicht von der Anode ausgingen, sondern aus dem Raum zwischen Anode und Kathode stammten.

Die Kanalstrahlen selbst sind unsichtbar. — Sie 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. Massenspektograph. 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 Bl (Abb. 152) 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 Pl 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. 153 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

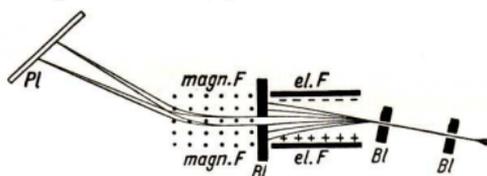


Abb. 152. Kanalstrahlenverlauf im Massenspektograph



Abb. 153. Massenspektrum des Kryptons

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

Man hat die Versuchseinrichtung Massenspektograph 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 Elemente wie Wasserstoff oder Sauerstoff bestehen aus Atomen verschiedener Masse. Es gibt Wasserstoff mit Atomen vom Atomgewicht 2 (schwerer Wasserstoff, schweres Wasser!). Sauerstoff enthält neben Atomen vom Atomgewicht 16 solche vom Atomgewicht 17 und 18. Man nennt die Atome verschiedener Masse, aber mit gleichen chemischen Eigenschaften, *Isotope*. Fast alle chemischen Elemente haben sich als Mischungen aus Isotopen erwiesen.

§ 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. 154). 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.

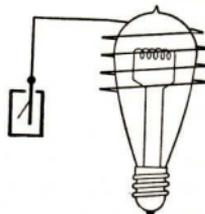
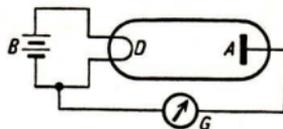


Abb. 154. Edisons Versuch

Der Ausschlag nimmt ab. Bei negativer Ladung tritt eine abstoßende Wirkung ein. Der Ausschlag kann daher nicht abnehmen.

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. 155). 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 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* Elektronen austreten, die nach *A* wandern. Weitere Versuche bestätigen:

Abb. 155.
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 Glühkathode, 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. 156). Berührt man die Gitterzuführung mit der Hand, so wird der Strom stärker.

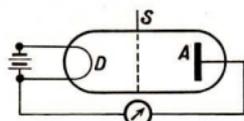


Abb. 156. Dreielektrodenröhre

Schaltet man zwischen D und S einen Akkumulator (Abb. 157) ein, so daß zwischen S und D 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 etwa 1000 km/s Geschwindigkeit erlangen, dann versteht man, daß die meisten Elektronen durch die Maschen des Gitters hindurch nach A fliegen. D ist die Kathode (Glühkathode), A die Anode des in der Röhre fließenden Stromes.

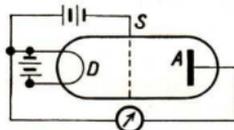


Abb. 157. Dreielektrodenröhre mit angelegter Gitterspannung

Der zwischen Glühkathode und Anode fließende Strom heißt **Anodenstrom**.

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

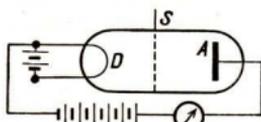


Abb. 158.
Nachweis des Anodenstromes

Negative Gitterspannung hemmt, positive fördert den Anodenstrom.

Schaltet man zwischen die Anode A und die Glühkathode D eine Batterie von 100 V ein (Abb. 158), so fließt ein stärkerer Strom durch das Ampere-meter, 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.

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 beeinflussbar.

Einfache Glühkathodenröhren mit drei Elektroden haben die in Abb. 159 wiedergegebene Form. Der Glühfaden D besteht aus einem Wolframdraht (schwer schmelzbar); das Gitter S ist als Wendeldraht um die Glühkathode gelegt; die Anode ist ein dünnes Blech, das zylind-

risch gebogen ist und S und D umgibt. Durch den Sockel der Röhre, die luftleer gepumpt ist, führen die Zuleitungen zu den Elektroden.

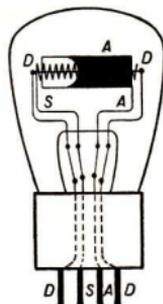


Abb. 159. Einfache Dreielektrodenröhre

3. Die Eigenschaften der Glühelktronen. Unsere Schlüsse 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 sog. **Glühelktronen**, das Verhältnis e/m bestimmt.

In Abb. 160 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 ge-

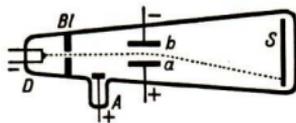


Abb. 160. Röhre zum Nachweis der elektrischen Ablenkung der Glühelktronen

heizt, 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 durch die Blendenöffnung. Auf der Wand der Röhre, oder einem angebrachten Schirm S , leuchtet dann ein Fleck auf, der einem, sich geradlinig ausbreitenden Bündel von Elektronen entspricht. 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. Messende Versuche ergeben:

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

Glühelktronen und Kathodenstrahllektronen sind also gleich. Treten die Elektronen aus dem glühenden Draht aus, so besteht zwischen ihnen und dem Draht ein elektrisches Feld (Abb. 161). Der Vorgang gleicht der Dissoziation der Moleküle in einem Elektrolyten, nur handelt es sich hier nicht um eine Spaltung der Moleküle, sondern um eine Spaltung der Atome. Das Elektron ist an Masse etwa 100 000 mal so klein wie ein Metallatom. Es kann ein Bestandteil des Metallatoms sein, 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 (Glühelktronen) oder andere Energieübertragung auf das Elektron. Die Richtigkeit dieser Auffassung hat man bestätigt.

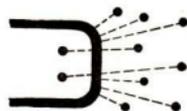


Abb. 161. Austritt der Glühelktronen

Das Elektron ist ein Bestandteil des Atoms.

Dies erklärt auch folgende Erscheinung sehr einfach:

4. Photoelektronen. Wir verbinden eine Metallplatte A mit dem Blättchen eines Elektroskops und bestrahlen sie mit Röntgenstrahlen (Abb. 162). 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

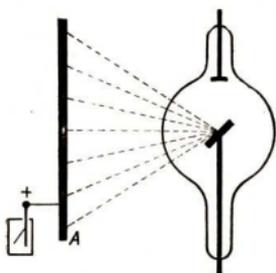


Abb. 162. Austritt der Photoelektronen

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.

Der Vorgang läßt sich in folgender Weise erklären: Durch die Röntgenstrahlen werden die Elektronen aus den Atomen, mit denen sie durch ein elektrisches Feld verbunden sind, herausgerissen. Sie treten wie aus einer heißen Elektrode aus. Das Metall muß dann positiv geladen zurückbleiben. Daß es sich auch in diesem Falle um Elektronen handelt,

hat man durch Messung von $\frac{e}{m}$ nachgewiesen.

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

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

§ 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. 163) mit dem Kopf und dem Gehäuse eines Elektroskops und laden sie dann auf, so bleibt der Ausschlag des

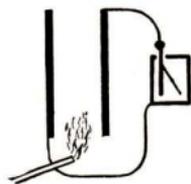


Abb. 163.

Versuche zur Leitung in Gasen

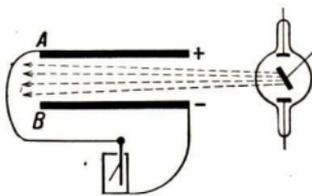


Abb. 164.

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. 164). – 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.

Gase werden elektrisch leitend, wenn sie stark erhitzt oder mit Röntgenstrahlen, Kathodenstrahlen, ultraviolettem Licht, radioaktiven Strahlen usw. bestrahlt werden. Sie werden dabei „ionisiert“, d. h. die neutralen Moleküle werden in entgegengesetzt geladene Teile gespalten.

Die Mittel, durch die man Gase ionisieren kann, nennt man „Ionisatoren“. Ihre Wirkung besteht darin, daß sie Ionen erzeugen, die sich im elektrischen Feld auf die Grenzflächen zu bewegen und so den Ladungstransport herbeiführen. Weil äußere Mittel angewandt werden und das Gas nur so lange leitend ist, wie man es bestrahlt, spricht man in diesem Falle von einer unselbständigen Leitung der Gase.

2. Gasionen. Alle Beobachtungen sprechen dafür, daß durch die Bestrahlung mit Ionisatoren im Gas positiv und negativ elektrisch geladene Moleküle entstehen, die man Gasionen nennt. Wie diese Ionisation zustande kommt, ist z. B. bei Röntgenstrahlen einfach zu verstehen. Wird Röntgenlicht von einem Molekül absorbiert, dann ist die Einwirkung so stark, daß zwar das Molekül nicht zersprengt, immerhin aber ein Elektron aus ihm herausgeworfen wird. Es tritt also eine photoelektrische Wirkung auf. Das Molekül bleibt positiv geladen zurück. Das befreite Elektron kann 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 an sie ungeladene Moleküle an, die influenziert werden und dann dadurch an dem geladenen Molekül haften. So entstehen größere Ionen, die als Kern ein Gasion besitzen, um das eine Anzahl ungeladener Moleküle gelagert ist.

Einfache Gasionen und Ionen, an die Moleküle angelagert sind, sind an ihrer Geschwindigkeit zu erkennen.

Einfache Gasionen bewegen sich wesentlich rascher.

3. Ionisation und Neutralisation der Moleküle. Bei gewöhnlicher Temperatur sind Gase 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 der Ionisator nicht neue erzeugt. Man kann die Beweglichkeit der Ionen messen und berechnen und findet: In einem Feld, dessen Feldstärke 1 V/cm beträgt, wandern die Luftionen bei Atmosphären-

druck 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 100. bis 1000. Teil der Beweglichkeit der Gasionen.

Ionen kann man sichtbar machen in übersättigtem Wasserdampf. 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. Wir schmelzen in eine Röhre von etwa 40 cm Länge zwei Elektroden ein und verdünnen die Luft in der Röhre. Bei Drucken von etwa 40 Torr bis herab zu $\frac{2}{100}$ Torr beobachtet man dann Leuchterscheinungen, wenn man eine Gleichspannung von etwa 1000 Volt oder mehr anlegt (Abb. 165). 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 ein Ionisator eine Rolle. Er leitet den Vorgang ein, auf dem die Leitfähigkeit des Gases beruht. Das Gas in der Röhre ist stark verdünnt. Die Weglänge, welche die Moleküle zwischen ihren Zusammenstößen 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, ohne selbst bei ihrer großen Geschwindigkeit eingefangen zu werden. Jedes Elektron befreit andere, diese ihrerseits wieder andere, ihre Zahl wächst lawinenhaft an. Das Gas wird in der Röhre ionisiert. Die in der Röhre herrschende hohe Feldstärke beschleunigt die 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 Licht zu erzeugen, das z. B. in den Reklameröhren zu Leuchtzwecken benutzt

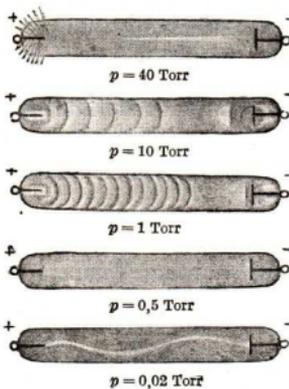


Abb. 165. Leuchten in Röhren bei verschiedenen Gasdrucken

wird. In den dunklen Räumen (z. B. vor der Kathode p) werden die Elektronen und Ionen beschleunigt.

Auch das Leuchten des elektrischen Funkens erklärt sich auf diese Weise, endlich auch das Entstehen des Lichtbogens zwischen zwei Kohlestäben

(Abb. 166). Sind die Spitzen der Kohlestäbe durch die Stromwärme glühend geworden, so treten zahlreiche Elektronen 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 .

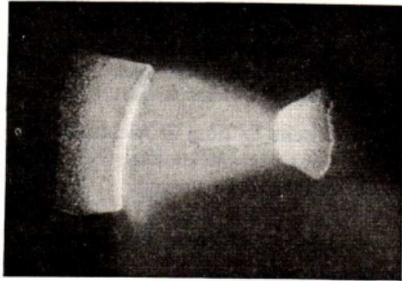


Abb. 166. Elektrischer Lichtbogen

C. Elektrische Leitung in festen Körpern

§ 32. Die Leitfähigkeit fester Körper

1. Die elektrische Leitung in Metallen. Schwierige Experimente und die durch Versuche bestätigte Theorie der Elektrizitätsleitung in Metallen haben gezeigt, daß der in einem Leiter fließende elektrische Strom aus strömenden Elektronen besteht.

Die elektrische Strömung in Metallen beruht auf der Wanderung von Elektronen durch das Gefüge des Metalles.

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

Die Zahl der Elektronen, die in einem metallenen Leiter nur ganz lose an die Atome gebunden sind, ist außerordentlich groß. Rechnet man auf jedes Atom nur ein lose gebundenes Elektron so enthält 1 g Kupfer etwa 10^{22} leicht verschiebbare Elektronen. Ein Kupferdraht von 1 mm^2 Querschnitt und 1 m Länge besitzt das Volum 1 cm^3 und das Gewicht 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 $1,60 \cdot 10^{-19}\text{ C}$ besitzt, ergibt sich bei 1 mm/s Geschwindigkeit die Stromstärke $9 \cdot 10^{19} \cdot 1,60 \cdot 10^{-19}\text{ C/s}$ oder rund 14 A. Diese Stromstärke wird erreicht, wenn die Spannung an den Enden des 1 m langen Leiters 0,25 V beträgt. Diese sehr geringe Geschwindigkeit der Elektronen genügt also, um starke Ströme zu erzeugen. Die Überschlagsrechnung zeigt uns:

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

2. Die Leitfähigkeit metallener Leiter. Das Leitvermögen der Metalle wird meist durch Angabe ihres elektrischen Widerstandes ausgedrückt (vgl. § 2). Der Widerstand metallener Leiter ist abhängig von ihrer Temperatur. Er nimmt mit steigender Temperatur zu, für 1° um etwa 0,4–0,6 %.

Man benutzt diese Eigenschaft des elektrischen Widerstandes zur Temperaturmessung. Die sog. **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 Wider-

stand. Die diesem Widerstand zugeordnete Temperatur entnimmt man der vorher gemessenen Eichkurve des Widerstandsthermometers. In der Nähe des absoluten Nullpunktes der Temperatur wird der Widerstand der Metalle sehr klein. Bei einigen 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 sog. Isolatoren, nur ist ihre Leitfähigkeit sehr gering.

Den Grad der Leitfähigkeit schlechter Leiter kann man auf folgende Weise messen. Man bildet aus einem Kondensator *C* von etwa 4 Mikrofarad, einer Glühlampe *G* (Abb. 167) und einem Telephon *T* einen Stromkreis. Zu den Punkten *A* und *D* leitet man eine Gleichspannung, und zwar den geerdeten Pol zu *D*, den nicht geerdeten Pol zu *A*.

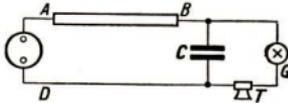


Abb. 167. Widerstandsmessung bei schlechten Leitern

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 Glühmentladungen kann man auf die Größe des Widerstandes des Leiters zwischen *A* und *B* schließen. — Leitet er so gut, daß die Zahl der Glühmentladungen 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. Man benutzt die sog. Selenzellen, um Lichtströme zu messen.

§ 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.

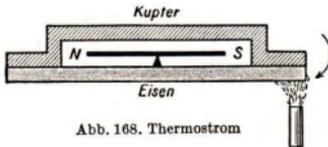


Abb. 168. Thermostrom

Man erhält einen starken Strom, wenn man zwei dicke Metallstäbe (Abb. 168) aus Kupfer und Eisen oder Kupfer und Konstantan¹⁾ 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 Magnethöhle ab.

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

Die erwärmte Lötstelle wirkt wie ein Element. Man spricht deshalb von einem *Thermoelement*. Die elektrische Spannung des Thermoelements hängt ab

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

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 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

Obwohl die Spannung sehr gering ist, fließen in Thermoelementen aus dicken Metallstäben bei 200° bis 300°C Temperaturunterschied sehr starke Ströme, die bei ein bis zwei Windungen kräftige Magnetfelder erzeugen (Abb. 169). 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. 170), dann kann man

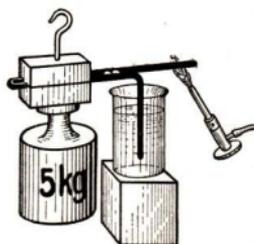


Abb. 169. Thermoelement als Stromquelle für einen Elektromagneten

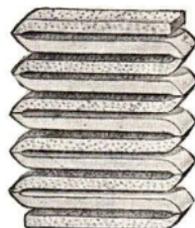


Abb. 170. Thermobatterie

z. B. die ungeraden gemeinsam erwärmen und die geraden gemeinsam abkühlen. Man erhält dann eine Thermobatterie, deren Spannung entsprechend der Zahl der darin enthaltenen Einzelemente vergrößert ist. Thermoelemente dienen zur Messung geringer Wärmemengen (z. B. der Wärmewirkung im Spektrum), zur Bestimmung sehr geringer Temperaturunterschiede und zur Messung hoher Temperaturen.

2. Mikrophon¹⁾ und Detektor²⁾. 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*. Werden sie aneinandergedrückt, dann werden die Brücken zahlreicher — und umgekehrt. Daher wechselt der Widerstand und damit die Stromstärke im Kohlemikrophon mit den Druckschwankungen, welche die Schallwellen beim Auftreffen auf die Membran hervorrufen (Abb. 171).



Abb. 171. Kohlemikrophon

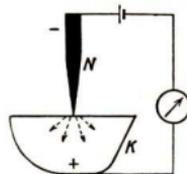


Abb. 172. Kristalldetektor, schematisch

Der Kristalldetektor (Abb. 172) 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 Wechselströme praktisch nur in einer Richtung hindurchläßt.

1) mikros (griech.) = klein, phóné (griech.) = Ton.

2) detector (lat.) = Aufdecker.

Zur Übung: Aufgaben: a) Welche Stromstärke fließt in einem Thermostromkreis, der aus einem Kupferdraht von 10 cm und einem Eisendraht von 3 cm Länge gebildet wird, wenn die beiden Lötstellen eine Temperaturdifferenz von 300°C besitzen? Der Durchmesser der Drähte betrage 1 cm. Es werde angenommen, daß die Thermospannung bis 300° proportional der Temperatur wächst. — b) Welcher Strom fließt in einem Kupfer-Konstantanelement, bei einer Temperaturdifferenz von $\frac{1}{100}^{\circ}\text{C}$, wenn der Stromkreis einen Widerstand von $10\ \Omega$ besitzt?

§ 34. Telegraphie- und Fernsprechröme

1. Leitungen. Bei der Telegraphie¹⁾ über Draht sind beide Stationen durch zwei Leitungen, Hin- und Rückleitung, verbunden. Für einen der beiden

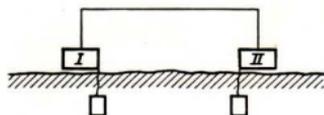


Abb. 173. Rückleitung durch Erde

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. 173).

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



Abb. 174. Stromstöße beim Telegraphieren

rasch wieder abnehmen, damit die aufeinanderfolgenden Zeichen sich scharf voneinander abheben (Abb. 174). Die deutliche Übertragung wird daher durch die Selbstinduktion und die Kapazität der Telegraphenleitung wesentlich beeinflusst.

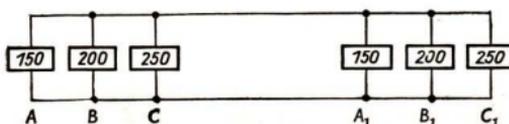


Abb. 175. Schema der Mehrfachtelegraphie auf einer Leitung

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 verschiedenen Sender und Empfänger benutzen dann Wechselströme verschiedener Frequenz (Abb. 175). Sendet A mit der Frequenz 150, dann wird dieser Strom durch

1) tēle (griech.) = fern, graphikos (griech.) = zum Schreiben.

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. Von dem Erdstecker der Station A (Abb. 176) fließt der elektrische Strom weitverzweigt durch die Erde nach B . Befindet sich in diesem Raum eine Leitung $a-b$, die mit zwei Steckern in die Erde eingeführt ist, so fließt zwischen a und b der Strom vorzugsweise durch den besser leitenden Draht und nicht durch die schlecht leitende Erde. Man kann daher – wenn man diesen Strom verstärkt – in C hören, was in A

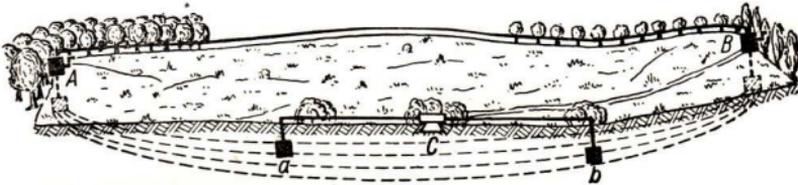


Abb. 176. Fernsprechen mit Einfachleitungen

und B gesprochen wird. Infolge der Erdleitung wird der Fernsprechverkehr oft durch Gespräche auf benachbarten Leitungen gestört.

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 einen Induktionswechselstrom 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 verdreht 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 Fern-

sprechleitung 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 zwar noch 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 jedesmal in der Leitung Spulen (Pupinsspulen¹⁾) und Kondensatoren einschaltet. Mit Hilfe von Pupinsspulen und Verstärkern (§ 35), die etwa alle 75 km in die Leitungen eingebaut sind, kann man über jede beliebige Entfernung durch Drahtverbindung telephonieren.

§ 35. Lautverstärker und Gleichrichter

1. Die Glühkathodenröhre als Lautverstärker. 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 Rundfunksendern usw. der Fall. Mit Hilfe der Glühkathoden-

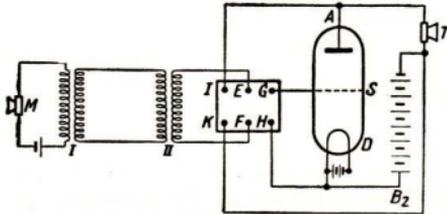


Abb. 177. Versuch zur Lautverstärkung eines Fernsprechstromes

röhre gelingt es, schwachen, im Telephon nicht wahrnehmbaren Strömen die erforderliche Stärke zu geben. Wie dies geschieht, deuten die Abb. 177 und 178 an.

M stellt ein Mikrofon dar, auf dessen Sprechtrichter z. B. eine Taschenuhr gelegt werden kann, damit ein Geräusch von gleichbleibender Lautstärke auf die Mikrofonmembran wirkt. Der Mikrofonstrom wird im Transformator I umgeformt und nach dem Transformator II der Empfangsstation geleitet. Dort ist ein Umschalter angebracht, durch den das Telephon *T* entweder unmittelbar an die Sekundärspule des Transformators II (wenn *E* mit *I* und *F* mit *K* verbunden ist) oder unter Einschaltung einer Dreielektrodenröhre an die Transformatorspule II 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. 178). Fließen im Stromkreis I die im Mikrofon erzeugten Wechselströme, so wechselt das elektrische Feld zwischen *S* und *D* seine Richtung. Ist *D* negativ und *S* positiv, so werden die aus *D* austretenden Elektronen beschleunigt, ist *D* positiv und *S* negativ, so werden sie zurückgehalten. Liegt nun im Stromkreis II zwischen der Anode *A* und der Kathode *D* eine Gleichstromspannung *B*₂ von etwa

1) Nach Michael Pupin benannt.

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 des Wechselstromes pulsierender Gleichstrom, dessen Schwankungen größer sind, als die Stromstärkeschwankungen in I. Er wird durch die Wechselspannungen zwischen Gitter und Glühkathode gesteuert. Seine Energie ist größer als die Energie des Wechselstromes in I. Fließt er durch einen Transformator und wird er von ihm auf ein Telefon T übertragen, so wirkt ein Strom von etwa 10facher Stärke auf die Membran. Leitet man den Strom II als Strom 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 Schallwellen (30 bis 5000 Hz) entsprechen, zu verstärken. Von Hochfrequenzverstärkern ist später (§ 53) die Rede.

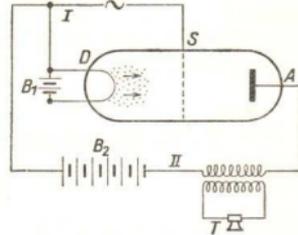


Abb. 178. Niederfrequenzverstärker

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 sog. 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 (Polarisation). Ein Gleichrichter ist auch der in § 33 beschriebene Detektor. Endlich gibt es auch noch Quecksilberdampfgleichrichter (Abb. 179), die zur Gleichrichtung sehr starker Ströme benutzt werden. Dabei ist von der Tatsache Gebrauch gemacht, daß ein Lichtbogen im Dampf zwischen einer Eisenelektrode und dem 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. 178), so fließt nur

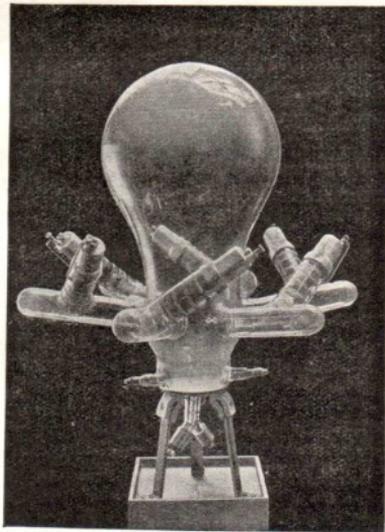


Abb. 179. Quecksilberdampfgleichrichter

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 benutzt. Die Glühkathodenröhre wird beim Rundfunkempfang sehr häufig als Gleichrichter verwendet.

D. Radioaktivität und atmosphärische Elektrizität

§ 36. Radioaktivität

An Verbindungen des Elementes Uran beobachtete 1896 der Franzose Becquerel, daß Uran eine Strahlung aussendet, welche auf die photographische

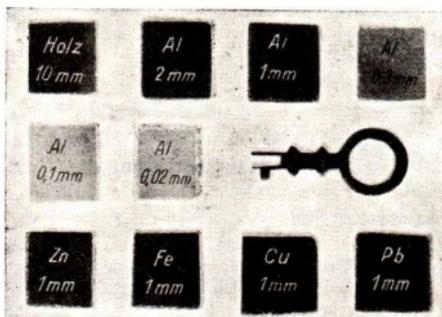


Abb. 180.

Photographische Wirkung der Radiumstrahlen (Positiv)

Platte einwirkt. Die weitere Untersuchung 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.

1. Die Eigenschaften der Strahlen.

Abb. 180 zeigt, wie Radiumstrahlen durch verschiedene Körper hindurch auf die photographische Platte einwirken. Blei verschluckt die Strahlen stark, Aluminium läßt sie hindurch treten.

Wie wir bereits in § 31 gesehen haben, wirken Radiumstrahlen ionisierend auf die Luft. Treffen sie auf einen fluoreszierenden Schirm, so leuchtet er auf.

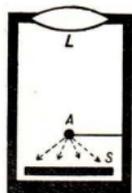
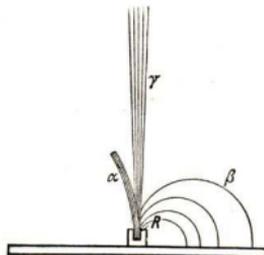


Abb. 181. Leuchten eines von Radiumstrahlen getroffenen Leuchtschirms

In Abb. 181 ist eine Büchse abgebildet, die auf einer Nadelspitze in A eine winzige Menge radioaktiven Stoffes enthält. S ist ein kleiner Leuchtschirm und L eine Lupe, durch die man das Leuchten des Schirms betrachtet. Mit gut ausgeruhem Auge nimmt man im Dunkeln ein fortgesetztes Flimmern des Schirmes wahr. Läßt man die von einer Radiumver-

Abb. 182. α -, β - und γ -Strahlung einer Radiumverbindung (R)

bindung (R) ausgesandten Strahlen durch ein Magnetfeld gehen, so stellt man die in Abb. 182 wiedergegebene Erscheinung fest. Einige Strahlen

werden wie positiv geladene bewegte Körper abgelenkt, andere wie negativ geladene, und ein dritter Teil der Strahlen geht unbeeinflusst durch das Feld hindurch.

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	Kanalstrahlen	Kathodenstrahlen	Röntgenstrahlen
Ladung	positiv	negativ	—
Masse (für H = 1)	4	$\frac{1}{2000}$	—
Natur der Strahlen	Heliumatom mit 2 Elementarladungen	Elektron	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. 183 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 eigenartig. 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 erkennen, ob die ausgesandten Strahlen positive oder negative Ladung haben.



Abb. 183.
Spur eines
 α -Strahles

3. Die Reichweite der Strahlen. Eine andere auffällige Erscheinung, auf die man bei der Untersuchung stieß, besteht darin, daß die Strahlen in Luft von Atmosphärendruck eine ganz bestimmte Reichweite besitzen. α -Strahlen, die vom Radium-C ausgesandt werden, dringen etwa 7 cm weit in die Luft ein (Abb. 184). 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, für verschiedene Stoffe dagegen verschieden ist.

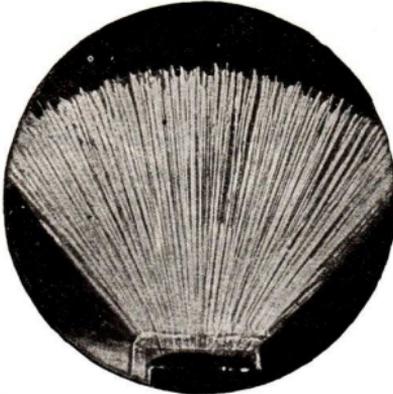


Abb. 184. Reichweite der α -Strahlen

4. 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 Gewichtseinheit 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

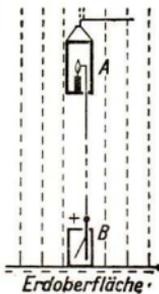


Abb. 185. Nachweis des elektrischen Feldes der Erde

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. 185). 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:

Die Erde ist von einem elektrischen Feld umgeben, dessen negative Grenzfläche an der Erdoberfläche liegt.

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 über einen Bereich von 60 bis 80 km, etwa auf 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 wird sie von der Strahlung der Sonne ionisiert, besonders in den oberen Luftschichten. Die Sonnenstrahlung enthält viel **ultraviolettes Licht**, das in den oberen Luftschichten stark verschluckt wird. Die Luft wird dabei so stark ionisiert, daß sie in 80 bis 100 km Höhe (Heavisideschicht) so gut leitet wie etwa der Erdboden. Nur ein Teil des ultravioletten Lichtes gelangt bis zum Erdboden. Ionisierend wirken auch die **Elektronenwolken**, welche die Sonne gelegentlich ausstößt und zur Erde sendet. Endlich erzeugt auch die sog. **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 in 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, welche 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 verschiedenen 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 größeren Teilchen ausgehen und in der negativen Ladung der feineren münden.

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 aufsteigende Luft rasch bis in mehrere tausend Meter Höhe vordringt (vgl. hierzu § 115,2). Dabei

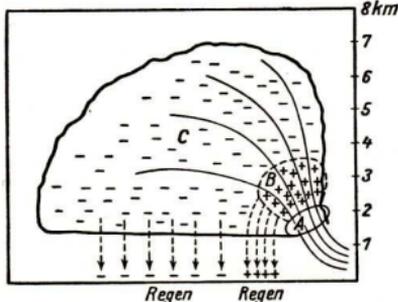


Abb. 186. Elektrisches Feld einer Gewitterwolke

kühlt sie sich stark ab. Ihr Wasserdampf kondensiert sich und fällt als Regen aus. Erlangt dabei im Bezirk *A* (Abb. 186) der aufsteigende Wind eine Geschwindigkeit von 8 m/s und mehr, so kann der Regen nicht mehr fallen. Die Wassertropfen werden hochgewirbelt und zerstäubt. 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, finden elektrische Entladungen in Form von Blitzen statt.

3. Der Blitz. Ein Blitz tritt erst auf, wenn die elektrische Feldstärke in der Wolke auf über 10 000 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 2–3 km. Es sind aber schon Blitze der 10fachen Länge einwandfrei beobachtet worden. Die Zeitdauer beträgt zwi-

schen $\frac{1}{50}$ und $\frac{1}{1000}$ s. Die Stromstärke ist außerordentlich groß, bis 10 000 Ampere. Zur Entladung kommen dabei aber nur Elektrizitätsmengen von etwa 10 Coulomb. Die Energie eines durchschnittlichen Blitzes kann man zu $2 \cdot 10^9$ kgm angeben. Bei hohen elektrischen Feldstärken entsteht auf dem Meere oft das Elmsfeuer oder im Hochgebirge eine Entladung, wie man sie bei der Influenzmaschine wahrnimmt, wenn man sie im Dunkeln dreht.

4. Das Nordlicht. Störungen im normalen elektrischen und vor allem im magnetischen Erdfeld rufen das Nordlicht hervor, das sich bis in 700 km Höhe erstreckt und besonders in den Polgebieten der Erde auftritt. Es zeigt Strahlen, Draperien, Bogen, pulsierende Flächen, die grünlich leuchten

(Abb. 187). 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 in die Polargebiete.



Abb. 187. Nordlicht

WELLEN IM STOFFERFÜLLTEN UND LEEREN RAUM

Die Materie ist in der Welt an einzelnen Stellen zu großen, zusammenhängenden, festen, flüssigen und gasförmigen Massen in den Himmelskörpern zusammengeballt. Zwischen ihnen erstreckt sich der Weltraum. Er übermittelt die Massenanziehung der Körper und ist Träger elektrischer und magnetischer Eigenschaften. Die ihn erfüllenden Felder erstrecken sich unbegrenzt nach allen Richtungen und stellen Verbindungen zwischen den Körpern her. Die physikalische Welt ist somit ein zusammenhängendes Gefüge. Jede Veränderung im physikalischen Zustand einer Stelle der Welt wirkt sich auf die anderen Stellen aus. Bisher haben wir unser Augenmerk in der Regel nur auf den einzelnen physikalischen Vorgang gerichtet und im allgemeinen unbeachtet gelassen, daß von ihm aus Einwirkungen auf die Umgebung ausgehen. Wir wollen nun einige Erscheinungen betrachten, die sich aus dem Nebeneinander vieler Körper und ihrem Zusammenhang im Ganzen der Natur ergeben.

A. Wellen im stoffgefüllten Raum

§ 39. Die Ausbreitung eines Stoßes im Stoff

1. Koppelungskräfte. Ein Briefbeschwerer, der auf einigen Blättern Papier liegt, übt durch sie einen Druck auf den Schreibtisch, durch ihn auf den Fußboden, durch das Haus auf den Erdboden aus. In ähnlicher Weise wirkt das Gewicht eines jeden Körpers auf viele andere seiner Umgebung ein. Ändert der Körper seine Lage, so werden auch andere dadurch beeinflußt. Die Einwirkungen auf die Umgebung sind u. U. sehr gering, können aber durch eine sorgfältige Untersuchung nachgewiesen werden.

Wenn wir eine an dem einen Ende befestigte Schraubenfeder etwas in die Länge ziehen, so werden alle Windungen bewegt. In diesem Falle sind es elastische Kräfte, welche die Veränderung von der einen Stelle auf andere übertragen. Solche Kräfte sind zwischen den Teilen fester, flüssiger und gasförmiger Körper wirksam. Ändert man die Form eines elastischen festen Körpers durch Zusammenpressen, Dehnen, Biegen oder Verdrehen innerhalb gewisser Grenzen, so nimmt der Körper die frühere Gestalt wieder an, wenn die formändernde Kraft nicht mehr wirkt. Er besitzt Formelastizität. Flüssigkeiten und Gase zeigen ihr elastisches Verhalten nur gegenüber Druckkräften. Ihre Volumelastizität bewirkt, daß die Veränderung des Druckes an irgendeiner Stelle sich überall in ihnen bemerkbar macht.

Wir nennen die Kräfte, durch die ein Körper mit den Körpern seiner Umgebung verbunden ist oder die die Teile ein und desselben Körpers verbinden, Koppelungskräfte.

2. Die Ausbreitung eines Stoßes im elastischen Körper. Bei einem Eisenbahnzug sind die einzelnen Wagen durch die Federn der Verbindungsstücke und Puffer elastisch miteinander gekoppelt.

Stößt eine Lokomotive beim Rangieren auf die Wagenreihe eines ruhenden Zuges, so empfängt zunächst der erste Wagen einen Impuls (vgl. Teil I, § 64) in der Bewegungsrichtung. Er wird ein kurzes Stück vorwärts geschoben, stößt dabei auf den zweiten Wagen, drückt ihn

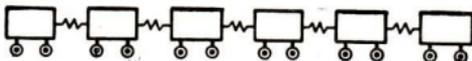


Abb. 188. Ausbreitung eines Stoßes bei elastischer Koppelung

etwas nach vorn und steht selbst wieder still. Beim zweiten und dritten Wagen wiederholt sich dann der Vorgang usw. Man merkt am Zusammenstoßen der Puffer und an den kurzen Bewegungen der Wagen, daß sich der Impuls mit einer gewissen Geschwindigkeit durch die Wagenreihe fortpflanzt (Abb. 188).

Legt man auf eine waagerechte Rinne (Abb. 189) eine Reihe von Stahlkugeln dicht nebeneinander und läßt



Abb. 189. Fortpflanzung eines Stoßes durch eine Reihe von Stahlkugeln

eine Stahlkugel *A* dagegenstoßen, etwa dadurch, daß man sie auf einer geneigten Rinne herabrollen läßt, dann pflanzt sich der Impuls durch die anfangs ruhenden Kugeln fort. Diese bleiben an ihrem Ort bis auf die letzte, die fortgeschleudert wird.

Legt man einen Stahlstab zwischen die Kugeln, so daß sie ihn berühren, dann wirkt er genau so wie eine Anzahl Kugeln, deren Platz er eingenommen hat.

Spannt man einen Stahlstab in waagerechter Lage fest ein und schlägt mit einem Hammer auf das eine Ende, so pflanzt sich der Impuls des Schläges durch den Stab hindurch bis zum anderen Ende fort und kann dort durch ein Pendel mit einer kleinen Stahlkugel oder Glas-kugel sichtbar gemacht werden.

In ähnlicher Weise wird ein Stoß durch eine Reihe elastischer Körper fortgeleitet, wenn diese sich gegenseitig berühren.

Der Versuch mit den Stahlkugeln zeigt aber mehr als die bloße Tatsache der Fortpflanzung des Stoßes, wenn wir die energetischen Verhältnisse betrachten. Die herabrollende Kugel *A* hat, wenn sie unten angekommen ist, eine gewisse kinetische Energie erlangt. Sie bleibt nachher ruhig liegen, hat also ihre ganze Energie abgegeben. Ebenso verhalten sich die folgenden Kugeln bis auf die letzte *B*. Diese fliegt nahezu mit der Geschwindigkeit fort, die *A* besessen hat. Beim Stoß wird demnach nicht nur der Impuls übertragen, sondern auch die Energie. Wir finden dies Ergebnis bestätigt, wenn wir anstelle der einen Kugel *A* zwei oder mehr Kugeln herabrollen lassen. Dann wird von der ruhenden Reihe auch eine entsprechende Anzahl von Kugeln mit annähernd derselben Geschwindigkeit fortgeschleudert. Ist der letzte Wagen des oben erwähnten Eisenbahnzuges losgekoppelt, dann wird er sich vorwärtsbewegen und dabei den Betrag an kinetischer Energie besitzen, der von der Lokomotive beim Zusammenschieben der Wagen angewendet worden ist, während die anderen Wagen an ihrer alten Stelle bleiben. Wir kommen zu dem Ergebnis:

In einem elastischen festen Körper kann Energie durch Stoß von Teilchen zu Teilchen übertragen werden, ohne daß der Körper dabei verschoben wird.

3. Die Reflexion des Impulses. Wenn in der Wagenreihe der von rechts kommende, nach links gerichtete Impuls I_1 sich bis zum letzten Wagen fortpflanzt hat, so beobachten wir, daß ein Impuls I_2 gleicher Richtung

über die Wagenreihe zurückläuft. Die Erscheinung ist so zu erklären, daß der Impuls I_1 , den der letzte Wagen erhält, diesen nach links drückt, ohne Widerstand zu finden. Infolge der Federkoppelung zwischen dem letzten und vorletzten Wagen übt der letzte auf den vorletzten nun einen Zug I_2 aus, der in der Richtung von I_1 wirkt und sich wiederum von einem Wagen auf den anderen überträgt. Wir sagen dann, daß der Impuls I_1 an dem freien Ende der Wagenreihe als ein ebenso gerichteter Impuls I_2 „reflektiert“¹⁾ wird (Abb. 190). Wir stellen die Wagenreihe nun so auf, daß der letzte Wagen sich

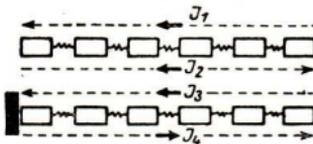


Abb. 190. Reflexion eines Stoßes

an ein festes Hindernis, einen Prellbock, anlehnt. Wenn jetzt wieder ein Impuls I_3 von rechts her kommt, so gibt der letzte Wagen den Impuls an den Prellbock weiter. Dieser weicht dabei kaum aus seiner Lage. Die zwischen ihm und dem letzten Wagen durch I_3 zusammengedrückte Feder erteilt dann beim Entspannen dem letzten Wagen

einen nach rechts gerichteten Impuls I_4 , der nun wieder in der ganzen Reihe der Wagen zurückläuft. In diesem Fall wird der Impuls I_3 als ein entgegengesetzt gerichteter Impuls I_4 „reflektiert“. In der Abb. 190 sind zu unterscheiden: Die Richtungen der Impulse (voll gezeichnete Pfeile) und die Richtungen der fortschreitenden Bewegungen (gestrichelte Pfeile).

Die beiden betrachteten Vorgänge unterscheiden sich dadurch, daß in dem einen Falle das letzte Ende der Körperreihe frei ausschlagen kann, während es im zweiten Falle praktisch unbeweglich ist.

In die dynamischen Zusammenhänge beim Stoß gewinnt man einen genaueren Einblick, wenn man eine elastische Kugel auf eine elastische Unterlage von großer Masse fallen läßt, etwa eine Elfenbein- oder Stahlkugel auf eine dicke Glasplatte, die auf eine Eisenplatte aufgekittet ist. Beruht man die Glasplatte, so zeichnet sich auf der Kugel je nach der Fallhöhe ein mehr oder minder großer schwarzer Kreis ab. Aus seinem Durchmesser und dem der Kugel kann man berechnen, um welchen Betrag die Kugel während des Stoßes zusammengedrückt wurde, und aus dem Gewicht der Kugel und der Fallhöhe kann man dann die mittlere Druckkraft bestimmen, die während des Stoßes wirksam gewesen sein muß. Bei einem Versuch mit einer Elfenbeinkugel (Durchmesser $d = 47$ mm; Gewicht $G = 92,5$ g) zeichnete sich ein Kreis von 6,0 mm Durchmesser ab, wenn die Kugel aus einer Höhe von $h = 1000$ mm herabfiel. Die Rechnung ergibt für die Pfeilhöhe des Eindruckes $\delta = 0,2$ mm. Am Anfang ist die potentielle Energie $G \cdot h$ vorhanden. Bezeichnet man die mittlere Druckkraft beim Stoß mit P , so wird beim Aufschlagen die Arbeit $P \cdot \delta$ geleistet. Wenn wir von Verlusten absehen, ist

$$P \cdot \delta = G \cdot h.$$

$$P = \frac{h}{\delta} \cdot G.$$

$$\frac{h}{\delta} = 5000, \quad \text{demnach} \quad P = 5000 G.$$

Es ergibt sich also eine mittlere Druckkraft $P = 460$ kg. Die Zeit des Stoßes ist dabei außerordentlich gering. Sie beträgt nur wenige Zehntausendstel einer Sekunde.

1) reflectere (lat.) = zurückwenden.

Läßt man eine kleine Stahlkugel auf eine waagrecht ausgerichtete Glasplatte fallen, so springt sie sehr oft auf und ab, ehe sie zur Ruhe kommt. Man erkennt bei einer photographischen Aufnahme des Vorganges (Abb. 191), daß bei jedem Stoß die kinetische Energie der Kugel nicht restlos erhalten bleibt, wie es beim Idealfall des vollkommen elastischen Körpers sein würde. Gleichzeitig wird die Kürze der Stoßzeit im Vergleich zu der Zeit der Bewegungsumkehr in den höchsten Punkten deutlich sichtbar.

Wir stellen weitere Versuche über die Reflexion von Impulsen an: Hängt man eine durch ein Gewicht belastete Schraubenfeder (Abb. 192) an einem Haken auf, so ist sie nur am unteren Ende frei beweglich. Zieht man sie nun etwas in die Länge, erteilt ihr also einen Längsimpuls, so durchläuft dieser die Feder bis zum oberen festen Ende und wird hier als Längsimpuls von entgegengesetzter Richtung reflektiert. Wenn dieser unten am freien Ende ankommt, wird er nach oben reflektiert, aber die Richtung des Impulses ändert sich dabei nicht.



Abb. 192.
Reflexion eines
Längsimpulses

Hängt man eine mehrere Meter lange Schraubenfeder zwischen zwei festen Haken *A* und *B* auf (Abb. 193) und führt gegen sie an dem einen Ende einen seitlichen Schlag, so läuft als Folge dieses Quersimpulses eine seitliche Ausbuchtung über die Schraubenfeder und wird an dem festen Ende als eine nach der entgegengesetzten Seite gerichtete Ausbuchtung reflektiert. Schaltet man einen dünnen Bindfaden zwischen das Ende der Feder und den Aufhängepunkt *B* und erzeugt am anderen Ende *A* wieder einen Impuls, dann wird dieser an der wie ein freies Ende wirkenden Grenze zwischen Bindfaden und Feder als gleichsinnige Ausbuchtung reflektiert (vgl. § 42).

In einem Rahmen hängt in der Anordnung der Abb. 194 ein Draht, an dem eine Anzahl von Querstäben befestigt ist, die in einer Ebene ausgerichtet

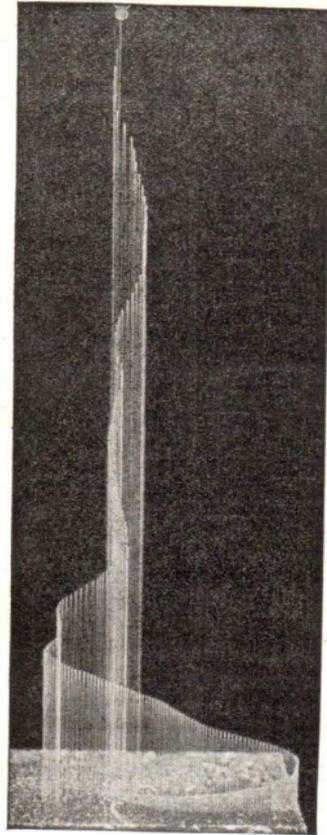


Abb. 191. Wiederholter Fall
einer Stahlkugel auf eine Glasplatte



Abb. 193.
Reflexion eines Quersimpulses

sind. Das untere Ende des Drahtes soll zunächst frei sein. Dreht man den obersten Querstab aus seiner Lage, so wandert ein Drehimpuls von einem

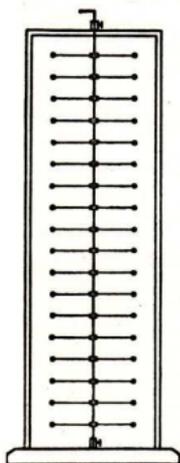


Abb. 194. Reflexion eines Drehimpulses

Stab zum anderen und läuft, wenn er unten angekommen ist, als Impuls von gleichem Drehsinn zurück. Klemmt man aber das untere Ende des Drahtes fest und wiederholt den Versuch, so wird der unten ankommende Drehimpuls im entgegengesetzten Drehungssinn reflektiert.

Die Versuche zeigen nochmals, daß wir zwischen den Richtungen der Impulse und den Richtungen, in denen sie sich fortpflanzen, unterscheiden müssen. Ob es sich nun um Längsimpulse, Querimpulse oder Drehimpulse handelt, in jedem Falle gilt das Gesetz:

An der Grenze eines zusammenhängenden elastischen Körpers wird ein Impuls, der durch ihn hindurchgewandert ist, reflektiert. Kann das Teilchen an der Grenze frei aus seiner Ruhelage ausschlagen, so wird ein gleichgerichteter Impuls zurückgeschickt, ist das Grenzteilchen fest, so hat der reflektierte Impuls entgegengesetzte Richtung. Beide Impulse pflanzen sich mit der gleichen Geschwindigkeit fort.

Zieht man die Schraubenfeder (Abb. 193) weiter auseinander, so werden die Koppelungskräfte zwischen den einzelnen Windungen größer, und man beobachtet gleichzeitig, daß die Impulse schneller wandern. Dieser Zusammenhang zwischen den Koppelungskräften und der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Impulse gilt in allen Fällen. In Metall- und Glasstäben sind die Koppelungskräfte besonders groß. Daher ergeben sich für die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der Impulse hohe Werte, bei Messing etwa $v = 4000$ m/s, bei Stahl und Glas etwa $v = 5000$ m/s (vgl. § 42).

4. Die Ausbreitung eines Impulses im Raum und in einer Fläche. Wir haben bisher nur die Fortpflanzung eines Impulses in elastischen Körpern in einer bestimmten Richtung betrachtet. Wird der Impuls im

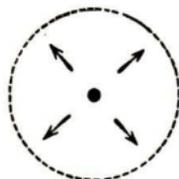


Abb. 195. Ausbreitung eines Impulses im Innern eines elastischen Körpers

Innern eines elastischen Körpers erzeugt, so breitet er sich nach allen Richtungen aus (Abb. 195). Seine Energie ist dann jeweils auf einer Kugelfläche verteilt, von deren Mittelpunkt der Impuls ausging. Ein solcher Fall liegt z. B. vor, wenn in der Luft oder im Wasser an irgendeiner Stelle ein Knall erzeugt wird. Dann erhalten die Luft- bzw. Wasserteilchen einen Stoß, den sie an die benachbarten Teilchen in radialer Richtung weitergeben. Der Impuls breitet sich aus, ohne daß eine Strömung in der Luft oder im Wasser entsteht.

Recht kompliziert werden die Erscheinungen, wenn der Impuls an der Grenzfläche zweier elastischer Körper erzeugt wird. Dieser Fall tritt z. B. ein, wenn wir einen Stein in ruhendes Wasser werfen. Dann beobachten wir auf der Wasseroberfläche die bekannten Wellenringe.

Es pflanzt sich aber auch ein elastischer Impuls in das Innere des Wassers fort und ein anderer in die Luft. Die Wirkung des letztgenannten vermittelt unserem Ohr das Geräusch des Aufschlages. Schließlich muß man noch berücksichtigen, daß die Oberfläche des Wassers, die sich wie eine gespannte Haut verhält, im Augenblick des Auftreffens etwas eingedrückt wird. Die Kapillarkräfte der Oberflächenspannung bewirken dann die Ausbreitung auch dieses Impulses nach allen Seiten in der Form einer Kräuselung. So dient die ursprünglich beim Aufschlagen des Steines vorhandene Energie zur Erzeugung der mannigfachsten Erscheinungen. Am sinnfälligsten sind die an erster Stelle erwähnten Wellenringe. Wir werden ihre Entstehung noch genauer untersuchen.

§ 40. Grundbegriffe der Wellenlehre

1. Schwingung und Welle. Jede regelmäßig hin- und hergehende Bewegung, wie wir sie beim Pendel kennengelernt haben, wird Schwingung (§ 67) genannt. Die Schwingungen eines Pendels

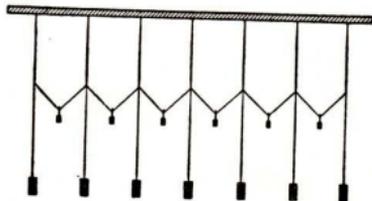


Abb. 196.
Entstehung einer Welle aus einer Schwingung

kann man durch Koppelung auf ein zweites, völlig gleichartiges übertragen. Koppeln wir nun eine größere Anzahl gleichartiger Pendel miteinander (Abb. 196) und versetzen das erste in Schwingungen, so erkennen wir, wie sich die Bewegung vom ersten auf die folgenden überträgt und jedes Pendel mit einer gewissen Verzögerung genau dieselben Schwingungen ausführt wie das erste. Die Gesamtheit dieser aufeinanderfolgenden Schwingungen ergibt eine Wellenbewegung.

Eine Welle entsteht dadurch, daß eine Reihe miteinander gekoppelter, schwingungsfähiger Teilchen nacheinander gleichartige Schwingungen ausführt.

2. Die transversale Wellenbewegung. Die bereits erwähnten Wasserwellen bilden sich in folgender Weise: An der Stelle *S*, an der der Stein aufschlägt, wird das Gleichgewicht der Wasserteilchen an der Oberfläche gestört. Sie weichen aus, suchen wieder die alte Lage, schwingen infolge der Trägheit über die ursprüngliche Lage hinaus und kehren zurück. So schwingen sie einige Male auf und ab. Durch ihre Bewegung werden die benachbarten Wasserteilchen angestoßen und vollführen nun ebenfalls Schwingungen. Diese beginnen aber etwas später als an der Erregungsstelle. Die neu angestoßenen Teilchen wirken wieder auf die benachbarten ein und veranlassen sie zu Schwingungen usw. Auf diese Weise breitet sich der ursprüngliche Impuls wellenförmig nach allen Seiten mit gleicher Geschwindigkeit

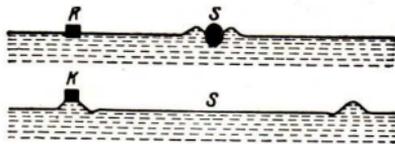


Abb. 197.
Ausbreitung eines Impulses auf der Wasseroberfläche

aus und erzeugt das Bild eines kreisförmigen Wellenringes. Trifft die Bewegung auf ein schwimmendes Stück Kork *K*, so sieht man, daß dieses nur auf und abschwimmt, aber nicht zur Seite geführt wird (Abb. 197).

Durch einen einzelnen Impuls kann im allgemeinen nur eine recht kleine Energie übertragen werden. Man kann aber durch viele Impulse, die man aufeinander folgen läßt, die Größe der übertragenen Energie steigern.

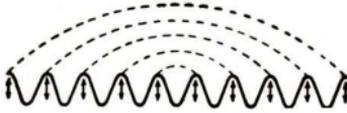


Abb. 198. Wellenberge und Wellentäler

waagrecht aus und kann die Wasserschicht von unten her durchleuchten oder auch im reflektierten Licht beobachten. Infolge der besonderen Form des Randes machen sich die reflektierten Wellen nicht störend bemerkbar. Geradlinige Wellen erzeugt man durch taktmäßiges Bewegen eines Stabes.

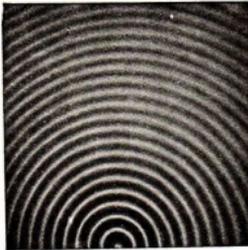


Abb. 199. Wasserwellenringe

Durch Einsetzen geeigneter Hindernisse lassen sich alle möglichen bei der Ausbreitung von Wellen auftretenden Erscheinungen verwirklichen. Stößt man einen Stab wiederholt in die Oberfläche des Wasserbeckens, so kann man Wellenringe erzeugen, die hintereinander herlaufen. Führt man die Bewegung des Stabes taktmäßig aus, dann haben die Wellenringe gleiche Abstände voneinander. Man kann dann **Wellenberge** und **Wellentäler** unterscheiden (Abb. 198). Eine solche Wellenbewegung läßt sich auch durch regelmäßige Luftstöße erregen. Wenn man die Bewegung auf dem

Wasser dann im Scheine einer Lichtquelle betrachtet, deren Helligkeit im gleichen Takt wie der Luftstrom wechselt, so erhält man ein Bild von ruhenden konzentrischen Kreisen mit gleichen Abständen (Abb. 199).

Fortschreitende Wellen kann man auch beobachten, wenn der Wind über die Halme eines Kornfeldes streicht. Ein einfaches Mittel zur Veranschaulichung einer fortschreitenden

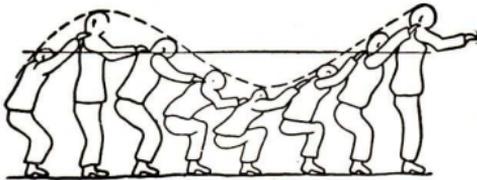


Abb. 200. Veranschaulichung einer Welle

Wellenbewegung ist folgendes: Man läßt eine Reihe von Schülern hintereinander antreten und jeden die Hände auf die Schultern des Vordermannes auflegen. Der letzte erhält dann den Auftrag, eine Kniebeuge auszuführen, und alle anderen sollen mit der gleichen Bewegung beginnen, sobald sie von ihrem Hintermann den entsprechenden Anstoß erhalten. Jeder bleibt dabei an seinem Platze. Ein Zuschauer sieht dann eine Welle über die Köpfe der Schüler hinwegwandern (Abb. 200). Bei einem derartigen Versuch liegen die Verhältnisse einfacher als bei den Wasserwellen, da sich die Bewegung nur in einer Richtung fortpflanzt. Solche Wellen heißen lineare Wellen. Denselben Vorteil und dabei eine größere Gleichförmigkeit erreichen wir, wenn wir Seilwellen zur Untersuchung benutzen.

Die Vorgänge bei Wasserwellen kann man im Zimmer gut beobachten, wenn man die Wellen in einer Wellenwanne erzeugt. Für diesen Zweck ist ein Bilderrahmen mit flach ansteigenden Leisten recht geeignet. Man richtet ihn

waagrecht aus und kann die Wasserschicht von unten her durchleuchten oder auch im reflektierten Licht beobachten. Infolge der besonderen Form des Randes machen sich die reflektierten Wellen nicht störend bemerkbar. Geradlinige Wellen erzeugt man durch taktmäßiges Bewegen eines Stabes. Durch Einsetzen geeigneter Hindernisse lassen sich alle möglichen bei der Ausbreitung von Wellen auftretenden Erscheinungen verwirklichen. Stößt man einen Stab wiederholt in die Oberfläche des Wasserbeckens, so kann man Wellenringe erzeugen, die hintereinander herlaufen. Führt man die Bewegung des Stabes taktmäßig aus, dann haben die Wellenringe gleiche Abstände voneinander. Man kann dann **Wellenberge** und **Wellentäler** unterscheiden (Abb. 198). Eine solche Wellenbewegung läßt sich auch durch regelmäßige Luftstöße erregen. Wenn man die Bewegung auf dem

Wasser dann im Scheine einer Lichtquelle betrachtet, deren Helligkeit im gleichen Takt wie der Luftstrom wechselt, so erhält man ein Bild von ruhenden konzentrischen Kreisen mit gleichen Abständen (Abb. 199).

Seilwellen lassen sich mit einem Seil, mit einem Gummischlauch oder am zweckmäßigsten mit einer langen Schraubenfeder erzeugen. Wir halten zunächst das eine Ende in der Hand und lassen das andere Ende auf dem Boden aufliegen: Führen wir nun das festgehaltene Ende taktmäßig hin und her, so sehen wir Wellenzüge über die Feder laufen und an dem aufliegenden Ende zur Ruhe kommen. Die Bewegung breitet sich infolge der Koppelung durch die elastischen Kräfte als **fortlaufende Welle** über die ganze Feder aus.

In Abb. 201 ist dargestellt, wie sich die Schwingungen in 15 aufeinanderfolgenden gleichen Zeiträumen (I–XV) von Teilchen 0 bis zum Teilchen 15 fortgepflanzt haben. Jede Reihe der Abb. 201 gibt die Lage der Schraubenfeder zu einem bestimmten Zeitpunkt wieder. In der Zeichnung ist angenommen, daß

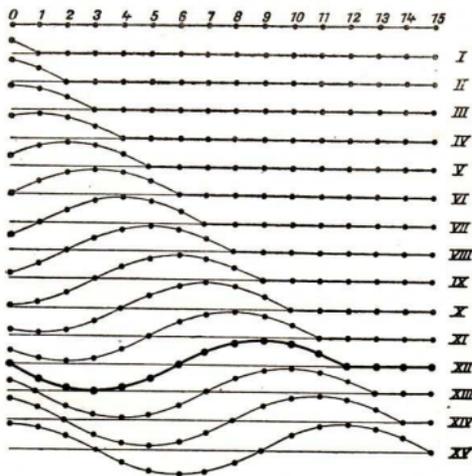


Abb. 201. Bildung einer fortschreitenden Querwelle

das 12. Teilchen in dem Augenblick seine Bewegung beginnt, in dem das Teilchen 0 in seine Anfangslage zurückkehrt. Die Reihe XII bezeichnet für diesen Augenblick die Lage der Feder. Man sieht auf der Reihe XII eine vollständige Welle zwischen den Teilchen 0 und 12 mit einem Wellental und einem Wellenberg. Die Teilchen 0 und 12 befinden sich in gleichem Bewegungszustand.

Bei den bisher betrachteten Wellen schwingen die einzelnen Teilchen quer zur Richtung der Fortpflanzung der Wellenbewegung.

Eine Wellenbewegung, bei der die Teilchen quer zur Richtung der Fortpflanzung der Welle schwingen, nennen wir **transversal**¹⁾. Die entstehenden Wellen heißen **Transversalwellen** oder **Querwellen**.

3. Die longitudinale Wellenbewegung. Wenn man einer Schraubenfeder taktmäßig hin- und hergehende Impulse in der Längsrichtung erteilt, dann sieht man auch eine fortschreitende Bewegung über die Feder in der Längsrichtung wandern. Man spricht in diesem Falle von **Längswellen** oder **Longitudinalwellen**²⁾. An diesen können wir keine Berge und Täler unterscheiden, wohl aber **Verdichtungen** und **Verdünnungen**. An den Verdichtungsstellen bewegen sich die Teilchen im gleichen, an den Verdünnungsstellen im ent-

1) transversus (lat.) = quer liegend.

2) longitudo (lat.) = Länge.

gegengesetzten Sinn der Richtung, in der die Welle fortschreitet. Bildlich können wir eine solche Welle darstellen, wenn wir von einer Querwelle ausgehen und die Abweichung jedes einzelnen Teilchens aus der Ruhelage um 90° drehen, und zwar im gleichen Drehungssinn, also etwa jede nach oben gerichtete Abweichung nach rechts und jede nach unten gerichtete Abweichung nach links. Abb. 202 ist in dieser Weise ausgeführt. Abb. 203 veranschaulicht ebenfalls den Zusammenhang zwischen Quer- und Längswellen.

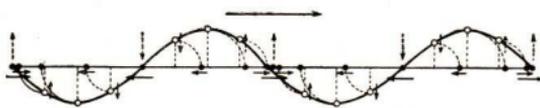


Abb. 202. Entstehung einer Längswelle aus einer Querwelle

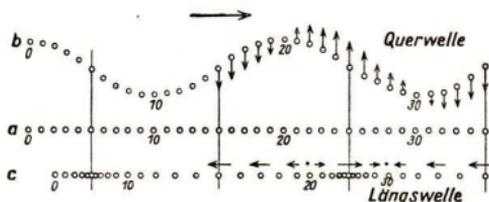


Abb. 203. Quer- und Längswellen

Die geschilderte Bewegung hat mit der transversalen Wellenbewegung gemeinsam, daß auch bei ihr Energie durch schwingende Teilchen übertragen wird, ohne daß die Teilchen mitwandern.

Eine Wellenbewegung, bei der die Teilchen in ein und derselben Geraden hin- und herschwingen, nennen wir **longitudinal**. Die entstehenden Wellen heißen **Longitudinalwellen** oder **Längswellen**. Sie schreiten in der Richtung der Geraden fort.

Die geschilderten Beziehungen zwischen Quer- und Längswellen kann man mit einer Wellenmaschine veranschaulichen. Diese besteht aus einer großen Anzahl gleicher Pendel, die nicht miteinander gekoppelt sind. Sie werden durch eine geeignete Vorrichtung nacheinander angestoßen und zu Querschwingungen veranlaßt. Sie zeigen also nur das Bild einer Welle, aber nicht ihre Entstehung. Dreht man dann die Schwingungsebenen der Pendel um 90° , so sieht man das Bild einer Längswelle.

4. Die Wellenlänge. Die Welle schreitet fort, während die Teilchen an ihrem Ort hin- und herschwingen.

Die Zeit, in der ein Teilchen eine Schwingung ausführt, nennen wir seine **Schwingungsdauer T** .

Während einer Schwingungsdauer T rückt jeder Berg an die Stelle des vorausgegangenen. Den Abstand zweier Berge nennen wir die **Wellenlänge λ** der Welle. Die Linie, die die schwingenden Teilchen in einem beliebigen Augenblick bilden, nennen wir **Wellenlinie**.

Abb. 204 zeigt die Wellenlinie, die aus einer Reihe von harmonisch schwingenden Teilchen gebildet wird. In ihr sind für jedes schwingende Teilchen durch kleine Kreise die Orte angegeben, an denen es sich nach je $\frac{1}{8}$ seiner Schwingungsdauer befindet. Die ausgefüllten

Kreise geben an, wo sich die Teilchen gleichzeitig befinden, wenn jedes um $\frac{1}{8}$ der Schwingungsdauer später als das vorhergehende zu schwingen begonnen hat. Der jeweilige Abstand von der Ruhelage läßt sich nach Abb. 204 leicht feststellen. Die Teilchen bewegen sich in verti-

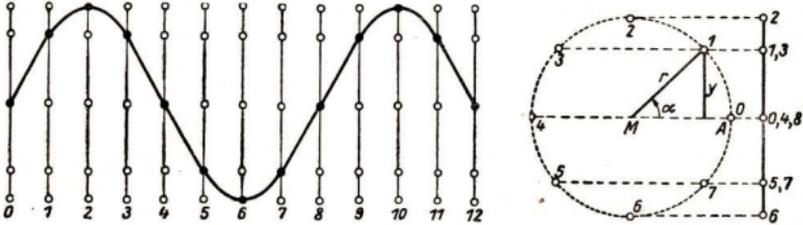


Abb. 204. Wellenlinie bei harmonischer Erregung der Welle

kaler Richtung genau so, wie die Projektion des Punktes A, wenn der Punkt sich gleichförmig auf dem Kreise bewegt (vgl. Teil I, § 67). α sei der Drehwinkel, y der Abstand des schwingenden Teilchens von der Ruhelage oder die Elongation¹⁾ und r die Schwingungsweite, dann ist

$$y = r \cdot \sin \alpha.$$

Die Wellenlinie harmonisch schwingender Punkte ist eine Sinuskurve.

Die Zinken einer Stimmgabel führen harmonische Schwingungen aus. Zeichnet man diese nach Teil I, § 1 auf, so ergeben sich Wellenlinien in der Form von Sinuskurven (Abb. 205).

Man nennt den Schwingungszustand, den ein Teilchen in einem bestimmten Augenblick besitzt, seine **Schwingungsphase**. Zwei Teilchen, die zur Ruhelage dieselbe Lage und dieselbe Bewegungsrichtung besitzen, schwingen in gleicher Phase. In der obenstehenden Zeichnung (Abb. 204) schwingen in gleicher Phase die Teilchen 0, 8; 1, 9; 2, 10 usw., nicht aber die Teilchen 0 und 4. Der Abstand zweier benachbarter Teilchen in gleicher Schwingungsphase ist gleich der Wellenlänge. Es ergibt sich also:

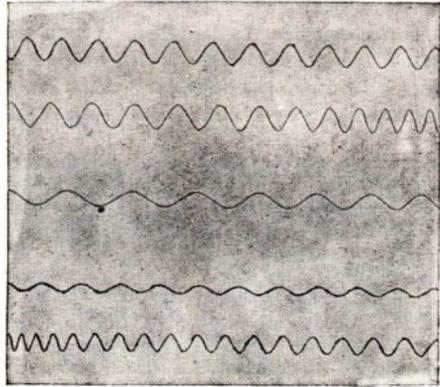


Abb. 205. Stimmgabelschwingungen

Die **Wellenlänge λ** einer Welle ist der Abstand zweier benachbarter Teilchen, die sich in gleicher Schwingungsphase befinden. Die Wellenlänge λ ist auch die Strecke, um die die Welle während der Schwingungsdauer T eines Teilchens vorrückt.

Unterschiede der Schwingungsphase werden in Bruchteilen der Wellenlänge gemessen. So besteht z. B. zwischen dem 1. und 5., 2. und 6. Teilchen der

1) elongare (lat.) = entfernen.

Phasenunterschied $\lambda/2$, zwischen dem 1. und 3., 2. und 4. Teilchen der Phasenunterschied $\lambda/4$.

5. Wellenlänge und Ausbreitungsgeschwindigkeit. In der Zeit der Schwingungsdauer T des erregenden Teilchens rücken die Berge und Täler der Welle um die Strecke λ vorwärts, in der Zeit $2T$ um 2λ , in der Zeit $3T$ um 3λ usw. Führt das schwingende Teilchen in 1 Sekunde f Schwingungen aus, so ist $T = \frac{1}{f}$. Die Zahl f der Schwingungen in einer Sekunde bezeichnet man als **Frequenz**. Während f Schwingungen rücken die Berge und Täler um $f \cdot \lambda$ vorwärts.

Durch den in 1 s zurückgelegten Weg der Welle kann man die Fortpflanzungsgeschwindigkeit c der Welle messen.

Es besteht dann folgende Beziehung:

$$c = f \cdot \lambda.$$

Führt man statt der Frequenz f die Schwingungsdauer T des erregenden Teilchens ein, so ergibt sich, weil $T = \frac{1}{f}$ ist,

$$c = \frac{\lambda}{T}.$$

6. Fortschreitende Wasserwellen. Wellen auf der Wasseroberfläche erzeugt der Wind, der gleichmäßig oder in Stößen über die Oberfläche hinwegstreicht, der Schwimmvogel oder das Schiff, das durch das Wasser fährt (Bug- und Heckwelle). Die in einem Punkt erzeugten Wasserwellen breiten sich kreis-



Abb. 206. Brandungswellen

förmig aus. Die Schwingungsweite nimmt mit dem Abstand vom Erregungszentrum ab.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wasserwellen hängt von der Wellenlänge und der Wassertiefe ab. Sie ist in tiefem Wasser größer als in seichtem. An der

Küste bilden sich deshalb Brandungswellen, weil die rascher fortschreitenden Wellen über die langsamer vordringenden hinweglaufen. Die Wellenberge erhalten weiße Kämme und nehmen die in Abb. 206 erkennbare Form an.

7. Fortschreitende Schallwellen. Ein Impuls, der sich in der Luft oder im Inneren von Wasser ausbreitet, erzeugt longitudinale Wellen, weil die Luft- und Wasserteilchen frei beweglich sind und nur durch elastische Stoßkräfte auf-

einander einwirken. Sie schwingen in derselben Richtung, in der sich die Welle ausbreitet.

Führt ein Schallerreger f Schwingungen in der Sekunde aus und ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle c , so ergibt sich die Wellenlänge λ der Schallwelle aus der Formel

$$c = \lambda \cdot f.$$

In Luft von 15° beträgt die Schallgeschwindigkeit 340 m/s. Töne der Schwingungszahlen 30, 440 oder 5000 besitzen daher in der Luft die Wellenlängen

$$\lambda_1 = 11,3 \text{ m}; \quad \lambda_2 = 0,77 \text{ m}; \quad \lambda_3 = 0,068 \text{ m}.$$

Im Wasser beträgt die Schallgeschwindigkeit 1450 m/s. Die Wellenlängen der entsprechenden Schallwellen im Wasser sind daher größer. Sie betragen

$$\lambda_1 = 48,3 \text{ m}; \quad \lambda_2 = 3,30 \text{ m}; \quad \lambda_3 = 0,29 \text{ m}.$$

8. Das Dopplersche Prinzip¹⁾. Steht man am Bahndamm und hört das Pfeifen einer vorüberfahrenden Lokomotive, so gewinnt man den Eindruck, als ob

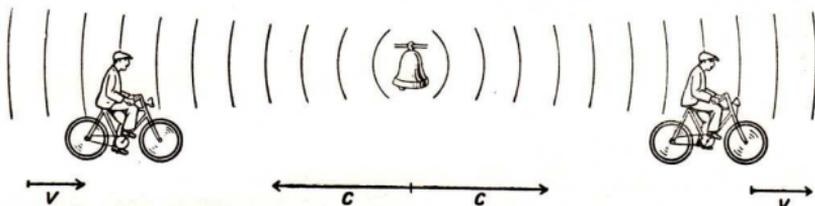


Abb. 207. Dopplersches Prinzip

die Pfeife, wenn sie sich nähert, einen höheren Ton erzeugt, als wenn sie sich entfernt. Im Augenblick des Vorüberfahrens schlägt die Tonhöhe um. Eine ähnliche Beobachtung macht man, wenn sich nicht die Tonquelle gegen den Beobachter, sondern der Beobachter sich gegen die Tonquelle bewegt. Die Höhe des wahrgenommenen Tones hängt also davon ab, ob sich der Abstand zwischen Beobachter und Schallquelle während des Tönens vergrößert oder verringert. Diese Erscheinung läßt sich aus der Wellennatur des Schalles erklären. In Abb. 207 stellt die Glocke eine ortsfeste Tonquelle dar, die Wellen von der Länge λ aussendet. Von ihr gehen die Schallwellen mit der Geschwindigkeit c aus. Ein Radfahrer, der sich nicht bewegt, vernimmt dann in jeder Sekunde

$$f = \frac{c}{\lambda} \text{ Schwingungen in einer Sekunde.}$$

Nähert er sich mit der Geschwindigkeit v , so nimmt er nicht f , sondern

$$f_1 = \frac{c+v}{\lambda} = f \cdot \left(1 + \frac{v}{c}\right) \text{ Schwingungen in einer Sekunde,}$$

1) Doppler, Christian, 1803–1853, Prag und Wien.

d. h. einen höheren Ton wahr. Entfernt er sich, so treffen in sein Ohr nur

$$f_2 = \frac{c-v}{\lambda} = f \cdot \left(1 - \frac{v}{c}\right) \text{ Schwingungen in einer Sekunde,}$$

d. h. er hört einen tieferen Ton.

Dieses Naturgesetz heißt **Dopplersches Prinzip**. Es besagt:

Die Frequenz eines Tones erscheint einem Beobachter größer, wenn die Entfernung zwischen ihm und der Tonquelle sich verringert, und kleiner, wenn sie sich vergrößert.

Aus dem Unterschied der Tonhöhe kann man einen Schluß auf die gegenseitige Geschwindigkeit v zwischen der Tonquelle und dem Beobachter ziehen. Für den Fall eines ruhenden Beobachters und einer bewegten Schall-

quelle gelten die Formeln $f_1 = \frac{1}{1 - \frac{v}{c}} \cdot f$ und $f_2 = \frac{1}{1 + \frac{v}{c}} \cdot f$. Für sehr

kleine Werte von $\frac{v}{c}$ besteht kein wesentlicher Unterschied zum ersten Fall.

Zur Übung: 1. Man berechne die Wellenlänge des Tones a' in Stahl ($c = 5300$ m/s), Blei ($c = 1300$ m/s) und Wasserstoff ($c = 1250$ m/s). – 2. Um wieviel Schwingungen höher wird der Ton a' einer Schallquelle wahrgenommen, wenn man sich ihr mit der Geschwindigkeit 20 m/s nähert?

§ 41. Interferenz von Seil-, Wasser- und Schallwellen



Abb. 208. Überlagerung zweier Wellenzüge

Wandern über einen Punkt einer Wasseroberfläche gleichzeitig zwei Wellenzüge, so erfährt er von jedem einen Antrieb zum Schwingen (Abb. 208). Er führt eine Schwingung aus, deren Elongation durch

die algebraische Summe der Elongationen beider Wellen bestimmt ist. Man sagt: Die Schwingungen überlagern sich.

1. Übereinanderlagerung gleicher Schwingungen. Wir betrachten zunächst den einfachen Fall, daß zwei Wellen gleicher Wellenlänge, gleicher Schwingungsweite und gleicher Fortpflanzungsgeschwindigkeit über den Punkt hinwegwandern. Sie mögen sich nur durch die Schwingungsphase unterscheiden. Ist der Phasenunterschied $\lambda/4$, so führt der Punkt Schwingungen aus, die durch die ausgezogene Wellenlinie in Abb. 209 gekennzeichnet sind. Ist der Phasenunterschied 0 oder λ , so schwingt er mit doppelter Schwingungsweite (Abb. 210). Ist der Phasenunterschied $\lambda/2$, so schwingt er überhaupt nicht (Abb. 211).

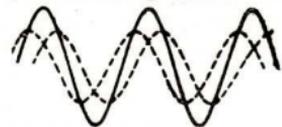


Abb. 209.

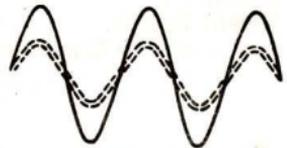


Abb. 210.

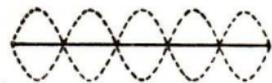


Abb. 211.

Überlagerte Schwingungen

2. Übereinanderlagerung ungleicher Schwingungen. Auch bei überlagerten Schwingungen kann man, ähnlich wie beim Stimmgabelversuch, den schwingenden Punkt seine Lage selbst aufschreiben lassen. Man erhält dann häufig recht verwickelt aussehende Kurven. Abb. 212 zeigt derartige Schwingungen eines Sandpendels (Teil I, § 67). Die Schwingungen einer Metallsaite kann man aufzeichnen, wie es in Teil I, § 1 beschrieben wurde. Die dabei entstehenden Kurven (Teil I, Abb. 8) weichen von den Sinuslinien (Abb. 205) erheblich ab. Sie kommen dadurch zustande, daß außer dem Grundton noch Obertöne in verschiedener Stärke mitschwingen. Abb. 21 und 35 in Teil I zeigen Aufzeichnungen eines Geigentones und der menschlichen Stimme. Sie sind mit Hilfe eines Oszillographen (§ 23) gewonnen. Die unter Abb. 21 in Teil I beigefügte Tabelle gibt an, in welchem Maße die ersten 15 Obertöne an den Schwingungen beteiligt sind.

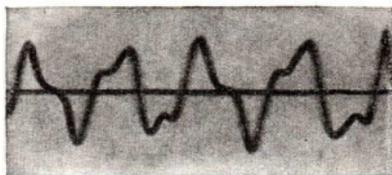


Abb. 212. Überlagerte Schwingungen eines Sandpendels

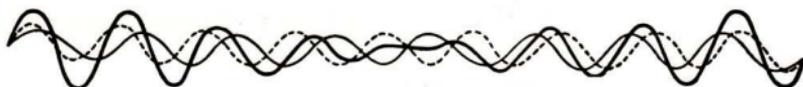


Abb. 213. Schwebung

Schwingungen, die sich in der Schwingungsweite und in der Schwingungsdauer nur wenig unterscheiden, erzeugen bei der Übereinanderlagerung sog. **Schwebungen**. Man kann sie beim Stimmen von Saiteninstrumenten wahrnehmen. Werden zwei Saiten angeschlagen, die im Ton nur wenig voneinander verschieden sind, so ändert sich die Tonstärke in raschem Wechsel. Abb. 213 deutet an, wie die Schwingungsweite einer durch derartige Überlagerung entstandenen Schwingung sich mit der Zeit ändert. Die Anzahl der Tonstärkenwechsel je Sekunde ist gleich der Differenz der Schwingungszahlen. Ist diese Differenz groß genug, so hört man einen neuen Ton, den Differenzton. Ertönen z. B. *e* und *g* gleichzeitig, so vernimmt man einen Ton, der zwei Oktaven tiefer liegt als *c*. Abb. 214 zeigt die durch die Schwingungen zweier Stimmgabeln erzeugten Schwebungen.

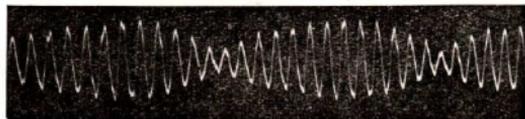


Abb. 214. Schwebungen bei zwei Stimmgabeltönen

3. Interferenz von Wasserwellen. Wie sich Schwingungen, die auf ein einzelnes Teilchen wirken, zu einer einzigen Schwingung zusammensetzen, so erzeugen

auch zwei Wellen, die sich in demselben Körper ausbreiten, eine einzige Wellenbewegung.

Die Überlagerung zweier Wellenzüge nennt man **Interferenz**.

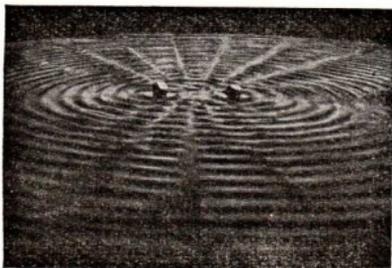


Abb. 215. Interferenz zweier Systeme von Kreiswellen auf einer Wasseroberfläche

länge versetzt. An allen Orten der Oberfläche, in denen Wellen mit einem Phasenunterschied von $\frac{\lambda}{2}$, $\frac{3\lambda}{2}$, $\frac{5\lambda}{2}$ usw. eintreffen, bleiben die Wasserteilchen in Ruhe (Abb. 211). An anderen Orten, wo ihr Phasenunterschied λ , 2λ , 3λ usw. beträgt, schwingen sie besonders heftig (Abb. 210). Da der geometrische Ort aller Punkte, deren Abstände von zwei festen Punkten um denselben Betrag verschieden sind, eine Hyperbel ist, liegen die Orte der Ruhe auf Hyperbeln, deren Brennpunkte die Erregungsstellen der Wellen sind.

4. Interferenz von Seilwellen. Durch taktmäßiges Bewegen eines Schwinghebels S (Abb. 216) erzeugt man auf den beiden gleich langen Schrauben-

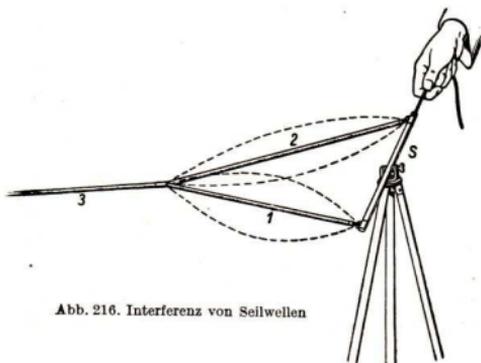


Abb. 216. Interferenz von Seilwellen

federn 1 und 2 Wellen, die mit entgegengesetzten Phasen beginnen, aber in der Frequenz und in der Schwingungsweite übereinstimmen. Diese treffen am gemeinsamen Ende aufeinander und setzen dann ihre Bewegung auf der Schraubenfeder 3 fort. Bei der Überlagerung heben sich die beiden Wellen auf und 3 bleibt in Ruhe.

5. Interferenz von Schallwellen. Auch die Interferenz von Schallwellen läßt sich in entsprechen-

der Weise wie bei den Wasserwellen zeigen. Man legt auf den Tisch zwei Telephone T_1 und T_2 in etwa 1 m Abstand voneinander und erzeugt in

beiden denselben Ton. Geht man in 2 bis 3 m Abstand an den Telephonen vorüber, so vernimmt man an gewissen Stellen den Ton stark und an anderen nur schwach (Abb. 217).

Zur Übung: 1. Man zeichne die Schwingungskurve eines Punktes, der durch zwei gleichgerichtete Wellen bewegt wird, deren Wellenlängen und Schwingungsweiten sich wie 1 : 2 verhalten. Zu Beginn sei die Phasendifferenz 0. — 2. Man führe dieselbe Aufgabe für zwei Wellen durch, deren Länge sich wie 1 : 3 und deren Schwingungsweiten sich wie 1 : 2 verhalten. — 3. Von zwei um 8 cm voneinander entfernten Punkten, die in gleicher Phase schwingen, gehen Wellen mit gleicher Schwingungsweite aus. Die Wellenlänge betrage 2 cm. Man gebe die Lage der Ruhepunkte durch Zeichnung an.

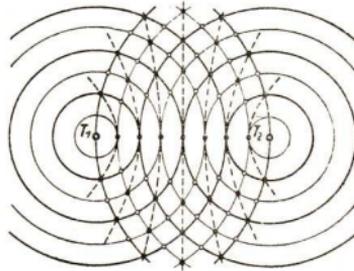


Abb. 217. Interferenz von Schallwellen

§ 42. Die Reflexion der Seil-, Wasser- und Schallwellen. Stehende Wellen

1. Die Reflexion einer Welle. Wir haben in § 39 gesehen, daß die Impulse, die sich durch einen Stoff ausbreiten, an der Grenzfläche zurückgeworfen werden. Was für den einzelnen Impuls gilt, trifft auch für die regelmäßig aufeinanderfolgenden Impulse zu, die bei einer Wellenbewegung auftreten. Wie ein Impuls verschieden reflektiert wird, je nachdem ob er auf eine feste oder nachgiebige Wand trifft, so wird auch eine Welle verschieden zurückgeworfen, je nachdem ob die Grenze, gegen die sie anläuft, nachgiebig oder starr ist. In Abb. 218 ist angedeutet, wie sich eine Welle verhält, die auf eine nachgiebige

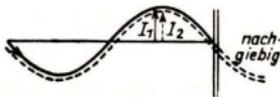


Abb. 218. Reflexion von Wellen an einer nachgiebigen Wand

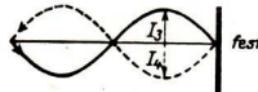


Abb. 219. Reflexion von Wellen an einer festen Wand

Wand trifft. Die in der Grenzfläche befindlichen Teile schwingen voll aus, dann erst kehrt die Welle um, weil die Reihe der schwingenden Teile zu Ende ist, und läuft ohne Änderung der Phase in entgegengesetzter Richtung zurück ($I_2 = I_1$). Trifft die Welle jedoch gegen eine starre Wand (Abb. 219), so kehrt der Impuls sofort um. Seine Schwingungsrichtung ist entgegengesetzt zu vorher ($I_4 = -I_3$). Die geschilderte Erscheinung kann man gut an Seilwellen beobachten. Wir knüpfen an das eine Ende einer Schraubenfeder einen Faden und befestigen diesen an einen Haken (Abb. 220). Erzeugt man nun am anderen Ende eine Querwelle, so kann man deutlich erkennen, wie diese an der Übergangsstelle von der Feder zum Faden wie an einer nachgiebigen Wand in gleicher Phase reflektiert wird. Entfernt man

den Faden, so wird die ankommende Welle an der festen Wand mit entgegengesetzter Phase reflektiert (Abb. 221). Aus den Versuchen ergibt sich:

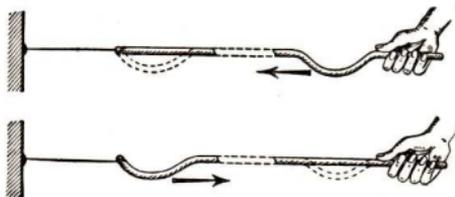


Abb. 220. Reflexion einer Halbwelle an einem freien Ende

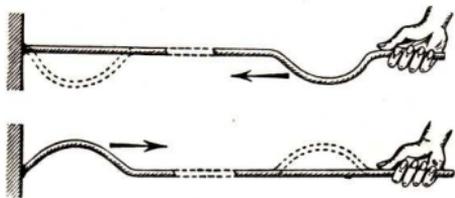


Abb. 221. Reflexion einer Halbwelle an einer festen Wand

An einer nachgiebigen Wand wird eine Welle in gleicher Phase, an einer starren Wand mit entgegengesetzter Phase, also mit einem Phasensprung oder einer Phasenverzögerung von $\frac{\lambda}{2}$ zurückgeworfen.

2. Interferenz zwischen auftretender und reflektierter Welle. Stehende Seilwellen. Trifft eine Welle senkrecht auf eine Wand, so wird sie senkrecht zur Wand zurückgeworfen und interferiert mit der zurückgeworfenen Welle.

Bei schrägem Auftreffen auf die Wand wird die Welle unter demselben Winkel gegen die Wand zurückgeworfen. Die

dabei an Wasserwellen auftretenden Interferenzerscheinungen sind z. B. in Abb. 236 zu erkennen.

Wir betrachten die Interferenz zwischen der ankommenden und reflektierten Welle bei senkrechtem Auftreffen an einem Beispiel. Wird eine lange Schraubenfeder (Abb. 222), die in *B* befestigt ist, in *A* auf und ab bewegt, so schreiten längs der Feder Wellen fort. Diese werden in *B* reflektiert. Die beiden Wellen interferieren. Durch die Interferenz wird die Bewegung der schwingenden Teile der Schraubenfeder geändert. Wenn das Zeitmaß der

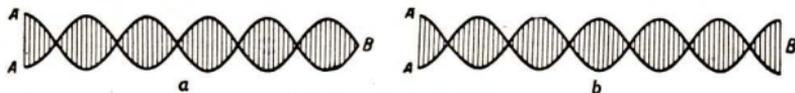


Abb. 222. Stehende Seilwellen

Bewegung passend gewählt wird, gibt es Teile, die dauernd in Ruhe bleiben, und Teile, die heftig schwingen. Abb. 222 a zeigt die Schwingungsvorgänge, wenn die Welle am festen Ende reflektiert wird. Abb. 222 b stellt sie dar, wenn das Ende frei schwingen kann. Fortschreitende Wellen sind nicht mehr zu beobachten. Die Welle bleibt gleichsam an Ort „stehen“. Man nennt die zustande kommenden Wellen „stehende Wellen“.

Stehende Wellen können sich auch bilden, wenn beide Enden der Feder (wie bei einer Saite) fest sind.

Stehende Wellen treten auf, wenn eine Welle an einer Grenzfläche zurückgeworfen wird und mit der zurückgeworfenen Welle interferiert.

Die Stellen der Ruhe heißen **Schwingungsknoten**, die Stellen der heftigsten Bewegung **Schwingungsbäuche**. Während in einer fortschreitenden Welle die Teilchen nacheinander durch die Ruhelage schwingen und ausnahmslos dieselbe Schwingungsweite besitzen, schwingen die Teilchen einer stehenden Welle zwischen benachbarten Knoten in gleicher Phase, besitzen aber sehr verschiedene Schwingungsweiten.

Der Abstand zweier benachbarter Knoten einer stehenden Welle beträgt eine halbe Wellenlänge.

Abb. 223 zeigt, wie zwei gegen-einander laufende Seilwellen, deren Wellenlänge gleich der Hälfte der Seillänge ist, sich zu einer stehenden Welle gleicher Länge zusammensetzen. Die Einzelbilder entsprechen Bewegungszuständen, die im Abstand von $\lambda/4$ aufeinander folgen. Aus Abb. 224 erkennt man den Unterschied der Schwingungszustände einer fortschreitenden und einer stehenden Welle.

Stehende Wellen sind vorzüglich dazu geeignet, die Längen von Wellen zu messen. Man bestimmt den Abstand zweier aufeinanderfolgender Schwingungsknoten und erhält so die halbe Wellenlänge.

Vor einer festen Wand liegen die Knoten im Abstand

$$0, \frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \dots$$

Vor einer nachgiebigen Wand liegen sie im Abstand

$$\frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4}, \dots$$

Anstatt die Seilwellen durch taktmäßiges Bewegen der Hand zu er-

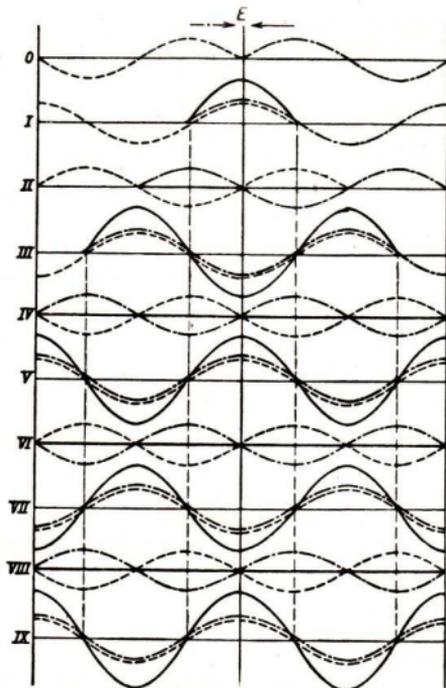


Abb. 223. Bildung einer stehenden Welle

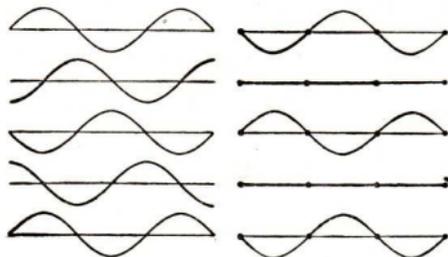


Abb. 224. Schwingungszustände einer fortschreitenden und einer stehenden Welle

zeugen, kann man auch als Erreger einen mit der nötigen Energie schwingenden Körper benutzen, z. B. den Klöppel einer elektrischen Klingel. In der Abb. 225 ist das eine Ende eines Gummiseiles an der unteren Klemme einer mit Wechselstrom betriebenen Säge befestigt, das

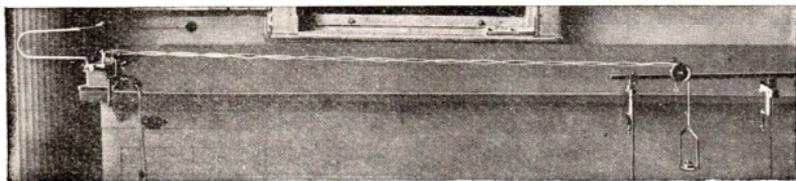


Abb. 225. Stehende Seilwellen nach Melde

andere führt über eine verschiebbare Rolle und kann durch Gewichte belastet werden. Bei der hohen Frequenz von 50 Hz erhält man eine große Zahl stehender Wellen und kann ihre Länge daher recht genau messen. Der Gedanke des Verfahrens stammt von Melde.

Auch longitudinale Wellen erzeugen bei der Überlagerung der ankommenden mit der reflektierten Welle stehende Wellen. Das kann man mit einer Schraubenfeder (Abb. 226) nachweisen, die man in rascher Folge durch Längsimpulse erregt.



Abb. 226.
Stehende Welle bei longitudinaler Schwingung

3. Stehende Wellen in Stäben, Platten und im Innern von festen Körpern.

Wird ein elastischer Stab, der in allen Teilen frei schwingen kann, an einem Ende zu Querschwingungen erregt, so laufen transversale Impulse durch ihn hindurch. Sie werden an den Enden reflektiert, und es bilden sich stehende Wellen. Wenn der Stab so schwingt, wie es Abb. 22 in Teil I andeutet, so gibt er den Grundton. Die Länge l des Stabes ist dann gleich der Wellenlänge λ des Tones. Er besitzt zwei Schwingungsknoten. In dieser Weise schwingt z. B. die Stimmgabel (Teil I, Abb. 23).

Wird der Stab zu Längsschwingungen erregt, wie es Abb. 24 in Teil I zeigt, so schwingt er im Grundton. Die Wellenlänge dieses Tones ist gleich der doppelten Länge des Stabes $\lambda = 2l$.

In schwingenden Saiten wandern von der Stelle, an der die Saite erregt ist, nach beiden Seiten Impulse, die an den Enden wiederholt reflektiert werden und durch ihre Überlagerung den Grundton und die Obertöne erzeugen.

In schwingenden Platten treten verschiedene stehende Wellen auf, je nach der Lage der Stelle, an der die Schwingung erregt wird. Die Chladnischen Klangfiguren¹⁾ deuten an, wie sich die Knotenlinien über die Platte verteilen (vergleiche Teil I, § 5, Abb. 26). Auch im Innern elastischer Körper kann man stehende Wellen nachweisen. In Abb. 227 ist ein voller Glaszylinder durch Ultraschall (Teil I, § 9) zu radialen Schwingungen angeregt und in der Richtung der Achse von polarisiertem Licht (§ 50) durch-

1) Chladni, E. F. Friedrich, 1756–1827, Wittenberg.

strahlt worden. Dadurch können die Knotenstellen der entstandenen stehenden Wellen sichtbar gemacht werden. Die Frequenz betrug 1280 kHz.

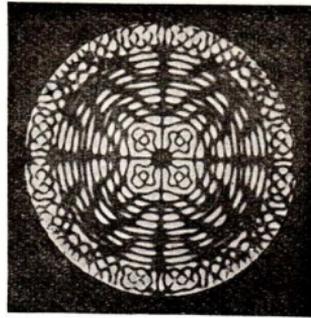


Abb. 227. Stehende Welle im Innern eines vollen Glaszylinders

4. Stehende Wellen in Luftsäulen. In einer Lippenpfeife wird der Ton dadurch erzeugt, daß ein Luftstrom (Abb. 228) gegen eine Schneide geblasen wird. Die Schneide verhält sich wie ein Körper, der sich rasch durch die Luft bewegt. Hinter ihr entsteht eine Wirbelstraße, in der die Wirbel gegeneinander versetzt sind. Der Luftstrom wechselt fortgesetzt seine Richtung, bald ist er mehr nach dem Innern der Pfeife, bald mehr nach außen gerichtet. Die regelmäßigen Impulse, die dabei auf die Luft ausgeübt werden, erzeugen Wellen. Diese Wellen werden am anderen Ende der Pfeife reflektiert und ergeben durch Interferenz mit den zu Anfang erzeugten Wellen stehende Wellen. An der Stelle der Erregung befindet sich stets ein Schwingungsbauch. Bei einer offenen Pfeife liegt am offenen Ende, an dem die ankommende Welle in gleicher Phase reflektiert wird,



Abb. 228. Entstehung von Schneidentönen

ebenfalls ein Schwingungsbauch. In einer gedeckten Pfeife wird die Welle am geschlossenen Ende mit entgegengesetzter Phase reflektiert. Hier bildet sich wie bei den stehenden Seilwellen am festen Ende ein Schwingungsknoten.

Bei einer offenen Pfeife tritt der einfachste Fall dann ein, wenn sich ein Knoten in der Mitte ausbildet. Dann gibt die Pfeife ihren tiefsten Ton, den Grundton (Abb. 229c). Seine Wellenlänge λ ist dann gleich der doppelten Länge l der Pfeife $\lambda = 2l$.

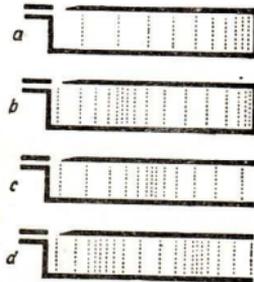


Abb. 229a—d.
Stehende Wellen in Pfeifen

Durch die Art des Anblasens kann man es auch erreichen, daß sich im Innern zwei Knoten ausbilden. Diese liegen dann auf $\frac{1}{4}$ und $\frac{3}{4}$ der Länge der Pfeife (Abb. 229d). Die Pfeife gibt dann den ersten Oberton. Seine Wellenlänge ist $\lambda_1 = l$. Er ist also die höhere Oktave des Grundtones. Bilden sich im Innern drei Knoten aus, dann liegt der erste $\frac{1}{3} l$ von der Lippe entfernt und der gegenseitige Abstand zweier aufeinanderfolgender Knoten ist $\frac{1}{3} l$. Die Wellenlänge λ_2 dieses Tones ist also $\lambda_2 = \frac{2}{3} l$. Die Schwingungszahlen von Tönen verhalten sich umgekehrt wie ihre Wellenlängen. Eine Fortsetzung der Überlegung zeigt, daß

bei einer offenen Pfeife die Schwingungszahlen des Grundtones und der Obertöne sich wie $1 : 2 : 3 \dots$ verhalten, also die harmonische Tonfolge ergeben (vgl. Teil I, § 4).

Eine gedeckte Orgelpfeife gibt ihren tiefsten Ton, wenn nur ein Schwingungsknoten ausgebildet ist (Abb. 229a). Die Wellenlänge dieses Grundtones ist dann $\lambda = 4l$. Der erste Oberton entsteht, wenn sich im Innern noch ein Knoten bildet. Dieser liegt dann $\frac{1}{3}l$ vom offenen Ende entfernt (Abb. 229b). Die Wellenlänge des ersten Obertones ist dann $\lambda_1 = \frac{4}{3}l$. Für den nächsten Oberton würde sich ergeben $\lambda_2 = \frac{4}{5}l$.

Die Schwingungszahlen des Grundtones und der Obertöne einer gedeckten Pfeife verhalten sich demnach wie $1 : 3 : 5 \dots$. Es sind also von der harmonischen Tonfolge nur die ungeraden Töne vertreten. Will man mit einer gedeckten Pfeife denselben Grundton erzeugen wie mit einer offenen, so muß die offene doppelt so lang sein. Die Klangfarbe der beiden Töne ist aber verschieden, da bei der gedeckten Pfeife die geraden Töne der harmonischen Reihe fehlen.

Die Beziehungen zwischen den Grundtönen einer offenen und einer gedeckten Pfeife kann man auch durch einen einfachen Versuch veranschaulichen. Schlägt man mit der flachen Hand auf ein beiderseits offenes Papprohr, so hört man einen dumpfen Ton; entfernt man die Hand sofort nach dem Schlag, so hört man die höhere Oktave.

5. Bestimmung der Schallgeschwindigkeit durch Interferenzversuche. Wenn die Geschwindigkeit des Schalles in Luft bekannt ist, kann man seine Geschwindigkeit in festen Körpern und in anderen Gasen durch folgenden Interferenzversuch bestimmen, den Kundt¹⁾ erdacht hat, und der nach ihm benannt ist:



Abb. 230. Kundtsche Staubfiguren

In eine beiderseits offene Glasröhre R (Abb. 230) ragt ein Metallstab G , der in seiner

Mitte befestigt ist. Auf ihm ist eine Korkscheibe S festgekittet, die den lichten Raum der Glasröhre fast ganz ausfüllt. Die Länge des Luftraumes in der Röhre läßt sich durch einen Stempel K verändern. Reibt man den Stab am freien Ende mit einem Tuch, das durch Kolophonium rau gemacht ist, so wird er in Längsschwingungen versetzt und gibt einen Ton. Die Korkscheibe bewegt sich dabei in der Längsrichtung der Röhre hin und her. Im Luftraum der Röhre entstehen Wellen, die am anderen Ende reflektiert werden und nach dem Kork zurückwandern. Durch Anpassung der Länge des Luftraumes in der Röhre kann man es erreichen, daß sich stehende Wellen ausbilden. Sie werden durch eingelagertes Korkpulver sichtbar gemacht. Dieses bleibt an den Knotenstellen in Ruhe, während es an den Stellen der Bäuche in lebhaftere Bewegung gerät. Der Abstand zweier benachbar-

1) August Kundt (1838–1894), 1888–1894 Direktor des physikalischen Instituts in Berlin.

ter Knoten in der Röhre ist gleich der halben Schallwelle $\frac{\lambda_1}{2}$ in Luft. Die Länge l des Stabes entspricht $\frac{\lambda_2}{2}$, der halben Wellenlänge der Schallwelle im Stabe (vgl. oben). Da die Schwingungszahl f des Tones in der Luft und im Stab dieselbe ist, so ergibt sich

$$\begin{array}{l} \text{die Schallgeschwindigkeit in Luft zu } c_1 = \lambda_1 \cdot f, \\ \text{,, ,, im Stab zu } c_2 = \lambda_2 \cdot f. \end{array}$$

Es verhält sich also $c_1 : c_2 = \lambda_1 : \lambda_2$.

Zur Übung: Man bestimme die Schallgeschwindigkeit in Glas oder Messing. Als bekannt wird die Schallgeschwindigkeit in Luft $c_1 = 340$ m/s vorausgesetzt. Man findet für Glas etwa 5000 m/s, für Messing etwa 4000 m/s.

Ist die Schallgeschwindigkeit im Stab bekannt, so kann man ein Gas in die Röhre füllen und die Schallgeschwindigkeit in ihm bestimmen.

§ 43. Das Gesetz der Ausbreitung der Wellen, Huygenssches Prinzip

1. Die allseitige Koppelung. Unsere Versuche haben uns gezeigt, daß eine Welle, die in einem Punkt erregt wird, sich in einer Ebene kreisförmig und im Raum kugelförmig ausbreitet. Von dem Erregungszentrum schreiten die Wellenberge und Wellentäler in radialer Richtung fort.

Diese Art der Ausbreitung bedarf aber der Erklärung, wenn man berücksichtigt, daß alle Teile des Stoffes, durch den sich die Welle ausbreitet, genau so schwingen können wie das Teilchen im Mittelpunkt.

Sie sind mit allen Teilchen des Stoffes gekoppelt. Auch sie müßten daher in radialer Richtung Wellen aussenden. Nimmt man also auf einer Welle, die vom Punkt A aus (Abb. 231) um die Strecke r fortgeschritten ist, einige schwingende Teilchen A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 aus der großen Zahl der Teilchen heraus, so gehen von ihnen (und allen anderen) Wellen aus, die sich durchkreuzen müssen. Die ganze Oberfläche und der Raum müßten also mit unzähligen sich durchkreuzenden Wellen erfüllt sein. Wie ist es unter diesen Umständen möglich, daß die Welle um A weiterhin so fortschreitet, als ob die Teilchen nur mit A und nicht untereinander gekoppelt wären?

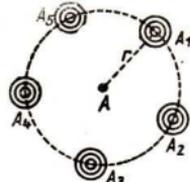


Abb. 231.
Allseitige Koppelung

2. Wellenflächen. Bevor wir diese Frage beantworten, sei folgendes vorausgeschickt. Wir wollen nicht mehr von Wellenbergen und Wellentälern sprechen, sondern von Linien und Flächen, auf denen die Teilchen der Materie in gleicher Phase schwingen. Geht von einem Punkte der Wasseroberfläche eine Welle aus, so liegen die Punkte gleicher Schwingungsphase auf einem Kreis um diesen Punkt. Breitet sich die Welle von einem Punkt im Innern eines homogenen Stoffes aus, so liegen die Punkte gleicher

Schwingungsphase auf Kugelflächen (Abb. 232). Ist das Wellenzentrum sehr weit entfernt, so können wir annehmen, daß bei Wellen, die sich im Raume ausbreiten, die Punkte gleicher Schwingungsphase nahezu in einer Ebene liegen (Abb. 232). Wir nennen den geometrischen Ort, auf dem die Punkte

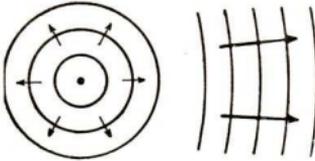


Abb. 232. Wellenflächen

gleicher Schwingungsphase liegen, die Wellenfläche und unterscheiden Kugelwellen und ebene Wellen.

Die Wellenflächen eines Wellenzuges sind Flächen, auf denen die schwingenden Teilchen in gleicher Phase schwingen.

Der Abstand zweier benachbarter Wellenflächen derselben Schwingungsphase ist gleich der Wellenlänge.

3. Das Huygenssche Prinzip. Eine Erklärung der Ausbreitung der Wellen unter Berücksichtigung der allseitigen Koppelung hat zuerst Huygens gegeben. Er ging von dem Schwingungszustand der Teilchen einer Wellenfläche K_1 aus. Alle Teilchen dieser Wellenfläche schwingen in gleicher Phase. Jedes sendet Wellen aus, die Huygens **Elementarwellen** genannt hat (Abb. 233). Diese Elementarwellen interferieren. Sie verstärken einander, wo gleichgerichtete Schwingungszustände aufeinandertreffen, und schwächen sich, wo die Richtungen der Schwingungen entgegengesetzt zueinander gerichtet sind. Zeichnet man möglichst viele solcher Elementarwellen auf, so findet man, daß sie sich nur in einer Richtung ausnahmslos verstärken,

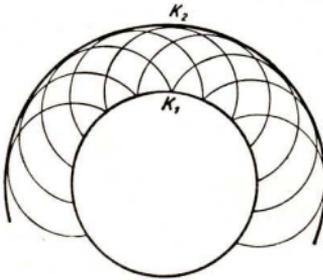


Abb. 233. Elementarwellen und Frontwelle

nämlich in der zur Wellenfläche K_1 senkrechten Richtung. In jeder anderen Richtung stören sich die Elementarwellen bis zur vollen gegenseitigen Aufhebung, weil dort Elementarwellen jeder Phase aufeinandertreffen. Die Interferenz der Elementarwellen bewirkt also, daß in der Ausbreitungsrichtung nur eine einzige Wellenfläche zustandekommt, auf der alle Teilchen in gleicher Phase schwingen. Diese neue Wellenfläche ist die Fläche K_2 , die als Berührungsfläche die Elementarwellen einhüllt, die im gleichen Augen-

blick von der Wellenfläche K_1 ausgegangen sind. Die aus den Elementarwellen entstandene Wellenfläche hat Huygens **Frontwelle** genannt.

Was wir als Wasserwelle über die Oberfläche eines Wasserbeckens laufen sehen, ist also eine Frontwelle, die durch Interferenz derjenigen Elementarwellen entstanden ist, die in demselben Zeitpunkt von einer Wellenfläche ausgegangen sind.

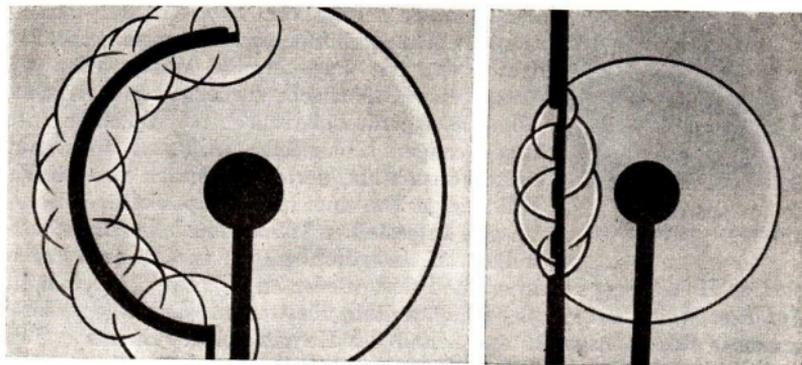


Abb. 234. Elementarwellen und Frontwelle bei Schallwellen nach Foley und Souder

Diese Erklärung der Ausbreitung der Wellen nennt man das **Huygensche Prinzip**. Wir bedienen uns seiner, um eine Reihe von weiteren Wellenerscheinungen zu klären.

Die Ausbildung der Elementarwellen und das Fortschreiten der Frontwelle kann man in besonderen Fällen bei Schallwellen sichtbar machen. In Abb. 234 ist in der Mitte durch den Knall einer elektrischen Entladung eine Schallwelle erzeugt. Es entsteht eine kugelförmige Frontwelle an den Stellen, wo sich die Bewegung ungestört ausbreiten kann. Auf der linken Seite trifft die Bewegung auf einen mit Löchern versehenen Schirm. Aus den Öffnungen dringen die Elementarwellen heraus. Ihre Einhüllende ist die Ergänzung der ungestörten Frontwelle auf der rechten Seite.

§ 44. Reflexion, Beugung und Brechung von Wasser- und Schallwellen nach dem Huygenschen Prinzip

1. Die Reflexion der Wellen. Fallen ebene Wellen auf eine ebene Grenzfläche, so werden sie reflektiert. Es gilt das Gesetz (Abb. 235):

Der Winkel, unter dem die Wellen an der Grenzfläche zurückgeworfen werden, ist gleich dem Winkel, unter dem sie auffallen.

An Wasser- und Schallwellen läßt sich dieses Gesetz leicht nachweisen. Abb. 236 zeigt eine photographische Aufnahme der Reflexion von

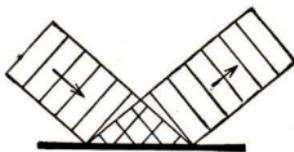


Abb. 235. Reflexion einer ebenen Welle.

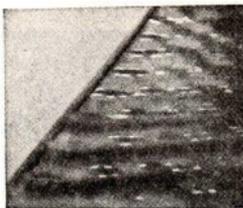


Abb. 236.
Reflexion von Wasserwellen

Wasserwellen an einer ebenen Grenzfläche. Die Wellen fallen schräg von vorn ein und werden schräg nach rechts hinten zurückgeworfen. Abb. 237 deutet an, wie kugelförmige Wasserwellen an einer ebenen Grenzfläche zurückgeworfen werden. Abb. 238 zeigt die Reflexion ebener Wellen an einer kugelförmigen Grenzfläche. Abb. 239 weist auf einen Versuch hin, der die Reflexion von Schallwellen zeigt. Von einer im Brennpunkt eines Hohlspiegels aufgestellten Taschenuhr fallen die Schallwellen auf einen Hohlspiegel, werden nach einem zweiten Hohlspiegel reflektiert und dort wieder im Brennpunkt vereinigt. Auf diese Weise läßt sich der Schall weithin übertragen. Wie sich das oben genannte Reflexionsgesetz auf Grund des Huygensschen Prinzips ergibt, ist in Abb. 240 erläutert. Ebene Wellen, die seitlich durch die Ebenen AA_1



Abb. 237. Reflexion einer Kugelwelle
an einer Ebene (Vgl. Abb. 234)

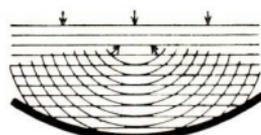


Abb. 238. Reflexion einer ebenen Welle
an einer kugelförmigen Fläche

und BB_1 abgegrenzt sind, fallen in der Richtung des Pfeiles a auf die Grenzfläche GG_1 zweier Medien. Wir betrachten nur die Erscheinungen im ersten Medium. Sobald der Wellenzug in A_1 auf die Grenzfläche auftrifft, geht von hier eine Elementarwelle aus, die sich halbkugelförmig ausbreitet. Ein wenig später geht von A_2 ebenfalls eine Elementarwelle aus, dann

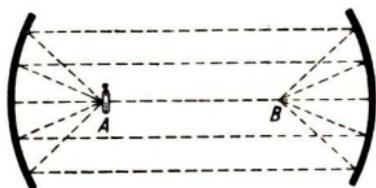


Abb. 239. Reflexion von Schallwellen

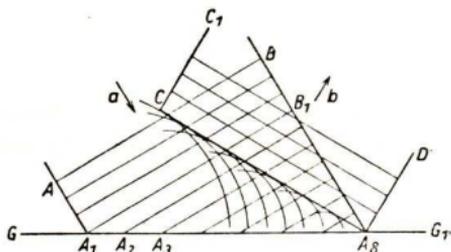


Abb. 240. Reflexion nach dem Huygenschen Prinzip

von A_3 und schließlich von A_8 . Auch alle dazwischenliegenden Punkte senden zu gegebener Zeit Elementarwellen aus. In dem Augenblick, in dem von A_8 die Elementarwelle ausgeht, ist die von A_1 ausgegangene Elementarwelle schon weit fortgeschritten. Ihr Radius ist dann gleich der Strecke B_1A_8 , denn sie breitet sich mit derselben Geschwindigkeit aus, mit

der die Welle gegen die Grenzfläche wandert. Die Radien der von A_1, A_2, A_3, \dots ausgegangenen Elementarwellen sind entsprechend dem späteren Beginn der Ausbreitung kleiner. Alle Elementarwellen erreichen die Ebene CA_3 in der gleichen Phase. Hier entsteht die Frontwelle, die in der Richtung des Pfeiles b fortschreitet. Zwischen CC_1 und A_3D_1 schreitet der reflektierte Wellenzug vorwärts. Die Abbildung ist symmetrisch in Bezug auf das Mittellot von A_1A_3 ; hieraus ergibt sich, daß der Einfallswinkel der Welle gleich dem Reflexionswinkel ist.

2. Die Beugung der Wellen. Es ist eine allgemein bekannte Erscheinung, daß man den Schall auch dann vernimmt, wenn sich ein Hindernis zwischen der Schallquelle und dem Ohr befindet. Um das Verhalten der Schallwellen in einem solchen Fall näher zu untersuchen, bringen wir ein Telephon T in einen schalldichten Kasten (Abb. 241). Besitzt der Kasten gegenüber dem Telephon ein Loch, so dringen die Schallwellen nach außen. Würden sie sich streng radial ausbreiten, so könnte man den Ton nur in der Richtung der eingezeichneten Wellen hören. Man vernimmt ihn aber auch seitlich in A oder in B , wohin der Schall bei geradliniger Ausbreitung überhaupt nicht dringen kann. Die Schallwellen müssen also auch zur Seite abgelenkt worden sein.

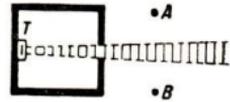


Abb. 241. Beugung von Schallwellen

Mit Wasserwellen kann man einen entsprechenden Versuch ausführen. Man läßt geradlinige Wasserwellen auf eine Grenzfläche fallen, die ein Loch besitzt. Durch das Loch treten die Wellen hindurch (Abb. 242). Sie breiten sich überall in dem Raum hinter der Grenzfläche nicht als geradlinige Wellen weiter aus, sondern als kreisförmige. Abb. 243 zeigt diese Umwandlung der Wellen schematisch durch Angabe der Strahlen. Die Erklärung der Erscheinung ist dadurch gegeben, daß von den schwingenden Teilchen der Öffnung Elementarwellen ausgehen, die sich kreisförmig ausbreiten. Dabei wird die enge Öffnung zum Mittelpunkt eines neuen kreisförmigen Wellenzuges. Die neu entstandene Welle ist von der Form des einfallenden Wellenzuges unabhängig.

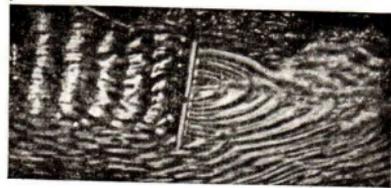


Abb. 242. Beugung von Wasserwellen

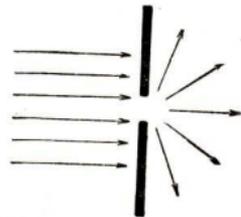


Abb. 243. Beugung nach dem Huygensschen Prinzip

Läßt man geradlinige Wasserwellen auf ein Hindernis fallen, an dem sie beiderseits vorüberschreiten können, dann findet man die in Abb. 244 wiedergegebene Erscheinung.

Man erkennt, daß die Wellenbewegung auch in den Raum eingedrungen ist, der bei geradliniger Ausbreitung der Welle gegen die Bewegung abgeschirmt sein müßte. Ein Teil der Wellen ist also aus der ursprünglichen Richtung abgelenkt. Man bezeichnet diese Erscheinung als **Beugung der Wellen**.

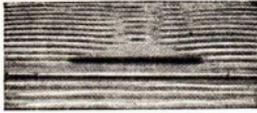


Abb. 244. Beugung von Wasserwellen an einem Hindernis

Um uns den Vorgang verständlich zu machen, betrachten wir die gerade Linie, in der das Hindernis liegt. Wenn die auftreffende Welle diese Gerade erreicht, gehen von allen ihren Punkten, die außerhalb des Hindernisses liegen, Elementarwellen aus. In größerer seitlicher Entfernung vom Hindernis liegen die Elementarwellen symmetrisch zu den Strahlen der ankommenden Welle. Sie überlagern sich daher wie bei der ungestörten Welle. Am Rande des Hindernisses ist die Anordnung der Elementarwellen rechts und links vom Strahl

der auftreffenden Welle verschieden, da von den Stellen des Hindernisses selbst keine Elementarwellen ausgehen. Dementsprechend ist auch die Überlagerung verändert, und es bildet sich eine Wellenfront, die von der ungestörten abweicht.

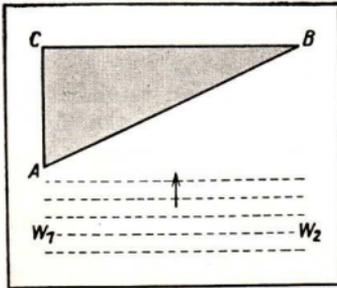


Abb. 245. Schema der Brechung von Wasserwellen

ihrer Richtung abgelenkt, wenn sie schräg auf die Grenzfläche auftreffen. Die Ausbreitungsrichtung besitzt an der Übertragungsstelle einen Knick. Daher spricht man von der **Brechung der Wellen**. An Wasserwellen können wir den Brechungsvorgang in folgender Weise zeigen. Wir legen (Abb. 245) eine Glasscheibe ABC derart, daß sie dicht unter der Wasseroberfläche liegt. Erzeugen wir nun längs W_1W_2 geradlinige Wellen

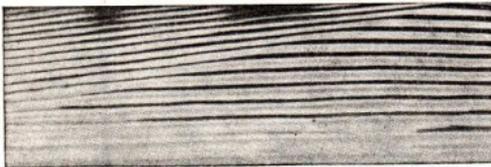


Abb. 246. Brechung von Wasserwellen

im Becken und treffen diese in der Richtung des Pfeiles schräg auf das niedrige Wasser, das über der Glasscheibe steht, so ändern die Wellen ihre Bewegungsrichtung. Sie werden „gebrochen“. Ihre Wellenlänge wird kürzer, wie aus Abb. 246 hervorgeht, die den Vorgang zeigt. Aus der Veränderung

3. Die Brechung der Wellen. Breiten sich Wellen durch Stoffe aus, in denen sie mit verschiedener Geschwindigkeit fortschreiten, so werden sie beim Übergang von dem einen in den anderen Stoff aus

der Wellenlänge λ geht hervor, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit c der Wellen im seichten Wasser geringer als im tiefen ist, denn die Frequenz f bleibt beim Übergang erhalten, und es ist stets $c = f \cdot \lambda$. Wir können den Vorgang nach dem Huygensschen Prinzip erklären. In der Abb. 247 ist angenommen, daß ebene Wellen mit der Wellenfront AC und der Geschwindigkeit c_1 an der ebenen Trennungsfläche CB in der Richtung des Pfeiles in ein Medium mit geringerer Fortpflanzungsgeschwindigkeit c_2 einfallen. An der Grenzfläche bilden sich im zweiten Medium Elementarwellen, zuerst vom Punkt C , zuletzt vom Punkt B aus. Nehmen wir als Verhältnis der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten 3 : 2 an, dann hat sich, während die ankommende Welle von A bis B fortschreitet, von C aus eine kugelförmige Elementarwelle gebildet, deren Radius $\frac{2}{3} AB$ beträgt. Entsprechendes gilt von den zwischen C und B liegenden Punkten der Grenzfläche.

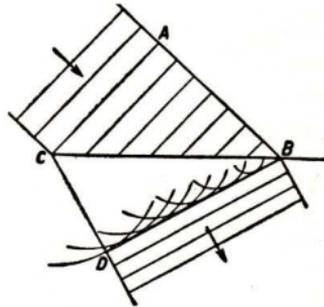


Abb. 247. Brechung nach dem Huygensschen Prinzip

Die Einhüllende aller Elementarwellen ist die neue Wellenfront BD . Sie ist nicht mehr parallel zu AC . Die Strahlen der einfallenden Welle erfahren also eine Brechung. Es ist $AB : CD = c_1 : c_2$. Zeichnet man in C das Einfallslot und führt den Einfallswinkel α und den Brechungswinkel β ein, dann ergibt sich aus der Abb. 248 $\sphericalangle ACB = \alpha$ und $\sphericalangle CBD = \beta$. Ferner $AB = BC \cdot \sin \alpha$ und $CD = BC \cdot \sin \beta$, also $AB : CD = \sin \alpha : \sin \beta$ und schließlich

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2}.$$

Das Verhältnis der Sinus von Einfallswinkel und Brechungswinkel ist gleich dem Verhältnis der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der Wellenbewegungen in den beiden Medien, also unabhängig von der Richtung der einfallenden Welle.

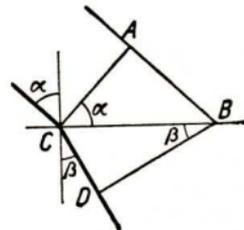


Abb. 248. Brechungsgesetz

1. Zur Übung: Zeichne für kreisförmige und ebene Wellenflächen, die auf die Innenfläche einer Kugel treffen, wie die reflektierte Welle nach dem Huygensschen Prinzip entsteht (vgl. Abb. 234). — 2. Führe dieselbe Aufgabe für das Auftreffen auf die Außenwand der Kugel durch. — 3. Ebene Wellen treffen unter 50° gegen das Lot auf die Grenzfläche zweier Medien, in denen die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten sich wie 3 : 2 verhalten. Zeichne die gebrochene Welle.

B. Lichtwellen

§ 45. Die Auffassungen vom Wesen des Lichtes

Zur Übertragung des Lichtes ist kein Stoff erforderlich wie z. B. beim Schall. Die Frage nach dem Wesen des Lichtes hat die Forscher von jeher lebhaft beschäftigt. Zwei verschiedene Auffassungen haben sich lange Zeit gegenübergestellt, ohne daß eine Entscheidung zwischen ihnen getroffen werden konnte.

1. Die Korpuskulartheorie des Lichtes von Newton. Der englische Physiker Isaak Newton hat im Jahre 1704 eine Auffassung vom Wesen des Lichtes veröffentlicht, die er bereits 30 Jahre vorher erdacht und durch viele Versuche nachgeprüft hatte. Er nahm an, daß das Licht aus sehr feinen Masseteilchen bestünde, die so klein wären, daß sie durch Flüssigkeiten wie Wasser und feste Körper wie Glas, ohne aufgehalten zu werden, hindurchgingen. Man nennt diesen Erklärungsversuch daher Korpuskulartheorie¹⁾.

Die Farben des Lichtes erklärte Newton durch Unterschiede in der Größe der Lichtteilchen. Rotes Licht, nahm er an, bestehe aus den größten, gelbes, grünes, blaues Licht aus feineren und violettes Licht aus den feinsten Lichtteilchen. Eine Mischung aus Lichtteilchen der verschiedenen Farben ergäbe weißes Licht.

Die Tatsache, daß das Licht an einem Spiegel nach dem Reflexionsgesetz reflektiert wird, erklärte er durch die Annahme, daß die von der Lichtquelle mit großer Geschwindigkeit ausgesandten Lichtteilchen elastisch seien und wie elastische Stahlkugeln, die auf eine Glasplatte auftreffen, unter demselben Winkel vom Spiegel zurückgeworfen würden, unter dem sie einfallen. Für die Brechung des Lichtes hatte er folgende Erklärung: Treten Lichtteilchen aus Luft in Glas schief zur Grenzfläche ein, so werden sie nach dem Massenanziehungsgesetz beim Übertritt von dem Glas stark angezogen, weil dann die Entfernung zwischen ihnen und den Glasteilchen sehr klein wird. Dadurch vergrößert sich die zur Grenzfläche senkrechte Komponente der Geschwindigkeit, während die zu ihr parallele Komponente unverändert bleibt und die Lichtteilchen setzen ihren Weg im Glas geradlinig in anderer Richtung als vorher fort, so daß der Brechungswinkel kleiner als der Einfallswinkel ist. Als Resultierende der beiden Komponenten ergibt sich dann im Glas eine größere Geschwindigkeit als vorher in der Luft. So folgt aus Newtons Auffassung vom Wesen des Lichts, daß die Lichtgeschwindigkeit in Glas größer als in der Luft sei. Darüber, ob es so wäre, wußte man zur Zeit Newtons aber noch nichts.

2. Die Wellentheorie des Lichtes von Huygens. Im Gegensatz zu Newton vertrat der holländische Forscher Christian Huygens 1690 die Auffassung,

1) corpusculum (lat.) = Körpchen.

daß sich das Licht genau so verhält, als ob es eine Wellenbewegung ähnlich wie der Schall wäre. Er wußte natürlich, daß der Schall nur durch einen Körper und das Licht auch durch den leeren Raum übertragen wird. Er war sich weiterhin darüber klar, daß im leeren Raum etwas sein müsse, das schwingen kann, sonst können sich keine Wellen in ihm ausbreiten. Daher nahm er an, der leere Raum sei mit einem äußerst feinen Stoff, dem Äther, ausgefüllt. Dem Äther schrieb er folgende Eigenschaften zu: Er durchdringe alle Körper. Er erfülle die ganze Welt. Sein Gewicht sei nicht feststellbar. In ihm breiteten sich Stöße und Schwingungen durch Zusammenstoß der Ätherteilchen wie in einem Gas aus. Ein glühender Körper wirkt auf den Äther nach der Auffassung von Huygens wie ein Tonerreger auf die Luft. Er versetzt ihn in Schwingungen, die wir als Licht empfinden, wenn sie in unser Auge dringen. Es war eine kühne Theorie, die Huygens entwarf, denn wenn man die Ausbreitung des Schalles in der Luft und die Ausbreitung des Lichtes miteinander vergleicht, so scheinen uns auf den ersten Blick die Merkmale, in denen sie übereinstimmen, nicht sehr zahlreich zu sein, weil sich das Licht in viel strengere Maße geradlinig ausbreitet als der Schall. Huygens hat aber in aller Gründlichkeit die Ausbreitung von Wellen in einem Stoff mit allseitig gekoppelten Teilchen untersucht und die Reflexion, die Brechung, die Beugung, die Interferenz, des Lichtes genau so erklärt, wie wir oben diese Erscheinungen bei Wasser- und Schallwellen erklärt haben. Er konnte also ebenfalls zeigen, daß der Einfallswinkel des Lichtes gleich dem Reflexionswinkel sein müsse. Er konnte begründen, daß das Licht an der Grenzfläche von Luft und Glas gebrochen werde, und folgerte aus seiner Theorie, daß die Geschwindigkeit des Lichtes in Glas kleiner als in Luft sei, denn nur dann konnte die Richtung der Lichtwellen im Glas einen kleineren Winkel mit dem Einfallslot bilden als die Richtung der einfallenden Wellen.

3. Die Entscheidung zwischen beiden Auffassungen. Jede dieser beiden Auffassungen vom Wesen des Lichtes hatte ihre Vorzüge. Jede hatte auch hinsichtlich der Gesamtheit der optischen Erscheinungen ihre Mängel. Der tiefe Eindruck, den Newtons Entdeckung des Gravitationsgesetzes und seine Farbenlehre auf seine Zeitgenossen und die Nachwelt ausübte, brachte es mit sich, daß man mehr als ein Jahrhundert lang Newtons Auffassung für zutreffender hielt als die Auffassung von Huygens. Die experimentelle Entscheidung zwischen beiden Theorien fiel erst im Jahre 1854, als es dem französischen Physiker Foucault¹⁾ gelang, die geringere Geschwindigkeit des Lichtes in Wasser und Glas gegenüber dem Vakuum experimentell zu bestimmen. Sie fiel zugunsten der Wellenlehre des Lichtes aus, die schon vorher an Wahrscheinlichkeit gewonnen hatte, weil sich aus ihr die Beugungs- und Interferenzerscheinungen einfacher erklären lassen (§ 49).

1) Foucault, J. B. Léon, 1819–1868, Paris.

§ 46. Die Lichtgeschwindigkeit

1. Astronomische Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit. Aus astronomischen Beobachtungen ist man zuerst darauf aufmerksam geworden, daß sich das Licht mit einer gewissen Geschwindigkeit ausbreitet. In Teil I, § 11 ist besprochen worden, wie Olaf Römer die Geschwindigkeit des Lichtes durch Beobachtungen an den Jupitermonden bestimmt hat. Er fand:

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes beträgt $c = 300\,000$ km/s.

2. Irdische Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit. Im Jahre 1854 gelang es Foucault, die Lichtgeschwindigkeit in einem Raum von Zimmergröße zu messen (Abb. 249).

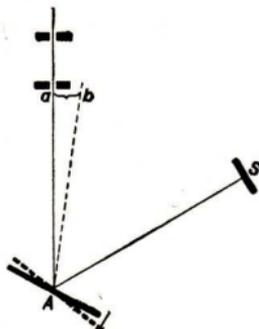


Abb. 249. Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit durch Foucault

Ein sorgfältig gerichteter Lichtstrahl fällt auf einen drehbaren Spiegel A und wird von ihm auf einen Spiegel S zurückgeworfen. In der Ruhe wirft S das Licht wieder nach A und der Spiegel A wieder nach a zurück. Hat sich der Spiegel A in der Zeit, in der der Strahl von A nach S und zurück bis A läuft, etwas gedreht, so wird der von S zurückkehrende Lichtstrahl nicht mehr nach a , sondern nach b reflektiert. Aus der Strecke ab und der Umdrehungszahl des Spiegels läßt sich die Zeit bestimmen, in der das Licht die Strecke AS hin und zurück durchläuft. Aus ihr und der Entfernung AS findet man dann die Lichtgeschwindigkeit.

Auch Foucault fand für die Geschwindigkeit des Lichtes $300\,000$ km/s.

3. Die Lichtgeschwindigkeit in durchsichtigen Körpern. Nach dem Verfahren Foucaults war es möglich, die Lichtgeschwindigkeit in einem durchsichtigen Körper zu bestimmen. Man brauchte nur auf dem Wege zwischen A und S , der wenige Meter groß war, den Körper einzulagern. Es gelang Foucault festzustellen, daß die Lichtgeschwindigkeit in einem durchsichtigen Körper kleiner als im leeren Raum ist. Er fand:

Die Geschwindigkeit des Lichtes beträgt im leeren Raum $300\,000$ km/s, in Luft fast genau so viel, in Wasser $225\,000$ km/s, in Glas $200\,000$ km/s.

Mit dieser Feststellung war erwiesen, daß die Annahme von Huygens über die Wellennatur des Lichtes richtig ist. Man sah daher von da ab die Huygenssche Auffassung vom Wesen des Lichtes als zutreffend an.

Hinsichtlich der Geschwindigkeit des Lichtes verschiedener Farbe stellte man fest:

Licht verschiedener Farbe besitzt im Vakuum dieselbe Geschwindigkeit.

4. Lichtgeschwindigkeit und Lichtbrechung. Wir wissen, daß ein Lichtstrahl beim Übergang von Luft in Glas gebrochen wird (Teil I, § 14).

Zwischen dem Einfallswinkel α und dem Brechungswinkel β besteht das nach Snellius benannte Gesetz (Abb. 250)

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n.$$

Wenn das Licht sich in Form von Wellen fortpflanzt, dann ist nach der Theorie von Huygens (§ 44) $\sin \alpha : \sin \beta = c_1 : c_2$, folglich

$$n = \frac{c_1}{c_2};$$

d. h. das optische Brechungsverhältnis für zwei Stoffe ist gleich dem Verhältnis der Geschwindigkeiten des Lichtes in den Stoffen.

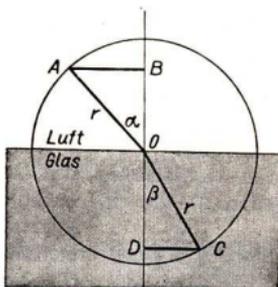


Abb. 250. Brechungsgesetz

Aus der Wellentheorie des Lichtes und den Versuchen von Foucault ergibt sich

$$\text{für Luft/Wasser: } n = \frac{300000}{225000} = \frac{4}{3}; \quad \text{für Luft/Glas: } n = \frac{300000}{200000} = \frac{3}{2}.$$

Durch unmittelbare Versuche hatten wir früher unabhängig von jeder Theorie genau dieselben Werte gefunden (Teil I, § 14).

Die Wellentheorie des Lichtes ist also im besten Einklang mit den beobachteten Tatsachen der Brechung des Lichtes. Sie zeigt darüber hinaus, daß der Vorgang der Brechung des Lichtes nur ein besonderer Fall der Brechung von Wellen ist.

Der Mathematiker Fermat hat für das Reflexionsgesetz und das Brechungsgesetz des Lichtes eine kurze Ausdrucksform gefunden:

Der Lichtstrahl schlägt bei der Reflexion und bei der Brechung stets den Weg ein, der ihn in der kürzesten Zeit von der Ausgangsstelle zum Ziel führt.

Zur Übung: 1. Wie groß ist die Entfernung, die das Licht in einem Jahre im leeren Raum zurücklegt? – 2. Wie groß ist der Grenzwinkel der Totalreflexion bei Glas ($n = 1,7$), Wasser ($n = 1,33$) (Teil I, § 14)? – 3. Welche Umlaufzahl muß der Spiegel im Foucaultschen Versuch (Abb. 249) besitzen, wenn $AS = 5$ m, $Aa = 8$ m beträgt, und eine Ablenkung von a bis b um 1 mm eintritt?

§ 47. Die Wellenlänge des Lichtes

1. Der Fresnelsche Spiegelversuch. Etwa 120 Jahre nach der Veröffentlichung der Lichttheorien durch Newton und Huygens führte der französische Physiker Fresnel¹⁾ einen Versuch aus, der deutlich die Wellennatur des Lichtes erweist und gestattet, die Wellenlänge des Lichtes zu bestimmen.

1) Fresnel, Augustin Jean, 1788–1827, Frankreich.

Fresnel ließ Licht aus einem schmalen Spalt L auf zwei ebene Spiegel SS_1 und SS_2 fallen, die nur sehr wenig gegeneinander geneigt waren (Abb. 251).

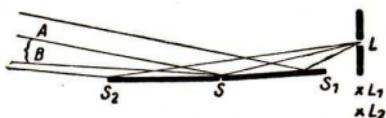
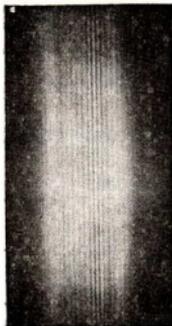


Abb. 251. Fresnelscher Spiegelversuch

Dadurch erreichte er, daß in den Raum SAB von beiden Spiegeln her Licht gelangte. Er erwartete, daß durch die Überlagerung eine größere Helligkeit als zu beiden Seiten des Raumes auftreten würde. Stellte er bei AB einen Schirm senkrecht zu

den Lichtstrahlen auf, so nahm er aber statt einer gleichmäßig beleuchteten Fläche eine Reihe von Streifen (Abb. 252) wahr, die parallel zum Spalt L verliefen. Sie waren farbig, wenn weißes Licht benutzt wurde, und bestanden aus hellen und dunklen Streifen, wenn einfarbiges Licht einfiel.

Abb. 252.
Fresnelscher Streifen

Nach der Körpertheorie des Lichtes ist das Auftreten dunkler Streifen unerklärlich, denn sie verlangt, daß eine Fläche um so heller erscheint, je mehr Licht auf sie trifft. Der Fresnelsche Versuch zeigt in den dunklen Streifen, daß aus der Überlagerung von Licht und Licht Dunkelheit werden kann. Die Wellentheorie gibt für diese Tatsache eine einfache Erklärung: Bestehen beide Lichtbahnen aus Wellen, die in Wellenlänge und Schwingungsweite übereinstimmen, so tritt an den Stellen Dunkelheit ein, wo die Lichtwellen mit einem Phasenunterschied von $\frac{1}{2}\lambda$, $\frac{3}{2}\lambda$, $\frac{5}{2}\lambda$ zusammentreffen, denn diese Wellen heben einander auf.

So erklärt sich das Versuchsergebnis nach der Wellentheorie folgendermaßen: Durch den Spalt L fällt Licht auf die beiden Spiegel S_1 und S_2 . Die von ihnen reflektierten Wellen verlaufen so, als ob sie von den Spiegelbildern L_1 und L_2 (Abb. 251) mit gleicher Phase

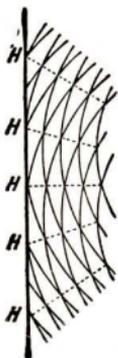


Abb. 253.

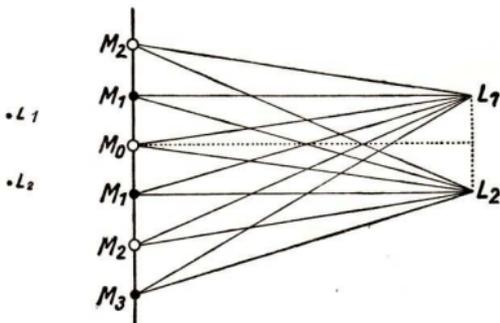


Abb. 254.

Der Fresnelsche Spiegelversuch. Erklärung der Streifen

abgegangen wären. Sie interferieren, wie Abb. 253 andeutet. Wo Wellenberge oder Wellentäler aufeinander treffen, entstehen auf einem Schirm helle Streifen H , und dazwischen liegen dunkle Streifen. Die Lichtwellen verhalten sich genau so wie die Wasserwellen in Abb. 215. Ist M_0 (Abb. 254) eine Stelle auf dem Schirm, die von L_1 und L_2 genau gleich weit entfernt ist, so treffen dort die Lichtwellen ohne Phasenunterschied ein. Dort ist der Schirm hell. In M_1 dagegen treffen die reflektierten Wellen mit einem Phasenunterschied ein, weil M_1L_1 und M_1L_2 verschieden groß sind. Ist der Unterschied gleich $\lambda/2$, so herrscht dort Dunkelheit. Beträgt der Wegunterschied in M_2 eine ganze Wellenlänge λ , so herrscht dort Helligkeit. In M_3 herrscht Dunkelheit, wenn der Wegunterschied $3/2 \lambda$ ist usw. Allgemein läßt sich über die Lage der Interferenzstreifen folgendes aussagen:

In dem Teil des Schirmes, auf den Licht von beiden Spiegeln fällt, herrscht bei einfarbigem Licht:

Helligkeit, wo der Wegunterschied der scheinbar von L_1 und L_2 ausgehenden Strahlen $2k \cdot \frac{\lambda}{2}$, **Dunkelheit**, wo dieser Wegunterschied $(2k - 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$ ist ($k = 1, 2, 3 \dots$).

2. Die Bestimmung der Wellenlänge des Lichtes nach Fresnel. Auf folgende Weise läßt sich aus diesem Versuch die Wellenlänge des Lichtes ermitteln.

M_0 (Abb. 255) sei die helle Mitte des beleuchteten Schirms, M_1 der erste dunkle Interferenzstreifen. Die Strecke M_0M_1 ist gleich dem halben Abstand $s/2$ der beiden mittleren dunklen Interferenzstreifen. Die Strecken r_1 und r_2 sind nur sehr wenig von dem senkrechten Abstand a des Schirmes von den Lichtquellen verschieden. s und a kann man messen. Der Abstand d der beiden virtuellen Lichtquellen L_1 und L_2 ist sehr klein. Er läßt sich nicht unmittelbar messen. Man kann aber mit Hilfe einer Sammellinse (Abb. 256) die virtuellen Lichtquellen L_1 und L_2 reell vergrößert abbilden und den Abstand b der reellen Bilder \mathcal{L}_1 und \mathcal{L}_2 messen. Da der Abstand im Verhältnis $m : n$ vergrößert wird, findet man d aus

$$d : b = m : n.$$

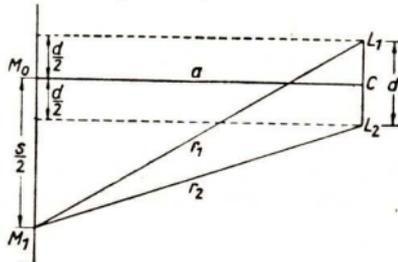


Abb. 255. Bestimmung der Wellenlänge des Lichtes nach Fresnel

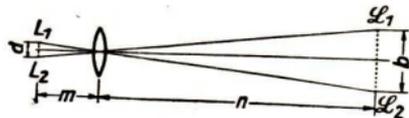


Abb. 256. Bestimmung der Entfernung der Lichtquellen \mathcal{L}_1 und \mathcal{L}_2

Weitere Messungen sind zur Bestimmung der Wellenlänge nicht erforderlich. Aus der Abb. 249 ergeben sich folgende geometrischen Beziehungen: Es ist

in den rechtwinkligen Dreiecken mit den Hypotenusen r_1 und r_2

$$r_1^2 = a^2 + \left(\frac{s}{2} + \frac{d}{2}\right)^2$$

$$r_2^2 = a^2 + \left(\frac{s}{2} - \frac{d}{2}\right)^2$$

$$r_1^2 - r_2^2 = \left(\frac{s}{2} + \frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{s}{2} - \frac{d}{2}\right)^2$$

$$(r_1 + r_2)(r_1 - r_2) = s \cdot d.$$

Ist M_1 der erste dunkle Streifen von der Mitte M_0 ab, so ist $r_1 - r_2 = \lambda/2$. Für $r_1 + r_2$ können wir, da $L_1 M_1$ und $L_2 M_1$ nur sehr wenig von a verschieden sind, $2a$ setzen. Es ergibt sich also

$$2a \cdot \frac{\lambda}{2} = s \cdot d,$$

$$\lambda = \frac{s \cdot d}{a}.$$

Die Wellenlänge des Lichtes läßt sich aus dem Fresnelschen Spiegelversuch berechnen nach der Formel

$$\lambda = \frac{s \cdot d}{a}.$$

3. Farbe und Wellenlänge des Lichtes. Aus dem Fresnelschen Spiegelversuch folgt, daß die Farbe durch die Wellenlänge des Lichtes bestimmt ist.

Spektralfarben unterscheiden sich durch ihre Wellenlängen.

Wählt man Fraunhofersche Linien des Sonnenspektrums (Teil I, § 20) zur Kennzeichnung verschiedener Farben, so ergibt sich:

Farbe	A rot	B rot	C orange	D gelb	E grün	F blau	G violett	H
Wellenlänge λ im Vakuum	0,761	0,687	0,656	0,589	0,527	0,486	0,431	0,397 μ ($1\mu = \frac{1}{1000}$ mm)
Schwingungszahl ν	394	437	457	509	569	617	696	756 Billionen in der Sekunde

Da zwischen der Wellenlänge λ , der Ausbreitungsgeschwindigkeit c und der Schwingungszahl ν einer Welle die Beziehung $c = \lambda \cdot \nu$ besteht, ergeben sich für die Schwingungszahlen des Lichtes die in der dritten Zeile der Tabelle angegebenen Werte. Wir können daher auch sagen:

Spektralfarben unterscheiden sich durch ihre Schwingungszahlen.

Wie wir gesehen haben (§ 46), ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes in Körpern kleiner als im leeren Raum. Die Schwingungszahl des Lichtes kann sich aber nicht ändern, wenn das Licht nacheinander durch Stoffe verschiedener Art dringt. Daraus ergibt sich, daß die Wellenlänge des Lichtes von dem Stoff abhängt, in dem sie gemessen wird.

Kennzeichnend für jede Spektralfarbe ist nicht die Wellenlänge, sondern die Schwingungszahl des Lichtes.

Das Versuchsergebnis zeigt, daß das Licht aus Wellen von sehr kleiner Wellenlänge besteht. Die Wellenlänge des äußersten violetten Lichtes ist etwa halb so groß wie die Wellenlänge des äußersten roten Lichtes. Wählt man einen akustischen Vergleich, so kann man sagen, daß die Schwingungszahlen des sichtbaren Lichtes ungefähr eine Oktave umfassen.

Das Licht einer Lichtquelle besteht gewissermaßen aus einzelnen Lichtblitzen von etwa 10^{-8} Sekunden Dauer. Dabei gehen von jedem Punkte Wellenzüge aus, die vollständig unabhängig voneinander sind. Handelt es sich um einfarbiges Licht, so ist die Wellenlänge des Lichtes in allen Wellenzügen dieselbe, über die Phase, mit denen die einzelnen Wellenzüge einsetzen, läßt sich aber nichts aussagen. Will man mit Lichtwellen bleibende Interferenzstreifen erzeugen, dann genügt aber nicht die Übereinstimmung der Wellenlängen der sich überlagernden Wellenzüge, sondern der an einer Stelle des Raumes einmal vorhandene Phasenunterschied muß dauernd beibehalten werden. Das ist nur dann gewährleistet, wenn das Licht der interferierenden Wellenzüge von demselben Punkt der Lichtquelle herstammt. Solches Licht heißt kohärent¹⁾. Beim Fresnelschen Spiegelversuch interferiert kohärentes Licht. In Abb. 257 stellt L den beleuchteten Spalt des Fresnelschen Spiegelversuches dar. L_1 und L_2 sind die durch die Spiegel erzeugten virtuellen Lichtquellen. Die Punkte A_1 und A_2 sind die virtuellen Bilder des Punktes A . Lichtwellen, die von A_1 und A_2 herzukommen scheinen, kommen daher in Wirklichkeit mit gleicher Ausgangsphase von A . Sie sind kohärent. Aus demselben Grunde besteht Phasengleichheit für die Lichtwellen, die scheinbar von B_1 und B_2 bzw. C_1 und C_2 ausgehen. Licht, das von entsprechenden Punkten der Lichtquellen L_1 und L_2 auf eine bestimmte Stelle des Schirmes fällt, besitzt daher an dieser Stelle immer denselben Phasenunterschied. Dabei ist es einerlei, ob das von verschiedenen Punkten (A, B, C usw.) stammende Licht unter sich in der Phase übereinstimmt oder nicht, denn nur vom Phasenunterschied hängt es ab, ob die Stelle dunkel oder hell ist. Licht zweier voneinander unabhängigen Lichtquellen würde keine Interferenzstreifen erzeugen. Der Versuch gibt keinen Aufschluß darüber, ob das Licht aus longitudinalen oder transversalen Wellen besteht. Er sagt auch nichts über den Träger der Lichtwellen.

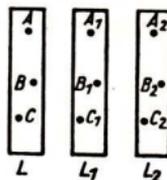


Abb. 257.
Kohärentes Licht

4. Der Dopplereffekt. Bei der Untersuchung der Schallwellen hatten wir festgestellt (§ 40), daß die Tonhöhe einer Schallquelle von einem Beobachter verschieden beurteilt wird, je nach seinem Bewegungszustande gegenüber der Schallquelle. Es ist zu erwarten, daß bei Lichtwellen eine ähnliche Erscheinung auftreten muß. Stellen wir die entsprechenden Überlegungen an wie in § 40, so können wir feststellen: Wenn eine Lichtquelle Schwingungen

1) cohaerēre (lat.) = zusammenhängen.

der Frequenz ν aussendet und sich ein Beobachter mit der Geschwindigkeit v von ihr fortbewegt, so empfängt dieser Licht von der Frequenz $\nu_1 = \nu \left(1 - \frac{v}{c}\right)$. Bewegt er sich mit derselben Geschwindigkeit v auf die Lichtquelle zu, dann ist die Frequenz des wahrgenommenen Lichtes $\nu_1 = \nu \left(1 + \frac{v}{c}\right)$. Im Gegensatz zum Schall gelten dieselben Formeln, wenn die Lichtquelle sich bewegt und der Beobachter ruht. Es kommt beim Dopplereffekt des Lichtes also nur auf die Relativgeschwindigkeit v zwischen Lichtquelle und Beobachter an. Daraus folgt, daß bei einer Bewegung zwischen Lichtquelle und Beobachter die Farbe des ausgesandten Lichtes geändert wird, und zwar erfolgt eine Verschiebung jeder Spektrallinie **nach dem roten Ende des Spektrums**, wenn die Lichtquelle sich vom Beobachter **entfernt** und nach dem violetten Ende, wenn sie sich ihm **nähert**. Aus der Richtung und Größe der Verschiebung einer bestimmten Spektrallinie des Lichtes einer bewegten Lichtquelle gegenüber der Lage der entsprechenden Linie bei ruhender Lichtquelle kann man die Geschwindigkeit ermitteln, mit der die Lichtquelle und der Beobachter sich gegeneinander bewegen. Nach dieser Methode hat man die Radialgeschwindigkeiten von Fixsternen gegenüber der Erde festgestellt. Die größte bisher gemessene Rotverschiebung entspricht einer Radialgeschwindigkeit von $v = 42\,000$ km/s (vgl. Teil I, § 49).

§ 48. Interferenz des Lichtes an durchsichtigen Platten

1. Die Farben dünner Blättchen. Sehr dünne Glimmerplättchen, Seifenblasen, Perlmutter, Öl auf Wasser zeigen, wenn sie von weißem Licht beleuchtet werden, lebhafte Farben aller Art. Diese Farben entstehen dadurch, daß das Licht sowohl an der oberen als auch an der unteren Grenzfläche der durchsichtigen dünnen Blättchen reflektiert wird und nach der Reflexion interferiert.

Wir gehen davon aus, daß auf das Blättchen ein Bündel von Strahlen parallelen einfarbigen Lichtes auffällt. Die Frontwellen dieses Lichtbündels sind eben. In Abb. 258 ist der Gang zweier Strahlen *I* und *II* des Bündels gezeichnet. Der Strahl *I* wird an der unteren und der Strahl *II* an der oberen Grenzfläche der dünnen Platte reflektiert. Die reflektierten Strahlen *I* und *II* verlaufen parallel zueinander. Zu jedem reflektierten Lichtstrahl *I* gibt es einen reflektierten Strahl *II*, der mit ihm zusammenfällt. In Abb. 259 ist derselbe Vorgang mit Wellen (anstatt mit Strahlen) gezeichnet. Der einfallende Wellenzug wird zum Teil an der oberen, zum Teil an der unteren Grenzfläche zurückgeworfen. Der gestrichelt gezeichnete Wellenzug *I* ist unten, der mit dünnen Linien ausgezeichnete Wellenzug *II* oben reflektiert worden. Beide Wellenzüge überlagern sich. Im allgemeinen werden die Phasen der zurückgeworfenen Wellenzüge gegeneinander verschoben sein. Es kann sein, daß Wellenberg auf Wellenberg fällt. Es kann aber auch sein, daß gerade Berge und Täler beider Wellenzüge zusammenfallen. Im

ersteren Falle verstärken sich die Wellenzüge *I* und *II* (Blättchen hell), im letzteren schwächen sie sich gegenseitig, so daß das Blättchen dunkel erscheint. Ob der eine oder der andere Fall eintritt, hängt von dem Unter-

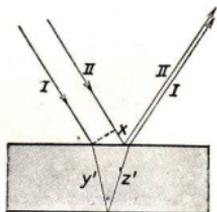


Abb. 258. Reflexion am dünnen Blättchen.
Strahlenverlauf

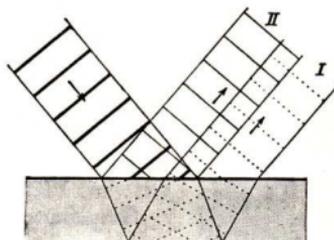


Abb. 259. Reflexion am dünnen Blättchen.
Wellenverlauf

schied der Wege ab, den die Lichtwellenzüge *I* und *II* zurücklegen, bis sie wieder zusammentreffen. Dieser Wegunterschied δ ist nach Abb. 258 von den Wegstrecken $y' + z'$ bzw. x abhängig, d. h. von der Dicke des Blättchens und dem Einfallswinkel des Lichtes. Fällt einfarbiges Licht der Wellenlänge λ auf, so könnte man glauben, daß das Blättchen dunkel erscheint, wenn δ ein ungerades Vielfaches von $\lambda/2$ ist, und hell, wenn δ ein gerades Vielfaches von $\lambda/2$ ist. In Wirklichkeit ist es aber umgekehrt, denn der Strahl *I* wird am optisch dünneren, der Strahl *II* am optisch dichteren Medium reflektiert. Dadurch wird insgesamt ein Phasenunterschied von $\Delta = \delta + \lambda/2$ zwischen *I* und *II* bedingt. Die Lichtwellen *I* und *II* verhalten sich bei der Reflexion ähnlich wie Seilwellen, die einmal am freien Ende das andere Mal an einer festen Wand zurückgeworfen werden (§ 42). Fällt weißes Licht ein, so wird nur Licht einer bestimmten Farbe ausgelöscht, z. B. $\lambda = 0,7 \mu$ (Rot). Für rotes Licht ist dann Δ gleich einem ungeraden Vielfachen von $\lambda/2$, nicht aber für die anderen Farben des weißen Lichtes. Diese werden daher durch Interferenz nicht ausgelöscht. Das Blättchen leuchtet grün, d. h. in der Komplementärfarbe des ausgelöschten roten Lichtes.

So erklären sich die schönen Farben, die dünne Schichten farbloser Körper im reflektierten weißen Licht zeigen. Die verschiedenen Stellen leuchten in verschiedenen Farben, weil meist die Dicke der Schicht und der Einfallswinkel des Lichtes von Ort zu Ort wechseln. Die Abhängigkeit des Gangunterschiedes Δ von der Dicke und dem Einfallswinkel läßt sich sehr gut erkennen, wenn man den Luftzwischenraum zwischen zwei lose aufeinanderliegenden Spiegelglasplatten durch Druck verändert und im reflektierten Licht einer mit Natrium gefärbten Flamme betrachtet. Man sieht dann scharf begrenzte dunkle Interferenzstreifen. Diese beginnen zu wandern, wenn man die Platten aufeinander drückt oder den Einfallswinkel verändert. Im durchfallenden Licht erscheinen dünne Blättchen in der Komplementärfarbe des zurückgeworfenen Lichtes.

2. Die Newtonschen Ringe. Bei seinen optischen Untersuchungen ist schon Newton mit den Interferenzerscheinungen in dünnen Blättchen bekannt geworden. Er hat die Farben in dünnen Luftschichten beobachtet, als er Glasprismen aufeinander kittete. Er hat erkannt, daß die Farben mit der

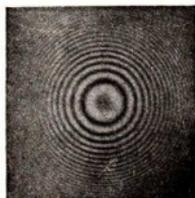


Abb. 260. Newtonsche Ringe im Natriumlicht

Dicke der Luftschicht zusammenhängen, und hat dann folgenden Versuch angestellt, der nach ihm benannt ist: Auf einer ebenen Platte liegt eine plankonvexe Linse. Dadurch wird zwischen Platte und Linse eine Luftschicht abgegrenzt, deren Dicke an der Berührungsstelle der beiden Körper 0 ist und nach außen zunimmt. Fällt senkrecht

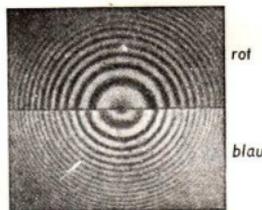


Abb. 261. Newtonsche Ringe im roten und blauen Licht

auf die Linse von oben einfarbiges Licht, z. B. Natriumlicht, so erscheint im reflektierten Licht die Mitte dunkel und umgeben von vielen Ringen, wie Abb. 260 zeigt. Im durchfallenden Licht ist die Mitte hell, und die hellen



Abb. 262. Interferierende Wellen

Ringe liegen an den Stellen, die im reflektierten Licht dunkel waren. Im weißen Licht sind die Ringe farbig, und zwar ist im reflektierten Licht die Farbe des engsten Ringes violett. Abb. 261 zeigt die Erscheinung für rotes und blaues Licht.

Wir können das Auftreten der farbigen Ringe H durch Interferenz zweier Lichtwellenzüge erklären (Abb. 262), die an der Kugelfläche der Linse und der oberen Fläche der Glasplatte reflektiert werden. Es bildet also der Luftzwischenraum zwischen Linse und Platte gewissermaßen ein dünnes Blättchen.

Zwischen der Dicke des Blättchens d an der Stelle, wo ein dunkler Ring entsteht und dem Radius r der Kugelfläche der Linse besteht die Beziehung (Abb. 263):

$$AC^2 = d \cdot BC = d \cdot 2r.$$

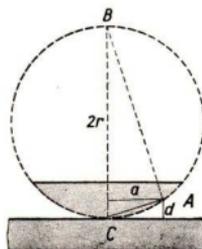


Abb. 263. Erklärung der Newtonschen Ringe

Da näherungsweise AC gleich dem Radius a des dunklen Ringes gesetzt werden kann, ist $a^2 = d \cdot 2r$.

An dieser Stelle müssen die an der oberen Fläche der Platte reflektierten Lichtwellen einen um $2d$ längeren Weg als die an der unteren Fläche der Linse zurückgeworfenen Lichtwellen zurücklegen. Da das Licht oben am optisch dünneren und unten am optisch dichteren Stoff zurückgeworfen wird, tritt noch ein Phasenunterschied von $\lambda/2$ auf. In Wellenlängen λ gemessen, beträgt also der Gangunterschied Δ zwischen den beiden an dieser Stelle interferierende Lichtwellen

$$\Delta = 2d - \lambda/2.$$

Sie löschen einander nach § 48 aus, wenn

$$\Delta = 2d - \frac{\lambda}{2} = (2k - 1) \frac{\lambda}{2},$$

mithin $2d = 2k \cdot \frac{\lambda}{2}$ ($k = 1, 2, 3, \dots$)

ist. Bedeutet nun a_n den Radius des n ten Ringes, so folgt aus $a_n^2 = d \cdot 2r$.

$$2d = \frac{a_n^2}{r},$$

also $\frac{a_n^2}{r} = 2n \cdot \frac{\lambda}{2}$ oder $\lambda = \frac{a_n^2}{r \cdot n}$.

Die Newtonschen Ringe sind demnach, wenn r bekannt ist, sehr geeignet zur Bestimmung der Wellenlänge des Lichtes.

3. Das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten in verschiedenen Stoffen. Füllen wir den Raum zwischen Linse und ebener Platte mit Wasser aus, so finden wir eine andere Wellenlänge für dieselbe Farbe. Vom Standpunkt der Wellentheorie kann diese Änderung nur dadurch erklärt werden, daß sich Lichtschwingungen von der Frequenz ν in Luft nach der Formel $c = \lambda \cdot \nu$ und in Wasser nach der Formel $c_1 = \lambda_1 \cdot \nu$ fortpflanzen. Daraus ergibt sich

$$c_1 : c = \lambda_1 : \lambda,$$

d. h., die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in einem anderen Mittel als Luft kann leicht durch die Bestimmung der Wellenlänge des Lichtes gemessen werden (vgl. § 46).

Zur Übung: Bei der Beobachtung der Newtonschen Ringe werden gemessen: der Radius des dritten Ringes zu 2,6 mm und zur Kontrolle derjenige des zehnten Ringes zu 4,8 mm. Der Krümmungsradius der Linse beträgt 4 m. Wie groß ist die Wellenlänge des Lichtes? Welche Farbe hat das benutzte Licht?

§ 49. Die Beugung des Lichtes

Schon bevor man etwas von der Wellennatur des Lichtes wußte, hat Grimaldi¹⁾ die Beobachtung gemacht, daß Licht, das durch ein enges Loch hindurchgeht, aus seiner Richtung abgelenkt oder „gebeugt“ wird (Abb. 264). Vom Standpunkt der Wellentheorie muß erwartet werden, daß sich das Licht so verhält. Wir wollen im folgenden die wichtigsten Fälle der Lichtbeugung besprechen.

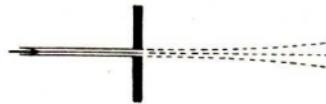


Abb. 264. Beugung des Lichtes

1. Beugungsercheinungen an einem schmalen Schirm. Ein breiter Schirm, der in ein Bündel paralleler Strahlen gestellt ist, wirft einen geometrisch scharfen Schatten. Ersetzen wir den Schirm durch immer schmalere Schirme

1) Francesco Maria Grimaldi, 1618–1663, Italien.

oder durch einen dünnen Draht, so wird der Schatten immer unschärfer und löst sich schließlich bei Verwendung von weißem Licht in eine Anzahl farbiger Streifen auf. In einfarbigem Licht erhält man helle und dunkle Streifen. Kennzeichnend ist, daß in der Mitte des geometrischen Schattens Helligkeit auftritt. Abb. 265 zeigt mehrere helle Streifen im Schatten. Sie sind symmetrisch zur Mitte angeordnet.

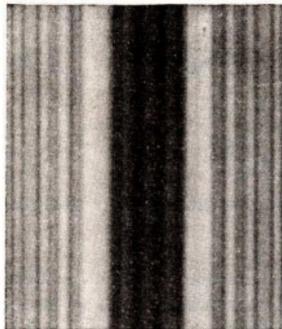


Abb. 265. Biegungstreifen
hinter einem dünnen Draht

Vergleichen wir diesen Versuch mit dem entsprechenden Versuch an Wasserwellen (§ 44), so erkennen wir die Übereinstimmung der Ergebnisse. In Abb. 244 sieht man deutlich, daß Wellen hinter das Hindernis gelangen und dort interferieren. Die Wasseroberfläche ist von Streifen durchzogen, in denen sie ruhig bleibt. Diese Streifen entsprechen den dunklen Streifen des Schattens auf dem Schirm in Abb. 265.

Für diese Erscheinung finden wir eine einfache Erklärung auf Grund der Beugung der Lichtwellen. Gehen die Lichtwellen an Rändern des Hindernisses N vorbei, so werden sie gebeugt, wie Abb. 266 andeutet. In den Schattenraum dringen also von beiden Seiten Lichtwellen ein. Diese interferieren wie die Lichtwellen beim Fresnelschen Spiegelversuch. Da sich in der Mitte des Schattens Lichtwellen treffen, die den Phasenunterschied 0 haben, entsteht dort ein heller Streifen.

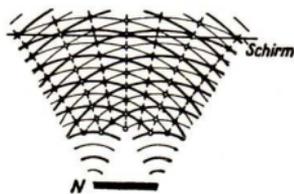


Abb. 266.
Entstehung der Beugungsbilder
hinter einem Hindernis

Die Mitte des Schattens ist hell.

Symmetrisch zu beiden Seiten liegen dunkle und helle Streifen wie beim Fresnelschen Spiegelversuch (§ 47). Mißt man den Abstand s der beiden mittleren dunklen Streifen, die Breite d des Hindernisses und die Entfernung a des Schirmes, auf dem man die Streifen beobachtet, von dem schattenwerfenden Körper, so ergibt sich die Wellenlänge des Lichtes zu

$$\lambda = \frac{s \cdot d}{a}.$$

Zur Übung: Man bestimme die Wellenlänge des roten, gelben und blauen Lichtes durch den Abstand der Beugungstreifen im Schatten.

2. Beugung am Rande eines Schirmes. Zu beiden Seiten des Schattens unseres schmalen Schirmes nehmen wir helle und dunkle Streifen wahr, deren gegenseitiger Abstand nach außen hin abnimmt, ähnlich wie bei den Newtonschen Ringen. Man kann ferner erkennen, daß bei der Verwendung weißen Lichtes die Streifen aus schmalen Spektren bestehen. Dasselbe kann man

auch beobachten, wenn man das Licht an dem Rand eines breiten schattenwerfenden Körpers vorbeigehen läßt. Abb. 267 zeigt eine Aufnahme dieser Erscheinung. Man stellt fest, daß im Schatten eines breiten Körpers keine Streifen vorhanden sind, daß aber der Schattenrand verwaschen ist, und seitwärts dunkle Streifen mit nach außen abnehmendem Abstand auftreten.



Abb. 267.
Beugung am
Rande eines
breiten Schirmes

3. Beugung am schmalen Spalt. Schneidet man mit einem scharfen Messer einen Spalt in ein Kartenblatt und blickt durch ihn hindurch nach einer brennenden Kerze, so erscheint die Flamme verbreitert, und zu beiden Seiten bemerkt man farbige Beugungsstreifen. Krümmt man das Blatt zylinderförmig, so weichen die Ränder des Spaltes etwas auseinander, er wird also breiter. Gleichzeitig beobachtet man, daß die Beugungsstreifen näher nach der Mitte zusammenrücken und schließlich fast ganz verschwinden. Die Abhängigkeit der Erscheinung von der Breite des Spaltes kann man auch feststellen, wenn man durch Ritzen der Schicht einer ungebrauchten oder auch einer geschwärzten photographischen Platte Spalte verschiedener Breite herstellt. An diese subjektiven Beobachtungen schließen wir einen objektiven Versuch an. Lassen wir einfarbiges paralleles Licht durch einen schmalen Spalt auf einen Schirm fallen, so entsteht kein scharf begrenztes geometrisches Spaltbild, sondern zu beiden Seiten des hellen Spaltbildes erblickt man eine Anzahl dunkler und heller Streifen (Abb. 268). Im weißen Lichte sind diese Beugungsstreifen farbig.



Abb. 268. Beugung
am schmalen Spalt

Aus dem Verhalten von Wasserwellen (Abb. 242) könnten wir schließen, daß der Schirm hinter dem schmalen Spalt nach außen gleichmäßig abnehmend beleuchtet würde. Das ist aber nicht der Fall, weil die Spaltöffnung mehr als 100 mal so groß wie die Wellenlänge des Lichtes ist, während sie bei den Wasserwellen nur einen Bruchteil der Länge der Wellen im Wasser beträgt. Die Wege der Lichtwellen, die von den Rändern des Spaltes an einer Stelle des Schirmes auftreten, weisen Unterschiede bis zu vielen Wellenlängen auf. So erklärt sich, daß Interferenzstreifen im Schattenraum und seitlich von ihm wie bei der Beugung am schmalen Schirm entstehen.

Das Huygenssche Prinzip erklärt Einzelheiten des Vorganges. Jeder Punkt der Spaltöffnung ist als Ausgangspunkt einer Elementarwelle anzusehen. Die Überlagerung der Wellen ergibt die beobachtete Erscheinung. Zunächst sieht man, daß in der Mitte des Spaltbildes die hellste Stelle des Beugungsbildes liegen muß, denn die hier auftreffenden Strahlen befinden sich paarweise im gleichen Schwingungszustand. Um die Entstehung der

beiden ersten seitlichen dunklen Streifen zu erklären, denken wir uns in dem Schirm GG (Abb. 269) die Spaltbreite XY durch ihre Mitte M geteilt. Jeden Punkt von XY sehen wir als Ausgangspunkt eines Strahles an, der nach dem betrachteten dunklen Streifen hin gerichtet ist. Wir betrachten also ein Bündel paralleler Strahlen, die unter dem Beugungswinkel α aus

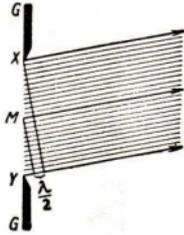


Abb. 269. Erklärung der Entstehung des ersten seitlichen dunklen Streifen

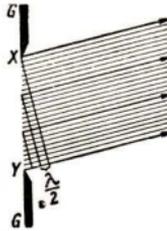


Abb. 270. Erklärung der Entstehung des ersten seitlichen hellen Streifen

ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt sind. Wir fällen von X das Lot auf diese Strahlen. Ehe die Strahlen das Lot treffen, haben sie sehr verschiedene Wege zurückgelegt. In der Abb. 269 sind 24 Strahlen gezeichnet. Der 1. und 13. gehören zu Wellen mit einem Gangunterschied von $\lambda/2$. Entsprechendes gilt vom 2. und 14. Strahl usw. Vereinigt man die Strahlen auf dem

Schirm durch eine Linse, so erhält man den ersten dunklen Streifen. Ähnlich erklären wir die Entstehung der ersten hellen seitlichen Streifen. Wir teilen jetzt die 24 unter einem größeren Beugungswinkel abgelenkten Strahlen in drei Gruppen zu je 8 Strahlen (Abb. 270), so daß die zum 1. und 9., zum 2. und 10., zum 9. und 17. gehörenden Wellen einen Gangunterschied von $\frac{1}{2}\lambda$ haben.

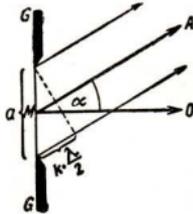


Abb. 271. Zusammenhang zwischen Beugungswinkel, Spaltbreite und Wellenlänge

Von drei zugeordneten Strahlen der drei Gruppen löschen sich immer zwei aus, der dritte liefert Licht für den ersten hellen Beugungsstreifen. Die Helligkeit des Streifens ist aber gegenüber dem ungestörten Licht vermindert.

Entsprechende Überlegungen kann man für die weiteren hellen und dunklen Streifen anstellen. Abb. 271 gibt den Zusammenhang zwischen Beugungswinkel $\angle MO = \alpha$, Spaltbreite a und Wellenlänge λ

$$\sin \alpha = \frac{k \cdot \lambda}{2a} \quad (k = 2, 3, 4 \dots)$$

Die Mitte ($k = 0$) ist hell; die ersten dunklen Streifen entstehen für $k = 2$, die ersten seitlich gelegenen hellen für $k = 3$.

4. Beugung am optischen Gitter. Die Beugungserscheinungen an einem einzelnen Spalt sind recht lichtschwach. Man könnte annehmen, daß sie bei Verwendung mehrerer Spalte heller werden. Fraunhofer machte einen Versuch mit vielen Spalten. Dabei zeigte sich eine unerwartete Erscheinung. Ein System einer großen Zahl von feinen parallelen Spalten bezeichnet man als ein optisches Gitter, die Spalte selbst als Linien. Man kann ein solches Gitter auf Glas herstellen, indem man die Oberfläche mit einem Diamanten ritzt. Dann kann nur an den nicht geritzten Stellen das Licht ungehindert hindurchtreten. Diese wirken dann wie Spalte.

Betrachten wir durch ein solches Gitter eine brennende Kerze, so erscheint ihr Bild wie bei der Betrachtung ohne Gitter, aber zu beiden Seiten beobachtet man helle Spektren, bei denen das violette Ende der Flamme zugekehrt ist. Wir wollen diese Erscheinung nicht nur subjektiv beobachten, sondern auch durch einen objektiven Versuch klären.

Wir lassen auf das Gitter paralleles weißes Licht, das von einem schmalen Spalt ausgeht, senkrecht auffallen und stellen diesen Spalt parallel zu den Linien des Gitters. Vereinigen wir das hindurchgetretene Licht mit Hilfe einer Linse auf einem Schirm, so erhält man auf diesem in der Mitte ein helles, scharfes Bild des Ausgangsspaltes in weißer Farbe. Zu beiden Seiten erblickt man in symmetrischer Anordnung eine Reihe Spektren, deren Helligkeit von der Mitte aus abnimmt. Verwenden wir einfarbiges Licht, dann erhalten wir bei der gleichen Versuchsanordnung auf dem Schirm in der Mitte wieder ein Bild des Ausgangsspaltes und seitlich davon eine Reihe scharfer Spaltbilder (Abb. 272). Alle Bilder H_0, H_1 haben die Farbe der Lichtquelle. Zwischen ihnen ist der Schirm dunkel (bei $D_1; D_2$). Nach dem Huygensschen Prinzip gehen von jeder Stelle der zahlreichen Spalte des Gitters Elementarwellen aus. Die Beobachtung zeigt, daß die meisten davon sich gegenseitig vernichten und nur ganz bestimmte sich zu scharfen, hellen Spaltbildern vereinigen.

Um diese Erscheinung zu verstehen, untersuchen wir zunächst die Beugung an einem Doppelspalt. Wir lassen paralleles einfarbiges Licht durch zwei parallele und gleich schmale Spalte hindurchgehen. Entsprechende Ränder der Spalte seien um b voneinander entfernt (Abb. 273). Das durch jeden dieser Spalte hindurchtretende Licht wird so gebeugt, wie wir es bei einem einzigen Spalt gesehen haben. Die Beugungsbilder beider Spalte überlagern sich. Dabei kommen jeweils zwei parallele Strahlenbündel S_1 und S_2 zur Interferenz. Für den gemeinsamen Ablenkungswinkel α von S_1 und S_2 ergibt sich aus der Abbildung folgende Beziehung:

$$\sin \alpha = \frac{k \cdot \frac{\lambda}{2}}{b}. \quad (k = 1, 2, 3 \dots)$$

Ist k ungerade, unterscheiden sich die Strahlen von S_1 und S_2 , also um $\frac{\lambda}{2}, 3 \cdot \frac{\lambda}{2}, 5 \cdot \frac{\lambda}{2} \dots$, so vernichten sie sich, und es tritt ein dunkler Beu-

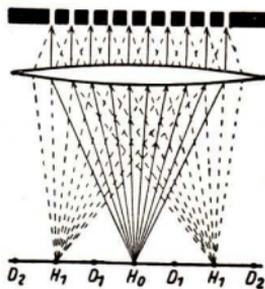


Abb. 272. Beugung am Gitter

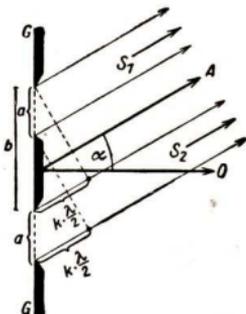


Abb. 273. Beugung am Doppelspalt

gungstreifen auf. Geraden Werten von k hingegen entsprechen Strahlenbündel S_1 und S_2 , deren Strahlen im gleichen Schwingungszustande aufeinander treffen und an der entsprechenden Stelle daher Helligkeit erzeugen.

Die Formeln für die Beugung am einfachen Spalt und am Doppelspalt sehen äußerlich gleich aus, a und b haben aber verschiedene Bedeutung, und für gleiche Werte von k ergeben sich in dem einen Fall Dunkelheit, im anderen Helligkeit.

Das für einen Doppelspalt gefundene Gesetz gilt auch entsprechend für ein aus einer großen Zahl paralleler Spalte von gleichem gegenseitigem Abstände bestehendes Gitter.

Beugungstreifen größter Helligkeit treten daher bei einem Gitter nur für

solche Ablenkungswinkel α auf, für die $\sin \alpha = 2 \cdot \frac{\lambda}{b}$; $\sin \alpha = 4 \cdot \frac{\lambda}{b}$,
 $\sin \alpha = 6 \cdot \frac{\lambda}{b}$ ist (Abb. 273).

An allen anderen Stellen treffen Wellen mit sehr verschiedenem Gangunterschied aufeinander und schwächen sich. Man kann durch mathematische Überlegungen in Übereinstimmung mit Versuchen nachweisen, daß an den zuletzt genannten Stellen sich die Wellen durch Interferenz vernichten, und zwar um so vollkommener, je zahlreicher die Spalte sind und je regelmäßiger ihre Anordnung ist. Mit der Zahl der Spalte erhöht sich gleichzeitig die Helligkeit der abgebeugten Spaltbilder. Die Lage der hellen Spaltbilder ist bestimmt durch:

$$\sin \alpha = \frac{k \cdot \lambda}{b}. \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$$

In dieser Formel bedeutet b die Summe der Breite eines Spaltes und eines undurchlässigen Zwischenraumes. Man nennt b die **Gitterbreite** oder **Gitterkonstante**.

Es ist gelungen, Gitter von außerordentlicher Feinheit herzustellen, die auf einer Strecke von 1 mm mehr als 800 Linien enthalten. Damit kann man die Wellenlänge des Lichtes nach der oben angegebenen Formel sehr genau messen. Den Winkel α bestimmt man aus dem Abstand der Beugungsbilder von dem hellen Spaltbild in der Mitte und der Entfernung des Gitters vom Schirm.

Bei Verwendung von rotem Licht liegen die Beugungsbilder weiter auseinander, bei blauem Licht sind ihre Zwischenräume geringer.

Durch ein optisches Gitter werden von einem Spalt helle Beugungsbilder erzeugt. Rotes Licht wird stärker abgelenkt als blaues.

5. Das Beugungsspektrum. Abb. 274 deutet an, welchen Abstand die durch ein und dasselbe Gitter erzeugten Beugungstreifen für rotes und violettes Licht besitzen. Die Beugungstreifen des gelben, grünen, blauen Lichtes liegen zwischen diesen. Läßt man durch einen Spalt weißes Licht auf das Gitter fallen, so entsteht in der Mitte ein weißes Spaltbild. Zu beiden Seiten erblickt man breite Spektren 1., 2., 3. Ordnung, je nachdem, ob sie aus den

1., 2., 3. . . seitlichen Beugungsstreifen zusammengesetzt sind. Bis auf das Spektrum 1. Ordnung überdecken diese Spektren einander.

Spektren, die durch ein Gitter erzeugt werden, nennt man Beugungsspektren.

In ihnen ist das rote Licht am stärksten und das violette am wenigsten abgelenkt. Der rote Teil ist breiter und der violette Teil schmäler als in dem durch ein Prisma erzeugten Spektrum (Zerstreuungs- oder Dispersionspektrum, Abb. 275). Die Abstände der farbigen Spaltbilder eines Beugungsspektrums von dem weißen Spaltbild in der Mitte sind proportional $\text{tg } \alpha$.

Für kleine Winkel kann man mit großer Annäherung $\text{tg } \alpha$ durch $\sin \alpha$ ersetzen. Wenn wir uns auf das Spektrum erster Ordnung beschränken, so erkennen wir, da $\sin \alpha = \frac{k \cdot \lambda}{b}$ ist, daß in diesem Spektrum die Farben proportional ihrer Wellenlänge aufeinander folgen. Man nennt ein solches Spektrum daher auch normales Spektrum. Beugungsspektren kann man benutzen, um die Wellenlänge des Lichtes genau zu messen und die Linienspektren zu untersuchen.

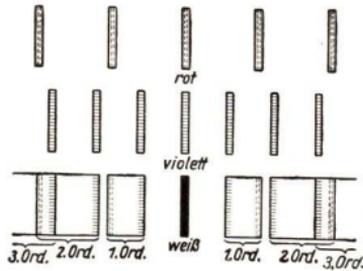


Abb. 274. Beugungsstreifen und Beugungsspektrum

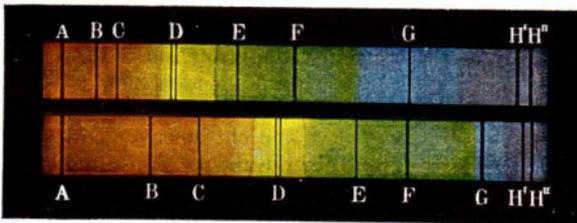


Abb. 275. Zerstreuungsspektrum und Beugungsspektrum

Die am Gitter beobachteten Beugungserscheinungen kann man auch feststellen, wenn man durch ein regelmäßiges, engmaschiges Seidengewebe, z. B. einen Regenschirm oder Müllergaze nach einer wenig ausgedehnten Lichtquelle blickt. Man sieht dann mehrere Reihen schmaler Spektren, von denen die eine Gruppe auf der anderen senkrecht steht. Dreht man das Gewebe, so dreht sich die Erscheinung mit. Verschiebt man es nur zur Seite, so ändert sich nichts. Jede Öffnung der Gaze wirkt wie ein winziger Spalt und das ganze Gewebe wie ein Kreuzgitter mit zwei Systemen senkrecht aufeinanderstehender Spalte. Die Gitterkonstante ist in dem angegebenen Falle etwa $b = 0,15$ mm. Auch eine Vogelfeder erweist sich als ein regelmäßiges Kreuzgitter. Die Reihen der Spalte und der entsprechenden Beugungsspektren bilden aber einen schiefen Winkel miteinander.

Eine eindrucksvolle Erscheinung erhält man, wenn man eine Glasplatte mit Bärlappsporen (Lykopodium) einstäubt und die Lichtquelle durch sie hindurch betrachtet. Man erblickt dann um die Lichtquelle herum mehrere Systeme von Ringen in den Spektralfarben. Dies-

mal ändert sich der Anblick auch beim Drehen der Platte nicht. Die Erklärung ist dadurch gegeben, daß die Platte nach jeder Richtung hin ein Gitter von gleicher geometrischer Anordnung darstellt. Die Gitterkonstante stimmt annähernd mit dem Durchmesser einer Spore überein. Man kann daher eine solche Vorrichtung auch benutzen, um die durchschnittliche Größe einer Spore zu bestimmen, wenn man die Wellenlänge des Lichtes als bekannt voraussetzt. Für den Durchmesser einer Spore findet man in guter Übereinstimmung mit mikroskopischen Beobachtungen $d = 0,03$ mm. Macht man einen entsprechenden Versuch mit Pollen einer Kiefer, so erkennt man das größere Korn sogleich an der Verengung der Beugungsringe.

Ähnliche Erscheinungen beobachtet man an Fensterscheiben, die mit einer dünnen Schicht von Eiskristallen beschlagen sind. Auch die farbigen Mondhöfe sind Beugungserscheinungen entsprechender Art.

§ 50. Die Polarisation des Lichtes

1. Die Doppelbrechung des Lichtes im Kalkspat. Beugung und Interferenz des Lichtes bestätigen zwar, daß das Licht eine Wellenbewegung ist, sie sagen

aber nichts darüber aus, ob die Schwingungen der Lichtwellen transversal oder longitudinal erfolgen.

Das Verhalten des Lichtes beim Durchgang durch Kristalle hat bei der Klärung der Ansichten über die Natur des Lichtes eine wichtige Rolle gespielt. Blickt man durch einen natürlichen Kalkspatkristall, so erscheinen die dahinterliegenden Gegenstände doppelt (Abb. 276). Jeder Strahl des auffallenden Lichtes muß sich also in zwei Strahlen gespalten haben. Man spricht daher von Doppelbrechung.



Abb. 276. Doppelbrechung im Kalkspat

Ein Lichtstrahl, der bereits durch einen Kalkspat doppelt gebrochen worden ist, erfährt nicht nochmals eine doppelte Brechung, wenn er durch einen

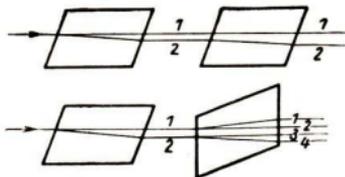


Abb. 277. Wiederholter Durchgang des Lichtes durch Kalkspat

zweiten Kristall in gleicher Stellung geht (Abb. 277). Man beobachtet dagegen vier Strahlen, wenn der zweite Kristall eine andere Stellung hat (Abb. 277).

Ein Jahrhundert lang hat die Frage, wie diese Tatsache zu erklären sei, die Physiker beschäftigt. Aufklärung gab eine Entdeckung des französischen Ingenieurs Malus¹⁾. Dieser beobachtete 1808, daß das Licht der Sonne, das von einem

Fenster unter einem bestimmten Winkel reflektiert wurde, beim Durchgang durch einen Kalkspat bei einer bestimmten Stellung des Kristalls nicht

1) Malus, Etienne, 1775—1812, Paris.

aufgespalten wurde. Das von der Fensterscheibe reflektierte Licht mußte also eine Änderung erfahren haben. Malus wählte für die Erscheinung das Wort „Polarisation“. Wir wollen nun den Vorgang näher untersuchen.

2. Polarisation des Lichtes durch Reflexion. Wir lassen ein paralleles Bündel L von Lichtstrahlen unter einem Einfallswinkel von 50° bis 60° auf eine auf der Rückseite geschwärzte Spiegelglasplatte P fallen (Abb. 278) und bringen einen zweiten ebensolchen Spiegel A so an, daß ihn der von P reflektierte Strahl M unter demselben Einfallswinkel trifft. Er wird an A als Strahl N

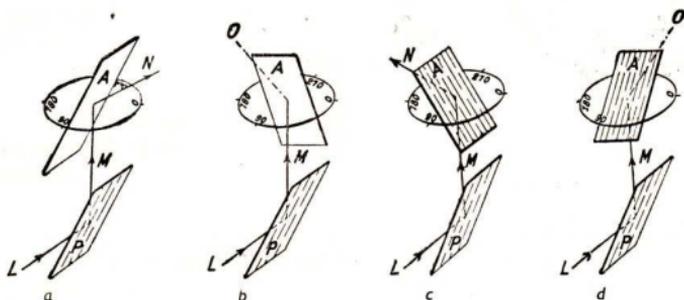


Abb. 278. Polarisation des Lichtes durch Reflexion

reflektiert. Drehen wir nun den Spiegel A unter Beibehaltung des Einfallswinkels um den Strahl M als Achse nacheinander in die dargestellten Lagen, so ändert der von A zurückgeworfene Strahl N viermal seine Helligkeit. Die größte Helligkeit tritt ein, wenn die Einfallsebenen der an P und A reflektierten Strahlen zusammenfallen (Abb. 278 a und c), die geringste, wenn diese Einfallsebenen aufeinander senkrecht stehen (Abb. 278 b und d). Die Erscheinung ist besonders deutlich, wenn der für beide Spiegel gleiche Einfallswinkel 55° beträgt.

Durch die Spiegelung an P muß also das Licht des Strahles L verändert worden sein, denn es besitzt nach der Zurückwerfung an P in zwei aufeinander senkrechten Richtungen verschiedene Eigenschaften. Derartig verändertes Licht nennt man **polarisiertes Licht**, die Einfallsebene für den Strahl L bei der Reflexion an P heißt **Polarisationsebene**, der Einfallswinkel **Polarisationswinkel**.

Eine Vorrichtung, die polarisiertes Licht erzeugt, heißt **Polarisator**, diejenige, mit der man polarisiertes Licht nachweisen kann, nennt man **Analysator**. In dem beschriebenen Versuch ist also P der Polarisator und A der Analysator.

Licht, das unter dem Einfallswinkel 55° von Glas reflektiert wird, ist polarisiert. Auch bei der Reflexion an anderen Stoffen wird Licht polarisiert. Die Größe des Polarisationswinkels hängt von der Art des Stoffes ab. Wollen wir ein-

facher als bisher nachprüfen, ob Licht polarisiert ist, so benutzen wir eine quadratische Pyramide, deren Seitenflächen aus vier spiegelnden, dreieckigen

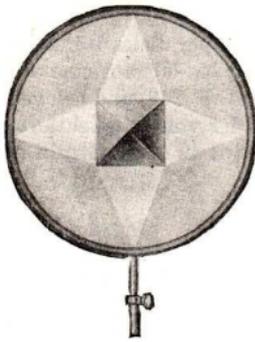


Abb. 279. Nichtpolarisiertes Licht

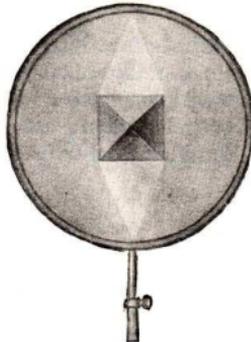


Abb. 280. Polarisiertes Licht

Glasplatten bestehen, die mit der Grundfläche einen Winkel von 55° bilden (Abb. 279). Auf sie trifft dann das zur Pyramidenachse parallel einfallende Licht unter dem Einfallswinkel 55° auf. Ist das Licht nicht polarisiert, so reflektieren die vier Flächen gleich stark. Auf dem Schirm, der die Pyramide trägt, zeichnen sich dann vier

dreieckige Flächen von gleicher Helligkeit ab. Ist es polarisiert, so reflektieren bei einer bestimmten Stellung der Pyramide nur zwei Flächen (Abb. 280).

3. Polarisation des Lichtes durch Brechung. Wir lassen nun ein Lichtbündel auf eine Glasplatte unter dem Einfallswinkel 55° auftreffen und sowohl das reflektierte wie das gebrochene Licht auf eine Pyramide fallen, wie wir sie eben verwendet haben (Abb. 281). Dann erweist sich das reflektierte Licht als polarisiert.

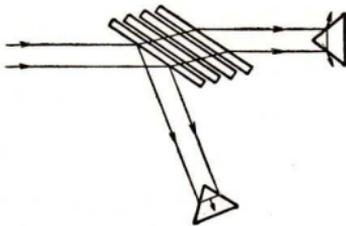


Abb. 281. Polarisation des Lichtes durch Brechung

Das gebrochene Licht ist nur schwach polarisiert. Legt man aber statt einer einzigen 10 bis 12 Glasplatten, einen sog. Plattensatz, unter dem Einfallswinkel 55° in den Lichtweg, so ist auch das gebrochene Licht weitgehend polarisiert.

Licht, das unter dem Einfallswinkel 55° durch einen Glasplattensatz getreten ist, ist polarisiert.

Untersuchen wir das reflektierte und gebrochene Licht gleichzeitig durch Spiegelpyramiden in der angegebenen Weise, so stellen wir fest:

Das reflektierte Licht ist senkrecht zum gebrochenen Licht polarisiert.

4. Das Licht als transversale Wellenbewegung. Was sagen diese Erfahrungstat-sachen über die Natur des Lichtes aus?

a) Bestände das Licht aus longitudinalen Wellen, so erfolgten die Schwingungen in der Richtung der Lichtstrahlen (Abb. 282). Dreht man den Spiegel um den einfallenden Lichtstrahl als Achse, so würde in diesem Fall

sich nichts in der gegenseitigen Lage von Spiegel und Schwingungsrichtung ändern. Es ist daher unmöglich, die Polarisation durch Reflexion longitudinaler Wellen zu erklären, da der Lichtstrahl dann in jeder Stellung des Spiegels in derselben Stärke reflektiert werden müßte.



Abb. 282. Reflexion longitudinaler Wellen bei gedrehtem Spiegel

b) Besteht aber das Licht aus transversalen Wellen, so erfolgen die Schwingungen quer zum Lichtstrahl. Trifft dann z. B. ein Lichtstrahl so auf den Spiegel, daß die Schwingungen senkrecht zur Einfallsebene liegen, und ein anderer Lichtstrahl so, daß seine Schwingungen parallel zur Einfallsebene gerichtet sind, dann besteht in beiden Fällen ein Unterschied in der gegenseitigen Lage von Schwingungsrichtung und Einfallsebene. Es ist dann ein ausreichender Grund dafür vorhanden, daß z. B. der Lichtstrahl in Abb. 283 besser in den Spiegel eindringt und der Lichtstrahl in Abb. 284 besser reflektiert wird. Wir wollen annehmen, daß es so ist. Es könnte aber auch umgekehrt sein. Eine Entscheidung können wir durch Versuche nicht treffen.

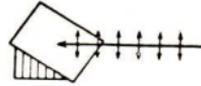


Abb. 283.



Abb. 284.

Reflexion transversaler Wellen

Wichtig ist allein, daß es keine andere brauchbare Erklärung für die Polarisationserscheinungen gibt als die, daß das Licht aus transversalen Wellen besteht.

Das Licht besteht aus transversalen Wellen.

Wir haben an unseren Versuchen über die Polarisation durch Spiegelung gesehen, daß die Ebene, in der die Schwingungen des polarisierten Strahles erfolgen, in einfacher Weise mit der Einfallsebene zusammenhängen muß, und hatten die willkürliche Annahme gemacht, daß in dem reflektierten, nunmehr polarisierten Strahle die Schwingungen senkrecht zur Einfallsebene verlaufen. Wir müssen uns dann folgerichtig in Übereinstimmung mit den Versuchen vorstellen, daß bei der Polarisation durch Brechung an einem Plattensatz die Schwingungen des gebrochenen Strahles parallel zur Einfallsebene liegen. Die Schwingungen eines polarisierten Lichtstrahles sind in jedem Falle senkrecht zur Polarisationsebene.

Bei einem Lichtstrahl, wie er von einer gewöhnlichen Lichtquelle ausgesandt wird, erfolgen die Schwingungen in allen möglichen Richtungen quer zum Strahl. Die Veränderung des Lichtes bei der Polarisation durch Spiegelung und durch Brechung besteht also darin, daß die Mannigfaltigkeit der Schwingungsebenen auf je eine bestimmte beschränkt wird.

In einem natürlichen Lichtstrahl erfolgen die Schwingungen senkrecht zum Lichtstrahl in allen möglichen Richtungen.

In einem polarisierten Lichtstrahl erfolgen die Schwingungen senkrecht zum Lichtstrahl in einer bestimmten Ebene.

Sind die Schwingungen geradlinig, so nennt man das Licht geradlinig oder **linear polarisiert**. Dies ist z. B. bei dem durch Reflexion oder Brechung gewonnenen polarisierten Licht annähernd der Fall. In vielen Kristallen wird das Licht geradlinig polarisiert.

5. Der Durchgang des Lichtes durch Kristalle. In vielen durchsichtigen Kristallen, die nicht dem regulären System angehören, wird das Licht wie im

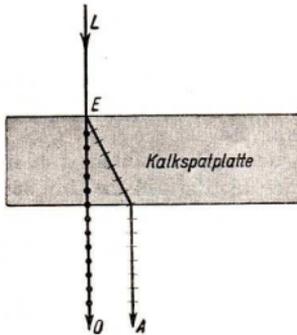


Abb. 285.
Ordentlicher und außerordentlicher Strahl
bei der Doppelbrechung des Lichtes
im Kalkspat

Kalkspat doppelt gebrochen. Kalkspat ist kristallisiertes Kalziumkarbonat. Der Doppelbrechung wegen hat er auch den Namen Doppelspat erhalten. Seine Kristalle sind Rhomboëder (Abb. 276). Die Verbindungslinien der beiden Ecken, in denen drei stumpfe Winkel zusammenstoßen, heißt die kristallographische Hauptachse oder optische Achse. Jede durch sie hindurchgelegte oder zu ihr parallele Ebene heißt Hauptschnitt.

Läßt man in *E* (Abb. 285) auf die vordere Begrenzungsfläche eines Kalkspatkristalls einen Lichtstrahl *L* senkrecht auffallen, so wird er in zwei nach dem Austritt parallele Strahlen *O* und *A* zerlegt. Der Strahl *O* geht ungebrochen hindurch und genügt damit dem Snellius-

schen Brechungsgesetz. Er heißt deshalb der **ordentliche Strahl**. Der Strahl *A* dagegen weicht ab und gehorcht einem anderen Gesetz. Er wird der **außerordentliche Strahl** genannt. Da beide Strahlen verschieden gebrochen werden, müssen sie sich im Kristall auch mit verschiedener Geschwindigkeit fortpflanzen. Beide Strahlen besitzen die gleiche Lichtstärke. Eine nähere Untersuchung zeigt, daß beide senkrecht zueinander geradlinig polarisiert sind. Wir können uns nun erklären, daß der aus dem ersten Kalkspat in der Abb. 277 austretende Strahl 1 im zweiten Kalkspat nur als Strahl 1 und Strahl 2 nur als Strahl 2 weitergehen können, wenn der erste Fall der Abbildung vorliegt. Steht der zweite Kalkspat in anderer Stellung, so stimmen die Schwingungsrichtungen der Strahlen nicht mit denen von Strahlen überein, die sich im Kristall ungestört fortpflanzen könnten. Die Schwingungen beider Strahlen werden dann in je zwei Komponenten zerlegt, und es entstehen vier Strahlen.

Mit Hilfe eines Kalkspatkristalls kann man leicht geradlinig polarisiertes Licht erzeugen, aber das Auftreten zweier Strahlen ist oft störend. Man hat daher ein Verfahren erdossen, den einen Strahl, und zwar den ordentlichen, zu beseitigen. Zu diesem Zwecke schleift man die beiden Flächen *AB* und *DC* eines Kristalls (Abb. 286 stellt einen Hauptschnitt dar) ein wenig ab, so daß die neuen Endflächen mit den Längskanten Winkel von 68° (statt vor-

her 71°) bilden und sägt den Kristall längs der Diagonalfäche AC auseinander. Die neu entstandenen Flächen werden sorgfältig geschliffen und mit Kanadabalsam wieder aufeinandergekittet. Fällt nun Licht L auf die Fläche AB ein, so geht der außerordentliche Strahl A mit geringer Verschiebung bei E hindurch. Der ordentliche Strahl O wird aber bei F an der Kanadabalsamschicht total reflektiert.

Ein so vorbereiteter Kristall heißt ein **Nicol'sches Prisma**¹⁾.

In neuester Zeit ist es gelungen, polarisiertes Licht für experimentelle Zwecke durch ein wohlfeileres Mittel zu erzeugen. Man verwendet eine dünne Schicht von Kristallen einer organischen Substanz, die senkrecht auffallendes Licht als fast vollständig polarisiertes Licht hindurchtreten lassen. Die Schicht befindet sich geschützt zwischen zwei Glasplatten. Solche Polarisatoren heißen **Polarisationsfilter**.

Ordnet man zwei Nicol'sche Prismen hintereinander an und blickt hindurch, so ist das Gesichtsfeld hell, wenn die Polarisations Ebenen in beiden Prismen parallel sind und dunkel, wenn sie senkrecht aufeinander stehen. Man unterscheidet dementsprechend **parallele** und **gekreuzte Nicols**. Bringt man zwischen gekreuzte Nicols eine senkrecht zur kristallographischen Hauptachse geschnittene Quarzplatte, so wird das Gesichtsfeld aufgehellt. Es tritt aber wieder Dunkelheit ein, wenn das eine Prisma um einen bestimmten Winkel, der von der Dicke der Quarzplatte abhängt, gedreht wird. Die Polarisations Ebene des Lichtes muß also im Quarz eine Drehung erfahren haben. Ähnlich wie Quarz verhalten sich auch andere Stoffe, z. B. eine Zuckerlösung. Bei einer solchen kann man aus der Größe der Drehung der Polarisations Ebene des Lichtes auf den Zuckergehalt schließen. Apparate für derartige Untersuchungen heißen **Saccharimeter**.

Vielfach verwendet man auch zur Untersuchung zwei Turmalinkristalle in Form der sog. **Turmalinzange**. Auch Turmalin spaltet nämlich einen auffallenden Lichtstrahl in zwei polarisierte Strahlen, doch absorbiert der Kristall schon bei geringer Dicke den ordentlichen Strahl, so daß nur der außerordentliche austritt.

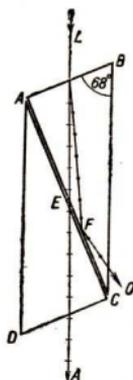


Abb. 286.
Strahlengang im
Nicol'schen Prisma

C. Elektromagnetische Wellen

§ 51. Elektrische Eigenschwingungen

Jeder Wechselstrom, der in einem Leiter fließt, ist eine „elektrische Schwingung“, denn der Strom und das Magnetfeld, das der Strom erzeugt, ändern taktmäßig ihre Richtung und Stärke. Auch die Ionen und Elektronen der Leiter, durch die der Wechselstrom fließt, bewegen sich hin und her. Es handelt sich dabei um Schwingungen, deren Schwingungsdauer durch die Umlaufzahl der Wechselstrommaschine bedingt ist, also um **aufgezwungene** Schwingungen, und nicht um freie, selbständige Schwingungen, wie wir sie im folgenden betrachten wollen.

1) William Nicol, englischer Physiker, 1768—1851.

1. Der Nachweis elektrischer Schwingungen. Wir bilden einen Stromkreis aus einem Kondensator C von 40 Mikrofaraad und zwei großen Selbstinduktionspulen L und schalten in die Verbindung einen Oszillographen (Abb. 287) ein. Dann laden wir den Kondensator auf 220 V durch kurze Berührung mit den

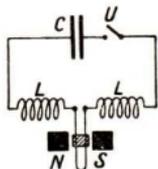


Abb. 287. Nachweis elektrischer Schwingungen

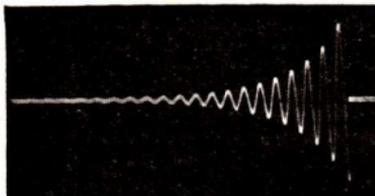


Abb. 288. Gedämpfte elektrische Schwingung

Polen des Gleichstrommetzes auf und schließen den Unterbrecher U . Der Oszillograph zeigt nun, daß in dem Leiterkreis ein Wechselstrom fließt, obwohl keine Wechselstromquelle eingeschaltet ist (Abb. 288). Die Stromstärke nimmt von Schwingung zu Schwingung ab. Wir haben gedämpfte elektrische Schwingungen.

Wir nennen einen aus einer Kapazität und einer Selbstinduktion gebildeten Leiterkreis einen elektrischen Schwingungskreis.

Wir erfahren aus dem Versuch, daß sich ein Kondensator über eine Selbstinduktion in Form einer gedämpften elektrischen Schwingung entlädt.



Abb. 289. Schwingende Glimmlichtentladung

Schaltet man statt eines Drahtschleifenoszillographen eine Glimmlampe mit ebenen Elektroden in den Schwingungskreis ein, so sieht man im rotierenden Spiegel, daß die Elektroden der Lampe abwechselnd aufleuchten. Es zeigt sich das in Abb. 289 dar-

gestellte Bild. Es läßt ebenfalls erkennen, daß ein Strom durch den Leiterkreis hin- und herfließt.

Benutzt man an Stelle des Oszillographen eine Funkenstrecke, so springt in ihr ein Funke über, wenn der Kondensator sich entlädt. Wir glauben einen einzigen leuchtenden Punkt wahr-



Abb. 290. Schwingende Funkenentladung

zunehmen, finden aber, wenn wir den Funken im rotierenden Spiegel betrachten, daß er aus einer Reihe von hin- und hergehenden Entladungen besteht. Abb. 290 zeigt das Bild einer starken Funkenentladung im rotierenden Spiegel.

2. Die Schwingungsdauer. Befestigt man eine kleine Glimmröhre R an einer Scheibe so, wie Abb. 291 andeutet, und läßt die Lampe mit der Scheibe ro-

tieren, dann erkennt man, wie abwechselnd die Elektroden bei der Entladung des Schwingungskreises aufleuchten. Man kann den Abstand der leuchtenden Streifen mit einem daneben gestellten Maßstab bestimmen. Ändert man bei gleichbleibender Umdrehungsgeschwindigkeit der Scheibe die Kapazität C oder die Selbstinduktion L des Schwingungskreises, so nimmt man wahr, daß sich der Abstand der leuchtenden Streifen ändert. Daraus geht hervor, daß die Schwingungsdauer von der Größe der Kapazität und der Selbstinduktion abhängt. Durch Messungen kann man feststellen:

Das Quadrat der Schwingungsdauer T ist proportional der Kapazität C und der Selbstinduktion L des Schwingungskreises.

Es herrscht also ein ähnlicher Zusammenhang wie zwischen Schwingungsdauer, Kraft und Masse bei der harmonischen Schwingung. Wie dort (Teil I, § 66)

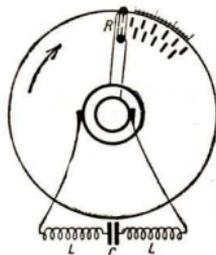


Abb. 291.
Versuch zur Schwingungsdauer elektrischer Schwingungen

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{m \cdot \frac{y}{P}}$$

ist, so ist hier

$$T = 2\pi \sqrt{L \cdot C}.$$

Mißt man die Kapazität C des Schwingungskreises in Farad und die Selbstinduktion L in Henry, so gibt die Formel die Schwingungsdauer in Sekunden.

Bemerkenswert ist, daß die Schwingungsdauer nicht von der Größe des Ohmschen Widerstandes des Schwingungskreises abhängt. Der Widerstand bewirkt nur, daß die Schwingung mehr oder weniger gedämpft wird.

Ein Schwingungskreis, der aus einer Kapazität von 10 Mikrofarad = 10^{-5} Farad und einer Selbstinduktion von 10^{-3} Henry besteht, besitzt eine Schwingungsdauer

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C} = 6,28 \cdot \sqrt{10^{-3} \cdot 10^{-5}} \text{ s} = 6,28 \cdot 10^{-4} \text{ s};$$

$$T = 0,00063 \text{ s}.$$

Ein Schwingungskreis möge aus einer Leidener Flasche von $2 \cdot 10^{-6}$ Farad und einer 10 m langen Spule von 400 Windungen und 5 cm² Querschnitt bestehen. Seine Selbstinduktion ist dann $8 \cdot 10^{-6}$ Henry. Die Schwingungsdauer beträgt in Sekunden

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{8 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-6}} \text{ s} = 7,9 \cdot 10^{-7} \text{ s}.$$

Wie sich aus diesen Beispielen ergibt, ist die Schwingungsdauer elektrischer Schwingungen im Vergleich zu der mechanischer Schwingungen außerordentlich klein.

3. Der Schwingungsvorgang. Dem Schwingungskreis wird keine Schwingung von außen aufgezwungen. Er schwingt vielmehr in seiner **Eigenschwingungsdauer**. Diese ist durch die Größe seiner Kapazität und seiner Selbstinduktion genau so festgelegt, wie die Eigenschwingungsdauer eines elastischen Pendels

durch seine Federkraft und seine Masse. Der den elektrischen Schwingungen entsprechende Pendelvorgang ist in Abb. 292 in sieben verschiedenen Phasen dargestellt. Zieht man die Kugel aus der Ruhelage (1) nach links (2),

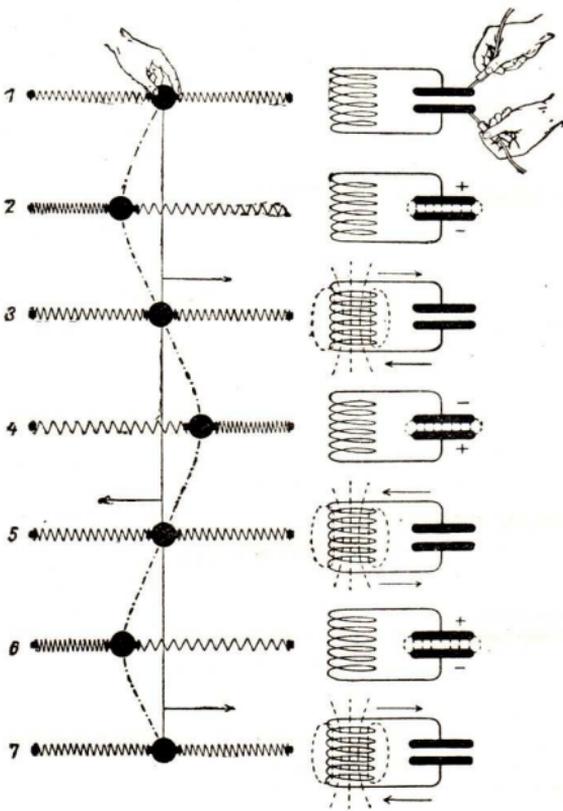


Abb. 292.
Vergleichung mechanischer und elektrischer Schwingungen

beim Loslassen in Bewegungsenergie umsetzt (3). Infolge ihrer Trägheit bewegt sich die Kugelmass über die Ruhelage hinaus und spannt die Federn in der entgegengesetzten Richtung (4); dann wiederholt sich der Vorgang, bis die Energie aufgebraucht ist. Mit dem Pendel vergleichen wir den Leiterkreis (Abb. 292), der aus der Selbstinduktionsspule L und dem Kondensator C besteht. Dem Kondensator entsprechen die Federn, beide erhalten eine Spannung, die Federn dadurch, daß wir sie „spannen“, der Kondensator dadurch, daß wir ihn aufladen. Der Selbstinduktion der Spule entspricht die Masse der Kugel, beide besitzen Trägheit. In 2 besteht zwischen den Platten des geladenen

Kondensators ein elektrisches Feld, das in 3 bei der Entladung zusammenbricht; dafür fließt ein elektrischer Strom, der in der Spule ein magnetisches Kraftfeld erzeugt. Die Selbstinduktion der Spule, in der sich die Trägheit des elektrischen Vorganges äußert, bewirkt ein Weiterfließen des Stromes über den Ausgleich der Ladungen hinaus, wodurch in 4 die Kondensatorplatten umgekehrt aufgeladen werden. In 5 fließt wieder der Entladungsstrom, der der Spule von neuem magnetische Energie zuführt; diese bewirkt

ein Aufladen des Kondensators mit elektrischer Energie, und so wiederholt sich dieser Vorgang der elektrischen Schwingung, bis sich alle Energie in Wärme verwandelt hat. Man erkennt aus der Untersuchung, daß zwischen Spannung und Strom ein Phasenunterschied von $\frac{1}{4}$ Schwingungsdauer besteht.

Bei einer elektrischen Schwingung wandeln sich elektrische und magnetische Energie ineinander um wie bei einer mechanischen Schwingung Lagen- und Bewegungsenergie.

Ist der Ohmsche Widerstand gleich 0, so geschieht die Umwandlung ohne jeden Energieverlust. Dann ist die Schwingung ungedämpft. Ist aber der Widerstand nicht 0, so wird im Leiter Wärme entwickelt. Die Schwingung verliert an Energie. Sie wird gedämpft.

Zur Übung: 1. Wie groß ist die Eigenschwingungsdauer eines Schwingungskreises, dessen Kapazität aus 40 Mikrofara und dessen Selbstinduktion aus zwei hintereinandergeschalteten Spulen von je 0,1 Henry besteht? — 2. Wie groß ist die Schwingungsdauer in einem Schwingungskreis, der aus einem Glimmerkondensator (Dicke der Glimmerplatte 0,1 mm, Größe 3 cm · 5 cm, $\epsilon^* = 8$) und einer eisenfreien Spule von 100 Windungen, 10 cm Länge und 3 cm² Querschnitt besteht?

§ 52. Erzeugung und Übertragung gedämpfter Schwingungen

1. Erzeugung gedämpfter Schwingungen. Zur Erzeugung gedämpfter elektrischer Schwingungen benutzt man in der Regel einen Schwingungskreis, der aus einer Selbstinduktion, einer Kapazität und einer Funkenstrecke besteht. Lädt man den Kondensator C durch einen Induktor oder Transformator J auf, so springen in F Funken über (Abb. 293). Jede einzelne Funkenentladung ist eine elektrische Schwingung. Selbst wenn der Kondensator durch Wechselstrom 1000 mal in jeder Sekunde aufgeladen wird, sind die elektrischen Eigenschwingungen des Schwingungskreises längst erloschen, wenn die neue Aufladung stattfindet, denn die Eigenschwingungsdauer beträgt nur 10^{-6} bis 10^{-5} s. Eine gedämpfte Schwingung von 20 Perioden, wie sie durch Abb. 288 dargestellt wird, dauert etwa $2 \cdot 10^{-5}$ bis $2 \cdot 10^{-4}$ s. Man kann daher durch 1000 Ladungen pro Sekunde den Schwingungskreis zu tausend voneinander getrennten Gruppen von gedämpften Schwingungen anregen. Bei dem Entstehen der elektrischen Schwingung bewirkt die Funkenstrecke, daß die Entladung nicht früher einsetzt, als bis C eine gewisse Ladung aufgenommen hat.

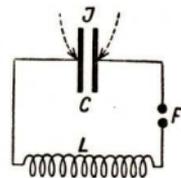


Abb. 293. Gedämpfter Schwingungskreis

2. Übertragung der Schwingungen durch Resonanz. Man kann die elektrische Schwingung eines Schwingungskreises I auf einen Schwingungskreis II (Abb. 294) übertragen; dazu müssen beide Schwingungskreise miteinander gekoppelt werden.

Die Koppelung kann kapazitiv, galvanisch oder induktiv sein. Kapazitiv ist sie, wenn beide Schwingungskreise einen Kondensator gemeinsam haben, galvanisch, wenn ein Stück der Leitung beiden gemeinsam ist, und induktiv, wenn das Magnetfeld der Spule L_1 die Windungen der Spule L_2 umschlingt (Abb. 294). Die Koppelung kann fest sein oder lose, je nachdem ob z. B. bei induktiver Koppelung viele oder nur wenige magnetische Feldlinien beide Spulen gemeinsam umschlingen.

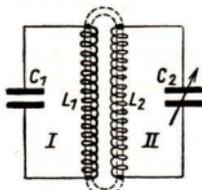


Abb. 294. Übertragung von Schwingungen durch Resonanz

Soll die Energie des Schwingungskreises I den Kreis II zu Schwingungen veranlassen, so muß Resonanz zwischen den Schwingungskreisen bestehen. Sie müssen in der Eigenschwingungsdauer übereinstimmen.

Resonanz besteht, wenn $T_1 = T_2$, also $L_1 \cdot C_1 = L_2 \cdot C_2$ ist.

Resonanz stellt man meist her, indem man in dem einen Schwingungskreis einen Kondensator von veränderlicher Kapazität (Drehkondensator) benutzt.

3. Messungen an Schwingungskreisen. Man kann auf verschiedene Weise feststellen, ob Resonanz zwischen zwei Schwingungskreisen herrscht. Man kann im Schwingungskreis II parallel zum Kondensator eine kleine Glimmlampe einbauen, die infolge der herrschenden Spannung leuchtet, wenn die Schwingung übertragen ist. Man kann in die Leitung eine kleine Glühlampe einfügen, die glüht, wenn der Strom bei der Schwingung durch die Leitung fließt. Für elektrische Schwingungen geringer Energie benutzt man zum Nachweis der in II auftretenden Schwingungen ein Telephon T (Abb. 295). Man schaltet es mit einem Detektor D (§ 33)

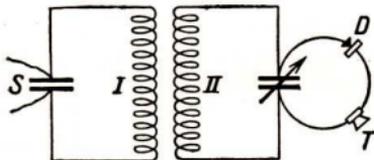


Abb. 295. Nachweis der Schwingungen durch Telephon

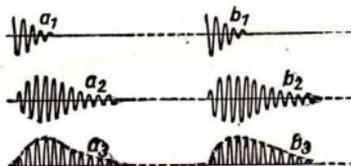


Abb. 296. Zusammenhang der Schwingungen in den Kreisen I und II

parallel zu dem Drehkondensator. Wird der Kondensator bei I durch einen Induktor (Summer) S z. B. etwa 100 mal je Sekunde aufgeladen, so erfolgen 100 mal nacheinander kurzdauernde gedämpfte Schwingungen a_1, b_1 (Abb. 296). Diese werden bei Resonanz auf den Schwingungskreis II übertragen. In diesem entstehen dann Schwingungen a_2, b_2, \dots , die anwachsen, so lange sie Energie aus I entnehmen, und darauf gedämpft abklingen. Der Detektor läßt die Ströme nur in der einen Richtung zum Telephon gelangen; in diesem fließen daher Gruppen von Gleichstromstößen a_3, b_3, \dots . Jede Gruppe wirkt wie ein einziger Stoß auf die Telephonmembran. Sie wird daher so oft angestoßen, wie der Kondensator aufgeladen wird. Man hört im Telephon einen Ton der Schwingungszahl 100.

Auf diese Weise kann man nachprüfen, ob zwei Schwingungskreise aufeinander „abgestimmt“ sind.

Man kann das Verfahren auch zur Messung der Selbstinduktion einer Spule oder der Kapazität eines Kondensators verwenden.

4. Der Teslatransformator. Die schnellen Eigenschwingungen in einem Schwingungskreis hat Tesla zuerst zur Erzeugung hoher elektrischer Spannungen benutzt. In einem Schwingungskreis I , dessen Kapazität C durch einen Induktor J (Abb. 297) aufgeladen wird, werden durch Funkenentladung bei F elektrische Schwingungen eingeleitet. Durch Veränderung der Kapazität kann die Schwingungsdauer geändert werden. Der Schwingungskreis enthält als

Selbstinduktion eine aus wenigen Windungen dicken Drahtes bestehende Spule S . In das Innere dieser Spule kann eine aus dünnem Kupferdraht dicht und einlagig gewickelte Spule T gebracht werden. Sie besitzt eine große Selbstinduktion und eine gewisse Kapazität; sie hat deshalb auch eine bestimmte Eigenschwingungsdauer und stellt einen „Schwingungskreis“ dar. Läßt man die in I erzeugten Schwingungen auf II wirken, und stimmt durch Änderung von C beide aufeinander ab, so entsteht in II eine so hohe elektrische Spannung, daß an den Enden der Spule eine starke Büschelentladung auftritt. Das Feld ist so stark, daß elektrodenlose Glimmlichtröhren in ihm aufleuchten. Die hohe Spannung erklärt sich aus dem Windungsverhältnis beider Spulen.

Mit Teslaströmen kann man zeigen, daß elektrischer Wechselstrom hoher Wechselzahl fast nur an der Oberfläche der Leiter fließt. Deshalb kann man z. B. den in Tesla spulen erregten Strom auf den menschlichen Körper ohne Schädigung übergehen lassen.

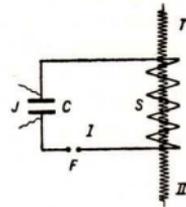


Abb. 297.
Teslastransformator

§ 53. Ungedämpfte elektrische Schwingungen

1. Die Glühkathodenröhre als Schwingungserreger. Wir haben in § 30 von der Verwendung der Glühkathodenröhre als Verstärker von Wechselströmen und als Gleichrichter gesprochen. Sehr viel wird sie auch zur Erzeugung ungedämpfter elektrischer Schwingungen benutzt. Sie eignet sich dazu, sehr schnelle Schwingungen zu erzeugen, weil sich die aus dem Glühfaden austretenden Elektronen wegen ihrer äußerst geringen Trägheit rasch hin und her bewegen lassen. Wie die Röhre als Sender wirkt, sei an Hand von Abb. 298 besprochen. Das Gitter S und der Heizdraht D sind mit einem Schwingungskreis I verbunden, der aus der Kapazität C und der Selbstinduktionsspule I besteht. An der Anode A liegt der positive Pol der Batterie B . Wird der Heizstrom der Röhre eingeschaltet, so treten Elektronen aus dem Glühfaden aus. Es fließt ein Anodenstrom von D nach A . Ein Teil der dabei von D nach A wandernden Elektronen wird vom Gitter abgefangen, das sich dabei negativ auflädt. Da das Gitter mit dem Kondensator C verbunden ist, lädt sich die obere Belegung des Kondensators negativ und die untere, die mit dem Glühfaden verbunden ist, positiv auf. Sobald das elektrische Feld des Kondensators entstanden ist, entlädt er sich schwingend. Nach einer halben Schwingungsdauer sind die obere Belegung und ebenso das mit ihr verbundene Gitter S positiv geladen, während die untere Belegung negative Ladung annimmt. Nach einer weiteren halben Schwingung ist mit der oberen Belegung zugleich auch das Gitter wieder negativ und die untere Belegung positiv. So geht es fortgesetzt weiter. Die Schwingung ist anfangs sehr schwach.

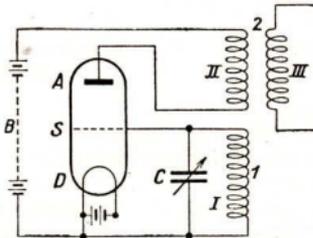


Abb. 298. Schaltung eines Senders

Von dem Augenblick ab, wo das Gitter wechselnde Ladungen zeigt, wird der Anodenstrom durch sie beeinflusst. Er wird stärker als vorher, wenn das Gitter positiv und schwächer als vorher, wenn es negativ geladen ist. Es fließen dann durch die Kathodenröhre Gleichstromstöße, die im Takt der Schwingungen des Schwingungskreises I unterbrochen werden. Je kleiner die Kapazität und die Selbstinduktion dieses Schwingungskreises sind, desto schneller ist die Folge der Gleichstromstöße.

Aus diesen gleichgerichteten Stromschwankungen kann man verstärkte Wechselstromschwingungen erzeugen, indem man sie durch eine in den Anodenstromkreis eingeschaltete Spule 2 auf einen Kreis III Induktionswirkungen ausüben läßt (induktive Koppelung). Dann entsteht in III eine ungedämpfte Schwingung, deren Schwingungsdauer mit der des Schwingungskreises I übereinstimmt. Die Spule 2 ist mit der Spule 1 induktiv gekoppelt. Deshalb wirken die im Anodenkreis schon verstärkten Schwingungen durch die Spule 2 verstärkend auf den Gitterkreis zurück, der dann seinerseits den Anodenstrom wieder verstärkt. Man bezeichnet diesen Vorgang als „Rückkoppelung“. Auf die vielen Formen der Glühkathodenröhren, die zur Erregung elektrischer Schwingungen dienen und die „Senderöhren“ genannt werden, kann hier nicht eingegangen werden; ebenso nicht auf die vielen Schaltungen, die bei den Sendern verwendet werden. Abb. 299 zeigt eine Senderöhre, wie sie im Rundfunk Verwendung findet.



Abb. 299.
Senderöhre

2. Hochfrequenzverstärker und Audion. Es sei noch die Verwendung der Glühkathodenröhre zur Verstärkung und Gleichrichtung hochfrequenter Schwingungen besprochen.

Die Zahl der Schwingungen je Sekunde mißt man in „Hertz“ (Hz); 1 Hertz = 1 Schwingung je Sekunde. Man spricht von **niederfrequenten** Schwingungen, wenn es sich um Schwingungszahlen von 30 bis 5000 Hz handelt (Sprachschwingungen). **Hochfrequente** Schwingungen sind solche, deren Schwingungszahlen sich auf 100 000 und mehr Hertz belaufen. (Drahtlose Telegraphie und Telephonie, Rundfunk, Fernsehen.) Durch Überlagerung einer hochfrequenten Schwingung (z. B. $f_1 = 1\,000\,000$ Hz mit einer niederfrequenten (z. B. $f_2 = 1000$ Hz) kann die Schwingungsweite der hochfrequenten im Takte der niederfrequenten geändert werden. Die hochfrequente Welle nennt man die **Trägerwelle**. Indem der Verstärker die einzelnen (hochfrequenten) Schwingungen verstärkt, verstärkt er auch die überlagerte niederfrequente Schwingung. Zur Verstärkung wird, weil es sich um eine Schwingung von konstanter Frequenz handelt, die Resonanz ausgenutzt (vgl. § 52). In Abb. 300 ist eine Schaltung wiedergegeben, bei der eine Glühkathodenröhre gleichzeitig als Verstärker und Gleichrichter (Audion) für hochfrequente Schwingungen dient. Die hochfrequenten Schwingungen kommen in einer Spule L_1 eines Schwingungskreises I an. Sie wirken auf die

Spule L_2 , die mit der veränderlichen Kapazität C_2 zu einem Schwingungskreis geschaltet ist. Durch Veränderung der Kapazität wird die Schwingungsdauer auf die ankommende Schwingung abgestimmt. Die Schwingungen in II wirken auf das Gitter S ein, mit dem der Schwingungskreis II verbunden ist. Der Kondensator C unterbricht zwar für Gleichstrom die leitende Verbindung mit S , hindert aber nicht die Beeinflussung von S durch die Schwingungen. Der hohe Widerstand R bewirkt, daß unerwünschte Ladungen des Gitters langsam abgeleitet werden. Wäre der Widerstand R nicht vorhanden, also das Gitter vollkommen isoliert, so würde es sich durch die auftretenden Elektronen so stark negativ aufladen, daß überhaupt kein Strom zur Anode fließen könnte. Man wählt nun den Ableitwiderstand R gerade so, daß die Gitteraufladung zwar nicht mehr den schnellen hochfrequenten, wohl aber noch den langsamen niederfrequenten Schwingungen folgen kann. Die Gitterladung stellt sich dann so ein, daß nur die positive Halbwelle des niederfrequenten Wechselstromes durchgelassen, die negative aber unterdrückt wird.

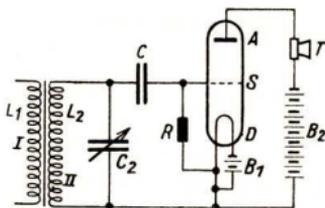


Abb. 300. Verstärkung und Gleichrichtung einer hochfrequenten Schwingung

Die schwache Wechselspannung wird also in stärkere Gleichstromschwankungen umgewandelt. Benutzt man die in Abb. 301 gezeichnete Schaltung, so erhöht sich die verstärkende Wirkung der Röhre wesentlich. In dieser Schaltung ist der Anodenkreis mit dem Schwingungskreis II (dem Gitterkreis) durch zwei Spulen Sp „rückgekoppelt“. Diese Rückkoppelung bewirkt, daß die Schwingungen in II durch die verstärkten Stromstöße des Anodenkreises „aufgeschaukelt“ werden. So regen sie sich gegenseitig zur stärksten Schwingungsweite an (wie Magnetfeld und Ankerstrom bei „Selbsterregung“ der Dynamomaschine).

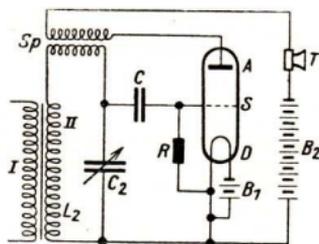


Abb. 301. Rückkoppelung

§ 54. Elektrische Wellen längs Drähten

1. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des elektrischen Feldes. Wir knüpfen an eine Frage an, von der wir bereits in § 5 gesprochen haben, die aber unbeantwortet geblieben ist. Überträgt man auf zwei Leiter $A_1 B_1$ und $A_2 B_2$ elektrische Felder mit isolierten Metallkugeln in der in § 5 angegebenen Weise, so verteilt sich das Feld über den Raum zwischen den beiden Leitern (Abb. 302). Wir wissen, daß diese Verteilung sehr rasch vor sich geht. Zu wissen, wie rasch sie erfolgt, ist wichtig für uns, denn nur dann, wenn man

die Ausbreitungsgeschwindigkeit des elektrischen Feldes (quer zum Verlauf der elektrischen Feldlinien) kennt, kann man beurteilen, welche Wirkungen

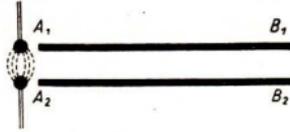


Abb. 302. Ausbreitungsgeschwindigkeit des elektrischen Feldes

schnelle elektrische Schwingungen in der Umgebung des Schwingungserregers hervorrufen. Wir stellen uns daher die Aufgabe zu bestimmen, mit welcher Geschwindigkeit elektrische Felder, die auf zwei Leiter in A_1 bzw. A_2 übertragen worden sind, sich von A_1 nach B_1 bzw. von A_2 nach B_2 ausbreiten. Mit der Uhr kann man diese Geschwindigkeit nicht

messen, dazu ist sie viel zu groß. Man kann aber auf folgendem Wege Aufschluß über die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines elektrischen Feldes erlangen:

2. Stehende elektrische Wellen. Wir benutzen einen Schwingungskreis mit sehr kleiner Kapazität und sehr kleiner Selbstinduktion. Er bestehe aus weiter nichts als aus zwei dicken Kupferdrähten S_1 und S_2 (Abb. 303), zwischen denen elektrische Funken überspringen, wenn sie

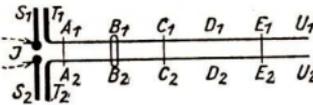


Abb. 303. Ausbreitung elektrischer Wellen längs Drähten

durch einen Funkeninduktor J oder Teslatransformator aufgeladen werden. Jede einzelne Funkenentladung besteht aus einer Anzahl sehr schneller elektrischer Schwingungen. Einen derartigen Schwingungskreis nennen wir einen elektrischen Dipol. Sind die Kupferdrahtstücke etwa 10 cm lang, so ist die Schwingungsdauer von der Größenordnung 10^{-9} s.

Dem Dipol dicht gegenüber werden zwei Kupferdrähte T_1 und T_2 aufgestellt, die umgebogen sind und auf einer Länge von 1 bis 2 m in 3 bis 4 cm Abstand parallel zueinander geführt sind. Setzen in S_1 und S_2 elektrische Schwingungen ein, so erregen sie in T_1 und T_2 erzwungene elektrische Schwingungen. Von T_1 läuft ein Ladungsstoß längs des Drahtes nach U_1 , wird dort reflektiert und läuft wieder nach T_1 zurück. Von T_2 läuft gleichzeitig ein entgegengesetzt gerichteter Ladungsstoß nach U_2 und zurück. In den Drähten $T_1 U_1$ und $T_2 U_2$ schwingt also die elektrische Ladung hin und her. In jedem einzelnen Draht vollziehen sich dabei Vorgänge, die an die Schwingungen eines ausgespannten Seiles (Abb. 304) erinnern, dessen Ende T taktmäßig auf und ab bewegt wird und dessen Ende U festgehalten wird, aber doch noch schwingungsfähig ist.

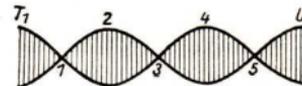


Abb. 304. Schwingungen eines Seiles

Ist die Drahtlänge $T_1 U_1$ auf die Schwingung in S_1 und S_2 „abgestimmt“, so begegnen sich an gewissen Stellen des Raumes zwischen den Drähten stets zwei entgegengesetzt gerichtete Spannungen und an anderen

Stellen stets gleichgerichtete Spannungen. In dem Raum zwischen den Drähten treten in gleichen Abständen Schwingungsknoten und Schwingungsbäuche der elektrischen Spannung auf (Abb. 303). In den Schwingungsbäuchen besteht ein schnell wechselndes Feld.

An den Enden der beiden Drähte liegen Schwingungsbäuche der Spannung. U_1 ist negativ, wenn U_2 positiv ist, und T_1 ist positiv, wenn T_2 negativ ist (Abb. 303). Damit nur die Eigenschwingung von S_1 und S_2 auf $T_1 U_1$ bzw. $T_2 U_2$ übertragen wird, legt man bei $A_1 A_2$ einen Draht quer über beide Drähte und verschiebt ihn so lange, bis zwischen S_1 und S_2 einerseits und $T_1 A_1 A_2 T_2$ andererseits Resonanz herrscht. Führt man dann eine kleine Glimmlicht-röhre, die quer über die Drähte gelegt ist, an den Drähten entlang, so nimmt man wahr, daß sie an den Schwingungsbäuchen der Spannung hell aufleuchtet und an den Knoten nicht leuchtet. So kann man die Lage der Knoten und Bäuche feststellen. In Abb. 303 sind vier Schwin-

gungsbäuche und drei Knoten gezeichnet. In T_1 und T_2 , B_1B_2 , D_1D_2 , U_1U_2 schwingt die elektrische Spannung zwischen den Drähten wie an den Stellen T , 2, 4, U des Seiles (Abb. 304) auf und ab. An den Stellen A_1A_2 , C_1C_2 , E_1E_2 herrscht keine Spannung zwischen den Drähten. Sie gleichen den Knoten 1, 3, 5 des schwingenden Seiles. Wir finden also:

Das elektrische Feld breitet sich zwischen den beiden Drähten als elektrische Welle aus. Längs der beiden Drähte treten stehende elektrische Wellen auf. Die Knoten und Bäuche der Spannung können mit der Glimmröhre festgestellt werden.

3. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Spannungsimpulses. Die Wellenlänge λ der längs der Drähte auftretenden elektrischen Wellen ist gleich dem doppelten Abstand zweier benachbarter Schwingungsknoten. Die Schwingungsdauer stimmt mit der Schwingungsdauer des Dipols überein. Kennt man seine Kapazität C und seine Selbstinduktion L , so kann man seine Schwingungsdauer aus der Formel $T = 2\pi\sqrt{L \cdot C}$ berechnen. Aus λ und T findet man dann c mit Hilfe der Formel $c = \frac{\lambda}{T}$.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des elektrischen Feldes senkrecht zu den Feldlinien beträgt

$$c = 300\,000 \text{ km/s.}$$

Sie stimmt also mit der Geschwindigkeit des Lichtes überein. Führt man die Drähte durch Öl, Alkohol, Wasser usw., so nimmt man ebenfalls elektrische Wellen wahr. Bei derselben Schwingungszahl ist die Wellenlänge kleiner als im leeren Raum. Die Untersuchung ergibt:

In einem Raum, der von einem Stoff ausgefüllt ist, dessen Dielektrizitätskonstante ϵ^* ist, beträgt die Ausbreitungsgeschwindigkeit des elektrischen Feldes

$$c_1 = \frac{c}{\sqrt{\epsilon^*}}.$$

§ 55. Elektromagnetische Wellen im Raum

1. Geschlossener und offener Schwingungskreis. Besitzt ein Schwingungskreis die in Abb. 305a gezeichnete geschlossene Form, so ist die Energie des elektrischen Feldes auf den engen Raum zwischen den Kondensatorplatten zusammengedrängt. Werden die Kondensatorplatten auseinandergezogen, bis

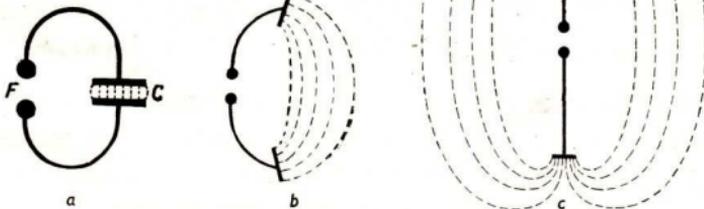


Abb. 305. a geschlossener, b halboffener, c offener Schwingungskreis

der Schwingungskreis zum Dipol wird (Abb. 305 b und c) – der Schwingungskreis heißt dann offen – so ist die Energie des Feldes über einen weiten Raum verteilt. Während die Schwingung im geschlossenen Schwingungskreis im wesentlichen durch die Erzeugung von Stromwärme gedämpft wird, schwingt der offene Schwingungskreis auch deshalb gedämpft, weil sich Energie im Raum ausbreitet.

2. Das elektromagnetische Feld des Dipols. In einem Dipol spielen sich bei den elektrischen Schwingungen dieselben Vorgänge ab, von denen wir schon

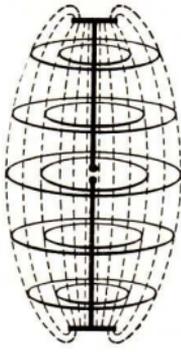


Abb. 306.
Das elektromagnetische
Feld eines Dipols

beim geschlossenen Schwingungskreis (§ 51) gesprochen haben. Er ist von einem elektromagnetischen Feld umgeben, das die in Abb. 306 dargestellte Form besitzt. Während das elektrische Feld zerfällt, wächst das magnetische und während das magnetische Feld zerfällt, wächst das elektrische.

Der Raum, der den Dipol umgibt, enthält ein elektromagnetisches Feld und elektromagnetische Energie.

Durch die Änderung des Stromes und des mit ihm verknüpften magnetischen Feldes werden in den benachbarten Raumteilen elektrische Felder mit geschlossenen Feldlinien induziert, welche die magnetischen Feldlinien umschließen. Da auch dieses elektrische Feld wieder verschwindet (denn das Magnetfeld, welches bei seinem Verschwinden das elektrische Feld erzeugte, nimmt inzwischen wieder zu und induziert dadurch ein entgegengesetztes, das bisherige schwächendes elektrisches Feld), entsteht in seiner Umgebung ein neues magnetisches Feld, dann wieder ein elektrisches usw. Auf diese Weise pflanzt sich die elektromagnetische Energie mit der Geschwindigkeit c mit der Wellenlänge $\lambda = \frac{c}{\nu}$ in dem Raum fort, wobei ν die Frequenz der Dipolschwingung ist. Das Feld erstreckt sich bis ins Unendliche. Seine Feldstärke ist in der Nähe des Dipols groß und in weiter Entfernung von ihm sehr klein. Bei einer elektrischen Schwingung besteht aber ein und dasselbe elektrische Feld nur während einer halben Schwingungsdauer. Wie wir gesehen haben, breitet sich das elektrische Feld mit der Geschwindigkeit $c = 300\,000$ km/s quer zu den Feldlinien aus. Beträgt z. B. die Dauer des Feldes $\frac{1}{100\,000}$ s, so dringt es in dieser Zeit 3 km tief in den Raum ein.

3. Elektromagnetische Wellen im Raum. Führt ein Schwingungskreis 250 000 Schwingungen je Sekunde aus, so dauert es gerade $\frac{1}{1\,000\,000}$ s, bis das elektrische Feld von Null auf seinen größten Wert angewachsen ist. In dieser Zeit kann es sich um 300 m ausbreiten (Abb. 307). In der nächsten $\frac{1}{1\,000\,000}$ s

zerfällt es wieder. Der Zerfall fängt am Schwingungskreis an und dringt in dieser Zeit 300 m weit. Dieser Vorgang setzt sich bei der Schwingung

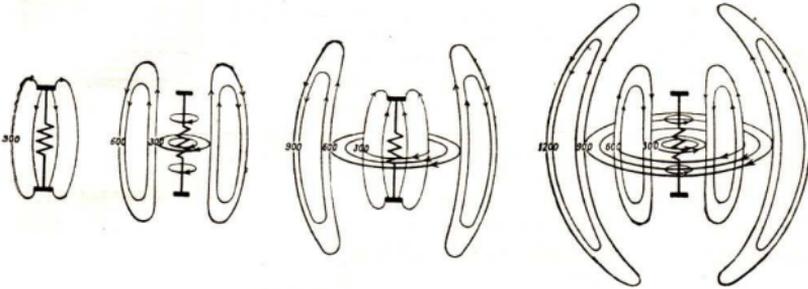


Abb. 307. Ausbreitung des Feldes eines Dipols

fort. So schreiten elektrische Felder wechselnder Richtung und sie umschlingende magnetische Felder wechselnder Richtung in dem Raum fort.

Es entstehen elektromagnetische Wellen im Raum.

4. Nachweis der Wellen im Raum. Zum Nachweis der Wellen im Raum verwenden wir zwei Dipole, wie sie Abb. 308 zeigt. In A_1, A_2 werden elektrische Schwingungen durch Aufladen mit einem Induktor J und Funkenentladung erregt. Der Dipol B_1, B_2 wird auf A_1, A_2 abgestimmt. Parallel zu der Unterbrechungsstelle ist ein Detektor und ein Galvanometer G eingeschaltet. Der Detektor leitet die wechselnden Ströme der Schwingungen in einer Richtung gut, in der entgegengesetzten nicht. Diese fließen dann als Gleichstromstöße durch das Galvanometer. Die vom Dipol ausgesandten elektrischen Wellen werden also durch elektrische Ströme nachgewiesen. Auf dieses Weise kann man zeigen:



Abb. 308. Nachweis der elektrischen Wellen im Raum

- a) Die in B_1, B_2 aufgenommene Energie der Wellen nimmt mit dem Quadrat der Entfernung ab.
- b) Die von A ausgehenden elektrischen Wellen werden an einem Schirm Sp aus Blech (Abb. 309) nach dem Reflexionsgesetz reflektiert. Sie können durch einen Hohlspiegel aus Blech in einer Richtung zusammengefaßt werden (Abb. 310).

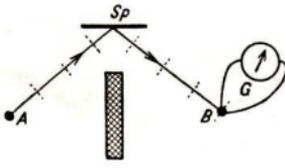


Abb. 309.

Reflexion der Wellen

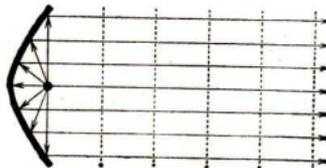


Abb. 310.

- c) Sie werden gebrochen, wenn sie durch ein Prisma aus Asphalt gehen (Abb. 311). Das Brechungsverhältnis der Wellen ist $n = \sqrt{\epsilon^*}$ (ϵ^* ist die Dielektrizitätskonstante von Asphalt).

d) Läßt man die Wellen senkrecht auf einen Metallschirm fallen, so werden sie in der entgegengesetzten Richtung zurückgeworfen. Es treten im Raum stehende elektrische Wellen auf. Aus dem Abstand der Knoten kann man die Wellenlänge bestimmen. Sie ist gleich der doppelten Länge des Dipols.

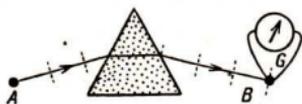
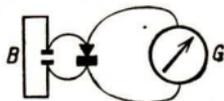


Abb. 311. Brechung der Wellen

e) Man kann nachweisen, daß die Wellen polarisiert sind, indem man sie auf ein Gitter von parallel ausgespannten Drähten fallen läßt (Abb. 312). Verlaufen die Drähte parallel zu den elektrischen Feldlinien, so werden die Wellen nicht vom Gitter hindurchgelassen; verlaufen sie senkrecht zu ihm, so gehen sie hindurch.

Abb. 312.
Gitter zum Nachweis der Polarisation der Wellen

f) Endlich kann man mit einem ringförmig geschlossenen, auf A_1A_2 (Abb. 308) abgestimmten kleinen Schwingungskreis B (Abb. 313) zeigen, daß in stehenden elektromagne-

Abb. 313 Nachweis
der magnetischen WellenAbb. 314. Beziehungen zwischen den elektrischen
und magnetischen Wellen

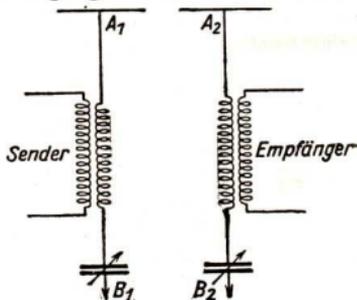
tischen Wellen auch Knoten und Bäuche der magnetischen Schwingung auftreten. Die Knoten der magnetischen Schwingungen sind gegen die Knoten der elektrischen um $\lambda/4$ verschoben (Abb. 314).

Diese im Raum auftretenden elektromagnetischen Wellen hat Maxwell zuerst theoretisch vorausgesagt. Sie wurden in eindrucksvollen Versuchen von Heinrich Hertz 1887–1889 experimentell nachgewiesen.

§ 56. Die drahtlose Telegraphie und Telephonie

Das Hauptanwendungsgebiet elektromagnetischer Wellen ist die drahtlose Telegraphie und Telephonie. Seit dem Jahre 1895 ist die Technik mit Erfolg bemüht, Nachrichten drahtlos zu übertragen. Man hat zuerst gedämpfte elektromagnetische Wellen benutzt, die in Schwingungskreisen mit elektrischen Funkenentladungen erregt wurden. Daher nannte man die drahtlose Telegraphie „Funkentelegraphie“. Heute verwendet man nur noch ungedämpfte Wellen, nachdem man entdeckt hat, daß die Glühkathodenröhre sich zur Erzeugung ungedämpfter Wellen vorzüglich eignet (§ 53).

1. Das Prinzip der Übertragung. In der Sendestation werden in einer Glühkathodenröhre besonderer Bauart, der Senderöhre (§ 53), hochfrequente

Abb. 315. Antennenkreise
von Sender und Empfänger

elektrische Schwingungen erzeugt. Sie werden auf einen „offenen“ Schwingungskreis, den Antennenkreis $A_1 B_1$, durch Koppelung übertragen (Abb. 315). Dieser Kreis strahlt die Schwingungsenergie in den Raum aus. Die Schwingungen im Antennenkreis erfolgen dauernd in gleicher Stärke, weil fortgesetzt Energie aus dem Sender zugeführt wird. Abb. 316 stellt die elektrischen Schwingungen im Antennenkreis $A_1 B_1$ graphisch dar.



Abb. 316. Elektrische Schwingungen im Antennenkreis $A_1 B_1$

Der Antennenkreis gleicht dem Dipol. Aus ihm quellen elektrische und magnetische Felder hervor, die sich mit Lichtgeschwindigkeit durch den Raum ausbreiten. Die zwischen der hoch über dem Erdboden ausgespannten Antenne und der Erde schwingenden elektrischen Felder pflanzen sich längs der Erde so fort, wie es Abb. 317 angibt. Senkrecht dazu verlaufen die magnetischen Felder. Gelangen diese Wellen in den Bereich der Antenne einer anderen Station und wird der Antennenkreis $A_2 B_2$ dieser Empfangsstation (Abb. 315) durch Veränderung der Kapazität auf die Schwingung der Sendestation abgestimmt, so wird die in den Raum ausgestrahlte Energie, soweit sie im Bereich des Empfängers eintrifft, aufgefangen. Es entstehen elektrische Schwingungen im Antennenkreis, die über einen mit dem Antennenkreis $A_2 B_2$ gekoppelten Kreis zum Empfänger geleitet werden.

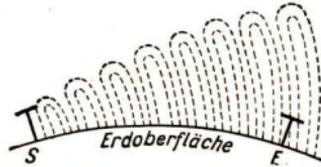


Abb. 317. Ausbreitung der Wellen längs der Erdoberfläche

2. Die Vorgänge beim Empfang. Die Empfangsantennen sind so eingerichtet, daß sie entweder die elektrischen Felder oder die magnetischen Felder zum Empfang ausnutzen. Abb. 318 deutet an, wie die von einem Dipol ausgesandten elektrischen Wellen im Raum fortschreiten. Sie mögen von einer Antenne empfangen werden, die selbst ein Dipol ist. In dem Augenblick, in dem das elektrische Feld über den Dipol hinwegschreitet, wird er influenziert (Abb. 319). In ihm entsteht ein zum äußeren Feld entgegengesetztes Feld, so daß der Leiter selbst feldfrei ist. An seinen Enden treten Ladungen auf. Wandert das äußere Feld weiter, so gleichen sich die Ladungen im Dipol aus. Es entsteht ein Strom, der auf

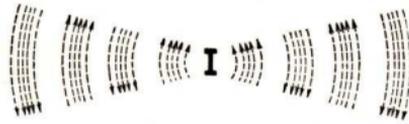


Abb. 318. Elektrischer Wellenzug

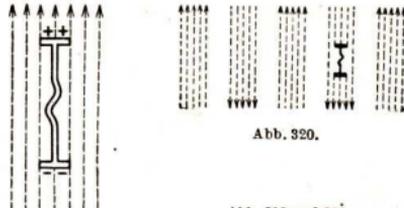


Abb. 319.

Abb. 320.

Abb. 319 und 320. Empfang elektrischer Wellen

die Empfangsgeräte wirkt. Da die über die Antenne wandernden Felder in ihrer Richtung wechseln, entsteht in ihr ein hochfrequenter Wechselstrom (Abb. 320). In der Antenne der Empfangsstation verlaufen also elektrische Schwingungen genau so wie in der Antenne der Sendestation. Die von der Sendestation ausgehenden **magnetischen Wellen** (Abb. 321 u. 322) wirken am besten auf eine Rahmenantenne.

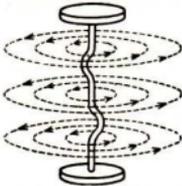


Abb. 321.
Magnetische Wellen

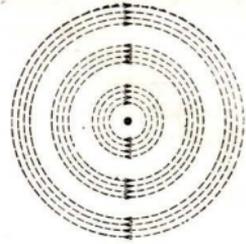


Abb. 322.
Magnetischer Wellenzug

Sie besteht aus mehreren Drahtwindungen, die auf einen großen Rahmen gewickelt sind (Abb. 323). Treten die magnetischen Feldlinien senkrecht durch die Windungsfläche hindurch, so erzeugen sie einen Induktionsstrom. Die aufeinander folgenden, in ihren Richtungen wechselnden magnetischen Felder der Wellen rufen dann in der Antenne einen hochfrequenten Wechselstrom hervor, der die Empfangsgeräte beeinflusst.

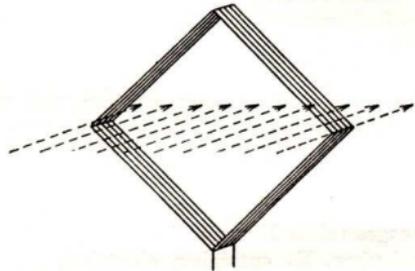


Abb. 323. Rahmenantenne

3. Drahtlose Telegraphie. Bei der Telegraphie wird der Antennenstrom des Senders im Morsezeichentakt unterbrochen und geschlossen. Auf der Empfangsstation kommen dann in $A_2 B_2$ lange und kurze Gruppen von Wellen gleicher Schwingungsweite an (Abb. 324). Sie gehen auf den Kreis *II* durch Koppelung über. Würde man an *II* ein Telefon schalten, so würde man nichts hören, weil die elektrischen Schwingungen viel rascher sind als die schnellsten Schwingungen, denen die Membran folgen kann. Auch wenn sie durch einen Detektor *D* gleichgerichtet werden, wird daran nichts geändert. Höchstens würde man ein Knacken beim Öffnen und Schließen des Stromes wahrnehmen. Schaltet man aber

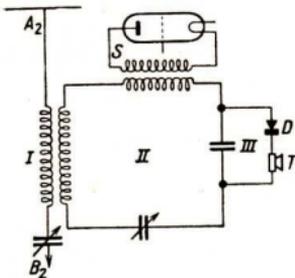


Abb. 324. Überlagerungsempfang bei drahtloser Telegraphie

zu *II* parallel eine kleine Senderöhre *S* und stimmt sie so ab, daß die Schwingungsdauer in *S* sich von der Schwingungsdauer in *II* ein wenig unterscheidet, dann überlagern sich die Schwingungen der Kreise *S* und *II*.

Ist in *II* die Schwingungszahl 100 000 Hz und die Schwingungszahl von *S* 101 000 Hz, so entsteht eine elektrische Schwebung von 1000 Hz, wie wir es bei den Schallwellen kennengelernt haben (Abb. 213). 1000 mal in einer Sekunde schwillt die Schwingung an, und ebenso oft wird sie sehr schwach. Werden diese durch Interferenz entstandenen Schwingungen in *III* durch einen Detektor *D* gleichgerichtet, so vernimmt man im Telephon *T* einen Ton der Schwingungszahl 1000 Hz. Dieser Ton wird dann lang und kurz nach Morsezeichen unterbrochen gehört. So kann man drahtlos telegraphieren.

4. Drahtlose Telephonie. Schaltet man auf der Sendestation parallel zum Gitterkreis einen Mikrophonstromkreis, so wirken die Mikrophonwechselströme auf das Gitter der Senderöhre (Abb. 325). Je nach ihrer Richtung und Stärke wird die Schwingungsweite der im Sender erregten ungedämpften elektrischen Schwingung größer oder kleiner (Abb. 326), weil der Anodenstrom durch sie beeinflusst wird. Zwischen $A_1 B_1$ und $A_2 B_2$ (Abb. 315) breiten sich dann elektromagnetische Wellen aus, deren Schwingungsweite sich im Takt der Schallschwingungen des Mikrophons ändert. Werden diese Schwingungen im Schwingungskreis *II* (Abb. 324) aufgenommen und im Kreis *III* gleichgerichtet (Abb. 327), so wirken sie auf die Telephonmembran. Die Schallwellen, die in der Sendestation auf die Membran des Mikrophons

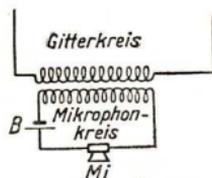


Abb. 325. Übertragung des Mikrophonwechselstroms bei drahtloser Telephonie



Abb. 326. Modulierte ungedämpfte Schwingung



Abb. 327. Gleichgerichtete Schwingung

einwirken, werden also schließlich im gleichen Takte auf die Membran des Telephons in der Empfangsstation übertragen.

Man nennt die Beeinflussung der Schwingungsweite einer hochfrequenten Schwingung durch die Sprachschwingungen „**Modulation**“. Sie wird durch die Beeinflussung der Gitterspannung hervorgerufen.

Auf die angegebene Weise kann man drahtlos telephonieren. Das Prinzip der Übertragung der Sprache erscheint also sehr einfach. Schwierig war es, die Geräte so auszugestalten, daß man so sprechen und hören konnte, wie wir es vom gewöhnlichen Telephonieren her kennen. Das wurde möglich, indem man die Sende- und Empfangsstelle jeder Station räumlich trennte, so daß sie sich gegenseitig möglichst wenig beeinflussen.

§ 57. Drahtloser Nachrichtenverkehr, Rundfunk

Grundsätzlich kann jede drahtlose Station mit jeder anderen in Verkehr treten. Ob es praktisch möglich ist, hängt von ihren technischen Einrichtungen und im besonderen ihrer Reichweite und der gegenseitigen Abstimmung ab.

1. Reichweite und Antenne. Die Reichweite eines Senders ist zunächst von seiner Energie abhängig.

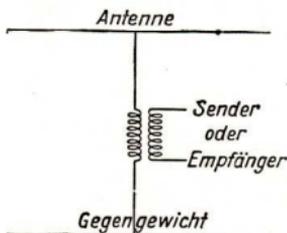


Abb. 328. Antennenschaltung

Es gibt Sender deren Sendeleistung 1, 2, 5, 10, 100, 1000 Watt und viel mehr beträgt. Mit den kleinsten dieser Geräte kann man immerhin noch etwa 4 km weit telefonieren. Ein 1000-Watt-Sender besitzt schon fast unbegrenzte Reichweite.

Die Reichweite ist aber auch von der Antenne des Senders und des Empfängers abhängig. Die Antenne eines Senders und eines auf den Empfang der elektrischen Wellen eingerichteten Empfängers besteht in der Regel aus dem „Luftdraht“, der hoch über dem Boden ausgespannt ist, dem „Gegengewicht“, einem Draht, der am Boden ausgebreitet ist, und dem Draht, der Luftdraht und Gegengewicht verbindet (Abb. 328). Man unterscheidet **Hochantennen**, die an Masten in der Höhe angespannt sind, **Niedrigantennen**, die nur wenige Meter über dem Erdboden ausgestreckt sind und **Bodenantennen**, die isoliert auf den Boden, gelegt sind. Die Reichweite einer Hochantenne ist mindestens doppelt so groß wie diejenige einer Niedrigantenne und bedeutend größer als die einer Bodenantenne. Rundfunksender und drahtlose Telephoniestationen der Post haben besonders hohe und

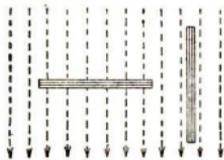


Abb. 329.
Magnetfeld und Richtempfang

für die besonderen Zwecke ausgebildete Antennen. Die auf den Empfang eingerichteten drehbaren Rahmenantennen empfangen nur dann gut, wenn ihre Windungsfläche senkrecht zu den magnetischen Feldlinien steht (Abb. 329, links). Stellt man sie so auf, daß sie den magnetischen Feldlinien parallel stehen, dann empfangen sie nur äußerst schwach (Abb. 329, rechts). Man kann daher Rahmenantennen mit einer Winkelmeßvorrichtung dazu benutzen, um Sender zu peilen, d. h. die Richtung festzustellen, in der ein Sender steht. Hat man bei zwei Empfängern mit Rahmenantennen (Abb. 330)

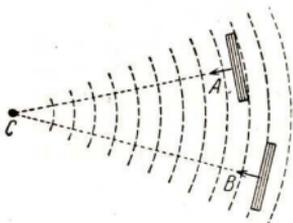


Abb. 330. Peilung durch Richtempfang

Empfängern mit Rahmenantennen (Abb. 330)

die Stellung des schwächsten Empfangs ermittelt, dann befindet sich der Sender im Schnittpunkt *C* der Lote auf den Windungsflächen.

2. Die Ausbreitung der Wellen. In Abb. 317 ist zu erkennen, daß die elektrischen Felder der von einem Sender ausgehenden Wellen auf der Erdoberfläche senkrecht stehen und von ihr gewissermaßen abgeschnitten werden. Wäre die Erde nicht da, so würden sie aussehen, wie Abb. 307 zeigt. An den Stellen, wo die Feldlinien von der Erde geschnitten werden, treten elektrische Ladungen auf. Daher laufen parallel mit der Welle im Raum elektrische Bodenwellen über die Erde. Diese Wellen sind es, die hauptsächlich auf Bodenantennen, aber auch durch die Gegengewichte auf die Hochantennen wirken. Sie bewirken auch, daß die Wellen im Raum gebeugt werden und um die ganze Erdoberfläche herumlaufen, obwohl sie sich doch eigentlich geradlinig ausbreiten müßten. Diese Beugung tritt aber nur bei verhältnismäßig langen elektromagnetischen Wellen auf.

Kurzwellen (siehe 3.) breiten sich geradlinig wie Licht aus und werden nur wenig gebeugt. Trotzdem wandern sie um die ganze Erde herum, selbst bei der sehr geringen Leistung, mit der sie meist ausgesandt werden. Die Erklärung dafür ist folgende: In 60 bis 200 km Höhe um die Erde herum ist die Luft so stark ionisiert, daß dort leitende Schichten entstehen, die ähnlich wie die Erde leiten. Treffen Kurzwellen auf diese Schichten, so werden sie reflektiert (Abb. 331). Bei dieser Art der Ausbreitung der Wellen können also Stationen in Verkehr treten, die infolge der Erdkrümmung sonst voneinander getrennt sind.



Abb. 331. Ausbreitung der Kurzwellen

3. Sendefrequenz und Verkehr. Sende- und Empfangsstation müssen, damit sie miteinander verkehren können, gegenseitig abgestimmt sein. Das geschieht durch Änderung der Kapazität oder der Selbstinduktion.

So lange man nur drahtlose Telegraphie mit gedämpften Wellen (Funkentelegraphie) kannte, störte jede sendende Station den Verkehr zwischen zwei anderen, denn die von ihr ausgehenden Wellen besitzen zwar eine bestimmte Wellenlänge, die sie mit größter Amplitude aussenden, sie wirken aber auch auf Empfangsgeräte ein, die auf den Empfang wesentlich kürzerer oder längerer Wellen eingestellt sind. Die Lautstärke ist natürlich dann am größten, wenn die Empfangsstelle auf die Wellenlänge der Sendestation eingestellt ist. Abb. 332 deutet an, wie laut ein gedämpfter Sender vergleichsweise gehört wird, wenn der Empfänger auf die angegebenen Wellenlängen abgestimmt ist. Zwei oder drei Sender können sich so stören, daß ein einwandfreier Empfang unmöglich ist.

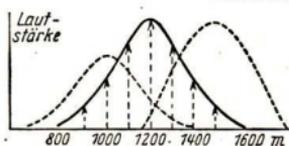


Abb. 332 Überschneidung des Wellenbereichs gedämpfter Sender

Ungedämpfte Wellen verhalten sich wesentlich anders. Soll ein Empfänger eine ungedämpfte Welle von 600 m aufnehmen, so muß er auf diese Welle genau abgestimmt sein. Schon eine geringe Abweichung auf etwa 602 oder 603 m bewirkt, daß kein Laut im Telephon wahrgenommen wird (vgl.

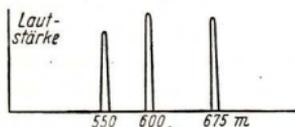


Abb. 333. Trennschärfe des Wellenbereichs ungedämpfter Sender

Abb. 333). Es können daher eine große Anzahl ungedämpfter Sender gleichzeitig Wellen aussenden, ohne daß eine Station die andere stört oder eine Empfangsstation gehindert ist, deutlich diejenige Sendestation herauszuhören, die für sie von Belang ist. Das wissen wir vom Rundfunk her. Trotzdem würde ein unheilvolles Durcheinander eintreten, wenn

der Betrieb von Sendestationen freigestellt wäre. Daher wird jedem Sender vom Staate eine ganz bestimmte Wellenlänge zugeteilt, auf der er senden muß. Über die staatlichen Grenzen hinaus sind internationale Verabredungen über die Zuteilung von Wellenlängen (bzw. Frequenzen) getroffen. So werden für den Verkehr der Schifffahrt, für den Wetterdienst, für den Rundfunk, für die politischen Nachrichten, für die Bildtelegraphie und viele andere Gebiete bestimmte Gruppen von Wellenlängen (bzw. Frequenzbänder) festgelegt, innerhalb deren die Wellen wieder auf die einzelnen Sender verteilt werden. Man spricht von langen Wellen (über 2000 m), Mittelwellen (100–600 m), Kurzwellen (10–100 m), Ultrakurzwellen (unter 10 m). Jede Station kann mit ihrem Empfänger alle ankommenden Wellen innerhalb eines großen Bereichs wahrnehmen. Sie hört aber nur die Station, auf deren Welle der Empfang gerade eingestellt ist. Sollen zwei bestimmte Stationen telegraphisch miteinander verkehren, so muß bekannt sein, auf welcher Wellenlänge der Verkehr stattfinden soll, und es müssen Zeichen verabredet sein, mit denen die Stationen einander anrufen. Hat eine Station das Rufzeichen vernommen, so gibt sie Antwort und hält sich zum Empfang bereit. Sie bestätigt am Schluß den Empfang des Telegramms. Treten die Stationen in drahtlosen Sprechverkehr, so ist die Gewißheit der richtigen Übermittlung aus dem Gespräch gegeben.

4. Rundfunk, Nachrichtendienst. Der Vorzug der drahtlosen Übertragung vor der Übertragung durch Draht besteht darin, daß ein einziger Sender beliebig viele Empfänger erreichen kann und daß bei geringen Entfernungen die Empfangsgeräte nur aus einem Schwingungskreis, einem Detektor und einem Telephon zu bestehen brauchen. Auf diese Weise ist es möglich, Rundfunksendungen in einem Bereich von 25 bis 30 km zu verbreiten. Will man Sender aus größerer Entfernung hören, so muß man Empfangsgeräte mit Verstärkereinrichtung benutzen.

Den Rundfunksendern sind Sendefrequenzen zugeteilt, die so bemessen sind, daß sie einander nicht stören, und daß den Rundfunkhörern möglich ist, ihre Geräte trennscharf auf den gewünschten Sender einzustellen.

Die Mitteilungen, die nur an die Presse von den Pressestellen und der Nachrichtenzentrale gehen, die Meldungen der einzelnen Wetterstationen werden, da sie sich nicht an alle richten, auf bestimmten, den Empfangsstellen bekannten Wellen übertragen.

§ 58. Fernschreiben, Bildübertragung, Fernsehen

1. Fernschreiben. Der Fernschreiber dient wie der Buchstabentelegraph zur unmittelbaren Übermittlung schriftlicher Nachrichten. Er findet nicht nur in zunehmendem Maße Verwendung bei der Post, sondern ist auch ein unentbehrliches Gerät für den Nachrichtendienst der Presse. Der Fernschreiber kann an das normale Fernsprechnetzt angeschlossen werden. Jeder Teilnehmer bedarf dazu einer Schreibmaschine, die so eingerichtet ist, daß die Schreibmaschine des anderen automatisch in genau derselben Weise betätigt wird wie die eigene.

2. Die Bildübertragung. Soll das Bild eines Gegenstandes auf telegraphischem Wege übermittelt werden, so kann man die Einzelheiten des Gegenstandes nur weitergeben, wenn man das **örtliche Nebeneinander** im Bild in ein **zeitliches Aufeinanderfolgen** umwandelt. Es ist also nur möglich, die einzelnen Teile des Bildes durch elektrische Ströme **nacheinander** richtig zu übertragen. Jedes Bild wird zu diesem Zweck durch ein Netz von Quadraten (Raster) in eine Reihe von kleinen Flächen aufgelöst. Abb. 334 gibt dies z. B. für den Buchstaben E an. Telegraphiert man nacheinander den Helligkeitswert der 170 kleinen Flächen und bewirkt, daß auf der Empfangsstation diese Helligkeiten in genau derselben Stärke und Anordnung auf eine lichtempfindliche Schicht übertragen werden, so erhält man eine richtige Wiedergabe des zu übertragenden Bildes. Je feiner der Raster ist, desto schärfer wird das Bild, weil dann die Einzelheiten besser hervortreten. Man kann nach diesem Verfahren Photographien durch Leitungsstrom oder drahtlos übertragen.

Das Wesentliche bei der Bildübertragung ist, daß die Helligkeitsunterschiede in Unterschiede des elektrischen Stromes umgewandelt werden. Zu dieser Umwandlung dient eine **lichtelektrische Zelle**, ein Gerät, in dem das einfallende Licht je nach seiner Intensität eine größere oder geringere elektrische Stromstärke erzeugt. Wird ein Diapositiv durch eine Lichtquelle derart beleuchtet, daß das Licht jeweils nur auf eine bestimmte Stelle der Platte auffällt (Abb. 335), so wird es von dunklen Stellen zurückgehalten, von hellen durchgelassen. Entsprechend entstehen in der lichtelektrischen Zelle elektrische Ströme wechselnder Stärke.

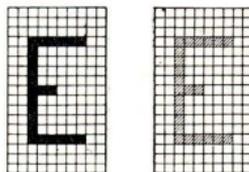


Abb. 334. Bildraster

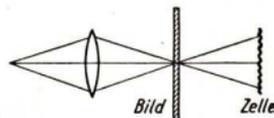


Abb. 335. Bildübertragungsvorgang beim Senden

Werden diese verstärkt und ferngeleitet, dann kann man sie dazu verwenden, den Lichtstrom einer Lichtquelle zu beeinflussen. Auf diese Weise werden dann die Unterschiede der elektrischen Energie wieder in Unterschiede der Lichtenergie umgewandelt.

3. Das Fernsehen. Das Problem des Fernsehens unterscheidet sich von dem Problem der Bildübertragung dadurch, daß bei der Bildübertragung das Bild nach und nach auf einer photographischen Schicht entstehen kann, während es beim Fernsehen sofort in allen Teilen sichtbar sein muß. Trotzdem ist der Unterschied nicht wesentlich, denn eine gleichzeitige Übertragung der Helligkeitswerte vieler Bildpunkte ist praktisch nicht möglich, weil man dann eben so viel Leitungen oder Wellen benutzen müßte, wie Bildpunkte vorhanden sind. Ein vollständiger Bildeindruck ist gewährleistet, wenn alle Punkte des Gegenstandes innerhalb $\frac{1}{20}$ Sekunde durch Übertragung abgebildet werden. Innerhalb dieser Zeit, deren Bedeutung aus dem Bildwechsel des Kinos bekannt ist, wirkt eine Übertragung der Bildpunkte nacheinander auf unser Auge genau so, als ob sie gleichzeitig erfolgte. Enthält ein Bild 5000 Bildpunkte, so müssen ihre Helligkeitswerte in einem zeitlichen Abstand von $\frac{1}{100\,000}$ s übertragen werden. Wie dies möglich ist, sei in folgendem kurz beschrieben.

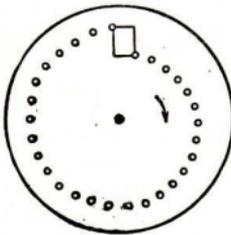


Abb. 336.

Nipkowsche Scheibe

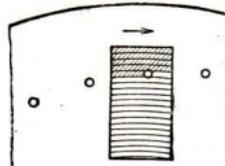


Abb. 337.

Das zu übertragende Bild sei ein Diapositiv. Die Lichteindrücke der verschiedenen Punkte des Bildes können durch „Abtasten“ des Gegenstandes

mit einem Lichtstrahl unter Verwendung der Nipkowschen Scheibe (erfunden von Nipkow um 1885) gewonnen werden. Sie besteht aus einer undurchsichtigen Scheibe, auf der in gleichem Abstand voneinander eine Anzahl Löcher

in einer Spirale angeordnet sind (Abb. 336). Der Abstand der Löcher ist gleich der Breite des zu übertragenden Bildes. Die Höhe des Bildes ist gleich dem Unterschied der Entfernungen des Anfanges und des Endes der Lochspirale vom Mittelpunkt der Scheibe.

Dreht sich die Scheibe, dann wird durch das erste Loch ein Streifen des Bildes überstrichen. Nacheinander werden dann anschließende Streifen der Platte durch die folgenden Löcher sichtbar. Alle Streifen insgesamt überdecken das Bild ganz (Abb. 337). Das Diapositiv werde von rückwärts beleuchtet. Jedesmal wenn die Scheibe einmal herumgedreht wird, trifft durch die Löcher der Spirale das Licht nacheinander auf alle Stellen des abzubildenden Gegenstandes. Dreht sich die Scheibe während $\frac{1}{20}$ Sekunde einmal her-

um, so gewinnt man den Eindruck, als ob man alle Teile des Gegenstandes gleichzeitig sehe, obwohl man zuerst in der obersten Zeile nacheinander den Wechsel der hellen und dunklen Stellen des Gegenstandes, dann in der zweiten Zeile, dann in der dritten usw. wahrnimmt. Vermittelt z. B. jede Zeile



Abb. 338.

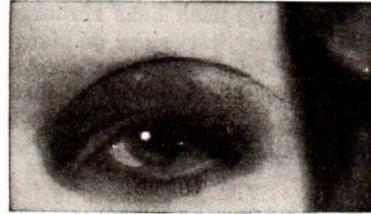


Abb. 339.

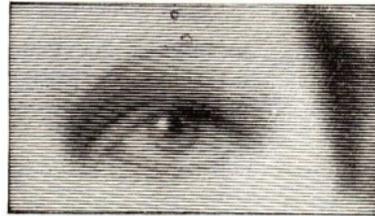


Abb. 340.

Originalbild und Fernsehbild

60 verschiedene Lichteindrücke, und wird der Gegenstand in 100 Zeilen abgetastet, so erhält man insgesamt 6000 verschiedene Lichteindrücke die übertragen werden müssen. Abb. 338 zeigt die zu übertragende Photographie, Abb. 339 die Vergrößerung eines Ausschnittes aus der Photographie und Abb. 340 die Vergrößerung eines Ausschnittes aus dem Fernsehbild; bei letzterer ist deutlich die Zergliederung in die abgetasteten Zeilen wahrnehmbar.

Zur Wiedergabe des Bildes benutzt man heute beim Fernsehen

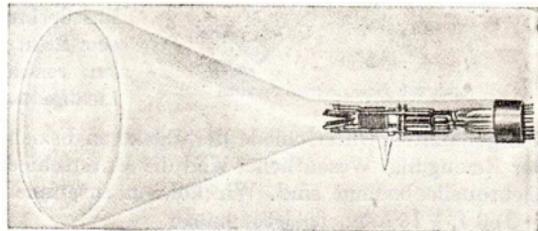


Abb. 341. Kathodenstrahlröhre

große Kathodenstrahlröhren (Abb. 341), in denen die Elektronen des Kathodenstrahls durch elektrische und magnetische Felder in einem Punkt auf der Endfläche der Röhre vereinigt werden. Die Endfläche ist flach ge-

wölbt und so groß, daß auf ihr das Bild in ausreichender Größe erscheinen kann. Sie ist so beschaffen, daß die von den Elektronen getroffene, etwa 1 mm^2 große Fläche hell leuchtet. Durch ein sog. Kippgerät wird der Elektronenfleck zeilenweise von links nach rechts über die Bildfläche bewegt und dazwischen ruckweise (während einer kurzen Unterbrechung der Übertragung) nach links zurückgeführt. Die Helligkeit des Flecks ändert sich mit der Stärke der empfangenen Ströme. Auf diese Weise wird an jeder Stelle der Bildfläche diejenige Helligkeit hervorgerufen, die im Gegenstand durch die Nipkowsche Scheibe abgetastet worden ist. Erforderlich ist noch, daß in der Aufeinanderfolge und im Durchlaufen der Zeilen volle Übereinstimmung (Synchronisation) zwischen Sender und Empfänger besteht.

D. Elektromagnetische Strahlung

§ 59. Arten und Ausdehnung der Spektren

1. Die Arten der Spektren. Man kann Spektren erzeugen (Teil I, § 18; II, § 49), indem man das Licht einer spaltförmigen Lichtquelle L durch eine Sammellinse zu einem Spaltbild S vereinigt und in den Strahlengang ein Prisma P

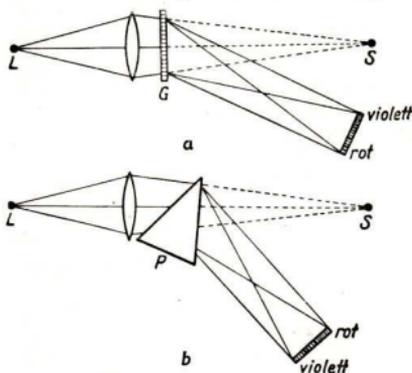


Abb. 342. Erzeugung von Spektren

oder ein Beugungsgitter G stellt (Abb. 342 a und b). In dem durch das Gitter erzeugten **normalen Spektrum** (§ 49) sind die Farben proportional ihrer Wellenlänge (rot am stärksten) abgelenkt; in dem durch das Prisma hervorgerufenen **Dispersionsspektrum** ist rot am wenigsten abgelenkt, und der rote Teil ist gegenüber dem blauen zusammengedrängt.

Das Spektrum ist nichts anderes als eine Reihe von nebeneinandergelagerten, verschiedenfarbigen Bildern des Lichtspalts.

Die genannten Unterschiede der Spektren beziehen sich nur auf die Art der Erzeugung. Wesentlicher sind die Unterschiede, die durch die Art der Lichtquelle bedingt sind. Wir können zusammenfassen, was wir bereits in Teil I, § 18 kennengelernt haben.

Die Spektren glühender fester Körper sind kontinuierlich.

Diese Spektren enthalten alle möglichen Farben. Die Spaltbilder gehen im Spektrum ineinander über, und nirgends ist eine Grenze oder eine Lücke

zu erkennen. Da das Licht verschiedener Farbe sich in der Wellenlänge unterscheidet, können wir sagen:

Kontinuierliche sichtbare Spektren enthalten Licht jeder Wellenlänge zwischen 0,40 und 0,76 μ .

Die Spektren leuchtender Gase sind Linienspektren.

Sie bestehen aus einzelnen Spaltbildern (Linien), die durch Zwischenräume voneinander geschieden sind. Leuchtende Gase senden also nur ganz bestimmte Farben aus. Jedes leuchtende Gas oder jeder leuchtende Dampf besitzt ein Spektrum, das für ihn kennzeichnend ist.

Linienspektren enthalten Licht verschiedener scharf voneinander geschiedener Wellenlängen.

Spektren von leuchtenden Körpern nennt man auch **Emissionsspektren**.

2. Das Sonnenspektrum. Entwerfen wir ein Spektrum vom Licht der Sonne, so entsteht ein kontinuierliches Spektrum, das von feinen schwarzen Linien

durchzogen ist, die unregelmäßig über das Spektrum verteilt sind (Abb. 343).

Diese Linien heißen **Fraunhofersche Linien**.

Sie entsprechen in ihrer Anordnung den farbigen Linien eines Linienspektrums. Wie sie entstehen, zeigt folgender Versuch:

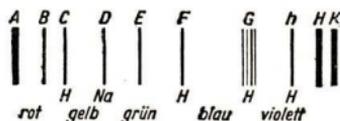


Abb. 343. Fraunhofersche Linien

Wir erzeugen ein kontinuierliches Spektrum und stellen zwischen dem Spalt und dem Prisma eine farblos brennende, große Bunsenflamme auf. Im Spektrum nehmen wir dann keine Veränderung wahr. Lassen wir aber in der Flamme Natrium verdampfen, so entsteht an derjenigen Stelle des Spektrums, wo die gelbe Natriumlinie erscheinen müßte, ein dunkler Streifen. Man spricht von einer „Umkehrung der Natriumlinie“. Rotes, grünes, blaues Licht geht also durch die stark gelb gefärbte Flamme hindurch, das gelbe Natriumlicht dagegen nicht.

Findet sich also im Sonnenspektrum im Gelben ebenfalls eine schwarze Linie, so kann sie in der Weise entstanden sein, daß das Sonnenlicht in der Umkehrschicht der Sonnenoberfläche (Teil I, § 40) durch Natriumdämpfe hindurchdringen mußte, und daß dabei das gelbe Licht des Natriumdampfes absorbiert worden ist. Ähnlich ist es mit anderen Linien, die im Sonnenspektrum auftreten.

Absorptionsspektren entstehen aus kontinuierlichen Spektren dadurch, daß einzelne Farben ausgelöscht werden und an ihrer Stelle schwarze Stellen auftreten.

Die hellen Linien, die ein leuchtender Dampf aussendet, entsprechen den dunklen Linien, die derselbe Dampf in einem zusammenhängenden Spektrum erzeugt, wenn er das Licht absorbiert. Man kann daher aus dem Absorptionsspektrum wie aus dem Emissionsspektrum auf die Art des Stoffes

schließen, der sie entstehen läßt (Spektralanalyse). Mit diesen Spektren kann man untersuchen, welche Stoffe in einer Lichtquelle leuchten oder sie einhüllen (Erforschung der Sterne).

Robert Gustav Kirchhoff (1824–1887) entdeckte die Umkehrung der Natriumlinie und begründete um 1860 mit dem Chemiker Robert Wilhelm Bunsen (1811–1899) zusammen die Spektralanalyse.

3. Die Energieverteilung im Spektrum. Wir haben bisher das Licht nur nach der Wirkung beurteilt, die es auf unser Auge ausübt. Wir wissen aber auch aus Erfahrung, daß jeder Körper, der Licht aufnimmt, sich erwärmt. Dunkle Körper werden im Sonnenlicht rascher heiß als weiße, weil sie mehr Licht verschlucken. Wir schließen daraus:

Licht ist Energie, die sich durch Strahlung (Wellenbewegung) ausbreitet.

Die von einer Lichtquelle ausgesandte Lichtenergie ist oft sehr klein. Man muß daher sehr empfindliche Meßinstrumente benutzen, wenn man die Energie eines Lichtstromes messen will. Zerlegt man den Lichtstrom in

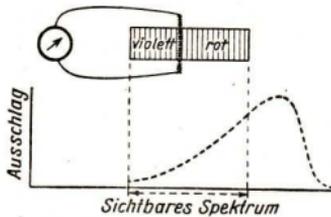


Abb. 344. Energieverteilung im Spektrum

ein Spektrum, so kann man mit einem Thermoelement (§ 33) messen, wie groß die Lichtenergie der einzelnen Spektralbereiche, d. h. der Anteil des roten, gelben, blauen Lichtes an der Gesamtenergie ist. Man verwendet Thermosäulen, in denen die Lötstellen der einzelnen Elemente linienartig angeordnet sind, und stellt sie so, wie Abb. 344 andeutet, im Spektrum auf. Man findet dann:

Die Energie des Lichtstromes, der von einer Kohlenbogenlampe ausgeht, wächst vom blauen nach dem roten Ende des Spektrums.

In der Mehrzahl unserer irdischen Lichtquellen ist der Anteil der Energie des roten Lichtes im Verhältnis zum blauen wesentlich stärker als z. B. im Sonnenlicht.

4. Infrarotes Licht. Bei den Messungen mit dem Thermoelement macht man die Beobachtung, daß auch jenseits des sichtbaren roten Endes des Spektrums der Kohlenbogenlampe noch Energie vorhanden ist, wo sichtbares Licht nicht wahrgenommen wird. Es ist sogar so, daß die Energie, die hier auftritt, wesentlich größer als im sichtbaren Spektrum ist. Man kommt auf diese Weise zu Erkenntnissen, die man folgendermaßen aussprechen kann:

Jenseits des roten Teils des Spektrums, im Infraroten (oder Ultraroten) gibt es noch eine für das menschliche Auge unsichtbare Strahlung, die durch Wärmewirkung nachweisbar ist. Sie wird infra-(oder ultra-)rote Strahlung genannt.

Dieser Teil des Spektrums einer Lichtquelle kann ebenfalls durch entsprechende Wellenlängen gekennzeichnet werden. Während das sichtbare Spektrum nur einen Bereich umfaßt, in dem die größte Wellenlänge (rot)

ungefähr doppelt so groß wie die kürzeste (violett) ist, reicht das infrarote Spektrum bis zu Wellen, deren Längen 10 bis 100 mal so groß sind wie die des sichtbaren Rot. Langwelliges infrarotes Licht bezeichnet man als „Wärmestrahlen“, obgleich auch das sichtbare Licht Wärme erzeugt.

Infrarotes Licht breitet sich wie sichtbares Licht aus. Folgender Versuch zeigt dies: Hängen wir in den Brennpunkt eines Hohlspiegels eine erhitzte, nicht leuchtende Eisenkugel auf und stellen ihm einen zweiten Hohlspiegel gegenüber, in dessen Brennpunkt ein Thermometer mit geschwärzter Kugel angebracht ist (Abb. 345), so kann man am Steigen des Thermometers nachweisen, daß die Wärmestrahlen, die von der heißen Kugel ausgehen, wie Lichtstrahlen im Brennpunkt des zweiten Spiegels vereinigt werden.

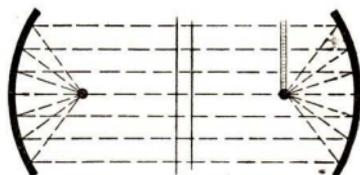


Abb. 345. Ausbreitung der Wärmestrahlen

Stellt man in den Strahlengang eine Glasplatte oder ein Gefäß mit Wasser, so werden die Wärmestrahlen absorbiert. Obwohl Glas und Wasser für alle Arten des sichtbaren Lichtes durchsichtig sind, sind sie undurchlässig für langwellige Wärmestrahlen. Steinsalz ist sehr durchlässig für Wärmestrahlen, auch Hartgummi, obwohl es Lichtstrahlen absorbiert.

5. Ultraviolettes Licht. Auch jenseits der violetten Grenze des sichtbaren Spektrums ist noch Strahlung vorhanden. Ihr Anteil ist bei den meisten irdischen Lichtquellen nur schwach. Man kann ihn nachweisen, indem man das Spektrum einer Quecksilberdampf Lampe oder einer Bogenlampe photographiert oder auf einen Schirm fallen läßt, der mit einem fluoreszierenden Salz überzogen ist. Fluoreszierende Stoffe haben die Eigenschaft, kurzwelliges Licht zu absorbieren und dafür langwelligeres auszustrahlen. Daher senden sie sichtbares Licht aus, wenn sie von ultraviolettem Licht getroffen werden. Man erkennt so, daß die Strahlung über das violette Ende des Spektrums hinausreicht.

Jenseits des violetten Teiles des Spektrums, im Ultravioletten, gibt es noch eine Strahlung, die sich durch starke photographische Wirksamkeit auszeichnet.

Sie ruft im Auge keine Lichtempfindung hervor, wirkt aber schädigend auf die Bindehaut und wird ultraviolettes Licht genannt. Ultraviolettes Licht wird stark von Glas, Luft und Wasser absorbiert. Es dringt aber z. B. durch Quarz gut hindurch. Je heißer ein glühender Körper ist, desto mehr ultraviolettes Licht ist in seiner Strahlung enthalten. Die Sonne sendet sehr viel ultraviolettes Licht aus. Auf die Erdoberfläche dringt davon nur das ultraviolette Licht, dessen Wellenlänge zwischen $0,40$ und $0,29 \mu$ liegt. Das ultraviolette Licht, dessen Wellenlänge noch kürzer ist, wird in den oberen Schichten der Atmosphäre absorbiert und wirkt dort als Ionisator (§ 31 u. 57). Es ist beteiligt bei der Erzeugung der leitenden Heavisideschicht, welche die Ultrakurzwellen reflektiert.

Das ultrarote und ultraviolette Spektrum wurde von dem Astronomen Wilhelm Herschel¹⁾ um 1800 entdeckt.

1) W. Herschel, 1738—1822.

6. Die spektrale Energieverteilung. In Abb. 346 sind Kurven angegeben, die andeuten, wie die Energie der Strahlung eines heißen Körpers sich auf die verschiedenen Wellenlängen verteilt. Aus ihnen ergibt sich:

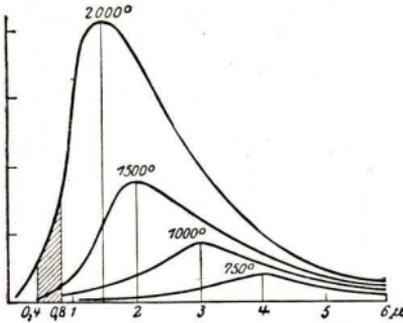


Abb. 346. Strahlungskurven

Die Gesamtstrahlung wächst sehr stark mit der Temperatur an.

Das Maximum der Strahlung eines heißen Körpers verschiebt sich aus dem Ultraroten nach dem sichtbaren und ultravioletten Licht hin, wenn seine Temperatur wächst.

Kennt man die Wellenlänge des Maximums der Strahlung, so kann man die Temperatur des Strahlers berechnen. In dieser Weise kann man z. B. die Strahlungstemperatur der Sonne bestimmen, deren Maximum im gelben Teil des Spektrums liegt. Sie beträgt rund 6000°.

temperatur der Sonne bestimmen, deren Maximum im gelben Teil des Spektrums liegt. Sie beträgt rund 6000°.

§ 60. Das Licht als elektromagnetische Strahlung

1. Lichtwellen und elektromagnetische Wellen. Wir haben bei der Behandlung der Wellenlehre des Lichtes die Frage offen gelassen, welcher Art die Schwingungen sind, aus denen die Lichtwellen bestehen. Wenn wir uns nun vergegenwärtigen, daß sich im Raume elektromagnetische Felder als Wellen ausbreiten, dann gewinnt der Gedanke, daß das Licht sich in ähnlicher Weise ausbreitet, an Wahrscheinlichkeit. Vergleichen wir die Eigenschaften der Lichtwellen und der elektromagnetischen Wellen, so können wir feststellen:

- Beide besitzen dieselbe Ausbreitungsgeschwindigkeit $c = 300\,000\text{ km/s}$.
- Beide werden nach demselben Reflexionsgesetz zurückgeworfen.
- Beide werden nach demselben Brechungsgesetz gebrochen, wenn sie aus dem leeren Raum in einen durchlässigen Stoff treten.
- Für Wellen jeder Art besteht das Gesetz, daß beim Übergang von einem Medium in ein anderes die Sinus von Einfallswinkel und Brechungswinkel in einem konstanten Verhältnis stehen. Dieses ist gleich dem Verhältnis der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der Wellen in den beiden Medien. Bei Lichtwellen hatten wir dieses Brechungsverhältnis mit n bezeichnet, bei elektromagnetischen Wellen hatte es die Größe $\sqrt{\epsilon^*}$, wenn die Wellen aus dem leeren Raum in einen Stoff mit der relativen Dielektrizitätskonstanten ϵ^* übergehen (§ 55).

Die nachstehende Tabelle gibt eine Übersicht über die Werte von n und $\sqrt{\epsilon^*}$ für einige durchsichtige Körper. Die Übereinstimmung ist für die meisten

Stoffe sehr gut. Bei Verwendung von langen Wellen zur Bestimmung von n zeigt sich auch bei Wasser und Alkohol eine genaue Übereinstimmung.

e) Isolatoren sind häufig durchlässig für Licht und für elektromagnetische Wellen. Undurchlässig für beide sind die Metalle.

	n	$\sqrt{\epsilon^*}$
Luft	1,000 294	1,000 295
Kohlensäure	1,000 449	1,000 473
Wasserstoff	1,000 138	1,000 132
Benzol	1,482	1,483
Petroleum	1,386	1,39
—	—	—
Wasser	1,33	9,1
Alkohol	1,36	5,7

f) Ein Zusammenhang zwischen optischen und magnetischen Erscheinungen wurde zum ersten Male von Faraday festgestellt. Er beobachtete 1845, daß die Polarisationsenebene des Lichtes in Flintglas (§ 50) durch ein starkes Magnetfeld gedreht werden kann.

Die erwähnten Beziehungen zwischen Lichtwellen und elektromagnetischen Wellen legen die Annahme nahe:

Das Licht besteht aus elektromagnetischen Wellen.

2. Die Lichtschwingungen. Wenn das Licht eine elektromagnetische Wellenbewegung ist, so sind die Lichtschwingungen nichts anderes als elektromagnetische Felder, die an einer bestimmten Stelle des Raumes, durch den das Licht dringt, in regelmäßigem Wechsel ihre Richtung und Feldstärke ändern. Es schwingt also kein stoffliches Teilchen quer zum Lichtstrahl, sondern es vollziehen sich periodische Änderungen des elektromagnetischen Feldes senkrecht zum Lichtstrahl. Wellen können entstehen, weil die elektrischen und magnetischen Felder miteinander gekoppelt sind. Die Kopplung beruht darauf, daß die elektrischen und magnetischen Feldlinien einander umschlingen. Diese Vorstellungen sind durch Versuchsergebnisse so stark gestützt, daß sich eine bessere Erklärung für die Ausbreitung des Lichtes geben, als es der stoffliche Äther vermag, den Huygens eingeführt hatte, um das Licht als Wellenbewegung verständlich zu machen.

3. Die Erregung der Lichtwellen. Besteht Licht aus elektromagnetischen Wellen, so muß gefolgert werden, daß die Lichtquelle Schwingungskreise enthält und diese Wellen aussenden. Beachtet man, daß die Lichtwellen 100 000 mal kleiner als die Wellen des kleinsten Dipols sind, mit dem man experimentell elektromagnetische Wellen erzeugen kann, so muß man auch die Schwingungskreise für Licht unter den Gebilden eines leuchtenden Körpers suchen, die wesentlich kleiner als die Lichtquelle selbst sind. Nur die Moleküle und Atome kommen daher als Sender für Licht in Betracht. Sie müssen Schwingungskreise enthalten, die Lichtschwingungen aussenden. Ein sehr einfacher Vorgang, bei dem eine elektromagnetische Welle ausgesandt wird, liegt vor, wenn ein Elektron um einen Punkt A , in dem die von ihm ausgehenden Feldlinien münden, Schwingungen ausführt (Abb. 347). Man nimmt daher an, daß in den Atomen Elektronen vorhanden sind und

daß sie um den Mittelpunkt des Atoms schwingen oder um ihn kreisen. Am einfachsten ist die Vorstellung, daß das Elektron um den Kern kreist und dabei elektromagnetische Wellen aussendet.

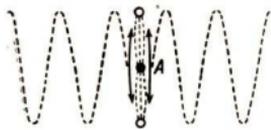


Abb. 347. Schwingendes Elektron

Von dieser Vorstellung ist man, als man die Frage der Erzeugung der Lichtschwingungen untersuchte, auch ausgegangen. Man hat aber bald gefunden, daß die Vorgänge doch wesentlich verwickelter sind, als man anfänglich

glaubte. Auf Einzelheiten können wir an dieser Stelle nicht eingehen. Festgehalten hat man an der Vorstellung:

Das Licht wird von Atomen ausgesandt, in denen elektrische Felder zwischen dem positiven Atomkern und den negativen Elektronen Energie in Form von Schwingungen nach außen abgeben.

Wichtige Beweise für die elektromagnetische Natur des Lichtes und die Eigenschaften des Atoms als Schwingungserreger elektromagnetischer Wellen haben Zeeman 1895 und Stark 1913 erbracht, indem sie gezeigt haben, daß das ausgesandte Licht durch Einwirkung magnetischer oder elektrischer Felder auf die Atome beeinflußt werden kann.

4. Schwingungsvorgänge im Atom und Spektrum. Jede elektromagnetische Welle, die von einem Atom ausgesendet wird, besitzt eine bestimmte Wellenlänge. In einem festen Körper, der ein zusammenhängendes Spektrum aussendet, sind die Atome so dicht gelagert und beeinflussen einander so stark und unregelmäßig, daß alle möglichen Schwingungen vorkommen. Ganz anders ist es in einem Gas, in dem die Atome weit voneinander getrennt sind. In den Atomen eines Gases treten Schwingungen auf, die unbeeinflusst von Schwingungen anderer Atome sind. Daher stellt man im Gasspektrum scharf getrennte Linien fest. Die Untersuchung der Spektren hat es ermöglicht, den Bau und die Eigenschaften der Atome festzustellen, obwohl man ein einzelnes Atom nicht beobachten kann.

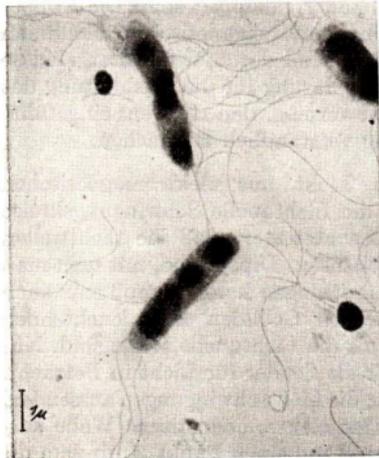


Abb. 348. Parathyphusbakterien
Elektronenoptische Vergrößerung 6500 : 1

§ 61. Das Elektronenmikroskop

Das optische Mikroskop ist an der Grenze seiner Leistungsfähigkeit angelangt, wenn die Einzelheiten des durchleuchteten Gegenstandes von der Größenordnung der Wellenlänge des Lichtes sind. Wir sahen schon bei der Beugung der Lichtwellen an einem dünnen Draht, daß das Bild auf dem Schirm nicht mehr getreu die Umrisse des Drahtes wiedergab. Die Elektronen sind wesentlich kleiner als die Länge einer Lichtwelle. Dringen die

in einer Glühkathodenstrahlröhre (§ 58) erzeugten Elektronen durch den zu untersuchenden Gegenstand, dann kann man die hindurchgetretenen Elektronen durch die elektrischen und magnetischen Felder der Röhre so genau lenken, daß ein stark vergrößertes Bild des Gegenstandes entsteht.

Man kann auf diese Weise noch Einzelheiten an Gegenständen, z. B. an Bakterien wahrnehmen, die 100 bis 1000 mal kleiner als die Wellenlänge des Lichtes sind (Abb. 348).

§ 62. Die Röntgenstrahlen

Wir haben in § 28 kurz von der Entstehung der Röntgenstrahlen gesprochen und von ihrer ionisierenden Wirkung Kenntnis genommen. Wir betrachten sie aber erst jetzt eingehend, weil ihre Eigenschaften erst in dem neuen Zusammenhang verständlich werden.

1. Erzeugung der Röntgenstrahlen. In Röntgenröhren älterer Bauart treten aus der Kathode der Röhre infolge der hohen Spannung Elektronen aus. In neuen Röntgenröhren besteht die Kathode aus einem Glühdraht, der Elektronen aussendet. Die Elektronen treffen auf die sog. Antikathode mit großer Geschwindigkeit auf, weil sie durch die hohe an die Röhre gelegte Spannung stark beschleunigt werden. Prallen sie auf, so werden sie von den Atomen des Antikathodenmetalls aufgehalten. Von der Auftreffstelle geht dann Röntgenstrahlung aus (Abb. 349).

2. Eigenschaften der Röntgenstrahlen. Röntgenstrahlen sind weder elektrisch noch magnetisch ablenkbar. Sie sind unsichtbar. Sie erregen aber Fluoreszenz, wenn sie durch die Glaswand der Röhre dringen oder auf einen fluoreszierenden Schirm treffen. Die photographische Schicht ist empfindlich für Röntgenstrahlen. Gase, durch die Röntgenstrahlen gehen, werden ionisiert. Besonders kennzeichnend ist für sie ihr großes Durchdringungsvermögen. Aluminium in dünnen Schichten ist für sie fast völlig durchlässig. Strahlen, die bei geringerer Spannung erzeugt werden, besitzen ein geringeres Durchdringungsvermögen als Strahlen, die bei hoher Spannung in der Röhre entstehen. Erstere nennt man *weich*, letztere *hart*. Bleischichten müssen schon einige Zentimeter dick sein, wenn harte Strahlen in ihnen völlig absorbiert werden sollen. Mit Röntgenstrahlen kann man Stoffe durchleuchten, Schattenaufnahmen vom menschlichen Körper machen

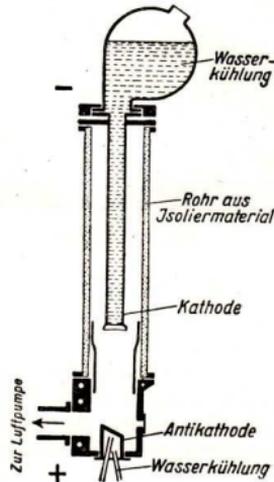


Abb. 349. Moderne Röntgenröhre

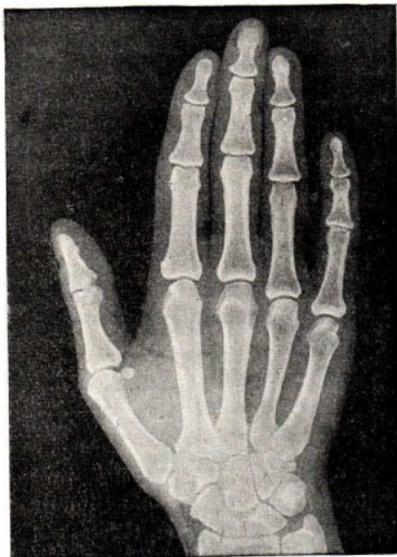
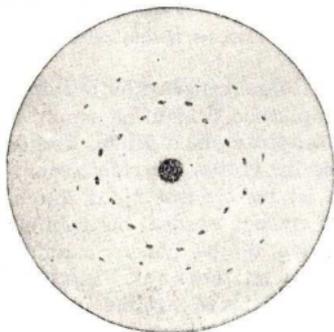


Abb. 350. Röntgenaufnahme

Im Jahre 1912 hat dann v. Laue zu einem Experiment Veranlassung gegeben, durch das die Wellenlänge der Röntgenstrahlen bestimmt werden konnte. Er ging von dem Gedanken aus, daß die Atome in einem Kristall so regelmäßig gelagert seien, daß er als ein optisches Raumgitter von sehr großem Auflösungsvermögen wirken müsse. Man ließ durch einen Kristall ein schmales Bündel von Röntgenstrahlen hindurchtreten

Abb. 352. Beugungsbild der Röntgenstrahlen.
Laue-Diagramm von Zinkblende

(Abb. 350) und Vorgänge im lebenden Körper erforschen. Langdauernde Bestrahlung mit Röntgenstrahlen ist gesundheitsschädlich, doch vermag der Arzt bei bestimmten Hauterkrankungen und Geschwülsten Heilwirkungen durch Röntgenstrahlen zu erzielen, indem er Bestrahlungsdauer und Härte der Strahlen passend wählt. Hervorragende Bedeutung besitzen sie für die Erforschung des Aufbaues der Kristalle, für die Prüfung von Werkstoffen und von undurchsichtigen Stoffen.

3. Das Wesen der Röntgenstrahlen. Die Röntgenstrahlen werden durch elektrische Vorgänge erregt. Sie gleichen darin also dem Licht. Anfangs hat man sie für longitudinale elektromagnetische Impulse gehalten, bis man nachweisen konnte, daß sie polarisierbar wie Lichtwellen sind.



Abb. 351. Beugung der Röntgenstrahlen

Auf einer photographischen Platte, auf welcher die aus dem Kristall austretenden Strahlen aufgefangen wurden, zeigte sich bei Zinkblende das in Abb. 352 wiedergegebene Bild. Die vielen Lichtflecke des Bildes ließen erkennen, daß die Röntgenstrahlen beim Durchgang durch den Kristall eine Beugung wie Licht erfahren. Aus der Anordnung der Beugungsflecke und dem Abstand der Atome des Raumgitters konnte man die Wellenlänge der Röntgenstrahlen bestimmen. Man fand:

Die Röntgenstrahlen sind elektromagnetische Wellen, deren Wellenlänge 1000 bis 10 000 mal kleiner als die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes ist.

4. Sekundäre Röntgenstrahlen. Treffen Röntgenstrahlen auf ein Metall, so erteilen sie einigen Elektronen des Metalls eine große Geschwindigkeit. Diese treten dann an der Oberfläche aus, und so entsteht der Photoeffekt der Röntgenstrahlen (§ 30). Beim Eindringen in das Innere des Metalls treffen die Röntgenstrahlen auf weitere Elektronen auf und regen diese zur Strahlung an. Dabei entstehen wiederum Röntgenstrahlen. Diese im Inneren eines bestrahlten Metalls auftretenden Röntgenstrahlen nennt man sekundäre Röntgenstrahlen. Die sekundären Strahlen besitzen eine größere Wellenlänge als die primären Strahlen. Die primäre Röntgenstrahlung wird auch oft als **Bremsstrahlung** bezeichnet. Die sekundären Röntgenstrahlen besitzen je nach dem Stoff ein bestimmtes Spektrum, dessen Linien serienmäßig geordnet werden können. Sie sind für die Erforschung des Aufbaues des Atoms sehr wichtig. Man nennt daher die sekundäre Röntgenstrahlung auch **charakteristische Strahlung**.

§ 63. Das elektromagnetische Spektrum

1. Die Ausdehnung des Spektrums. Auch die γ -Strahlung radioaktiver Substanzen, die in ihrem Verhalten den Röntgenstrahlen gleicht, besteht aus elektromagnetischen Wellen. Die nachstehende Tabelle ist eine Zusammenstellung aller uns bekannten elektromagnetischen Strahlenarten. Sie gibt an, welche Wellenlängen jeder Strahlenart zukommt. Trotz gleicher elektromagnetischer Natur treten mit Änderung der Wellenlänge nach und nach charakteristische physikalische Unterschiede auf, so daß man ohne Kenntnis der Theorie kaum noch merkt, daß es sich um gleiche physikalische Erscheinungen handelt.

Strahlenart	Wellenlänge
γ -Strahlen	$5 \cdot 10^{-11}$ bis $3 \cdot 10^{-9}$ cm
Röntgenstrahlen	$5 \cdot 10^{-10}$ bis $5 \cdot 10^{-8}$ „
Ultraviolette Strahlen	$4 \cdot 10^{-7}$ bis $4 \cdot 10^{-5}$ „
Sichtbares Licht	$4 \cdot 10^{-5}$ bis $8 \cdot 10^{-5}$ „
Infrarote Strahlen (Wärmestrahlen)	$8 \cdot 10^{-5}$ bis $4 \cdot 10^{-2}$ „
Funkwellen	$4 \cdot 10^{-2}$ cm bis mehrere km

der Wellenlänge nach und nach charakteristische physikalische Unterschiede auf, so daß man ohne Kenntnis der Theorie kaum noch merkt, daß es sich um gleiche physikalische Erscheinungen handelt.

2. Die Strahlungsenergie. Überblicken wir diese Zusammenstellung, so erkennen wir, daß jede Strahlung bestimmter Art durch elektromagnetische Vorgänge bestimmter Art erzeugt wird. Jedesmal muß zur Erzeugung elektromagnetischer Strahlung Energie umgewandelt werden. Bei den langwelligen Strahlen wird die Energie der elektrischen und magnetischen Energie des Schwingungskreises entnommen, bei den kurzwelligen Strahlen stammt die Energie aus der Energie sehr schnell bewegter Elektronen.

Beim sichtbaren Licht und den kurzwelligen Strahlen ist der Schwingungskreis, der Energie aufnimmt und als elektromagnetische Energie ausstrahlt, ein Atom. Wenn ein Körper bei 600° C rotes Licht aussendet, so geht daraus hervor, daß bei dieser Temperatur einige Atome durch Stoß soviel Energie aufnehmen, daß sie zum Aussenden roten Lichtes ausreicht. Bei 2000° C sind die Molekülstöße so heftig, daß alle Farben des sichtbaren Spektrums ausgesandt werden können.

Dem Molekül kann auch durch den Stoß eines Elektrons, das im elektrischen Feld beschleunigt wird, Energie zugeführt werden. Deshalb leuchtet das Gas in einer Glimmröhre, wenn zwischen den Elektroden eine hinreichende Spannung angelegt ist. Die leuchtenden Moleküle befinden sich in demselben Zustand wie im selbstleuchtenden heißen Körper, nur ist die Zahl der leuchtenden Moleküle im Gas, das Glimmlicht aussendet, viel geringer. Das Gas besitzt keine wesentlich höhere Temperatur als seine Umgebung. Die leuchtenden Moleküle werden durch Zusammenstoß mit den schnellen Elektronen zur Strahlung angeregt. Man nennt diese Art der Erzeugung von Licht „Lumineszenz“.

Fluoreszenz tritt ein, wenn die Moleküle eines Körpers kurzwelliges Licht (Röntgenstrahlen, ultraviolette Strahlen) absorbieren und dann von sich aus langwelliges Licht aussenden. Sie kann auch durch Auftreffen von Kathoden-, Kanal-, γ - und β -Strahlen erregt werden. Fluoreszenzerscheinungen bestehen darin, daß kurzwellige Strahlung in langwellige umgewandelt wird. Körper, die Strahlung aufnehmen und sie als Strahlung anderer Wellenlänge wieder abgeben und dabei nachleuchten, heißen phosphoreszierend. Es handelt sich hier um ein Speichern der Strahlungsenergie. Mit der Phosphoreszenz hat das Leuchten des Phosphors nichts zu tun. Es beruht auf einer Chemilumineszenz und ist eine Begleiterscheinung der langsamen Verbrennung des Phosphors.

3. Die Lichtquanten. Die Ergebnisse der heutigen Forschung führen über das, was im vorangegangenen vom Aufbau der Materie aus kleinsten Bausteinen und vom Wesen der elektromagnetischen Strahlung gesagt worden ist, weit hinaus. Unsere Kenntnis von der Wechselwirkung zwischen Materie und Strahlung ist, gefördert durch geistvolle Theorien und experimentelle Untersuchungen, in den letzten Jahrzehnten außerordentlich gewachsen. Es ist das Verdienst des deutschen Forschers Max Planck¹⁾, die grundlegenden Beziehungen entdeckt zu haben, die diese Entwicklung ermöglichten. Aus der Untersuchung der Strahlungskurven, wie sie in Abb. 346 angedeutet sind, hat er 1900 gefolgert, daß zwischen der Schwingungszahl des von einem Atom ausgesendeten oder absorbierten Lichtes und der Energie, die dabei umgesetzt wird, ein ganz bestimmtes unveränderliches Verhältnis besteht.

Je kürzer die Wellenlänge einer elektromagnetischen Strahlung ist, desto größer ist das Energiequantum, das bei der Absorption vom Atom aufgenommen und bei der Emission von ihm abgegeben wird.

So erklärt sich z. B. die starke ionisierende Wirkung kurzwelliger Strahlung. Weil jede Spektralfarbe und jede elektromagnetische Strahlung bestimmter Wellenlänge auf diese Weise mit bestimmten kleinsten Energiequanten verbunden ist, wird die von Planck aufgestellte Theorie **Quantentheorie** genannt. Sie hat auf allen Gebieten der Physik ihre experimentelle Bestätigung gefunden und dazu beigetragen, manche Widersprüche zwischen Theorie und Erfahrung zu beseitigen. Nach der Quantentheorie besteht die elektromagnetische Strahlung aus „Lichtquanten“ oder „Photonen“, die einen ganz bestimmten Energieinhalt besitzen. Wie die Materie aus Molekülen, Atomen, Elektronen usw. besteht, ist die elektromagnetische Strahlung aus Photonen mit verschiedenen Energiebeträgen zusammengesetzt.

1) Max Planck, geb. 1858, Berlin.

§ 64. Aufbau der Materie

1. Atome und Moleküle. Wir sahen (Teil I, § 80 und § 109), daß alle Körper aus kleinsten Teilchen aufgebaut sind, die in unaufhörlicher Wärmebewegung begriffen sind. Bei chemisch reinen Stoffen sind diese kleinsten Teilchen einander gleich; wir nennen sie die Moleküle des betreffenden Stoffes. So besteht beispielsweise Wasser aus lauter gleichen Molekülen, die je aus einem Atom Sauerstoff und zwei Atomen Wasserstoff zusammengesetzt sind. Wir drücken das durch die chemische Formel H_2O aus. Diese Atome und die aus ihnen zusammengesetzten Moleküle haben eine bestimmte Masse. Wir hatten beispielsweise als Masse des Wasserstoffatoms $1,7 \cdot 10^{-24}$ gr angegeben (§28). Im allgemeinen pflegt man die relativen Massen der Atome anzugeben. Dieses sog. Atomgewicht gibt das Massenverhältnis zwischen dem Atom eines chemischen Elementes und dem Wasserstoffatom an. 1 Atom Sauerstoff hat etwa die 16 fache Masse eines Wasserstoffatoms. Aus verschiedenen Gründen pflegt man die relative Masse der Atome der anderen Elemente auf $\frac{1}{16}$ der Masse eines Sauerstoffatoms zu beziehen. Das Molekulargewicht des Wassers beträgt rund $16 + 2 \cdot 1 = 18$.

2. Die Isotope. Die Regel von der Gleichheit aller Atome eines chemischen Elements gilt nicht ohne Einschränkung. Im Massenspektograph hat sich gezeigt, daß viele chemische Elemente aus zwei oder mehr verschiedenen Atomarten zusammengesetzt sind. Diese verhalten sich chemisch ganz gleich, haben aber verschiedene Atommassen. Wir nannten diese verschiedenen Stoffarten mit gleichem chemischen Verhalten, aber verschiedenem Atomgewicht Isotope des betreffenden Elementes. So kennen wir z. B. außer dem in großer Menge vorkommenden Wasserstoffatom, dessen Masse wir oben angaben, noch den sog. schweren Wasserstoff, dessen Atome die doppelte Masse haben, der also das Atomgewicht 2 hat. Auch Sauerstoff hat, neben dem in großer Menge vorhandenen Isotop mit dem Atomgewicht 16, Spuren von Isotopen mit den Atomgewichten 17 und 18. Es lassen sich also, außer den normalen Wassermolekülen mit dem Molekulargewicht $16 + 2 \cdot 1 = 18$, Wassermoleküle, wenn auch in sehr geringer Menge, finden, die das Molekulargewicht $16 + 2 \cdot 2$, $17 + 2 \cdot 1$, $18 + 2 \cdot 1$, $17 + 2 \cdot 2$ und $18 + 2 \cdot 2$, aber auch $16 + 2 + 1$, $17 + 2 + 1$ und $18 + 2 + 1$ haben.

3. Der Atomkern. Versuche über die Ablenkung von schnell bewegten Elektronen und α -Teilchen bei ihrem Durchgang durch Materie haben gezeigt, daß es selbst innerhalb eines festen Körpers große Gebiete gibt, in denen sich keine Massen befinden und daß die Masse jedes Atoms auf einem winzigen Raum angetroffen wird. Wir nennen die Stelle eines Atoms, an der sich praktisch seine gesamte Masse befindet, den Atomkern. Die erwähnten Versuche ergaben, daß sein Durchmesser nur etwa ein Zehntausendstel des Atomdurchmessers beträgt.

4. Bausteine der Atome. Man hat bereits früh vermutet, daß die Atome der verschiedenen Elemente aus gemeinsamen kleinsten Bausteinen aufgebaut sein müssen. Als Bausteine der Atome haben wir bereits den Kern und die Elektronen kennengelernt. Diese tragen eine negative elektrische Elementarladung und haben eine außerordentlich geringe Masse, die fast 2000 mal kleiner ist, als die des Wasserstoffatoms (vgl. § 28, 3).

Die Entstehung des von leuchtenden Körpern ausgesandten Lichtes wird durch die Bewegung der Elektronen um den Mittelpunkt des Atoms, den Atomkern, erklärt (§ 60, 3).

Wir haben einen bündigen Beweis dafür, daß durch Entfernung bestimmter Teilchen aus einem Atom kern das Atom eines anderen chemischen Elementes entsteht. Diesen Beweis liefern uns die Erscheinungen der Radioaktivität (§ 36).

5. Der radioaktive Zerfall. Wir hatten gefunden, daß das aus Uranerz gewonnene Element Radium α -Teilchen aussendet und daß diese α -Teilchen positiv geladene Heliumatomkerne sind. Und zwar entspricht ihre Ladung zwei Elementarquanten. Helium hat das Atomgewicht 4. Wir stellen uns vor, daß jedes ausgesandte α -Teilchen aus einem einzelnen Radiumatom stammt, das beim Aussenden des α -Teilchens sein Atomgewicht von 226 um 4 vermindert. Es läßt sich nachweisen, daß bei dem Zerfall aus dem Radiumatom ein ganz anderer chemischer Stoff, das Radon (auch Radiumemanation genannt), entsteht.

Radium verhält sich chemisch wie die Erdalkalimetalle und ist besonders dem Barium sehr ähnlich. Es bildet also mit Säuren Salze, die zum Teil in Wasser gut löslich sind. Das Radon dagegen ist ein Gas, das wie die uns bekannten Edelgase (Helium, Argon) keinerlei chemische Verbindung eingeht. Sein Atomgewicht ist 222. Auch das Radon ist radioaktiv und seine Atome verwandeln sich unter Aussendung eines α -Teilchens in ein anderes chemisches Element Radium *A* mit dem um 4 verminderten Atomgewicht 218. Auch dieses Element zerfällt weiter unter Aussendung eines α -Teilchens. Das so entstehende Radium *B* vom Atomgewicht 214 sendet bei dem Zerfall seiner Atome β -Teilchen, also Elektronen aus. Das dabei entstehende Element Radium *C* hat demnach praktisch dasselbe Atomgewicht wie Radium *B*. Während aber Radium *B* sich chemisch wie Blei verhält, gleicht das Radium *C* einem anderen Element, dem Wismut. Schließlich entsteht durch weiteren Zerfall eine Atomart, die nicht mehr radioaktiv ist, nämlich ein Bleisotop mit dem Atomgewicht 206. Alle Zwischenprodukte zerfallen schneller oder langsamer mit einer Geschwindigkeit, die völlig unabhängig von allen äußeren Einflüssen ist. So ist es insbesondere völlig gleichgültig, in welcher chemischen Verbindung sich das zerfallende Element befindet und bei welcher Temperatur es untersucht wird.

Die Zeit, in der die Hälfte sämtlicher vorhandenen Atome eines radioaktiven Elements zerfällt, ist bei Uran $4,5 \cdot 10^9$ Jahre, bei Radium 1580 Jahre, bei

Radon 3,85 Tage, bei Radium *A* 3 Minuten usw. Nach diesen Zeiten ist auch die von dem betreffenden radioaktiven Element ausgehende Strahlungsintensität auf die Hälfte gesunken. Abb. 353 zeigt, wie sich aus Uran über Radium und andere radioaktive Elemente schließlich Blei bildet. Die Größe der Kreise deutet schematisch die Zeit an, die verstreicht, bis die Hälfte der Atome zerfallen ist. Diese Zeit ist für Uran also unvorstellbar lang, für Radium *A* sehr kurz. Die durch

schrattierte Kreise bezeichneten radioaktiven Elemente zerfallen unter Aussendung eines α -Teilchens, die anderen unter Aussendung eines β -Teilchens.

Es hat sich also gezeigt, daß es chemische Elemente gibt, die durch Entfernung eines α -Teilchens oder eines β -Teilchens aus dem Kern in andere Elemente verwandelbar sind. Wir nehmen an, daß auch sämtliche anderen, nicht radioaktiven Elemente in gleicher Weise durch Entfernen oder Hinzufügen kleinster Bausteine ineinander überführbar sind. In neuester Zeit ist es gelungen, auch nicht-radioaktive Elemente so zu zerlegen, daß dabei Isotope anderer bekannter chemischer Elemente entstehen.

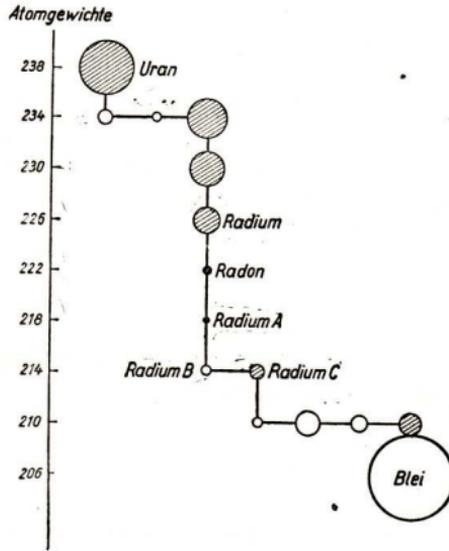


Abb. 353. Der radioaktive Zerfall des Urans

6. Das Proton. Das leichteste Atom ist das Wasserstoffatom. Wir sahen (§ 26), daß Wasserstoff immer die Wertigkeit 1 hat und bei chemischen Umsetzungen oder in Gasentladungen nur ein Elektron abzuspalten vermag. Wir schließen, daß es nur ein Elektron enthält. Sein Linienspektrum wird von diesem einen um seinen Kern kreisenden Elektron ausgesendet. Damit das Wasserstoffatom nach außen elektrisch neutral ist, muß also sein Kern, der die gesamte Masse (bis auf die geringe Masse des Elektrons) enthält, eine positive elektrische Elementarladung tragen. Dieser Wasserstoffkern, das Wasserstoffion H^+ (vgl. § 26) ist der leichteste Atomkern, den wir kennen. Wir nennen dieses Wasserstoffion daher auch Proton¹⁾.

7. Das Neutron. Wir wissen, daß das α -Teilchen zwei positive Ladungsquanten trägt (§ 36) und schließen, daß ein neutrales Heliumatom durch Vereinigung von einem α -Teilchen mit zwei Elektronen entsteht, die in weiten Bahnen um

1) prótos (griech.) = der Vorderste, der Erste.

das α -Teilchen als Kern kreisen. Das Heliumatom hat die vierfache Masse eines Wasserstoffatoms. Man stellt sich nun vor, daß das α -Teilchen oder der Heliumkern durch Zusammenlagerung von 2 Protonen mit zwei Teilchen entsteht, die dieselbe Masse haben, wie die Protonen, aber ungeladen sind. Diese Teilchen, deren Existenz in den letzten Jahren auf vielen Wegen nachgewiesen werden konnte, nennt man Neutronen¹⁾.

8. Die Atomkerne. In Erweiterung dieser Auffassung vom Bau des Heliumkernes stellt man sich den Bau der Atome aller übrigen Elemente folgendermaßen vor: Jedes Atom hat einen Kern, der nur etwa $\frac{1}{10000}$ des Atomdurchmessers hat. In ihm ist bis auf die zu vernachlässigende Elektronenmasse die gesamte Masse des Atoms vereinigt. Der Kern ist aus Protonen und Neutronen zusammengesetzt und hat eine positive elektrische Ladung. Die Anzahl seiner elektrischen Elementarquanten ist durch die Zahl der in ihm enthaltenen Protonen gegeben. Die Atome der verschiedenen Elemente unterscheiden sich durch die Zahl dieser Kernladungen. Wir kennen sämtliche Elemente mit den Kernladungen 1 (Wasserstoff) bis 92 (Uran). Die Anordnung der Elemente nach der Zahl der Kernladungen nennt man das periodische System der Elemente (vgl. Lehrbuch der Chemie). Atomarten mit der gleichen Kernladung, aber verschiedener Neutronenzahl im Kern stellen die verschiedenen Isotope ein und desselben Elementes dar.

9. Die Elektronenschalen. Außerhalb des Kernes kreisen ebensoviele Elektronen wie positive Elementarquanten im Kern vorhanden sind. Diese Elektronen sind verschieden fest an den Kern gebunden; sie kreisen in verschiedener Entfernung um den Kern.

Man hat gelernt, sich eine Vorstellung von der Anordnung der Elektronen um den Kern so zu machen, daß man damit das sichtbare Linienspektrum, sowie auch die ultravioletten Linien und die charakteristische Röntgenstrahlung (§ 62) eines Elements zu erklären vermag. Danach stammt die charakteristische Röntgenstrahlung von Elektronen, die in engen Bahnen um den Kern kreisen und daher besonders fest an ihn gebunden sind.

Die gelbe Natriumlinie stammt dagegen von dem äußersten Elektron des Natriumatoms, das also von allen Elektronen am lockersten an den Kern gebunden ist. Wir sind diesem Elektron bereits bei der Zerlegung von Kochsalz in Na^+ und Cl^- begegnet (vgl. § 26). Das Elektron ist so locker an den Rest des Natriumatoms gebunden, daß bei der Spaltung des Kochsalzmoleküls bei der Lösung in Wasser nicht neutrale Natriumatome, sondern positiv geladene Natriumatome, sog. Na^+ -Ionen entstehen. Das Elektron lagert sich an das Chloratom an und verwandelt es so in ein negatives Cl^- -Ion.

Wir sehen also, daß das gleiche Elektron für das Spektrum und das chemische Verhalten eines Atoms verantwortlich ist. Die Abspaltung eines weiteren Elektrons vom Natrium gelingt in Lösungen nicht. Das entspricht der Tatsache, daß wir das Natrium als einwertiges Element kennen (§ 26). In

1) neutrum (lat.) = keines von beiden.

elektrischen Gasentladungen ist es nur unter Aufwendung großer Energien möglich, dem Natrium weitere Elektronen zu entreißen. Wir schließen daraus, daß die im Na^+ verbliebenen Elektronen einen besonders festen Zusammenhang mit dem Kern haben. Als Elemente, die überhaupt keine chemische Bindung eingehen, sondern als einatomige Gase existieren, haben wir die Edelgase kennengelernt (vgl. z. B. Teil I, § 96, 5 und § 110, 4). Es hat sich gezeigt, daß die Elektronenhülle des Na^+ -Ions die gleiche Festigkeit besitzt, wie die der Edelgase.

Im periodischen System folgen Neon und Natrium aufeinander; ihre Kernladungszahl unterscheidet sich um Eins. Na^+ und Neon haben also die gleiche Anzahl um den Kern kreisender Elektronen.

Das dem Na^+ bei der Spaltung des NaCl -Moleküls in der wäßrigen Lösung verloren gegangene Elektron lagert sich mit dem Chloratom zu einem negativ geladenen Chloratom, einem Cl^- -Ion zusammen. Das periodische System zeigt, daß das Chlor Nachbar eines Edelgases, des Argons, ist, und zwar ist die Kernladung des Chlors um Eins kleiner als die des Argons. Wir sehen, daß durch die Anlagerung eines Elektrons die Zahl der Elektronen des Cl^- gleich der Elektronenzahl eines Edelgases wird. Cl^- hat eine beständigere Elektronenanordnung als das neutrale Chloratom.

Die Edelgase haben die Kernladungen: 2 (Helium), 10 (Neon), 18 (Argon), 36 (Krypton), 54 (Xenon) und 86 (Radon). Die chemische Erfahrung, wie die Untersuchungen an Gasentladungen, haben gezeigt, daß die Elektronenanordnung um einen Kern besonders fest ist, wenn die Zahl der Elektronen gleich einer dieser Zahlen ist. Wir stellen uns den Bau der Elektronenhüllen so vor, daß beim Neon um eine innere „Schale“, die von 2 Elektronen besetzt ist, eine weitere „Schale“ angeordnet ist, die 8 Elektronen enthält. Das Argon enthält 2 innere Schalen, die den beiden Neonschalen entsprechen und außerdem noch eine äußere Schale, die wiederum 8 Elektronen enthält. Beim Krypton ist eine Schale mit 18 Elektronen hinzugefügt, im Xenon noch eine Schale mit 18 Elektronen. Beim Radon ist eine vollständige Schale, die 32 Elektronen enthält, erreicht. Alle übrigen Elemente haben Elektronenhüllen, in denen die äußerste Schale unvollständig ist.

Der geschilderte Atombau erklärt, daß die chemischen und spektroskopischen Eigenschaften der Elemente sich bei der Anordnung nach dem periodischen System regelmäßig ändern.

§ 65. Geschichtliche Entwicklung

1. Wissenschaftliche Erkenntnisse. Den Griechen war bekannt, daß Bernstein kleine Körperchen anzieht, wenn er mit einem Tuch gerieben wird. Von der griechischen Bezeichnung für Bernstein (elektron) ist das Wort Elektrizität abgeleitet worden. Die Geschichte der elektrischen Entdeckungen beginnt eigentlich erst Ende des 16. Jahrhunderts. Zu dieser Zeit fand der englische Arzt und Forscher William Gilbert, daß viele Körper ein ähnliches

Verhalten wie Bernstein zeigen. Die elektrische Abstoßung beobachtete zuerst Otto von Guericke (1602–1686).

Die durch Reibung erzeugten elektrischen Felder besitzen oft eine außerordentlich hohe Spannung. Das Feld kann aber nur dadurch zerstört werden, daß man die Ladung durch Berührung mit einem Leiter wegnimmt. Daher ist nicht verwunderlich, daß sich an die Entdeckung Gilberts nicht unmittelbar die Verwertung der elektrischen Erscheinungen anschloß. 1729 machte Stephan Gray (in London) darauf aufmerksam, daß sich die Stoffe nach ihrem elektrischen Verhalten in zwei Gruppen, Leiter und Nichtleiter, einteilen lassen. 1733 fand der Franzose Charles François Dufay, daß es zwei verschiedene Arten der Elektrizität, Glas- und Harzelektrizität, gibt.

Die ersten Influenzerscheinungen wurden von dem Holländer Pieter van Musschenbroek und dem Deutschen Ewald Georg von Kleist 1745 beobachtet. Sie schufen den elektrischen Kondensator, die Leidener Flasche. Alle Fortschritte waren bis dahin vom Zufall abhängig, weil man keine zutreffenden theoretischen Vorstellungen besaß. Um 1750 gab der nordamerikanische Naturforscher und Staatsmann Benjamin Franklin in Briefen, die er an die Royal Society in London richtete, die erste Theorie der Elektrizität. Er nahm an, daß sie aus einem Stoff bestehe, der in jedem Körper enthalten sei. Überschuß von Elektrizität in einem Körper sollte sich darin bemerkbar machen, daß er positiv geladen erscheine, Mangel am normalen Quantum darin, daß er negativ geladen sei. Mit dieser Hypothese erklärte er die Vorgänge der Influenz. Als Mann der Praxis schuf er den Blitzableiter.

Charles Augustin Coulomb entdeckte in den Jahren 1785 und 1789 das nach ihm genannte Gesetz über die Anziehung und Abstoßung elektrischer Ladungen. Er schuf damit die unentbehrliche Grundlage für elektrische Messungen. Daher kommt diesem Gesetz eine große Bedeutung zu.

Im Jahre 1786 entdeckte Aloisio Galvani in Bologna, daß Froschschenkel, die zwei verschiedene Metalle berührten, zusammenzuckten. Sein Landsmann Alessandro Volta erklärte 1798 diesen Vorgang richtig und wies nach, daß zwischen zwei Metallen, die in eine leitende Flüssigkeit tauchen, eine elektrische Spannung entsteht.

Die Beziehung zwischen der elektrischen Spannung und der Stromstärke in einem Stromkreis, der aus festen Leitern gebildet wird, wurden von dem Deutschen Georg Simon Ohm in den Jahren 1825 bis 1827 auf theoretischem und experimentellem Wege gefunden. Das Ohmsche Gesetz bildet die Grundlage für die elektrischen Meßinstrumente. Der Bedeutung der Entdeckung Ohms entspricht es, wenn die Maßeinheit des Widerstandes ihm zu Ehren benannt ist.



Georg Simon Ohm
(1787–1854)

Die magnetischen Eigenschaften des Eisens sind schon seit alters her bekannt. Magneteisensteine hat man zuerst in China und seit dem 12. Jahrhundert in Europa als Kompaß benutzt. Erforscht wurden die magnetischen Eigenschaften des Eisens zuerst von dem Engländer William Gilbert am Ende des 16. Jahrhunderts.

Er erkannte, daß die Erde wie ein großer Magnet wirkt, dessen magnetischer Südpol im Norden liegt. Die Abhängigkeit der Deklination der Magnetnadel vom Beobachtungsort ist schon von Kolumbus beobachtet worden. Die Inklination wurde von dem Deutschen Hartmann im 16. Jahrhundert entdeckt. Der Göttinger Mathematiker Carl Friedrich Gauss hat sich um die wissenschaftliche Bestimmung der Horizontalintensität des Erdmagnetismus verdient gemacht. Er hat die Schwingungen des Magnetometers dazu benutzt.

Die magnetischen Feldlinien hat schon der französische Philosoph René Descartes mit Eisenfeilicht nachgewiesen, aber erst der englische Physiker Michael Faraday hat um 1830 die Bedeutung dieser Linien erkannt und die Lehre vom magnetischen Feld in anschaulicher Weise begründet.

Die Einwirkung des elektrischen Stromes auf die Magnetnadel ist 1820 von dem Dänen Hans Christian Oersted entdeckt worden. Oersteds Entdeckung veranlaßte die französischen Forscher André Marie Ampère, Jean Baptiste Biot, Félix Savart und andere die Kräfte zu untersuchen, welche Stromkreise auf Magnete und Stromkreise aufeinander ausüben.

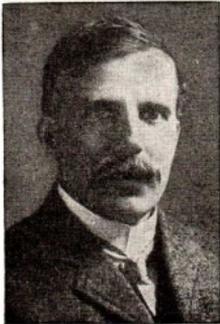
Die ersten Induktionserscheinungen wurden von dem Franzosen Dominique François Arago 1824 an dem Verhalten rotierender Magnete gegenüber Kupferscheiben beobachtet, aber nicht richtig gedeutet. Die Gesamtheit der Induktionswirkungen ist 1832 von Faraday beschrieben worden. Er hat nicht nur die gegenseitige Induktion von Stromkreisen und die Wirkung eines Magneten auf einen Leiterkreis entdeckt, sondern auch 1835 die Selbstinduktion experimentell nachgewiesen. Er erkannte, daß kein Unterschied zwischen Reibungselektrizität, Induktionselektrizität oder galvanischer Elektrizität besteht.

Den größten Fortschritt, eine Umwälzung der grundlegenden Anschauungen, brachten nahezu ein halbes Jahrhundert nach den Untersuchungen Coulombs, Faradays Vorstellungen von den elektrischen und magnetischen Kraftlinien, die sog. Feldtheorie des Elektromagnetismus. Im Jahre 1855 hat der englische Physiker William Thomson die Schwingungsdauer der elektrischen Entladung berechnet, und 1858 hat Berend Wilhelm Feddersen die Thomsonsche Schwingungsformel experimentell bestätigt.



Michael Faraday
(1791—1867)

Die Elektrolyse des Wassers wurde bereits um 1800 beobachtet. Die erste Theorie der Vorgänge im Elektrolyten gab von Grothuß 1805. Er nahm an, daß alle Moleküle des Elektrolyten aus einem negativen und einem positiven Bestandteil zusammengesetzt und an ihren Ort gebunden seien. Faraday verbesserte diese Theorie 1833, indem er die positiven und negativen Bestandteile der Moleküle als beweglich annahm. Er nannte sie „Ionen“ und erklärte die Vorgänge der Elektrolyse durch die Wanderung von Ionenschwärmen zwischen den Elektroden. Seine Theorie wurde von dem deutschen Physiker Johann Wilhelm Hittorf (1858) weiter ausgebaut. Der Schwede Svante Arrhenius und der Niederländer Jacobus Hendricus van't Hoff gaben der Ionentheorie zwischen 1884 und 1887 die Form, in der wir sie dargestellt haben. Die Untersuchung des Elektrizitätsdurchgangs durch verdünnte Gase führte 1869 Hittorf zu der Beobachtung, daß von der Kathode Strahlen ausgehen, die magnetisch ablenkbar sind. Josef Goldstein hat 1886 in Berlin die Kanalstrahlen entdeckt. Im Jahre 1894 fand Philipp Lenard, daß Kathodenstrahlen durch Aluminiumfolie aus der Röhre austreten können. Das Verhältnis e/m der Kathodenstrahlen ist zuerst 1898 von dem Deutschen Walter Kaufmann bestimmt worden. Wilhelm Wien hat als erster e/m der Kanalstrahlen (Würzburg 1900) gemessen. Die radioaktiven Eigenschaften des Urans entdeckte 1896 der Fran-



Ernest Rutherford
(1871—1937)

zose Henri Becquerel. Aus der Pechblende stellte 1898 das Ehepaar Marie und Pierre Curie in Paris das Element Radium her. Hervorragenden Anteil an der Erforschung der Ionen und Elektronen haben die englischen Forscher William Ramsay, J. J. Thomson, Ernest Rutherford, Francis William Aston gehabt. Die mathematische Darstellung und der theoretische Ausbau der Faradayschen elektromagnetischen Feldvorstellungen stammt von dem englischen



James Clerk Maxwell
(1831—1879)

Physiker James Clerk Maxwell (1865), der damit der Begründer der gesamten modernen elektromagnetischen Lichttheorie geworden ist.

Maxwell hatte in seiner elektromagnetischen Feldtheorie vorausgesagt, daß von einem Schwingungskreis elektromagnetische Wellen ausgehen müßten, die sich wie Licht im Raum ausbreiten. In genialen Versuchen gelang es dem Deutschen Heinrich Hertz zwischen 1887 und 1889 diese Wellen experimentell nachzuweisen. Die Kenntnis von der Wechselwirkung zwischen einem Magnetfeld und dem Licht stammt bereits von Faraday. Er hat 1845 ge-

funden, daß die Polarisationssebene des Lichtes in Glas durch ein Magnetfeld gedreht wird. Die magnetische Zerlegung der Spektrallinien bei der Emission des Lichtes hat der Holländer Pieter Zeeman 1896 entdeckt, während der Deutsche Johannes Stark den entsprechenden elektrischen Effekt 1913 experimentell nachweisen konnte.



Heinrich Hertz
(1857—1894)

Als ebenfalls elektromagnetische Wellenstrahlung erwiesen sich die 1895 von dem Deutschen Wilhelm Conrad Röntgen entdeckten und nach ihm benannten Strahlen. Der Nachweis ihrer Wellennatur und ihrer Wellenlänge gelang 1912 dem deutschen Physiker Max von Laue. Die beiden englischen Forscher William Henry und William L. Bragg (Vater und Sohn) haben die Methode der Reflexion von Röntgenstrahlen an Kristallen zuerst benutzt, um Röntgenspektren zu untersuchen. Schon 1885 hat der Schweizer J. J. Balmer erkannt, daß die Spektrallinien des Wasserstoffes sich in Serien ordnen

lassen und daß ihre Lagen durch einfache zahlenmäßige Beziehungen miteinander verknüpft sind. Erst 30 Jahre später hat seine Beobachtung große Beachtung gefunden. Inzwischen war der deutsche Physiker Max Planck 1900 zu der Erkenntnis gekommen, daß die Energie des Lichtes nur in bestimmten kleinsten Teilen, den Lichtquanten, abgegeben werden kann (Quantentheorie). Er hat damit der Forschung ganz neue Wege gewiesen. Den Gedanken, daß allgemein Energie nur in derartigen Quanten von Körper zu Körper übertragen werden kann, hat dann der deutsche, seit 1933 in den USA lebende Physiker Albert Einstein ausgesprochen.

Die Verknüpfung der Vorstellungen vom Bau der Atome mit den sichtbaren und den Röntgenspektren der Elemente geht auf Rutherford und den dänischen Physiker Niels Bohr zurück. An den experimentellen und theoretischen Arbeiten, die mit der Erforschung des elektromagnetischen Spektrums und seiner Deutung durch atomare Vorgänge zusammenhängen, haben die Engländer W. H. und W. L. Bragg und Henry Moseley, die Schweden Rydberg und Siegbahn und die Deutschen Ritz, Paschen, Sommerfeld hervorragenden Anteil genommen. Die neue Entwicklung der Quantentheorie des Lichtes und ihre Verknüpfung mit der Wellentheorie der Materie stammt von dem Franzosen Louis de Broglie, dem Österreicher Erwin Schrödinger, dem Deutschen Werner Heisenberg und dem Engländer Paul Dirac.

2. Technische Entwicklung. Es folgte jeder wissenschaftlichen Erkenntnis bald der Versuch, sie technisch nutzbringend auszuwerten. Trotzdem verstrich oft eine lange Zeit bis ein bedeutender technischer Erfolg sichtbar wurde. Dies liegt an dem Ineinandergreifen der technischen Einzelentwick-

lungen. Zuerst entwickelte sich die Schwachstromtechnik, da für sie die damals vorhandenen Stromquellen (z. B. galvanische Elemente) ausreichten. Der erste elektrische Telegraph wurde von Sömmering 1809 hergestellt. Für jeden Buchstaben diente eine besondere Stromleitung. Ein Wasserzersetzungsgesetz zeigte auf der Empfangsstation an, in welchem Stromkreis Strom floß. Dieser Apparat wurde von Ampère verbessert.

Einen elektromagnetischen Telegraphen mit einer Leitung benutzten Carl Friedrich Gauß und Wilhelm Weber 1833 zwischen dem Physikalischen Institut und der Sternwarte in Göttingen. Im Jahre 1837 erfand der amerikanische Maler Samuel Morse die nach ihm benannte Schrift, die er für seinen Schreibtelegraphen verwendete.

In Deutschland konstruierte 1846 Werner von Siemens den Zeigertelegraphen, der sich aber dem Schreibtelegraphen Morses, der erst später in Deutschland bekannt wurde, für die Nachrichtenübermittlung unterlegen erwies. Siemens baute nach seinem System die ersten Telegraphenlinien in Deutschland (von Frankfurt nach Berlin, 1848). Da die Drähte damals in den Erdboden verlegt wurden, mußte zuerst die Herstellung isolierter Drähte technisch ermöglicht werden. Zur Isolierung benutzte man Guttapercha. Die in der Erde verlegten Leitungen bewährten sich aber damals noch nicht, und so ging man dazu über, die Leitungen isoliert durch Porzellanlocken auf Stangen zu führen. Später wurden wieder vorzugsweise Landkabel verwandt. Schon zehn Jahre später verband das erste Kabel Nordamerika mit Europa. Kurz vorher (1855) erfand der Amerikaner David Edward Hughes den Drucktelegraphen. Die Schnelltelegraphensysteme entstanden in den letzten Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts. Der Homburger Lehrer Philipp Reis hat 1860 ein Telephon zur Übertragung musikalischer Töne konstruiert. Das erste Telephon zum Sprechen zeigte der Amerikaner Graham Bell 1876 auf der Weltausstellung in Philadelphia. Es glied dem heutigen Hörer. 1878 wurde das Mikrophon gleichzeitig von Hughes und dem Deutschen Lütge erfunden. In Berlin wurde 1877 die erste Fernsprechleitung eingerichtet.

Die Entwicklung der Starkstromtechnik konnte erst einsetzen, als Werner von Siemens die Dynamomaschine konstruiert hatte. Stromerzeugungsmaschinen mit Stahlmagneten wurden schon bald nach der Entdeckung der Induktionswirkung überall gebaut. Die Maschinen leisteten im Verhältnis zu ihrer Größe meist recht wenig. Werner von Siemens konstruierte 1857 den Doppel-T-Anker, der heute noch bei kleinen Elektromotoren angewendet wird. Im Jahre 1866 fand er das Prinzip der Selbsterregung der Dynamomaschine. Wenige Tage später entdeckte dieses auch der Engländer Charles Wheatstone. Angewendet wurde dieses Prinzip in den Stromerzeugungsmaschinen von Gramme (Paris 1869), die mit einem von Paccinotti (Pisa, 1860) erfundenen Kollektor ausgestattet waren. Im Jahre 1873 erfand der deutsche Elektroingenieur Friedrich v. Hefner-Alteneck den Trommelanker.

Die erste elektrische Eisenbahn zeigte Siemens 1879 auf der Gewerbeausstellung in Berlin. Die erste Fernübertragung elektrischer Energie in großem Maßstabe wurde auf der elektrischen Ausstellung in Frankfurt a. M. 1891 nach den Plänen von Oskar von Miller durchgeführt. Von Lauffen am Neckar wurde über eine Strecke von 180 km Drehstrom nach Frankfurt geleitet, der hier transformiert wurde und noch 72% Nutzeffekt aufwies. Nach den Versuchen von Heinrich Hertz ging man daran, die elektrischen Wellen zur Nachrichtenübermittlung auszunutzen. 1890 war durch den Franzosen Edouard Branly ein Detektor aus Eisenfeilicht erfunden worden, dessen elektrischer Widerstand geringer wurde, wenn elektromagnetische Wellen in dem Schwingungskreis ankamen, in den der Detektor eingeschaltet war („Fritter“ oder „Kohärer“).



Alexander Popow
(1859–1905)

Die ersten gelungenen Versuche zur Übermittlung von Nachrichten mit Hilfe von elektrischen Wellen machte 1895 der russische Physiker Alexander Popow. Dem Italiener Guglielmo Marconi gelang in England um das Jahr 1897 die Überbrückung größerer Entfernungen. Einige Jahre später war man im eifrigen Wettbewerb um die Vervollkommnung dieser Erfindung bemüht. In Deutschland waren führend tätig Karl Ferdinand Braun, Adolf Slaby, Georg Graf v. Arco, Max Wien und viele andere. Innerhalb des ersten Jahrzehnts des 20. Jahrhunderts fanden die Funkenstationen mit gedämpften Wellen, die man damals nur kannte, schon ausgedehnte Verwendung.

Die Erfindung der Glühkathodenröhre führte dann einen völligen Umschwung herbei. Für die Entwicklung der Glühkathodenröhre sind als Bahnbrecher in Deutschland Robert von Lieben (1906) und in den Vereinigten Staaten Lee de Forest (1907) zu nennen. Nach 1918 entwickelte sich die Telegraphie und Telephonie mit ungedämpften Wellen sehr rasch. 1921 wurde in den USA., 1924 in Deutschland der Rundfunk eingeführt.

Nachdem der russische Forscher Petrow den Lichtbogen erfunden hatte, erzeugte unabhängig von ihm der Engländer Humphry Davy 1812 den elektrischen Lichtbogen zwischen Kohlespitzen. Einen Vorläufer der industriellen Kohlenfadenlampe schuf der nach New York ausgewanderte hannoversche Lehrer Heinrich Goebel, der schon 1854 Kohlefadenlampen herstellte und zur Beleuchtung seiner Uhrmacherwerkstatt unter Benutzung von galvanischen Elementen verwendete. Die elektrische Beleuchtung verbreitete sich erst nach 1879, als Friedrich von Hefner-Alteneck in Deutschland die Differentialbogenlampe und Thomas Alva Edison in den USA. die Kohlenfadenlampe fabrikationsreif konstruiert hatte. Die Entwicklung der Glühlampe mit Wolframdraht ist von dem Nordamerikaner Irving Langmuir wesentlich beeinflusst.

Sachverzeichnis

- Absorptionsspektrum 181
 Abstimmung elektrischer Schwingungskreise 162
 Abstoßung, elektrische 21
 Akkumulator 82
 Alphastrahl 101
 Ampere (A) 8
 Amperemeter 9
 Amperesekunde (C) 22
 Amperewindung 38
 Analysator 153
 Anion 79
 Anker der Dynamomaschine 55. 62
 —, Trommelanker 64
 Anode 78
 Antenne 174
 Antikathode 85
 Anziehung, elektrische 21
 —, magnetische 36
 Äquivalent, elektrochemisches 78
 Arbeit, elektrische 32
 Atom 191
 —, Bau 192
 Atomgewicht 191
 Atomkern 191. 194
 Audion 164
 Ausbreitungsgeschwindigkeit s. Fortpflanzungsgeschwindigkeit

Batterie 6
 Betastrahl 101
 Beugung von Wasser- und Schallwellen 131
 — des Lichtes 146
 Beugungsgitter 150
 Beugungsspektrum 151
 Bildübertragung, drahtlose 177
 Bleiakkumulator 82
 Blitz 104
 Brechung des Lichtes 137
 — von elektrischen Wellen 169
 — von Wasserwellen 132

Coulomb (C) 23

 Dauermagnet 43
 Deklination, magnetische 47
 Detektor 95
 Diamagnetismus 44

 Dielektrizitätskonstante 26
 Differenzton 119
 Dipol, elektrischer 116
 Dispersionsspektrum 151
 Doppelbrechung 152. 156
 Doppplersches Prinzip 118. 141
 Drahtlose Bildübertragung 177
 — Telegraphie 170
 — Telephonie 172
 Drehimpuls 110
 Drehspulstrommesser 7
 Drehstrom 68
 Drehstromdynamo 68
 Drehstrommotor 69
 Drehung, optische 157
 Dreifingerregel, Bewegung des Stromleiters im Magnetfeld 46
 —, Richtung des Induktionsstromes 50
 Dreiphasenstrom 68
 Dynamomaschine, Gleichstrom- 62
 —, Wechselstrom- 66

Edelgas 195
 Eigenschwingung, elektrische 157
 Elastizität 106
 Elektrische Feldlinie 14
 — Feldstärke 18
 — Schwingung 157
 — Spannung 5
 — Stromstärke 7
 — Wellen 167
 Elektrischer Schwingungskreis 158
 — Widerstand 9. 93
 Elektrisches Elementarquantum 80
 — Feld 13
 — —, Aufbau 19
 — —, der Erde 102
 — —, homogenes 17
 — —, selbständiges 18
 — —, Zerfall 19. 20
 — Leitvermögen 93
 — Wärmeäquivalent 33
 Elektrizitätsmenge 22
 —, Einheit 23
 Elektrochemisches Äquivalent 78
 Elektrolyse 8. 78

 Elektrolytischer Leiter 78
 Elektromagnet 45
 Elektromagnetische Lichttheorie 184
 — Strahlung s. elektrische Wellen und elektrische Lichttheorie
 — Wellen (im Raum) 168
 Elektromagnetisches Feld 53
 — Spektrum 189
 Elektromechanisches Äquivalent 33
 Elektrometer 5
 Elektromotor 65. 67. 69
 Elektron 21. 83. 87. 101. 192
 Elektronenmikroskop 186
 Elektronenröhre s. Glühkathodenröhre
 Elektroskop 15
 Element, galvanisches 80
 —, isotopes 87
 Elementarquantum 80
 Elmsfeuer 105
 Emissionsspektrum 181
 Empfang, ungedämpfter elektrischer Wellen 171
 Energie, elektrische 31
 Erdfeld, elektrisches 102
 —, magnetisches 37. 47
 Erdmagnetismus, Veränderlichkeit 48
 Ersatzwiderstand einer Stromverzweigung 12

Farad (F) 24
 Faradaysches Gesetz, erstes 78
 — —, zweites 79
 Farben dünner Blättchen 142
 Feld, elektrisches 13
 —, elektromagnetisches 53
 —, elektrostatisches 53
 —, magnetisches 34
 Feldlinien im elektromagnetischen Feld 53
 —, elektrische 14
 — —, Richtungssinn 21
 —, magnetische 35
 — —, Richtungssinn 36
 Feldlinienzahl, magnetische 44. 52
 Feldstärke, elektrische 40
 — magnetische 37
 Fernleitung 76

- Fernschreiben 177
 Fernsehen 178
 Fernsprechverkehr 96
 Ferromagnetismus 44
 Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes 136
 — des Schalles 117. 126
 — elektromagnetischer Wellen 167
 — von Wellen 116
 Fraunhofersche Linien 181
 Frequenz 69. 116
 Frequenzmesser, magnetischer 69
 Fresnelscher Spiegelversuch 138
 Funkentelegraphie 170
- Galvanisches Element** 80
 Galvanometer 9
 Gammastrahl 101
 Gedämpfte elektrische Schwingungen 158
 Gekoppelte elektrische Schwingungen 161
 Gewitter 104
 Gitter, optisches 150
 Gleichrichter 99
 —, Aluminium- 99
 —, Detektor 95
 —, Glühkathoden- 99
 —, Quecksilberdampf- 99
 Gleichstrom 5
 Gleichstromdynamo 62
 Gleichstrommotor 65
 Glühelktron 89
 Glühkathodenröhre 87. 163
 — als Gleichrichter 99
 — als Verstärker 98
 Grammäquivalent, elektrisches 79
 Grammatom 79
 Grundton 125
- Hauptschlußmaschine** 65
 Henry (H) 62
 Hertz (Hz) 164
 Hintereinanderschaltung von Elementen 6
 Hitzdrahtstrommesser 7
 Hochfrequente Schwingung 164
 Hochfrequenzverstärker 164
 Horizontalintensität 47
 Huygensches Prinzip 128
- Impuls** 107
 —, Ausbreitung 110
 —, Dreh- 110
- Impuls, Längs-** 109
 —, Quer- 109
 —, Reflexion 107
 Induktion, elektrische 49
 —, magnetische 54
 Induktionsgesetz, elektrisches 53
 Induktionsstrom 49. 55
 —, Richtung 50
 Influenz 28
 Infrarotes Licht 182
 Inklination, magnetische 47
 Interferenz des Lichtes 139. 142
 — von Schall- und Wasserwellen 120
Ion, elektrolytisches 79
 —, Gas- 91
 —, Metall- 22
 Ionenbeweglichkeit 80
 Ionisierung von Gasen 91
 Isolator 7. 20
 Isotop 87. 191
- Joule (J)** 32
- Kanalstrahl** 86
 Kapazität, elektrische 25. 158
 Kathode 78
 Kathodenstrahl 82
 Kathodenstrahlröhre 83
 Kation 80
 Kilowatt (kW) 33
 Kilowattstunde (kWh) 33
 Kirchhoffsche Regeln 12
 Klangfiguren, Chladnische 124
 Kollektor 63. 66
 Kondensator 24
 Koppelung elektrischer Schwingungskreise 161
 Koppelungskräfte 10
 Kreisfrequenz 56
 Kurzschlußanker 69
 Kurzweile 176
- Ladung, elektrische, Anziehung** 20
 — —, Abstoßung 21
 — —, Einheit 23
 — —, positive und negative 20
 — —, Trennung und Vereinigung 20
Ladungsdichte 30
 Längswellen 114
 Lautverstärker 98
 Leidener Flasche 27
 Leistungsfaktor bei Wechselstrom 73
- Leistungsverlust in elektrischen Leitungen** 73
 Leiter 7. 20
 —, metallische 93
 Leitung, elektrolytische 78
 — in Gasen 90
 Leitvermögen, elektrisches 90
 — —, von Isolatoren 94
 — —, von Metallen 93
 — —, von Nichtmetallen 94
 Licht, kohärentes 141
 —, polarisiertes 153
 —, sichtbares 180. 184
 —, ultrarotes 182
 —, ultraviolettes 183
 Lichtbogen 92
 Lichtelektrische Zelle 90
 Lichtgeschwindigkeit 136
 — in durchsichtigen Stoffen 145
 Lippenpfeife 125
 Longitudinale Wellen 114
 Lumineszenz 190
- Magnet, permanenter** 43
 Magnetfeld der Erde 47
 Magnetisches Feld 34
 Magnetismus, remanenter 43
 Magnetnadel 34
 Magnetometer 39
 Magnetpole 47
 — Anziehung und Abstoßung 47
 Massenspektograph 86
 Mikروفarad (μF) 25
 Mikrophon 95
 Molekularströme im Eisen 42
 Molekül 191
 Mondhof 152
 Motor 65. 67. 69
- Nachleuchten 190
 Nebenschluß 13
 Nebenstrommaschine 65
 Neutron 194
 Newtonsche Ringe 144
 Nichtleiter 7
 Nicolsches Prisma 157
 Niederfrequente Schwingung 164
 Niederfrequenzverstärker 99
 Nipkowsche Scheibe 178
 Nordlicht 105
 Normalelement 81
- Oberton** 126
 Oersted 48
 Ohm (Ω) 10
 Ohmsches Gesetz 11

- Optisches Gitter 148
 Orgelpfeife 126
 Oszillograph 70
- Paramagnetismus** 44
 Periodisches System der Elemente 194
 Permeabilität 45. 52. 58
 Pfeife, gedeckte 125
 —, offene 125
 Phase des Wechselstroms 57
 — von Lichtwellen 141
 — von Wellen 115
 —, Schwingungs- 115
 Phasenverschiebung bei Wechselstrom 72
 Phosphoreszenz 190
 Photoelektron 90
 Photozelle 90
 Plattenkondensator 25
 Polarisation des Lichtes 133
 — elektrischer Wellen 170
 — elektrolytische 81
 Polarisationsebene 153
 Polarisationsfilter 157
 Polarisationswinkel 153
 Polarisor 153
 Proton 194
- Quantentheorie** 190
 Querwelle 113
- Radialgeschwindigkeit** der Fixsterne 142
 Radioaktivität 100
 Rahmenantenne 172
 Rechte-Hand-Regel, Bewegung des Stromleiters im Magnetfeld 46
 —, Stromrichtung und Magnetfeldrichtung 36
 Reflexion elektrischer Wellen 166. 169
 — von Wasser- und Schallwellen 129
 Reichweite radioaktiver Strahlen 102
 Resonanz in elektrischen Schwingungskreisen 161
 Röntgenröhre 85
 Röntgenstrahlen 85. 187
 Rotverschiebung bei Fixsternen 142
 Rückkoppelung 164
 Rundfunk 176
- Saccharimeter 157
 Schallgeschwindigkeit 117. 126
- Schallwellen 116. 129
 Schalter, rotierender 24
 Schiebewiderstand 9
 Schwebung 119
 Schwingung 111
 —, elektrische 157
 —, gedämpfte 158
 —, harmonische 114
 —, ungedämpfte 163
 Schwingungsbauch 123
 Schwingungsdauer 114
 — einer elektrischen Schwingung 159
 Schwingungsknoten 123
 Schwingungskreis, elektrischer 158. 170
 Schwingungsphase 115
 Schwingungsweite 115
 Schwingungszahl des Lichtes 140
 Selbsterregung der Dynamomaschine 64
 Selbstinduktion 61. 158
 Selbstinduktionskoeffizient 61
 Sendefrequenz 175. 176
 Sender 163. 170
 Spannung, elektrische 5
 —, Einheit 6
 — und Feldlinien 18
 Spannungsmesser 12
 Spannungsstoß 51
 Spektralfarbe 140
 Spektrum und Bau der Atome 195
 —, Beugungs- 151. 180
 —, Dispersions- 151. 180
 —, elektromagnetisches 189
 —, Energieverteilung im 184
 —, kontinuierliches 180
 —, Linien- 181
 —, normales (Beugungs-) 151. 180
 —, Zerstreungs- 151. 180
 Spule 36
 Stoß 106
 Strahl, außerordentlicher 156
 —, ordentlicher 156
 Strahl, α - 101
 —, β - 101
 —, γ - 101
 Strahlungsenergie 184
 Stromkreis 10
 Strommesser 9. 13
 Stromstärke, elektrische 7
 —, Einheit 8
 Stromstoß 22
 —, induzierter 49. 60
 Stromverzweigung 12
 Stromwärme 33
 Synchronmotor 68
- Telegraphie über Draht** 96
 —, drahtlose 170
 Telephonie, drahtlose 172
 Teslatransformator 162
 Thermoelement 94
 Thermostrom 94
 Torsionsmagnetometer 39
 Trägerwelle 164
 Transformator 74
 Transversale Welle 113
 Turmalinzange 157
- Überlandzentrale** 76
 Ultrakurzwellen 176
 Ultrarotes Licht 182
 Ultraviolettes Licht 183
 Umformer, Einankerumformer 76
 Ungedämpfte elektrische Schwingung 163
- Verstärker** 98
 Volt (V) 6
 Voltmeter 6. 12
- Wärmeäquivalent, elektrisches** 33
 Wärmestrahlung 182. 189
 Wasserwellen 116. 129
 Watt (W) 33
 Wechselspannung 56
 —, Phase 57. 70
 Wechselstrom 56
 —, Frequenz 69
 —, Leistung 73
 —, Phase 57. 70
 —, Umwandlung in Gleichstrom 76
 Wechselstromdynamomaschine 66
 Wechselstrommotor 67
 Welle, elektromagnetische 168
 —, fortschreitende 116
 —, longitudinale 114
 —, stehende 122
 —, stehende elektrische 166
 —, transversale 113
 Wellenber 112
 Wellenlänge 114
 — des Lichtes 139
 Wellental 112
 Widerstand, elektrischer 9. 93
 — —, Einheit 10
 — —, im Wechselstrom 70
 Widerstandsthermometer 93
 Wirbelströme 59
 Wirkungsgrad der Dynamomaschine 66
- Zerfall, radioaktiver** 192

