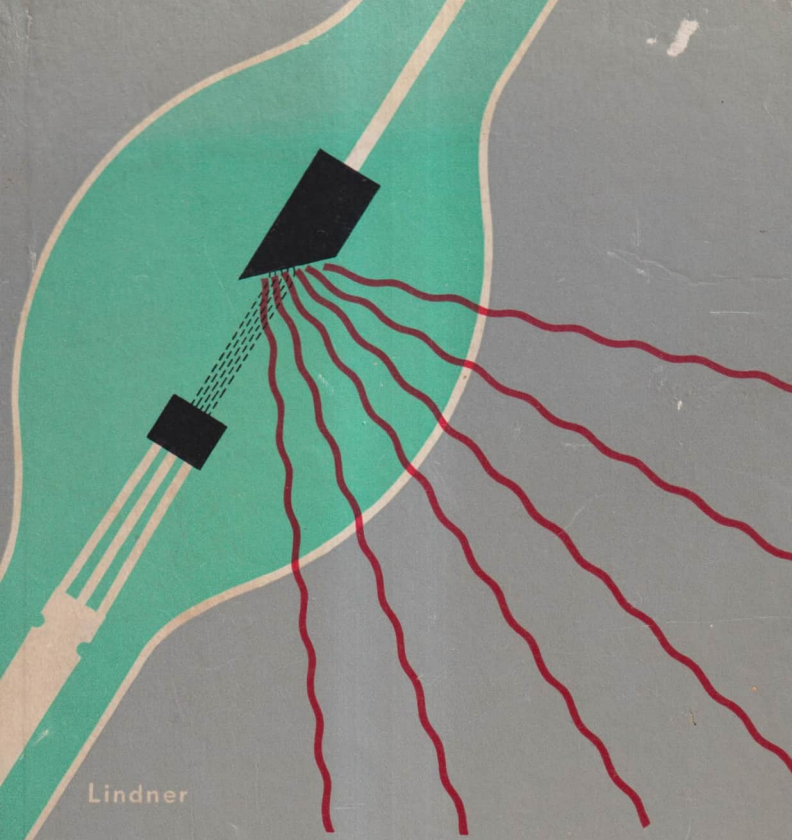


Lindner

Lehrbuch der Physik

für Techniker und Ingenieure

Band III

LEHRBUCH DER PHYSIK

FÜR TECHNIKER UND INGENIEURE

BAND III

Elektrizitätslehre und Atomphysik

VON HELMUT LINDNER

Dozent an der Ingenieurschule für Elektrotechnik, Mittweida

5., verbesserte Auflage · Mit 357 Bildern

VEB FACHBUCHVERLAG LEIPZIG 1962

Als Lehrbuch an den Fachschulen
der Deutschen Demokratischen Republik eingeführt

Staatssekretariat für das Hoch- und
Fachschulwesen

Berlin, den 25. 4. 1955

Zeichnungen: Kurt Bier, Leipzig

Redaktionsschluß 15. 10. 1961

ES 20 C 3 (18 B 1)
Alle Rechte vorbehalten · VEB Fachbuchverlag Leipzig
Satz und Druck: VEB Druckhaus „Maxim Gorki", Altenburg
Veröffentlicht unter der Lizenznummer 114-210/33/62 des Ministeriums für Kultur
der Deutschen Demokratischen Republik, Abteilung Literatur und Buchwesen
Karten: MdI der DDR Nr. 2134/5

Vorwort

Die Physik bildet neben der Mathematik eine der wissenschaftlichen Grundlagen der Technik. Ohne ein bestimmtes Maß physikalischer Kenntnisse können die technischen Fachkräfte vom Facharbeiter bis zum leitenden Ingenieur nicht die erforderliche Sicherheit und Wendigkeit bei der Lösung ihrer Aufgaben erlangen, können sie vor allem auch nicht schöpferisch an der Entwicklung der Technik teilnehmen. Die Höherentwicklung der Technik ist aber eine der wichtigsten Voraussetzungen für den planmäßigen Aufbau unserer Friedenswirtschaft.

Dieses Lehrbuch der Physik ist für den werdenden Ingenieur bestimmt. Es ist zunächst für den Gebrauch an Ingenieur- und Fachschulen und in vorbereitenden Kursen der Betriebe oder Volkshochschulen gedacht, ist aber auch als Hilfsmittel für das Selbststudium geeignet.

Dementsprechend setzt es keine höhere Schulbildung voraus, sondern entwickelt möglichst voraussetzungslos und leichtverständlich die physikalischen Grundlagen der Technik. Die Gliederung des Stoffes folgt den neuesten Lehrplänen der Ingenieur- und Fachschulen der Deutschen Demokratischen Republik, die vor allem nach pädagogischen Gesichtspunkten aufgestellt worden sind. Mit der Verordnung über die physikalisch-technischen Einheiten vom 14. 8. 1958 haben sich für die Unterrichtspraxis weitgehende methodische Vorteile und Vereinfachungen ergeben, wodurch auch die vorliegende 5. Auflage in wesentlichen Punkten weiter verbessert werden konnte. Einige über den Rahmen der neuen Lehrpläne zu weit hinausgehende Abschnitte wurden zugunsten einer ausführlichen Darstellung der Kernphysik gekürzt.

Außer der konsequenten Einführung von Größengleichungen wurden noch weitere Verbesserungen getroffen, wie die notwendig gewordene schärfere Fassung mancher Begriffe (z. B. des Materiebegriffes) im Sinne des dialektischen Materialismus und die Hervorhebung der ökonomischen Bedeutung des Leistungsfaktors.

Nach einer kurzen Einleitung über Wesen und Arten der Physik behandelt der Band I alle Gebiete der Mechanik der festen Körper, Flüssigkeiten und Gase. Der Band II ist der Wärmelehre, der Akustik und der Optik gewidmet. Der vorliegende Band III des Lehrbuches befaßt sich mit der Elektrizitätslehre und der Atomphysik.

Auch in der Methode folgt das Buch den an Ingenieur- und Fachschulen bewährten Grundsätzen. So ist z. B. die Anwendung der vektoriellen Schreibweise nicht möglich, weil im Fachschulstudium die Vektorrechnung (bis auf gelegentliche Anwendung der Vektoraddition) nicht gelehrt wird.

Es wird empfohlen, bei allen Rechnungen die Maßeinheiten mitzuschreiben, wie dies in den hier gegebenen Beispielen durchgeführt ist. Damit Verwechslungen ver-

mieden werden, sind die Formelzeichen entsprechend dem gültigen DDR-Standard kursiv (z. B. Masse m, Erdbeschleunigung g, Weg s) und die Maßeinheiten in senkrechter Schrift (z. B. Meter m, Gramm g, Sekunde s) gedruckt.
Die im Text enthaltenen Hinweise auf die Bände I und II beziehen sich auf die 1960 erschienenen Auflagen dieser Bände.

Mittweida und Leipzig, im Sommer 1961 Verfasser und Verlag

Inhaltsverzeichnis

Elektrizitätslehre

1. Die elektrischen Grundgrößen 13

1.1. Das Wesen der Elektrizität 13

1.2. Der elektrische Strom 13

1.3. Die elektrische Spannung 15

1.4. Der elektrische Widerstand 17

1.4.1. Der spezifische Widerstand 18

1.4.2. Widerstand und Temperatur 20

2. Der Gleichstromkreis 20

2.1. Das Ohmsche Gesetz 21

2.2. Der verzweigte Stromkreis 22

2.2.1. Nebenwiderstände für Strommesser 23

2.3. Der unverzweigte Stromkreis 24

2.3.1. Vorschaltwiderstand und Spannungsteiler 25

2.3.2. Vorschaltwiderstände für Spannungsmesser 26

2.4. Innerer Widerstand und elektromotorische Kraft 27

2.4.1. Messung des inneren Widerstandes und der EMK von Spannungsquellen . 28

2.5. Schaltung von Spannungsquellen 29

2.6. Die Wheatstonesche Brücke 29

2.7. Die Leistung des elektrischen Stromes 30

2.8. Die Arbeit des elektrischen Stromes 31

2.9. Die Stromwärme 32

2.9.1. Anwendungen der Stromwärme 33

3. Das elektrische Feld 35

3.1. Grunderscheinungen ruhender Ladungen 35

3.1.1. Positive und negative Ladung 35

3.1.2. Elektrometer 37

3.1.3. Die Reibungselektrisiermaschine 38

3.2. Das elektrische Feld im Vakuum . . . 38
3.2.1. Die elektrischen Feldlinien . . . 38
3.2.2. Die Influenz . . . 40
3.3. Die elektrischen Feldgrößen . . . 41
3.3.1. Die Flächendichte . . . 41
3.3.2. Die elektrische Feldstärke . . . 42
3.3.3. Die Verschiebungsdichte . . . 43
3.4. Kraftwirkungen und Arbeit im elektrischen Feld . . . 44
3.4.1. Die Kraft auf eine punktförmige Ladung im Feld . . . 44
3.4.2. Die Kraft zwischen zwei geladenen Platten . . . 44
3.4.3. Die Kraft zwischen zwei Punktladungen . . . 45
3.5. Die Kapazität . . . 46
3.6. Elektrisches Feld und Stoff . . . 47
3.6.1. Die Dielektrizitätskonstante . . . 47
3.6.2. Kondensatoren . . . 48
3.6.3. Die Energie des elektrischen Feldes . . . 50
3.6.4. Krümmungsradius und Feldstärke . . . 51
3.6.5. Vorgänge im Dielektrikum . . . 53
3.6.6. Der piezoelektrische Effekt . . . 54
3.7. Ladungstrennung in Doppelschichten . . . 55
3.8. Thermoelektrische Erscheinungen . . . 56

4. Die Stromleitung in Flüssigkeiten . . . 58
4.1. Die elektrolytische Dissoziation . . . 58
4.2. Die Elektrolyse . . . 60
4.2.1. Anwendungen der Elektrolyse . . . 62
4.3. Galvanische Elemente . . . 64
4.3.1. Entstehung der elektromotorischen Kraft . . . 64
4.3.2. Die elektrolytische Polarisation . . . 65
4.3.3. Konstante galvanische Elemente . . . 66
4.3.4. Akkumulatoren . . . 67
4.4. Stromleitung durch kolloide Teilchen . . . 68

5. Die Stromleitung in festen Körpern . . . 69
5.1. Die metallischen Leiter . . . 69
5.2. Vorgänge in Halbleitern . . . 70
5.2.1. Die Eigenleitung . . . 70
5.2.2. Die n-Leitung . . . 71
5.2.3. Die p-Leitung . . . 72
5.2.4. Die n-p-Gleichrichtung . . . 72
5.2.5. Der Transistor . . . 74
5.2.6. Halbleiter-Photoelemente . . . 75

6. Die Stromleitung in Gasen 75
6.1. Glimmentladung in verdünnten Gasen 75
6.1.1. Die Teile der Glimmentladung 75
6.1.2. Vorgänge in der Glimmentladung 76
6.1.3. Anwendung der Glimmentladung 78
6.2. Katoden- und Kanalstrahlen 79
6.3. Die Bogenentladung 80
6.4. Die Röntgenstrahlung 81

7. Der elektrische Strom im Hochvakuum 82
7.1. Geschwindigkeit und Energie freier Elektronen 83
7.2. Elektronenbefreiung aus Metallen 84
7.3. Die Diode (Zweielektrodenröhre) 85
7.4. Die Triode (Dreielektrodenröhre) 86
7.4.1. Die Verstärkerwirkung einer Triode 88
7.4.2. Das Stromtor (Thyratron) 89

8. Das magnetische Feld 89
8.1. Grunderscheinungen des Magnetismus 89
8.1.1. Der Magnet 89
8.1.2. Die magnetischen Feldlinien 91
8.1.3. Das magnetische Erdfeld 91
8.2. Elektromagnetismus 94
8.2.1. Das Magnetfeld stromdurchflossener Spulen 94
8.2.2. Der Elektromagnet und seine Anwendungen 96
8.3. Die magnetischen Feldgrößen 99
8.3.1. Die magnetische Feldstärke 99
8.3.2. Die magnetische Spannung 100
8.3.3. Die Induktion 101
8.3.4. Der magnetische Fluß 103
8.4. Das magnetische Feld in stofflichen Medien 104
8.4.1. Die Permeabilität 104
8.4.2. Magnetisierungskurve und Hysteresis 105
8.4.3. Para- und diamagnetische Stoffe 107
8.4.4. Magnetisierung und Entmagnetisierung 107
8.4.5. Der Durchflutungssatz 108
8.4.6. Berechnung eines magnetischen Kreises 110
8.5. Induktionsvorgänge 111
8.5.1. Das Induktionsgesetz 111
8.5.2. Induktion in bewegten Leiterteilen 114
8.5.3. Wirbelströme 115

8.5.4. Der Gleichstromgenerator 115
8.5.5. Die Selbstinduktion 117

8.6. Kraftwirkungen auf Stromleiter im Magnetfeld 119
8.6.1. Kraftwirkung auf einen geraden Stromleiter 119
8.6.2. Anwendungen der Kraftwirkung auf Stromleiter 121
8.6.3. Die Lorentzkraft 124
8.6.4. Kraftwirkung zwischen Stromleitern 125
8.6.5. Die gesetzliche Definition der Stromstärke 126
8.6.6. Die Lenzsche Regel 127

8.7. Die Energie des magnetischen Feldes 128
8.7.1. Berechnung der Feldenergie 128
8.7.2. Die Zugkraft eines Magneten 129

9. Der Wechselstrom 130

9.1. Grundeigenschaften des Wechselstroms 130
9.1.1. Die Entstehung einer sinusförmigen Wechselspannung 131
9.1.2. Der Wechselstromgenerator 132
9.1.3. Mittelwerte von Wechselspannungen und -strömen 133

9.2. Widerstände im Wechselstromkreis 135
9.2.1. Rein ohmscher Widerstand 135
9.2.2. Der induktive Widerstand 135
9.2.3. Der kapazitive Widerstand 137
9.2.4. Die Addition phasenverschobener Spannungen und Ströme 138
9.2.5. Reihenschaltung von Wechselstromwiderständen 140
9.2.6. Die Parallelschaltung von Wechselstromwiderständen 142
9.2.7. Resonanz in Wechselstromkreisen 143
9.2.8. Der Haut-(Skin-)Effekt 145

9.3. Die Leistung im Wechselstromkreis 146
9.3.1. Die Wirkleistung 146
9.3.2. Die Blindleistung 146
9.3.3. Die Wechselstromleistung im allgemeinen Fall 147

9.4. Die Bedeutung des Blindstromes und seine Kompensation 149

9.5. Der Transformator 149
9.5.1. Der Funkeninduktor 151

9.6. Der Dreiphasenstrom 152
9.6.1. Entstehung eines Dreiphasenstroms 152
9.6.2. Die Dreieckschaltung 153
9.6.3. Die Sternschaltung 154

9.7. Wechselstrommotoren 154
9.7.1. Der Synchronmotor 154
9.7.2. Asynchronmotoren 155

10. Elektromagnetische Schwingungen und Wellen 157
10.1. Der einfache Schwingkreis 157
10.2. Der Katodenstrahl-Oszillograph 160
10.3. Die Triode als Schwingungserzeuger 160
10.4. Der Dipol als Schwingkreis 161
10.5. Freie elektromagnetische Wellen 162
10.5.1. Die Entstehung elektromagnetischer Wellen 162
10.5.2. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen 163
10.6. Nachweis und Empfang elektromagnetischer Wellen 164
10.6.1. Resonanz zweier Schwingkreise 164
10.6.2. Drahtlose Telegrafie und Rundfunk 166
10.7. Das Fernsehen 168
10.8. Energie und Stoff 169
10.8.1. Der Strahlungsdruck 169
10.8.2. Die Masse eines Strahlungsquants 170
10.8.3. Die Masse-Energie-Beziehung 171

Atomphysik

11. Die Elementarteilchen 172
11.1. Die Atome 172
11.2. Die Arten der Elementarteilchen 173
11.2.1. Im Atom enthaltene Teilchen 173
11.2.2. Weitere Elementarteilchen 173
11.3. Die Größe der Elementarteilchen 174

12. Das Wasserstoffatom 175
12.1. Bau des Wasserstoffatoms 175
12.2. Das Bohrsche Atommodell 175
12.3. Emission und Absorption des Lichtes 177
12.4. Die Spektrallinien des Wasserstoffs 177
12.5. Die Quantenzahlen 179

13. Atombau und periodisches System 180
13.1. Atomgewicht und Ordnungszahl 180
13.2. Die Atomhüllen der übrigen Elemente 182
13.3. Entstehung der Röntgenspektren 185

14. Die Isotopie 186
14.1. Isotope und Isobare 186

14.2. Das physikalische Atomgewicht 187
14.3. Der Massendefekt 188

15. Die natürliche Radioaktivität 188
15.1. Das Wesen der radioaktiven Strahlungen 188
15.2. Das Zerfallsgesetz 189
15.3. Die radioaktiven Zerfallsreihen 191
15.3.1. Die Uranreihe 191
15.3.2. Die Thoriumreihe 193
15.3.3. Die Aktiniumreihe 193
15.4. Weitere natürliche radioaktive Isotope 193
15.5. Nachweis der Strahlungen 193
15.6. Die Maßeinheit der Aktivität 195

16. Kernumwandlungen und künstliche Radioaktivität 196
16.1. Kernreaktionen 196
16.2. Die Erzeugung schneller Teilchen 197
16.3. Die künstliche Radioaktivität 200

17. Die Kernspaltung 201
17.1. Der Grundvorgang der Kernspaltung 201
17.2. Die Kernspaltungsenergie 201
17.3. Die Kettenreaktion 202
17.4. Die Transurane 203
17.5. Gewinnung von Atomenergie für friedliche Zwecke 204

18. Eigenschaften radioaktiver Strahlungen 205
18.1. Eigenschaften der α-Strahlen 205
18.2. Eigenschaften der β-Strahlen 205
18.3. Eigenschaften der γ-Strahlen 206
18.4. Die Strahlendosis 207
18.5. Die Dosisleistungskonstante 208

19. Anwendung von Radioisotopen 208

20. Die kosmische Strahlung 210
Bildquellenverzeichnis 211
Sachwortverzeichnis 212

ELEKTRIZITÄTSLEHRE

1. Die elektrischen Grundgrößen

1.1. Das Wesen der Elektrizität

Alle elektrischen und die mit ihnen verbundenen magnetischen Erscheinungen rühren daher, daß in den Atomen aller Stoffe noch kleinere Teilchen vorhanden sind, die sich nach besonderen Gesetzen anziehen oder abstoßen. Um sie ihrem Charakter nach zu unterscheiden, sagt man, sie seien **positiv** bzw. **negativ elektrisch** geladen. Das Wesen dieses besonderen Zustandes ist nicht weiter erklärbar, am wenigsten aber mechanisch zu deuten.

Nicht zu verwechseln ist die elektrische Anziehung mit der allgemeinen Massenanziehung (Band I, Abschn. 5.10). Zwischen zwei elektrisch geladenen Elementarteilchen ist bei gleichem Abstand die Massenanziehung um viele Zehnerpotenzen geringer als die elektrische Anziehungskraft.

Fürs erste genügt zu wissen, daß sich in den Atomkernen neben unelektrischen Masseteilchen — den sogenannten Neutronen — positiv geladene **Protonen** befinden, während die Atomhülle aus den negativ geladenen **Elektronen** besteht.[1]) Bei den meisten elektrischen Erscheinungen spielen die leicht abtrennbaren und frei beweglichen Elektronen die Hauptrolle. Es gelingt heute leicht, große Mengen von Elektronen zu sammeln und in Drähten fortzuleiten.

Je nach ihrer Fähigkeit, den elektrischen Strom zu leiten, unterscheidet man

1. **Leiter** (Metalle, Kohle, wäßrige Lösungen von Salzen, Säuren und Basen),
2. **Nichtleiter (Isolatoren)** (Harze, Gläser, keramische Stoffe, Schwefel, Paraffin usw.).

Die Leiter teilt man ihrerseits ein in

Leiter I. Klasse, die bei Stromdurchgang nicht verändert werden, und in

Leiter II. Klasse, die sich bei Stromdurchgang chemisch verändern (wäßrige Lösungen, Schmelzen).

Eine besondere Gruppe stellen die **Halbleiter** dar, wozu z. B. Selen, Germanium, Silizium, die metallischen Sulfide und Oxyde gehören.

1.2. Der elektrische Strom

Der **elektrische Strom** besteht in einem sehr langsamen Dahinströmen zahlreicher Elektronen, die sich zwischen den Atomen der Leitungsdrähte fortbewegen. Er ist als alltägliche Erscheinung in zahlreichen Geräten des Haushalts und der Technik

---

[1]) Ruhmasse eines Protons $m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-24}$ g,
Ruhmasse eines Elektrons $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-28}$ g,
Elektronenradius $r = 1{,}4 \cdot 10^{-13}$ cm.

bekannt: Glühlampe, Heiz- und Kochgeräte, Fernsprech- und Radioapparate usw. Je mehr Elektronen sekundlich den Draht durchfließen, desto größer ist die **Stromstärke *I*.**

Die heute allgemein verwendeten elektrischen Maßeinheiten sind international vereinbart und in der DDR durch die Verordnung vom 14. 8. 1958 festgelegt worden.

Einheit der Stromstärke *I*: 1 Ampere (1 A)

Die gesetzliche Definition lautet (etwas vereinfacht):

Das Ampere ist die Stärke eines Stromes durch zwei parallele Leiter, die einen Abstand von 1 m haben und zwischen denen die durch den Strom hervorgerufene Anziehungskraft je 1 m Leitungslänge $2 \cdot 10^{-7}$ Newton beträgt (Bild 1).[1])

(Näheres hierüber s. S. 126.)

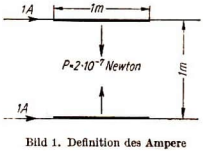


Bild 1. Definition des Ampere

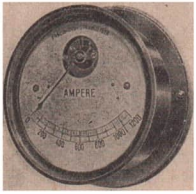


Bild 2. Amperemeter

Anhaltspunkte: Durch eine Haussicherung können maximal 6 bzw. 10 A fließen, durch eine gewöhnliche Glühlampe 0,1 bis 0,5 A, durch einen Lautsprecher etwa 0,02 A.

Zur Messung der Stromstärke dienen **Strommesser (Amperemeter)** (Bild 2, über deren Bau S. 122). Der zu messende Strom muß das Amperemeter nach Bild 3 durchfließen.

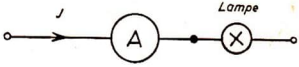


Bild 3. Schaltung eines Strommessers

Es liegt nahe, den elektrischen Strom mit einem Wasserstrom zu vergleichen, der in einem Rohr dahinfließt. Wie man die Wassermenge mittels einer in die Leitung eingebauten Wasseruhr mißt, muß auch das Amperemeter stets so angeschlossen werden, daß es vom elektrischen Strom durchflossen wird (Bild 4). Allerdings zeigt die Wasseruhr nur die Gesamtmenge des Wassers und nicht die Stärke des Wasserstroms an.

In jeder Sekunde fließt demnach eine bestimmte Menge von Elektronen, kurz eine bestimmte **Elektrizitätsmenge** Q durch den Draht, entsprechend einer gewissen Wassermenge, die je Zeiteinheit den Rohrquerschnitt passiert. Als Einheit der Elektrizitätsmenge wählt man diejenige, die bei einer Stromstärke von 1 Ampere innerhalb einer Sekunde durch den Draht fließt.

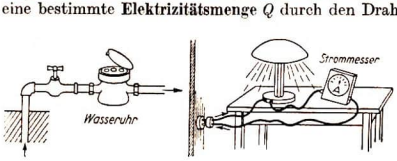


Bild 4. Vergleich zwischen Wasserstrom und elektrischem Strom

[1]) Die auf das Gesetz vom 1. 6. 1898 zurückgehende Definition des früheren internationalen Ampere (1 Ampere scheidet in 1 Sekunde aus einer Silbernitratlösung 1,118 mg Silber ab) ist damit ungültig geworden.

Einheit der Elektrizitätsmenge Q: 1 Amperesekunde (1 As) = = 1 Coulomb (1 C)

Wenn beispielsweise diese Elektrizitätsmenge innerhalb einer viertel Sekunde den Drahtquerschnitt passieren soll, muß die Stromstärke 4 Ampere betragen. Es ist daher die

(1) **Elektrizitätsmenge:** $Q = It$ (1 a) **Stromstärke:** $I = \frac{Q}{t}$

Letztere Gleichung bringt noch einmal zum Ausdruck, daß man unter der **Stromstärke I** den Quotienten aus der **Elektrizitätsmenge Q** und der **Zeit t** versteht, in der diese den Leiterquerschnitt durchströmt.

Größere Elektrizitätsmengen mißt man in **Amperestunden (Ah).**

1 Amperestunde (Ah) = 3600 Amperesekunden (As).

Beispielsweise vermag eine gute Taschenlampenbatterie etwa 1,25 Ah zu liefern. Dies sind 1,25 A · 3600 s = 4500 As.

Die kleinste in der Natur vorkommende Elektrizitätsmenge tragen das Elektron und das Proton, und zwar je eine

(2) **elektrische Elementarladung:** $e_0 = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ As

Bruchteile dieser Elementarladung sind noch nicht beobachtet worden, nur ganzzahlige Vielfache davon. Bei einer Stromstärke von 1 A fließen demnach $\frac{1}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} = 6{,}2$ Trillionen Elektronen innerhalb einer Sekunde durch den Drahtquerschnitt.

1.3. Die elektrische Spannung

Der elektrische Strom fließt nur, solange er von einer treibenden Ursache in Gang gehalten wird, die man **elektrische Spannung** U nennt.

Spannung = Ursache des Stromes

Einheit der elektrischen Spannung U: 1 Volt (1 V)

Anhaltspunkte: Hausleitungen führen eine Spannung von 125 oder 220 V, Taschenlampenbatterien 4,5 V, Hochspannungsleitungen bis 380000 V.

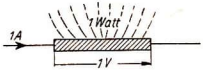


Bild 5

Die gesetzliche Definition lautet (etwas vereinfacht):

Das Volt ist die elektrische Spannung zwischen zwei Punkten eines metallischen Leiters, in dem bei einem Strom von 1 A zwischen den beiden Punkten eine Leistung von 1 W umgesetzt wird (Bild 5).

(Näheres hierüber s. S. 31.)

Vorrichtungen, die in der Lage sind, eine Spannung zu erzeugen, nennt man **Spannungsquellen.** Die Technik verwendet hierzu galvanische Elemente, Akkumulatoren, Dynamomaschinen usw. Für den Hausgebrauch ist die Steckdose eine Spannungsquelle.

Bildlich gesprochen kann man jede Spannungsquelle als eine Pumpe betrachten, die den elektrischen Strom der Leitungsdrähte in Bewegung setzt und erhält. Die hierzu nötigen Elektronen sind in den stromdurchflossenen Leitungen von vornherein schon enthalten. Die Spannungsquelle fügt keine Elektronen hinzu; sie liefert nur die Antriebsenergie.

Bild 6. Einfacher Stromkreis

Wie man bei Wasserleitungen Zu- und Abfluß unterscheidet, kennzeichnet man die **Stromrichtung** durch + und — und hat für den praktischen Gebrauch festgesetzt:

Der Strom fließt stets vom Pluspol der Spannungsquelle durch den äußeren Teil des Stromkreises nach dem Minuspol.

Im Innern der Spannungsquelle läuft der Strom in der gleichen Richtung weiter, also hier von Minus nach Plus (Bild 6). Die Elektronen selbst laufen dieser technischen Stromrichtung entgegen, was mitunter zu beachten ist.

Die Spannung als eine „Kraft" oder „Druck" zu bezeichnen, ist physikalisch unzutreffend, weil Spannung und Strom als elektrische Größen nicht mechanischer Art sind.

Man kann höchstens — um einen sehr groben Vergleich mit dem Wasserstrom zu ziehen — die elektrische Spannung mit dem Druck vergleichen, unter dem eine Wasserleitung steht. Ein elektrischer Spannungsmesser muß aber stets an beide Pole einer Spannungsquelle angeschlossen werden (Bild 7).

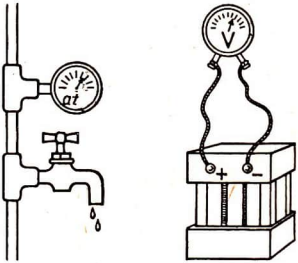


Bild 7. Vergleich zwischen Wasserdruck und elektrischer Spannung

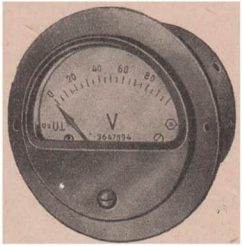


Bild 8. Voltmeter

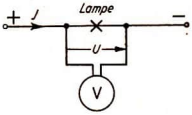


Bild 9. Schaltung eines Spannungsmessers

Die gebräuchlichen **Spannungsmesser (Voltmeter)** zeigen nur an, wenn sie von einem schwachen Strom durchflossen werden. Sie sind in Wirklichkeit in Volt geeichte Strommesser mit hohem Innenwiderstand (Bilder 8, 9). Zum genauen Vergleich von Spannungen benutzt man geeichte **Normalelemente** (S. 66). Zur Aufbewahrung der Spannungseinheit bei den Staatsinstituten dient das Weston-Normalelement, dessen Spannung bei 20 °C 1,01865 V beträgt.

1.4. Der elektrische Widerstand

Bei ihrer Bewegung zwischen den Atomen des Leitungsdrahtes stoßen die Elektronen auf einen mehr oder weniger großen **Widerstand** R. Je größer dieser ist, desto weniger Strom kann fließen.

Einheit des elektrischen Widerstandes R: $\boxed{1 \text{ Ohm } (1\,\Omega)}$

Die gesetzliche Definition lautet (etwas vereinfacht):

Das Ohm ist der elektrische Widerstand zwischen zwei Punkten eines metallischen Leiters, durch den bei der Spannung 1 V zwischen den beiden Punkten ein Strom von 1 A fließt (Bild 10).

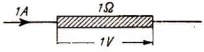


Bild 10

(Näheres hierüber s. S. 21.)

Anhaltspunkte: Gewöhnliche Glühlampen haben einen Widerstand von etwa 200 bis 1200 Ω, ein elektrisches Bügeleisen etwa 65 Ω.

Bequem veränderbar sind **Schiebe-** und **Kurbelwiderstände** (Bild 11). Für Meßzwecke dienen genau geeichte **Stöpsel-Rheostaten** (Dekadenwiderstände). Beim Entfernen eines kurzschließenden Stöpsels wird der gewünschte Widerstand freigegeben (Bilder 12, 13). Andere Widerstandswerte erhält man beim Herausziehen weiterer Stöpsel.

Oft ist es einfacher, mit dem reziproken Wert des Widerstandes, dem **elektrischen Leitwert** G, zu rechnen.

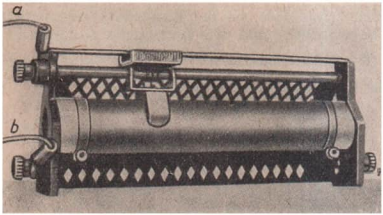


Bild 11. Schiebewiderstand. Anschlüsse bei a und b

Leitwert: $$\boxed{G = \frac{1}{R}}$$

Einheit des elektrischen Leitwertes G: $$\boxed{1 \text{ Siemens } (1\text{ S}) = \frac{1}{\text{Ohm}}\ (1/\Omega)}$$

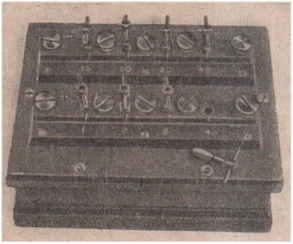


Bild 12. Stöpsel-Rheostat

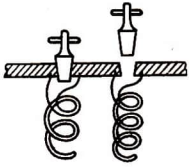


Bild 13. Inneres eines Stöpsel-Rheostaten

Die elektrischen Maßeinheiten kommen bei technischen Aufgaben in recht verschiedenen Größenordnungen vor, so daß man an Stelle vieler Dezimal- und Kommastellen gern folgende abkürzenden Vorsilben benutzt:

Tera – (T) = das 10^{12}fache
Giga – (G) = das 10^{9}fache
Mega – (M) = das 10^{6}fache (z. B. Megohm)
Kilo – (k) = das 10^{3}fache
Milli – (m) = das 10^{-3}fache (z. B. Milliampere)
Mikro – (μ) = das 10^{-6}fache (z. B. Mikrovolt)
Nano – (n) = das 10^{-9}fache
Pico – (p) = das 10^{-12}fache (z. B. Picofarad)

1.4.1. Der spezifische Widerstand

Wie sich mit einfachen Versuchen zeigen läßt, ist der Widerstand bei gleichem Leitermaterial der Länge l des Leiters direkt und dem Querschnitt F umgekehrt proportional, d. h. $R \sim \frac{l}{F}$. Der für das jeweilige Material charakteristische Proportionalitätsfaktor ist der **spezifische Widerstand** ϱ. Damit ergibt sich der

(3) **Widerstand eines Leiters:** $$R = \frac{\varrho l}{F}$$

Bei Drähten ist es allgemein üblich, die Länge l in m und den Querschnitt F in mm² zu messen. Durch Einsetzen der Maßeinheiten in Gleichung (3) findet man dann für die Maßeinheit Ω mm²/m. Der Zahlenwert von ϱ entspricht also dem Widerstand eines Drahtes von 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt.
Bei Flüssigkeiten und Isolierstoffen pflegt man dagegen die Länge l in cm und den Querschnitt F in cm² einzusetzen, weshalb dann der spezifische Widerstand ϱ die Maßeinheit Ω cm erhält. Sein Zahlenwert entspricht dem Widerstand eine Würfels von 1 cm Kantenlänge, wenn der Strom von einer Würfelfläche zur gegen überliegenden fließt.

Widerstandswerte einiger Metalle bei 20 °C

	Spezifischer Widerstand ϱ bei 20 °C	Leitfähigkeit $\varkappa$	Temperaturkoeffizient α	$\beta \cdot 10^6$
	$\Omega\,mm^2/m$	Sm/mm^2	$^1/grd$	$^1/grd^2$
Silber	0,016	61,0	0,0038	0,7
Reinkupfer	0,0172	58,1	0,0039	0,6
Leitungskupfer	0,0178	56	0,00393	0,6
Leitungsaluminium	0,02857	35	0,00377	1,3
Wolfram	0,055	18	0,0041	1,0
Zink	0,063	16	0,0037	2,0
Nickel	0,08 ··· 0,11	13 ··· 9	0,0037 ··· 60	9,0
Eisen	0,10 ··· 0,15	10 ··· 7	0,0045 ··· 60	6,0
Platin	0,11 ··· 0,14	9 ··· 7	0,002 ··· 3	0,6
Nickelin (54 Cu, 26 Ni, 20 Zn)	0,43	2,3	$0{,}11 \cdot 10^{-3}$	—
Konstantan (54 Cu, 45 Ni, 1 Mn)	0,50	2,0	$0{,}0035 \cdot 10^{-3}$	—
Chromnickel (79 Ni, 20 Cr)	1,1	0,91	$0{,}2 \cdot 10^{-3}$	—
Quecksilber	0,96	1,04	$0{,}92 \cdot 10^{-3}$	1,2

Isolatoren

	Spezifischer Widerstand ϱ (in Ω cm)	Dielektrizitätskonstante ε	Verlustfaktor $\tan\delta \cdot 10^3$ bei 600 kH
Bernstein	10^{19}	2 8	5
Quarz	10^{19}	3,8 ··· 5,0	0,1
Paraffin	10^{16}	2,1 ··· 2,2	
Hartgummi	$10^{12} \cdots 10^{18}$	2,8	6,5
Glimmer	$10^{14} \cdots 10^{17}$	7,1 ··· 7,7	0,2
Reinstes Wasser	$2{,}26 \cdot 10^7$	81,57	
Gut destilliertes Wasser	$5 \cdot 10^5$	81,57	

Wie die Zahlenwerte obiger Tabelle zeigen, hat das Kupfer nächst dem Silber den geringsten spezifischen Widerstand und wird daher in der Technik vor allen anderen Materialien bei weitem bevorzugt.
Mitunter rechnet man auch mit dem reziproken Wert des spezifischen Widerstandes, d. h. mit der

(4) **Leitfähigkeit:** $\boxed{\varkappa = \frac{1}{\varrho}}$

Beispiele: 1. Welchen Widerstand hat eine Kochplatte, die 10 m Chromnickeldraht von 0,45 mm Durchmesser enthält? — Der Querschnitt beträgt $F = \frac{0{,}45^2 \pi}{4}\,mm^2 = 0{,}159\,mm^2$ und der Widerstand nach (3) $R = \frac{1{,}1\,\Omega\,mm^2\,10\,m}{m\,0{,}159\,mm^2} = 69{,}2\,\Omega$.

2. Zwischen 2 Metallplatten liegt eine 10 cm · 10 cm große, 4 mm dicke Paraffinschicht. Wie groß ist ihr Widerstand? — Nach (3) ist $R = \frac{10^{16}\,\Omega\,cm\,0{,}4\,cm}{100\,cm^2} = 0{,}4 \cdot 10^{14}\,\Omega$.

1.4.2. Widerstand und Temperatur

Der spezifische Widerstand der meisten Stoffe ist stark von der Temperatur ϑ abhängig und nimmt im allgemeinen mit steigender Temperatur zu. Daher gelten die oben angegebenen Werte genau nur für die Bezugstemperatur von $\vartheta_{20} = 20\,°C$. Bis zu 200 °C genügt die Annahme, daß der Widerstand proportional mit der Temperatur zunehme. Dann versteht man unter dem

Temperaturkoeffizient α: relative Änderung des Widerstandes je Grad der Temperaturänderung $\Delta\,\vartheta$.

$$\alpha = \frac{\Delta R}{\Delta\vartheta \cdot R_{20}}$$

Man erhält demnach den Widerstand R für eine beliebige Temperatur ϑ, indem man zu dem bei $\vartheta_{20} = 20\,°C$ geltenden Wert R_{20} noch den Betrag $\Delta R = \alpha R_{20} \Delta\vartheta$ hinzufügt, d. h. $R = R_{20} + \Delta R$, so daß der

(5) **Widerstand bei der Temperatur ϑ:** $$\boxed{R = R_{20}(1 + \alpha\Delta\vartheta) = R_{20}[1 + \alpha(\vartheta - \vartheta_{20})]}$$

Für höhere Temperaturen verwendet man besser noch einen zweiten Koeffizienten und die Formel

$$R = R_{20}\,(1 + \alpha\Delta\vartheta + \beta\Delta\vartheta^2).$$

Zu beachten ist schließlich, daß einige Stoffe einen **negativen Temperaturkoeffizienten** haben, d. h., ihr Widerstand nimmt mit steigender Temperatur ab (z. B. Kohle, Konstantan). Der Temperaturkoeffizient des Eisens ist in besonderem Maße von der Temperatur selbst abhängig und erreicht bei etwa 850 °C den Wert 0,018, um dann wieder abzunehmen.
Wenn die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes sich störend bemerkbar macht (z. B. bei Widerständen für Meßzwecke), verwendet man daher besondere Legierungen mit recht kleinem α, z. B. Konstantan.

Beispiele: 1. Die Kupferwicklung eines Elektromotors hat bei 20 °C einen Widerstand von 500 Ω. Welchen Widerstand hat sie im Betrieb bei 62 °C? – $R = 500(1 + 0{,}0039 \cdot 42)\,\Omega = 582\,\Omega$.
2. Beim Einschalten von Glühlampen entsteht im ersten Augenblick ein Stromstoß von größerer Stärke, da der Widerstand des noch kalten Wolframdrahtes kleiner als im Betrieb ist.

2. Der Gleichstromkreis

Jeder elektrische Stromkreis besteht aus der Spannungsquelle und irgendeiner Leiteranordnung, durch welche der von der Spannung angetriebene Strom fließt. Die von der Spannung bewegten Elektronen sind von vornherein im Leiter enthalten, so daß sich ein reiner Kreislauf vollzieht. Wird er irgendwo unterbrochen, so kommt der Strom sofort zum Stillstand.

Strom fließt nur im geschlossenen Kreislauf.

Da weder die Spannungsquelle noch irgendein Teil des Leiters Elektronen neu erzeugen oder verschwinden lassen kann, bleibt die Gesamtzahl der strömenden Elektronen stets konstant. Dieselbe Elektronenmenge, die am einen Ende zuströmt, muß am anderen Ende abfließen.

(6) **Die Stromstärke ist in allen Teilen eines einfachen Stromkreises konstant.**

Demnach ist es gleichgültig, an welcher Stelle des Kreises der Strom gemessen wird.

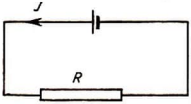


Bild 14. Schematische Darstellung eines Gleichstromkreises

Es ist im allgemeinen üblich, Stromkreise schematisch zu zeichnen, wobei es sich empfiehlt, die in den Normblättern DIN 40700 und 40709 ··· 19 vorgeschlagenen Schaltzeichen zu verwenden. So zeigt Bild 14 einen einfachen Stromkreis mit einer Gleichspannungsquelle; der Widerstand des gesamten Kreises ist mit R angedeutet, wobei man sich die übrigen Linien widerstandslos zu denken hat.

2.1. Das Ohmsche Gesetz

Wenn die Spannung die treibende Ursache des Stromes ist, so liegt die Frage nahe, nach welchem Gesetz beide Größen miteinander zusammenhängen. Sie wurde von Georg Simon Ohm (Bild 15) beantwortet.

Das Ohmsche Gesetz:

Die Stromstärke I ist direkt proportional der Spannung U. Den Proportionalitätsfaktor G nennt man den Leitwert des Stromkreises.

(7) $$\boxed{I = GU}$$

Wir wissen noch (S. 17), daß der Leitwert G dem Widerstand R reziprok ist.
Damit erhält man die Stromstärke nach dem Ohmschen Gesetz

(8) **Stromstärke:** $$\boxed{I = \frac{U}{R}}$$

Bild 15. Georg Simon Ohm (1789–1854)

Das Ohmsche Gesetz wird bei konstanter Temperatur von den Metallen und Elektrolyten streng erfüllt. Stellt man die Abhängigkeit des Stromes von der Spannung grafisch dar, so ergibt sich als **Charakteristik** (Strom-Spannungs-Kennlinie) eine ansteigende Gerade (Bild 16a). Man sieht, daß der Differenzenquotient $\frac{\Delta U}{\Delta I} = R$ an allen Stellen der Kennlinie konstant ist. Dies ist charakteristisch für einen **ohmschen Widerstand.** Dagegen zeigen z. B. Gasentladungsstrecken eine **fallende Kennlinie** (Bild 16b), indem mit zunehmender Spannung U die Stromstärke I abnimmt. Ein dritter Fall ist die **Sättigungskennlinie** (Bild 16c), die z. B. für Elektronenröhren typisch ist. Hier erreicht die Stromstärke von einem bestimmten Spannungswert an einen konstant bleibenden Sättigungswert. Das Ohmsche Gesetz ist also für die Fälle b und c nicht gültig!

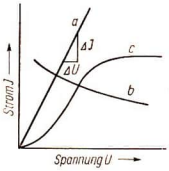


Bild 16.
Strom-Spannungs-Kennlinien:
a) ohmscher Widerstand
b) fallende Kennlinien
c) Sättigungskennlinie

Beispiele: 1. Welcher Strom fließt durch ein Bügeleisen von 80 Ω bei einer Spannung von 220 V? — Nach (8) ergibt sich $I = \frac{220\ \text{V}}{80\ \Omega} = 2{,}75\ \text{A}$.

2. Der Zeiger eines Voltmeters gibt eine Spannung von 300 V an, wobei das Instrument von 0,1 A durchflossen wird. Welchen Widerstand hat das Voltmeter? — Nach (8) ist $R = \frac{U}{I} = \frac{300\ \text{V}}{0{,}1\ \text{A}} = 3000\ \Omega$.

3. Der Heizdraht einer Radioröhre hat einen Widerstand von 63 Ω und wird von 100 mA durchflossen. Wie groß ist die Heizspannung? — $U = IR = 0{,}1\ \text{A}\ 63\ \text{V/A} = 6{,}3\ \text{V}$.

2.2. Der verzweigte Stromkreis

Man kann nun zwei verschiedene Widerstände (etwa eine Lampe und ein Bügeleisen) so miteinander verbinden, wie es Bild 17 zeigt. Man nennt dies eine **Parallelschaltung.** Beide Widerstände liegen ersichtlich anderselben Spannung U. Mißt man die beiden Teilströme I_1 und I_2 sowie den Gesamtstrom I, so findet man die

1. Kirchhoffsche Regel: Die Summe der Zweigströme ist gleich dem Gesamtstrom.

(9) $$I = I_1 + I_2$$

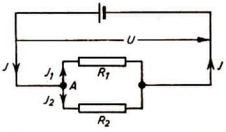


Bild 17. Verzweigter Stromkreis mit 2 parallelgeschalteten Widerständen

Es ist dies übrigens eine notwendige Folge aus Satz (6), wonach die Stromstärke in allen Punkten des Hauptstromkreises konstant sein muß. Beim Betrachten des Verzweigungspunktes A erkennt man, daß ihm ein Strom I zufließt, während die Ströme I_1 und I_2 abfließen. In allgemeiner Form lautet daher die 1. Kirchhoffsche Regel:

Die Summe der einem Knotenpunkt zufließenden Ströme ist gleich der Summe aller abfließenden Ströme (Bild 18).

$$\Sigma I_{\text{zufl.}} = \Sigma I_{\text{abfl.}}$$

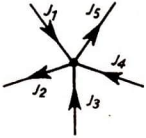


Bild 18. Knotenpunkt in allgemeiner Darstellung $I_1 + I_5 + I_4 = I_2 + I_3$

Man kann auch jedem Zweigstrom ein Vorzeichen geben, je nachdem, ob er zum Knotenpunkt hin- oder von ihm wegfließt. Dann lautet die

(10) **Knotenregel:** $$\Sigma I = 0$$

Wenn man ferner bedenkt, daß an den beiden Widerständen die gleiche Spannung U liegt, findet man einerseits $U = I_1 R_1$ und anderseits $U = I_2 R_2$. Es ist daher $I_1 R_1 = I_2 R_2$ oder, anders geschrieben,

(11) $$I_1 : I_2 = R_2 : R_1$$

Die Teilströme verhalten sich zueinander umgekehrt wie die zugehörigen Widerstände.

Durch den größeren Widerstand fließt also stets der kleinere Strom und umgekehrt.

Schließlich kann man Gleichung (9) noch durch die gemeinsame Spannung U dividieren und erhält dabei $\frac{I}{U} = \frac{I_1}{U} + \frac{I_2}{U}$ oder ausgerechnet

(12) $$\boxed{\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

Hierfür kann man auch die Leitwerte einsetzen:

(13) **Leitwert paralleler Widerstände:** $\boxed{G = G_1 + G_2}$

Der Gesamtleitwert parallelgeschalteter Widerstände ist gleich der Summe der einzelnen Leitwerte.

Diese Gesetze gelten in entsprechender Weise auch dann, wenn mehr als 2 Widerstände parallel liegen. Beispielsweise erhält man für 3 Widerstände

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}.$$

Aus (12) findet man durch Ausrechnen den

(14) **Gesamtwiderstand zweier paralleler Widerstände:** $\boxed{R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}$

Beispiele: 1. An einer Spannung von 110 V liegen, parallelgeschaltet, zwei Lampen von 303 Ω bzw. 151 Ω. Berechne a) die beiden Teilströme, b) den Gesamtstrom und c) den Gesamtwiderstand.

a) $I_1 = \frac{110\ \text{V}}{303\ \Omega} = \underline{0{,}364\ \text{A}}$; $I_2 = \frac{110\ \text{V}}{151\ \Omega} = \underline{0{,}728\ \text{A}}$; b) $I = 0{,}364\ \text{A} + 0{,}728\ \text{A} = \underline{1{,}092\ \text{A}}$;

c) $R = \frac{303 \cdot 151}{303 + 151}\ \Omega = 100{,}6\ \Omega$; Probe: $R = \frac{110\ \text{V}}{1{,}092\ \text{A}} = 100{,}6\ \Omega$.

2. 4 Widerstände von je 15 Ω sind parallelgeschaltet und liegen an einer Spannung von 4 V. Berechne a) den Gesamtwiderstand, b) den Gesamtstrom und c) die Teilströme. — a) Wegen $\frac{1}{R} = \frac{4}{R_1}$ ist $R = \frac{R_1}{4} = 3{,}75\ \Omega$; b) $I = \frac{4\ \text{V}}{3{,}75\ \Omega} = 1{,}06\ \text{A}$; c) $I_1 \cdots I_4 = \frac{4\ \text{V}}{15\ \Omega} = 0{,}27\ \text{A}$.

2.2.1. Nebenwiderstände für Strommesser

Eine wichtige Anwendung der 1. Kirchhoffschen Regel stellen die vielbenutzten **Nebenwiderstände (Shunts)** für Strommesser dar, mit denen man den Meßbereich nach Belieben vergrößern kann, ohne im Meßwerk selbst etwas zu ändern (Bilder 19, 20).

Hierbei legt man parallel zum Meßwerk einen Widerstand R_n von geeigneter Größe. Dies hat zur Folge, daß durch das Meßwerk selbst nur ein bestimmter kleiner Bruchteil, durch den Nebenwiderstand aber der Hauptteil des Stromes fließt.

Berechnung eines Nebenwiderstandes. Der Meßbereich eines Amperemeters von 50 Ω soll von 3 mA auf 0,3 A (d. h. auf das 100fache) erweitert werden. Dies ist so zu verstehen, daß bei Vollausschlag des Zeigers durch das Meßwerk nach wie vor derselbe Strom I_i fließt, der Strom I durch Meßwerk (R_i) und Nebenwiderstand (R_n) zusammen aber den 100fachen Wert

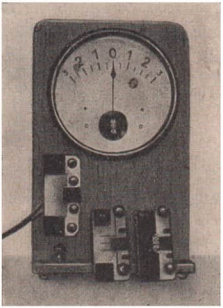


Bild 19.
Strommesser mit Nebenwiderständen

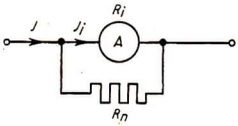


Bild 20. Schaltung eines Nebenwiderstandes

hat. Dann darf notwendigerweise durch das Instrument selbst nur $\frac{1}{100}$ des Gesamtstroms fließen, während der übrige Teil von $\frac{99}{100}$ durch den Nebenwiderstand geht. Es gilt also wegen (11) die Beziehung $\frac{1/100}{99/100} = \frac{R_n}{R_i} = \frac{R_n}{50\,\Omega}$, wonach $R_n = \frac{50\,\Omega}{99} = 0{,}505\,\Omega$.

Allgemein ist also der

Nebenwiderstand bei n-fachem Meßbereich eines Strommessers:

(15) $$R_n = \frac{R_i}{n-1}$$

2.3. Der unverzweigte Stromkreis

Es werde nun ein Stromkreis mit mehreren hintereinanderliegenden Widerständen aufgebaut, deren Größe einzeln bekannt sei. Man nennt dies eine **Reihen- oder Serienschaltung** (Bild 21). Mißt man dann die Spannungen zwischen den Verbindungsklemmen, so findet man:

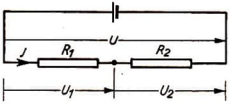


Bild 21. Reihenschaltung von Widerständen

Die Summe der Teilspannungen einer Reihenschaltung von Widerständen ist gleich der Gesamtspannung.

(16) $$U = U_1 + U_2$$

Wenn man die Gleichung $U = U_1 + U_2$ durch den gemeinsamen Strom I dividiert, erhält man $\frac{U}{I} = \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I}$ oder ausgerechnet

(17) $$R = R_1 + R_2$$

Der Gesamtwiderstand einer Reihenschaltung ist gleich der Summe der Einzelwiderstände.

In einer anderen Ausdrucksweise kann man auch sagen, daß die Gesamtspannung in jedem einzelnen Widerstand um einen bestimmten Betrag „abfällt", oder:

Die Gesamtspannung ist gleich der Summe aller einzelnen Spannungsabfälle.

Beispiele: 1. Die zu einer Lampe von 85 Ω führende Leitung ist an eine Spannungsquelle von 220 V angeschlossen und hat eine Gesamtlänge von 120 m sowie einen Kupferdurchmesser von 1,5 mm. Berechne a) den gesamten Widerstand, b) den Strom und c) die unmittelbar an der Lampe liegende Spannung.

a) Der Widerstand der Leitung beträgt $R_1 = \frac{0{,}0178\ \Omega\ \mathrm{mm}^2 \cdot 120\ \mathrm{m}}{\mathrm{m}\ 1{,}77\ \mathrm{mm}^2} = 1{,}21\ \Omega$, so daß $R = 1{,}21\ \Omega + 85\ \Omega = \underline{86{,}21\ \Omega}$. b) Nach (8) ist $I = \frac{220\ \mathrm{V}}{86{,}21\ \Omega} = \underline{2{,}55\ \mathrm{A}}$. c) Nach (8) ist $U_2 = 2{,}55\ \mathrm{A}\ 85\ \Omega = \underline{216{,}5\ \mathrm{V}}$. An der Lampe ist nur ein Teil der Spannung wirksam.

2. Warum dürfen zwei Lampen für 110 V mit den Widerständen 303 Ω und 151 Ω nicht hintereinander an eine Spannung von 220 V geschaltet werden? Welche Stromstärke ist zu erwarten, und welche Spannungen liegen an den Lampen?

a) $I = \frac{220\ \mathrm{V}}{303\ \Omega + 151\ \Omega} = \underline{0{,}485\ \mathrm{A}}$; b) $U_1 = 0{,}485\ \mathrm{A}\ 303\ \Omega = \underline{147\ \mathrm{V}}$; diese Lampe wird demnach erheblich überlastet! $U_2 = 0{,}485\ \mathrm{A}\ 151\ \Omega = \underline{73\ \mathrm{V}}$. Probe: $U_1 + U_2 = 220\ \mathrm{V}$.

2.3.1. Vorschaltwiderstand und Spannungsteiler

Die Gesetze der Reihenschaltung muß man u. a. bei der Berechnung von **Vorschaltwiderständen** anwenden. Ihre Aufgabe ist, die zur Verfügung stehende Spannung auf einen kleineren Wert zu reduzieren. Gleichzeitig damit wird wegen der Erhöhung des Gesamtwiderstandes die zu erwartende Stromstärke geringer.

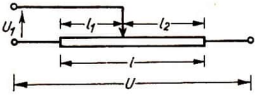


Bild 22. Schema eines Spannungsteilers

Berechnung eines Vorschaltwiderstandes. Die für 6 V gebaute Lampe eines Projektionsapparates, deren Widerstand 1,2 Ω beträgt, soll an eine Spannung von 220 V angeschlossen werden. Der Vorschaltwiderstand muß also einen Teil der Spannung, d. h. (220 − 6) V = 214 V, „vernichten".

Der vorschriftsmäßige Strom durch die Lampe beträgt wegen (8) $I = \frac{6\ \mathrm{V}}{1{,}2\ \Omega} = 5\ \mathrm{A}$. Aus dem Spannungsabfall des Vorschaltwiderstandes von 214 V ergibt sich wegen (8) $R = \frac{214\ \mathrm{V}}{5\ \mathrm{A}} = 42{,}8\ \Omega$. Beim praktischen Gebrauch ist vorher zu prüfen, ob der Widerstand die angegebene Stromstärke auch verträgt, ohne sich zu stark zu erhitzen oder gar durchzuschmelzen.

Bild 23. Spannungsteiler. Anschlüsse bei *a*, *b* und *c*

Statt eines Vorschaltwiderstandes verwendet man bei geringen Stromstärken auch den sogenannten **Spannungsteiler** (Bilder 22, 23). Dieser besteht in der Regel aus einer Wicklung von Widerstandsdraht, auf der ein verschiebbarer Kontakt gleitet. Die beiden Teilwiderstände sind den Drahtlängen proportional, so daß man sagen kann:

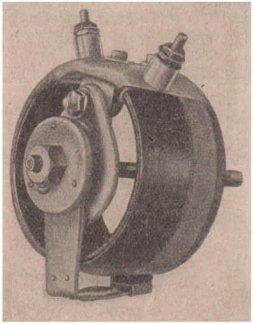


Bild 24. Potentiometer mit Kohlekontakt

Die Teilspannungen verhalten sich zueinander wie die zugehörigen Wicklungslängen.

(18) $\boxed{\frac{U_1}{U_2} = \frac{l_1}{l_2}}$ oder auch $\boxed{\frac{U_1}{U} = \frac{l_1}{l}}$

Spannungsteiler zur Herstellung regelbarer Spannungen bei geringem Strom nennt man auch **Potentiometer** (Bild 24). Es ist stets daran zu denken, daß durch die ganze Wicklung ein fortwährender Strom fließt und die angegebenen Beziehungen nur bei kleiner Belastung (strenggenommen nur im unbelasteten Zustand) gelten.

2.3.2. Vorschaltwiderstände für Spannungsmesser

Mittels eines passenden Vorschaltwiderstandes R_v läßt sich der Meßbereich eines Spannungsmessers beliebig erhöhen (Bild 25). Wird der Widerstand des Meßwerkes mit R_i bezeichnet, so ist dann der Gesamtwiderstand $R = R_i + R_v$ (Bild 26). Es fließt dann der Meßstrom $I = \frac{U}{R_i + R_v}$. Soll der Meßbereich auf das n-fache vergrößert werden, so heißt das, daß trotz der n-fachen Spannung derselbe Strom fließen muß. Denn der Zeiger soll nach Vorschalten von R_v bei der Spannung nU auf derselben Stelle stehen wie bei der Spannung U ohne R_v. Gleiche Zeigerstellung bedeutet aber gleichen Strom, womit

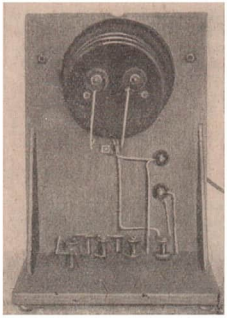


Bild 25.
Spannungsmesser mit Vorwiderständen

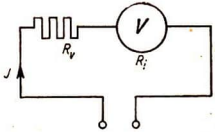


Bild 26.
Schaltung eines Vorwiderstandes

$$I = \frac{nU}{R_i + R_v} = \frac{U}{R_i}.$$

Hieraus erhält man den

Vorschaltwiderstand bei n-fachem Meßbereich eines Spannungsmessers:

(19) $\boxed{R_v = (n - 1)\, R_i}$

Beispiel: Der Meßbereich eines Voltmeters von 1500 Ω soll von 1,5 V auf 30 V vergrößert werden. Bei $n = 20$ ist der erforderliche Vorschaltwiderstand $R_v = 19 \cdot 1500\ \Omega = 28\,500\ \Omega$. Der Meßstrom ist bei vollem Zeigerausschlag zuerst $I = \frac{1{,}5\ \text{V}}{1500\ \Omega} = 1\ \text{mA}$ und dann ebenfalls $I = \frac{30\ \text{V}}{1500\ \Omega + 28\,500\ \Omega} = 1\ \text{mA}$.

2.4. Innerer Widerstand und elektromotorische Kraft

Wir haben unser Augenmerk bisher nur auf die äußeren Teile des Stromkreises gerichtet. Die Spannungsquelle selbst ist aber auch ein Teil des Gesamtkreises. Nach Satz (6) wird sie vom gleichen Strom I durchflossen und besitzt wie jeder andere Leiter einen eigenen Widerstand, den man den **inneren Widerstand** R_i nennt (Bild 27).
Demnach ist der

(20) **Gesamtwiderstand eines Stromkreises:** $\boxed{R = R_i + R_a}$

(R_a bezeichnet den gesamten äußeren Widerstand.)

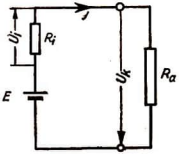


Bild 27. Innerer und äußerer Spannungsabfall. (Der innere Widerstand R_i der Spannungsquelle ist von dieser getrennt gezeichnet)

Der fließende Strom I wird also auch vom inneren Widerstand der Spannungsquelle mit bestimmt.
Die zur Überwindung dieses Gesamtwiderstandes nötige Spannung heißt die **elektromotorische Kraft (kurz: EMK)** E (auch Urspannung E genannt)[1]). Der innere Widerstand R_i verursacht den **inneren Spannungsabfall** $I \cdot R_i = U_i$ in der Spannungsquelle selbst, während die äußeren Widerstände die uns bereits bekannten Spannungsabfälle $I \cdot R_a$ verursachen. Hieraus ergibt sich die

2. Kirchhoffsche Regel: Die elektromotorische Kraft einer Spannungsquelle ist gleich der Summe aller Spannungsabfälle des Stromkreises.

(21) $$\boxed{E = \Sigma U}$$

Die an den Klemmen der Spannungsquelle gemessene Spannung heißt **Klemmenspannung** U_k. Diese muß gleich der Summe der äußeren Spannungsabfälle sein; sie wird ja an denselben Punkten gemessen.

Elektromotorische Kraft = Klemmenspannung + innerer Spannungsabfall.

(22) $$\boxed{E = U_k + U_i = U_k + IR_i}$$

Diese Betrachtungsweise läßt klar erkennen, daß die eigentliche treibende Ursache des fließenden Stromes eben diese EMK ist, die offenkundig allein von der Spannungsquelle erzeugt wird. Ihr stehen sämtliche Teilspannungen vom gleichen Gesamtbetrag gegenüber.
Auf diese Weise entsteht das

(23) **Ohmsche Gesetz für den gesamten Stromkreis:** $\boxed{I = \frac{E}{R_i + R_a}}$

Der innere Widerstand großer Generatoren und Akkumulatoren ist äußerst klein und beträgt nur Bruchteile eines Ohms, während er bei kleinen galvanischen Elementen beträchtlich ist.
Die mit dem Voltmeter gemessene Klemmenspannung ist stets niedriger als die EMK. Jedoch stimmt sie, wie die Formel (22) zeigt, um so besser mit der EMK über-

[1]) Zu diesem althergebrachten Ausdruck „Kraft" ist dasselbe zu sagen wie auf S. 16.

ein, je kleiner der zur Messung verwendete Strom ist. Bei Verwendung eines elektrostatischen (stromlosen) Voltmeters ist $I = 0$ und damit $E = U_k$.

Elektromotorische Kraft = Spannung im stromlosen Zustand (Leerlaufspannung).

2.4.1. Messung des inneren Widerstandes und der EMK von Spannungsquellen

1. Mit Hilfe zweier Spannungsmessungen. Beim Anlegen eines Voltmeters mißt man stets nur die Klemmenspannung U_k. Wenn jedoch der Widerstand des Spannungsmessers gegenüber R_i sehr groß ist, erhält man praktisch die EMK E. Sodann schaltet man an Stelle des Voltmeters einen kleineren Widerstand R_a und mißt die jetzt kleiner gewordene Klemmenspannung U_k, die gleich IR_a ist. Aus der letzten Gleichung (23) ergibt sich

$$R_i = \frac{E}{I} - R_a. \text{ Setzt man } I = \frac{U_k}{R_a}, \text{ so erhält man den}$$

(24) **inneren Widerstand einer Spannungsquelle:** $$\boxed{R_i = R_a\left(\frac{E}{U_k} - 1\right)}$$

2. Mit Hilfe zweier Strommessungen. E und R_i können gleichzeitig bestimmt werden, wenn man die Spannungsquelle nacheinander mit zwei verschiedenen äußeren Widerständen R_1 und R_2 belastet. Dabei ergeben sich die beiden Stromstärken I_1 und I_2, die bequem gemessen werden können. Aus den beiden Gleichungen $I_1 = \frac{E}{R_i + R_1}$ und $I_2 = \frac{E}{R_i + R_2}$ erhält man die beiden Unbekannten $R_i = \frac{I_2R_2 - I_1R_1}{I_1 - I_2}$ und $E = I_1(R_i + R_1)$.

3. Messung durch Spannungskompensation. Die Kompensationsmethode erlaubt es, die EMK eines Prüflings E_x durch Vergleich mit einem Normalelement E_n im stromlosen Zustand zu messen. Wie Bild 28 zeigt, speist die Hilfsbatterie B den Kompensator K (als Spannungsteiler geschalteter, dekadisch abgestufter Kurbelwiderstand). Zunächst wird das Normalelement E_n angeschlossen und durch Regeln des Hilfswiderstandes H erreicht, daß dieses stromlos wird. Hierbei ist $E_n = I \cdot R_n$, wobei R_n der am Kompensator K abgegriffene Teilwiderstand ist. Dann schaltet man auf den Prüfling um und regelt diesen Abgriff bei unverändertem H so ein, daß E_x stromlos wird. Somit besteht die Beziehung $E_x : E_n = R_x : R_n$.

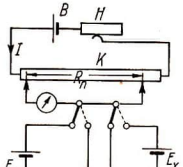


Bild 28. Spannungskompensation

Beispiele: 1. Der innere Widerstand eines Gleichstromgenerators beträgt 3,5 Ω und seine EMK 125 V. Welcher Strom fließt, und welche Klemmenspannung wird gemessen, wenn der Widerstand des äußeren Stromkreises 65 Ω beträgt? — Nach (23) ist $I = \frac{125\text{ V}}{(3{,}5 + 65)\,\Omega} = \underline{1{,}82\text{ A}}$. $U_k = I R_a = 1{,}82\text{ A } 65\,\Omega = \underline{118\text{ V}}$.

2. Die Anodenbatterie eines Radioempfängers hat eine EMK von 120 V. Wenn ein Strom von 80 mA entnommen wird, beträgt die Klemmenspannung 110 V. Welchen inneren Widerstand hat die Batterie? — Nach (22) ist $R_i = \frac{E - U_k}{I} = \frac{(120 - 110)\text{ V}}{0{,}08\text{ A}} = \underline{125\,\Omega}$.

2.5. Schaltung von Spannungsquellen

Wenn die EMK einer einzelnen Spannungsquelle für den beabsichtigten Zweck nicht ausreicht, schaltet man mehrere **Spannungsquellen in Reihe.** Man muß dabei den +Pol der einen mit dem —Pol der nächsten Spannungsquelle verbinden usw. Handelt es sich z. B. um einzelne galvanische Elemente, so erhält man eine galvanische **Batterie** (Bild 29).

Wie bei der Reihenschaltung von Widerständen (17) ergibt sich die Gesamtspannung als Summe der einzelnen Teilspannungen:

Bild 29. Schema der Reihenschaltung von 4 Elementen

(25) $$E = E_1 + E_2$$

Auf diese Weise beträgt die EMK einer Taschenlampenbatterie 4,5 V (3mal 1,5 V). Der Nachteil dieser Schaltung ist, daß sich auch die inneren Widerstände der einzelnen Elemente entsprechend addieren. Die Reihenschaltung empfiehlt sich besonders, wenn R_a groß ist gegenüber R_i.

Wenn der äußere Widerstand R_a gegenüber R_i klein ist, wendet man die **Parallelschaltung** an, indem die +Pole und —Pole sämtlicher Elemente unter sich verbunden werden (Bild 30). Hierbei ist die gesamte EMK gleich derjenigen eines einzelnen Elementes. Der innere Widerstand der Batterie beträgt bei n Elementen jedoch nur noch den n-ten Teil eines einzelnen. Auf diese Weise können entsprechend hohe Stromstärken entnommen werden.

Wenn schließlich R_a etwa gleich R_i ist, empfiehlt sich die **Gruppenschaltung** (Bild 31).

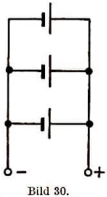


Bild 30. Schema der Parallelschaltung von 3 Elementen

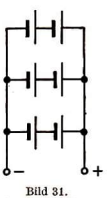


Bild 31. Gruppenschaltung von 6 Elementen

2.6. Die Wheatstonesche Brücke

Zur genauen Messung von Widerständen dient die Wheatstonesche Brückenschaltung. Die Anordnung besteht aus einem Meßdraht AB (Bild 32), auf dem ein verschiebbarer Kontakt gleitet, so daß der Draht in 2 Abschnitte mit den Widerständen R_1 und R_2 geteilt wird. R_n ist ein Vergleichswiderstand (z. B. ein Stöpselrheostat) von genau bekanntem Wert und R_x der Widerstand, dessen Wert gemessen werden soll. Die „Brücke" bildet ein empfindlicher Strommesser, der nur zur Kontrolle dafür dient, ob in dem Zweig CD ein Strom fließt. Der Nullpunkt steht auf der Mitte der Skala, so daß der Zeiger nach links oder rechts ausschlagen kann. Zur Bestimmung von R_x wird der Kontakt auf dem Meßdraht AB so lange verschoben, bis das „Nullinstrument" stromlos ist.

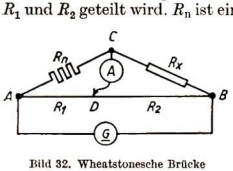


Bild 32. Wheatstonesche Brücke

In diesem abgeglichenen Gleichgewicht ist die Spannung $U_{AC} = U_{AD}$ sowie $U_{CB} = U_{DB}$. Man könnte CD kurzschließen, ohne daß sich irgend etwas ändert.

Dann gelten nach (11) die Beziehungen $\frac{R_n}{R_1} = \frac{I_u}{I_0}$ und $\frac{R_x}{R_2} = \frac{I_u}{I_0}$ (I_u und I_0 seien die Ströme im unteren bzw. oberen Stromzweig). Beide Gleichungen ergeben für das

Brückengleichgewicht:

(26) $$\boxed{R_x : R_2 = R_n : R_1}$$

Hieraus erhält man in einfacher Weise

$$R_x = \frac{R_n R_2}{R_1}.$$

Da es nur auf das Verhältnis $R_1 : R_2$ ankommt und dieses gleich dem Längenverhältnis der beiden Abschnitte des Meßdrahtes ist, hat dieser eine Längeneinteilung. Bild 33 zeigt eine handliche Ausführung, die sämtliche Teile sowie eine Trockenbatterie in einem Gehäuse enthält. Hier liest man R_x an der Skala des Drehknopfes ab.

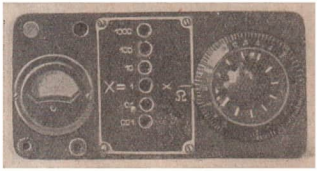


Bild 33. Wheatstonesche Brücke in handlicher Form

2.7. Die Leistung des elektrischen Stromes

Die in jedem stromdurchflossenen Leiter entstehende Wärme ist ein Zeichen dafür, daß sich hier eine Energieumwandlung vollzieht. Der entstehenden Wärme muß nach dem Gesetz von der Erhaltung der Energie ein äquivalenter Verlust an elektrischer Energie gegenüberstehen.

Um hierfür einen Ausdruck zu finden, denke man sich den folgenden einfachen Versuch (Bild 34). Eine Taschenlampenbirne für 4,5 V strahlt beim Anschluß an die Batterie je Zeiteinheit eine ganz bestimmte Energiemenge N aus. Schaltet man noch 2 gleiche Lämpchen dazu parallel, so wird die 3fache Energiemenge abgestrahlt, und man kann sagen: Bei gleicher Spannung ist die gebildete Wärme der Stromstärke proportional. Nunmehr schaltet man die 3 Lampen hintereinander, wozu die 3fache Spannung nötig ist, wenn sie ebenso hell wie vorher leuchten sollen. In diesem Fall hat der Strom dieselbe Stärke wie bei einem einzelnen Lämpchen, und man kann sagen: Bei gleicher Stromstärke ist die gebildete Wärmemenge der Spannung proportional.

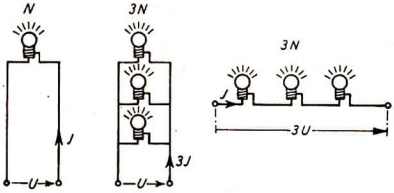


Bild 34. Zur Berechnung der elektrischen Leistung

So ergibt sich das

Joulesche Gesetz: Die in der Zeiteinheit erzeugte Wärmemenge ist sowohl der Spannung als auch der Stromstärke proportional.

(27) **Leistung des elektrischen Stromes:** $$\boxed{N = U \cdot I}$$

Diese in der Zeiteinheit erzeugte Wärmemenge stellt ihrem Wesen nach eine Leistung (Arbeit je Zeiteinheit) dar.
Sie ist zahlenmäßig gleich dem Produkt aus Spannung und Stromstärke. Statt der entsprechenden Maßbezeichnung Voltampere[1]) verwendet man aber die

Leistungseinheit: 1 Watt (1 W)
1 Kilowatt (kW) = 1000 W

Man kann in (27) an Stelle von U nach dem Ohmschen Gesetz auch IR einsetzen oder auch für I den Quotienten $\frac{U}{R}$ und erhält die Ausdrucksweisen

(28) $$N = I^2R$$ und (29) $$N = \frac{U^2}{R}$$

Beispiele: 1. Welche Leistung setzt eine Glühlampe um, durch die bei einer Spannung von 125 V ein Strom von 0,48 A fließt? — Nach (27) ist $N = 0{,}48\ \text{A} \cdot 125\ \text{V} = \underline{60\ \text{W}}$.
2. Welche elektrische Leistung muß zum Transport eines Stromes von 20 A durch eine Kupferleitung von 8 km Länge und 2,5 mm² Querschnitt aufgewandt werden?
Nach (3) beträgt der Widerstand der Leitung 57 Ω, womit sich $N = 20^2\text{A}^2\ 57\ \text{V/A} = \underline{22{,}8\ \text{kW}}$ nach (28) ergibt. Man sieht, daß zur bloßen Fortleitung des Stromes mitunter recht beträchtliche Leistungen erforderlich sind und in Form von Wärme verlorengehen.
3. Um wieviel % geht die Leistung eines Heizgerätes zurück, wenn die Netzspannung infolge einer Störung um 10% sinkt? — Da die Spannung nur noch $0{,}9\,U$ beträgt, ergibt sich die Leistung zu $\frac{0{,}9^2\,U^2}{R} = \frac{0{,}81\,U^2}{R}$ gegenüber $\frac{U^2}{R}$. Die Abnahme beträgt 19%.

2.8. Die Arbeit des elektrischen Stromes

Die innerhalb der Zeit t verrichtete Arbeit A (I, 5.023) ist das Produkt aus Leistung und Zeit, d. h. $A = Nt$. Folglich ist auch die vom Strom I innerhalb der Zeit t verrichtete

(30) **Arbeit des elektrischen Stromes:** $$A = UIt$$

Einheit der Arbeit: **1 Wattsekunde (1 Ws)**

Für größere Energien verwendet man

1 Kilowattstunde (1 kWh) = 3,6 · 10⁶ Ws.

Nun stellt aber das Produkt It nach (1) die in der Zeit t fließende Elektrizitätsmenge Q dar, und man erhält den Ausdruck

(31) $$A = UQ$$

Die Beziehungen der verschiedenen Maßeinheiten für die Arbeit sind im Gesetz vom 14. 8. 1958 wie folgt festgelegt:

(32) **1 Ws = 10⁷ erg = 1 Nm** oder auch **1 Ws = 0,102 kpm = 10,2 kpcm**

weil (I, 5.021) 980665 erg = 1 kpm.

[1]) Mit der Schreibweise VA bezeichnet man die Scheinleistung bei Wechselstrom.

Die in der Technik viel benutzte Beziehung

(33) $\boxed{1\,\text{kW} = 1{,}36\,\text{PS}}$ bzw. $\boxed{1\,\text{PS} = 0{,}7355\,\text{kW}}$

ergibt sich, wenn man bedenkt, daß nach (I, 5.023) 75 kpm/s = 1 PS, womit 102 kpm/s $= \frac{102}{75}$ PS = 1,36 PS.

Beispiele: 1. Durch einen Heißwasserspeicher fließt 25 min lang ein Strom von 5,6 A bei einer Spannung von 220 V. Dies entspricht einer Arbeit von

$$A = \frac{220\ \text{V}\ 5{,}6\ \text{A}\ 25\ \text{h}}{60} = \underline{513\ \text{Wh}}\ \text{(Wattstunden)}.$$

2. Welche durchschnittliche Stromstärle herrscht in einer Hausleitung, wenn der Zähler bei einer Netzspannung von 220 V in 30 min eine Arbeit von 0,8 kWh mißt? — Aus (30) erhält man $I = \frac{A}{Ut} = \frac{800\ \text{VAh}\ 60}{220\ \text{V}\ 30\ \text{h}} = \underline{7{,}27\ \text{A}}$.

3. Aus einem 60 m tiefen Brunnenschacht sollen je min 100 Liter Wasser gepumpt werden. Welche Leistung muß der Antriebsmotor ohne Berücksichtigung des Wirkungsgrades aufnehmen?
Die erforderliche Leistung ist nach (I, 5.023) $N = \frac{A}{t} = \frac{mgh}{t} = \frac{100\ \text{kg}\ 9{,}81\ \text{m/s}^2\ 60\ \text{m}}{60\ \text{s}}$ $= 981\ \text{Nm/s} = 981\ \text{W} = \underline{0{,}981\ \text{kW}}$.

2.9. Die Stromwärme

Welche Wärmemenge in einem Leiter freigesetzt wird, wenn der Strom die Arbeit 1 Wattsekunde verrichtet, kann man experimentell bestimmen, indem man eine schwarz angestrichene brennende Glühlampe in ein mit Wasser gefülltes Kalorimeter hängt (Bild 35) (II, 11.13). Dabei hat man einerseits die erzeugte Wärmemenge Q aus der Wassermenge und ihrer Temperaturerhöhung zu bestimmen, anderseits die Klemmenspannung U, den Strom I und die während des Versuches verflossene Zeit t zu messen (Berücksichtigung der am Versuch beteiligten Wasserwerte liefert bessere Ergebnisse). Man findet dabei, daß

(34) $\boxed{1\ \text{Ws} = 0{,}239\ \text{cal}}$

Dasselbe Ergebnis folgt auch aus der im Gesetz vom 14. 8. 1958 festgelegten Beziehung

(34a) $\boxed{1\ \text{cal} = 4{,}1868\ \text{Ws}}$

(34b) oder rund: $\boxed{1\ \text{kWh} = 860\ \text{kcal}}$

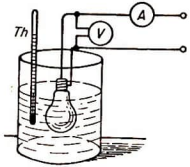


Bild 35. Bestimmung des elektrischen Wärmeäquivalents mit einer geschwärzten Glühlampe

Beispiel: Wieviel PS muß das Elektrizitätswerk zum Betrieb eines Bügeleisens von 750 W aufwenden, und welche Wärmemenge wird je Stunde dafür geliefert? — Nach obigen Beziehungen rechnet man 0,75 · 1,36 PS = 1,02 PS; Q = 750 W 3600 s 0,239 cal/Ws = <u>645 kcal</u>.

2.9.1. Anwendungen der Stromwärme

Da ein elektrisch erwärmter Draht seine Länge ändert, verwendet man diese Eigenschaft zur Messung von Strömen. Man nimmt hierzu einen ausgespannten feinen Platindraht, der einen Zeiger bewegt (Bild 36). Der Vorteil dieser **Hitzdrahtinstrumente** ist, daß sie auch für Wechselströme brauchbar sind. Ihr Nachteil ist die nichtlineare Skala und die elastische Nachwirkung des Drahtes, die eine häufige Korrektur des Nullpunktes nötig macht.

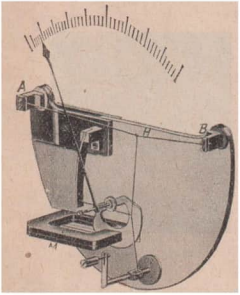


Bild 36. Hitzdrahtinstrument. H Hitzdraht, M Dämpfungsmagnet, A, B Stromanschlüsse

Jeder elektrischen Anlage sind **Schmelzsicherungen** vorgeschaltet (Bild 37). Sie haben die Aufgabe, zu hohe Stromstärken zu verhindern. Ein dünnes Silberdrähtchen (Schmelzpunkt 961 °C) ist in feinen Quarzsand eingebettet, der einen z. B. bei Kurzschluß entstehenden Lichtbogen sofort löscht.

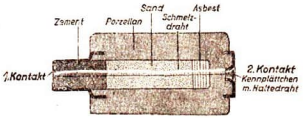


Bild 37. Elektrische Sicherung

Zur elektrischen Heizung (Kochplatten, Backherde usw.) verwendet man meist Chromnickeldraht (Schmelzpunkt 1370 °C), dessen Chromgehalt den Heizleiter vor dem Oxydieren schützt. Für technische Zwecke verwendet man Öfen, die von glühenden **Silitstäben** (Siliziumkarbid) geheizt werden (Bild 38).

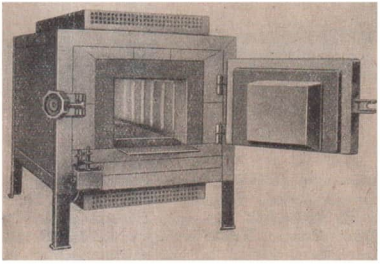


Bild 38. Elektrischer Ofen mit Silitstab-Heizung

Die **elektrischen Glühlampen** haben fast alle anderen Lichtquellen verdrängt. Die **Kohlefadenlampe** (Glühtemperatur etwa 1800 °C) ist wegen ihrer geringen Lichtausbeute (dafür ist sie recht stoßfest) fast völlig von den **Wolframdrahtlampen** verdrängt worden. Sie enthalten in einem Glaskolben, der mit einem Argon-Stickstoff-Gemisch gefüllt ist, einen feinen (bis zu 0,01 mm herunter) Wolframdraht, der meist gewendelt ist, um die Abkühlungsverluste gering zu halten. Am wirtschaftlichsten sind die Doppelwendellampen (Bild 39). Die Güte einer Lampe richtet sich nach dem je Watt erzeugten Lichtstrom (d. h. lm/W). Trotzdem ist die Lichtausbeute der

Glühlampe recht gering. Nur etwa 5% der elektrischen Leistung wird in sichtbares Licht umgewandelt, der Rest als Wärme abgestrahlt. Grund: Man kann die Glühtemperatur nicht über 2400···2700 °C steigern, da sonst der Faden vorzeitig zerstäubt. Höhere Temperatur steigert zwar die Lichtausbeute (Wiensches Verschiebungsgesetz II, 13.55), verkürzt jedoch die Lebensdauer.

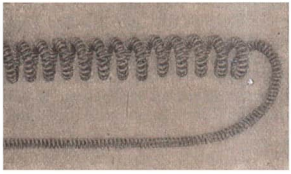


Bild 39. Wolfram-Leuchtdraht einer Doppelwendel-Lampe (stark vergrößert)

Bild 40. Reinkohle-Bogen

Die **Kohlebogenlampe** wird nur noch für Sonderzwecke wie Kinobeleuchtung, Heillampen (starker Gehalt an Ultraviolett) und dergleichen verwendet. Sie enthält zwei einander zunächst berührende Kohlestifte, die man nach Stromschluß einige mm weit auseinanderzieht. Der sich bildende Lichtbogen (Bild 40) besteht aus hocherhitzten Gasen, während die größte Lichtmenge von den weißglühenden Kohleenden ausgeht. Die positive Kohle höhlt sich dabei kraterartig aus, weshalb sie etwa doppelt so dick wie die andere Elektrode gewählt wird (Bild 41). Der **Beck-**

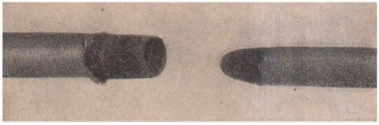


Bild 41. Krater in der positiven Kohle

Lichtbogen (Bild 42) brennt zwischen zerhaltigen Dochtkohlen, wodurch der eigentliche Bogen stark mitleuchtet und eine Flamme bildet. Die Temperatur im Krater beträgt etwa 5000 °C. Die höchsten, bisher laboratoriumsmäßig erzielten Temperaturen wurden mit dem **Gerdienbogen** (1922) erzielt. Der Lichtbogen wird hierbei durch die Öffnung einer wassergekühlten Metallscheibe eingeengt. Bei Einschnürung in einem Wasserkanal wurde bei 1500 A eine Temperatur von etwa 50000 °K erreicht.

Bild 42. Beck-Bogen

In den **Elektroöfen** heizt man das Schmelzgut entweder indirekt mittels eines Kohlebogens oder direkt, indem der Strom durch die Schmelze selbst geht und sie dabei erhitzt (Herstellung von Kalziumkarbid, Bild 43).

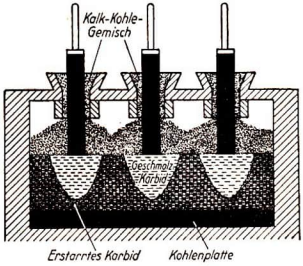


Bild 43. Herstellung von Kalziumkarbid

3. Das elektrische Feld

3.1. Grunderscheinungen ruhender Ladungen

3.1.1. Positive und negative Ladung

Zu einem tieferen Verständnis der elektrischen Erscheinungen gelangt man bei der Betrachtung der Eigenschaften **ruhender Ladungen.** Man nennt dieses Erscheinungsgebiet die **Elektrostatik.**

Von hier aus begann auch die Entdeckungsgeschichte der Elektrizität; denn schon im Altertum war bekannt, daß ein geriebenes Stück Bernstein[1]) eine lebhafte Anziehungskraft auf Wollfasern, Papierschnitzel und andere leichte Körper ausübte (Bilder 44, 45). Aber auch viele andere Nichtleiter lassen sich „elektrisch laden", z. B. *Glas und Porzellan* durch Reiben mit trockenem Papier oder besser mit einem amalgamierten[2]) Lederlappen; *Schwefel, Hartgummi, trockenes Papier* durch Reiben mit einem Wollappen.

Bild 44. Anziehungskraft geriebenen Bernsteins

[1]) Vom griechischen Wort für Bernstein „elektron" stammt die Bezeichnung **„Elektrizität".** Das Wort **„elektrisch"** wurde von William Gilbert 1600 eingeführt.

[2]) Zu empfehlen ist Kienmayersches Amalgam: 1 Sn, 1 Zn, 2 Hg.

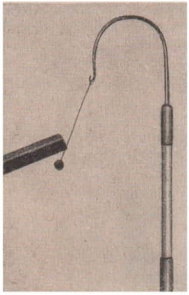


Bild 45. Elektrisches Pendel: Ein isoliert aufgehängtes Kügelchen aus Holundermark wird von einem geriebenen Hartgummistab angezogen

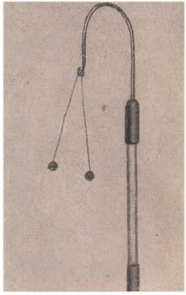


Bild 46
Gegenseitige Abstoßung zweier gleichartig geladener Kügelchen

Wenn man einen in solcher Weise elektrisch geladenen Stab an einem dünnen Faden so aufhängt, daß er sich in der horizontalen Ebene leicht drehen kann, und einen zweiten geriebenen Stab in seine Nähe bringt, findet man:

2 geriebene Hartgummi- oder Glasstäbe stoßen sich ab,
je ein Hartgummi- und Glasstab ziehen sich an.

Hieraus ist zu erkennen, daß es zweierlei Arten der elektrischen Ladung geben muß, die man als **positiv** (kurz: +) (z. B. Glas) und **negativ** (kurz: —) (z. B. Hartgummi) bezeichnet.

Gleichartige elektrische Ladungen stoßen einander ab. Ungleichartige Ladungen ziehen einander an (Bild 46).

Die Träger dieser früher als **„Reibungselektrizität“** bezeichneten Erscheinung sind die gleichen, die wir bei der Betrachtung des elektrischen Stromes kennenlernten. Die beim elektrischen Strom im Innern des Leiters fließenden Elektronen sitzen hier als negative Ladung an der Oberfläche. Beim Reiben des ursprünglich **neutralen** Glases werden (nur an der Oberfläche!) negative Ladungen „abgewischt“, weshalb das Glas dann positiv zurückbleibt. Beim Reiben von Hartgummi werden in umgekehrter Weise Elektronen von der Wolle abgewischt und bleiben am Hartgummi haften.

Positive Ladung eines Körpers = Elektronenmangel.

Negative Ladung eines Körpers = Elektronenüberschuß.

Diese Reibungsversuche gelingen mit Metallen oder feuchten Stoffen nicht, da sich in diesen die Elektronen außerordentlich leicht bewegen können (elektrische Leiter!). Ein etwa vorhandener Elektronenüberschuß fließt bei bestehender Verbindung sofort zur Erde ab, ein Elektronenmangel wird von dorther sogleich wieder ergänzt.

Beispiele: 1. Fährt man mit einem Hartgummikamm durch das trockene Haar, so hört man das Knistern elektrischer Funken.

2. Man ziehe ein auf dem Ofen getrocknetes Blatt Zeitungspapier reibend zwischen Ärmel und Anzug. Es haftet dann fest an einer tapezierten Wand.

3. Aus laufenden Treibriemen springen beim Annähern des Fingers oftmals zentimeterlange Funken.

4. Das in den Waschkesseln chemischer Reinigungsanstalten enthaltene Benzin (ein Isolator) kann sich stark elektrisch aufladen, Funkenbildung und Explosion verursachen. Ähnliche Unfälle sind auch an Benzintankstellen vorgekommen.

Bild 47. Einfaches Elektroskop in geladenem Zustand

3.1.2. Elektrometer

Zum Nachweis elektrischer Ladungen genügt in den einfachsten Fällen das **Blättchenelektroskop,** das zwei an feinen, leitenden Fäden aufgehängte Blättchen aus Seidenpapier oder Metallfolien enthält. Die Zuleitung ist mit Paraffin oder einem anderen Nichtleiter gut isoliert. Beim Berühren der Zuleitung mit einem geriebenen Glasstab spreizen sie sich infolge ihrer gleichartigen Ladung auseinander.

Behelfsmäßig kann man sich ein Elektroskop herstellen, indem man einen Blechstreifen senkrecht in ein Stück Paraffin eindrückt (Bild 47). Auf die obere Kante hängt man ein umgeknicktes Streifchen Zigarettenpapier. Nach Berühren des Bleches mit einem geriebenen Isolator spreizt es sich weit ab und bleibt wegen der guten Isolation lange Zeit in dieser Stellung.

Das **Braunsche Elektrometer** (Bild 48) enthält einen leicht beweglichen Zeiger, der sich in geladenem Zustand von der gleichartig geladenen Haltvorrichtung abstößt.

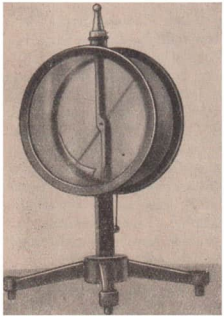


Bild 48. Braunsches Elektrometer

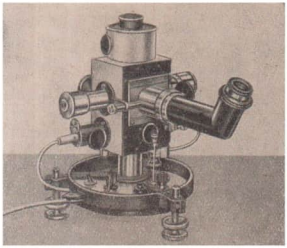


Bild 49. Modernes Fadenelektrometer mit Ablesemikroskop

Von den zahlreichen weiteren Konstruktionen sei noch das äußerst empfindliche **Wulfsche Fadenelektrometer** erwähnt. Zwischen zwei von einer Hilfsspannungsquelle aufgeladenen festen Platten ist ein feiner Platinfaden aufgespannt, dessen Ablenkung mit einem Mikroskop beobachtet wird (Bild 49).

3.1.3. Die Reibungselektrisiermaschine

Stärkere elektrische Ladungen erhält man mit der **Reibungselektrisiermaschine** (Bild 50). Eine Glasscheibe wird mit einer Handkurbel zwischen zwei amalgamierten, federnd angedrückten Reibzeugen aus Leder gedreht. Beiderseits der sich positiv aufladenden Platte saugen zwei Spitzenkämme (S. 52) die Ladungen ab und führen sie einer isoliert aufgestellten Blechkugel (Konduktor) zu, wo sich die Ladung ansammelt. Beim Annähern des Fingers springen bis zu einigen Zentimetern lange Funken über. Ist auch das Reibzeug isoliert befestigt, so kann man dessen negative Ladung einem zweiten Konduktor zuführen. Beim Verbinden beider Konduktoren gleichen sich die Ladungen unter Funkenbildung wieder aus. Die beiden Konduktoren nennt man die beiden **Pole** der Maschine.

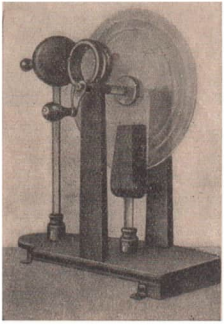


Bild 50. Reibungselektrisiermaschine

3.2. Das elektrische Feld im Vakuum

3.2.1. Die elektrischen Feldlinien

Zwei einzelne und voneinander isolierte Leiter bilden zusammen einen **Kondensator** (Verdichter). Im einfachsten Fall kann man hierzu zwei gleich große, parallele Metallplatten verwenden, d. h. einen **Plattenkondensator** (Bild 51).

Zwei auf eine isolierende Platte geklebte Stanniolstreifen stellen das flächenhafte Modell eines Plattenkondensators dar. Sie werden mit den beiden Polen einer Elektrisiermaschine verbunden. Streut man jetzt von oben auf die Platte pulverisierte Glaswolle, so ordnet sich der Staub zu zarten, aber eindeutig verlaufenden Linien an. Zwischen den Metallstreifen laufen sie quer und parallel zueinander, weichen aber oben und unten bogenförmig in den freien Raum aus (Bild 52). Man nennt sie **elektrische Kraft- oder Feldlinien.** Diese Feldlinien haben insbesondere folgende Eigenschaften, die man z. T. schon an ihrem Verlauf erkennen kann:

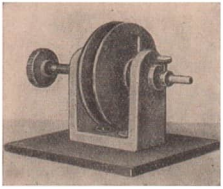


Bild 51. Plattenkondensator

1. Die Feldlinien beginnen auf der positiven und enden auf der negativen Ladung (dieser Richtungssinn ist willkürlich festgesetzt worden). Sie haben also Anfang und Ende.

2. Sie sind wie elastische Fäden zwischen den Ladungen ausgespannt, deren Abstand sie zu verkürzen bestrebt sind (Anziehung der mit ihnen verbundenen Ladungen).
3. Sie stoßen sich gegenseitig quer zu ihrer eigenen Richtung ab (Verdrängung in den freien Raum) (Bild 53).
4. Positiv geladene Körper bewegen sich in Richtung der Feldlinien auf die negative Platte zu. Negativ geladene bewegen sich den Feldlinien entgegen (Bild 54).
5. Die Feldlinien enden stets senkrecht auf der Leiteroberfläche.

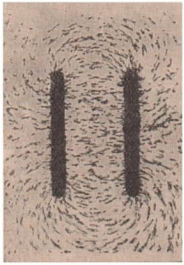


Bild 52. Feldlinien eines geladenen Plattenkondensators

Begründung des letzten Satzes: Negativ geladene Körper und damit auch die Elektronen selbst bewegen sich den Kraftlinien entgegen. Würde eine Kraftlinie schräg auf der Leiteroberfläche enden, so könnte man die wirkende Kraft in je eine normale und tangentiale Komponente zerlegen. Da die Elektronen auf einem Leiter leicht verschiebbar sind, müssen sie, der tangentialen Komponente folgend, sich so lange verschieben, bis der Gleichgewichtszustand und damit das Senkrechtstehen der Feldlinien erreicht ist.

Aus diesen Eigenschaften der Feldlinien ergibt sich ferner:

Das Innere eines im Feld befindlichen Leiters ist feldfrei; ruhende Ladungen befinden sich nur an der Oberfläche eines Leiters.

Grund: Dem Zug der Feldlinien folgend, bewegen sich die Elektronen bis zur Oberfläche, wo auch die Feldlinien endigen.

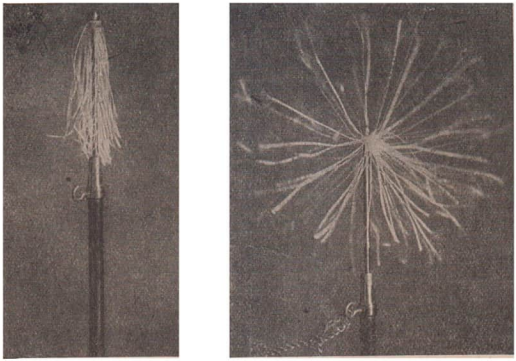


Bild 53. Elektrisch geladenes Fadenbüschel zeigt die Richtung der Feldlinien an

Aus dem 4. Satz geht übrigens hervor, daß die Elektronen in einem Leiter vom Minuspol nach dem Pluspol fließen, während man in der Technik die Stromrichtung willkürlich von Plus nach Minus festgesetzt hat.

Die Elektronen fließen der technischen Stromrichtung entgegen.

Obwohl die sichtbaren Feldlinien nur eine Anordnung von Faserstaub darstellen, kann man ihnen eine eigene hypothetische Existenz zuschreiben, indem man sich vorstellt, daß der Raum zwischen den geladenen Körpern in eigentümlicher Weise verändert sei. Man nennt ihn dann ein **elektrisches Feld**[1]).

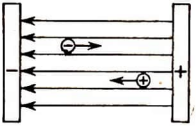


Bild 54. Bewegung elektrisch geladener Körper im Feld

Ob diese „Linien" selbständig (also auch ohne Faserstaub!) existieren, erscheint fraglich. Früher nahm man als weitere Hypothese an, der leere Raum sei von einem feinen, alles durchdringenden Medium, dem **Äther,** durchdrungen. Die moderne Physik hat sich aber von dieser Auffassung abgewandt, nachdem alle Versuche fehlschlugen, den Äther nachzuweisen. Trotzdem aber erweist sich die Hilfsvorstellung der Kraftlinien bei vielen Gelegenheiten als recht nützlich.

Versuche: 1. Man stelle ein Elektrometer unter eine Haube aus engem Drahtnetz und lade das Netz mit einer Elektrisiermaschine. Das Elektrometer zeigt keinen Ausschlag (Faradayscher Käfig). Nach diesem Prinzip schützt man Pulvermagazine vor Blitzschlag.

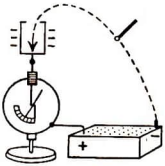


Bild 55. Die in das Innere des Faradayschen Bechers gebrachte Ladung wandert auf dessen Außenseite und sammelt sich dort an

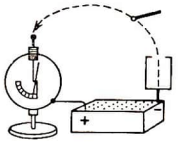


Bild 56. Vom Innern des Bechers aus gelingt die Ladungsübertragung nicht

2. Man setze auf das Elektrometer ein Blechgefäß mit engerer Öffnung (Faradayscher Becher) und verbinde das Gehäuse mit dem +Pol einer Anodenbatterie (Bilder 55, 56). Mit einer Probekugel (kleiner Metallkugel an isolierendem Stiel) berührt man abwechselnd den −Pol der Batterie und das Innere des Bechers. Das Elektrometer zeigt einen schrittweise steigenden Ausschlag. Grund: Die Probekugel gibt an die Innenwand des Bechers ihre Ladung ab, die sofort nach außen wandert.

3. Man setze den Becher auf den negativen Pol der Batterie und wiederhole damit denselben Versuch. Er gelingt nicht; ein Beweis dafür, daß das Innere des Bechers keine Ladung trägt.

3.2.2. Die Influenz

In die Nähe eines isoliert aufgestellten Metallkörpers bringe man einen (positiv geladenen) geriebenen Glasstab, berühre den Körper

Bild 57. Aufladung eines isolierten Metallkörpers durch Influenz

[1]) Die Kraftlinienvorstellung wurde von Michael Faraday (1791···1867) geschaffen.

kurz mit dem Finger und entferne den Stab wieder (Bild 57). Der Metallgegenstand erweist sich jetzt bei einer Prüfung als negativ geladen, ohne daß eine Berührung mit dem Glasstab stattgefunden hat.

Erklärung: Die in der Nähe befindliche positive Ladung des Glasstabes zieht die negative Ladung des Körpers an dessen Oberfläche, wo sie wegen der Anziehung vorläufig festgehalten wird **(gebundene Ladung).** Während der kurzdauernden Berührung mit dem Finger fließt die nicht gebundene Ladung **(freie Ladung)** — in diesem Fall ist es die positive — zur Erde ab.[1])

Das elektrische Feld ruft also auf jedem Körper eine Ladungsverschiebung hervor. Man nennt diesen Vorgang **Influenz.** Diese Verschiebung währt nur so lange, wie das Feld wirksam ist, sie ist daher im allgemeinen nur vorübergehender Art.

Influenz = Ladungsverschiebung unter dem Einfluß eines von außen einwirkenden elektrischen Feldes.

Beispiele: 1. Ein Elektrometer schlägt bereits aus, wenn man einen geriebenen Glasstab annähert, ohne das Elektrometer damit zu berühren. Nach kurzem Berühren des Elektrometerkopfes mit dem Finger erweist sich dieses wesentlich stärker geladen als bei direkter Berührung. Grund: Bei unmittelbarer Berührung kann nur wenig Ladung vom Stab übergehen, da dieser ein Isolator ist. Beim Influenzvorgang wirkt jedoch das ganze Feld in der Umgebung des Stabes ladungsverschiebend.

2. Vorüberziehende Gewitterwolken können auf Hochspannungsleitungen gefährliche Ladungswellen erzeugen, wenn die influenzierte Ladung nach Entladung der Wolke nach beiden Seiten abfließt.

3.3. Die elektrischen Feldgrößen

3.3.1. Die Flächendichte

Die auf einer Leiteroberfläche sitzende elektrische Ladung Q kann größer oder kleiner sein. Betrachtet man die Einheit der Oberfläche F, so erhält man die

(35) **Flächendichte der Ladung auf einem Leiter:** $\boxed{\sigma = \frac{Q}{F}}$

Einheit der Flächendichte σ: $\boxed{1\ \mathrm{As/m^2}}$

Da die Oberfläche einer frei stehenden Kugel gleich $4\pi r^2$ und die Ladung auf ihr gleichmäßig verteilt ist, gilt für die

(36) **Flächendichte auf einer Kugel:** $\boxed{\sigma = \frac{Q}{4\pi r^2}}$

Durch Umstellung dieser Gleichung erhält man die

(37) **Ladung einer Kugeloberfläche:** $\boxed{Q = 4\pi\sigma r^2}$

[1]) Da sich in Wirklichkeit nur negative Ladungen (Elektronen) bewegen können, müßte man eigentlich sagen, dem Körper fließt zum Ausgleich der freien positiven Ladung eine entsprechende Menge von Elektronen zu. Diese ist nach Entfernen des positiv geladenen Stabes dann im Überschuß auf dem Körper vorhanden.

3.3.2. Die elektrische Feldstärke

Denken wir zunächst an einen Zweiplattenkondensator, so ist die auf seiner Oberfläche sitzende Ladung die Ursache des zwischen den Platten befindlichen Feldes. Offenbar ist die Stärke dieses Feldes im Plattenzwischenraum überall konstant, es handelt sich hier um ein **homogenes Feld.**

Ein homogenes Feld ist stets daran zu erkennen, daß alle Feldlinien in gleichen Abständen parallel laufen.
In der Umgebung einer geladenen Kugel streben die Feldlinien jedoch immer weiter auseinander, die Kraftwirkung wird mit zunehmender Entfernung immer geringer (Bild 62, S. 46). In einem solchen **inhomogenen Feld** hat die Feldstärke in jeder Entfernung vom Kugelmittelpunkt einen anderen Wert. Als Maß für die Feldstärke gilt allgemein:

Bild 58. Elektrischer Überschlag bei Wind

Maßeinheit der elektrischen Feldstärke E: $\boxed{1\ \mathrm{V/m}}$

Einheit der elektrischen Feldstärke $\mathfrak{E}$: Die Feldstärke beträgt 1 V/m, wenn zwischen zwei 1 m entfernten Punkten der betreffenden Feldlinie eine Spannung von 1 V besteht.

Die Feldstärke ist wie die Kraft in der Mechanik ein Vektor, der in die jeweilige Richtung der durch den betrachteten Feldpunkt laufenden Feldlinie weist. Wenn es, wie es im folgenden meist der Fall ist, nur auf den Betrag von $\mathfrak{E}$ ankommt, schreibt man ein lateinisches E.

Bild 59. Elektrischer Durchschlagskanal durch ein dickwandiges Porzellanrohr (Teil einer Durchführung)

Nach dieser Festsetzung läßt sich der Betrag von $\mathfrak{E}$ im Zwischenraum eines Plattenkondensators leicht angeben:

(38) **Feldstärke im Plattenkondensator:** $\boxed{E = \frac{U}{d}}$ (d Plattenabstand)

Technisch besonders wichtig ist jener Betrag der Feldstärke, bei dessen Überschreitung der zwischen den Feldgrenzen befindliche Luftzwischenraum unter Funkenbildung durchschlagen wird. Diese **Durchschlagsfestigkeit** trockener Luft beträgt etwa $2 \cdot 10^6$ V/m = 20000 V/cm (Bilder 58, 59).

3.3.3. Die Verschiebungsdichte

Zur Beschreibung eines elektrischen Feldes bieten sich demnach zwei Wege. Einerseits kann man jedem Feldpunkt eine bestimmte Feldstärke (V/m) zuordnen, ohne dabei an die Entstehungsursache des Feldes selbst zu denken. Dieses aber wird verursacht von einer ganz bestimmten Ladungsmenge, die auf der Plattenoberfläche gleichsam an den Enden der Feldlinien haftet und vom Feld gebunden wird. Je größer die Feldstärke ist, desto größer muß auch die von ihr „verschobene" Ladungsmenge je Flächeneinheit sein. Man kann also das Feld mit der gleichen Berechtigung durch die zu seiner Hervorrufung erforderliche Flächendichte beschreiben, wenn man die Flächendichte noch mit der Richtung der Feldlinien verknüpft.
In diesem Fall erhält die das Feld beschreibende Größe den Namen **Verschiebungsdichte** $\mathfrak{D}$, deren Betrag in As/m² gemessen wird. Die Maßeinheiten und Zahlenwerte von $\mathfrak{D}$ und $\mathfrak{E}$ sind natürlich völlig verschieden voneinander. (Vergleich: Den Wert des Geldes kann man sowohl nach der zu seinem Erwerb notwendigen Arbeitsleistung als auch nach der Warenmenge bemessen, die man dafür kaufen kann.) Beiden Vektoren $\mathfrak{D}$ und $\mathfrak{E}$ gibt man die Richtung der elektrischen Feldlinien. Ihre Beträge lassen sich ineinander umrechnen nach der Beziehung

(39) **Betrag der Verschiebungsdichte:** $\boxed{D = \varepsilon_0 E}$

Einheit der Verschiebungsdichte D: $\boxed{1\ \mathrm{As/m^2}}$

Der hier vorkommende Proportionalitätsfaktor muß notwendigerweise die Maßeinheit As/Vm haben und wird

(40) **Verschiebungskonstante:** $\boxed{\varepsilon_0 = 8{,}854 \,.\, 10^{-12}\ \mathrm{As/Vm}}$

(oder Influenzkonstante)

genannt.

Die Verschiebungskonstante ε_0 gibt an, welche Ladungsmenge je m² von der Feldstärke 1 V/m gebunden wird.

$\mathfrak{D}$ und $\mathfrak{E}$ beschreiben, um es nochmals zu wiederholen, dasselbe Feld. Der Übergang von der einen zur anderen Bezeichnungsweise bedeutet nur eine Veränderung des Standpunktes insofern, als man $\mathfrak{E}$ gleichsam als „Ursache" und $\mathfrak{D}$ als „Wirkung" des Feldes bezeichnen kann. (Mit gleichem Recht könnte man auch $\mathfrak{D}$ als Ursache und $\mathfrak{E}$ als Wirkung betrachten.)

Die auf den gesamten Feldquerschnitt F entfallende Verschiebung bezeichnet man als

(41) **Verschiebungsfluß:** $\boxed{Q = \sigma F}$ [1])

Einheit des Verschiebungsflusses Q: $\boxed{1\ \mathrm{As}}$

Er gibt also an, welche Elektrizitätsmenge von einem bestimmten Feldquerschnitt auf den Kondensatorplatten gebunden wird.
Der Betrag der Verschiebungsdichte ist die Flächendichte, d. h. $D = \sigma$, womit wegen $D = \varepsilon_0 E$ der Betrag der

[1]) Die Bezeichnung ist insofern unglücklich, als hier nichts „fließt".

(42) **Feldstärke an der Oberfläche eines Leiters:** $\boxed{E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}}$

Wegen (36) $\sigma = \frac{Q}{4\pi r^2}$ ist dann die

(43) **Feldstärke an der Oberfläche einer Kugel:** $\boxed{E = \frac{Q}{4\pi r^2 \varepsilon_0}}$

Beispiele: 1. Wie groß ist die Feldstärke in einem homogenen Feld, wenn zwischen zwei auf einer Feldlinie liegenden 5 cm entfernten Punkten eine Spannung von 0,3 V gemessen wurde? $E = \frac{0{,}3\ \text{V}}{0{,}05\ \text{m}} = \underline{6\ \text{V/m}}$.

2. Auf welche Spannung dürfen zwei Platten höchstens geladen werden, wenn der 4 cm breite Luftzwischenraum eben nicht durchschlagen werden soll? — Da die Durchschlagsfestigkeit der Luft etwa 20000 V/cm beträgt, ist $U = Ed = 2 \cdot 10^6\ \text{V/m}\ 0{,}04\ \text{m} = \underline{80000\ \text{V}}$.

3.4. Kraftwirkungen und Arbeit im elektrischen Feld

3.4.1. Die Kraft auf eine punktförmige Ladung im Feld

Ein in das Feld gebrachter Probekörper wird eine um so stärkere Kraft erfahren, je größer die Feldstärke ist. So kann man auch die auf eine bestimmte, im Feld befindliche Ladungsmenge ausgeübte Kraft als Maßstab der Stärke des elektrischen Feldes ansehen:

Feldstärke = Kraft je Ladungseinheit

(44) $$\boxed{E = \frac{P}{Q}}$$

Hiernach kann man angeben, mit welcher Kraft eine bestimmte Ladung Q im Feld bewegt wird, nämlich:

Kraft = Ladungsmenge · Feldstärke

(45) **Kraft auf eine punktförmige Ladung im homogenen Feld:** $\boxed{P = QE}$

Hierbei ergibt das Produkt QE zunächst $\frac{\text{As} \cdot \text{V}}{\text{m}} = \frac{\text{Ws}}{\text{m}}$. Da aber nach (32) 1 Ws = 1 Nm (Newtonmeter) ist, erhält man die Kraft P nach Gleichung (45) in Newton. Will man sie in kp ausdrücken, so ist P noch durch den Umrechnungsfaktor 9,81 N/kp zu dividieren.

3.4.2. Die Kraft zwischen zwei geladenen Platten

Auch hier gilt grundsätzlich der allgemeine Ausdruck $P = QE$, der sich wie bisher auf den Fall bezieht, daß die Ladung Q sich inmitten eines irgendwie erzeugten Feldes befindet. Das Feld in einem Plattenkondensator wird aber erst von den beiden Ladungen $+Q$ und $-Q$ erzeugt. Dann befindet sich $+Q$ in dem von $-Q$ erzeugten Feld E_1 und $-Q$ in dem von $+Q$ erzeugten Feld E_2. Beide Felder zusammen ergeben das tatsächlich vorhandene Feld E, so daß $E = E_1 + E_2$. Wegen $E_1 = E_2$ ist dann $E_1 = E/2$. Auf die Ladung $+Q$ wirkt demnach die Feldstärke $E/2$,

so daß $P = \frac{QE}{2}$ die Kraft ist, mit der die eine Platte angezogen wird, wenn man die andere festhält. Weiterhin ist nach (41) $Q = \sigma F$ und nach (42) $\sigma = \varepsilon_0 E$, so daß $Q = \varepsilon_0 EF$ und $P = \frac{\varepsilon_0 E^2 F}{2}$. Wegen $E = \frac{U}{d}$ wird dann die

(46) **Anziehungskraft zweier geladener Platten:** $$\boxed{P = \frac{\varepsilon_0 U^2 F}{2 d^2}}$$

Mit den Maßeinheiten für ε_0 (As/Vm), U (V), F (m²) und d (m) erhält man die Kraft P mit $\left(\frac{\mathrm{As} \cdot \mathrm{V}^2 \cdot \mathrm{m}^2}{\mathrm{V} \cdot \mathrm{m} \cdot \mathrm{m}^2} = \frac{\mathrm{Ws}}{\mathrm{m}} = \frac{\mathrm{Nm}}{\mathrm{m}}\right)$ wiederum in Newton.

Beispiele: 1. Auf einem schweren Lithographenstein (Bild 60) liegt eine genau eben geschliffene Platte. Beim Anschluß an eine Gleichspannung von etwa 200 V haftet der Stein so fest, daß man ihn an der Platte hochheben kann. Der Zwischenraum d ist hier mikroskopisch klein, so daß die Kraftwirkung beträchtlich ist.

2. Zur Messung hoher Gleich- und Wechselspannungen verwendet man u. a. das in Bild 61 angegebene **elektrostatische Meßwerk,** das auf der Anziehung paralleler geladener Platten beruht.

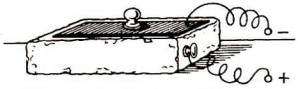


Bild 60. Anhaften eines schweren Steines durch elektrostatische Anziehung

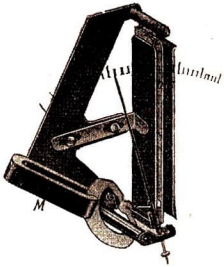


Bild 61. Elektrostatisches Meßwerk für hohe Gleich- und Wechselspannungen. Anschluß der Spannung einerseits an a, b und andererseits an c. M Dämpfungsmagnet

3.4.3. Die Kraft zwischen zwei Punktladungen

Die ersten Messungen der elektrischen Anziehungskraft wurden 1785 von **Coulomb** mittels der von ihm erfundenen Drehwaage[1]) ausgeführt. Er fand dabei das

Coulombsche Gesetz der elektrischen Anziehung oder Abstoßung: **Die anziehende oder abstoßende Kraft zweier elektrisch geladener Kugeln ist proportional dem Produkt der beiden Ladungen und nimmt mit dem Quadrat der Entfernung ab.**

(47) $$\boxed{P = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}}$$

Mit den Maßeinheiten für ε_0 (As/Vm), Q (As) und r (m) erhält man die Kraft P mit $\left(\frac{\mathrm{Vm\,A^2\,s^2}}{\mathrm{As} \cdot \mathrm{m}^2} = \frac{\mathrm{Ws}}{\mathrm{m}} = \frac{\mathrm{Nm}}{\mathrm{m}}\right)$ in Newton.

Herleitung: Die für die Oberfläche einer geladenen Kugel angegebene Feldstärke (43) gilt auch für einen beliebigen Abstand r vom Kugelmittelpunkt. Dann besteht am Ort einer zweiten Ladung Q_2 die Feldstärke $E = \frac{Q_1}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$. Die Kraft beträgt nach (45) $P = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$.

[1]) Diese ist im Prinzip die in I, 5.10 abgebildete Drehwaage. Statt der dort angebrachten Massen verwendete Coulomb leichte, elektrisch geladene Kugeln.

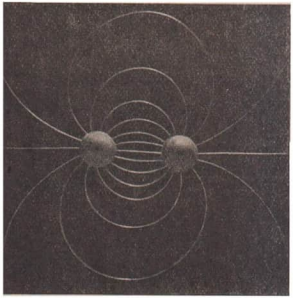
Das Gesetz gilt genau nur für punktförmige Ladungen oder weit entfernte geladene Kugeln, wobei r der Mittelpunktsabstand der Kugeln ist.

Die Coulombsche Anziehungskraft wirkt so, als sei die gesamte Ladung im Kugelmittelpunkt vereinigt (Bild 62).

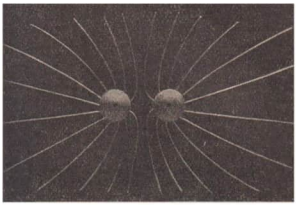
Beispiel: Zwei kleine Kugeln in 1 cm Abstand ihrer Mittelpunkte tragen eine Ladung von je 1 As. Dann ergibt sich aus (47)

$$P = \frac{1\ (\mathrm{As})^2\ \mathrm{V\ m}}{4\pi\ 8{,}854 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{As}\ (0{,}01)^2\ \mathrm{m}^2} = 8{,}988 \cdot 10^{13}\ \mathrm{N} = 9{,}16 \cdot 10^{12}\ \mathrm{kp}.$$

Derart ungeheure Kräfte sind aber in Wirklichkeit niemals zu beobachten. Es liegt daran, daß die bei elektrostatischen Versuchen auftretenden Ladungsmengen im Vergleich zu 1 As winzig klein sind.



a



b

Bild 62. Elektrisches Feld zwischen zwei geladenen Kugeln
a) ungleichartig geladen,
b) gleichartig geladen

3.5. Die Kapazität

Ein Plattenkondensator wird geladen und mit einem Elektrometer verbunden (Bild 63). Zieht man dann die Platten weiter auseinander, so zeigt das Elektrometer eine stärker werdende Spannung an. Bei Verringerung des Plattenabstandes sinkt die Spannung, obwohl die Ladungsmenge unverändert bleibt, was man beim Wiederentfernen der Platten feststellen kann.

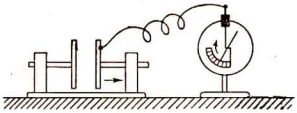


Bild 63. Bei Vergrößerung des Plattenabstandes steigt die Spannung

Bei engem Abstand ist zur Erzeugung einer bestimmten Spannung eine größere Elektrizitätsmenge erforderlich als bei großem Abstand. Man sagt dafür, die **Kapazität** C des Kondensators ist bei kleinem Abstand der Platten größer. Im selben Maß, wie die Kapazität C größer wird, nimmt bei gleicher Ladung Q die Spannung U ab, weshalb

(48) $$\boxed{Q = UC} \qquad \boxed{C = \frac{Q}{U}}$$

Maßeinheit der Kapazität C: $\boxed{\textbf{1 Farad}\ \left(1\,\mathrm{F} = 1\,\frac{\mathrm{As}}{\mathrm{V}}\right)}$

Aus der Maßeinheit As/V kann man die Einheit der Kapazität auch folgendermaßen definieren:

Ein Kondensator hat die Kapazität von 1 F, wenn er bei Anlegen der Spannung von 1 V die Ladung von 1 As aufnimmt.

Bei kleinen Plattenabständen ist bei diesen Versuchen die Spannung U dem Abstand d proportional. Wegen (38) $E = \frac{U}{d}$ bzw. $U = Ed$ folgt daraus, daß die Feldstärke E dabei konstant bleibt. Bei größer werdenden Abständen steigt jedoch die Spannung U nicht weiter an: ein Zeichen dafür, daß die Feldstärke (infolge Auseinandertretens der Feldlinien) abnimmt.

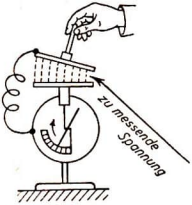


Bild 64. Messung einer geringen Spannung mit dem Elektrometer

Man wendet dies als Kunstgriff an, wenn man mit einem Elektrometer kleine Spannungen messen will. Auf das Elektrometer wird eine ebene, mit Schellack überzogene Metallplatte gesetzt und mit der zu messenden Spannung aufgeladen. Eine zweite daraufgelegte Platte ist mit dem Gehäuse verbunden (Bild 64). Beim Abheben dieser Platte werden die Feldlinien beträchtlich verlängert, wodurch man die Spannung auf den etwa hundertfachen Wert bringen kann.

(49) **Beim Auseinanderziehen von Feldlinien steigt die Spannung.**

3.6. Elektrisches Feld und Stoff

3.6.1. Die Dielektrizitätskonstante

Man stelle zwischen ein elektrisches Pendel und einen geriebenen Glasstab eine isolierende Scheibe (Bild 65). Das Pendel wird genauso angezogen, als sei die Platte nicht vorhanden. Die Feldlinien greifen offenbar ungehindert durch die Platte. Die isolierende Platte nennt man daher ein **Dielektrikum.** Der Versuch mißlingt, wenn man eine geerdete Metallplatte dazwischenstellt. In diesem Fall enden die Feldlinien auf der Leiteroberfläche, so daß der Raum hinter der metallischen **Abschirmung** feldfrei wird.

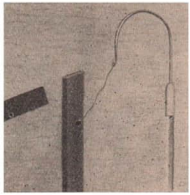


Bild 65. Die elektrostatische Anziehung zwischen geriebenem Hartgummistab und isolierter Kugel greift durch eine isolierende Platte

Welche Rolle das Dielektrikum dabei spielt, wird ersichtlich, wenn man ein Elektrometer mit einem Plattenkondensator verbindet und auflädt. Schiebt man jetzt eine isolierende Scheibe in den Plattenzwischenraum, so nimmt die Spannung sofort ab. Beim Entfernen der Scheibe nimmt die Spannung wieder ihren alten Wert an. Das Dielektrikum hat demnach dieselbe Wirkung wie eine Verkleinerung des Plattenabstandes.

Beim Einbringen eines Dielektrikums erhöht sich die Kapazität eines Kondensators.

Verwendet man verschiedene Materialien, so findet man, daß die Kapazitätserhöhung ganz von dem betreffenden Stoff abhängt. Man bezeichnet als

$$\textbf{(relative) Dielektrizitätskonstante } \varepsilon = \frac{\textbf{Kapazität mit Füllstoff}}{\textbf{Kapazität im Vakuum}} \text{ [1]}$$

(50) $$\boxed{\varepsilon = \frac{C}{C_{\text{vak}}}}$$

Die relative Dielektrizitätskonstante der Luft ist nahezu gleich 1 ($\varepsilon = 1{,}000594$), weshalb viele elektrostatische Vorgänge sich in der Luft praktisch wie im Vakuum abspielen.

3.6.2. Kondensatoren

Für den schon mehrfach erwähnten Zweiplattenkondensator gilt:

(51) **Kapazität eines Zweiplattenkondensators:** $$\boxed{C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon F}{d}}$$

Begründung: In die allgemeine Formel $C = \frac{Q}{U}$ setzt man $Q = \sigma F$ und $U = E d$ ein sowie nach (42) für den Betrag der Feldstärke $E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$. Damit wird für das Vakuum $C = \frac{\sigma F \varepsilon_0}{\sigma d} = \frac{\varepsilon_0 F}{d}$. Bei Abwesenheit des Dielektrikums ergibt sich der ε-fache Wert.

Diese Formel gilt wegen der Randstreuung nur, wenn der Plattenabstand gegenüber der Plattenoberfläche sehr klein ist. Für genaue Messungen empfiehlt sich die Verwendung eines **Schutzringkondensators**, welcher die an den Rändern hervorquellenden Feldlinien abschirmt (Bild 66).

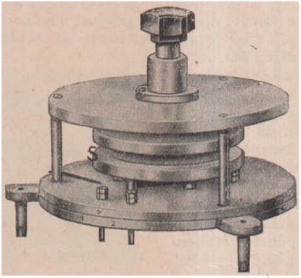


Bild 66. Plattenkondensator mit Schutzring (S

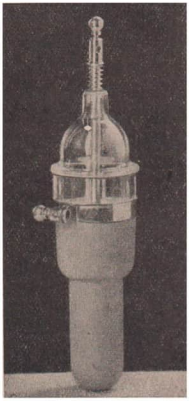


Bild 67 Moderne Leidener Flasche (Minos-Flaschenverdichter)

[1]) Auch häufig als „relative Dielektrizitätskonstante ε_r" bezeichnet. Die „absolute Dielektrizitätskonstante" ist dann $\varepsilon_{\text{abs}} = \varepsilon_r \varepsilon_0$.

Die Kapazität einer frei stehenden Kugel, deren Radius r klein gegenüber der Entfernung ist, in der sich die Ladung des anderen Vorzeichens befindet, beträgt:

(52) **Kapazität einer freistehenden Kugel:** $\boxed{C = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r}$

Außer dem bereits genannten und für Meßzwecke wichtigen Zweiplattenkondensator, dessen Kapazität aber nur gering ist, verwendet man noch folgende Formen: Die **Leidener Flasche** ist ein innen und außen mit Stanniol beklebtes Glasgefäß (veraltet). Der **Minos-Flaschenverdichter** ist eine hochwertige moderne Form der Leidener Flasche (Durchschlagsfestigkeit 2500 kV/cm, Kapazität bis 4000 pF) (Bild 67).

Bild 68
Geöffneter Wickelkondensator

Blockkondensatoren sind aus Metallfolien und Glimmer- oder Glasplatten geschichtet. **Wickelkondensatoren** werden aus einem langen Streifen zusammengerollt, der aus 2 paraffinierten Papierschichten und 2 Metallfolien besteht (Bild 68). Die in Rundfunkempfängern viel verwendeten **Röhrchenkondensatoren** (Bild 69) bestehen aus zwei ineinandergeschobenen Metallhülsen mit einer Zwischenschicht von besonders großer D.-K.

Die **Elektrolytkondensatoren** enthalten 2 Aluminiumfolien in einer wäßrigen Lösung von Borax und Borsäure,

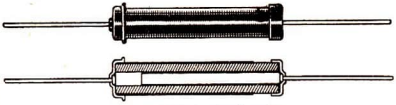


Bild 69. Röhrchenkondensator

von denen die positive sich beim Anlegen einer Spannung mit einer etwa 100 nm dünnen Schicht von $Al(OH)_3$ überzieht, die das Dielektrikum darstellt. Die Kapazität ist infolge der geringen Stärke des Dielektrikums sehr groß.

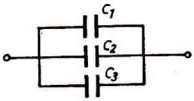


Bild 70. Parallelgeschaltete Kondensatoren

Schaltung von Kondensatoren

1. Parallelschaltung (Bild 70). Hinsichtlich der Ladungsmengen gilt $Q = Q_1 + Q_2 + \cdots$ Alle Kondensatoren liegen an derselben Spannung U, womit

$$CU = C_1U + C_2U + \cdots$$

und die

(53) **Gesamtkapazität bei Parallelschaltung:** $\boxed{C = C_1 + C_2 + \cdots}$

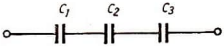


Bild 71.
In Reihe geschaltete Kondensatoren

2. Reihenschaltung (Bild 71). Jeder Kondensator trägt dieselbe Ladungsmenge Q, da jede Platte auf der ihr gegenüberliegenden (ohne Rücksicht auf ihre Größe) die

gleiche Elektrizitätsmenge bindet. Da sich die Spannungen bei der Reihenschaltung addieren, gilt: $U = \frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \cdots$ und demzufolge

(54) **Gesamtkapazität bei Reihenschaltung:** $\boxed{\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \cdots}$

Insbesondere gilt dann für 2 Kondensatoren:

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}.$$

Beispiele: 1. Welche Elektrizitätsmenge sitzt auf einer Kugel von 4 cm Durchmesser, deren Spannung gegen Erde 50 V beträgt? — Mit $Q = CU$ und (52) folgt

$$Q = \frac{4\pi\, 8{,}854 \cdot 10^{-12}\ \text{As}\ 0{,}02\ \text{m}\ 50\ \text{V}}{\text{Vm}} = \underline{11{,}1 \cdot 10^{-11}\ \text{As}}.$$

2. Welche Kapazität hat die Erdkugel ($r = 6378$ km)? — Nach (52) ist

$$C = \frac{4\pi\, 8{,}854 \cdot 10^{-12}\ \text{As}\ 6{,}378 \cdot 10^{6}\ \text{m}}{\text{Vm}} = \underline{710\ \mu\text{F}}.$$

3. Welche Kapazität hat ein Plattenkondensator von 250 cm² Oberfläche bei Verwendung von Hartgummi als Dielektrikum ($\varepsilon = 2{,}8$), wenn die Randstreuung vernachlässigt wird, a) bei 1 mm und b) 3 cm Plattenabstand?

a) $C = \frac{8{,}854 \cdot 10^{-12}\ \text{As}\ 0{,}025\ \text{m}^2\ 2{,}8}{\text{Vm}\ 0{,}001\ \text{m}} = \underline{6{,}2\ \text{nF}}$,

b) $C = \underline{207\ \text{pF}}$.

3.6.3. Die Energie des elektrischen Feldes

Wenn einem anfänglich noch ungeladenen Kondensator elektrische Ladung zugeführt wird, steigt seine Spannung allmählich an, und zwar wegen (48) $U = \frac{Q}{C}$ proportional der zugeführten Elektrizitätsmenge. Es kommt also das in Bild 72 gezeichnete Diagramm zustande. Sobald aber eine Ladung gegen ein Feld bewegt wird, ist eine Arbeit A aufzuwenden, die bei konstanter Spannung nach (31) gleich dem Produkt UQ ist. In diesem Fall aber ist sie gleich dem Dreieck unter der Kurve, d. h.

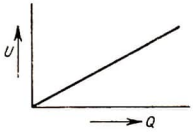


Bild 72. Ladung und Spannung eines Kondensators

$$A = \frac{U}{2} Q \text{ oder mit } Q = UC:$$

$$A = \frac{U^2 C}{2}.$$

Diese aufgewendete Arbeit A ist gleich der Energie W des geladenen Kondensators.

(55) **Energie eines geladenen Kondensators:** $\boxed{W = \frac{U^2 C}{2}}$

Setzt man für C die Kapazität eines Plattenkondensators ein, so erhält man die

(56) **Energie eines Plattenkondensators:** $\boxed{W = \frac{U^2 \varepsilon \varepsilon_0 F}{2d}}$

Mit der Feldstärke $E = \frac{U}{d}$ wird hieraus die

(57) **Energie des elektrischen Feldes vom Volumen $V = dF$:**

$$\boxed{W = \frac{1}{2} E^2 \varepsilon \varepsilon_0 dF},$$

woraus man unmittelbar sieht, daß die Energie dem Quadrat der Feldstärke und dem Volumen $V = dF$ des Plattenzwischenraumes proportional ist:

Träger der elektrischen Energie ist das elektrische Feld.

Beispiel: Zur Speisung eines Elektronenblitzgerätes mit Hilfe eines Kondensators werden 100 Ws bei einer Spannung von 800 V benötigt. Welche Kapazität muß der Kondensator mindestens haben? — Durch Auflösung von (55) erhält man $C = \frac{2 \cdot 100\ \text{VAs}}{800^2\ \text{V}^2} = \underline{312\,\mu\text{F}}$.

3.6.4. Krümmungsradius und Feldstärke

Für die Spannung einer geladenen, frei stehenden Kugel gilt nach (48) sowie (52) $U = \frac{Q}{C} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 \varepsilon r}$. Vergleicht man diesen Ausdruck mit Formel (43) für die Feldstärke an der Kugeloberfläche $E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 \varepsilon r^2}$, so findet man für die

(58) **Feldstärke an der Oberfläche einer geladenen Kugel:** $\boxed{E = \frac{U}{r}}$

Wenn man nun 2 verschieden große Kugeln durch einen Draht miteinander verbindet und dann auflädt (Bild 73), müssen beide die gleiche Spannung U gegen Erde haben. Andernfalls würde der sich sofort einstellende Ausgleichsstrom eine etwa vorhandene Spannungsdifferenz ausgleichen.
Es ist demnach

$$U = E_1 r_1 = E_2 r_2.$$

Für die Feldstärken kann man nach (42) die Flächendichten $E_1 = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_0}$ und $E_2 = \frac{\sigma_2}{\varepsilon_0}$ einsetzen, so daß die Gleichung $\frac{\sigma_1 r_1}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma_2 r_2}{\varepsilon_0}$ entsteht.
Hieraus folgt dann

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{r_2}{r_1}.$$

Die Flächendichte ist auf der kleinen Kugel demnach größer als auf der großen Kugel. Betrachtet man einen Körper von unregelmäßiger Gestalt, so sieht man, daß er an jeder Stelle einen anderen Krümmungsradius aufweist. Folglich ist die Ladungsverteilung und damit auch die Feldstärke an der Oberfläche entsprechend ungleich.

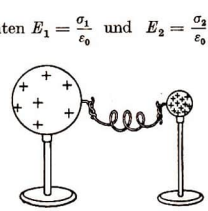


Bild 73. Verschiedene Flächendichte bei gleicher Spannung

Bild 74. Elektrischer Wind bläst eine Kerze aus

Die Flächendichte und damit die Feldstärke ist dem Krümmungsradius der betreffenden Stelle umgekehrt proportional.

Dies macht sich bei geladenen Körpern als sogenannte **Spitzenwirkung** bemerkbar. Infolge der hohen Feldstärke tritt eine starke Ionenbildung (S. 75) ein. Die vom Feld weggetriebenen Ionen reißen auch Luftmoleküle mit. Dieser **elektrische Wind** kann sogar eine Kerze ausblasen, die man zwischen Spitze und Platte einer Reibungselektrisiermaschine stellt (Bilder 74, 75).

Beispiele: 1. Alle Teile von Hochspannungsanlagen sind sorgfältig abgerundet, um Sprüherscheinungen zu vermeiden. Bei Hochspannungsleitungen von zu kleinem Durchmesser können dadurch größere Verluste eintreten (Bild 76).

Bild 75. Spitzenwirkung versetzt ein Rädchen in Umdrehung

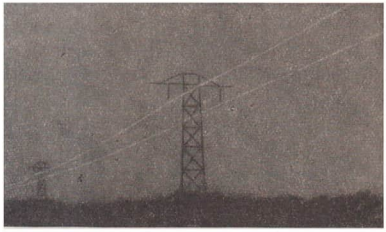


Bild 76. Sprühentladung an einer Hochspannungsleitung

2. Bei Gewittern gehen von spitzen Gegenständen manchmal leuchtende Büschel (St.-Elms-Feuer) aus.

3. Die Spitzenkämme der Elektrisiermaschinen „saugen" vermöge dieser Spitzenwirkung die Ladungen an sich.

4. Zur Wiedergewinnung wertvollen Staubes werden **elektrische Gasreiniger** (Elektrofilter) benutzt. In der Achse eines Rohres ist ein blanker Draht gespannt und gegenüber der Rohrwandung auf hohe Spannung geladen, so daß eine „stille" Entladung eintritt. Beim Hindurchströmen von Luft werden die Staubteilchen elektrisch geladen, wandern zur Rohrwand und sammeln sich hier an.

5. Eine Kugel von 3 cm Radius ist auf 5000 V geladen und hat an einer Stelle eine Spitze von 0,1 mm Krümmungsradius. Welche Feldstärke herrscht an der Spitze und an der übrigen Oberfläche?

Nach (58) ist an der Spitze $E = \frac{5000\ \text{V}}{0{,}01\ \text{cm}} = 500\,000\ \text{V/cm}$ und an der übrigen Oberfläche $E = \frac{5000\ \text{V}}{3\ \text{cm}} = 1667\ \text{V/cm}$.

3.6.5. Vorgänge im Dielektrikum

Wie der auf S. 47 geschilderte Versuch gezeigt hat, nimmt die Spannung an den Kondensatorplatten beim Einbringen eines Dielektrikums ab. Da mit abnehmender Spannung auch die Feldstärke sinkt, ergibt sich:

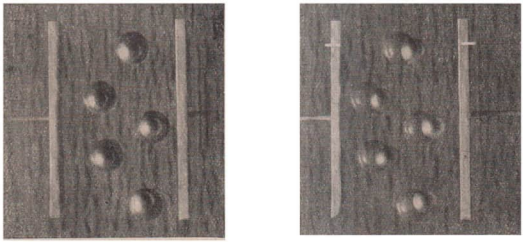
Im Dielektrikum beträgt die Feldstärke gegenüber der des Vakuums nur den ε-ten Teil.

Die Ladung auf den Platten hat sich bei dem Versuch nicht geändert. Die Verschiebungsdichte $\mathfrak{D}$ wird daher vom Dielektrikum nicht beeinflußt. Es muß daher gelten

$$\boxed{\mathfrak{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \mathfrak{E}} \tag{59}$$

Wenn man aber das Dielektrikum aus dem Kondensator herausnimmt, erweisen sich seine Oberflächen als elektrisch geladen. Die Kondensatorplatten haben auf ihnen Ladungen influenziert, die nach Entfernen der Platte aus dem Feld offenbar deswegen nicht wieder verschwinden, weil das Dielektrikum ein Isolator ist und sich hier Ladungen nicht von selbst verschieben.
Damit wird auch das Absinken der Feldstärke erklärlich. Die auf den Oberflächen des Dielektrikums influenzierten Ladungen kompensieren die Ladung der Kondensatorplatten teilweise, weshalb für die Bildung des Feldes nur noch der Rest zur Verfügung steht.
Die Ursache dieses Vorganges ist aber nicht auf den Oberflächen, sondern im Innern des Dielektrikums, d. h. im Verhalten seiner Moleküle und Atome, zu suchen.

1. Verschiebungspolarisation. Unter dem Einfluß des Feldes tritt innerhalb der Moleküle eine Verschiebung der Ladungen ein, die im neutralen Zustand symmetrisch zueinander verteilt sind. Die den Kondensatorplatten zugewandten Seiten werden positiv bzw. negativ elektrisch polarisiert, jedes einzelne Atom wird zu einem **Dipol** (Bild 77). Diese Erscheinung tritt in jedem Stoff auf, da der positive Kern und die negative Hülle eines Atoms nicht starr verbunden sind.



a b

Bild 77. Verschiebungspolarisation (modellmäßig). a) Positive und negative Ladung sind im Molekül symmetrisch verteilt. b) Im elektrischen Feld verschiebt sich die negative Ladung nach der positiven und die positive Ladung nach der negativen Seite

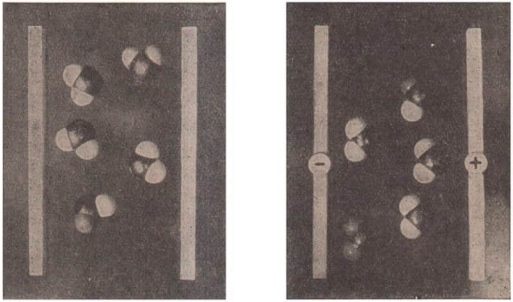


Bild 78. Orientierungspolarisation (modellmäßig)

2. Orientierungspolarisation. Bei einer Reihe von Stoffen (z. B. Wasser) sind positive und negative Ladung von vornherein unsymmetrisch verteilt. Die Moleküle selbst stellen schon Dipole dar, die sich aber wegen der ungeordneten Wärmebewegung nach außen nicht geltend machen. Im elektrischen Feld erhalten sie aber eine Vorzugsrichtung (Bild 78). Es ist dann unter Berücksichtigung der Wärmebewegung möglich, den Abstand der im Molekül vorhandenen Ladungen zu berechnen und hieraus wertvolle Schlüsse über die innere Struktur der Moleküle zu ziehen.

Wenn man einen geladenen Kondensator durch kurzzeitiges Verbinden der beiden Pole entlädt und ihn eine Weile stehenläßt, findet man ihn hernach erneut aufgeladen (elektrischer Rückstand). Dies beweist, daß die durch Influenz hervorgerufene Ladungsverschiebung im Isolator eine Zeitlang bestehenbleibt.

Der polarisierte Zustand eines flüssigen Dielektrikums läßt sich auf längere Zeit gleichsam „Einfrieren". Eine stabförmige Gußform wird mit einer flüssigen Mischung von Harz und Wachs gefüllt und mittels beiderseits eingeführter Elektroden einem starken Feld ausgesetzt. Nach dem Erstarren erweisen sich die beiden Enden als dauernd positiv bzw. negativ elektrisch. Ein solcher **Elektret** ist in einer Blechhülse jahrelang haltbar.

3.6.6. Der piezoelektrische Effekt

In ähnlicher Weise kommt auch der in II, 8 besprochene piezoelektrisch Effekt zustande. Es handelt sich dabei z. B. um eine aus einem Quarzkristall geschnittene Platte (Bild 79). Drückt man sie in Richtung x—x zusammen, so zeigen sich auf diesen Flächen elektrische Ladungen.

Zur Erklärung muß man an den Aufbau des Quarzkristalls (SiO_2) aus Silizium- und Sauerstoffatomen denken, die in streng geometrischer Ordnung das Kristallgitter aufbauen. Das kleinste Bauelement, eine sog. Strukturzelle, besteht aus 3 positiv 4wertigen Silizium- und 6 negativ 2wertigen Sauerstoffatomen. Sie ist in Bild 80 vereinfacht dargestellt, und zwar so, daß hier je 2 Sauerstoffatome zu einem einzigen

Atom zusammengefaßt erscheinen. Im unverzerrten Zustand ist die Zelle demnach elektrisch neutral.
Bei Druck auf die **polare** (x—x) Achse verschiebt sich die Zelle nach Bild 81 so, daß sich die negative Ladung des Sauerstoffs der Oberseite und die positive Ladung des Siliziums der Unterseite nähert **(longitudinaler Effekt).** Ein entsprechender **transversaler Effekt** entsteht, wenn der Druck quer zur x—x-Achse ausgeübt wird (Bild 82).
Wenn nun der Kristall in ein elektrisches Feld gebracht wird, so erfährt er in umgekehrter Weise eine Dehnung oder Verkürzung. Dies nennt man den **reziproken Piezoeffekt** oder auch Elektrostriktion.
Die piezoelektrischen Erscheinungen können nur an Kristallen auftreten, die wie der Quarz eine polare Achse besitzen, wie z. B. auch das Seignettesalz. Anwendungen wurden bereits in II, 8 beschrieben (Ultraschallgenerator, Kristallmikrofon).

3.7. Ladungstrennung in Doppelschichten

Ein empfindliches Elektrometer trägt einen mit Wasser gefüllten Metallbecher (Bild 83). Wenn man eine isoliert befestigte Paraffinkugel eintaucht, geschieht

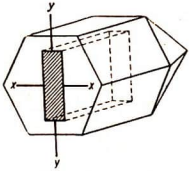


Bild 79. Quarzkristall

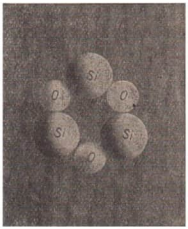


Bild 80. Strukturzelle des Quarzes

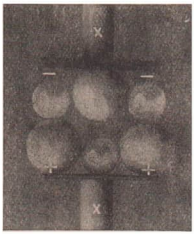


Bild 81. Longitudinaler piezoelektrischer Effekt

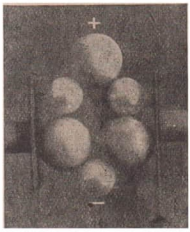


Bild 82. Transversaler piezoelektrischer Effekt

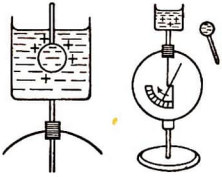


Bild 83. Nachweis der elektrischen Doppelschicht

zunächst noch nichts. Beim Herausziehen der Kugel schlägt das Elektrometer aus, das Wasser zeigt sich positiv geladen, während die Paraffinkugel negativ geworden ist.

Diese Erscheinung zeigt, daß sich zwischen Wasser und dem nicht benetzbaren Körper eine **elektrische Doppelschicht** ausbildet. Beim Herausnehmen des Paraffins bleibt die positive Hülle dieser Schicht im Wasser zurück. Derartige Doppelschichten bilden sich stets an der Berührungsfläche zweier verschiedener Stoffe. Hierfür gilt die

Coehnsche Regel: Bei Berührung lädt sich der Stoff mit der größeren Dielektrizitätskonstante positiv auf.

Man kann sich das damit erklären, daß sich im Stoff mit dem größeren ε auch die Ladungen stärker verschieben, wobei die Elektronen leichter an das angrenzende Medium abgegeben werden als umgekehrt.

Auf diese Weise kommt auch die **„Reibungselektrizität"** zustande (Abschn. 3.1.), die auf der innigen Berührung zweier Stoffe und ihrer anschließenden Trennung beruht. Bedenkt man noch, daß die Länge der Feldlinien anfänglich etwa 10^{-6} cm betragen mag, dann aber millionenfach vergrößert wird, so erklären sich nach Satz (49) leicht die dabei auftretenden hohen Spannungen.

Auch beim Zersplittern und Zerstäuben einheitlicher fester Stoffe und Flüssigkeiten treten häufig beträchtliche Ladungsmengen und hohe Spannungen auf (im Dunkeln sichtbare Funkenbildung beim Zerbrechen von Würfelzucker, Staubexplosionen). Werden von Wassertropfen kleine Teile abgerissen, so sind diese Stäubchen negativ geladen, womit es sich erklärt, daß die einen Wasserfall umgebende Luft stets negativ geladen ist.

Das Gewitter. Ein sogenanntes **Wärmegewitter** entsteht auf folgende Weise. Die am Boden erwärmte Luft steigt nach oben, wo sich in etwa 2 km Höhe durch Abkühlung und Kondensation Wassertröpfchen bilden, die sich bis zu 12 km Höhe zu den für ein Gewitter typischen **Haufen- (Kumulus-) Wolken** auftürmen. Diese haben stets einen „positiven Kopf" und eine „negative Basis". Welcher physikalische Effekt die Ladungstrennung bewirkt, ist noch ungeklärt.

Der beim Ausgleich dieser getrennt aufgehäuften Ladungen entstehende **Blitz** (Bilder 84, 85) ist kein einfacher Funke, sondern ein verzweigtes System einzelner, kurz aufeinanderfolgender Entladungsstöße; Blitzlänge bis zu mehreren km, Dicke des Hauptkanals bis 50 cm, Stromstärke bis etwa 200000 A, Energie bis etwa 1700 kWh, Blitzdauer $10 \cdot 10^{-3}$ s, Ladung je Blitz im Mittel 30 As.

3.8. Thermoelektrische Erscheinungen

Auch an der Grenzfläche zweier verschiedener fester Metalle tritt — ähnlich wie bei der Erscheinung der elektrischen Doppelschichten — eine sogenannte **Berührungsspannung** auf, deren Höhe wegen der meßtechnischen Schwierigkeiten allerdings noch nicht genau festgestellt werden konnte. Sie ist die Ursache der **thermoelektrischen** Erscheinungen.

Der Grundvorgang ist stets der folgende (Bild 86). Zwei verschiedene Metallstäbe oder -drähte (etwa Kupfer und Antimon) sind an beiden Enden miteinander fest verbunden (gelötet, geschweißt oder zusammengepreßt). Wird die eine **Lötstelle** erhitzt, so fließt ein Strom. Die entstehende Spannung ist jedoch recht klein. Die Stromstärke hängt vom Widerstand der Anordnung ab. Die Größe und Richtung der Thermo-EMK für 1 Grad Temperaturunterschied der beiden Lötstellen ersieht man aus der

Thermoelektrischen Spannungsreihe (bei 0 °C)

Sb	Fe	Zn	Cu	Pb	Al	Pt	Ni	Bi
+35	+16	+3	+2,8	0	−0,5	−3,1	−19	$-70 \cdot 10^{-6}$ V/grd.

An der kälteren Lötstelle ist jedes in dieser Reihe links stehende Metall gegenüber einem rechts davon stehenden thermoelektrisch positiv.

Bild 84. Aufnahme eines Blitzes

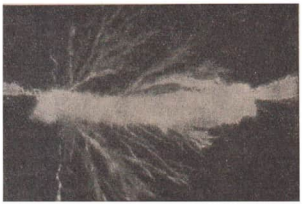


Bild 85. Funkenüberschlag zwischen 2 Spitzen unter Wasser

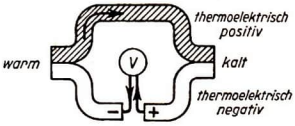


Bild 86. Technische Stromrichtung im Thermoelement

Thermoelemente werden vor allem zu Temperaturmessungen (II, 10.13) verwendet, besonders die Kombinationen Eisen-Konstantan oder Kupfer-Konstantan oder Platin-Platinrhodium (mit 10% Rh). Zu beachten ist, daß die EMK im allgemeinen nicht nur von der Temperaturdifferenz, sondern auch von der Temperatur selbst abhängt.

Thermo-EMK (mV) und Temperatur (°C)

Temperatur der Lötstellen in °C	0 bzw. 100	0 bzw. 200	0 bzw. 300	0 bzw. 400
Konstantan-Eisen	5,40	10,99	15,56	22,07
Platin-Platinrhodium	0,64	1,42	2,29	3,21

Wie man sieht, ist die EMK der Temperatur nicht genau proportional.
Zur Messung von Wechselströmen beliebiger Frequenz dienen **Thermoumformer** (Bild 87). Der Wechselstrom erwärmt einen dünnen Heizdraht, mit dem die Lötstelle des aus 2 feinen Drähten bestehenden Thermoelementes in mittelbarer oder unmittelbarer (Thermokreuz) Berührung steht. Die früher als Spannungsquellen hergestellten **Thermosäulen** arbeiten sehr unwirtschaftlich. Die „Gülchersche Thermosäule" enthielt 66 Elemente Nickel-Antimon und lieferte bei einem Leuchtgasverbrauch von 170 l/h eine Spannung von 4 V und 6 W.

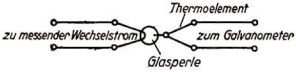


Bild 87. Thermoumformer zur Messung schwacher Wechselströme

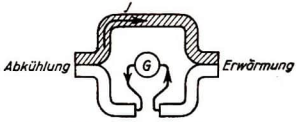


Bild 88. Peltier-Effekt bei gleicher Anordnung wie in Bild 86

Die Umkehrung dieser thermoelektrischen Erscheinungen ist der **Peltier-Effekt** (1834). Ein durch die Lötstelle gesandter Strom kühlt diese ab oder erwärmt sie. Der durch Erwärmung einer Lötstelle entstehende Strom ist so gerichtet, daß ein Strom von gleicher Richtung Abkühlung hervorruft (Bild 88). Unter Verwendung bestimmter Halbleiter ist der Wirkungsgrad von Thermoelementen bedeutend verbessert worden und auch der Peltier-Effekt technisch verwertbar.

Beispiele: 1. Die Lötstellen eines Thermoelementes Antimon-Wismut tauchen in siedendes Wasser bzw. schmelzendes Eis. Welche EMK entsteht? — Nach der Spannungsreihe ergibt sich

$$E = [35 - (-70)] \cdot 10^{-6}\ \mathrm{V/grd} \cdot 100\ \mathrm{grd} = \underline{0{,}0105\ \mathrm{V}}.$$

2. Welcher Strom fließt durch einen Thermokreis, der aus 2 Eisen- und Konstantanstäben von je 8 cm Länge und 2 cm² Querschnitt besteht? Die Temperaturdifferenz der Lötstellen betrage 50 grd. — Die EMK beträgt nach der gegebenen Tabelle 2,7 mV, der Widerstand

$$R = \frac{(0{,}1 + 0{,}0175) \cdot 0{,}08}{200}\,\Omega = 47 \cdot 10^{-6}\,\Omega; \quad I = \frac{2{,}7 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{V}}{47 \cdot 10^{-6}\ \Omega} = \underline{57\ \mathrm{A}}.$$

4. Die Stromleitung in Flüssigkeiten

4.1. Die elektrolytische Dissoziation

Reinstes Wasser ist zwar kein vollkommener Isolator, doch beträgt sein spezifischer Widerstand etwa $0{,}06 \cdot 10^6\ \Omega\ \mathrm{cm}$[1]). Um zu zeigen, daß reines Wasser praktisch ein

[1]) Dieser Wert gilt nur für unter äußerster Vorsicht destilliertes Wasser, dessen Leitfähigkeit ausschließlich auf geringem Gehalt an H^+- und OH^--Ionen beruht.

Nichtleiter ist, hänge man in ein Gefäß mit destilliertem Wasser 2 Metallplatten, die mit den Polen einer Spannungsquelle verbunden sind. Es fließt kein Strom. Streut man jetzt ein wenig Kochsalz ins Wasser, so fließt sogleich ein leicht meßbarer Strom (Bild 89). Das Wasser ist zu einem **Elektrolyt** (Stromleiter zweiter Klasse) geworden.
In diesem Zusammenhang bezeichnet man stets den

positiven Pol als Anode, den negativen Pol als Katode.

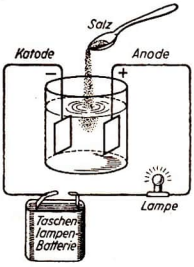


Bild 89. Stromleitung einer Kochsalzlösung. Beim Zugeben von Kochsalz leuchtet die Lampe auf

Um die Leitfähigkeit der Flüssigkeiten zu verstehen, muß man an den Bau der Moleküle denken. Die Moleküle aller Säuren, Basen und Salze haben vermöge des eigentümlichen Charakters ihrer chemischen Bindung die Eigenschaft,

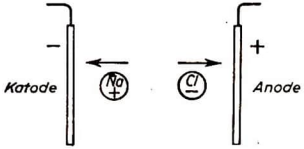


Bild 90. Kation und Anion

leicht in je einen positiven und negativen Teil zu zerfallen (zu **dissoziieren**). Man nennt diese elektrisch geladenen Teilchen

Ionen (Wanderer) = elektrisch geladene Teile von Molekülen.

Wie alle elektrisch geladenen Teilchen in einem Feld, wandern die positiven Ionen zum negativen und die negativen Ionen zum positiven Pol (Bild 90). Während also in den Zuleitungsdrähten der elektrische Strom aus Elektronen besteht, die sich nur nach einer Richtung bewegen, findet im Elektrolyt eine Bewegung von Ionen nach beiden Richtungen hin statt. Dabei nennt man

Kationen = positive Ionen (sie wandern zur Katode),

Anionen = negative Ionen (sie wandern zur Anode).

Man kann sich leicht merken:

Alle Metalle und der Wasserstoff bilden Kationen.

Alle Säurereste und die OH-Gruppe bilden Anionen.

Vorzeichen und Wertigkeit der Ionen gibt man symbolisch durch hinter das chemische Zeichen gesetzte Punkte (Kationen) und Striche (Anionen) an, z. B. $Cu^{\cdot\cdot}SO_4^{''}$.
Die Ionen sind bereits im kristallischen, also im festen Zustand dieser Stoffe, räumlich getrennt, im sogenannten Kristallgitter enthalten. Die gegenseitige Bindung ist elektrostatischer Art.

Beim Auflösen in Wasser wird diese gegenseitige Bindung weitgehend aufgehoben, was mit der großen Dielektrizitätskonstanten des Wassers ($\varepsilon = 81{,}57$) zusammenhängt. Denn für die Kraft, mit der sich zwei Ionen gegenseitig anziehen und dabei wieder ein neutrales Molekül bilden, gilt in einem Dielektrikum das Coulombsche Gesetz (47) $P = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\frac{Q_1Q_2}{r^2}$. Sie ist demnach im Wasser gegenüber anderen Flüssigkeiten relativ gering, so daß die Dissoziation in Wasser gelöster Stoffe sehr begünstigt wird.

4.2. Die Elektrolyse

Nunmehr läßt sich leicht verstehen, was geschehen wird, wenn man den positiven (Anode) und negativen Pol (Katode) einer Spannungsquelle in einen Elektrolyten senkt. Die positiven Kationen wandern in Richtung des elektrischen Feldes nach dem negativen Pol, nehmen dort die ihnen fehlenden Elektronen auf und werden dadurch zu neutralen Atomen. Ebenso wandern die negativen Anionen nach der Anode und geben dort ihre überschüssige Ladung ab. Bild 91 zeigt beispielsweise, wie sich aus einer Lösung von essigsaurem Blei metallisches Blei in Kristallform abgeschieden hat. Im Falle des Kochsalzes muß sich demnach Natriummetall an der Katode und Chlorgas an der Anode abscheiden. Allerdings reagiert das frei werdende Natrium sofort mit dem Wasser unter Bildung von Natronlauge (S. 63).

Bild 91. Bleibaum. Ausscheidung von Blei aus einer Lösung von essigsaurem Blei

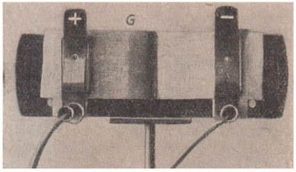


Bild 92. Sichtbare Wanderung von Ionen. G Grenze der nach der Anode vorrückenden Ionen

Versuch: Ein breiter Streifen Fließpapier wird mit einer stark verdünnten Lösung von Kaliumpermanganat ($K^{\cdot}MnO_4'$) getränkt und zwischen 2 Metallstreifen eingeklemmt (Bild 92). Quer in die Strombahn legt man ein schmales Streifchen auf, das mit starker (violetter) Lösung desselben Salzes getränkt ist. Nach Anlegen der Spannung von etwa 200 V zieht sich eine scharf abgrenzende Wolke, welche die violetten MnO_4'-Ionen enthält, langsam nach der Anode. Wenn man die Spannung umpolt, wandert die Wolke nach der entgegengesetzten Seite zurück. (Der Versuch zeigt zugleich die Langsamkeit der Ionenwanderung, die je nach Spannung einige mm je min beträgt.)

Meist finden jedoch an den Elektroden noch **sekundäre chemische Reaktionen** zwischen den frisch gebildeten Atomen und der Flüssigkeit (oder auch mit dem Elektrodenmaterial) statt, so daß entsprechende Zersetzungsprodukte erscheinen.

Jedes einzelne, von der Katode an den Elektrolyten abgegebene Elektron setzt demnach genau ein einwertiges Atom in Freiheit. Hieraus ergibt sich das

1. Faradaysche Gesetz: Die abgeschiedene Stoffmenge ist der Stromstärke I und der Zeit t proportional.

(60) **Abgeschiedene Menge:** $\boxed{m = cIt}$

Die hierin enthaltene Konstante c ist das

elektrochemische Äquivalent c: abgeschiedene Menge (z. B. in mg) je Ampere und Sekunde.

Elektrochemische Äquivalente (mg/As)

Silber$^{\cdot}$	1,11796	Aluminium$^{\cdots}$	0,0935
Kupfer$^{\cdot\cdot}$	0,3295	Nickel$^{\cdot\cdot}$	0,3039
Natrium$^{\cdot}$	0,2387	Knallgas	0,174 cm³ (bei 0 °C und 760 Torr)

Es ist ferner das

$$\textbf{Äquivalentgewicht} = \frac{\textbf{Atomgewicht}}{\textbf{Wertigkeit}} \text{ (Bild 93).}$$

Beispielsweise beträgt das Äquivalentgewicht des einwertigen Silbers $\frac{107{,}88}{1} = 107{,}88$ und des zweiwertigen Kupfers $\frac{63{,}57}{2} = 31{,}79$.

Dann folgt aus der Tatsache, daß jeweils 1 Elektron ein einwertiges bzw. jeweils 2 Elektronen ein zweiwertiges Ion neutralisieren, das

2. Faradaysche Gesetz:

Die von einer bestimmten Elektrizitätsmenge abgeschiedenen Mengen verschiedener Stoffe verhalten sich wie deren Äquivalentgewichte.

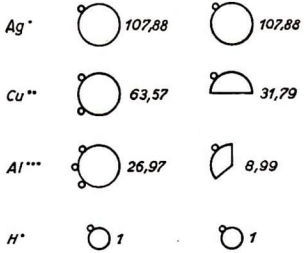


Bild 93. Zusammenhang zwischen Atom- und Äquivalentgewicht

Hiernach kann man, ausgehend vom einwertigen Silber, das elektrochemische Äquivalent für irgendein anderes Metall berechnen, wenn man dessen Atomgewicht und Wertigkeit kennt. Man erhält z. B. für Kupfer die Proportion $c : 1{,}118 = 31{,}79 : 107{,}88$ und daraus $c = 0{,}3295$ mg/As (s. obenstehende Tabelle). Um demnach ein Grammäquivalent abzuscheiden, benötigt man für alle Stoffe ein und dieselbe Elektrizitätsmenge. Sie berechnet sich z. B. aus den Werten des Silbers zu $\frac{107{,}88\text{ g}}{1{,}11796 \cdot 10^{-3}\text{ g/As}} = 96498$ As. Diese Elektrizitätsmenge nennt man die

Faradaysche Zahl F: die zur Abscheidung von 1 Grammäquivalent nötige Elektrizitätsmenge

(61) $\boxed{F = 96498\text{ As}}$

Nun ist die Anzahl der in einem Grammäquivalent eines einwertigen Elementes enthaltenen Atome gleich der Loschmidtschen Zahl $N_L = 6{,}023 \cdot 10^{23}$ Atome je Grammatom (II, 10.1). Da jedes Elektron ein einwertiges Atom in Freiheit setzt, erhält man somit die Ladung eines einzelnen Elektrons

$$e_0 = \frac{96498\ \mathrm{As}}{6{,}023 \cdot 10^{23}} = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{As},$$

wie auf S. 15 angegeben wurde.

4.2.1. Anwendungen der Elektrolyse

Zur Vorführung der elektrolytischen **Wasserzersetzung** benutzt man gern den Hofmannschen Apparat, entweder mit verdünnter H_2SO_4 und Platinelektroden oder mit schwacher Kalilauge und Nickelelektroden (Bild 94). Es bilden sich stets 1 Raumteil Sauerstoff und 2 Raumteile Wasserstoff. Obwohl es so aussieht, als ob das Wasser direkt in seine Bestandteile zerlegt wird, spielen sich in Wirklichkeit zwei Vorgänge ab:

a) primärer Vorgang: Zersetzung der Schwefelsäure $H_2^{\cdot\cdot}SO_4''$ und Abscheidung von H_2-Gas an der Katode,

b) sekundärer Vorgang: Der an der Anode frei werdende Säurerest reagiert mit dem Wasser: $SO_4 + H_2O \rightarrow H_2SO_4 + O$, wodurch sich freier Sauerstoff an der Anode ausscheidet.

Zur Herstellung reiner Metalle bedient sich die Technik der **elektrischen Raffination,** wobei man z. B. das hochwertige **Elektrolytkupfer** aus dem hüttenmäßig gewonnenen Schwarzkupfer und zugleich die hierin noch enthaltenen wertvolleren Bestandteile (Silber, Nickel, Wismut) gewinnt (Bild 95).

Versuch: In eine Lösung von $CuSO_4$ hängt man je einen Streifen Kupferblech und schließt eine Spannungsquelle an. Auf der Katode bildet sich ein stetig dicker werdender Kupferniederschlag, während die Anode allmählich aufgezehrt wird:

a) primärer Vorgang: $Cu^{\cdot\cdot} - SO_4''$ und Abscheidung von Cu an der Katode;

b) sekundärer Vorgang: $SO_4'' + Cu^{\cdot\cdot} \rightarrow CuSO_4$, d. h. Verbrauch von Cu an der Anode.

Die Lösung selbst ändert ihre Zusammensetzung dabei nicht.

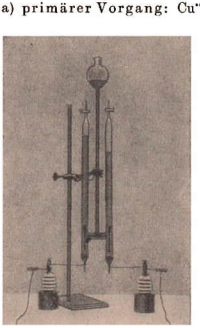


Bild 94. Hofmannscher Wasserzersetzungsapparat

Bild 95. Elektrolytische Raffination von Kupfer

Aluminium gewinnt man durch Elektrolyse eines Schmelzflusses (bei etwa 900 °C) aus reiner Tonerde (Al_2O_3), die meist aus dem Mineral Bauxit hergestellt wird. Als **Flußmittel** dient Kryolith ($AlF_3 \cdot 3NaF$). Das Aluminium sammelt sich am Boden des Ofens an, während der Sauerstoff die aus Kohle bestehende Anode verbrennt.
Die Technik der Herstellung edlerer Metallüberzüge über unedlen Metallen nennt man **Galvanostegie** (Verkupfern, Verchromen usw.). Soll der Überzug fest und porenfrei sein, sind bestimmte Rezepte und Betriebsbedingungen einzuhalten.

Rezept zur Vernickelung (Schnellbad): 1 l Wasser, 240 g $NiSO_4 \cdot 7H_2O$, 20 g $NiCl_2$, 240 g Na_2SO_4, 30 g H_3BO_3 (Borsäure). Badspannung 2···3 Volt, die Anode muß aus Nickel bestehen.

Die **Galvanoplastik** stellt Metallabdrücke nach gegebenen Modellen her. Beispielsweise werden die metallenen Preßformen für Schallplatten dadurch gewonnen, daß man die Originalwachsplatte mit elektrisch leitendem Graphitpulver bestäubt und hierauf einen stärkeren Kupferüberzug niederschlägt. Diesen kann man abheben und hat so ein Negativ mit allen Einzelheiten.

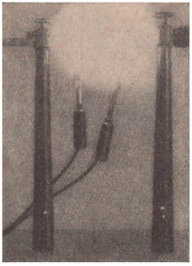


Bild 96. Durchschmelzen eines erwärmten Glasstabes bei 220 Volt

Die Elektrolyse einer **Kochsalzlösung** ergibt

a) primär: $Na^{\cdot}$—Cl' unter Abscheidung von Chlorgas an der Anode;

b) sekundär: Verbindung des frei werdenden Natriums mit Wasser

$$Na + H_2O \rightarrow NaOH + H,$$

d. h. Bildung von Natronlauge.

Das bekannte **Polreagenzpapier** enthält neben Kochsalz ein wenig Phenolphthalein, das sich bei Gegenwart von NaOH rot färbt. Drückt man die beiden Leiterenden auf das angefeuchtete Papier, so muß die sich rot färbende Stelle die Katode (der negative Pol) sein.
Auch in **festen Körpern**, z. B. in erhitztem Glas, kann eine elektrolytische Leitung stattfinden. Letzteres wird bei einigen hundert Grad leitend.

Versuch: Man befestige ein Stück Glasrohr zwischen 2 um etwa 1···2 cm voneinander entfernten Kupferdrähten und schalte es in Reihe mit einer Glühlampe an das örtliche Spannungsnetz. Mit einem Bunsenbrenner erhitze man das Glas, wonach die Glühlampe bald aufleuchtet und das Glas schließlich von selbst durchschmilzt (Bild 96).

Beispiele: 1. Wieviel Nickel scheidet ein Strom von 45 A in 4 Stunden ab? — Nach (60) ist $m = 0{,}3039 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{g/As} \cdot 45\,\mathrm{A} \cdot 4 \cdot 3600\,\mathrm{s} = \underline{197\,\mathrm{g}}$.

2. Wieviel Wasser wird von 1 Ah zersetzt? — Zur Bildung von 1-g-Äquivalent H_2 (d. h. 1,008 g) werden nach (61) 96498 As benötigt. Dabei entsteht gleichzeitig 1-g-Äquivalent Sauerstoff (d. h. $\frac{16}{2}$ g = 8 g), so daß 96498 As die Menge von 9,008 g Wasser zersetzen. 3600 As zerlegen demnach $\underline{0{,}336\,\mathrm{g}}$ Wasser.

3. Was wird geschehen, wenn bei dem oben beschriebenen Versuch die Katode aus Kupfer, die Anode jedoch aus Platin besteht? — Während sich wie vorhin an der Katode Kupfer abscheidet, bildet sich an der Anode primär der Säurerest SO_4, der sich sekundär mit dem Wasser zu H_2SO_4 und frei werdendem Sauerstoff umsetzt. Der Elektrolyt wird an Kupfer ärmer und zunehmend saurer werden.

4.3. Galvanische Elemente

In ein Becherglas mit verdünnter Schwefelsäure tauche man je einen Streifen Zink- und Kupferblech und verbinde diese mit einem Voltmeter (Bild 97). Man stellt fest, daß zwischen den beiden Metallen eine Spannung von etwa 1 V besteht, wobei das Kupfer den positiven und das Zink den negativen Pol bildet (sogenanntes **Volta-Element**).

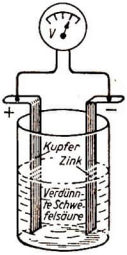


Bild 97. Volta-Element

Benutzt man für den Versuch irgend zwei andere, aber jeweils verschiedene Metalle oder auch andere stromleitende Flüssigkeiten, so zeigt sich auch hier stets eine elektrische Spannung.

Zwei verschiedene Metalle ergeben zusammen mit einer leitenden Flüssigkeit ein galvanisches Element.
Das edlere Metall ist stets der positive Pol.

Geschichtliches. Der italienische Gelehrte **Luigi Galvani** (1737···1789) (Bild 98) hing Froschschenkel mit Messinghaken an ein eisernes Gitter. Sobald die Schenkel das Eisen berührten, zuckten sie zusammen. Man glaubte damals, es mit einer besonderen tierischen Elektrizität zu tun zu haben. Heute wissen wir, daß er das erste **galvanische Element** (Messing-Elektrolyt-Eisen) vor sich hatte.

Alessandro Volta (1745···1827) (Bild 99) setzte die Arbeiten Galvanis fort, indem er den Froschschenkel durch eine gut leitende Flüssigkeit ersetzte. Er schichtete z. B. abwechselnd Scheiben aus Silber (oder Kupfer), getränkte Pappe und Zink aufeinander und erhielt mit dieser **Voltaschen Säule** kräftige elektrische Spannungen. Er fand auch die im nächsten Abschnitt erwähnte Spannungsreihe der Metalle.

4.3.1. Entstehung der elektromotorischen Kraft

Die bei dem Versuch gemessene Spannung kommt auf folgende Weise zustande. Das eintauchende Zink gibt an seiner Oberfläche positive Metallionen ab,

Bild 98. Luigi Galvani (1737···1789)

Bild 99. Alessandro Volta (1745···1827)

die um das nunmehr negativ gewordene Metall eine Hülle bilden. Zwischen Metall und Flüssigkeit besteht damit eine **elektrische Doppelschicht** und damit eine bestimmte Spannung des Metalls gegenüber der Flüssigkeit (Bild 100). Aber auch das Kupfer umgibt sich mit einer solchen Ionenhülle, wobei aber die Spannung kleiner als beim Zink ist. Infolge dieses Spannungsunterschiedes ergibt sich eine bestimmte EMK. Wie sich leicht experimentell zeigen läßt, ist die Größe dieser EMK von der Größe der eintauchenden Metallplatten unabhängig.

Die EMK eines galvanischen Elementes ist gleich der Differenz der Einzelspannungen der Elektroden gegenüber der Lösung. Die EMK hängt nur von der stofflichen Beschaffenheit, nicht aber von der Größe des Elementes ab.

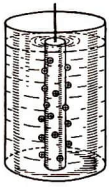


Bild 100. Ionenhülle um einen eingetauchten Metallstab

Es ist aber mit einfachen Mitteln nicht möglich, die Einzelspannung zwischen Metall und Elektrolyt direkt zu messen. Hierzu müßte man, um einen geschlossenen Stromkreis zu erhalten, eine zweite Elektrode in die Lösung tauchen, die aber ihrerseits eine Spannung gegenüber der Lösung besitzt. Man geht daher von einer **Normal-Wasserstoffelektrode** aus, die mit Platinschwarz überzogen ist, von reinem Wasserstoff umspült wird und in eine Säure taucht, die 1 g Wasserstoffionen je Liter enthält. Man setzt die Spannung dieser Elektrode willkürlich gleich Null[1]) und erhält so die

elektrochemische Spannungsreihe der Metalle

Metall	$Li^{\cdot}$	$K^{\cdot}$	$Na^{\cdot}$	$Zn^{\cdot\cdot}$	$Fe^{\cdot\cdot}$	$Ni^{\cdot\cdot}$	$H^{\cdot}$	$Cu^{\cdot\cdot}$	$Ag^{\cdot}$	$Hg^{\cdot}$	$Au^{\cdot}$
Spannung in Volt	−3,02	−2,92	−2,71	−0,76	−0,44	−0,25	0	0,34	0,81	0,86	1,5

In dieser Reihe ist das jeweils links stehende Metall gegenüber einem rechts davon stehenden negativ.

Die angegebenen Zahlenwerte gelten nur dann genau, wenn das betreffende Metall in eine Lösung taucht, die 1-g-Ion des Metalls je Liter enthält. Da z. B. Kupfersulfat ($CuSO_4$) je Mol 1-g-Ion (d. i. 64 g Kupfer) bildet und das Molekulargewicht dieses Salzes $64 + 32 + 4 \cdot 16 = 160$ beträgt, muß dann 1 Liter 160 g wasserfreies Salz enthalten.

Bei abweichender Konzentration der Lösung ändert sich auch die Spannung. Man erhält demnach auch ein galvanisches Element, wenn zwei Elektroden aus gleichem Material in zwei verschieden starke Lösungen tauchen: eine sogenannte **Konzentrationskette.**

Versuche, die bei der Verbrennung von Wasserstoff und anderen chemischen Stoffen frei werdende Energie mittels besonderer sogenannter **Brennstoffelemente** direkt in elektrische Energie umwandeln, beginnen technische Bedeutung zu erlangen.

4.3.2. Die elektrolytische Polarisation

Wir hatten gesehen (S. 62), wie man mit dem Hofmannschen Apparat Wasser zersetzen kann. Wenn man Platinelektroden benutzt, bleiben Wasserstoff und Sauerstoff in winzigen Bläschen daran haften und bilden ihrerseits ein neues Element. Diesen Vorgang nennt man

elektrolytische Polarisation = Veränderung der Elektroden unter Bildung eines neuen (sekundären) galvanischen Elementes.

[1]) Der Wert der absoluten Spannung der Wasserstoffelektrode konnte bisher noch nicht einwandfrei bestimmt werden.

Um dies nachzuweisen, schaltet man die Spannungsquelle ab und dafür ein Voltmeter in den Stromkreis. Es zeigt sich eine **Polarisationsspannung** von 1,23 V. Diese ist der ursprünglich angelegten Spannung entgegengerichtet, so daß mindestens eine **Zersetzungsspannung** von 1,23 V aufzuwenden ist, wenn man Wasser elektrolytisch zerlegen will. Will man den Versuch z. B. mit 1 V ausführen, so hört die Gasentwicklung nach wenigen Sekunden auf, weil die Polarisationsspannung größer als die angelegte Klemmenspannung ist.

Die galvanische Polarisation stört häufig genauere Messungen und muß dann durch besondere Kunstgriffe beseitigt werden.

Versuche: Je ein Stück Zink- und Kupferblech werden in ein Glas mit verdünnter Schwefelsäure getaucht. Die anfängliche Spannung dieses eingangs bereits erwähnten Volta-Elementes von 1 V läßt aber nach kurzer Zeit sehr nach. Nimmt man jetzt die Kupferplatte heraus und spült sie gut ab, so hat die Spannung wieder ihren ursprünglichen Wert, geht aber sogleich wieder zurück. Durch Einstreuen von Kaliumbichromat läßt sich das Absinken der Spannung gleichfalls verhindern.

Erklärung: Der vom Zink gemäß der Gleichung $Zn + H_2SO_4 \rightarrow ZnSO_4 + H_2$ entwickelte Wasserstoff wandert nach dem Kupferpol, weil im Innern des Elementes der Strom vom Zink zum Kupfer fließt und das Kupfer hier Katode ist. Infolge der Bedeckung der Kupferoberfläche mit Wasserstoffgas wird diese zunehmend unwirksamer. Außerdem steht H in der Spannungsreihe weiter links, so daß auch das sekundäre Element Zn-H schwächer ist. Das Kaliumbichromat aber ist ein kräftiges Oxydationsmittel, das den Wasserstoff bindet und so als **Depolarisator** wirkt.

4.3.3. Konstante galvanische Elemente

Eine Verbesserung des soeben besprochenen Volta-Elementes ist das **Daniell-Element** (Bild 101). Ein Kupfer- und Zinkstab befinden sich in je einer Lösung von Kupfer- bzw. Zinksulfat zwar in einem gemeinsamen Hauptgefäß, jedoch durch eine wasserdurchlässige Tonwand getrennt. Bei fließendem Strom werden dem Kupfer durch die Leitung Elektronen zugeführt, wodurch die anhaftenden (Doppelschicht!) Kupferionen entladen werden und sich als Metall niederschlagen. Da sofort neue Ionen aus der Lösung nachgeliefert werden, wird deren Konzentration immer geringer. Am Zink gehen dafür Metallionen in Lösung, während die ergänzenden SO_4-Ionen durch die Scheidewand herüberdiffundieren. Die Lösung des $ZnSO_4$ wird daher immer konzentrierter.

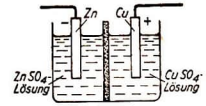


Bild 101. Daniell-Element

Da sich somit an den Elektroden dieselben Metalle abscheiden, aus denen sie selbst bestehen, tritt keine Polarisation ein, weshalb die EMK dieses Elementes konstant 1,1 V beträgt, wie man auch aus der Spannungsreihe entnehmen kann [0,34 V − (−0,76 V) = 1,1 V].

Damit die Konzentration der sich zunehmend verdünnenden $CuSO_4$-Lösung konstant bleibt, befindet sich ein Vorrat an Kristallen in der unten offenen Glocke (Bild 102) des **Meidinger-Elementes.** Die spezifisch leichtere $ZnSO_4$-Lösung schwimmt ohne Trennwand obenauf.

Ebenso konstant ist das für genaue Meßzwecke heute allgemein verwendete **Kadmium-** (Weston-) **Normalelement,** dessen EMK bei 20 °C gleich 1,01865 V ist.

Die Einzelheiten dieser Zelle gehen aus Bild 103 hervor. Es ist meist mit einem elektrischen Thermostaten, der für genau konstante Temperatur sorgt, in einem Kasten zusammengebaut.

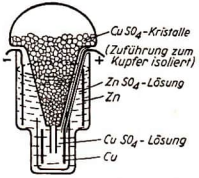


Bild 102. Meidinger-Element

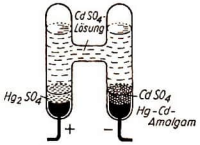


Bild 103. Weston-Normalelement

Am verbreitetsten ist das **Leclanché-Element** (Zink-Salmiaklösung-Kohle): Klingelelemente, Taschenlampen-, Anodenbatterien usw. Seine EMK beträgt 1,5 V (Bild 104).

Der Elektrolyt ist bei den **Trockenbatterien** mit Mehl eingedickt. Der Kohlestab ist meist von einem braunsteingefüllten Beutel umgeben, der zur Depolarisation dient.

Der Braunstein ist beim **Luftsauerstoffelement** (ebenfalls von Leclanché erfunden) entbehrlich, weil der in die Kohle diffundierende Sauerstoff die Depolarisation bewirkt.

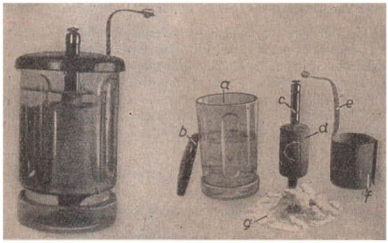


Bild 104. Klingelelement

a) Gefäß für Salmiaklösung
b) Deckel
c) Kohlestab
d) Braunsteinbeutel
e) Bleistreifen
f) Zinkmantel

Eine gute Taschenlampenbatterie liefert etwa 1,25 Ah, verwertet aber nur etwa 1/15 der chemischen Energie des Zinks. Aus dem Salmiak entwickelt sich Salzsäure, die mit dem Braunstein (MnO_2) zusammen $MnCl_4$ bildet, wonach die Reaktion $3\,NH_4Cl + MnCl_4 \rightarrow (NH_4)_3MnCl_6 + Cl$ stattfindet. Das frei werdende Chlor bindet den zur Kohle wandernden Wasserstoff. Weitere Reaktionsprodukte schwächen jedoch die Wirkung des Braunsteins, so daß die Spannung des Elementes allmählich abnimmt.

4.3.4. Akkumulatoren

Wie die Wasserzersetzung mit dem Hofmannschen Apparat zeigt, bildet sich infolge Polarisation ein neues, sekundäres Element.

Diese Erscheinung nützt man bei den **Akkumulatoren (Sammlern)** aus, um elektrische Energie auf chemischem Wege zu speichern.

Besondere Bedeutung hat der **Blei- (Planté-) Akkumulator.**

Versuch: Man stelle 2 gewöhnliche Stücke Bleiblech in etwa 20%ige Schwefelsäure und lege eine Spannung von etwa 3 V an. Nach einigen Minuten hat sich auf der Anode eine schokoladenbraune Schicht von Bleisuperoxyd (PbO_2) gebildet, während die Katode metallisch blank wird. Schaltet man jetzt die Spannungsquelle ab und dafür ein kleines Lämpchen in den Stromkreis, so leuchtet dieses kräftig auf. Ein Voltmeter zeigt eine Spannung von etwa 2 V an. Bei öfterer Wiederholung des Versuches wird das Speichervermögen der Bleizelle immer besser.

Erklärung: Beim Eintauchen des stets mit einer Oxydschicht bedeckten Bleies bildet sich an der Oberfläche $PbSO_4$ (Bleisulfat), das sich beim Stromdurchgang wie folgt zersetzt:

$$\textit{Laden:}\quad \underset{\substack{\text{Verbrauch}\\ \text{von}\\ \text{Wasser}}}{2\,PbSO_4 + 2\,H_2O} \longrightarrow \underset{\substack{\text{braun,}\\ \text{positive}\\ \text{Platte}}}{PbO_2} + \underset{\substack{\text{grau,}\\ \text{negative}\\ \text{Platte}}}{Pb} + \underset{\substack{\text{Bildung}\\ \text{von}\\ \text{Säure}}}{2\,H_2SO_4}$$

Derselbe Vorgang verläuft in umgekehrter Richtung beim

$$\textit{Entladen:}\quad PbO_2 + Pb + \underset{\substack{\text{Verbrauch}\\ \text{von}\\ \text{Säure}}}{2\,H_2SO_4} \longrightarrow \underset{\substack{\text{Bildung}\\ \text{von}\\ \text{Wasser}}}{2\,PbSO_4 + 2\,H_2O}$$

Hieraus geht hervor, daß beim Laden die Säuredichte zunehmen, dagegen während des Entladens die Säure schwächer werden muß.

Bei der Herstellung des meistverwendeten (Faure-)Typs wird in die gitterartigen Bleiplatten ein Brei aus Schwefelsäure und Bleipulver bzw. Bleioxyd eingepreßt. Das Laden ist beendet, wenn die Spannung von 2,6 V erreicht ist, was auch an der kräftigen Gasbildung (Vorsicht, Knallgas!) erkennbar wird. Während des Entladens soll die Spannung nicht unter 1,8 V sinken. Die Kapazität soll etwa 5···10 Ah je dm^2 Plattenoberfläche betragen; etwa 80% der Ladeenergie wird zurückgewonnen; 1 kg Zellengewicht vermag etwa 32 Wh zu speichern. Bei längerem, unbenutztem Stehen bildet sich hartes Bleisulfat, das den Sammler unbrauchbar macht.

Weniger empfindlich ist der alkalische **Eisen-Nickel-** (oder auch Kadmium-Nickel-) **Sammler.**

$$\textit{Laden:}\quad Fe(OH)_2 + 2\,Ni(OH)_2 \rightarrow Fe + 2\,Ni(OH)_3$$

$$\textit{Entladen:}\quad Fe + 2\,Ni(OH)_3 \rightarrow Fe(OH)_2 + 2\,Ni(OH)_2$$

Als Elektrolyt dient 20%ige Kalilauge. Die Energieausbeute beträgt nur 75%, das Speichervermögen je kg ist etwa dasselbe wie beim Bleisammler.

4.4. Stromleitung durch kolloide Teilchen

Sind in einer Flüssigkeit schwebende Partikel so klein (etwa $10^{-5}\cdots10^{-7}$ cm Durchmesser), daß sie sich auch bei längerem Stehen nicht absetzen, so nennt man sie **kolloide Teilchen.** In den meisten Fällen lagern sie negative oder positive Ionen an. So sind z. B. in Wasser aufgeschwemmte Harzteilchen stets negativ geladen und vermögen dann im elektrischen Feld zu wandern. Man nennt diese Erscheinung

Elektrophorese = Wanderung elektrisch geladener Kolloide im elektrischen Feld.

Versuch: Man stelle eine Aufschwemmung aus feinem Ton und destilliertem Wasser her und bringe sie in ein elektrisches Feld. Bei starker Vergrößerung sieht man, daß die Tonteilchen zur Anode wandern (Bild 105).

Anwendungen: Gewinnung von festem Kautschuk aus seiner Emulsion, der Kautschukmilch; Anlagerung von Bodenkolloiden zur Verankerung von Pfählen in wenig tragfähigen Baugründen.

Der Ladungssinn eines Kolloides läßt sich in vielen Fällen chemisch beeinflussen. Im sog. **isoelektrischen Punkt** sind kolloide Teilchen elektrisch neutral. Ein feinporiger Propfen in einem wassergefüllten U-Rohr wirkt gleichsam wie ein Kolloid, das an seiner Bewegung gehindert wird. Das ihm gegenüber positive Wasser bewegt sich dann durch den Propfen zur Katode (Bild 106):

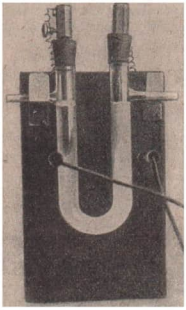


Bild 105. Elektrophorese

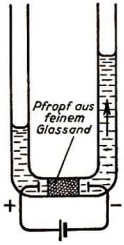


Bild 106.
Elektroosmose

Bild 107.
Entwässern von Torf

Elektroosmose = Wanderung von Wasser durch eine kolloide Schicht im elektrischen Feld (Kataphorese).

Anwendungen: Einbringen von Medikamenten in die Haut (Kataphorese). Trocknen von Torf (Bild 107).

Wenn man umgekehrt Wasser durch einen solchen Propfen preßt, lädt sich die Flüssigkeit gegenüber dem negativen Körper positiv auf. Es entsteht eine **Strömungsspannung.** Im letzteren Fall findet die eigentliche Ladungstrennung in der Doppelschicht (S. 56) zwischen Körper und Flüssigkeit statt.

5. Die Stromleitung in festen Körpern

5.1. Die metallischen Leiter

In den Metallen bewegen sich, wie schon mehrfach erwähnt, Elektronen als sogenanntes **Elektronengas** frei zwischen den Metallatomen. Es handelt sich hierbei um die innerhalb der Atome am weitesten außen liegenden Elektronen, die bei chemischen Vorgängen in Tätigkeit treten (Valenzelektronen). Ihre Bewegung ist

zunächst völlig ungeordnet, erst beim Anlegen einer Spannung erhalten sie eine Vorzugsrichtung nach dem positiven Pol.

Die folgende überschlägliche Rechnung zeigt, daß die **Geschwindigkeit des elektrischen Stromes** überraschend gering ist. Es werde angenommen, durch einen Kupferdraht von 1 mm^2 Querschnitt und 1 cm Länge fließe ein Strom von 1 A. Dieser Draht hat ein Volumen von 0,01 cm^3 und wiegt 0,089 g. Das Atomgewicht des Kupfers ist 63,57, so daß diese Menge gleich $\frac{0{,}089}{63{,}6} = 0{,}0014$ Grammatom[1]). Nach S. 62 sind hierin $0{,}0014 \cdot 6{,}023 \cdot 10^{23} = 8{,}44 \cdot 10^{20}$ Atome enthalten. Man nimmt nun an, daß von jedem Atom 1 Elektron an der Stromleitung beteiligt ist. Da 1 Elektron die Ladung $e_0 = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ As trägt, enthält der Draht eine Elektrizitätsmenge von $8{,}44 \cdot 10^{20} \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ As = 135 As. Würde diese Menge in 1 s durch den Drahtquerschnitt fließen, so entspräche das einer Elektronengeschwindigkeit von 1 cm/s und einem Strom von 135 A. Da der Strom aber nur 1 A beträgt, kann die Geschwindigkeit nur $\frac{1}{135}$ cm/s = 0,0074 cm/s betragen.

Bei größeren Stromstärken ist die Elektronengeschwindigkeit bei gleichem Drahtquerschnitt entsprechend höher.

In der Nähe des absoluten Nullpunktes (II, 10.22) nimmt der elektrische Widerstand einiger Stoffe sprunghaft auf einen unmeßbar kleinen Wert ab. Diese **Supraleitung** wurde 1911 beim Quecksilber entdeckt. Die Temperatur, bei der dies eintritt, heißt **Sprungtemperatur** und beträgt z. B. bei

Pb	Hg	U	Zn	Cd
7,26	4,17	1,25	0,79	0,54°K

Die höchste Sprungtemperatur besitzt Niobiumnitrid (NbN), bei dem der Übergang Supraleitung-Normalleitung bei 23°K liegt. Da im supraleitenden Zustand der Ohmsche Widerstand verschwindet, kreist ein einmal induzierter Strom ununterbrochen weiter: **Dauerstrom.** In einem Bleiring konnte nach 6 Stunden noch keine Abnahme des Stromes festgestellt werden. Auf diese Weise erhält man einen idealen Akkumulator, der bei Verwendung von NbN bereits in flüssigem Wasserstoff aufbewahrt werden kann.

5.2. Vorgänge in Halbleitern

Der Widerstand der Metalle liegt etwa zwischen 10^{-4} und 10^{-7} Ω cm, während man bei Werten von über 10^{10} Ω cm von Isolatoren spricht. Dazwischen liegt das Gebiet der **Halbleiter,** zu denen eine Reihe von chemischen Elementen, aber auch viele Salze und Metalloxyde gehören. Der wesentliche Unterschied gegenüber den Metallen und Flüssigkeiten besteht jedoch nicht in der Größe ihres elektrischen Widerstandes, sondern beruht auf besonderen Eigenheiten des Leitungsmechanismus, der je nach Art des Halbleiters verschieden sein kann. Die folgenden Darstellungen beziehen sich insbesondere auf die Vorgänge in den Halbleitern **Germanium** und **Silizium,** die in den letzten Jahren große technische Bedeutung erlangt haben.

5.2.1. Die Eigenleitung

Ist ein Halbleiter chemisch absolut rein, so verhält er sich bei tiefsten Temperaturen wie ein Isolator; alle den Atomrumpf umgebenden Elektronen werden durch die Kräfte der chemischen Bindung festgehalten (Bild 108a). Mit zunehmender Tem-

[1]) 1 Grammatom ist das in Gramm ausgedrückte Atomgewicht.

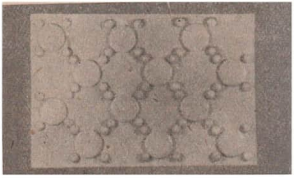


Bild 108a. Halbleiter bei tiefer Temperatur: Jeder Atomrumpf des 4wertigen Germaniums ist von 8 Elektronen umgeben (flächenhaft schematisiert)

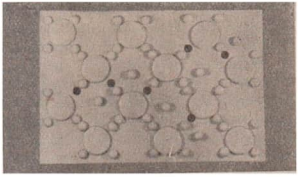


Bild 108b. Halbleiter bei höherer Temperatur: Durch Aufnahme thermischer Energie entstehen freie Elektronen und Defektelektronen (Löcher)

peratur werden aber immer mehr Elektronen durch Aufnahme thermischer Energie aus ihrer Bindung befreit und können nunmehr den Stromtransport übernehmen. Demzufolge nimmt der spezifische Widerstand im Gegensatz zu den Metallen mit steigender Temperatur ab. Anwendungen: Widerstandsthermometer, Eisenoxyd- oder Titanoxydwiderstände als Strombegrenzer beim Einschalten.

In gleicher Weise setzt auch die Bestrahlung mit Licht den Widerstand von Halbleitern herab, wodurch es möglich ist, elektrische Ströme mit Hilfe von Licht zu steuern. Anwendungen: Widerstandsfotozellen, Selenzelle.

Diese **Eigenleitung** ergibt z. B. bei reinstem Germanium einen spezifischen Widerstand von etwa 60 Ω cm bei Zimmertemperatur. Die Eigenleitung beruht aber nicht nur auf der Wanderung von Elektronen. Vielmehr hinterläßt jedes beweglich gewordene Elektron im Kristallgitter eine positiv geladene Lücke (Bild 108b). Man spricht hierbei von positiven **Defektelektronen** oder kurz **Löchern.** Da der Kristall als Ganzes neutral bleibt, ist die Zahl der Defektelektronen genau gleich der Zahl der freien Elektronen.

Sobald eine elektrische Spannung an den Halbleiter gelegt wird, wandern die Elektronen von der Katode zur Anode. Aber auch die Defektelektronen beteiligen sich am Stromtransport. Dabei rückt ein ursprünglich fest gebundenes Elektron in die nächstgelegene positive Lücke ein, wodurch ein neues Loch entsteht, das wiederum ausgefüllt wird usw. Es ist demnach so, als ob ein Strom positiver Ladungsträger dem Elektronenstrom entgegen von der Anode zur Katode wandert.

5.2.2. Die n-Leitung

Da die Elemente Germanium und Silizium chemisch 4wertig sind, gehören zu jedem Atomrumpf 4 Elektronen. Fügt man dem ursprünglich reinen Germanium geringe Spuren eines 5wertigen Elementes (z. B. Arsen oder Antimon) bei (Dotierung mit Fremdatomen), so ordnen sich diese Atome an entsprechenden Stellen des Gitters ein. Da sie aber gegenüber dem Germanium ein Elektron zuviel haben, ist an diesen sogenannten **Störstellen** ein Elektron im Überschuß, das dann als zusätzliches Leitungselektron in Tätigkeit tritt (Bild 109a).

Das Produkt aus der Anzahl positiver und negativer Ladungsträger bleibt hierbei konstant (Massenwirkungsgesetz), so daß sich die Anzahl der Defektelektronen entsprechend vermindert. Auf diese Weise wird das Germanium zu einem **Überschußhalbleiter** oder **n-Leiter,** bei dem der Stromtransport durch Defektelektronen nur noch

eine ganz untergeordnete Rolle spielt. Wird angenommen, daß im Zustand der Eigenleitung je 10^{13} Elektronen und Defektelektronen je cm^3 vorhanden sind, so ist das Produkt $10^{13} \cdot 10^{13} = 10^{26}$. Sind nach der Dotierung 10^{16} Elektronen vorhanden, so verringert sich die Zahl der Defektelektronen auf 10^{10}; denn das Produkt $10^{16} \cdot 10^{10} = 10^{26}$ muß nach dem Massenwirkungsgesetz den gleichen Wert behalten. Hierdurch aber nimmt die Zahl der Ladungsträger von $2 \cdot 10^{13}$ auf $(10^{16} + 10^{10})$ ganz beträchtlich zu, so daß durch die Dotierung mit Störatomen die Leitfähigkeit des Germaniums bedeutend erhöht wird. Um dies zu erreichen, genügt bereits die Zugabe von 1 Störatom auf je 10^6 Germaniumatome. Die Herstellung derartiger Halbleiter erfordert daher völlig neue technologische Verfahren und stellt insbesondere höchste Anforderungen an die Reinheit der zu verarbeitenden Rohstoffe.

5.2.3. Die p-Leitung

Fügt man dem Germanium dagegen Spuren eines 3wertigen Elementes (z. B. Indium oder Gallium) zu, so bilden sich ebenfalls Störstellen, an denen aber jeweils ein Elektron zu wenig vorhanden ist. Dadurch entstehen zusätzliche Defektelektronen (Bild 109 b). Nach dem Massenwirkungsgesetz wird damit die Konzentration der Elektronen stark herabgesetzt, und der Stromtransport erfolgt vorwiegend durch Defektelektronen. Man spricht hierbei von einem **Mangelhalbleiter** oder **p-Leiter.**

5.2.4. Die n-p-Gleichrichtung

Setzt man nun je einen p- und n-Halbleiter zusammen, so diffundieren (analog zur Diffusion zweier verschiedener Gase) an der Berührungsstelle Elektronen in den p-Leiter und Defektelektronen in den n-Leiter hinein. In der Mitte der Übergangszone selbst sind nunmehr Elektronen und Defektelektronen zu gleichen Teilen vermischt. Da das Produkt der Konzentrationen nach den vorhin angenommenen Zahlen aber mit 10^{26} je cm^3 konstant bleiben muß, sind hier nur noch $2 \cdot 10^{13}$ Ladungsträger vorhanden. Der spezifische Widerstand in der Übergangszone ist somit beträchtlich erhöht. Zwischen dem n- und p-Gebiet bildet sich eine **Sperrschicht** (Bild 110 a).

Sperrichtung. Legt man jetzt eine Spannung an diese n–p-Kombination, und zwar den Pluspol an die n-Seite und den Minuspol an die p-Seite, so verbreitert sich die Sperrschicht, da der Pluspol weitere Elektronen aus der Übergangszone absaugt und der

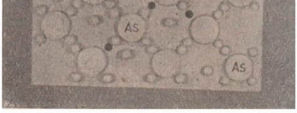


Bild 109a. n-Leitung: 5wertige Störatome (As) haben je ein Elektron zuviel. Die Anzahl der Defektelektronen ist verringert

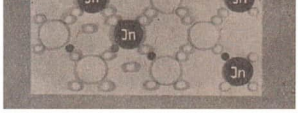


Bild 109b. p-Leitung: 3wertige Störatome (In) haben je ein Elektron zuwenig. Die Anzahl der freien Elektronen ist verringert

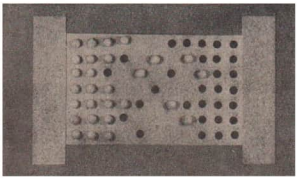


Bild 110a. n–p-Kombination: Zwischen der n-Zone (links) und der p-Zone (rechts) bildet sich durch Diffusion eine an Ladungsträgern verarmte Sperrschicht (Atomrümpfe sind weggelassen)

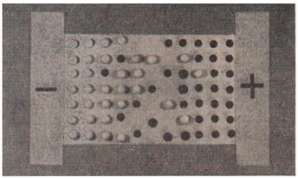


Bild 110b. n–p-Kombination, in Flußrichtung gepolt. Katode und Anode drücken Elektronen bzw. Defektelektronen in die Sperrschicht hinein und verringern deren Breite

Minuspol weitere Defektelektronen in das p-Gebiet zurückzieht. Der Widerstand der Anordnung wird somit noch größer, und es kann bei dieser Polung ein **Sperrstrom** von nur einigen μA fließen.

Flußrichtung. Wird jedoch die p-Seite zur Anode und die n-Seite zur Katode gemacht, so drückt die Anode Defektelektronen und die Katode Elektronen in die Sperrschicht hinein, wodurch sich deren Dicke verringert und der Widerstand abnimmt (Bild 110b). Der **Flußstrom** ist etwa 1000···10 000mal größer als der Sperrstrom.

Technische Ausführungen. Legt man eine Wechselspannung an diese Anordnung, so kann der Strom nur in einer Richtung fließen, während er in der anderen Richtung gesperrt wird. Die in der letzten Zeit entwickelten **Germanium-Gleichrichter** sperren Spannungen von 100···400 V und können mit Stromdichten bis zu 75 A/cm² belastet werden. In der Schwachstromtechnik sind die sehr kleinen **Germaniumdioden** bereits weit verbreitet.

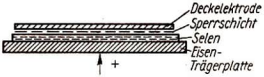


Bild 111. Selengleichrichter. → Durchlaßrichtung für den Strom

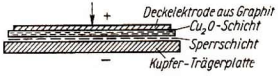


Bild 112. Kupferoxydul-Gleichrichter. → Durchlaßrichtung für den Strom

Bisher waren meist **Selen-** und **Kupferoxydul-Gleichrichter** in Gebrauch. Der Aufbau eines einzelnen Gleichrichterelementes ist aus Bild 111 bzw. 112 erkennbar. Auch hier bildet sich bei der Herstellung an der oberen Grenze des Selens eine Sperrschicht, die im Prinzip wie die besprochene n-p-Kombination wirkt.

Die Sperrspannung beträgt beim Selenelement etwa 25 V, beim Cu_2O-Gleichrichter etwa 5 V. Beim Überschreiten dieser Werte wird die Sperrschicht zerstört. Man muß daher bei höheren Spannungen mehrere Elemente in Reihe schalten (Bild 113).

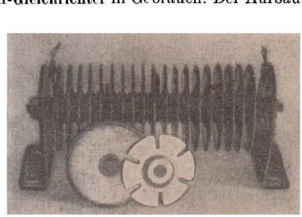


Bild 113. Selengleichrichter

Legt man eine Wechselspannung an das Element, so wird immer nur jede zweite Halbwelle durchgelassen (Bild 114): **Einweggleichrichtung.**

Um auch die andere Halbwelle zu erhalten, wendet man die **Graetz-Schaltung** an und erhält die **Doppelweggleichrichtung** nach Bild 115.

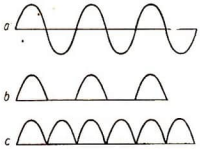


Bild 114.
a) Wechselspannung
b) nach Einweggleichrichtung
c) nach Doppelweggleichrichtung

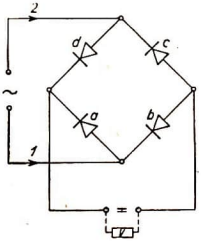


Bild 115. Graetz-Schaltung zur Doppelweggleichrichtung

Um sie zu verstehen, verfolge man zuerst die Strombahn (1) von links her. Dann fließt der Strom über die Zelle (a), den Verbraucher (V) und die Zelle (c) nach der anderen Klemme. Nachdem der Strom seine Richtung gewechselt hat (Strombahn 2), fließt er über die Zelle (d), den Verbraucher (V) und Zelle (b) zur anderen Klemme. Auf diese Weise kann man z. B. einen Akkumulator laden, wenn nur Wechselspannung zur Verfügung steht.

5.2.5. Der Transistor

Durch Zusammenbau einer p-n-p-Kombination entsteht der **Transistor**, der es ermöglicht, mit kleinen Schwankungen eines primären Stromkreises große Spannungen in einem zweiten Stromkreis zu steuern. Damit wird die gleiche Wirkung wie bei einer Elektronenröhre (S. 85) erzielt.

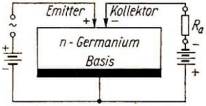


Bild 116.
Prinzip eines Spitzentransistors

Es gibt verschiedene Formen des Transistors. Der **Spitzentransistor** ist z. B. ein n-leitender Germaniumkristall mit 3 Kontakten (Bild 116). Die beiden Spitzenkontakte liegen sehr eng beieinander, und durch geeignete Vorbehandlung wird vor jeder Spitze ein kleines p-leitendes Gebiet von einigen tausendstel Millimeter Durchmesser erzeugt. Zwischen der einen Spitze, dem **Emitter** und dem **Basiskontakt** liegt die zu verstärkende Wechselspannung. Da der Emitter positive Vorspannung erhält, ist er in Flußrichtung gepolt, so daß mit geringem Widerstand Defektelektronen in das Germanium einströmen. Die andere Spitze heißt **Kollektor** und ist in Sperrichtung gepolt, so daß an dieser Stelle ein hoher Widerstand vorhanden ist. Da der Kollektor negative Vorspannung hat, werden die meisten vom Emitter in das Germanium gelangenden Defektelektronen vom Kollektor angezogen und erzeugen im Kollektorkreis einen Strom I von fast gleicher Größe wie im Emitterkreis. Da der Widerstand R_c am Kollektor aber um ein Vielfaches größer als am Emitter ist, entsteht hier eine entsprechend größere Spannung $U = I \cdot R_c$.

Bei guter Anpassung des Außenwiderstandes erzielt man eine Leistungsverstärkung bis 1 : 10000.

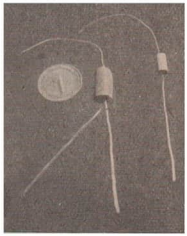


Bild 117. Transistor und Germaniumdiode

5.2.6. Halbleiter-Fotoelemente

Läßt man in die Oberfläche eines n-Halbleiters (z. B. n-Silizium) Fremdatome (z. B. Boratome) eindiffundieren, so entsteht eine lichtdurchlässige p-Schicht. Einfallendes Licht ändert dann die Konzentrationsverhältnisse der Ladungsträger in dieser n-p-Kombination derart, daß zwischen der n- und p-Schicht eine meßbare EMK entsteht. **Anwendungen:** Selenfotoelemente als fotografische Belichtungsmesser, Solarbatterien in künstlichen Erdtrabanten, mit denen eine Nutzleistung von 6···11 mW/cm² erzielt werden kann.

6. Die Stromleitung in Gasen

Bei gewöhnlichen Versuchen mit weniger empfindlichen Apparaten erscheinen die Gase, insbesondere die Luft, als Isolatoren. Sie sind es grundsätzlich auch. Wenn dennoch Fälle einer gewissen Leitfähigkeit auftreten, muß das Gas **Ladungsträger** enthalten, die dann, im Feld wandernd, das Gas zu einem Leiter machen. Ganz allgemein bezeichnet man als

Träger = elektrisch geladene Teilchen, wie Elektronen, Ionen und durch deren Anlagerung geladene Moleküle und gröbere Teilchen.

Der im Gas fließende Strom muß daher dann aufhören, wenn alle positiven und negativen Träger zur Anode bzw. Katode gewandert sind. In diesem idealen Grenzfall ist das Gas im wahren Sinne des Wortes „entladen". Aber auch sonst bezeichnet man Stromleitungsvorgänge in Gasen als **Gasentladungen.**
Man unterscheidet

1. **unselbständige Entladung** = Stromdurchgang mittels im Gas bereits vorhandener Träger. Diese können von Natur aus darin vorhanden sein (durch radioaktive Stoffe) oder künstlich erzeugt worden sein (Bestrahlung mit Röntgenlicht),
2. **selbständige Entladung** = Stromdurchgang mittels Träger (Glimm-, Bogen-, Funkenentladung), die vom Strom selbst fortlaufend neu gebildet werden.

6.1. Glimmentladung in verdünnten Gasen

6.1.1. Die Teile der Glimmentladung

Zu den beliebtesten Versuchen mit der Elektrisiermaschine oder dem Funkeninduktor gehörte früher das Aufleuchten von „Geißlerschen Röhren" (nach ihrem Hersteller benannt) (Bild 118). Dies sind kleine, mit verdünnter Luft gefüllte verschieden geformte Glasröhren mit eingeschmolzenen Elektroden.

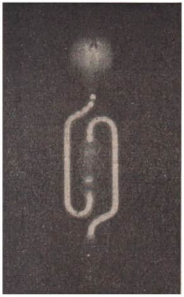


Bild 118. Geißlersche Röhren. Erkennbar ist die geschichtete positive Säule

Versuch: Auf eine Vakuumpumpe setzt man eine etwa 50 cm lange Glasröhre und schließt die beidet scheibenförmigen Elektroden an einen mit Gleichstrom betriebenen Funkeninduktor an. Während des Auspumpens erscheinen bald violett leuchtende Büschel, die sich bei etwa 0,1 ··· 2 Torr zum charakteristischen Bild einer **Glimmentladung** verbreitern. Die Leuchterscheinung bildet, von der Katode ausgehend, folgende Teile (Bild 119):

Bild 119. Teile einer Glimmentladung

1. **Astonscher Dunkelraum:** eine kaum erkennbare, nichtleuchtende Schicht zwischen Katode und dem
2. **Katodenlicht:** eine dünne violett leuchtende Schicht;
3. **Hittorfscher Dunkelraum:** sehr schwach violett leuchtender Zwischenraum;
4. **negatives Glimmlicht:** kräftig leuchtende Zone, beginnend mit dem Glimmsaum;
5. **Faradayscher Dunkelraum:** sehr schwach leuchtend;
6. **positive Säule** (Plasma): häufig regelmäßig geschichtet, kräftig rosa leuchtend, erfüllt den größten Teil der Röhre bis zur Anode.
   Nur bei einigen elektronegativen Gasen (z. B. Joddampf) bildet sich das
7. **anodische Glimmlicht.**

Die hier angegebenen Farben treten nur in Luft auf, sie sind bei jedem Gas anders. Das Plasma des Neons leuchtet rot, das des Quecksilbers grünlich, des Heliums violett usw.

6.1.2. Vorgänge in der Glimmentladung

Die Glimmentladung ist eine **selbständige Entladung.** Damit sie überhaupt einsetzen kann, ist die anfängliche Gegenwart von einigen Trägern notwendig, was gewöhnlich immer der Fall ist. Im Feld werden sie nach beiden Elektroden hin beschleunigt.

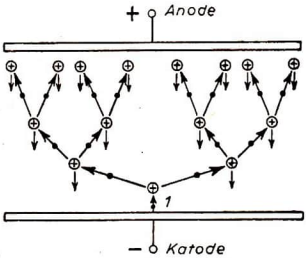


Bild 120. Entstehung einer Lawine positiver Ionen durch ein von der Katode abgelöstes Elektron

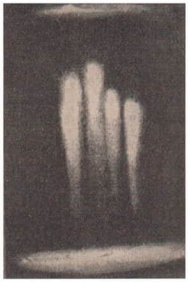


Bild 121. Nebelkammeraufnahme einer Ionenlawine

Angenommen, ein Ion pralle auf die Katode, wo es ein Elektron herausschlägt (Bild 120). Dieses wird nach der Anode hin beschleunigt und stößt mit einem Gasmolekül zusammen. Dadurch bildet sich ein neues Elektron und ein positives Ion. Die beiden weiterfliegenden Elektronen erzeugen bei weiterem Zusammenprall 2 weitere Ionen und Elektronen, so daß jetzt 4 Elektronen weiterfliegen und in dieser Weise eine rasch anwachsende **Ionenlawine** verursachen (Bild 121).

Nach einer gewissen Anlaufstrecke ist die Geschwindigkeit der befreiten Elektronen so groß geworden, daß sie ein Gebiet starker Ionisation erzeugen. Die wegen ihrer Größe langsamen positiven Ionen bleiben in dieser Zone zurück, während die Elektronen von der Anode abgesaugt werden. So entsteht das negative Glimmlicht, das demnach eine positive **Raumladungswolke** (Bild 122) darstellt. Zwischen ihr und der Katode liegt fast der gesamte Spannungsabfall der Röhre, der sogenannte **Katodenfall** (Bild 123). In dieser Wolke findet auch eine starke Wiedervereinigung zu neutralen Teilchen statt, welche das Leuchten hervorruft.

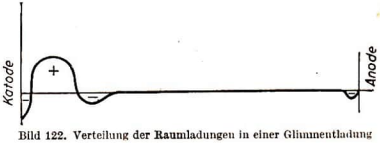


Bild 122. Verteilung der Raumladungen in einer Glimmentladung

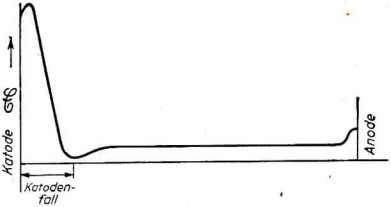


Bild 123. Verlauf der Feldstärke in einer Glimmentladung

Im Gegensatz hierzu besteht die positive Säule aus gleich viel positiven wie negativen Trägern. Ein solches, im ganzen „quasineutrales" Gas nennt man allgemein **Plasma.** Im Plasma ist die Feldstärke nur noch klein.

6.1.3. Anwendung der Glimmentladung

Derartige einfache Entladungsröhren werden schon seit langem als **Leuchtröhren** für Reklamezwecke verwendet. Wesentlich verbessert wird der Wirkungsgrad, wenn man dem Grundgas Metalldampf beimengt:

Natrium- und Quecksilberdampflampen. Weiter verbessert wird die Lichtausbeute, wenn der Dampfdruck des Quecksilbers vergrößert wird.
Man unterscheidet:

Quecksilberdampflampen

	Niederdruck	Hochdruck	Superhochdruck
Druck	0,01···1 Torr	100 Torr bis 10 at	50···200 at

Eine Quecksilberdampflampe mit Quarzröhre ist die **Höhensonne** (Bild 124) (kräftige Ultraviolettabstrahlung). Die modernen **Leuchtstoffröhren** (Bild 125) enthalten ebenfalls etwas Quecksilberdampf, dessen starke UV-Strahlung durch einen fluoreszierenden Innenbelag der Röhre in sichtbares Licht umgewandelt wird (s. II, Abschn. 30.2).

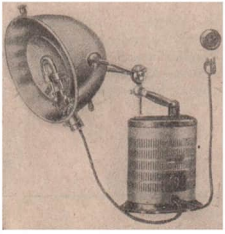


Bild 124. Höhensonne

Werden die Elektroden einander genähert, so geschieht dies auf Kosten der positiven Säule. Diese verkürzt sich, bis bei engem Abstand nur noch das negative Glimmlicht übrigbleibt, das in dünner Schicht die Katode überzieht (Bild 126). Diese **Glimmlampen** (Bild 127) geben zwar nur ein schwaches Licht, sind aber für viele andere Zwecke nützlich. Sie müssen stets mit einem Schutzwiderstand in Reihe geschaltet werden, da sie sonst durch Funkenüberschlag zerstört werden (bei zunehmendem Strom sinkt die Spannung!). Zur Einleitung der Entladung ist eine bestimmte **Zündspannung** notwendig. Wenn man die Spannung dann vermindert,

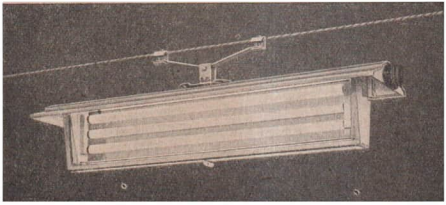


Bild 125. Leuchtstofflampen

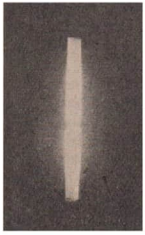


Bild 126. Glimmbedeckung bei geringem Abstand zweier stabförmiger Elektroden

Bild 127
Kleinglimmlampe mit eingebautem Sicherungswiderstand

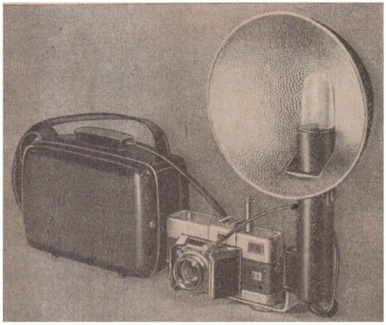


Bild 128. Elektronenblitzgerät

erlischt die Glimmröhre noch nicht, sondern erst unterhalb der (10 ··· 30 V tieferen) **Löschspannung.**
Die **Elektronenblitzlampen** sind mit Xenon gefüllte Quarzröhren (Fülldruck 30 bis 100 Torr), die aus einem Kondensator großer Kapazität gespeist werden. Die Blitzdauer beträgt $10^{-5} \cdots 10^{-4}$ s, die Lichtmenge $10^{2} \cdots 10^{6}$ lm · s (Bild 128).

6.2. Katoden- und Kanalstrahlen

Pumpt man das vorhin betrachtete Entladungsrohr noch weiter aus, so vergrößern sich die Dunkelräume, und die Lichterscheinungen verschwinden zusehends. Dafür beginnt die Glaswand in grünem Licht zu fluoreszieren. Dies wird von der sogenannten **Katodenstrahlung** verursacht.
Wie die folgenden Erscheinungen beweisen, besteht diese „Strahlung" aus frei von der Katode wegfliegenden Elektronen.

Versuch:	*Folgerung:*
Ein in den Strahlengang gebrachter Gegenstand wirft einen Schatten auf die Gefäßwand.	Geradlinige Ausbreitung.
Ein kleines, exzentrisch getroffenes Flügelrad gerät in Umdrehungen.	Die Strahlen bestehen aus Masseteilchen.
Mit einem Magnet kann man die Strahlen wie einen elektrischen Strom ablenken (Bild 129).	Die Strahlung besteht aus negativer Elektrizität.
Die Strahlung dringt durch dünne Fenster in der Rohrwand nach außen.	Die Teilchen müssen sehr klein sein, da sie die Zwischenräume der Atome durchdringen.

Sie wirken ferner auf die fotografische Platte ein, üben bei hohlspiegelförmiger Katode kräftige Wärmewirkungen aus und bringen fluoreszierende Stoffe zum Leuchten (Bild 130).

Bild 129
Ablenkung eines Katodenstrahls im magnetischen Feld

Bild 130. Mit fluoreszierenden Farben bestrichenes Präparat bei Bestrahlung mit Katodenstrahlen

Wenn man die Katode nahe der Rohrmitte anbringt und sie mit einem Loch oder Schlitzen versieht, geht von diesen nach rückwärts ein strahlenartiges Leuchten aus. Diese **Kanalstrahlen** (Bild 131) bestehen aus positiven Ionen. Sie fliegen auf die Katode zu und vermöge ihrer Trägheit durch die Öffnungen, wonach sie in dem feldfreien Raum hinter der Katode die zuletzt erreichte Geschwindigkeit beibehalten.

6.3. Die Bogenentladung

Der auf S. 34 erwähnte, zwischen zwei Kohlestiften brennende **Lichtbogen** ist einer Glimmentladung sehr ähnlich. Der Hauptteil des Bogens leuchtet nur schwach violett und stellt die positive Säule der Glimmentladung dar. Das negative Büschel sitzt auf der Katode. Das Licht geht hauptsächlich von den glühenden Elektroden aus. Die zur Aufrechterhaltung der Entladung nötigen Elektronen werden nicht durch Ionenaufprall, sondern infolge der hohen Temperatur befreit.

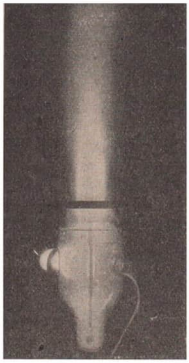


Bild 131. Kanalstrahlen

Bei verschiedener Beschaffenheit und Gestalt der Elektroden wird die Bogenentladung unsymmetrisch, die Entladung ist dann nur in einer Richtung möglich. Diese **Ventilwirkung** ist das Prinzip des **Quecksilberdampf-Gleichrichters** (Bild 132). Als Katode befindet sich in einem evakuierten Gefäß flüssiges Quecksilber. Die großen Anoden sind aus Eisen. Gezündet wird mit einer besonderen Vorrichtung. Der Strom fließt als Bogenentladung nur von der Quecksilberkatode zur Anode.

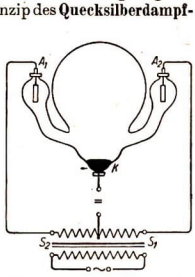


Bild 132. Prinzip des Quecksilberdampf-Gleichrichters

Man führt den Wechselstrom über einen Transformator zu, dessen Sekundärseite in der Mitte angezapft ist. Fließt der Strom hier von (S_1) nach (S_2),

so ist die Anode (A_1) positiv, und diese Halbwelle findet ihren Weg von (A_1) nach der Katode zum Verbraucher. Nach dem Richtungswechsel tritt die Anode (A_2) in Tätigkeit, so daß auch die zweite Halbwelle über (K) zum Verbraucher geht. Dieser erhält demnach pulsierenden Gleichstrom.

Im Betrieb sieht man den Ansatzpunkt des Lichtbogens, den **Brennfleck,** auf der Katodenoberfläche hin- und herwandern. Von der kühleren Wand der oberen Halbkugel läuft das kondensierte Quecksilber in kleinen Rinnsalen wieder nach unten.

6.4. Die Röntgenstrahlung

Stellt man in den Weg schnell bewegter Elektronen — wozu die an der Röhre liegende Spannung recht hoch sein muß[1]) — einen Metallklotz (hierzu kann die Anode selbst dienen), so beobachtet man eine neue, unsichtbare Strahlung, die durch das Glas der Röhre nach außen gelangt: die 1895 entdeckte **Röntgenstrahlung**, auch X-Strahlung genannt (Bild 133).

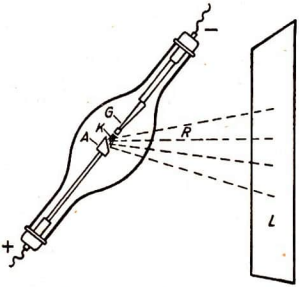


Bild 133. Moderne Röntgenröhre

Bild 134. Eine der ersten Röntgenaufnahmen: die Hand von Röntgens Frau

Um sie sichtbar zu machen, bringt man in den Strahlengang einen **Leuchtschirm.** An Stelle des früher benutzten Anstriches aus Bariumplatinzyanür verwendet man heute mit Silber aktiviertes Zinkkadmiumsulfid. Ein zwischen Röhre und Leuchtschirm stehender, weniger gut durchdringlicher Körper wirft dann auf den Leuchtschirm einen Schatten, das **Röntgenbild** (Bild 134).

Entstehung der Strahlung. Ein Teil der Elektronen dringt in die Anode ein (verwendet wird meist Wolfram) und erhitzt diese. Die beim Abbremsen eines anderen Teils der Elektronen frei werdende Energie wird unmittelbar in elektromagnetische Strahlung umgesetzt **(Bremsstrahlung).** Ein weiterer Teil der Elektronen regt die Atome des Anodenmaterials selbst an,

[1]) Bei der Durchstrahlung metallischer Werkstücke bis 300000 V.

die dann die **charakteristische Strahlung** aussenden. Das Spektrum dieser Strahlung ist im Gegensatz zum kontinuierlichen Spektrum der Bremsstrahlung ein Linienspektrum.

Bremsstrahlung = kontinuierliches Spektrum.

Charakteristische Strahlung = Linienspektrum des betreffenden Metalls.

Die Wellenlängen umfassen den Bereich von $10^{-9}...10^{-6}$ cm (das sichtbare Licht beginnt bei 10^{-4} cm). Kurzwellige Röntgenstrahlen werden als „hart", längerwellige als „weich" bezeichnet.

Das kontinuierliche Spektrum der Bremsstrahlung ist nach der kurzwelligen Seite hin jedoch scharf begrenzt. Die kinetische Energie der auftreffenden Elektronen läßt sich in Elektronenvolt (S. 83) ausdrücken und liefert die Energie der einzelnen Strahlungsquanten (II, 30.1). Damit hat man die Gleichung

$$e_0 U = h\nu,$$

woraus sich die größtmögliche Frequenz der Strahlung ergibt, wenn angenommen wird, daß sich im günstigsten Fall die gesamte kinetische Energie in Strahlung umsetzt.

(62) **Grenzfrequenz der Röntgenbremsstrahlung:** $\boxed{\nu = \frac{e_0 U}{h}}$

Haupteigenschaften der Röntgenstrahlung:

1. großes Durchdringungsvermögen für fast alle Körper, auch Metalle. Lediglich dicke Bleiplatten gewähren Schutz;
2. Schwärzung photographischer Schichten, so daß auf lichtempfindlichem Film ein Schattenbild des durchstrahlten Gegenstandes entsteht;
3. zerstörende Wirkungen auf lebende Gewebe, weshalb mit der Strahlung sehr vorsichtig umgegangen werden muß;
4. in gewissen Fällen heilende Wirkung.
5. Der Brechungsindex aller Stoffe für Röntgenstrahlen weicht nur wenig von 1 ab.
6. Gase werden ionisiert, wodurch z. B. Luft elektrisch leitend wird.

Als Dosiseinheit gilt in der Röntgenmedizin **1 r (1 Röntgeneinheit)**, d. i. diejenige Strahlungsmenge, die in 1 cm³ Luft (0 °C, 760 Torr) Ionen beiderlei Vorzeichens von je $3{,}33 \cdot 10^{-10}$ As erzeugt.

Moderne Röntgenröhren arbeiten mit Glühkatode.

7. Der elektrische Strom im Hochvakuum

Die bisher betrachteten Erscheinungen der Katoden- und Röntgenstrahlen können ohne weiteres mit kalter Katode erreicht werden, weil die hierzu benötigten Elektronen durch Aufprall von Ionen aus der Katode herausgelöst werden. Die erzielbaren Wirkungen werden jedoch in vieler Hinsicht besser, wenn man das Gas möglichst vollkommen entfernt und im Vakuum von mindestens 10^{-6} (oft bis $10^{-15}...10^{-16}$) Torr arbeitet. Da dann Zusammenstöße zwischen Elektronen und Gasmolekülen nur noch sehr selten stattfinden, können sich nur noch wenig störende Ionen bilden.

7.1. Geschwindigkeit und Energie freier Elektronen

Da im Vakuum jegliche Reibung wegfällt, bewegen sich die Elektronen nicht mehr mit gleichbleibender Geschwindigkeit wie etwa in einem Metalldraht. Vielmehr wirkt jetzt auf die Elektronenmasse bei Annahme konstanter Feldstärke E nach (45) eine fortwährende Kraft $P = e_0 E$, die nach dem Grundgesetz der Dynamik ($P = mb$) die Masse m bei konstanter Feldstärke gleichförmig beschleunigt.

Die Elektronengeschwindigkeit nimmt im homogenen Feld mit der Länge des durchlaufenen Feldes gleichförmig beschleunigt zu.

Die zur Bewegung der Ladung Q gegen eine Spannung U erforderliche Arbeit berechnet sich nach (31) als $A = UQ$. Setzt man hier für U die Spannung 1 V und für Q die Ladung eines Elektrons ($e_0 = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ As), so ergibt sich die Energie

(63) $$\boxed{1 \text{ Elektronenvolt} = 1 \text{ eV} = 1{,}602 \cdot 10^{-19} \text{ Ws} = 1{,}602 \cdot 10^{-12} \text{ erg}}$$

Es bedeutet also:

1 eV = die Energie eines Elektrons, das eine Spannung von 1 V durchlaufen hat.

Dabei nimmt ein Elektron vermöge seiner Masse m_0 die kinetische Energie

$$\frac{m_0}{2} v^2$$

an. Beide Energien sind einander gleich, so daß

$$\frac{m_0 v^2}{2} = e_0 U .$$

Hieraus erhält man durch Auflösen

$$v = \sqrt{\frac{2 e_0 U}{m_0}} .$$

Berechnet man hieraus die Geschwindigkeit v, die das Elektron nach Durchlaufen der Spannung 1 V annimmt, so bekommt man

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19} \text{ As } 1 \text{ V}}{9{,}1 \cdot 10^{-28} \text{ g}}} = \sqrt{\frac{3{,}204 \cdot 10^{-19} \text{ kg m}^2}{9{,}1 \cdot 10^{-31} \text{ kg s}^2}} = 594 \cdot 10^3 \text{ m/s};$$

denn es ist 1 Ws = 1 kg m²/s² (Nm).
Für eine beliebige Spannung U erhält man hieraus die Zahlenwertgleichung für die

Geschwindigkeit eines Elektrons nach Durchlaufen der Spannung U:

(64) $$\boxed{v = 594 \sqrt{U}}$$

(v in km/s, U in Volt.)

Beispiele: 1. Welche Endgeschwindigkeit nimmt ein Elektron nach Durchlaufen einer Spannung von 100, 1000 und 10000 V an? — Durch Einsetzen dieser Spannungswerte ergibt sich im ersten Fall $v = 5{,}94 \cdot 10^3$ km/s; im zweiten Fall $v = 18{,}8 \cdot 10^3$ km/s und im dritten Fall $v = 5{,}94 \cdot 10^4$ km/s.

2. Es soll die der Grenzfrequenz entsprechende kürzeste Wellenlänge der Röntgenbremsstrahlung berechnet werden, wenn die Elektronen eine Spannung von 50 kV durchlaufen haben. — Wegen $\lambda = \frac{c}{\nu}$ und $\nu = \frac{e_0 U}{h}$ ergibt sich mit $h = 6{,}62 \cdot 10^{-27}$ erg·s $= 6{,}62 \cdot 10^{-34}$ Ws²

(II, 30.1) $\lambda = \frac{3 \cdot 10^{10}\ \text{cm}\ 6{,}62 \cdot 10^{-34}\ \text{VAs}^2}{1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{As}\ 5 \cdot 10^4\ \text{V}} = 2{,}48 \cdot 10^{-9}\ \text{cm} = 0{,}0248\ \text{nm}.$

Bei sehr großen Spannungen zeigt sich, daß die Elektronengeschwindigkeit langsamer zunimmt, als es dieser Formel entspricht.

Die Elektronenmasse nimmt bei Annäherung an die Lichtgeschwindigkeit zu.

Dies zeigen folgende Zahlen:

Durchlaufene Spannung	Elektronengeschwindigkeit in km/s	Elektronenmasse m in g
10 V	$18{,}8 \cdot 10^2$	$9{,}1 \cdot 10^{-28}$
1000 V	$18{,}7 \cdot 10^3$	$9{,}12 \cdot 10^{-28}$
100000 V	$16{,}5 \cdot 10^4$	$10{,}9 \cdot 10^{-28}$
10^6 V	$28{,}3 \cdot 10^4$	$28{,}8 \cdot 10^{-28}$
$3{,}1 \cdot 10^6$ V	$29{,}7 \cdot 10^4$	$64{,}3 \cdot 10^{-28}$
∞	Lichtgeschwindigkeit	∞

Diese **relativistische Massenzunahme**[1]) läßt sich nach der Formel

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \tag{65}$$

leicht errechnen, wobei m_0 die Ruhmasse ($9{,}1 \cdot 10^{-28}$ g) des Elektrons bedeutet.

7.2. Elektronenbefreiung aus Metallen

Da das Vakuum selbst keine Ladungsträger enthält, müssen die zum Stromtransport erforderlichen Elektronen vom Material der Katode geliefert werden. Man muß also die Katode veranlassen, daß sie Elektronen aussendet (emittiert). Die Emission von Elektronen kann stattfinden durch

1. hohe Feldstärken an der Katodenoberfläche;
2. Erhitzung der Katode (thermische Emission);
3. Sekundäremission, d. h. Elektronenbefreiung durch Aufprall von Elektronen und Ionen auf die kalte Katode, wie dies bei den bisher besprochenen Glimmentladungen der Fall ist;
4. Auftreffen von Licht- und Röntgenstrahlen.

Die Ablösung eines Elektrons von seinem Atom erfordert erfahrungsgemäß eine Energie von einigen eV (Abschn. 12.). Im einzelnen ist sie verschieden.

[1]) Deshalb so genannt, weil dies eine Folgerung der Relativitätstheorie ist (Albert Einstein, 1905).

Austrittsarbeit einiger Metalle

Metall	W	Mo	Cu	Bariumoxyd-Paste	Cs auf W
Austrittsarbeit	4,53	4,43	4,39	0,99	1,36 eV

Der 1. Fall läßt sich nutzbringend kaum verwerten, und zwar aus folgendem Grund:

Der Anziehungsbereich des Restatoms beträgt etwa 10^{-7} cm. Damit herrscht — wenn man ein homogenes Feld annimmt — zwischen Elektron und Restatom eine Feldstärke von einigen 10^7 V/cm. Das von außen anzulegende Feld müßte also mindestens 10 Millionen V/cm stark sein, wenn es ein Elektron ablösen soll.

7.3. Die Diode (Zweielektrodenröhre)

Vakuumröhren, in denen ein Elektronenstrom von der Katode zur Anode fließt, nennt man allgemein **Elektronenröhren.** Wenn nur diese beiden Elektroden vorhanden sind, spricht man von **Dioden** (Bild 135). Zwischen Katode und Anode legt man die von der **Anodenbatterie** gelieferte **Anodenspannung** U_a. Den in der Röhre von der Anode zur Katode fließenden Strom (technische Stromrichtung) nennt man den **Anodenstrom** I_a.

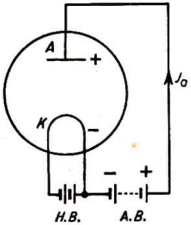


Bild 135. Schaltung einer Diode. K Katode, A Anode, HB Heizbatterie, AB Anodenbatterie, I_a Anodenstrom

Die meisten modernen Elektronenröhren haben eine **Glühkatode,** d. h. einen kurzen Draht, der von einem besonderen **Heizstrom** zum Glühen gebracht wird. Bei der heute vielfach angewandten indirekten Heizung ist der eigentliche Heizdraht von einem dünnen Metallröhrchen umgeben, das mit einer bariumoxydhaltigen Paste bedeckt ist, welche die Elektronen abgibt. Bei einer bestimmten Temperatur vermag die Katode nur eine bestimmte Höchstmenge an Elektronen abzugeben, der Anodenstrom hat also einen Höchstwert, den **Sättigungsstrom** I_{as}.

Versuch: Man schalte den Heizstrom einer Gleichrichterröhre ein, lege ein Milliamperemeter in den Anodenstromkreis und messe den Anodenstrom bei schrittweise zunehmender Anodenspannung. Man findet, daß der Anodenstrom ebenfalls zunimmt und bei bestimmter Spannung einen Höchstwert erreicht. Graphisch dargestellt, ergibt sich die in Bild 136 gezeigte Kurve.

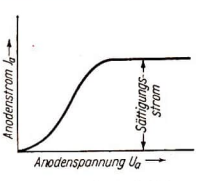


Bild 136. U_a, I_a-Kennlinie einer Elektronenröhre

Es entsteht nunmehr die Frage, weshalb der Anodenstrom mit steigender Spannung überhaupt zunimmt. Die bei konstanter Heiztemperatur emittierte Elektronenmenge müßte auch von einer kleinen Anodenspannung vollständig „abgesaugt" werden. Der Grund für die Abhängigkeit des Anodenstroms von der Anodenspannung liegt darin, daß die den Heizdraht umgebenden Elektronen den Draht positiv geladen zurücklassen. Es bildet sich zwischen Katode und Anode eine **negative Raumladung** aus (Bild 137). Gegenüber dieser Raumladungswolke ist der Heizdraht positiv

geladen; es geht von ihm ein elektrisches **Gegenfeld** aus, in welchem langsame Elektronen sogar wieder zur Katode zurückwandern und das nur von genügend schnellen Elektronen durchstoßen wird. Die von der Anode ausgehenden Feldlinien enden also zum Teil nicht auf der Oberfläche der Katode, sondern in dieser Raumladungswolke. Erst wenn der Sättigungsstrom erreicht ist, wenn also sämtliche von der Katode emittierten Elektronen abgesaugt werden, reicht das Hauptfeld bis an den Heizdraht.

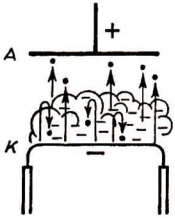


Bild 137. Wirkung der negativen Raumladungswolke zwischen Katode und Anode

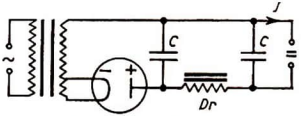


Bild 138. Schaltung einer Gleichrichterröhre

Einfache Dioden werden als **Gleichrichterröhren** geringer Leistung verwendet. Da der Strom nur von der Anode zur Katode fließen kann, wird aus der Wechselspannung eine pulsierende Gleichspannung, die im Takte der Wechselspannung schwankt. Man kann den entstehenden Strom als einen reinen Gleichstrom und eine ihm überlagerte Wechselkomponente betrachten. Zur **Glättung** schaltet man eine **Siebkette** in den Stromkreis (Bild 138). Die Siebkondensatoren (C) bedeuten für die Wechselkomponente gleichsam einen Kurzschluß (s. Abschn. 9.2.3.), während die Siebdrossel (Dr) den Wechselanteil zurückhält (s. Abschn. 9.2.2.).
Für größere Leistungen verwendet man **gasgefüllte Dioden.** Die zur Katode wandernden positiven Ionen neutralisieren die von den Elektronen gebildete Raumladung, wodurch der Anodenstrom wesentlich kräftiger wird.

7.4. Die Triode (Dreielektrodenröhre)

Die Triode ist eine Röhre, die außer der Katode und Anode noch eine dritte Elektrode, das **Gitter,** enthält. Dieses umgibt den Heizdraht in einigem Abstand in Form einer Wendel, während in weiterem Abstand die zylindrische Anode folgt (Bild 139).

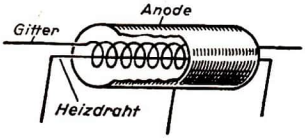


Bild 139. Die drei Elektroden einer Triode

Wird das Gitter von außen her negativ aufgeladen, so stößt es die ankommenden Elektronen ab und vermag den Anodenstrom völlig zu sperren, wenn die negative Gittervorspannung groß genug ist. Bei positiver Ladung unterstützt es die Wirkung der Anode, der Anodenstrom wird verstärkt. Man kann also mit Hilfe des Gitters den Anodenstrom weitgehend **steuern** (daher **Steuergitter**), ohne hierfür eine zusätzliche Leistung aufwenden zu müssen. Daher rührt die Verwendung der Triode als **Verstärkerröhre.**

Versuche: 1. Man lege zwischen Katode und Gitter eine Batterie, so daß sich die Spannung des Gitters gegenüber der Katode in einem Bereich von -10 bis $+10$ V einstellen läßt (Bild 140). Bei festliegender Anodenspannung stellt man nun verschiedene Gitterspannungen U_g ein und mißt mit einem Milliamperemeter jeweils den Anodenstrom I_a. Die graphische Darstellung des Ergebnisses zeigt Bild 141. Es stellt die sogenannte **U_g, I_a-Kennlinie** (Charakteristik) der Röhre dar. Das allmähliche Ansteigen des Anodenstroms hat dieselbe Ursache wie bei der Diode.

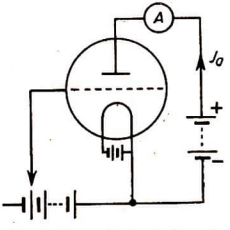


Bild 140. Messung des Anodenstroms I_a bei veränderlicher Gitterspannung

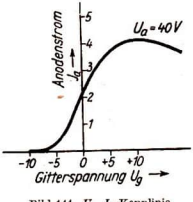


Bild 141. U_g, I_a-Kennlinie nach Schaltbild 140

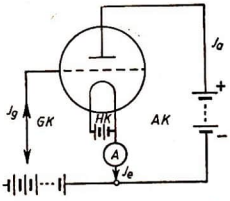


Bild 142. Messung der Gesamtemission I_e bei veränderlicher Gitterspannung. HK Heizkreis, GK Gitterkreis, AK Anodenkreis, I_g Gitterstrom, I_e Gesamtemission, I_a Anodenstrom (technische Stromrichtungen)

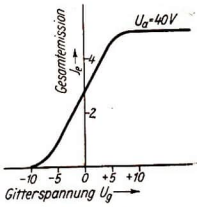


Bild 143. U_g, I_e-Kennlinie nach Schaltbild 142

2. Der Strommesser wird nunmehr nach Bild 142 eingeschaltet und die gleiche Meßreihe wie vorhin durchgeführt. Man erhält dabei eine neue Kennlinie mit durchweg höheren Anodenströmen (Bild 143). In diesem Fall wird nämlich der gesamte von der Katode emittierte Strom I_e gemessen, im ersten Fall nur der tatsächlich zur Anode gelangende Anteil I_a. Ein zweiter Anteil fließt als **Gitterstrom** I_g über das Gitter.

Es gilt demnach:

Gesamter Emissionsstrom I_e = Gitterstrom I_g + Anodenstrom I_a.

Verschiedene Anodenspannungen ergeben eine Schar von Kennlinien (Bild 144).

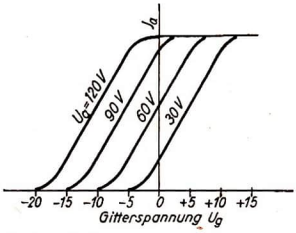


Bild 144. Kennlinien bei verschiedener Anodenspannung

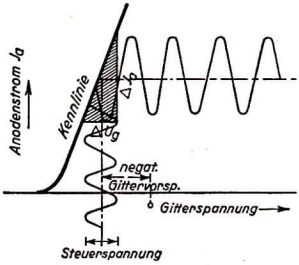


Bild 145. Steuerwirkung einer Verstärkerröhre

7.4.1. Die Verstärkerwirkung einer Triode

An das Gitter einer Triode werde nun eine kleine Wechselspannung gelegt. Im gleichen Takt muß dann auch der Anodenstrom schwanken. Aus dem Bild 145 der Kennlinie ersieht man, daß die Amplitude des Anodenstroms um so größer wird, je steiler die Kennlinie verläuft.

Die Verstärkung hängt von der Steilheit der Kennlinie ab.

Die Steilheit der Kennlinie ist gleich dem Tangens ihres Steigungswinkels, d. h. gleich dem Verhältnis einer kleinen Änderung ΔI_a des Anodenstroms zu einer entsprechenden Änderung ΔU_g der Gitterspannung.

(66) **Steilheit** (bei konstanter Anodenspannung): $\boxed{S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g}}$

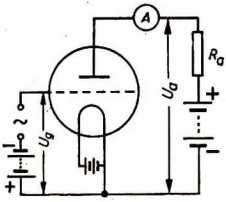


Bild 146
Verstärkung einer Wechselspannung

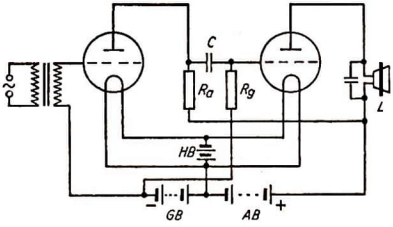


Bild 147. Schaltung eines zweistufigen Niederfrequenzverstärkers mit Widerstandskopplung. AB Anodenbatterie, GB Gitterbatterie, HB Heizbatterie L Lautsprecher C Kopplungskondensator

Durch entsprechende Wahl der Gittervorspannung muß man übrigens dafür sorgen, daß sich der Vorgang auf dem geraden Teil der Kennlinie abspielt. Andernfalls wird die dem Gitter zugeführte Spannung nicht formgetreu, sondern verzerrt übertragen.
Liegt im Anodenstromkreis nach Bild 146 ein äußerer Widerstand R_a, so entsteht in diesem der Spannungsabfall $U_a = I_a \cdot R_a$. Dann versteht man unter der

(67) **Spannungsverstärkung:** $$\boxed{v = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g}}$$

Hieraus ist zu ersehen, daß der äußere Widerstand R_a möglichst groß sein muß.
Bild 147 zeigt die Schaltung eines 2stufigen **Niederfrequenzverstärkers** mit der heute meist verwendeten **Widerstandskopplung.** Der Kondensator (C) hält die hohe Anodengleichspannung vom Gitter der zweiten Röhre fern und überträgt lediglich deren weiter zu verstärkende Schwankungen. Der **Gitterableitewiderstand** R_g (einige MΩ) leitet die sich auf dem Gitter ansammelnden Elektronen ab.

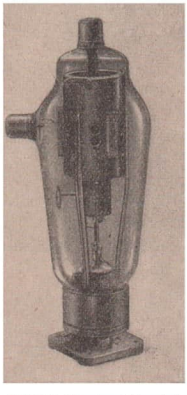


Bild 148. Thyratron (Stromtor)

7.4.2. Das Stromtor (Thyratron)

Das Thyratron ist eine gasgefüllte Triode, deren Anodenstrom ebenfalls mit Hilfe eines Gitters gesteuert wird (Bild 148). Allerdings läßt sich hiermit nur der Einsatz der Zündung lenken, die dann eintritt, wenn die negative Vorspannung des Gitters bis zu einem bestimmten Wert vermindert wird. Die einmal in Gang gesetzte Entladung kann vom Gitter her nicht wieder gelöscht werden. Erst wenn die Anodenspannung unter einen bestimmten Wert sinkt, reißt die Entladung ab. Man benutzt das Thyratron zum bequemen Schalten starker Ströme (z. B. in Schweißgeräten).

8. Das magnetische Feld

8.1. Grunderscheinungen des Magnetismus

8.1.1. Der Magnet

Die Erscheinungen des Magnetismus entdeckte man zuerst an dem in der Natur häufig vorkommenden **Magneteisenerz** (Ferrit Fe_3O_4), von dem man mitunter attraktive (anziehende) Stücke findet[1]). Sie haben die Eigenschaft, kleine eiserne Gegenstände anzuziehen.

[1]) Von einem dieser im Altertum berühmten Fundorte (Magnesia in Kleinasien) rührt auch das Wort „Magnet" her.

Jedermann kennt heute die aus hartem Stahl bestehenden stab-, nadel- oder hufeisenförmigen **Dauermagnete (permanente Magnete)** mit ihrer Eigenschaft, nicht nur Eisen, sondern auch Nickel und Kobalt anzuziehen.

Ein frei in der Mitte aufgehängter Magnet dreht sich stets mit dem einen Ende nach Norden. Man nennt dieses den **Nordpol** des Magneten, das andere Ende den **Südpol.**

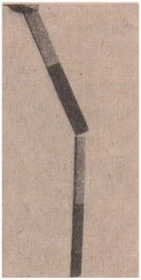


Bild 149. Entgegengesetzte Pole ziehen sich an

Der $\frac{\text{Nord}}{\text{Süd}}$ pol des Magneten weist nach $\frac{\text{Norden}}{\text{Süden}}$.

Bringt man einen zweiten, etwa gleich starken Magneten in die Nähe des beweglichen, so findet man (Bild 149):

Gleichartige Pole stoßen sich ab, ungleichartige Pole ziehen sich an.

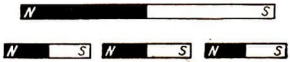


Bild 150. Beim Zerbrechen eines Magneten entstehen neue, selbständige Magnete

Wenn man einen Stabmagneten in zwei Stücke zerbricht, könnte man erwarten, je einen einzelnen Nord- und Südpol zu erhalten. Dies ist jedoch nicht der Fall:

Einzelne Magnetpole existieren nicht.

Vielmehr stellt jedes, auch das kleinste Bruchstück eines Magneten wieder einen selbständigen kleinen Magneten mit zwei Polen dar (Bild 150). Denkt man sich die Zerteilung immer weiter fortgesetzt, so gelangt man zur Vorstellung von gewiß sehr kleinen **Molekularmagneten,** aus denen sich jeder größere Magnet zusammensetzt[1]).

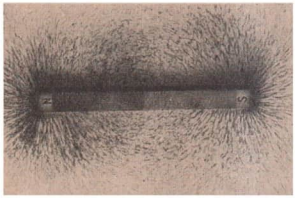


Bild 151. Feldlinien eines Stabmagneten

Bild 152. Feldlinien eines Hufeisenmagneten

[1]) Eigentliche Moleküle im modernen Sinn sind damit nicht gemeint. Die Bezeichnung soll nur andeuten, daß es sich um sehr kleine Elementarmagnete handelt.

8.1.2. Die magnetischen Feldlinien

Ein Magnet werde mit Papier bedeckt und dieses mit Eisenfeilspänen bestreut (Bilder 151, 152). Die Feilspäne ordnen sich zu charakteristischen Linien, den **magnetischen Feld- (oder Kraft-) Linien,** an, die äußerlich große Ähnlichkeit mit den elektrischen Feldlinien haben. Hinsichtlich ihrer Richtung hat man willkürlich festgesetzt:

Die magnetischen Feldlinien laufen außerhalb eines Magneten vom Nord- zum Südpol.

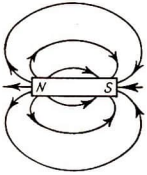


Bild 153. Pole und Richtung der Feldlinien

Sie treten aus dem Nordpol aus und gehen in weitem Bogen wieder in den Südpol hinein (Bild 153).
Hinsichtlich ihrer realen Existenz gilt dasselbe, was auch (S. 40) über die elektrischen Feldlinien gesagt wurde. Doch ist die Feldlinienvorstellung ein recht nützliches Hilfsmittel, um magnetische Vorgänge anschaulich darzustellen.

Die magnetischen Pole stellen nur jene Stellen dar, an denen die meisten Feldlinien aus dem Magneten austreten (bei einem Stabmagneten etwa $^1/_{12}$ Magnetlänge vom Ende entfernt).

Um Dauermagnete vor Beeinflussung zu schützen, legt man einen **Anker** aus Weicheisen vor ihre Pole. In diesem Fall existieren dann überhaupt keine Pole mehr, da nirgendwo Kraftlinien aus dem Kreis austreten.

Ein kleiner in das Feld gebrachter Magnet stellt sich stets in Richtung der Feldlinien ein.

Man kann daher mit einem kleinen Probemagneten stets die Feldrichtung feststellen.

Der Nordpol weist in Richtung der Feldlinien.

Bringt man ein Stück weiches Eisen (das selbst unmagnetisch ist) in ein Magnetfeld, so wird es vorübergehend magnetisch. Vorläufige einfache Deutung: Im unmagnetischen Eisen liegen die Molekularmagnete ungeordnet durcheinander. Im Feld folgen sie dem Zuge der Kraftlinien und bilden, einsinnig geordnet, einen ganzen Magneten. Man nennt dies **magnetische Influenz** (Bild 154).
Wenn man aber ein Stück noch unmagnetischen gehärteten Stahls (z. B. eine Stricknadel) mit einem Magneten bestreicht, so bleibt es dauernd magnetisch. Die Molekularmagnete behalten ihre neue Lage für immer bei.

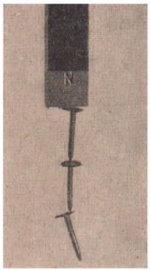
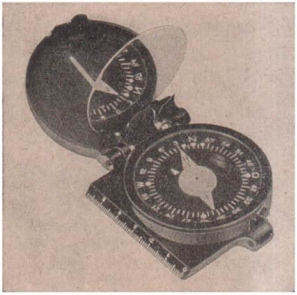


Bild 154
Magnetische Influenz

8.1.3. Das magnetische Erdfeld

Der allgemein bekannte **Kompaß** enthält eine Magnetnadel, die sich in einer Pinne über einer Windrose leicht drehen kann (Bild 155). Aus der Tatsache, daß sie sich stets nach Norden richtet, geht hervor, daß überall an der Erdoberfläche ein **natürliches Magnetfeld** besteht, dessen Feldlinien



von Süden nach Norden verlaufen. Daher befindet sich in der Nähe des geographischen Nordpols der **magnetische Südpol** der Erde.[1])

Bild 156 Inklination

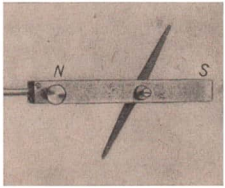


Bild 155 Handkompaß

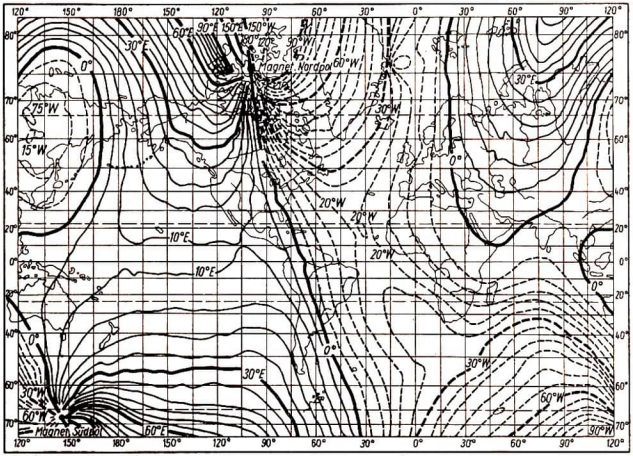


Bild 157. Linien gleicher Deklination (Isogonen) für 1940 ——— = östlich, ····· = westlich. MdI der DDR Nr. 2134/5

[1]) Über die Ursache des Erdmagnetismus weiß man noch nichts Bestimmtes. Die ältere Hypothese, er rühre von größeren Eisenmassen im Erdinnern her, hat an Wahrscheinlichkeit verloren, seitdem man weiß, daß im Erdinnern eine Temperatur von einigen tausend Grad herrscht und Eisen bei 769 °C seinen Magnetismus verliert.

Nach Amundsen befand sich dieser 1903 auf der Halbinsel Boothia Felix bei 70° 30′ n. Br. und 95° 30′ w. L. Seine Lage wandert mit der Zeit langsam. Die Linien des Erdfeldes weisen i. a. nicht genau nach diesem Punkt, aber auch nicht genau nach dem geographischen Nordpol:

Deklination *D* (Mißweisung) = Abweichung von der geographischen Nordrichtung.

D betrug z. B. im 1. Halbjahr 1958 in Leipzig 2°15′ West und nimmt in unseren Breiten jährlich um etwa 0,17° ab.
Läßt man eine Magnetnadel in nordsüdlicher Richtung um eine waagerechte Achse schwingen, so weist ihr Nordpol schräg nach unten (Bild 156):

Inklination = Abweichung von der Horizontalen.

(1. Halbjahr 1958 in Leipzig 66°40′.) In dieser Lage zeigt die Magnetnadel die eigentliche Richtung des Erdfeldes an. An den magnetischen Polen zeigt sie senkrecht nach unten, am magnetischen Äquator (der ebenfalls nicht mit dem geographischen zusammenfällt) liegt sie waagerecht.

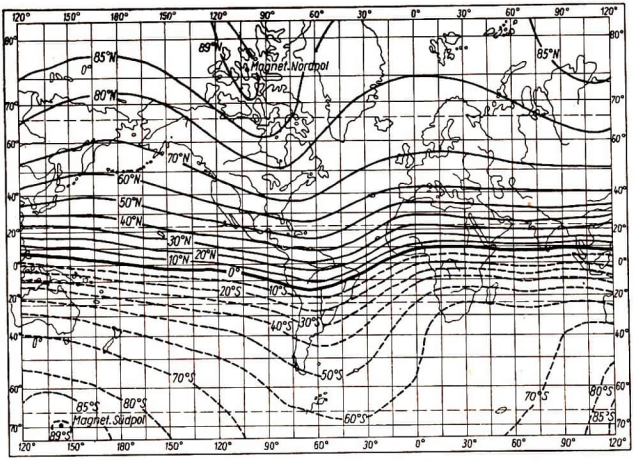


Bild 158. Linien gleicher Inklination (Isoklinen) für 1940. MdI der DDR Nr. 2134/5

Einen allgemeinen Überblick über diese Verhältnisse geben die Karten der **Isogonen** (Verbindungslinien aller Punkte gleicher Deklination, Bild 157) und **Isoklinen** (Linien gleicher Inklination, Bild 158). Genauere Beobachtungen werden in den **erdmagnetischen Observatorien** (u. a. in Niemegk, Bez. Potsdam) durchgeführt.

8.2. Elektromagnetismus

8.2.1. Das Magnetfeld stromdurchflossener Spulen

Früher glaubte man, daß die magnetischen Eigenschaften der Stoffe eine selbständige physikalische Erscheinung darstellten. Wir werden aber sehen, daß die magnetischen Vorgänge mit elektrischen Vorgängen zusammenhängen, daß jeder

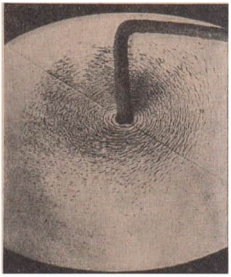


Bild 159. Magnetfeld eines geraden Leiters

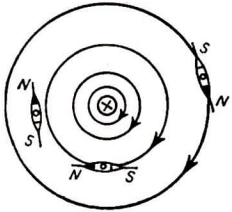


Bild 160. Einstellung eines kleinen Probemagneten im magnetischen Feld. Der Strom fließt von oben durch die Zeichenebene nach unten

elektrische Vorgang zugleich ein magnetischer ist und umgekehrt.

Versuch: Durch die Mitte einer waagerechten Pappscheibe geht senkrecht ein Draht, durch den ein Strom von einigen Ampere fließt. Streut man jetzt Eisenfeilspäne darauf, so ordnen sich diese zu konzentrischen Kreisen an (Bild 159). Eine kleine, um den Draht geführte Magnetnadel stellt sich tangential zu diesen Kreisen (Bild 160) und ergibt die

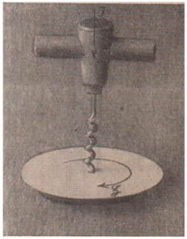


Bild 161. Korkenzieherregel für Stromrichtung und Magnetfeld

Bild 162. Faustregel

(68) **Korkenzieherregel** (für Stromrichtung und Feldumlauf): **Schraubt man einen Korkenzieher in Richtung des Stromes vorwärts, so gibt die Drehrichtung die Richtung der magnetischen Feldlinien an** (Bild 161).

Dasselbe besagt die

Faustregel: Umfaßt man den Stromleiter mit der rechten Hand und zeigt der Daumen in Stromrichtung, so geben die gekrümmten Finger die Richtung des magnetischen Feldes an (Bild 162).

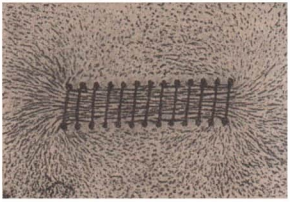


Bild 163. Magnetische Feldlinien einer Zylinderspule (nach Pohl)

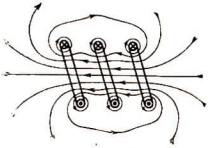


Bild 164. Magnetische Feldlinien von 3 stromdurchflossenen Windungen

Formt man den Draht zu einer Spule, so kann man mittels Feilspäne feststellen, daß ihr Inneres von **parallelen Feldlinien** durchzogen ist (Bild 163). Sie kommen dadurch zustande, daß die kreisförmigen Feldlinien der einzelnen Drähte zu einem zusammenhängenden Bündel verschmelzen (Bild 164). An den Enden der Spule quellen die Feldlinien bogenförmig heraus, laufen außerhalb der Spule zurück, um am anderen Ende wieder einzutreten.

Das Magnetfeld im Innern einer langen Zylinderspule ist praktisch homogen.

An den Enden ist dies nicht mehr der Fall.
Die stromdurchflossene Spule verhält sich damit ähnlich wie ein Stabmagnet. Man nennt sie auch ein **Solenoid.** Mit einer herangeführten Kompaßnadel findet man am einen Ende einen Nord-, am anderen einen Südpol.
Daß das Solenoid wie ein Magnet wirkt, hat zuerst Ampère gezeigt. Er hängte eine stromdurchflossene Spule leicht drehbar auf und stellte fest, daß sie sich wie eine Kompaßnadel in Richtung des Erdfeldes einstellt (Bild 165).

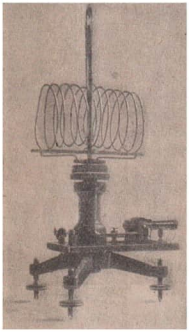


Bild 165. Stromdurchflossene Spule dreht sich in Richtung des Erdfeldes

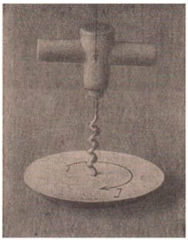


Bild 166. Korkenzieherregel für Feld- und Stromrichtung in den Windungen einer Spule

Jede stromdurchflossene Spule wirkt wie ein Stabmagnet.[1])

[1]) Dies gilt jedoch nicht genau, weil beim Stabmagneten Feldlinien nicht nur an den Enden, sondern auch an den Längsseiten austreten.

Als Merkregel gilt hier ebenfalls eine

(69) **Korkenzieherregel** (für Feldrichtung und Stromumlauf) (Bild 166): **Setzt man einen Korkenzieher auf die Vorderseite einer Zylinderspule und dreht ihn in Richtung des die Windungen durchfließenden Stromes, so schraubt er sich in Richtung der Feldlinien vorwärts.**

Leicht läßt sich auch die **Polregel** (Bild 167) merken.

Bild 167. Polregel. Die Pfeile geben die Magnetpole und zugleich die Stromrichtungen an

Alle diese Regeln besagen im Grunde genommen ein und dasselbe und gehen aus der zuerst genannten Korkenzieherregel hervor.

Wenn man eine lange Zylinderspule zu einem Ring zusammenbiegt, entsteht eine **Ringspule,** das **Toroid.** Die aus einer beiderseits offenen Spule austretenden Feldlinien sind beim Toroid ringförmig in sich geschlossen (Bild 168). Nirgendwo treten Kraftlinien aus.

Der Außenraum einer Ringspule ist feldfrei.

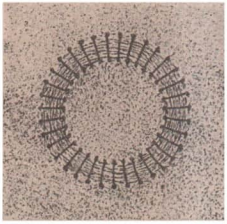


Bild 168. Magnetische Feldlinien einer Ringspule (nach Pohl)

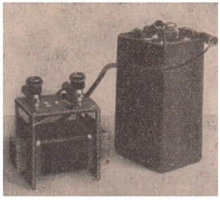


Bild 169. Elektromagnet

8.2.2. Der Elektromagnet und seine Anwendungen

Der Magnetismus einer stromdurchflossenen Spule wird wesentlich stärker, wenn man sie mit einem Kern aus weichem Eisen ausfüllt.

Das vom Strom erzeugte Magnetfeld wird durch Eisen verstärkt.

Man spricht dann von einem **Elektromagneten** (Bild 169). Die im gewöhnlichen Eisen ungeordnet durcheinanderliegenden Molekularmagnete werden dabei einheitlich ausgerichtet (Bild 170). Beim Abschalten des Stromes verschwindet der Magnetismus weichen Eisens sofort wieder bis auf einen geringfügigen Rest, den **remanenten Magnetismus.**

Verwendet man anstatt weichen Eisens Stahl, so bleibt dieser dauernd magnetisch. Man kann also auf leichte Weise einen permanenten Magneten dadurch herstellen, daß man ihn für kurze Zeit in eine stromdurchflossene Spule steckt.

Weiches Eisen wird nur vorübergehend, Stahl aber bleibt dauernd magnetisch.

Der Elektromagnet ist der Hauptbestandteil vieler bekannter Geräte und Instrumente.

1. Die elektrische Klingel (Bild 171). Ein U-förmiger Weicheisenkern trägt zwei Spulen (S) von entgegengesetztem Wicklungssinn (Polregel!). Beim Drücken des Klingelknopfes wird der Stromkreis geschlossen, wodurch der Anker (A) angezogen wird. Dadurch löst sich die Feder von der Kontaktspitze (K) und unterbricht den Strom. Beim Zurückschnellen des Klöppels wird der Strom wieder geschlossen usw. Einen solchen selbsttätigen **Unterbrecher** nennt man auch einen **Wagnerschen Hammer.**

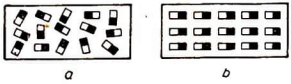


Bild 170. Hilfsvorstellung der Molekularmagnete
a) gewöhnliches Eisen, b) magnetisches Eisen

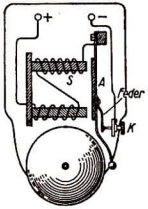


Bild 171. Elektrische Klingel

2. Der Summer ist wie eine elektrische Klingel gebaut, jedoch ohne Klöppel und Glocke. Da die schwingende Masse sehr klein ist, entsteht eine höhere Unterbrecherfrequenz und damit ein hörbarer Ton.

3. Das Relais (Bild 172) ist ein sehr empfindlicher Elektromagnet, dessen Anker den Kontakt eines zweiten Stromkreises von größerer Leistung betätigt. Bei der Schaltung mit **Arbeitsstrom** wird ein zweiter Stromkreis geschlossen, bei der **Ruhestromschaltung** wird ein zuvor geschlossener Stromkreis vom Relais geöffnet.

4. Der Morsetelegraf (Bild 173) besteht aus der **Morsetaste** am Sendeort und dem **Schreibapparat** am Empfangsort. Beim Betätigen der Taste wird der Anker des Schreibers angezogen, wodurch ein Farbrädchen gegen einen zwischen zwei Walzen bewegten Papierstreifen drückt. Hierbei entstehen Striche oder Punkte.

5. Der Fernsprecher besteht in der Hauptsache aus dem **Mikrofon** und dem **Fernhörer** (Bild 174). Das Mikrofon enthält einen kleinen Kohleklotz, dessen Vertiefungen

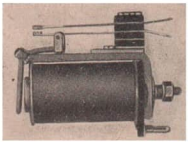


Bild 172. Relais

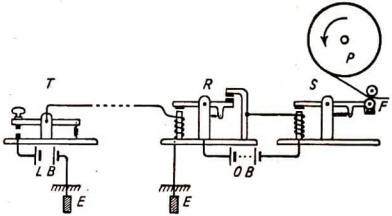


Bild 173. Morsetelegraf mit Rückleitung des Stromes über die Erde E. T Taste, LB Linienbatterie, OB Ortsbatterie, R Relais, S Schreiber, F in Farbe tauchendes Schreibrädchen, P Papierrolle

Morsealphabet

a · —	g — — ·	o — — —	ü · · — —	3 · · · — —
ä · — · —	h · · · ·	ö — — — ·	v · · · —	4 · · · · —
b — · · ·	i · ·	p · — — ·	w · — —	5 · · · · ·
c — · — ·	j · — — —	q — — · —	x — · · —	6 — · · · ·
ch — — — —	k — · —	r · — ·	y — · — —	7 — — · · ·
d — · ·	l · — · ·	s · · ·	z — — · ·	8 — — — · ·
e ·	m — —	t —	1 · — — — —	9 — — — — ·
f · · — ·	n — ·	u · · —	2 · · — — —	0 — — — — —

mit Kohlekörnchen gefüllt sind, die anderseits die Membran berühren. Durch Membran, Kohlegrieß und Köhleklotz fließt der Strom einer Batterie. Beim Besprechen gerät die Membran in Schwingungen, wodurch starke Widerstandsänderungen eintreten und der Strom entsprechend schwankt. Über die Leitung wird dieser Strom dem Fernhörer zugeführt, der einen kleinen Elektromagneten und in geringem Abstand eine Membran aus Stahlblech enthält. Infolge der Stromschwankungen gerät diese in Schwingungen, die denen der Mikrofonmembran genau entsprechen. Der Kern des Fernhörermagneten ist ein Dauermagnet, wodurch die Membran eine Vorspannung erhält und die Empfindlichkeit erhöht wird.

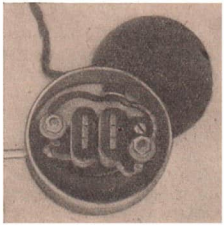


Bild 174. Telefonhörer

6. Das Nadelgalvanometer (Bild 175) ist ein einfacher, heute kaum noch benutzter Strom- oder

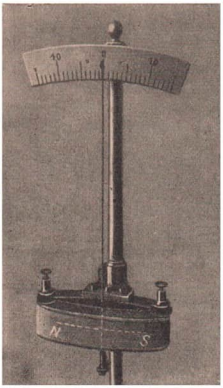


Bild 175. Einfaches Nadelgalvanometer

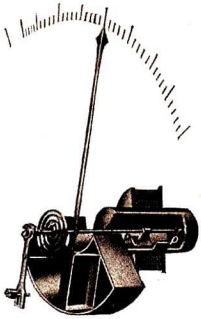


Bild 176. Weicheiseninstrument mit Luftdämpfung. Die beiden Eisenplättchen (P) werden gleichnamig magnetisch und stoßen sich ab

Spannungsmesser. Eine stählerne Magnetnadel ruht leicht drehbar im Innern einer Spule. Bei Stromschluß schlägt die Nadel aus und sucht sich in Richtung der Feldlinien (Spulenlängsachse) einzustellen. Nachteil: Der Magnetismus der Nadel ist leicht Störungen ausgesetzt (Einfluß des magnetischen Erdfeldes).

7. Das Weicheiseninstrument (Bild 176) besteht aus einer Spule, in welcher sich bei Stromfluß ein festes und ein bewegliches Eisenplättchen gleichsinnig magnetisieren. Dadurch wird das bewegliche abgestoßen und bewegt einen Zeiger. Da bei Zuführung von Wechselstrom beide Plättchen stets gleichsinnig beeinflußt werden, läßt sich dieses, auch Dreheiseninstrument genannte Meßgerät für Wechselstrom verwenden. Nachteil: ungleichmäßige Teilung der Skala, da die Empfindlichkeit bei kleinen Stromstärken gering ist.

8.3. Die magnetischen Feldgrößen

8.3.1. Die magnetische Feldstärke

Wie sich mit einfachen Versuchen zeigen läßt, hängt die Stärke des magnetischen Feldes von der Stärke des Stromes I ab. Man kann das Feld aber auch dadurch kräftiger machen, daß man bei gleicher Stromstärke und Spulenlänge eine größere Zahl von Windungen aufwickelt (Bild 177).

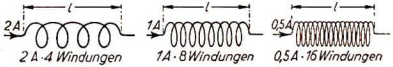


Bild 177. Gleiche Feldstärke bei gleicher Spulenlänge und gleicher Amperewindungszahl

Eine Vervielfachung der Stromstärke verstärkt das Feld bei konstanter Spulenlänge ebenso wie eine gleiche Vervielfachung der Windungszahl.

Es kommt also auf das Produkt aus der Stromstärke I und der Windungszahl w an. Man nennt es die **Amperewindungszahl** Iw. Dagegen zeigt sich ein umgekehrter Einfluß der Spulenlänge l. Bei gleichbleibender Amperewindungszahl wird das magnetische Feld um so schwächer, je länger die Spule ist. Damit definiert man als

magnetische Feldstärke im Innern einer Ringspule oder langen Zylinderspule:

(70) $$\boxed{H = \frac{Iw}{l}}$$ (w Windungszahl, l Länge der Spule).

Dieser Ausdruck gilt genau nur für eine Ringspule, da aus ihr keine Feldlinien austreten und ihr Feld vollständig homogen ist. An den Enden einer Zylinderspule jedoch treten die Feldlinien auseinander, so daß das Feld hier schwächer wird. Im Außenraum vollends verteilen sich die Feldlinien auf ein sehr großes Gebiet, wo die Feldstärke entsprechend gering ist.

Aus Gleichung (70) folgt die

Maßeinheit der magnetischen Feldstärke $\mathfrak{H}$: $\boxed{\begin{array}{c}1\ \mathrm{A/m}\\ (1\ \text{Amperewindung je m})\end{array}}$ [1])

[1]) Veraltet und gesetzlich nicht mehr zulässig ist die Einheit „Oersted": $1\ \mathrm{Oe} = \frac{1000}{4\pi}\ \mathrm{A/m}$.

Die Einheit A/m wird ganz allgemein für magnetische Felder aller Art verwendet, also nicht nur für Zylinder- oder Ringspulen, für die sie zunächst am geeignetsten erscheint.

Im inhomogenen Feld hat die Feldstärke in jedem Punkt einen anderen Wert, nicht nur der Größe, sondern auch der Richtung nach. Die magnetische Feldstärke $\mathfrak{H}$ ist ebenso wie die elektrische Feldstärke $\mathfrak{E}$ ein Vektor, der zugleich die Richtung der durch den betreffenden Feldpunkt laufenden Feldlinie angibt.

In den meisten Fällen wird es im folgenden nur auf deren Betrag ankommen, wofür man dann den lateinischen Buchstaben H verwendet.

8.3.2. Die magnetische Spannung

Eine weitere Größe des magnetischen Feldes ergibt sich durch folgenden Vergleich. Die elektrische Spannung zwischen den Platten eines Kondensators ist nach (38) gleich dem Produkt aus der Feldstärke E und dem Plattenabstand d, also

elektrische Spannung U = elektrische Feldstärke • Länge der Feldlinien

$$U = El,$$

sofern längs des Weges l die Feldstärke konstant ist.
In genau entsprechender Weise kann man auch erklären:

magnetische Spannung U_{magn} = magnetische Feldstärke • Länge der Feldlinien

$$U_{\text{magn}} = Hl,$$

sofern längs des Weges l die Feldstärke konstant ist.

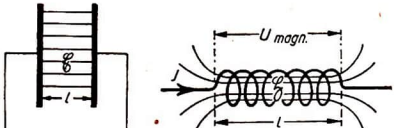


Bild 178. a) Elektrische und b) magnetische Spannungsquelle

Zwischen den Enden einer Zylinderspule besteht demnach eine magnetische Spannung ebenso wie eine elektrische Spannung zwischen den Platten eines Kondensators (Bild 178). Offenkundig wird dabei U_{magn} von dem in der Spule kreisenden Strom hervorgerufen, weshalb die Spule eine **magnetische Spannungsquelle** darstellt, ebenso wie das galvanische Element eine elektrische Spannungsquelle ist. Damit ergibt sich als

Maßeinheit der magnetischen Spannung: $\boxed{1\ \text{A}}$

Der Begriff der magnetischen Spannung ist allerdings nicht so allgemein bekannt wie die elektrische Spannung, zumal magnetische Spannungsmesser nicht so ver-

breitet sind wie die elektrischen und natürlich auf einem völlig anderen Prinzip beruhen. Wenn man Gleichung (70) umformt:

$$\boxed{Hl = Iw},$$

so stellt dieser Ausdruck die gesamte magnetische Spannung einer Ringspule dar; denn die Feldstärke H ist entlang der Feldlinie von der Länge l konstant. Die Amperewindungszahl Iw nennt man daher auch die **magnetomotorische Kraft** (MMK) der Spule.

Bei einer Zylinderspule ist es komplizierter. Die magnetomotorische Kraft ist wieder durch die Amperewindungszahl gegeben, doch ist die Feldstärke H nur im Spuleninnern konstant, so daß $H_1 l_1$ (Bild 179) nur einen Teil der Gesamtspannung darstellt. Im Außenraum ist die Feldstärke wesentlich geringer und überall verschieden. Denkt man sich den weiteren Verlauf der Feldlinie in einzelne Teilstücke von jeweils konstantem H zerlegt, so erhält man lauter einzelne magnetische „Spannungsabfälle", so daß schließlich ihre Gesamtsumme gleich der magnetomotorischen Kraft Iw sein muß:

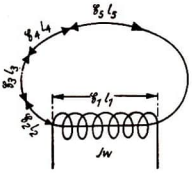


Bild 179
Magnetomotorische Kraft Iw und die magnetischen Teilspannungen Hl

(71) $$\boxed{\Sigma Hl = Iw}$$

In dieser Gleichung kommt die 2. Kirchhoffsche Regel zum Ausdruck, die hier sinngemäß auf den magnetischen Kreis übertragen ist:

Die Summe aller magnetischen Spannungsabfälle längs einer geschlossenen Feldlinie ist gleich der magnetomotorischen Kraft, welche diese Feldlinie erzeugt.

8.3.3. Die Induktion

Versuch: Im Innern einer Zylinderspule **(Feldspule)** befinde sich eine zweite kleinere Drahtschleife, deren Enden mit einem langsam schwingenden, empfindlichen Galvanometer (S. 123) verbunden sind (Bild 180). Solange in der Feldspule ein konstanter Strom fließt, geschieht nichts. Wenn man aber den Strom der Feldspule abschaltet, zeigt das Galvanometer einen kurzdauernden **Spannungsstoß.** Beim Wiedereinschalten tritt ein zweiter Spannungsstoß von entgegengesetzter Richtung auf. Man nennt diesen Vorgang **Induktion** und die zweite Spule die **Induktionsspule.**

Wir werden uns im Abschnitt 8.6. mit dieser Erscheinung ausführlicher beschäftigen. Vorläufig sei nur folgendes festgestellt:

Während des Entstehens und Vergehens eines magnetischen Feldes wird in einer benachbarten Spule eine Spannung induziert.

Die Spannung ist, wie sich mit weiteren Versuchen bestätigen läßt, der von der Induktionsschleife umfaßten Fläche proportional, also z. B. größer, wenn man sie auf dem äußeren Umfang der Feldspule aufbringt.

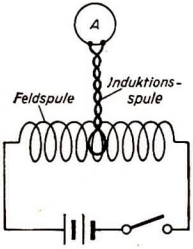


Bild 180. Induktionsversuch

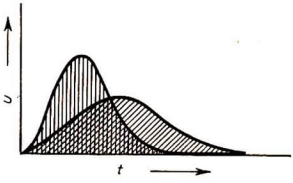


Bild 181. Zwei Spannungsstöße gleicher Größe, aber verschiedener Zeitdauer (gleiche Flächeninhalte)

Ein solcher Spannungsstoß sieht etwa so aus, wie Bild 181 zeigt. Läßt man den Strom der Feldspule nur langsam zu- oder abnehmen, so findet man, daß die Spannung zwar nicht so hoch ansteigt, dafür aber länger anhält. Der Flächeninhalt unter der Kurve (die zeitliche Summe aller Augenblicksspannungen) aber bleibt der gleiche.

Die Größe des induzierten Spannungsstoßes (des Zeitintegrals der Spannung) ist unabhängig von der Art des Ein- oder Ausschaltens des magnetischen Feldes.

Da er ein Produkt aus Spannung U und Zeit t darstellt, drückt man ihn in **Voltsekunden** (Vs) aus. Es liegt daher nahe, mit Hilfe dieses Spannungsstoßes die Stärke eines Magnetfeldes zu messen.

Da aber der Spannungsstoß noch von der Größe der Induktionsschleife abhängt, bezieht man ihn für diesen Zweck auf 1 m² (man denke sich demnach eine Drahtschleife von 1 m² Flächeninhalt, die so in die Feldspule gebracht wird, daß sie senkrecht von den Feldlinien durchsetzt wird) und erhält so die

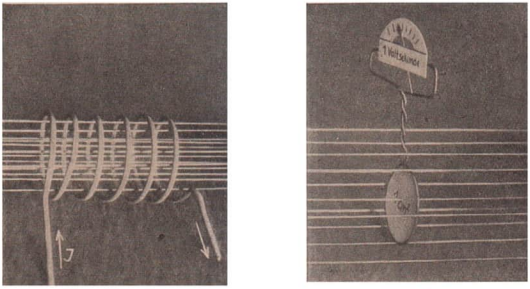
Maßeinheit der Induktion $\mathfrak{B}$: $\boxed{1\ \mathrm{Vs/m^2}}$

In dieser Weise ergibt sich eine zweite Möglichkeit, die Stärke eines magnetischen Feldes auszudrücken, indem man an die Wirkung denkt, die es bei seinem Entstehen oder Vergehen auszulösen vermag. Die schon besprochene Feldstärke $\mathfrak{H}$ mißt das Feld hinsichtlich seiner Ursache, während die Induktion $\mathfrak{B}$ es nach seiner Wirkung beschreibt. Beide Beschreibungsweisen sind gleichwertig. Beiden Größen gibt man die Richtung der Feldlinien bei, so daß auch die Induktion $\mathfrak{B}$ ein Vektor ist, der in die Richtung der durch den betrachteten Feldpunkt laufenden Feldlinie weist (Bild 182).

Man erinnere sich hierbei, daß auch das elektrische Feld in zweifacher Weise (elektrische Feldstärke $\mathfrak{E}$ und Verschiebungsdichte $\mathfrak{D}$) beschrieben werden kann.

Auch hier ergibt sich die Notwendigkeit, die beiden Feldgrößen $\mathfrak{B}$ und $\mathfrak{H}$ ineinander umzurechnen, was mit Hilfe eines Proportionalitätsfaktors μ_0 geschieht:

(73) $$\boxed{\mathfrak{B} = \mu_0 \mathfrak{H}}$$



a b

Bild 182. Die beiden Maßgrößen des magnetischen Feldes (modellmäßig)
a) Feldstärke von 1 A/cm b) Induktion von 1 Vs/cm²

Der Faktor μ_0 muß notwendigerweise die Maßeinheit $\frac{\text{Vsm}}{\text{m}^2\,\text{A}} = \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$ haben und heißt

(74) **Induktionskonstante:** $\boxed{\mu_0 = 1{,}256 \cdot 10^{-6}\ \text{Vs/Am}}$ [1])

Bei technischen Berechnungen wird für die Induktion noch vielfach die Einheit „Gauß" (G) benutzt, die nach dem Gesetz vom 14. 8. 1958 aber nicht mehr zulässig ist.

$$\boxed{10^{-4}\ \text{Vs/m}^2 = 1\ \text{G}}$$

8.3.4. Der magnetische Fluß

In einem homogenen Feld (z. B. im Innern einer Ringspule) hat die Induktion an allen Feldpunkten denselben Wert. Denkt man sich irgendeinen Teil des Feldquerschnittes herausgeschnitten oder auch den ganzen Feldquerschnitt F, so kann man sich leicht vorstellen, wie er von den Feldlinien senkrecht durchsetzt wird. Das Produkt aus der Induktion $\mathfrak{B}$ und der von ihr rechtwinklig durchsetzten Fläche nennt man den

(75) **magnetischen Fluß** (oder kurz: **Kraftfluß**): $\boxed{\Phi = \mathfrak{B}F}$

und die

Einheit des magnetischen Flusses Φ: $\boxed{1\ \text{Vs (Voltsekunde)} = 1\ \text{Wb (Weber)}}$

Von ihm ausgehend, bezeichnet man deshalb die Induktion häufig auch als **Kraftflußdichte** und meint damit eben den auf die Flächeneinheit (1 m²) entfallenden Anteil des Gesamtflusses Φ.

[1]) Genauere Begründung des Zahlenwertes S. 127.

In der Technik wird noch häufig die (nicht mehr zulässige) CGS-Einheit des magnetischen Flusses, das „Maxwell" (M), gebraucht:

$$\boxed{1\ \mathrm{M} = 10^{-8}\ \mathrm{Vs\ (Wb)}}$$

Zusammenfassend seien die einander entsprechenden elektrischen und magnetischen Feldgrößen gegenübergestellt:

Elektrisches Feld	Maßeinheit	Magnetisches Feld	Maßeinheit
Feldstärke $\mathfrak{E}$	V/m	Feldstärke $\mathfrak{H}$	A/m
Verschiebungsdichte $\mathfrak{D}$	As/m²	Induktion $\mathfrak{B}$	Vs/m²
Verschiebungsfluß Q	As	magnetischer Fluß Φ	Vs
Verschiebungskonstante ε_0	As/Vm	Induktionskonstante μ_0	Vs/Am

Ein Vergleich zeigt, daß jede magnetische Größe aus der ihr entsprechenden elektrischen durch Vertauschung von Volt mit Ampere entsteht. Dies zeigt eindringlich die enge gegenseitige Bezogenheit von elektrischem und magnetischem Feld.

8.4. Das magnetische Feld in stofflichen Medien

8.4.1. Die Permeabilität

Versuch: In eine Zylinderspule schiebe man einen Eisenkern. Beim Einschalten des Stromes zeigt sich die in der Induktionsschleife auftretende Wirkung (Spannungsstoß) um ein Vielfaches größer als bei leerer Feldspule:

Beim Einbringen von Eisen in das magnetische Feld nimmt die Induktion zu.

Diese Wirkung ist nicht nur beim Eisen so auffällig. Stoffe, die in dieser Hinsicht dem Eisen ähneln, bezeichnet man als

ferromagnetisch = eisenähnlich.

Ferromagnetisch sind Eisen, Nickel, Kobalt und Gadolinium.
Aber auch alle übrigen Stoffe beeinflussen die Induktionswirkung, allerdings meist nur in verschwindend geringem Maße. Als Maßzahl dieses Verhaltens dient die

$$\textbf{(relative) Permeabilität } \mu = \frac{\textbf{Induktion der gefüllten Feldspule}}{\textbf{Induktion der leeren Feldspule}}\ [\text{dimensionslos}]$$

(gilt genau nur für die Ringspule).

Damit wird in allgemeiner Hinsicht

$$\boxed{\mathfrak{B} = \mu\mu_0\mathfrak{H}} \tag{76}$$

Der obenerwähnte Ausdruck $\mathfrak{B} = \mu_0\mathfrak{H}$ gilt daher, strenggenommen, nur für das Vakuum. Bei den nicht ferromagnetischen Stoffen unterscheidet sich jedoch μ kaum von 1 (Luft z. B. $\mu = 1{,}0000004$):

Für Luft und die übrigen nicht ferromagnetischen Stoffe ist μ praktisch gleich 1.

Permeabilität μ ferromagnetischer Legierungen

Schmiedeeisen	bis 5000
Hyperm (75 Fe, 20 Cr, 5 Al)	bis 10000
Heuslersche Legierung (30 Mn, 70 Cu, Al, Sn, Bi oder Sb)	bis 40
Reines Eisen	Anfangspermeabilität 400[1])
Permalloy (22 Fe, 78 Nickel)	Anfangspermeabilität 1200 (Bild 183)

Bemerkenswert ist, daß auch gewisse Legierungen, die weder Fe noch Ni oder Co enthalten, magnetisch werden können.
Oberhalb einer bestimmten Temperatur **(Curie-Temperatur)** verlieren ferromagnetische Stoffe ihre magnetischen Eigenschaften vollständig:

Curie-Punkte

Eisen	769 °C
Kobalt	1075 °C
Nickel	360 °C
Heuslersche Legierung (je nach Zusammensetzung)	60···380 °C

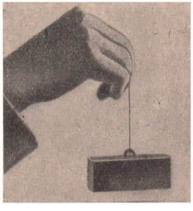


Bild 183. Kleiner Dauermagnet aus Vicalloy (Fe, Co, V) trägt das Vielfache seines eigenen Gewichtes

8.4.2. Magnetisierungskurve und Hysteresis

Die Permeabilität μ spielt rechnerisch dieselbe Rolle wie die Dielektrizitätskonstante ε [vgl. Formel (76) mit (59)]. Ein wesentlicher Unterschied besteht aber darin:

Die Permeabilität ferromagnetischer Stoffe hat keinen konstanten Wert, sondern hängt von der jeweiligen Feldstärke ab.

Beispiel: Bei einem Induktionsversuch mit einer eisengefüllten Spule ergibt sich bei einer Feldstärke von 1000 A/m eine Induktion von 1,3 Vs/m². Bei Verdoppelung des Feldstromes hat die Induktion nicht etwa den doppelten Wert, sondern nur 1,43 Vs/m². (Derartige Zahlen hängen stark von der jeweiligen Eisensorte ab!) Im ersten Fall erhält man nach (76)

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{1{,}3\ \mathrm{Vs\,Am\,m}}{1{,}256 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{Vs\,m^2\,1000\,A}} = 1035,$$

im zweiten in entsprechender Weise jedoch nur $\mu = 570$.

Die Permeabilität ferromagnetischer Stoffe ist der Feldstärke nicht proportional.

Stellt man den Zusammenhang von Feldstärke H und Induktion B graphisch dar, so erhält man eine für jede Eisensorte charakteristische **Magnetisierungskurve** (Bild 184).
Aus der Kurve sieht man, daß bei zunehmender Feldstärke die Induktion immer langsamer ansteigt. Der obere Teil der Kurve läuft in eine sanft ansteigende Gerade aus, die Induktion nimmt mit weiter wachsender Feldstärke nur noch langsam zu.

[1]) Die Anfangspermeabilität besteht bei sehr kleiner Feldstärke.

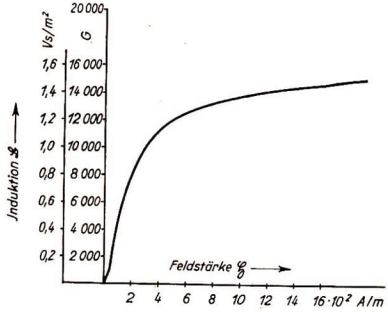


Bild 184. Magnetisierungskurve von Dynamoblech

Man sagt dann, das Eisen ist in diesem Gebiet **magnetisch gesättigt.** Berechnet man für jeden Kurvenpunkt nach dem vorstehenden Beispiel die Permeabilität μ, so erreicht diese vor dem „Knie" der Magnetisierungskurve einen Höchstwert und nimmt dann immer weiter ab.

Es sei jetzt angenommen, die Induktion B einer Eisenprobe werde bei schrittweiser Erhöhung der Feldstärke H gemessen. War die Probe vorher unmagnetisch, so entsteht dabei die in Bild 185 angegebene Kurve AB. Man nennt sie die jungfräuliche oder **Neukurve.** Nach Erreichen der magnetischen Sättigung werde die Feldstärke schrittweise wieder herabgesetzt. Man könnte erwarten, daß jetzt die alte Kurve einfach rückwärts durchlaufen werde. Statt dessen aber entsteht die Kurve BC, die oberhalb von AB liegt.

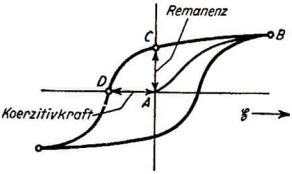


Bild 185. Hysteresisschleife einer harten Stahlsorte

Wenn die Feldstärke den Wert 0 erreicht hat, ist noch eine ganz beträchtliche Induktion AC vorhanden. Diesen B-Wert nennt man die **Remanenz** (zurückbleibender Magnetismus). Erst bei neuerlicher, entgegengesetzter Magnetisierung gelingt es, die Eiseninduktion wieder auf den Wert 0 zu bringen und damit das Eisen wieder unmagnetisch zu machen. Der hierzu erforderliche H-Wert AD heißt **Koerzitivkraft.** In dieser Weise fortfahrend, erhält man die S-förmig gekrümmte **Hysteresiskurve.** Bei harten Stahlsorten umschließt sie eine breite Fläche, bei Weicheisen und hochwertigen Dynamoblechen ist sie recht schmal. Die üblichen Magnetisierungskurven (z. B. Bild 184) stellen den mittleren Verlauf beider Kurvenäste dar (mithin nicht etwa die Neukurve).

Damit wird verständlich, weshalb ein Stahlstück nach vorübergehender Magnetisierung auch magnetisch bleibt und zu einem **Dauermagneten** wird. Derartige permanente Magnete sollen bei hoher Remanenz eine recht große Koerzitivkraft besitzen, so daß die im linken oberen Quadranten liegende Fläche möglichst groß sein muß.

Beispiele: 1. In einem Kern aus Dynamoblech von 4 cm² Querschnitt besteht eine Feldstärke von $H = 1500$ A/m. Wie groß sind die Induktion B, der magnetische Fluß und die relative Permeabilität? — Aus der Kurve (Bild 184) liest man ab $B = 1{,}43$ Vs/m². Hiernach ergibt sich der magnetische Fluß zu $\Phi = 57{,}2 \cdot 10^{-5}$ Vs und die relative Permeabilität

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{1{,}43 \text{ Vs Am m}}{1{,}256 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ Vs } 1500 \text{ A}} = 760.$$

2. In einem rechteckigen, geschlossenen Kern aus Dynamoblech (mittlere Länge der Feldlinien $l = 20$ cm) nach Bild 191 soll eine Induktion von 0,8 Vs/m² bestehen. Wieviel Amperewindungen sind hierzu erforderlich? — Aus der Magnetisierungskurve (Bild 184) liest man die zu $B = 0{,}8$ Vs/m² gehörige Feldstärke von $H = 200$ A/m ab. Demnach ist $Iw = 200\ \text{A/m} \cdot 0{,}2\ \text{m} = 40$ A.

8.4.3. Para- und diamagnetische Stoffe

Außer den ferromagnetischen Stoffen zeigen auch alle übrigen Substanzen magnetische Eigenschaften, allerdings mit äußerst schwachen Wirkungen.

1. Paramagnetische Stoffe. Diese (z. B. Aluminium) verhalten sich — wenn auch in ungleich schwächerem Maße — ähnlich wie die ferromagnetischen.

Versuch: Ein kleines U-Rohr mit einer Lösung von $FeCl_3$ wird zwischen die Pole eines starken Elektromagneten gebracht (Bild 186). Beim Einschalten des Feldstromes steigt die Flüssigkeit in das Feld hinein.

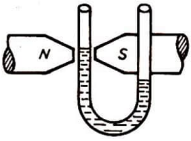


Bild 186. Verhalten einer paramagnetischen Flüssigkeit im Magnetfeld

2. Diamagnetische Stoffe. Zu ihnen gehören z. B. Kupfer und Wismut.

Versuch: Ein kleines, an einem Faden hängendes Wismutstäbchen stellt sich zwischen den Polen eines Magneten quer zu den Feldlinien (Bild 187). Ein kleines Wismutkügelchen wird aus dem Feld herausgestoßen.

Paramagnetische Stoffe werden in ein Magnetfeld hineingezogen, diamagnetische von ihm abgestoßen (Bild 188).

8.4.4. Magnetisierung und Entmagnetisierung

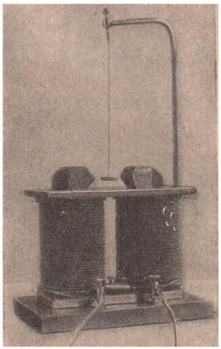


Bild 187. Wismutstäbchen im Magnetfeld

Die bei Anwesenheit eines Füllstoffes eintretende Induktionswirkung läßt sich gedanklich in zwei Anteile zerlegen: jenen, der sich auch ohne Füllstoff ergeben würde, und einen zweiten, der vom Füllstoff selbst herrührt:

Magnetisierung $\mathfrak{M}$ = allein vom Füllstoff herrührende Induktion.

Damit wird $\mathfrak{B} = \mu_0 \mathfrak{H} + \mathfrak{M}$ und hieraus mit (76)

$$\mathfrak{M} = \mathfrak{B} - \mu_0 \mathfrak{H} = \mu_0 \mu \mathfrak{H} - \mu_0 \mathfrak{H} = \mu_0 \mathfrak{H} (\mu - 1).$$

Bild 188. a) Paramagnetischer und
b) diamagnetischer Stoff im homogenen Magnetfeld

Den Faktor $(\mu - 1)$ bezeichnet man als

(77) **magnetische Suszeptibilität:** $\boxed{\varkappa = \mu - 1}$

Oft rechnet es sich mit der Suszeptibilität (Empfänglichkeit) bequemer als mit der Permeabilität, vor allem bei nicht ferromagnetischen Stoffen.

Magnetische Suszeptibilitäten $\varkappa$ (10^6fache Werte)

Luft (18 °C)	+ 4	Wasser	− 9,04
Sauerstoff	+ 1,8	Wismut	−176
Aluminium	+ 21,4	Kupfer	− 10,0
Chrom	+ 327	Quecksilber	− 30,1
Mangan	+1005	Blei	− 17,0

Positive Werte von $\varkappa$ zeigen, daß die Permeabilität größer als 1 ist **(paramagnetische Stoffe).** Negative Werte von $\varkappa$ bedeuten eine Permeabilität von weniger als 1 **(diamagnetische Stoffe).**

Wenn das Feld nicht vollständig von Eisen ausgefüllt ist, wird das Eisenstück selbst zu einem Magneten, aus dessen Nordpol Feldlinien austreten und dem äußeren Feld entgegen wieder zum Südpol zurücklaufen müssen. Dies findet nicht nur außerhalb des Körpers statt, sondern auch im Innern. Man kann sich hierbei einen dünnen, zwischen den Eisenatomen verlaufenden Kanal vorstellen. In seiner Längsrichtung verlaufen dann das erregende Feld und das vom Eisen sekundär erzeugte einander entgegengesetzt (Bild 189). Damit wird die zur Magnetisierung des Eisens verfügbare Feldstärke zum Teil aufgehoben.

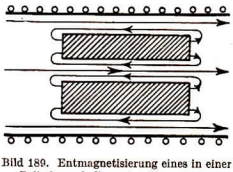


Bild 189. Entmagnetisierung eines in einer Zylinderspule liegenden Eisenstückes

Man nennt diesen Vorgang **Entmagnetisierung.** Bei Messung der magnetischen Eigenschaften des Eisens muß dann ihr Einfluß rechnerisch beseitigt werden. Hierbei kommt es sehr auf die Gestalt des Stückes an.

Bei einer eisengefüllten Ringspule tritt die Entmagnetisierung nicht in Erscheinung, da hier sämtliche Feldlinien in sich geschlossen sind und rückläufige Feldlinien nicht vorkommen können.

Daher kommt es, daß in allen Eisenkernen mit freien Enden bei weitem nicht die der Magnetisierungskurve entsprechenden Induktionswerte erreicht werden und zur magnetischen Sättigung viel höhere Feldstärken erforderlich sind als bei ringförmigen Kernen.

8.4.5. Der Durchflutungssatz

Betrachtet man die Entstehung eines magnetischen Feldes, so erkennt man, daß der erregende Strom und das von ihm erzeugte Feld in einfacher Weise zusammenhängen (Bilder 190···192): Eine einzelne herausgegriffene Feldlinie (die bekanntlich stets in sich geschlossen sein muß) umrandet eine Fläche, in welche die erregenden Stromwindungen von der einen Seite her hineinstoßen. Diese Stromwindungen

nennt man die **Durchflutung.** Längs des Randes der solchermaßen durchfluteten Fläche besteht dann eine magnetische Spannung (auch magnetische Rand- oder Umlaufspannung genannt).

Durchflutungssatz:
Die magnetische Spannung längs einer Feldlinie ist gleich der Durchflutung durch die von dieser Feldlinie umrandeten Fläche.

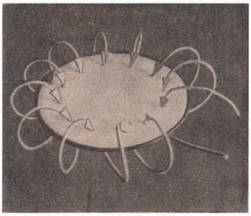


Bild 190. Durchflutung einer Ringspule und umrandende Feldlinie

Der allgemeine Zusammenhang ist der uns bereits bekannte Ausdruck (71)

$$\Sigma H l = I w .$$

Es handelt sich beim Durchflutungssatz nur um eine andere Ausdrucksweise bereits bekannter Zusammenhänge ($I w$ wurde im Abschnitt 8.3.2. als magnetomotorische Kraft bezeichnet).

Der Durchflutungssatz bildet die Grundlage zur Berechnung aller möglichen elektromagnetischen Anordnungen.

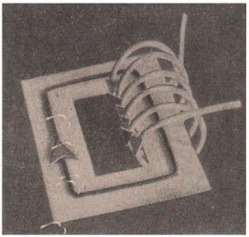


Bild 191. Mittlere Feldlinienlänge und Amperewindungszahl eines geschlossenen Eisenkerns

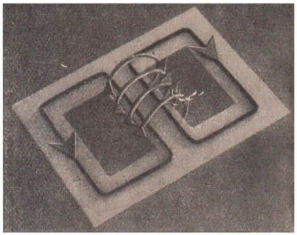


Bild 192. Durchflutung des Mantelkerns eines Transformators

Als besonders wichtiges Beispiel sei die Feldstärke in der Umgebung eines geraden Leiters berechnet. Dieser ist (Bilder 159 u. 193) von konzentrischen kreisförmigen Feldlinien umgeben. Da die Länge einer solchen Linie $l = 2\pi r$ und H längs dieser Linie konstant ist, beträgt die magnetische Spannung $H 2\pi r$. Diese wird von einer einzigen stromdurchflossenen Windung erzeugt; denn das betrachtete gerade Leiterstück ist ein Teil einer Stromschleife, deren sonstige Teile in diesem Zusammenhang nicht weiter beachtet werden.

Mit $w = 1$ wird daher aus Formel (71)

$$H 2\pi r = I$$

und damit die

magnetische Feldstärke außerhalb eines geraden Leiters: $\boxed{H = \frac{I}{2\pi r}}$

Man erkennt hieraus in besonders anschaulicher Weise die Maßeinheit der magnetischen Feldstärke A/m. Ferner ist ersichtlich:

Die magnetische Feldstärke ist dem Abstand vom Leiter umgekehrt proportional.

Beispiel: Welche Feldstärke besteht in 5 cm Entfernung von einem Draht, durch den ein Strom von 6 A fließt? —

$$H = \frac{6\ \text{A}}{2\pi\ 0{,}05\ \text{m}} = 19\ \text{A/m}.$$

8.4.6. Berechnung eines magnetischen Kreises

Unter einem **magnetischen Kreis** versteht man eine Anordnung, in der die von einer Spule erzeugten Feldlinien möglichst verlustlos in sich geschlossen werden.

Beispiele: Kerne von Drosselspulen, Transformatoren, elektrodynamischen Lautsprechern, elektrische Maschinen aller Art usw.

Um dies zu erreichen, verwendet man hierfür ausschließlich Eisen. Jeder Querschnitt eines solchen Kreises wird von demselben Fluß Φ durchsetzt:

Der magnetische Fluß Φ ist in allen Teilen eines streuungslosen Kreises konstant.

„Streuungslos" heißt, daß sämtliche Feldlinien den vollständigen Kreis durchlaufen, was sich durch günstige Gestaltung meist nahezu erreichen läßt.
Wenn aber Φ konstant ist, muß die Induktion je nach dem Querschnitt verschieden sein; denn $B = \frac{\Phi}{F}$ (75):

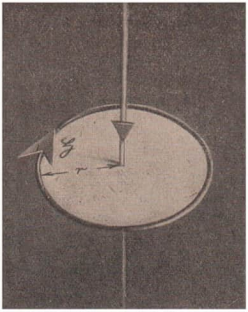


Bild 193. Durchflutung der Feldlinie eines geraden Leiters

Die Induktion ist dem jeweiligen Querschnitt des Kreises umgekehrt proportional.

Bei verschiedenem Querschnitt ist wegen (76) $H = \frac{B}{\mu\mu_0}$ auch die Feldstärke in den einzelnen Teilen verschieden. Außerdem ist die Permeabilität μ nicht konstant, so daß man für Eisen die Feldstärke der Magnetisierungskurve entnimmt.
In vielen Fällen handelt es sich darum, die zur Erzeugung einer bestimmten Induktion B notwendige Amperewindungszahl zu berechnen.
Dann verläuft die Rechnung wie folgt:

1. Zerlegung des Kreises in einzelne Teile, in denen die Feldstärke als konstant angenommen werden kann.

2. Berechnung (bzw. graphische Ermittlung) der Feldstärken für die einzelnen Teile des Kreises.
3. Ermittlung der jeweiligen mittleren Länge der Feldlinien.
4. Berechnung der magnetischen Teilspannungen.
5. Addition dieser Teilprodukte, wobei sich wegen $\Sigma Hl = Iw$ die gesuchte Amperewindungszahl ergibt.

Dies sei an folgendem Beispiel gezeigt.

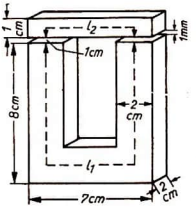


Bild 194. Magnetischer Kreis

Aufgabe: Auf dem in Bild 194 angegebenen U-Kern aus Dynamoblech ist in 1 mm Abstand (dem sogenannten Luftspalt) ein Anker aufgesetzt. Im Luftspalt soll eine Induktion von 7000 G = 0,7 Vs/m² erzeugt werden. Wieviel Amperewindungen sind hierzu notwendig?

Lösung:

1. U-Kern: $B_1 = 0{,}7$ Vs/m² (weil hier derselbe Querschnitt wie im Luftspalt)
   $H_1 = 160$ A/m (laut Magnetisierungskurve)
   $l_1 = 0{,}19$ m (laut Skizze) $\qquad H_1 l_1 = 30$ A
2. Anker: $B_2 = 1{,}4$ Vs/m² (laut Skizze nur der halbe Querschnitt)
   $H_2 = 1050$ A/m (laut Magnetisierungskurve)
   $l_2 = 0{,}06$ m (laut Skizze) $\qquad H_2 l_2 = 63$ A
3. Luftspalt: $B_3 = 0{,}7$ Vs/m² (laut Aufgabe)

$$H_3 = \frac{B_3}{\mu_0 \mu} = \frac{0{,}7 \text{ Vs Am}}{1{,}256 \cdot 10^{-6} \text{ Vs m}^2} = 558000 \text{ A/m ([76] und } \mu = 1)$$

$l_3 = 0{,}002$ m (2 Luftspalte) $\qquad H_3 l_3 = 1116$ A

$\Sigma Hl = 1209$ A

Der Kern muß folglich 1209 Amperewindungen tragen, d. h. z. B. 1209 Windungen bei 1 A oder 2418 Windungen bei einem Strom von 0,5 A usw.

Aus diesem Beispiel ersieht man, daß auf die Luftspalte die meisten Amperewindungen entfallen. Oder umgekehrt ausgedrückt:

Die Induktion in den Eisenteilen eines magnetischen Kreises wird bei gegebener Amperewindungszahl durch Luftspalte wesentlich herabgesetzt.

Hiervon wird in der Technik oft Gebrauch gemacht. Anderseits setzen Luftspalte (z. B. Stoßfugen) die Induktion in unerwünschter Weise herab.

8.5. Induktionsvorgänge

8.5.1. Das Induktionsgesetz

Im Abschnitt 8.3.3. wurde bereits beschrieben, wie man durch Ein- und Ausschalten eines Elektromagneten in einer benachbarten Induktionsspule eine elektrische Spannung erzeugen kann:

Induktion = Spannungserzeugung auf elektromagnetischem Wege.

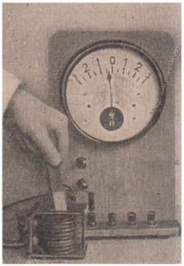


Bild 195. Induktion durch Bewegung eines Stabmagneten in einer Spule

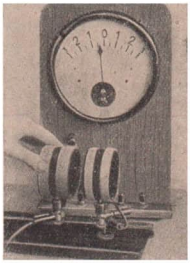


Bild 196. Induktion durch Annähern oder Entfernen einer stromdurchflossenen Spule

Wie sich mit einfachen Versuchen zeigen läßt, gibt es aber noch weitere derartige Möglichkeiten. Man unterscheidet

bei ruhender Induktionsspule:

1. Ein- und Ausschalten des Stromes der Feldspule (s. Abschn. 8.3.3.);
2. Bewegung eines Dauermagneten gegenüber der ruhenden Induktionsspule (Bild 195);
3. Änderung des Flächeninhalts der Induktionsschleife im Magnetfeld;

bei bewegter Induktionsspule:

4. Bewegung der Induktionsspule gegen einen ruhenden Magneten;
5. Bewegung einer stromdurchflossenen Feldspule gegenüber einer ruhenden Induktionsspule oder umgekehrt (Bild 196);
6. Drehung einer Induktionsspule im ruhenden Magnetfeld (s. Abschn. 8.5.4.).

Wie verschieden diese Versuche äußerlich auch aussehen mögen, so liegt ihnen doch ein einziges Prinzip zugrunde: In allen Fällen wird der die Induktionsschleife bzw. -spule durchsetzende magnetische Fluß Φ geändert.

Während jeder Änderung des eine Stromschleife durchsetzenden magnetischen Flusses wird in dieser eine elektromotorische Kraft und damit ein Strom induziert.

In allen Fällen gilt die

(78) **Induktionsregel** (Bild 197): **Blickt man in Richtung des Magnetfeldes gegen die Leiterschleife, so bewirkt eine $\frac{\text{Zunahme}}{\text{Abnahme}}$ des Flusses Φ einen Strom im $\frac{\text{Gegenzeiger}}{\text{Zeiger}}$-Sinn.**

Weiterhin findet man die Wirkung bedeutend verstärkt, wenn man statt einer einzigen Windung eine aus vielen Windungen bestehende Induktionsspule ver-

wendet. Außerdem erhält man um so höhere Spannungen, je rascher die Feldänderung vor sich geht. Bewegt man den in Bild 195 dargestellten Magneten sehr langsam, so ist die EMK nur mit besonders empfindlichen Instrumenten nachweisbar.

Die Höhe der induzierten EMK ist der Windungszahl w und der Änderungsgeschwindigkeit des magnetischen Flusses proportional.

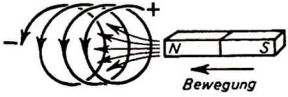


Bild 197. Induktionsregel

Hat der Fluß im Zeitpunkt t_1 den Wert Φ_1 und zur Zeit t_2 den Wert Φ_2, so beträgt die Flußänderung $\Phi_2 - \Phi_1$ und die

Änderungsgeschwindigkeit des Flusses: $\boxed{\dfrac{\Phi_2 - \Phi_1}{t_2 - t_1}}$ bzw. $\boxed{\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}}$

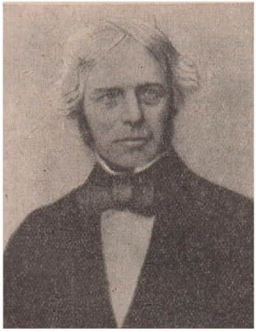


Bild 198. Michael Faraday (1791···1867)

Damit erhält man das von **Faraday** entdeckte

Induktionsgesetz: (Augenblickswert der induzierten EMK)

$$\boxed{e = -w\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}} \tag{79}$$

Bemerkung: Alle nur für einen bestimmten Augenblick geltenden elektrischen Größen schreibt man mit lateinischen Kleinbuchstaben. Im nächsten Augenblick kann der Differenzenquotient einen anderen Wert haben. Das negative Vorzeichen gibt an, daß bei positiver Flußänderung (Flußzunahme) der Strom entgegengesetzt der sonst gültigen Korkenzieherregel (69) fließt (S. 96).

Beispiel: Eine eisenfreie Zylinderspule von 40 cm Länge und 5 cm Durchmesser trägt als Primärwicklung 800 Windungen und eine Sekundärwicklung von 2000 Windungen. Den Primärstrom läßt man innerhalb von 3 s gleichförmig von 0,1 A auf 5 A anwachsen. Welche EMK wird während dieser Zeit induziert? —

Der die Induktionsspule durchsetzende Fluß wächst von

$$\Phi_1 = \mu\mu_0 F H_1 = \frac{1{,}256 \cdot 10^{-6}\ \text{Vs}\ 0{,}1\ \text{A}\ 800 \cdot 19{,}64 \cdot 10^{-4}\ \text{m}^2}{\text{Am}\ 0{,}4\ \text{m}} = 49 \cdot 10^{-8}\ \text{Vs auf}$$

$$\Phi_2 = \frac{1{,}256 \cdot 10^{-6}\ \text{Vs}\ 5\ \text{A}\ 800 \cdot 19{,}64 \cdot 10^{-4}\ \text{m}^2}{\text{Am}\ 0{,}4\ \text{m}} = 2466 \cdot 10^{-8}\ \text{Vs an.}$$

Damit wird $$e = \frac{2000\,(2466 - 49)\ 10^{-8}\ \text{Vs}}{3\ \text{s}} = 16{,}1\ \text{mV}.$$

8.5.2. Induktion in bewegten Leiterteilen

Bild 199 zeigt einen geraden Draht, der sich pendelnd quer durch ein Magnetfeld bewegen kann. Sobald man den Draht hin- und herbewegt, zeigt das Meßinstrument einen Strom von gleichfalls wechselnder Richtung an.

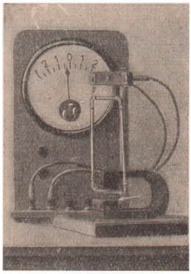


Bild 199. Induktion durch einen Leiter, der quer zu einem Magnetfeld bewegt wird

In jedem quer durch ein Magnetfeld bewegten Leiterstück wird eine EMK induziert.

Ihre Richtung ergibt sich nach der

Rechten-Hand-Regel (für den durch Bewegung induzierten Strom) (Bild 200): **Hält man die rechte Hand so, daß die Feldlinien in die Handfläche eintreten und der Daumen die Bewegungsrichtung des Leiters angibt, so zeigen die ausgestreckten Finger die Stromrichtung an.**

Das allgemeine Induktionsgesetz läßt sich hier wie folgt anwenden. Bild 201 zeigt mit einem Blick auf den Pol die Feldlinien. Ein Teil des magnetischen Flusses tritt durch die Stromschleife. Wird das Leiterstück l mit der gleichförmigen Geschwindigkeit $v = \frac{s}{t}$ nach links bewegt, so legt es in der Zeit t die Strecke s zurück und überstreicht dabei die Fläche $F = sl$.

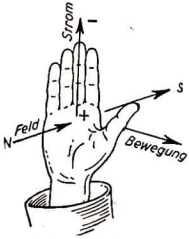


Bild 200. Rechte-Hand-Regel

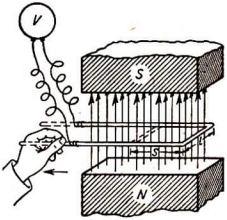


Bild 201. Zur Berechnung der induzierten EMK

Der hindurchtretende Fluß nimmt ab um $\Delta\Phi = BF = Bsl$. Damit ergibt sich unter Anwendung von (79) der Betrag $e = \frac{Bsl}{t}$ oder die

(80) **induzierte EMK in einem bewegten Leiterstück:** $\boxed{e = Blv}$

Hierbei erkennt man noch einmal auf anschauliche Weise die Maßeinheit der Induktion B, wenn man diesen Ausdruck nach $B = \frac{e}{lv}$ auflöst. Auf der rechten Seite kommt $\frac{\mathrm{V \cdot s}}{\mathrm{m \cdot m}} = \mathrm{Vs/m^2}$ heraus.

Bei der Bewegung des Leiters werden die Feldlinien gleichsam „durchschnitten". Der Sachverhalt kann dann aber auch so gedeutet werden:

(81) **Die induzierte EMK ist der je Zeiteinheit durchschnittenen Anzahl von Feldlinien proportional.**

8.5.3. Wirbelströme

Nicht nur in bewegten Drähten können Spannungen induziert werden. Auch in massiven Metallkörpern und Blechen werden Spannungen induziert, sobald sie sich in einem Magnetfeld bewegen. Hierbei entstehen sogenannte **Wirbelströme**, da die Richtung der induzierten EMK zwar durch die Rechte-Hand-Regel vorgeschrieben ist, nicht aber der Verlauf der Strombahn, die in sich kurzgeschlossen ist. Wegen dieses inneren Kurzschlusses können die Wirbelströme sehr stark werden und beträchtliche Wärme erzeugen.

Versuch: Zwischen den Polen eines Elektromagneten schwingt pendelnd eine Kupfer- oder Aluminiumscheibe (Bild 202). Nach Einschalten des Feldstromes bleibt sie wie in einer zähen Flüssigkeit stecken. Erklärung: Die zur Erzeugung dieser Ströme und der mit ihnen verbundenen Stromwärme notwendige Energie wird dem Energievorrat des schwingenden Pendels entzogen. Wenn die Scheibe geschlitzt ist, sind die Bahnen der Wirbelströme unterbrochen, die Scheibe pendelt ungestört.

Bei der Bewegung eines ausgedehnten Leiters im Magnetfeld wird Wärme erzeugt und mechanische Energie verbraucht.

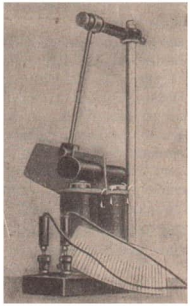


Bild 202.
Bremsung einer schwingenden Metallscheibe durch Wirbelströme

Anwendungen: Bei der **Wirbelstromdämpfung** schwingender elektrischer Instrumente (z. B. Bilder 36, 61) bewegt sich eine Metallscheibe zwischen den Polen eines Bremsmagneten. Im **Wechselstromzähler** dreht sich eine Aluminiumscheibe zwischen den Polen eines Dauermagneten, wodurch deren Rotation gebremst und gleichförmig wird. Die **Eisenkerne** elektrischer Maschinen und Transformatoren sind aus einzelnen Blechen geschichtet, womit quer durch das Paket gerichtete Ströme verhindert werden.

8.5.4. Der Gleichstromgenerator (Dynamomaschine)

Prinzipielle Wirkungsweise (Bild 203). Eine rechteckige Leiterschleife wird im Feld eines starken Magneten gedreht. Nach der Rechten-Hand-Regel ergeben sich die im Bild gezeichneten Stromrichtungen. Der Strom wird zwei halbkreisförmigen, auf der Antriebswelle sitzenden Blechlamellen **(Kollektor)** zugeführt, gegen die sich federnd die beiden **Bürsten** (meistens kleine Kohleklötze) anlegen, an denen die erzeugte Spannung abgenommen wird. Wenn nach einer halben Umdrehung Draht 1 vor dem Nordpol liegt, hat sich auch der Kollektor mitgedreht, so daß die Klemmenspannung stets dieselbe Richtung beibehält. Um das Magnetfeld besser auszunutzen,

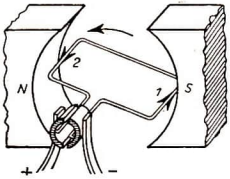


Bild 203. Prinzip des Gleichstromgenerators

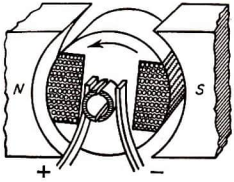


Bild 204. Doppel-T-Anker

verwendet man statt einer einzigen Windung eine Spule, die auf einen Eisenkern gewickelt ist. In diesem einfachen Fall entsteht so der **Doppel-T-Anker** (Bild 204).

Die EMK ist nach (81) der Zahl der sekundlich geschnittenen Feldlinien proportional. In der auf Bild 203 angegebenen Stellung werden viele Linien geschnitten. Steht dagegen die Schleife senkrecht, so gleiten die Drähte 1 und 2 an den Feldlinien entlang, ohne sie zu schneiden, so daß in diesem Augenblick überhaupt keine EMK vorhanden ist. Der Strom verläuft deshalb nicht gleichförmig, sondern „pulsiert", d. h. schwankt periodisch zwischen 0 und einem Höchstwert (Bild 205). (Genaueres über die Kurvenform S. 132.)

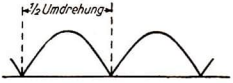


Bild 205. Verlauf der EMK während einer ganzen Umdrehung

Der Trommelanker. Der heute fast ausschließlich verwendete Trommelanker enthält viele parallele Drähte in den Nuten eines Eisenzylinders. Das lästige Pulsieren wird dabei weitgehend gemildert, wenn auch nicht ganz beseitigt. Es gibt mehrere Wicklungssysteme. Das Prinzip der **Schleifenwicklung** zeigt Bild 206. Die von vorn nach hinten laufenden Ankerdrähte sind so verbunden, daß die rechte Lamelle des Kollektors stets einen Minus-, die andere stets den Pluspol abgibt.

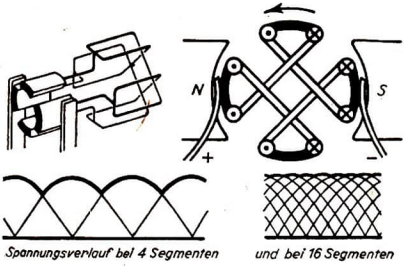


Bild 206. Schema eines Trommelankers mit Schleifenwicklung

Aber auch im Eisenkern des Ankers würden Ströme von derselben Richtung induziert werden. Um diese Wirbelströme zu unterbinden (sie würden den Anker in unangenehmer Weise erhitzen), ist dieser mit Papierzwischenlagen aus einzelnen Blechen (**Dynamoblech** mit kleiner Remanenz) geschichtet.

Erregung des Feldmagneten. Nach der Erfindung **Werner von Siemens** (1866) wird der im Anker induzierte Strom zur Erregung des Feldmagneten verwendet. Dabei unterscheidet man zwei grundsätzliche Möglichkeiten: die **Hauptschluß-** (oder **Reihenschluß-**) **Maschine** (Feld- und Ankerwicklung in Reihe, Bild 208) und die **Nebenschlußmaschine** (Feld- und Ankerwicklung parallelgeschaltet, Bild 209).

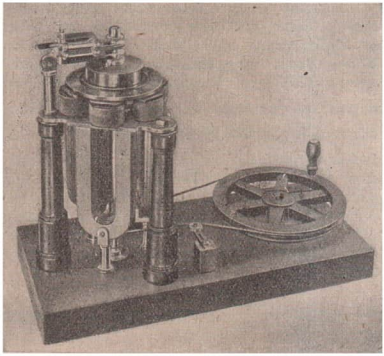


Bild 207. Magnetelektrische Maschine mit permanenten Feldmagneten aus dem Jahre 1843 (Deutsches Museum)

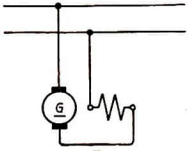


Bild 208. Schaltung der Hauptschlußmaschine

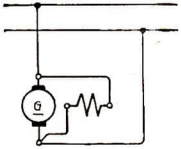


Bild 209. Schaltung der Nebenschlußmaschine

Beispiel: Der Trommelanker eines Gleichstromgenerators ist 12 cm lang und hat einen Durchmesser von 8 cm. Jeweils 60 Drähte liegen im Feld von 0,8 Vs/m². Welchen Höchstwert hat die EMK bei einer Drehzahl von 2000 ¹/min? — Nach (80) ist $e = Blv$, wobei v die Umfangsgeschwindigkeit des Ankers ist. Demnach $E = 60 \cdot \frac{0{,}8\ \mathrm{Vs}\ 0{,}12\ \mathrm{m} \cdot 0{,}08\ \mathrm{m}\ \pi\ 2000}{\mathrm{m}^2\ 60\ \mathrm{s}} = 48\ \mathrm{V}$.

8.5.5. Die Selbstinduktion

Versuch (Bild 210): Eine Spannungsquelle E liegt mit dem Schalter, dem Lämpchen L_1 und einem starken Elektromagneten M in Reihe. Parallel zur Spannungsquelle liegt ein zweites Lämpchen L_2 und parallel zum Elektromagneten eine kleine Glimmlampe G. Man beobachtet zweierlei. Beim Einschalten leuchtet das Lämpchen L_1 erheblich später auf als L_2. Beim Ausschalten verlöschen diese beiden Lämpchen, aber die Glimmlampe G, deren Zündspannung etwa 80···100 V beträgt, leuchtet kurz auf.

Deutung: Beim Schließen des Stromkreises tritt offenbar eine entgegengerichtete EMK auf, die das Aufleuchten der Lampe L_1 verzögert. Beim Öffnen muß ebenfalls eine recht hohe Spannung auftreten, welche zur Zündung der Glimmlampe

ausreicht. Die stromdurchflossene Spule wirkt wie eine zusätzliche Spannungsquelle. Die Erscheinung nennt man **Selbstinduktion.**

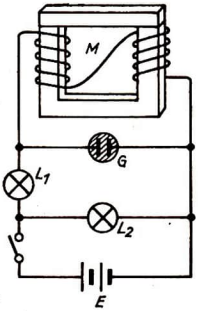


Bild 210. Versuch zur Selbstinduktion

Selbstinduktion = Spannungserzeugung in den eigenen Windungen einer stromdurchflossenen Spule.

Die Ursache ist der vom Spulenstrom erzeugte magnetische Fluß, der beim Einschalten zunimmt. Diese Flußänderung muß in den Windungen eine EMK induzieren, deren Richtung nach dem Induktionsgesetz (79) beim Einschalten der angelegten Spannung entgegengerichtet sein muß $\left(\text{Flußzunahme, d. h. positive Flußänderung } \frac{\Delta\Phi}{\Delta I}\right)$. Sie verhindert das sofortige Zustandekommen des Einschaltstromes, der — wie es der Versuch zeigt — auch nur langsam zunimmt. Bei sehr großen Elektromagneten kann das mehrere Minuten dauern! Beim Ausschalten (Flußabnahme, d. h. negative Flußänderung) hat die EMK die gleiche Richtung wie die angelegte Spannung.

Die EMK der Selbstinduktion ist beim $\frac{\text{Schließen}}{\text{Öffnen}}$ des Stromkreises der angelegten Spannung $\frac{\text{entgegen}}{\text{gleich}}$ gerichtet.

Um diese EMK zu berechnen, erweitert man das Induktionsgesetz mit ΔI und erhält $e = -w\frac{\Delta\Phi}{\Delta I}\frac{\Delta I}{\Delta t}$. Nun ist aber der Fluß Φ in einem Stoff von konstanter Permeabilität μ jederzeit der Stromstärke I proportional. Dann kann an Stelle des Bruches $\frac{\Delta I}{\Delta I}$ das einfache Verhältnis $\frac{\Phi}{I}$ gesetzt werden, so daß $e = -\frac{w\Phi}{I}\frac{\Delta I}{\Delta t}$. Den in dieser Formel enthaltenen Faktor $\frac{w\Phi}{I}$ bezeichnet man als

(82) **Koeffizient der Selbstinduktion oder Induktivität:** $\boxed{L = \frac{w\Phi}{I}}$

Als Maßeinheit für diese Größe ergibt sich wegen Φ (Vs) und I (A) der Ausdruck $1\,\frac{\text{Vs}}{\text{A}}$. Dies ist die

Einheit der Induktivität L: $\boxed{1 \text{ Henry (H)} = 1\,\frac{\text{Vs}}{\text{A}}}$

Die physikalische Bedeutung des Koeffizienten L läßt sich an Hand ihrer Maßeinheit auch in Worten ausdrücken:

Eine Spule hat die Induktivität von 1 H, wenn bei einer innerhalb von 1 s stattfindenden Änderung der Stromstärke um 1 A die EMK von 1 V in ihren eigenen Windungen induziert wird.

Damit berechnet sich die

(83) **EMK der Selbstinduktion:** $$\boxed{e = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}}$$

Die Induktivität L spielt besonders bei Wechselstromvorgängen eine große Rolle, wo sie die Größe des „induktiven Widerstandes" bestimmt (S. 135). Die Berechnung der Induktivität L ist jedoch nur in besonders einfachen Fällen exakt möglich, da sie von der geometrischen Form und Wicklungsart der Spulen abhängt. Aber auch jede beliebige andere Leiteranordnung hat stets eine bestimmte Induktivität, wie z. B. Telefon- und andere Stromleitungen, Antennen, Kabel usw. Hier bilden Hin- und Rückleitung gleichsam eine Spule mit einer einzigen Windung. Es gibt zwar zur Berechnung von L eine Reihe für die jeweiligen Einzelfälle gültige Näherungsformeln, doch ist es stets besser, die Induktivität mit Hilfe von Wechselstrom zu messen (S. 141).

Für den Fall einer langgestreckten Zylinderspule mit relativ kleinem Durchmesser $\left(\frac{l}{d} \geqq 10\right)$ oder die Ringspule ergibt sich nach (82) und wegen $\Phi = FB = F\mu_0\mu H = \frac{F\mu_0\mu I w}{l}$ der Wert $L = \frac{w\mu_0\mu I w F}{I l}$ und damit die

(84) **Induktivität einer langen Zylinderspule oder Ringspule:** $$\boxed{L = \frac{w^2\mu_0\mu F}{l}}$$

Der hier enthaltene Faktor μ ist bei Spulen mit Eisenkern ganz von der jeweils vorhandenen Feldstärke, d. h. vom Strom I abhängig. Bei Anwesenheit von Eisen ist also die Induktivität einer Spule je nach der Strombelastung verschieden.

Beispiel: Welche Induktivität hat eine eisenfreie Spule von 25 cm Länge, 3 cm Durchmesser und 1500 Windungen? — Es ist $\mu = 1$ und $L = \frac{1{,}256 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{Vs}\; 7{,}07 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{m}^2\; 1500^2}{\mathrm{A\,m}\; 0{,}25\,\mathrm{m}} = 8{,}88\,\mathrm{mH}$.

8.6. Kraftwirkungen auf Stromleiter im Magnetfeld

8.6.1. Kraftwirkung auf einen geraden Stromleiter

Der im Abschnitt 8.5.2., S. 114, geschilderte Versuch läßt sich umkehren. Sobald man durch den quer im Magnetfeld liegenden Draht einen Strom leitet, bewegt sich der Draht zur Seite (Bild 211). Für die Richtungen gilt jetzt die

Linke-Hand-Regel (für die Bewegung eines Stromleiters im Magnetfeld, Bild 212):	**Hält man die linke Hand so, daß die Feldlinien in die Handfläche eintreten und die ausgestreckten Finger die Stromrichtung angeben, so zeigt der abgespreizte Daumen die Bewegungsrichtung des Leiters an.**

Die Erscheinung läßt sich auch an Hand des Feldlinienbildes deuten; denn der Leiter umgibt sich mit konzentrischen, ringförmigen Linien, die sich dem parallelen Feld des Magneten überlagern. Auf Bild 213 ist erkennbar, wie sich die resultierenden Feldlinien rechts vom Leiter zusammendrängen und demzufolge einen nach links gerichteten Druck ausüben.

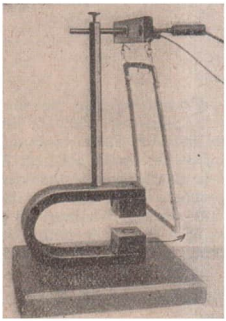


Bild 211. Bewegung eines stromdurchflossenen Leiters im Magnetfeld

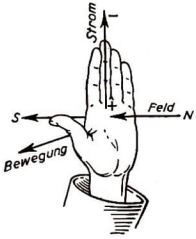


Bild 212. Linke-Hand-Regel

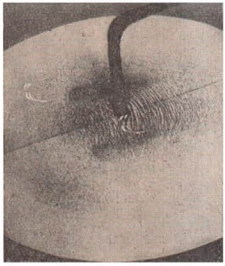


Bild 213. Überlagerung des Magnetfeldes eines geraden Leiters mit dem Feld eines Hufeisenmagneten (dieser liegt unter der Pappscheibe)

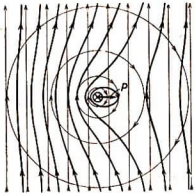


Bild 214. Konstruktion der Überlagerung zweier Magnetfelder

Den ungefähren Verlauf dieses Feldes kann man finden, wenn man ein System von konzentrischen Kreisen[1]) und parallelen Linien zeichnet. Die Diagonalen der entstehenden Vierecke verbindet man zu einem fortlaufenden Linienzug (Addition von Vektoren! Bild 214).

Größe der Kraft: Während der Bewegung wird in dem Draht eine EMK induziert, deren Größe sich nach (80) zu $e = Blv$ berechnet. An die Drahtenden muß daher

[1]) Bei einer genauen Konstruktion muß man die Kreisradien maßstäblich umgekehrt proportional der jeweiligen Feldstärke zeichnen, so daß dicht aufeinanderfolgende Linien große Feldstärke bedeuten und umgekehrt.

eine Spannung U angelegt werden, welche e gerade aufhebt. Diese, mit dem Strom I multipliziert, ergibt die aufzuwendende Leistung $UI = BlvI$. Die Leistung UI läßt sich aber auch als Produkt aus Kraft mal Geschwindigkeit $P \cdot v$ (I, 5.02) ausdrücken, so daß $Pv = BlvI$.

(85) **Kraft auf einen Stromleiter im Magnetfeld:** $\boxed{P = BlI}$

Mit dieser Formel (85) erhält man die Kraft P in Newton, da das Produkt BlI $\left(\frac{\text{Vs m A}}{\text{m}^2} = \frac{\text{Ws}}{\text{m}}\right)$ die Maßeinheit $\frac{\text{Nm}}{\text{m}}$ ergibt. Will man die Kraft in kp erhalten, so muß man noch durch den Umrechnungsfaktor 9,81 N/kp dividieren.

8.6.2. Anwendungen der Kraftwirkung auf Stromleiter

1. Der Gleichstrom-Hauptschlußmotor. Die in den Bildern 203, 204, 206 angegebenen Schemata von Gleichstromgeneratoren stellen gleichzeitig auch **Gleichstrommotoren** dar, nur mit dem Unterschied, daß den beiden Bürsten Strom zugeführt werden muß und der Anker dadurch in entgegengesetztem Drehsinn umläuft. Die für die Dynamomaschine geltende Rechte-Hand-Regel ist jetzt durch die Linke-Hand-Regel zu ersetzen.

Führt man einer Gleichstrom-Dynamomaschine Strom zu, so arbeitet sie als Elektromotor.

Beim Hauptschlußmotor sind Anker und Feldmagnet in Reihe geschaltet (Bild 215).

Beim Einschalten — wenn also der Anker noch stillsteht — ist der Ankerstrom recht groß und ergibt ein großes Drehmoment (wichtig für elektrische Bahnen, Walzwerke usw.). Mit steigender Drehzahl wird jedoch eine zunehmende Gegen-EMK im Anker induziert, so daß der vom Anker aufgenommene Strom von selbst zurückgeht. Damit besitzt der Gleichstrommotor den großen Vorzug, daß sich der Ankerstrom von selbst der verlangten Leistung anpaßt. Um den Einschaltstrom auf ein tragbares Höchstmaß zu begrenzen, schaltet man vor den Motor einen **Anlasser,** d. i. ein regelbarer Widerstand, den man mit steigender Drehzahl stufenweise abschaltet.

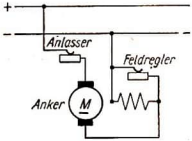


Bild 215

Bei sehr kleiner Belastung schwächt die infolge zunehmender Drehzahl wachsende Gegen-EMK wegen der Reihenschaltung auch das Erregerfeld, so daß der Anker immer schneller laufen muß, damit Gegen-EMK und Klemmenspannung gleich groß bleiben. Der Motor kann daher im Leerlauf leicht „durchgehen" und darf deshalb nicht ohne weiteres von der angetriebenen Maschine abgekuppelt werden. In diesem Sinne wirkt auch der auf Bild 215 angegebene Feldregler, indem die Schwächung des Feldes die Drehzahl steigert und umgekehrt eine Feldverstärkung die Drehzahl verringert.

2. Der Gleichstrom-Nebenschlußmotor. Wenn die Erregerwicklung nach Bild 216 parallel zum Anker geschaltet ist, muß sie aus vielen Windungen dünnen Drahtes bestehen, damit der Erregerstrom nicht zu stark wird. Erregerfeld und Drehzahl bleiben im Gegensatz zum Hauptschlußmotor bei unterschiedlicher Belastung nahezu

konstant. Würde z. B. bei Leerlauf die Drehzahl ansteigen, so hätte das eine Zunahme der Gegen-EMK zur Folge, wodurch aber der Ankerstrom und die Drehzahl entsprechend wieder abnehmen müßten. Aus diesem Grunde wird der Nebenschlußmotor weitaus am meisten verwendet.

Die Drehrichtung aller Gleichstrommotoren bleibt auch beim Umpolen immer dieselbe, da sich dabei die Stromrichtung in Feld und Anker gleichzeitig ändert. Zur Änderung der Drehrichtung müssen also Feld oder Anker einzeln umgepolt werden.

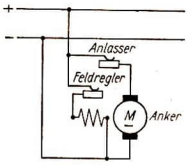


Bild 216

Beispiel: Welche Kraft entsteht am Umfang des Trommelankers eines Gleichstrommotors, der von 8 A durchflossen wird, wenn sich jeweils 150 Drähte von 18 cm Länge im Feld von 0,75 Vs/m² befinden?

$$P = 150 \cdot \frac{0{,}75\ \text{Vs}\ 0{,}18\ \text{m}\ 8\ \text{A}}{\text{m}^2} = 162\ \text{N} = \underline{16{,}5\ \text{kp}}.$$

3. Das Drehspulinstrument. Eine kleine rechteckige Spule befindet sich im ringförmigen Luftspalt eines Dauermagneten (Bild 217). Sie ist an einer Spiralfeder befestigt, deren Drehmoment dem Drehwinkel proportional ist (s. Hookesches Gesetz I, Abschn. 8.1). Ihm entgegen wirkt das vom Strom hervorgerufene und dem Strom proportionale Drehmoment, so daß der Zeigerausschlag ebenfalls dem Strom proportional ist.

4. Der elektrodynamische Lautsprecher (Bild 218). In den meisten Radioapparaten befindet sich ein elektrodynamischer Lautsprecher. Der Kraftfluß eines topfförmigen Elektromagneten läuft durch einen ringförmigen Spalt. In diesen taucht eine leichte Spule, an welcher die konusförmige Membran befestigt ist. Im Rhythmus des vom Verstärker kommenden Stroms schwingt die Spule auf und ab und bewegt dabei die Membran. Lautsprecher mit Dauermagneten, die also keinen besonderen Erregergleichstrom brauchen, nennt man **permanentdynamisch.**

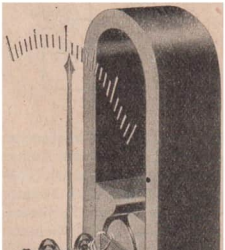


Bild 217. Drehspulmeßwerk

5. Der Schleifenoszillograph. Zur Sichtbarmachung schnell veränderlicher Ströme leitet man diese durch eine schmale, leicht gespannte Drahtschleife, die einen Spiegel trägt und sich in einem Magnetfeld befindet. Der im Takt der Stromschwankungen schwingende

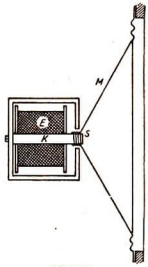


Bild 218.
Elektrodynamischer Lautsprecher im Schnitt.
E Erregerspule
M Konusmembran
S Schwingspule
K Kern des Magneten

Spiegel reflektiert einen Lichtstrahl, der anschließend über einen Drehspiegel an die Wand geworfen wird.

6. Das Spiegelgalvanometer (Bild 219). Hier hängt die Drehspule an einem feinen Metallfaden, der zugleich einen leichten Spiegel trägt.
Schreibt man das Induktionsgesetz (79) in der Form $e\,dt = -w\,d\Phi$, so entsteht nach beiderseitiger Integration der

(86) **induzierte Spannungsstoß:** $\boxed{\int e \cdot dt = w(\Phi_2 - \Phi_1)}$

Das linksstehende Integral stellt nun das S. 102 erwähnte zeitliche Integral der EMK, d. h. einen Spannungsstoß, dar. Zur Messung solcher Spannungsstöße dient

7. das ballistische Galvanometer. Dieses ist im Prinzip ein Drehspulinstrument mit Fadenaufhängung (Bild 219), das nach einmaligem Anstoß sehr langsame, schwach gedämpfte Schwingungen ausführt. Wenn der zugeführte Spannungs- bzw. Stromimpuls kurz gegenüber der Schwingdauer des Systems ist, ergibt sich ein Ausschlag, der dem Spannungsstoß $\int e \cdot dt$ proportional ist. Damit zeigt das Instrument unmittelbar das fertige Integral $\int e \cdot dt$, d. h. die Zeitsumme der Spannung, an.

Wie die Gleichung zeigt, ist der Stoßausschlag allein vom Anfangs- und Endwert des Flusses abhängig. Man kann also mit dem einmal geeichten Instrument die Induktion B einfach dadurch bestimmen, daß man eine Probespule aus dem zu messenden Feld herauszieht (Bild 220) oder bei feststehender Probespule das Feld ein- oder ausschaltet (Abschn. 8.3.3.).

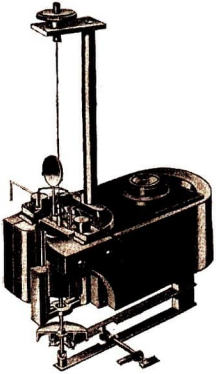


Bild 219. Spiegelgalvanometer

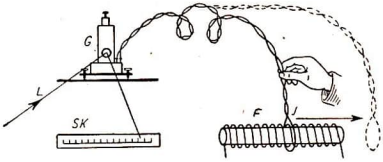


Bild 220. Messung der Induktion einer stromdurchflossenen Feldspule mit dem ballistischen Galvanometer.

G Galvanometer, L Lichtstrahl, F Feldspule, J Induktionsschleife, SK Skala. Die Schleife wird von der Feldspule heruntergezogen

Den von der induzierten EMK verursachten Strom erhält man nach dem Induktionsgesetz als $i = \frac{w}{R}\frac{d\Phi}{dt}$. Ferner ist nach (1) $i\,dt = dQ$. Das ergibt den

(87) **induzierten Stromstoß:** $\boxed{\int i\,dt = Q = \frac{w}{R}(\Phi_2 - \Phi_1)}$

(R Widerstand des Galvanometer-Stromkreises.) Dem Spannungsstoß entspricht daher eine ganz bestimmte, durch das Galvanometer fließende Elektrizitätsmenge, weshalb man mit einem ballistischen Galvanometer auch Ladungsmengen messen kann.

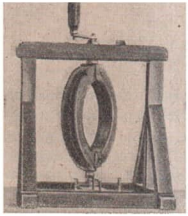


Bild 221. Erdinduktor

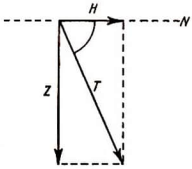


Bild 222. Komponenten des erdmagnetischen Feldes

8. Der Erdinduktor (Bild 221). Die Ebene einer größeren, flachen Induktionsspule stellt man zunächst in Richtung des magnetischen Meridians. Beim Schwenken um die vertikale Achse um 90° wächst der die Spule durchsetzende Fluß von Null auf den vollen Wert an und erzeugt im ballistischen Galvanometer den Stromstoß $\int i dt$. Mit $\Phi = BF$ und dem Gesamtwiderstand R des Stromkreises ergibt sich $\int i dt = \frac{wBF}{R}$, woraus man B leicht berechnen kann. In der angegebenen Weise erhält man die **Horizontalkomponente** H der erdmagnetischen Induktion. Sie betrug 1958 in Leipzig 0,1888 G. Schwenkt man die Spule um eine horizontale Achse, so erhält man die **Vertikalkomponente** Z. Beide ergeben, geometrisch addiert (Addition von Kräften), die **Totalintensität** T (Bild 222). Die Richtung von T schließt mit der Horizontalen den S. 93 erwähnten Inklinationswinkel ein.

8.6.3. Die Lorentzkraft

Wenn ein Stromleiter eine quer zum Magnetfeld gerichtete Ablenkung erfährt, ist auch zu erwarten, daß dies auch mit den Elektronen selbst geschieht. Dies ist in der Tat der Fall.

Man denke also an ein einzelnes Elektron von der Ladung e_0, das sich frei im Vakuum mit der Geschwindigkeit v quer zu den Feldlinien eines homogenen Feldes der Stärke B bewegt. In jedem Augenblick muß dann eine Kraft P wirken, die es rechtwinklig zur momentanen Bewegungsrichtung ablenkt, die sogenannte **Lorentzkraft.** Da der Betrag der Geschwindigkeit v konstant bleibt, ist auch die Lorentzkraft konstant und zwingt dem Elektron eine Kreisbewegung auf (Bild 223). Eine entsprechende Fliehkraft hält der Lorentzkraft das Gleichgewicht. Die Größe der Kraft ergibt sich, wenn man bedenkt, daß das in Formel (85) stehende Produkt lI dieselbe Maßeinheit (A · m) wie das Produkt $e_0 v$ (As · m/s) hat:

(88) **Lorentzkraft für ein freies Elektron:** $\boxed{P = e_0 v B}$

(e_0 in As, v in m/s, B in Vs/m², P in Newton).

Technisch wird die Erscheinung u. a. im Zyklotron (S. 99) angewandt.

Hiermit hängt auch der sogenannte **Halleffekt** zusammen. Eine vom Strom durchflossene Platte (Bild 224) werde von einem Magnetfeld durchsetzt. Zwischen zwei gegenüberliegenden Punkten A und B ist ohne Magnetfeld natürlich keine Spannung feststellbar, wohl aber nach Einschalten des Feldes. Ein empfindliches Galvanometer zeigt dann die sogenannte **Hallspannung** an. Am stärksten ist der Halleffekt bei Wismut, Graphit, Tellur und Silizium.

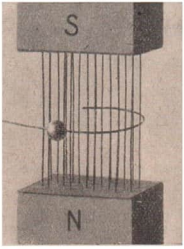


Bild 223. Kreisbahn eines Elektrons im Magnetfeld (modellmäßig)

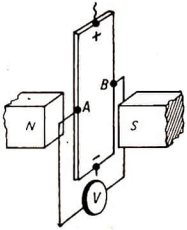


Bild 224. Halleffekt

Erklärung: Die Elektronen werden nach der Rechten-Hand-Regel abgelenkt, was auf dasselbe hinausläuft, als ob sie von einem zusätzlichen, quer zur ursprünglichen Bewegungsrichtung gerichteten elektrischen Feld bewegt würden.

Mit dem Halleffekt hängt es zusammen, daß der Widerstand von Metallen zunimmt, wenn rechtwinklig zur Strombahn ein Magnetfeld einwirkt. Zur praktischen und bequemen Messung von Magnetfeldern dient die **Wismutspirale,** (bifilar) aus dünnem Wismutdraht gewickelt. Bei 1,5 Vs/cm² beträgt die Widerstandsänderung etwa 80%. Sie wird in bekannten Feldern geeicht.

8.6.4. Kraftwirkung zwischen Stromleitern

Auch zwischen zwei Stromleitern muß eine Kraftwirkung bestehen, da der eine von ihnen das Magnetfeld erzeugt, in dem sich der zweite bewegen muß.

Versuch: Man hänge zwei leichte Lamettafäden parallel nebeneinander und lasse einen kräftigen Strom hindurchfließen (Bild 225). Die Fäden ziehen sich an. Schaltet man die Fäden in Reihe, so daß die Stromrichtungen entgegengesetzt sind (Bild 226), so stoßen sie sich ab.

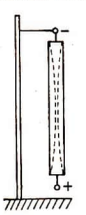


Bild 225
Anziehung gleichgerichteter Ströme

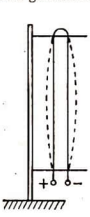


Bild 226
Abstoßung entgegengesetzter Ströme

Parallele Leiter mit $\frac{\text{gleicher}}{\text{entgegengesetzter}}$ Stromrichtung $\frac{\text{ziehen sich an}}{\text{stoßen sich ab}}$.

Auch dies läßt sich mit Hilfe des Feldlinienbildes erklären. Durch Überlagerung der beiden Felder entsteht im ersten Fall beiderseits der beiden Leiter, im zweiten Fall zwischen den Leitern eine Verdichtung (Bild 227).

a b

Bild 227. Magnetfeld zweier paralleler Leiter; a) gleiche Stromrichtung, b) entgegengesetzte Stromrichtung

Das Wattmeter. Zur Messung der elektrischen Leistung dient das **elektrodynamische Meßwerk.** Zwischen einem feststehenden Spulenpaar, das im Stromkreis liegt (Strompfad), befindet sich eine Drehspule (Spannungspfad). Die von vorn nach hinten laufenden Drähte (Bild 228) beider Systeme ziehen sich bei gleicher Stromrichtung mit einer Kraft an, die dem Produkt beider Ströme proportional ist. Die festen Stromspulen bestehen aus wenigen Windungen dicken Drahtes, während die bewegliche Spannungsspule viele Windungen dünnen Drahtes enthält (Schaltung nach Bild 229). Ein lamelliertes Eisengehäuse schützt die Anordnung vor fremden Feldern.

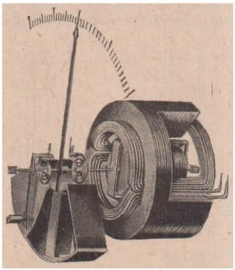


Bild 228. Elektrodynamisches Meßwerk mit Luftdämpfung

8.6.5. Die gesetzliche Definition der Stromstärke

Die heute gültigen elektrischen Einheiten bauen sich auf der gesetzlichen Definition des Ampere auf. Entsprechend der auf Seite 14 gegebenen Erklärung betrachte man zwei Stromleiter 1 und 2, die im Abstand von 1 m parallel zueinander verlaufen.

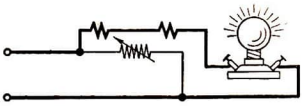


Bild 229. Schaltung eines Wattmeters

Sie haben je die Länge von 1 m und werden in gleicher Richtung von je 1 A durchflossen (Bild 230). Leiter 1 ist daher von kreisförmigen Feldlinien umgeben. Die Feldstärke H im Abstand von 1 m, d. h. am Ort, wo sich Leiter 2 befindet, ist $H = \frac{Iw}{l} = \frac{1\,\mathrm{A}}{l}$, da ja $I = 1\,\mathrm{A}$ und $w = 1$ ist. Die Länge der zugehörigen Feldlinie ist

$l = 1 \cdot 2\pi$ m, womit $H = \frac{1}{2\pi}$ A/m. Da sich die Drähte in Luft befinden, ist $\mu = 1$ und $B = \mu_0 H$, d. h., die auf den Leiter 2 wirkende Anziehungskraft ist nach (85) $P = \mu_0 H l I$ oder

$$P = \frac{1{,}256 \cdot 10^{-6}\ \text{Vs A 1 A 1 m}}{\text{Am } 2\pi\ \text{m}} = 2 \cdot 10^{-7}\ \text{Ws/m} = 2 \cdot 10^{-7}\ \text{N}.$$

Meßtechnisch läßt sich die Einheit der Stromstärke mit Hilfe der **Stromwaage** (Bild 231) überwachen. Man arbeitet hierbei aber nicht mit geradlinigen Leiterstücken, sondern mit Paaren von Stromspulen, deren Anziehungskraft sich in ähnlicher Weise berechnen läßt.

Aus der letzten Rechnung kann man auch den genauen Wert der **Induktionskonstanten** μ_0 entnehmen. Geht man nämlich davon aus, daß die Kraft P genau $2 \cdot 10^{-7}$ N $\left(\frac{\text{Ws}}{\text{m}}\right)$ sein muß, so erhält man aus der Gleichung

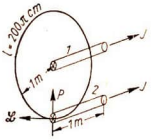


Bild 230

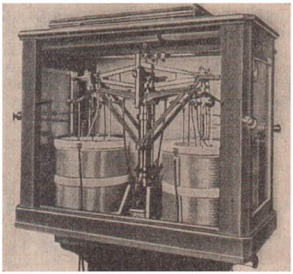


Bild 231. Elektromagnetische Waage zur Bestimmung der Stromstärke

$$P = \mu_0 H l I \quad \text{die Induktionskonstante}$$

$$\mu_0 = \frac{P}{H l I} = \frac{2 \cdot 10^{-7}\ \text{Ws } 2\pi\ \text{m}}{\text{m A 1 m 1 A}} = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \text{Vs/Am} = 1{,}256 \cdot 10^{-6}\ \text{Vs/Am}.$$

8.6.6. Die Lenzsche Regel

Wie wir sahen, wird nach der Linken-Hand-Regel ein stromdurchflossener Leiter aus dem Feld herausgetrieben. Er verrichtet dabei eine bestimmte Arbeit. Will man ihn wieder in das Feld hineindrücken, so ist nach dem Gesetz der Erhaltung der Energie eine gleich große Arbeit aufzuwenden. Der nur unter Energieaufwand entstehende Strom hat nach der Rechten-Hand-Regel dieselbe Richtung wie im ersten Fall, weil die Bewegung entgegengesetzt erfolgt. Dieser gegenseitige Zusammenhang der beiden Gesetze läßt sich in einer einzigen Regel zusammenfassen:

Lenzsche Regel: **Der induzierte Strom ist so gerichtet, daß er die ihn verursachende Bewegung zu hemmen versucht.**

Oder allgemeiner: **Jeder Induktionsstrom wirkt seiner Entstehungsursache entgegen.**

Beispiele: 1. **Dämpfung von Drehspulinstrumenten.** Die an einer Spiralfeder elastisch befestigte Ablenkspule hat die Neigung, vor dem Stehenbleiben einige Male hin- und herzupendeln. Abhilfe: Ein kleiner kurzgeschlossener Metallrahmen bildet den Spulenkörper, in dem während der Einstellbewegung ein die Bewegung hemmender Strom induziert wird.

2. Durch Kurzschließen der Spule eines Spiegelgalvanometers kann man die Schwingungen augenblicklich abbremsen.

3. Eine Magnetnadel schwingt in einem Kupferbügel. Bei geschlossenem Bügel klingen die Schwingungen bedeutend schneller ab als bei offenem.

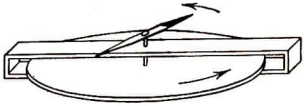


Bild 232. Versuch von Arago (1825)

4. **Versuch von Arago.** Eine leicht drehbare Magnetnadel befindet sich über einer rotierenden Kupferscheibe (Bild 232). Die Nadel wird ebenfalls von der Drehbewegung erfaßt. Läßt man umgekehrt einen Magneten über einer drehbaren Scheibe rotieren, so dreht sich die Scheibe mit. Hierbei werden Wirbelströme induziert, und diese wirken ihrer Entstehungsursache (Relativbewegung zwischen Magnet und Metallscheibe) entgegen.

8.7. Die Energie des magnetischen Feldes

8.7.1. Berechnung der Feldenergie

Ähnlich wie im elektrischen Feld ist auch im magnetischen Feld einer Spule Energie enthalten. Um dieses Feld zu erzeugen, muß demnach Arbeit aufgewandt werden. Sie besteht darin, daß während des Stromanstieges nach dem Einschalten die auf dem Wege der Selbstinduktion entstehende Gegenspannung $U = w \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ zu überwinden ist. Hierfür ist während der Zeit Δt die Leistung $UI = w \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \cdot I$ bzw. die Arbeit $\Delta W = UI\Delta t = Iw\Delta\Phi$ erforderlich, die eben dazu dient, das magnetische Feld aufzubauen. Wenn man die Einschränkung macht, daß die Permeabilität μ der Spule konstant ist, wächst hierbei der Fluß Φ proportional zur Stromstärke an. Nach Bild 233 gibt das hinsichtlich des Zusammenhangs von Iw und Φ eine ansteigende Gerade. Der im Zeitraum Δt aufzuwendenden Arbeit entspricht der Flächeninhalt des schmalen, unter der Kurve liegenden Rechteckes $Iw \cdot \Delta\Phi$. Man erkennt auch, daß diese die Maßeinheit $(A \cdot Vs = Ws)$ hat.

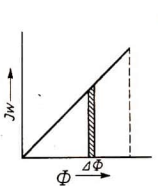


Bild 233

Die gesamte, zum Aufbau des Magnetfeldes notwendige Arbeit wird dann durch den Flächeninhalt des unter der Kurve liegenden Dreieckes dargestellt, der durch den schließlich erreichten Endwert Φ gegeben ist. Damit ist die gesamte Arbeit $W = \frac{Iw}{2} \cdot \Phi$. Der Fluß Φ aber hängt mit der Induktivität L nach der Beziehung (82) $L = w \frac{\Phi}{I}$ zusammen. Setzt man $\Phi = \frac{IL}{w}$ in das Produkt ein, so erhält man für die Feldenergie

$W = \frac{Iw}{2} \cdot \frac{IL}{w}$ oder den

(89) **Energiegehalt eines magnetischen Feldes** (bei konstantem μ): $\boxed{W = \frac{LI^2}{2}}$

Da hierbei vorausgesetzt wird, daß die Induktivität L bzw. die Permeabilität μ während des Vorgangs konstant ist, gilt der Ausdruck daher nur für Luft- und Massekernspulen sowie bei Eisenkernen mit großem Luftspalt.

Man erkennt übrigens die Ähnlichkeit dieses Ausdrucks mit demjenigen für die elektrische Energie (55) $W = \frac{CU^2}{2}$ [1]. Bedenkt man, daß $L = \frac{w^2 \mu_0 \mu F}{l}$ und $I = \frac{Hl}{w}$, so erhält man die andere Schreibweise

(90) $$\boxed{W = \frac{1}{2} H^2 \mu_0 \mu l F}$$

(ebenfalls für konstantes μ). Hier kommt zum Ausdruck, daß die magnetische Energie in dem Volumen $V = lF$ enthalten ist:

Träger der magnetischen Energie ist das magnetische Feld.

Wenn das Feldvolumen V mit Eisen ausgefüllt ist, darf man μ nicht als konstant betrachten, weshalb dann auch Φ nicht mehr proportional zu Iw ist. Die auf Bild 233 gegebene Kurve ist dann auch keine Gerade mehr. Um die Feldenergie finden zu können, muß dann der Wert des Integrals $W = \int Iw \cdot d\Phi$ ermittelt werden. Das ist jedoch nur auf grafischem Wege möglich, da der Verlauf der Magnetisierungskurve keine mathematisch darstellbare Funktion ist.

8.7.2. Die Zugkraft eines Magneten

Vor den Polen eines Elektromagneten (Bild 234) befinde sich der eiserne Anker A, der mit der Kraft P angezogen wird. Der Luftzwischenraum $V = lF$ ist ein Teil des ganzen magnetischen Feldes und enthält nach (90) die magnetische Energie $W = \frac{H^2 \mu_0 l F}{2}$ (im Luftraum ist $\mu = 1$) oder wegen $\mu_0 H = B$

$$W = \frac{B^2 l F}{2 \mu_0}.$$

Nach dem Anlegen des Ankers ist dieser Teil des Feldes und damit sein Energieanteil nicht mehr vorhanden. Dafür wird eine äquivalente mechanische Arbeit $W = Pl$ verrichtet.

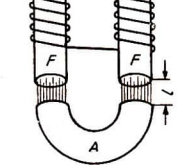


Bild 234. Magnetfeld zwischen Polen und Anker eines Magneten

[1]) Interessant ist auch die formale Übereinstimmung mit der kinetischen Energie einer bewegten Masse

$$W = \frac{mv^2}{2}.$$

Dann kürzt sich l aus der letzten Gleichung, und man erhält die

(91) **Zugkraft eines Magneten:** $$\boxed{P = \frac{B^2 F}{2\mu_0}}$$

in Newton. Man erhält sie in kp, wenn man das Ergebnis durch den Umrechnungsfaktor 9,81 N/kp dividiert.

Bild 235. Lasthebemagnet mit einer Last von 5000 kp

Beispiel: Ein U-förmiger Elektromagnet aus Stahlguß hat zwei Polflächen von je 2 cm² und wird von 300 Amperewindungen erregt. Der Gesamtweg der Feldlinien beträgt 25 cm. Der Eisenquerschnitt und damit die Induktion B sei (wie auf Bild 234) überall gleich groß. Welche Tragkraft entwickelt der Magnet?

Die Feldstärke beträgt $H = \frac{300\ \text{A}}{0{,}25\ \text{m}} = 1200\ \text{A/m}$. Nach der Magnetisierungskurve S. 106 ergibt sich daraus eine Induktion von 1,42 Vs/m². Da zwei Polflächen vorhanden sind, ist $F = 4 \cdot 10^{-4}\ \text{m}^2$. Nach der obigen Formel (91) bekommt man

$$P = \frac{1{,}42^2\ \text{V}^2\ \text{s}^2\ 4 \cdot 10^{-4}\ \text{m}^2\ \text{A m}}{\text{m}^4\ 2 \cdot 1{,}256 \cdot 10^{-6}\ \text{Vs}} = 321\ \text{N} = \underline{32{,}7\ \text{kp}}.$$

9. Der Wechselstrom

9.1. Grundeigenschaften des Wechselstroms

Zur Versorgung der Wirtschaft mit elektrischer Energie wird heute fast ausschließlich **Wechselstrom** verwendet (Bild 236). Der Hauptgrund hierfür ist, daß sich mit Hilfe von Transformatoren die Spannung nach Wunsch bequem verändern läßt. Je höher die Spannung aber ist, desto geringer werden die Stromwärmeverluste bei der Energieübertragung auf große Entfernungen, weil bei gleicher Leistung die Stromstärke entsprechend kleiner ist. Dies ist deswegen wichtig, weil Erzeuger und Verbraucher elektrischer Energie in den modernen Volkswirtschaften weit auseinanderliegen.

Beispiel: Am 10 km entfernten Verbrauchsort soll einer Kupferleitung von 20 mm² Querschnitt eine Leistung von 11 kW bei einer Spannung von 110 V entnommen werden. Dann muß (27) der Strom $I = \frac{N}{U} = \frac{11\,000}{110}\ \text{A} = 100\ \text{A}$ fließen. Der Widerstand der Leitung ergibt sich zu $R = \frac{0{,}0175 \cdot 20\,000}{20}\,\Omega = 17{,}5\,\Omega$. Hervorgerufen durch die Wärmeentwicklung in der Leitung, entsteht (28) ein Leistungsverlust von $N_v = I^2 R = (100^2 \cdot 17{,}5)\ \text{W} = 175\ \text{kW}$. Der Verlust ist somit um ein Vielfaches größer als die Nutzleistung.

Wählt man aber eine Spannung von 5000 V, so beträgt die Stromstärke bei gleicher Nutzleistung nur noch $\frac{11\,000}{5000}\ \text{A} = 2{,}2\ \text{A}$, und der Leistungsverlust in der Leitung sinkt auf $N_v = 2{,}2^2 \cdot 17{,}5 = 85\ \text{W}$. Der Verlust fällt kaum noch ins Gewicht!

9.1.1. Die Entstehung einer sinusförmigen Wechselspannung

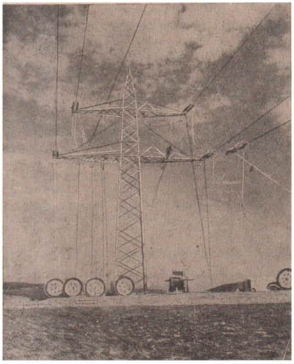


Bild 236. Abspannmast einer 220-kV-Leitung

Eine einfache rechteckige Drahtschleife drehe sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit in einem homogenen Magnetfeld (Bild 237). Im Gegensatz zum Gleichstromgenerator (Bild 203) sind die beiden Enden der Schleife an zwei getrennte, voneinander isolierte **Schleifringe** geführt. An jeden Schleifring legt sich eine Bürste, die den induzierten Strom abnimmt und weiterleitet.

Bei senkrechter Anfangslage und gleichförmiger Rotation befindet sich die Schleife nacheinander in den auf Bild 238 angegebenen Stellungen. Die im Draht 1 induzierte Spannung ist nach Satz (81) proportional den je Zeiteinheit geschnittenen Feldlinien. Je größer der je Zeiteinheit zurückgelegte Drehwinkel α aber ist, um so mehr Linien werden je Zeiteinheit vom Draht geschnitten. Hierfür stellen die kleinen Abschnitte c einen Maßstab dar. Ihre Länge ist bei jeweils gleicher Bogenlänge b gleich $c = b \sin \alpha$.

In einer gleichförmig rotierenden Schleife wird im homogenen Feld eine sinusförmige Spannung induziert.

Bei technischen Drehvorgängen geht man aber nicht von dem je Zeiteinheit zurückgelegten Drehwinkel α aus, sondern von der Winkelgeschwindigkeit $\omega = \frac{\alpha}{t}$ (s. I, Abschn. 4.41). Es ist dann $\alpha = \omega t$ und damit der

(92) **Momentanwert der induzierten Wechselspannung:** $\boxed{u = U_{\max} \sin \omega t}$

$U_{\max}$ ist dabei der bei jeder halben Umdrehung erreichte **Scheitelwert** (Höchstwert) der Spannung; denn der größte Betrag, den ein Sinus überhaupt annehmen kann, ist 1.

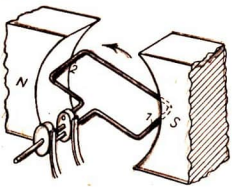


Bild 237. Prinzip des Wechselstromgenerators

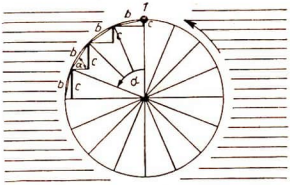


Bild 238. Schneiden der Feldlinien während der Rotation des Drahtes 1

Im Verlauf einer weiteren Vierteldrehung nimmt u wieder auf den Wert 0 ab. Während der anschließenden zweiten Halbdrehung schneidet der Draht die Feldlinien in der entgegengesetzten Richtung. Die Rechte-Hand-Regel ergibt, daß die Spannung dann ihre Richtung umkehrt. Während einer vollen Umdrehung durchläuft die Wechselspannung eine **volle Periode,** die aus je einer positiven und negativen Halbwelle besteht (Bild 239).

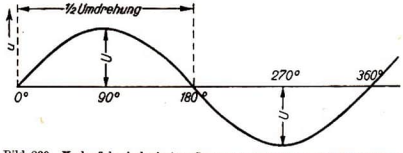


Bild 239. Verlauf der induzierten Spannung während einer Umdrehung der Drahtschleife (1 volle Periode)

Die Winkelgeschwindigkeit der rotierenden Schleife bezeichnet man als

(93) **Kreisfrequenz:** $\boxed{\omega = 2\pi f}$

die im Fall einer einfachen Leiterschleife deren Winkelgeschwindigkeit entspricht (I, Abschn. 4.41). f bedeutet hier die sekundliche Drehzahl der Stromschleife. Da der dabei erzeugte Wechselstrom ebenfalls f volle Perioden ausführt, bedeutet

f = Frequenz der Wechselspannung
(ausgedrückt in Hertz (Hz)).

Die elektrischen Maschinen werden so konstruiert, daß die Wechselspannung stets genau sinusförmig ist. In den gebräuchlichen Netzen wechselt die Spannung in einer Sekunde 100mal ihre Richtung:

Der technische Wechselstrom ist sinusförmig und hat eine Frequenz von meist 50 Hz (50 Perioden je Sekunde).

9.1.2. Der Wechselstromgenerator

Eine einzelne Leiterschleife erzeugt nur eine geringe Spannung. Um sie zu erhöhen, besitzt der Anker der technischen Wechselstromerzeuger (Generatoren) Spulen aus vielen Windungen. Da es ferner nur auf die Relativbewegung zwischen Feld und Anker ankommt und die Abnahme starker Ströme von den Schleifringen des Ankers unbequem ist, läßt man bei größeren Maschinen (von etwa 200kVA an) den Feldmagneten rotieren **(Läufer, Rotor)** und verbindet die Ankerwicklung fest mit dem ringförmigen Gehäuse **(Ständer, Stator)**; daher die Bezeichnung **Innenpolmaschine.**

Den **Erregerstrom** für den rotierenden Feldmagneten liefert häufig eine besondere kleine Maschine, die

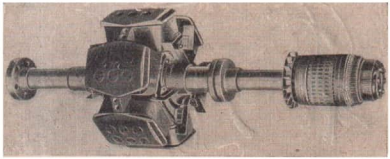


Bild 240. Polrad eines großen Generators von 700 kVA

seitlich auf derselben Welle sitzt (Bild 240). Um die für 50 Hz erforderliche hohe Drehzahl ($n = 3000^1$/min) herabzusetzen, verwendet man statt eines Pol- bzw. Spulenpaares deren mehrere. Bild 242 zeigt eine 4polige (2 Polpaare) Maschine.

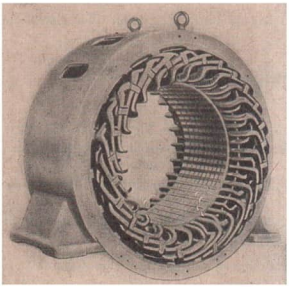


Bild 241. Ständer eines großen Generators von 700 kVA und $n = 1000^1$/min

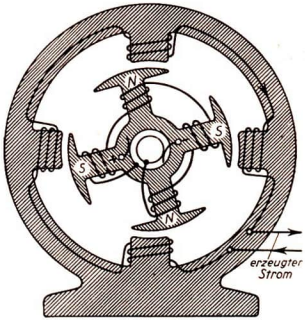


Bild 242. Wechselstrommaschine mit Innenpolen

An jeder der feststehenden Ankerspulen wandert abwechselnd ein Nord- und Südpol vorüber, so daß Wechselstrom induziert wird. Je 2 aufeinanderfolgende Spulen haben entgegengesetzten Wicklungssinn, weil sich über der einen ein Nord- und über der anderen zugleich ein Südpol befindet. In Bild 242 sind alle Ankerspulen in Reihe geschaltet. Will man bei niedriger Spannung größere Stromstärken erzielen, so sind sie parallelzuschalten.

9.1.3. Mittelwerte von Wechselspannungen und -strömen

Wenn Wechselstrom mit einem Gleichstrominstrument gemessen werden soll, vermag das Meßwerk wegen seiner Trägheit den schnellen Richtungsänderungen nicht zu folgen. Der Zeiger bleibt daher auf dem Nullstrich stehen. Da positive und negative Werte jeweils gleich groß sind, ergibt sich:

Der arithmetische Mittelwert über eine volle Periode ist gleich 0.

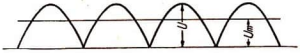


Bild 243. Gleichgerichtete Wechselspannung und ihr arithmetischer Mittelwert

Man kann aber mittels eines Doppelweg-Gleichrichters (S. 80) die eine Halbwelle umkehren, so daß die Spannung so verläuft, wie Bild 243 zeigt. Dann wird — abermals wegen der Trägheit des Meßwerkes — der Zeiger eine mittlere Lage einnehmen und das **arithmetische Mittel** aller Momentanwerte über eine Halbwelle anzeigen[1]).

[1]) Die Skalen sind jedoch stets in Effektivwerte umgeeicht.

Zu seiner Berechnung genügt wegen der Symmetrie der Sinuskurve eine viertel Periode. Näherungsweise erhält man diesen Wert, wenn man die 9 Sinuswerte für 5°, 15°, 25°, ..., 85° addiert und die Summe durch 9 dividiert. Das so erhaltene arithmetische Mittel der Sinuswerte ergibt sich hierbei zu 0,637.

Arithmetischer Mittelwert über eine halbe Periode: $\boxed{U_m = 0{,}637\, U_{max}}$

Exakt erhält man das Ergebnis nach folgendem Ansatz und Integration über eine halbe Periode:

$$U_m = U_{max} \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sin \alpha \, d\alpha = -\frac{U_{max}}{\pi} \Big[\cos \alpha\Big]_0^{\pi} = \frac{2}{\pi} U_{max}.$$

Der arithmetische Mittelwert muß verwendet werden, wenn es sich um die Feststellung von Elektrizitätsmengen oder elektrolytische Messungen handelt (daher auch **elektrolytischer Mittelwert**).
Meistens gibt man aber bei Wechselspannungen und -strömen den Effektivwert an:

Der Effektivwert eines Wechselstromes entspricht demjenigen Gleichstrom, der die gleiche Leistung (z. B. Wärmewirkung) hervorruft.

Beispielsweise hängt die Zeigerstellung eines Hitzdrahtinstrumentes von der je Zeiteinheit im Draht entwickelten Wärmemenge ab. Wie die Stromleistung (28) $N = I^2 R$, ist auch die je Zeiteinheit erzeugte Wärmemenge dem jeweiligen Quadrat der Stromstärke proportional.

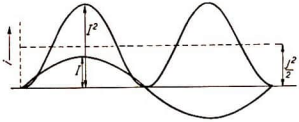


Bild 244. Quadrierte Sinuskurve

Man muß demnach zunächst die Quadrate der einzelnen Momentanwerte $i = I_{max} \sin \omega t$ bilden, diese addieren und die Summe durch die Anzahl dieser quadrierten Momentanwerte dividieren: $I_{eff}^2 = \frac{\Sigma I_{max}^2 \sin^2 \omega t}{n}$.

Dies kann man sich graphisch durch Zeichnen der Kurve $I_{max}^2 \sin^2 \omega t$ veranschaulichen (Bild 244). Sie liefert auch für die negative Halbwelle nur positive Werte und stellt wieder eine Sinuskurve, jedoch von doppelter Frequenz dar. Den Beweis führt man mit der bekannten Beziehung $\sin^2 \alpha = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\alpha$. Das zeitliche Mittel der quadrierten Sinuskurve entspricht der im Abstand von $\frac{I_{max}^2}{2}$ zur Zeitachse gezogenen Parallelen; denn ober- und unterhalb dieser Linie liegen gleich große Halbwellen. Man findet also $I_{eff}^2 = \frac{I_{max}^2}{2}$ und hieraus

$$I_{eff} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$$

oder, ausgerechnet, den

(94) **Effektivwert des Wechselstromes:** $\boxed{I_{eff} = 0{,}707\, I_{max}}$

Meist ist der Effektivwert bekannt und nach dem Scheitelwert gefragt.

(95) **Scheitelwert des Wechselstromes:** $\boxed{I_{max} = I_{eff} \sqrt{2}}$

Selbstverständlich gilt derselbe Faktor auch für eine Wechselspannung. Wenn nicht besonders hervorgehoben, bedeuten die Bezeichnungen I und U im folgenden stets die meist praktisch verwendeten Effektivwerte.

Beispiele: 1. Berechne den Scheitelwert der mit 220 V angegebenen Spannung des Wechselstromnetzes. — Es ist $U_{max} = U_{eff}\sqrt{2} = 311$ V.

2. Ein Kondensator trägt den Vermerk „Prüfspannung 500 V". Welche Wechselspannung darf höchstens angelegt werden? — Da die Prüfung mit Gleichspannung erfolgt, ist die Spannung von 500 V der Scheitelwert der Wechselspannung und ihr Effektivbetrag

$$U_{eff} = 500\ \text{V} \cdot 0{,}707 = \underline{353{,}5\ \text{V}}.$$

9.2. Widerstände im Wechselstromkreis

9.2.1. Rein ohmscher Widerstand

Da es hinsichtlich des Energieumsatzes (Wärmewirkung) auf die Stromrichtung nicht ankommt, ist die Wirkung wie bei reinem Gleichstrom. Elektrische Glühlampen und Heizöfen funktionieren mit beiden Stromarten in genau gleicher Weise.

Im ohmschen Widerstand verhält sich Wechselstrom wie Gleichstrom.

Aus diesem Grunde berechnet sich auch der Widerstand wie beim Gleichstrom.

(96) **Ohmscher Widerstand:** (Wirkwiderstand) $\boxed{R = \frac{U}{I}}$ [1]

Wenn die Spannung sinusförmig schwankt, ändert sich auch der Strom im gleichen Takt mit:

(97) **Strom und Spannung liegen beim ohmschen Widerstand in gleicher Phase.**

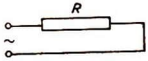


Bild 245. Ohmscher Widerstand im Wechselstromkreis

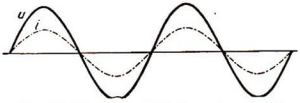


Bild 246. Spannung und Strom im rein ohmschen Widerstand

Zeichnet man die Strom- und Spannungskurve, so liegen daher die Maxima beider Kurven stets an derselben Stelle (Bilder 245, 246).

9.2.2. Der induktive Widerstand

Eine Wechselspannung u liege an einer Spule, deren ohmscher Widerstand so klein sei, daß er vernachlässigt werden kann. Bei Gleichspannung würde das einen überaus starken Strom ergeben, die Spule würde den Stromkreis praktisch kurzschließen. Für die Wechselspannung entsteht aber ein beträchtlicher Widerstand. Wegen der Selbstinduktivität und der raschen Stromänderungen wird nämlich ständig

[1]) Bei sehr hohen Frequenzen macht sich allerdings der sogenannte Hauteffekt (S. 145) als zusätzlicher Widerstand bemerkbar.

eine EMK induziert, die von der Klemmenspannung u überwunden werden muß. Es ist also $u = -e$.

Diese in den Windungen der Spule induzierte EMK berechnet sich nach dem Induktionsgesetz (79) zu $e = -w\frac{d\Phi}{dt} = -w\frac{d\Phi}{di}\frac{di}{dt}$ und nach (83) $u = L\frac{di}{dt}$. Der Differentialquotient $\frac{di}{dt} = \frac{d(I_{max}\sin\omega t)}{dt}$ aber liefert $I_{max}\omega\cos\omega t$ oder $I_{max}\omega\sin(\omega t + 90°)$, so daß der

Momentanwert der Spannung: $u = I_{max}\omega L\sin(\omega t + 90°)$.

Dieser Ausdruck läßt erkennen, daß die an die Spule gelegte Spannung u dem Strom i um 90°, d. h. um eine viertel Periode, **vorauseilt.** Wenn die Spannung ihren positiven Scheitelwert hat, ist der Strom gleich Null (Bilder 247, 248).

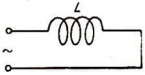


Bild 247. Induktivität im Wechselstromkreis

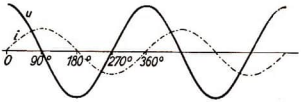


Bild 248. Spannung und Strom im rein induktiven Widerstand

(98) **Im rein induktiven Widerstand eilt** $\frac{\textbf{die Spannung dem Strom}}{\textbf{der Strom der Spannung}}$ **um eine viertel Periode** $\frac{\textbf{voraus}}{\textbf{nach}}$.

Oder kürzer ausgedrückt:

Zwischen Strom und Spannung besteht eine Phasenverschiebung von 90°.

Zur Zeit $t = 0$ erhält man $\sin(\omega \cdot 0 + 90°) = 1$ und damit den

(99) **Scheitelwert der Spannung:** $\boxed{U_{max} = I_{max}\omega L}$

Vergleicht man dies mit dem ohmschen Gesetz $U = IR$, so findet man als Widerstandsgröße den

(100) **induktiven Widerstand:** $\boxed{R_L = \omega L}$

(induktiver Blindwiderstand, Induktanz),

mit dessen Hilfe sich der Strom $I = \frac{U}{\omega L}$ berechnen läßt. Da sich Scheitel- und Effektivwert nur um den festen Faktor $\sqrt{2}$ unterscheiden, gelten diese Ausdrücke ebenso für die Effektivwerte.

Man ersieht aus $R_L = \omega L$, daß bei großer Frequenz und Induktivität auch der Widerstand entsprechend zunimmt. Bei sehr hoher Frequenz kann eine Spule den Strom praktisch vollkommen abriegeln. Der Vorteil einer solchen **Drosselspule** ist, daß sie im Gegensatz zu einem gewöhnlichen ohmschen Widerstand keine nennenswerte Energie in Wärme umsetzt und daher keinen Leistungsverlust hervorruft.

Beispiel: An einer Spule der Selbstinduktivität $L = 0{,}05$ H liegt eine Wechselspannung mit dem Effektivwert von 15 V und 50 Hz. Wie groß sind der induktive Widerstand und der fließende Strom? ($f = 50$ Hz.)

Nach (99) ist $I_{\text{eff}} = \dfrac{U_{\text{eff}}}{\omega L} = \dfrac{15\ \text{Vs A}}{314 \cdot 0{,}05\ \text{Vs}} = \underline{0{,}96\ \text{A}}$.

Weiterhin ist der induktive Widerstand selbst $R_{\text{L}} = 314\,{}^1/\text{s} \cdot 0{,}05\ \text{Vs/A} = \underline{15{,}7\,\Omega}$.

9.2.3. Der kapazitive Widerstand

Eine Wechselspannung u liege an einem Kondensator (Bild 249). Einem Gleichstrom würde er den Weg völlig versperren, da das Dielektrikum ein Isolator ist. Bei Wechselstrom ist dies aber nicht der Fall. Der Kondensator wird jedesmal beim Anwachsen der Spannung geladen und während des Abklingens der Spannung wieder entladen.

So fließt dem Kondensator während des Ladevorganges nach (48) in jedem Augenblick die Elektrizitätsmenge $\mathrm{d}Q = C\,\mathrm{d}u$ zu. Das ergibt einen momentanen Strom von $i = \dfrac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} = C\dfrac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}$. Ist die angelegte Spannung sinusförmig, d. h. $u = U_{\max} \sin \omega t$, so ergibt die Differentiation wie vorhin $\dfrac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} = U_{\max}\,\omega \cos \omega t = U_{\max}\,\omega \sin(\omega t + 90°)$, so daß der

Momentanwert des Stromes: $i = U_{\max}\, C \sin(\omega t + 90°)$.

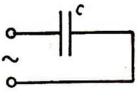


Bild 249. Kapazität im Wechselstromkreis

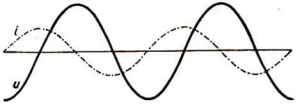


Bild 250. Spannung und Strom im rein kapazitiven Widerstand

Man ersieht hieraus:

(101) **Im rein kapazitiven Widerstand eilt** $\dfrac{\textbf{der Strom der Spannung}}{\textbf{die Spannung dem Strom}}$ **um eine vierte Periode** $\dfrac{\textbf{voraus}}{\textbf{nach}}$ (Bild 250).

Dies steht ganz im Einklang damit, daß der Höchstwert der Spannung in einem Kondensator erst dann erreicht wird, wenn der Ladevorgang beendet ist, d. h. der Strom zu fließen aufgehört hat.

Für $t = 0$ ergibt sich der

(102) **Scheitelwert des Stromes:** $\boxed{I_{\max} = U_{\max}\,\omega C}$

mit dem

(103) **kapazitiven Widerstand:** $\boxed{R_{\text{C}} = \dfrac{1}{\omega C}}$

(kapazitiver Blindwiderstand, Kapazitanz).

Für hohe Frequenzen und große Kapazitäten wird dieser Widerstand sehr klein. Ein Kondensator stellt für den Wechselstrom ein u. U. nur geringfügiges Hindernis dar. Auch dieser Widerstand verzehrt keine Energie.

Beispiele: 1. Welchen Widerstand hat ein Kondensator von 2 μF für eine Frequenz von 50 Hz, und welcher Strom fließt bei einer Spannung von 220 V? — $R_C = \frac{10^6\ \text{sV}}{314 \cdot 2\ \text{As}} = 1590\,\Omega$; $I = \frac{220\ \text{V}}{1590\ \Omega} = 0{,}138\ \text{A}$.

2. Legt man parallel zu einem hochohmigen Lautsprecher einen Kondensator von einigen tausend pF (1 Picofarad = 10^{-12} F), so wird die Klangfarbe merklich dunkler. Der Kondensator hat für hohe Frequenzen einen nur kleinen Widerstand und wirkt für diese wie ein Kurzschluß.

9.2.4. Die Addition phasenverschobener Spannungen und Ströme

Ein ohmscher und ein induktiver Widerstand seien parallelgeschaltet. Beide Teilströme vereinigen sich dann in den Verzweigungspunkten wieder und ergeben den im Hauptstromkreis fließenden Gesamtstrom. Bei Gleichstrom wäre er gleich der algebraischen Summe der beiden Zweigströme. Nunmehr sind aber die beiden Zweigströme nach (98) phasenverschoben. Es fragt sich, wie in diesem Fall die Addition zu geschehen hat und welche Phasenverschiebung im Hauptstromkreis zu erwarten ist.

Dem Knotenpunkt fließen auf jeden Fall zwei Ströme mit verschiedener Phasenlage zu, die dann zusammen als ein einziger Strom abfließen müssen; denn in einem Leiter können nicht gleichzeitig zwei verschiedene Ströme vorhanden sein. Dieselbe Frage taucht auf, wenn in einer Reihenschaltung verschiedene phasenverschobene Teilspannungen auftreten, die zusammen eine einzige Gesamtspannung ergeben müssen.

Die Lösung findet sich, wenn man diese Wechselgrößen als Schwingungen auffaßt. Dann werden sich beim Zusammentreffen diese Teilschwingungen überlagern. Wie das im einzelnen geschieht, wurde bereits (Band I, Abschn. 6.71) behandelt: Der jeweils resultierende Momentanwert muß gleich der Summe der einzelnen Momentanwerte sein.

Graphisch zeigt dies das **Liniendiagramm.** Die resultierende Kurve (Bild 251) erhält man, indem man die Ordinaten Punkt für Punkt addiert und alle Endpunkte miteinander verbindet. Der tatsächliche Verlauf des Gesamtstromes stellt offenbar wieder eine Sinuskurve dar.

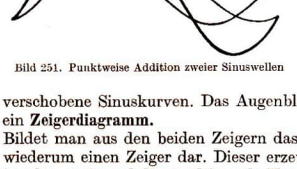


Bild 251. Punktweise Addition zweier Sinuswellen

Ein anderer Weg ergibt sich, wenn man daran denkt, daß die einzelnen Ordinaten einer Sinuskurve durch Projektion eines gleichförmig rotierenden Zeigers auf die senkrechte Achse entstehen. Rotieren 2 Zeiger, die einen Winkel φ miteinander bilden, mit gleicher Winkelgeschwindigkeit, so erzeugen sie 2 phasenverschobene Sinuskurven. Das Augenblicksbild solch rotierender Zeiger nennt man ein **Zeigerdiagramm.**

Bildet man aus den beiden Zeigern das Parallelogramm, so stellt dessen Diagonale wiederum einen Zeiger dar. Dieser erzeugt, fest mit den beiden ersten Zeigern verbunden, rotierend die resultierende Kurve des Liniendiagramms.

Der punktweisen Addition im Liniendiagramm entspricht die Konstruktion des diagonalen Zeigers im Zeigerdiagramm.

Beweis: Jeder senkrechte Schnitt durch das Liniendiagramm (Bild 252) entspricht einem bestimmten Drehwinkel des Zeigerdiagramms. Im Liniendiagramm ist jede Ordinate der resultierenden Kurve die Summe der Ordinaten der Komponenten. Im Zeigerdiagramm muß

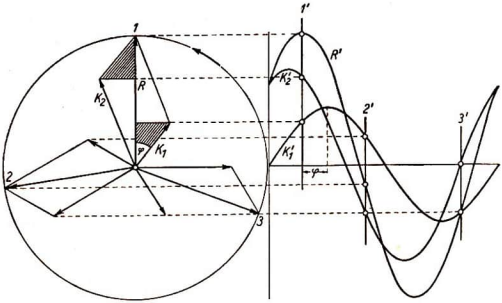


Bild 252. Addition von Zeigern. Die Zeiger K_1 und K_2 erzeugen beim Rotieren die entsprechenden Sinuskurven K_1' und K_2'. Der resultierende Zeiger gibt die Sinuskurve R'. Jedem Schnitt 1'···3' durch das Liniendiagramm entspricht eine bestimmte Stellung 1···3 des im ganzen rotierenden Zeigerdiagramms

ebenfalls die Summe der Projektionen der Komponenten auf die Vertikale gleich der Projektion der Resultierenden sein. Damit müssen die beiden schraffierten Dreiecke auf Bild 252 kongruent sein. Dies ist nur möglich, wenn die Resultierende die Diagonale eines Parallelogramms ist.

Da die Diagonale bei ihrer Rotation wiederum eine Sinuskurve erzeugt, gilt:

Die Addition zweier sinusförmiger Wechselgrößen gleicher Frequenz ergibt wiederum eine Sinuskurve.

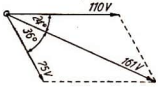


Bild 253
Addition zweier phasenverschobener Spannungen

Ebenso ist unmittelbar zu erkennen:

Die Phasenverschiebung φ der resultierenden Kurve ist gleich dem Winkel, den die Diagonale im Zeigerdiagramm mit der einen Komponente bildet.

Weil man aus dem Zeigerdiagramm die meist allein interessierenden Scheitelwerte und die Phasenverschiebung sofort ablesen kann, gibt man dieser Versinnbildlichung bei weitem den Vorzug. Dabei kann man sogar die Vorstellung, daß das Zeigerdiagramm in Wirklichkeit rotiert, beiseite lassen. Ebenso kann man ohne weiteres Effektivwerte eintragen, obwohl die Zeiger in Verbindung mit dem Liniendiagramm eigentlich nur Scheitelwerte bedeuten sollten. Üblicherweise zeichnet man das Parallelogramm (meist genügt bereits ein Teildreieck) so, daß eine der beiden Komponenten senkrecht oder waagerecht liegt.

Zusammenfassend gilt demnach als wichtigste Regel:

Wechselspannungen und -ströme werden im Zeigerdiagramm nicht algebraisch sondern geometrisch addiert.

Beispiel: Zwei Spannungen gleicher Frequenz von 75 bzw. 110 V_{eff} sind um 60° gegeneinander verschoben. Ermittle den Effektivwert der Gesamtspannung und die Phasenwinkel gegenüber den beiden Komponenten auf zeichnerischem Wege. — Das gezeichnete Parallelogramm nebst den maßstäblich ablesbaren Werten zeigt Bild 253.

9.2.5. Reihenschaltung von Wechselstromwiderständen

1. Ohmscher Widerstand und Induktivität in Reihe (Bild 254). Im ohmschen Widerstand sind Spannung und Strom in gleicher Phase, während in der Induktivität die Spannung dem Strom um 90° vorauseilt. Durch beide Widerstände fließt aber offenbar derselbe Strom I, der in jedem Einzelwiderstand einen Spannungsabfall hervorruft. Wenn es sich um Gleichstrom handeln würde, wäre die gesamte, an der Schaltung liegende Spannung gleich der algebraischen Summe der Teilspannungen. Hier muß aber bei der Addition der Teilspannungen berücksichtigt werden, daß zwischen den beiden Spannungswellen eine Phasenverschiebung von 90° vorliegt.

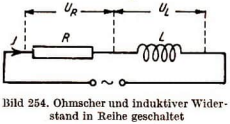


Bild 254. Ohmscher und induktiver Widerstand in Reihe geschaltet

Es handelt sich demnach um die Addition zweier gegeneinander verschobener Sinusschwingungen U_R und U_L. Man erledigt daher die Summation am bequemsten nach der im vorigen Abschnitt beschriebenen Methode, d. h. durch Zeichnen des Zeigerdiagramms.

Hierbei braucht man nicht mehr daran zu denken, daß das Zeigerdiagramm eigentlich rotiert, da es darauf ankommt festzustellen, welchen Wert die resultierende Spannung besitzt und welchen Phasenwinkel diese Gesamtspannung mit dem Strom bildet. Man zeichnet daher 2 rechtwinklig zueinander stehende Zeiger mit den Beträgen U_R und U_L (Bild 255). Als gemeinsame Bezugsrichtung dieses **Spannungsdiagramms** nimmt man den Strom I und zeichnet U_R in die gleiche Richtung wie die von I. Hiermit kommt zum Ausdruck, daß U_R und I in gleicher Phase liegen. Das entstehende Parallelogramm (hier ein Rechteck) liefert dann die

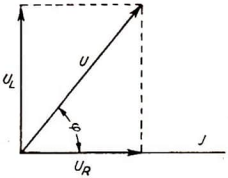


Bild 255. Teilspannungen und Gesamtspannung im Zeigerdiagramm zur Schaltung in Bild 254

gesamte Klemmenspannung:

(104) $$\boxed{U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = I\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$ (bei R und L in Reihe).

Die Gesamtspannung einer Reihenschaltung ist gleich der geometrischen Summe der Teilspannungen.

Die letzte Quadratwurzel enthält die beiden Widerstandsgrößen und heißt

(105) **Scheinwiderstand:** (Impedanz) $$\boxed{R_S = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

Auch hier sieht man, daß die Widerstände nicht algebraisch, sondern geometrisch addiert werden.

Um den **Phasenwinkel** zu finden, mit dem die Gesamtspannung dem durch die Anordnung fließenden Strom voraneilt, betrachte man die geometrische Lage des Zeigers U gegenüber der Richtung von I.

(106) **Phasenwinkel zwischen Gesamtspannung und Strom:** $\boxed{\tan\varphi = \frac{\omega L}{R}}$

Dieser Fall liegt praktisch bei jeder von Wechselstrom durchflossenen **Spule** vor. Die im Abschnitt 9.2.2. gemachte Annahme einer reinen Induktivität trifft in Wirklichkeit niemals zu. Stets müssen die Drahtwindungen einen ohmschen Widerstand haben. Man kann sich leicht vorstellen, daß in einer solchen Spule ohmscher und induktiver Widerstand gewissermaßen in Reihe liegen. Genaugenommen handelt es sich hier um eine gedachte **Ersatzschaltung,** da sich ohmscher und induktiver Widerstand nicht räumlich auseinanderhalten lassen.

Beispiele: 1. Man lege eine Spule mit Eisenkern und einen induktionsfreien Widerstand in Reihe an eine Wechselspannung. Mißt man die beiden Teilspannungen einzeln, so ist deren algebraische Summe größer als die gesamte Klemmenspannung.

2. Legt man an eine Spule die Wechselspannung von 110 V (50 Hz), so fließt ein Strom von 0,4 A; bei einer gleich großen Gleichspannung beträgt der Strom dagegen 3 A. Welchen ohmschen Widerstand und welche Induktivität hat die Spule? — Der ohmsche Widerstand ergibt sich aus dem Gleichstromversuch mit $R = \frac{U}{I} = \frac{110\text{ V}}{3\text{ A}} = 36{,}67\,\Omega$. Der Scheinwiderstand beträgt beim Wechselstromversuch $R_s = \frac{U}{I} = \frac{110\text{ V}}{0{,}4\text{ A}} = 275\,\Omega$. Hierin ist der ohmsche Widerstand mit enthalten. Nach (105) erhält man $L = \frac{\sqrt{R_s^2 - R^2}}{\omega} = \frac{\sqrt{275^2 - 36{,}67^2}}{314}\text{ H} = 0{,}868\text{ H}$.

2. Ohmscher, induktiver und kapazitiver Widerstand in Reihe (Bild 256). In diesem Fall sind 3 Teilspannungen zu addieren. Es ist dabei zu bedenken, daß die kapazitive Teilspannung $\frac{I}{\omega C}$ nach (102) dem Strom um 90° nacheilt und von der genau entgegengerichteten Spannung $I\omega L$ zu subtrahieren ist. Wie das graphisch im Zeigerdiagramm geschieht, zeigt Bild 257. Es ist dann die

(107) **gesamte Klemmenspannung:** (bei R, L und C in Reihe) $\boxed{U = I\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$

Die Quadratwurzel ist der Scheinwiderstand der ganzen Anordnung. Natürlich kann es auch vorkommen, daß $\frac{1}{\omega C} > \omega L$ oder $\frac{1}{\omega C} = \omega L$.

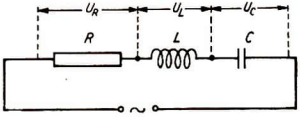


Bild 256. Ohmscher, induktiver und kapazitiver Widerstand in Reihe geschaltet

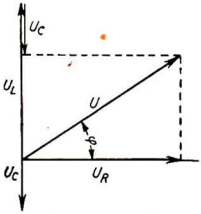


Bild 257. Teilspannungen und Gesamtspannung zur Schaltung in Bild 256

9.2.6. Die Parallelschaltung von Wechselstromwiderständen

Vom Gleichstrom her ist uns noch bekannt, daß bei parallel liegenden Widerständen sich die Ströme addieren. Hier ist jedoch wiederum zu beachten, daß bei vorhandener Phasenverschiebung nur geometrisch addiert werden darf.

1. Ohmscher Widerstand und Kapazität parallel (Bild 258). An beiden Schaltgliedern liegt offenbar dieselbe Spannung U. Mit ihr liegt der Strom I_R in gleicher Phase, weshalb dessen Richtung im Zeigerdiagramm (Bild 259) mit der Bezugsrichtung U

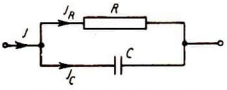


Bild 258. Ohmscher und kapazitiver Widerstand parallelgeschaltet

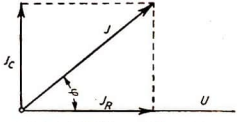


Bild 259. Teilströme und Gesamtstrom zur Schaltung in Bild 258

zusammenfällt. Da aber der durch die Kapazität fließende Strom I_C der Spannung U um 90° vorauseilt (101), weist sein Zeiger senkrecht nach oben. Aus dem so gezeichneten **Stromdiagramm** liest man unmittelbar ab:

(108) **Gesamtstrom:** $$\boxed{I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} = U\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + (\omega C)^2}}$$

(bei R und C parallel)

(109) **Phasenwinkel zwischen Gesamtstrom und Spannung:** $$\boxed{\tan\varphi = \omega RC}$$

Begründung: Der Tangens von φ ist gegeben durch $\frac{I_C}{I_R} = \frac{U\omega C}{U/R}$.

Jeder Kondensator mit festem Dielektrikum läßt sich als eine Kapazität mit parallel liegendem Widerstand R auffassen. Bei den hochwertigen Isolierstoffen spielt jedoch der Isolationswiderstand nur eine untergeordnete Rolle. Vielmehr fallen die **dielektrischen Verluste** ins Gewicht. Sie werden durch die in den Molekülen des Dielektrikums sehr rasch vor sich gehenden Ladungsverschiebungen (Verschiebungspolarisation, S. 53) verursacht. Diese wirken sich letzten Endes so aus, als sei ein ohmscher Widerstand vorhanden.

Da trotz allem der Phasenwinkel nur wenig von 90° abweicht und der zu großen Tangenswerten gehörige Winkel in den Tafeln nur ungenau ablesbar ist, berechnet man den

(110) **Verlustwinkel (oder Verlustfaktor):** $$\boxed{\tan\delta = \frac{1}{\omega RC}}$$

Hierunter versteht man den Komplementwinkel δ zum Phasenwinkel φ.
Er ist nur wenig von der Frequenz abhängig und stellt ein wichtiges Gütemerkmal von Isolierstoffen dar (s. Tabelle S. 19).

2. Induktiver und kapazitiver Widerstand parallel (Bild 260). Die beiden zu addierenden Ströme haben entgegengesetzte Phasenlage, da der eine um 90° nacheilt und

der andere um 90° voreilt. Sie können daher einfach voneinander subtrahiert werden. Das Zeigerdiagramm nach Bild 261 ergibt den

(111) **Gesamtstrom:** $\boxed{I = I_L - I_C}$ (bei L und C parallel).

Setzt man $I_L = \frac{U}{\omega L}$ und $I_C = U\omega C$, so ergibt sich

(112) $$I = U\left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right).$$

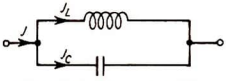


Bild 260. Induktiver und kapazitiver Widerstand parallelgeschaltet

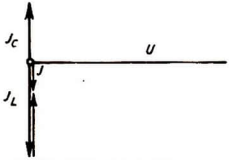


Bild 261. Teilströme und Gesamtstrom zur Schaltung in Bild 260

9.2.7. Resonanz in Wechselstromkreisen

1. Reihen- (oder Spannungs-) Resonanz. Es sei nochmals die Reihenschaltung von Widerständen nach (107) betrachtet. Die Quadratwurzel in dem Ausdruck

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

ist der Scheinwiderstand R_s. Wenn hierin der Klammerausdruck $\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$ gleich 0 wird, hat R seinen kleinstmöglichen Wert. Wenn also $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, verbleibt allein der ohmsche Widerstand der Anordnung, und der Strom I steigt auf ein Maximum. Diesen Fall der Gleichheit der beiden Blindwiderstände nennt man **Resonanz.** Da dann der gesamte Blindwiderstand gleich Null ist, hängt die Stromstärke nur noch vom Wirkwiderstand R ab. Die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung ist aufgehoben.

Reihenresonanz = Strommaximum durch Kompensation der Blindwiderstände.

Versuch: Eine Spule von 250 Windungen auf U-förmigem Kern mit verschiebbarem Anker liegt in Reihe mit einem Kondensator von 10 μF und einem Strommesser (Bild 262). Bei einer Wechselspannung von etwa 20···30 V (50 Hz) fließt ein bestimmter Strom. Durch Hin- und Herschieben des aufliegenden Ankers verändert man die Induktivität der Spule und findet bald eine Stelle, wo der Strommesser ein Maximum anzeigt. In diesem Fall liegt die Resonanz vor.

Bild 262. Versuch zur Reihenresonanz

Besonders wichtig ist zu wissen, bei welcher Frequenz Resonanz eintritt, wenn die beiden Schaltglieder L und C fest vorgegeben sind. Aus der bereits angeführten

(113) **Resonanzbedingung:** $\boxed{\omega L = \frac{1}{\omega C}}$

ergibt sich $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ und wegen $\omega = 2\pi f$ die

(114) **Resonanzfrequenz:** $$\boxed{f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}}$$

Anstatt „Reihenresonanz" wird auch häufig der Ausdruck „Spannungsresonanz" verwendet, weil in diesem Fall an der Induktivität und Kapazität sehr hohe Spannungen entstehen, die sich wegen ihrer entgegengesetzten Phasenlage zwar gegenseitig aufheben, aber Spule und Kondensator einzeln hoch belasten.

Beispiel: Ein Kondensator von 1 μF und eine Spule von 2 H und 50 Ω liegen in Reihe an einer Spannung von 100 V. Berechnet man nach der eingangs erwähnten Formel die Stromstärke für zunehmende Frequenzen von 100···120 Hz und stellt die Stromstärke in Abhängigkeit von der Frequenz graphisch dar, so entsteht die in Bild 263 angegebene Kurve (Resonanzkurve). Die Resonanzfrequenz ergibt sich nach (114) zu $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{2 \cdot 10^{-6}}} = 112$ Hz in Übereinstimmung mit dem Kurvenbild. Der Resonanzstrom beträgt $I_r = \frac{100\text{ V}}{50\,\Omega} = 2$ A. Am Kondensator liegt die Spannung $U_r = \frac{I}{\omega C} = \frac{2 \cdot 10^6}{2\pi\, 112 \cdot 1}$ V $= 2840$ V.

Aus diesem Beispiel ersieht man, daß im Resonanzfall an den einzelnen Schaltgliedern gefährlich hohe, die Klemmenspannung weit übersteigende Spannungen auftreten können. Zerstörungen von Kabeln und Maschinen sind die häufige Folge.

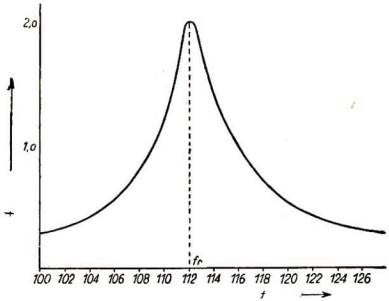


Bild 263. Spannungsresonanz. Verlauf des Stromes bei zunehmender Frequenz

2. Parallel- (oder Strom-) Resonanz. Ein ganz ähnlicher Resonanzfall kann auch eintreten, wenn Induktivität und Kapazität parallelgeschaltet sind. Nach (112) ergab sich dafür die Stromstärke

$$I = U\left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right).$$

Aufhebung der Phasenverschiebung bedeutet auch hier wieder, daß die Widerstände ωL und $\frac{1}{\omega C}$ gleich groß sein müssen. Wenn dies der Fall ist, verschwindet der Klammerausdruck, und der Strom I wird gleich Null.

In Wirklichkeit kann dies kaum vorkommen, da infolge des stets vorhandenen ohmschen Widerstandes auch im Resonanzfall noch ein Reststrom fließt:

Parallelresonanz = Strominimum durch Kompensation der Blindwiderstände.

Versuch: Mit einer ähnlichen wie vorhin beschriebenen Anordnung kann man auch die Stromresonanz sinnfällig vorführen (Bild 264). Man verwendet hierbei eine Spule von 1000 Windungen und einen dazu parallelgeschalteten Kondensator von 5 μF (Wechselspannung etwa 80 V). In den Resonanzkreis sind noch 2 Lämpchen eingeschaltet. Bei aufgelegtem Anker leuchtet zunächst nur Lämpchen L_1, und ein in den Hauptstromkreis geschaltetes Amperemeter zeigt einen Strom an. Wenn man den Anker verschiebt, geht der Ausschlag des Strommessers bei günstigster Stellung fast bis auf 0 zurück, während das Lämpchen L_2 ebenfalls aufleuchtet. Am Strominimum in der Zuleitung erkennt man den Resonanzfall.

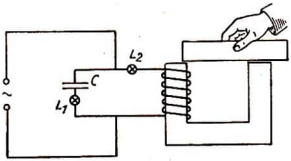


Bild 264. Versuch zur Parallelresonanz

Im Gegensatz zur Reihenresonanz hat hier der Strom in der äußeren Zuleitung ein Minimum, da der Widerstand des Resonanzkreises dabei einen Höchstwert hat. Wegen derselben Resonanzbedingung (113) ergibt sich auch dieselbe Resonanzfrequenz (114).

Es ergibt sich demnach die Gegenüberstellung:

Reihenresonanz	*Parallelresonanz*
(Spannungsresonanz)	(Stromresonanz)
Die Teilspannungen an den Blindwiderständen sind überhöht (gegenüber der angelegten Spannung).	Die Teilströme in den Blindwiderständen sind überhöht (gegenüber dem einfließenden Strom).
Der Strom durchläuft die bekannte Resonanzkurve (bei konstanter Eingangsspannung).	Die Spannung durchläuft die bekannte Resonanzkurve (bei konstantem Eingangsstrom).

9.2.8. Der Haut-(Skin-)Effekt

Bei Wechselstrom von höherer Frequenz (von etwa 1000 Hz an stärker bemerkbar) tritt auch in geraden Drähten noch ein besonderer Widerstand auf. Der Strom ist dabei nicht mehr über den ganzen Drahtquerschnitt gleichmäßig verteilt, sondern drängt sich an der Leiteroberfläche zusammen: der sogenannte **Haut- (Skin-) Effekt.** Er wirkt sich so aus, als sei der Drahtquerschnitt verkleinert, womit sich der Widerstand vergrößern muß.

Hochfrequenter Wechselstrom fließt daher fast nur an der Leiteroberfläche (Verwendung versilberter Drähte für Hochfrequenzleitungen).

Erklärung: In einem bestimmten Augenblick möge der Strom I auf Bild 265 nach oben fließen und dabei in Zunahme begriffen sein. Er ist dann nach der Korkenzieherregel (68) mit konzentrischen magnetischen Feldlinien umgeben. Dieser rings um die Drahtachse laufende Kraftfluß Φ nimmt daher ebenfalls zu. Nach der Induktionsregel (78) ruft aber ein zunehmender Kraftfluß einen Kreisstrom im Gegenzeigersinn hervor. Es liegt zwar hier im Gegensatz zu Bild 197 keine Drahtschleife um den Kraftfluß, in welcher die im Linkssinn induzierte EMK

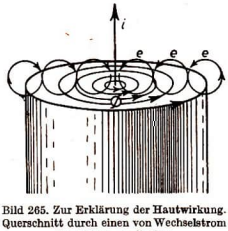


Bild 265. Zur Erklärung der Hautwirkung. Querschnitt durch einen von Wechselstrom durchflossenen Leiter

zustande kommt. Da jedoch der Fluß Φ das massive Metall des Leiters durchsetzt, entstehen in ihm ringförmige Wirbelströme der gezeichneten Richtung.
Dabei sieht man, daß diese Wirbelströme in der Drahtachse dem primären Strom I entgegenfließen, wodurch dieser geschwächt wird. Am Rande des Leiters dagegen unterstützen die induzierten Wirbelströme den Leitungsstrom, womit dieser hier verstärkt wird.

9.3. Die Leistung im Wechselstromkreis

9.3.1. Die Wirkleistung

Wenn zur Aufrechterhaltung eines elektrischen Stromes überhaupt eine Leistung erforderlich ist, so liegt das nur an der dabei erzeugten Stromwärme oder anderen frei werdenden Energiearten (mechanischer Energie, Licht, Schall usw.). Wie im Fall der Stromwärme leicht einzusehen ist, spielt die Stromrichtung dabei keine Rolle. Für den Fall also, daß der im Wechselstromkreis liegende Widerstand keine andere Wirkung hat, als Wärme zu erzeugen (wie z. B. eine Glühlampe), berechnet sich die Leistung wie beim Gleichstrom als Produkt aus Spannung U und Strom I. Dabei sind für U und I die von den üblichen Meßinstrumenten angezeigten Effektivwerte einzusetzen; denn nach S. 134 ist ja der Effektivwert des Wechselstromes derjenige, der die gleiche Leistung wie ein gleich starker Gleichstrom hervorbringt.
Im rein ohmschen Widerstand wird daher eine „wirkliche" Leistung verbraucht und in Form von Wärme nach außen abgegeben. Man spricht daher von der

(115) **Wirkleistung eines ohmschen Widerstandes:** $\boxed{N_w = UI}$

Hervorgehoben sei nochmals die physikalische Bedeutung des Ausdruckes:

Wirkleistung = in nichtelektrische Energieformen umgewandelte elektrische Leistung.

Sie wird daher in Watt ausgedrückt.

9.3.2. Die Blindleistung

Ganz anders liegt der Fall aber bei einer Spule oder einem Kondensator. Denkt man sich die Spule im idealen Fall aus widerstandslosem Draht gewickelt, so ist zwar der Widerstand für Gleichstrom gleich Null, nicht aber für Wechselstrom. An den Spulenenden liegt eine Spannung, die dem Strom um 90° vorauseilt und die mit einem passenden Instrument jederzeit gemessen werden kann.

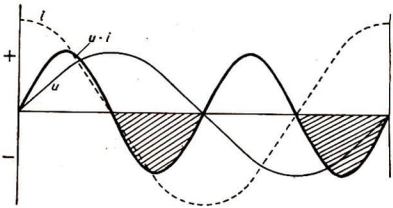


Bild 266. Verlauf der Blindleistung im Kondensator

Multipliziert man diese mit dem Strom, so stellt das Produkt UI formal zwar auch eine Leistung dar; man sucht aber vergeblich nach der ihr entsprechenden, äquivalenten anderen Energiemenge; denn diese aus widerstandslosem Draht bestehende Spule erzeugt keinerlei Wärme.

Ähnlich verhält sich ein idealer, d. h. verlustloser Kondensator, der keinen Gleichstrom passieren läßt, wohl aber Wechselstrom. Auch hier kann man das Produkt UI bilden, obwohl der Kondensator keinerlei Leistung in Form von Wärme nach außen abgibt.
Wie das zustande kommt, zeigt Bild 266, das die um 90° gegenüber der Spannung versetzte Stromwelle zeigt. Für jeden Punkt des Liniendiagramms ist das Produkt der Momentanwerte $u \cdot i$ gebildet. Je eine Halbwelle der neu entstehenden Sinuswelle (sie ist ein Bild des Leistungsverlaufes) liegt im positiven und negativen Bereich des Diagramms. Im ersten Fall nimmt der Kondensator Energie zum Aufbau seines elektrischen Feldes auf, im zweiten gibt der Kondensator die gleiche Energiemenge wieder ab.
Zwischen Kondensator und Spannungsquelle bzw. einer Spule und dem übrigen Stromkreis pendelt die Energie hin und her, ohne selbst verbraucht zu werden.
In diesen beiden Fällen reiner Kapazität bzw. Induktivität nennt man das Produkt UI daher

Blindleistung eines kapazitiven oder induktiven Widerstandes: $\boxed{N_b = UI}$

Um Verwechslungen mit der Wirkleistung (Watt) zu vermeiden, wird die Blindleistung in **var**[1]) angegeben.
Spule und Kondensator verbrauchen also im idealen Fall keine Wirkleistung. Die Blindleistung tritt nach außen hin überhaupt nicht in Erscheinung, zu ihrer Erzeugung ist im zeitlichen Mittel kein Energieaufwand nötig.

9.3.3. Die Wechselstromleistung im allgemeinen Fall

Geht man von der Spannung U aus, so kann der Strom I im allgemeinen um einen bestimmten Winkel φ gegenüber U verschoben sein. Im rein ohmschen Widerstand ist die Verschiebung des Stromes $\varphi = 0$. Man spricht dann von reinem **Wirkstrom** I_w. Wenn im Fall der idealen Spule oder des verlustlosen Kondensators der Strom um den Winkel $\varphi = 90°$ gegenüber U verschoben ist, spricht man von reinem **Blindstrom** I_b, der natürlich genauso meßbar ist wie der Wirkstrom. Die entsprechenden Widerstände nennt man **Wirk-** bzw. **Blindwiderstand.**
Nun sind aber die in einem Wechselstromkreis liegenden Widerstände oder Widerstandskombinationen häufig gemischter Art, d. h., sie besitzen gleichzeitig ohmschen sowie induktiven bzw. kapazitiven Widerstand; denn jede gewöhnliche Spule hat nach S. 140 sowohl Wirk- als auch einen gewissen Blindwiderstand. Die Verschiebung des Stromes I ist daher weder $\varphi = 0°$ noch $\varphi = 90°$, sondern hat irgendeinen dazwischenliegenden Wert. Man kann dann den Strom I gedanklich in zwei Komponenten zerlegen, von denen die eine, der Wirkstrom I_w, mit der Spannung U in gleicher Phase ($\varphi = 0°$) liegt und die andere, der Blindstrom I_b, um 90° dagegen verschoben ist. Beide addieren sich geometrisch zum Gesamtstrom I.
Aus dem Diagramm (Bild 267) liest man ab:

(116) **Wirkstrom:** $\boxed{I_w = I \cos \varphi}$

(117) **Blindstrom:** $\boxed{I_b = I \sin \varphi}$ (eines zusammengesetzten Widerstandes)

[1]) Das Kurzzeichen var (Voltampere réactif) ist die neuere Bezeichnung für das früher verwendete BW (Blindwatt)

Da die Wirkstromkomponente mit der Spannung in gleicher Phase liegt, ergibt sich die

(118) **Wirkleistung eines beliebigen Widerstandes:** $\boxed{N_w = UI \cos \varphi}$

Den hier auftretenden Faktor nennt man den **Leistungsfaktor** $\cos \varphi$.

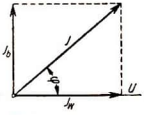


Bild 267. Zerlegung des Stroms I in Wirk- und Blindstrom

Im Fall der idealen Spule ist $\cos \varphi = \cos 90° = 0$. Wie nicht anders zu erwarten, ist ihre Wirkleistung $N_w = UI \cdot 0 = 0$. Für den rein ohmschen Widerstand ist dagegen $\cos \varphi = \cos 0° = 1$ und $N_w = UI$.

Die in den Haushaltungen verwendeten Wechselstromzähler sind so eingerichtet, daß sie nur die reine Wirkarbeit anzeigen. Sie reagieren nicht auf den Blindanteil.

Dennoch ist die Ermittlung der Blindleistung N_b mitunter von großer Wichtigkeit. Sie ergibt sich als

(119) **Blindleistung:** $\boxed{N_b = UI \sin \varphi}$

Ein in den Stromkreis geschaltetes Amperemeter zeigt allerdings weder den Wirkstrom I_w noch den Blindstrom I_b an, sondern den Strom I, der sich geometrisch aus beiden Komponenten zusammensetzt. Wenn man demnach Klemmenspannung und Strom eines Elektromotors mißt und miteinander multipliziert, so erhält man nicht die tatsächliche umgesetzte (Wirk-)Leistung, sondern die stets größere

(120) **Scheinleistung eines beliebigen Widerstandes:** $\boxed{N_s = UI}$

Um Verwechslungen mit der Wirkleistung (Watt) zu vermeiden, wird die Scheinleistung in **VA** (Voltampere) angegeben.
Erst nach weiterer Multiplikation mit dem Leistungsfaktor $\cos \varphi$ und der Zeit entsteht die vom Zähler registrierte und vom Konsumenten zu bezahlende Wirkarbeit.
Dividiert man die Gleichung $UI \cos \varphi = N_w$ durch $UI = N_s$, so erhält man den

(121) **Leistungsfaktor:** $\boxed{\cos \varphi = \frac{N_w}{N_s}}$

Schließlich kann man auch die Ströme in dem auf Bild 267 dargestellten Diagramm mit der gemeinsamen Spannung U multiplizieren und erhält dabei ein entsprechendes, geometrisch ähnliches **Leistungsdiagramm** (Bild 268). Hieraus läßt sich ohne weiteres die Beziehung ablesen:

(122) $\boxed{N_s = \sqrt{N_w^2 + N_b^2}}$

Bild 268

Beispiele: 1. Auf dem Typenschild eines Motors ist der Leistungsfaktor $\cos \varphi = 0{,}7$ angegeben, seine Leistung beträgt 25 kW, die Klemmenspannung 220 V. Berechne die Stromstärke I, Wirk- und Blindstrom sowie Schein- und Blindleistung.

Die Scheinleistung ist $N_s = \frac{N_w}{\cos \varphi} = \frac{25 \text{ kW}}{0{,}7} = 35{,}7 \text{ kVA}$. Die Stromstärke $I = \frac{35\,700 \text{ V}}{220\ \Omega} = 162 \text{A}$. Wirkstrom $I_w = 162 \text{ A} \cdot 0{,}7 = 113{,}4 \text{ A}$. Blindstrom $I_b = 162 \text{ A} \cdot 0{,}715 = 115{,}8 \text{ A}$. Blindleistung $N_b = 35{,}7 \text{ kVA} \cdot 0{,}715 = 25{,}5 \text{ kvar}$ oder $220 \text{ V} \cdot 115{,}8 \text{ A} = 25{,}5 \text{ kvar}$.

2. Durch einen Motor fließt ein Strom von 6,5 A bei einer Klemmenspannung von 220 V. Der Zähler zeigt 580 W an. Berechne die Scheinleistung, den Leistungsfaktor und den Phasenwinkel. — $N_s = 220\ \text{V}\ 6{,}5\ \text{A} = 1430\ \text{VA}$; $\cos\varphi = \frac{N_w}{N_s} = 0{,}405$; $\varphi = 66°$ (Cosinustabelle).

9.4. Die Bedeutung des Blindstromes und seine Kompensation

Auch der in den öffentlichen Leitungsnetzen fließende Strom ist durch induktive Belastung mit Motoren und dgl. kein reiner Wirkstrom, sondern läßt sich nach Bild 267 in Wirk- und Blindanteil zerlegen. Auf jeden Fall ist der tatsächlich fließende Strom I größer als der Wirkstrom I_w, der zur Umformung in nutzbare Arbeit erforderlich ist. Damit wird das Leitungsnetz bedeutend stärker belastet, als es dem eigentlichen Bedarf entspricht. Dieser Nachteil ist um so schwerwiegender, als der in den Kabeln und Leitungen entstehende Verlust durch Stromwärme mit dem Quadrat der Stromstärke I anwächst.

Es muß daher das Bestreben aller Energieverbraucher sein, den Leistungsfaktor $\cos\varphi$ nach Möglichkeit zu verbessern, d. h., dem Wert 1 möglichst nahezubringen. Hierfür gibt es zwei Möglichkeiten. Die eine besteht im Betrieb besonderer, übererregter Synchronmotoren (sog. Phasenschieber, S. 155). Einfacher und bequemer sind jedoch große Kondensatoren, die dem jeweiligen Verbraucher parallelzuschalten sind. Die Kapazität C muß so bemessen sein, daß bei der betreffenden Klemmenspannung ein kapazitiver Blindstrom I_b durch den Kondensator fließt, der von gleicher Größe ist wie der induktive Blindstrom der jeweiligen Verbraucher. Beide Ströme müssen einander dann **kompensieren,** d. h. sich gegenseitig aufheben.

Die Blindleistung des Kondensators ist $N_C = U \cdot I$, wobei nach (102) $I = U\omega C$, so daß $N_b = U^2\omega C$ ist. Hieraus erhält man die

(123) **Kapazität eines Kondensators zur Kompensation der Blindleistung N_b:** $$\boxed{C = \frac{N_b}{U^2\omega}}$$

Beispiel: Ein Motor für 220 V (50 Hz) hat den Leistungsfaktor $\cos\varphi = 0{,}65$ und verbraucht 18 kW. Wie groß ist die Blindleistung und die Kapazität des zur vollständigen Kompensation parallelzuschaltenden Kondensators?

Die Scheinleistung ist zunächst $N_s = \frac{18}{0{,}65}\ \text{kVA} = 27{,}7\ \text{kVA}$; hieraus erhält man die Blindleistung $N_b = \sqrt{27{,}7^2 - 18^2}\ \text{kvar} = 20{,}8\ \text{kvar}$ und damit $C = \frac{20800\ \text{VAs}}{220^2\ \text{V}^2 \cdot 314} = 137\ \mu\text{F}$.

9.5. Der Transformator

Wechselstrom läßt sich mittels eines **Transformators (Umspanners)** bequem so umwandeln, daß nahezu ohne Leistungsverlust aus einer niederen Spannung eine hohe Spannung entsteht oder umgekehrt. Der umzuspannende Strom wird der **Primärwicklung** zugeführt, der gewünschte Strom der **Sekundärwicklung** entnommen (Bild 269). Beide Spulen liegen getrennt oder auch übereinander gewickelt auf einem gemeinsamen, geschlossenen Eisenrahmen. Das Verhältnis der beiden Windungszahlen nennt man das **Übersetzungsverhältnis.**

Der sich sinusförmig ändernde Primärstrom erzeugt im Eisenkern einen ebenfalls sinusförmigen magnetischen Fluß Φ. Dieser induziert in den beiden Spulen nach dem Induktions-

gesetz (79) die beiden elektromotorischen Kräfte $e_1 = -w_1 \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ und $e_2 = -w_2 \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$. Hierbei ist e_1 von der angelegten Primärspannung u_1 zu überwinden, so daß $u_1 = -e_1$, während e_2 auf der Sekundärseite als treibende Spannung zur Verfügung steht, d. h. $u_2 = e_2$. Somit sind die beiden Spannungen gegeneinander um 180° phasenverschoben.

Man erkennt hieraus das zahlenmäßige Verhältnis der beiden Spannungen:

$$\frac{\textbf{Primärspannung } U_1}{\textbf{Sekundärspannung } U_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

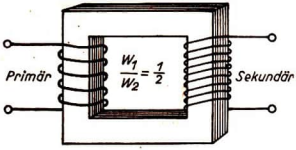


Bild 269. Schema eines eisengeschlossenen Transformators

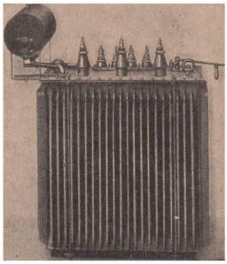


Bild 270. Großer Transformator mit Ölfüllung und Kühlrippen

Gute Transformatoren haben einen Wirkungsgrad von 95···98%, d. h., die Energieverluste sind so gering, daß man Ein- und Ausgangsleistung praktisch gleichsetzen kann. Daher muß für den idealen Transformator gelten: $U_1 I_1 = U_2 I_2$ bzw. $\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$ oder

$$\frac{\textbf{Primärstrom } I_1}{\textbf{Sekundärstrom } I_2} = \frac{w_2}{w_1}.$$

Versuch: Auf einem Eisenkern liegt außer der festen Primärwicklung ein lose aufgeschobener, als Sekundärwicklung mit einer einzigen Windung zu betrachtender Aluminiumring (Bild 271). Beim Einschalten des Stromes wird der Ring weggeschleudert und beweist, daß Primär- und Sekundärstrom von entgegengesetzter Richtung sein müssen.

Die Verluste eines Transformators werden hauptsächlich durch drei Vorgänge hervorgerufen:

1. **Hysteresisverluste.** Nach Abschn. 8.4.2. wird während jeder Periode die Hysteresisschleife des Eisens einmal umlaufen. Ihr Flächeninhalt ist der zur Ummagnetisierung nötigen Energie proportional. Daher verwendet man besonders legierte Bleche mit schmaler Hysteresisschleife.
2. **Wirbelstromverluste.** Im Eisen werden von dem periodisch wechselnden Fluß Φ Wirbelströme induziert. Abhilfe: Aufbau des Kerns aus einzelnen, voneinander isolierten Blechen, die so geschichtet sind, daß sich keine geschlossenen Strombahnen ausbilden können.
3. **Kupferverluste.** Hierunter versteht man die in den Wicklungen eintretenden Verluste durch Stromwärme.

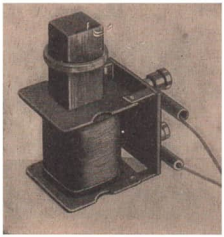


Bild 271. Beim Einschalten des Spulenstroms wird der Aluminiumring weggeschleudert

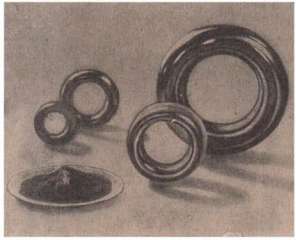


Bild 272. Kerne aus gepreßtem Eisenpulver

Bei großen Transformatoren muß die aus diesen Gründen entstehende Wärme durch besondere Kühlung abgeführt werden. Für die Hochfrequenztransformatoren der Radiotechnik verwendet man Kerne aus feinem, mit einem Bindemittel gepreßtem Eisenpulver (z. B. Ferrocart), weil zwischen den voneinander getrennten Eisenteilchen keine Wirbelströme möglich sind (Bild 272). Noch besser sind die **Ferritkerne** (Verbindungen des Eisenoxyds Fe_2O_3 mit anderen Oxyden), die von vornherein eine sehr kleine elektrische Leitfähigkeit bei hoher Permeabilität besitzen.

9.5.1. Der Funkeninduktor

Dem Transformator ähnlich ist der **Funkeninduktor** (Bild 273). Er wird in der Regel mit zerhacktem Gleichstrom betrieben und dient zur bequemen Erzeugung hoher Spannungen. Die aus wenigen Windungen dicken Drahtes bestehende Primärwicklung sitzt unmittelbar auf dem Eisenkern. Sie ist von den einigen tausend Windungen der Sekundärspule umgeben. Der in die Primärspule geleitete Strom wird im einfachsten Fall mit einem Hammerunterbrecher zerhackt (s. elektrische Klingel, S. 97). Wegen der Induktivität der Primärspule steigt der Primärstrom bei Stromschluß verhältnismäßig langsam an, so daß die in der Sekundärwicklung hierbei induzierte Spannung relativ niedrig ist. Dagegen besitzt der bei rascher Öffnung des Primärkreises induzierte Spannungsstoß eine hohe Spannungsspitze (Bild 274). Um sie möglichst hochzutreiben, muß der am Unterbrecher auftretende Öffnungsfunke beseitigt werden, der den Öffnungsvorgang verzögert. Hierzu dient der im unteren Teil des Induktors befindliche große Kondensator.

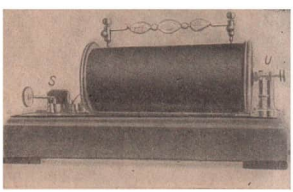


Bild 273. Funkeninduktor.
S Stromwender, U Hammerunterbrecher

Sehr schnelle (bis etwa 1000¹/s) Unterbrechungen erzielt der **Wehnelt-Unterbrecher.** Ein Platindraht taucht mit seiner Spitze neben einer Bleiplatte in 30%ige Schwefelsäure. Die sich erhitzende Spitze umgibt sich mit einer Dampfschicht, die den Strom unterbricht und vom Öffnungsfunken sogleich wieder zerstört wird. Ein Kondensator ist hierbei unnötig.

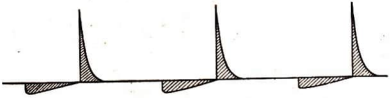


Bild 274. Spannungsverlauf in der Sekundärspule des Funkeninduktors

Bild 275. Entladungen auf der Sekundärseite des Induktors (zwischen Platte und Spitze)

Man verwendet den Funkeninduktor gern zur Demonstration der in Abschn. 6.1.1. behandelten Entladungserscheinungen in Luft, verdünnten Gasen und im Vakuum. Für technische Zwecke wird er kaum noch benutzt.

9.6. Der Dreiphasenstrom

9.6.1. Entstehung eines Dreiphasenstroms

Große elektrische Leistungen auf große Entfernungen werden meist mit Hilfe des **Dreiphasenstroms (Drehstroms)** übertragen. Er besteht aus einer zweckmäßigen Verkettung von **3 Einphasen-Wechselströmen.** (Bisher war hier nur vom Einphasenstrom die Rede.)

Drei einfache Stromschleifen sind nach Bild 276 um je 120° gegenseitig versetzt und rotieren gemeinsam in einem homogenen Magnetfeld. Die Drehstromgeneratoren der Technik enthalten an Stelle einzelner Stromschleifen größere Spulen, wobei es vorteilhafter ist, die Spulen fest einzubauen und den Feldmagneten rotieren zu lassen (Bild 277).

Die Ableitungen jeder Spule seien zunächst getrennt herausgeführt, so daß bei der Rotation 3 selbständige, getrennte Wechselströme entstehen. Da die Pole zeitlich

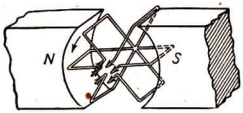


Bild 276. Entstehung eines Dreiphasenstroms

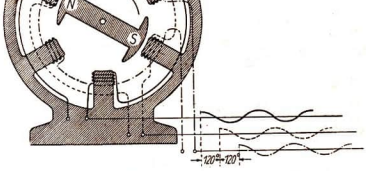


Bild 277. Prinzip eines Drehstromgenerators mit feststehenden Spulen und rotierendem Feldmagnet

nacheinander an den Spulen vorbeiwandern, sind die 3 Ströme um je 120° gegeneinander phasenverschoben (Bild 278). Damit ergeben sich zunächst $3 \cdot 2 = 6$ Spulenenden.

Die Summe der 3 um je 120° phasenverschobenen Ströme bzw. Spannungen ist in jedem Augenblick gleich 0.

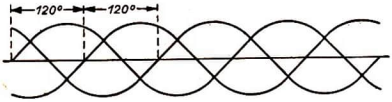


Bild 278. Liniendiagramm des Dreiphasenstroms

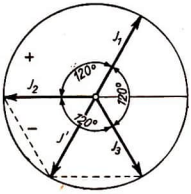


Bild 279. Zur Stromsumme beim Dreiphasenstrom

Beweis: Das Zeigerdiagramm (Bild 279) enthält die 3 Ströme I_1, I_2 und I_3. Dieses Diagramm muß (S. 139) rotierend gedacht werden. Faßt man z. B. die beiden Zeiger I_2 und I_3 zu ihrem resultierenden Zeiger zusammen, so ergibt sich der Zeiger I' (Bild 279). Wie man sieht, ist I' entgegengesetzt gleich mit I_1. Die Ströme heben sich damit in jedem Augenblick gegenseitig auf.

9.6.2. Die Dreieckschaltung

Von den ursprünglich 6 Zuleitungen zu den Spulen kann man jedoch 3 einsparen. Eine Möglichkeit besteht darin, das Ende der einen Spule mit dem Anfang der nächsten zu verbinden, so daß ein in sich geschlossener Stromkreis entsteht, die sogenannte **Dreieckschaltung** (Bild 280). Innerhalb dieses Dreiecks heben sich die Ströme nach dem soeben abgeleiteten Satz gegenseitig auf, so daß kein Stromfluß zustande kommen kann.

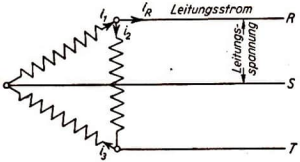


Bild 280. Dreieckschaltung

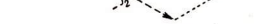


Bild 281. Zeigerdiagramm der Ströme in der Dreieckschaltung

Zwischen je 2 Eckpunkten liegt die Spannung je einer Spule, die sogenannte **Phasenspannung.** In jedem Eckpunkt selbst verzweigen sich 3 Ströme: Ein Spulenstrom fließt dem Eckpunkt zu, ein zweiter fließt von ihm weg, während die Differenz beider in die Leitung fließt: $i_R = i_1 - i_2$. Diese Differenz muß wiederum geometrisch gefunden werden. Bild 281 zeigt die Zeiger der Ströme I_1 und I_2 um 120° gegeneinander versetzt. Subtraktion von I_2 bedeutet Umwendung des Zeigers I_2 und geometrische Addition. Dabei ergibt sich I_R als Diagonale von der Länge $I_1\sqrt{3}$

(das Parallelogramm ist ein doppeltes gleichseitiges Dreieck!). Zusammenfassend gilt für die

(124) **Dreieckschaltung:** **Leitungsspannung = Phasenspannung**
Leitungsstrom = $\sqrt{3}$ · Phasenstrom

9.6.3. Die Sternschaltung

Die Anfänge aller 3 Spulen sind miteinander verbunden (Bild 282). Aus den Endpunkten des entstehenden Sterns fließt je ein Leitungsstrom ab, so daß Leitungsstrom = Phasenstrom. Die Spannung u_{RS} zwischen den Punkten 1 und 2 ist gleich

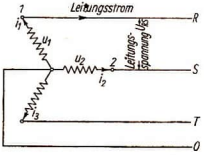


Bild 282. Sternschaltung

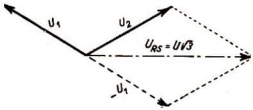


Bild 283. Zeigerdiagramm der Spannungen in der Sternschaltung

der Differenz der beiden Phasenspannungen u_1 und u_2; dies deshalb, weil vom Mittelpunkt aus die Spannungen einander entgegengerichtet sind. Wie bei der Dreieckschaltung die Teilströme, sind jetzt die beiden Teilspannungen geometrisch zu subtrahieren (Bild 283). Man findet, daß $U_{RS} = U_1\sqrt{3}$.

(125) **Sternschaltung:** **Leitungsspannung = $\sqrt{3}$ · Phasenspannung**
Leitungsstrom = Phasenstrom

Diese Beziehungen gelten nur dann, wenn alle 3 Phasen durch die äußeren Teile des Stromkreises gleichmäßig belastet sind. Häufig wird auch der Nullpunkt des Sterns als besondere Leitung herausgeführt **(Nulleiter).** Die Spannung einer Phasenleitung R, S oder T gegenüber dem Nulleiter ist dann gleich der Phasenspannung.

Beispiel: Zwischen den Leitungen R und S werden 220 V gemessen. Welche Spannung besteht zwischen R bzw. S und dem Nulleiter? — Nach den Gesetzen der Sternschaltung ist die Phasenspannung

$$U_{OR} = \frac{220}{\sqrt{3}}\,\text{V} = 127\,\text{V}.$$

9.7. Wechselstrommotoren

9.7.1. Der Synchronmotor

Für den Betrieb mit ein- und dreiphasigem Wechselstrom gibt es die verschiedensten Typen von Motoren, von denen hier nur vier erwähnt werden mögen.
Der **Synchronmotor** hat prinzipiell den gleichen Aufbau wie der in Bild 277 angegebene Generator. Dem Ständer wird Wechselstrom zugeführt, so daß dessen Innenpole abwechselnd zu Nord- und Südpolen werden. Der Läufer wird wie beim Generator

mit Gleichstrom erregt. Seine Pole wechseln daher nicht. Bild 284a zeigt, wie in einem bestimmten Augenblick ein Südpol des Läufers von einem Nordpol des Ständers angezogen wird. Nachdem dieser erreicht ist, ist inzwischen der nächste Pol zum Nordpol geworden (Bild 284b) und zieht den Südpol des Läufers um ein weiteres Stück nach rechts usw. Dieses Spiel setzt voraus, daß die Drehgeschwindigkeit des Läufers genau zum Polwechsel des Ständers paßt; daher die Bezeichnung Synchron- (gleichlaufender) Motor und seine Verwendung überall dort, wo es auf genau gleichbleibende Drehzahlen ankommt. Der Motor läuft nicht von selbst an, sondern muß angeworfen werden.

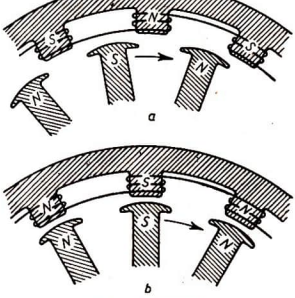


Bild 284. Synchronmotor

Ein besonderer energiewirtschaftlicher Vorteil liegt darin, daß der Synchronmotor bei Übererregung des Läufers in den Spulen des Stators eine Gegenspannung induziert. Die Klemmenspannung des Ständers steht sonst im Gleichgewicht mit der vom magnetischen Fluß Φ induzierten Gegenspannung (siehe Transformator). Bei Übererregung wird diese Gegenspannung vergrößert, wodurch dem Netz ein Gegenstrom entnommen wird, der den Fluß wieder auf den Wert Φ herabsetzt. Daher ist dieser Gegenstrom ein um 90° voreilender, der das Netz wie eine Kapazität belastet. Damit steht ein wertvolles Hilfsmittel zur Verfügung, den im Netz durch induktive Verbraucher stets vorhandenen Blindstrom zu kompensieren und den Leistungsfaktor zu verbessern.

9.7.2. Asynchronmotoren

1. Der Einphasen-Kollektormotor

Da die Stromrichtung auf den Drehsinn eines Gleichstrommotors keinen Einfluß hat, können Gleichstrommotoren prinzipiell auch mit Wechselstrom betrieben werden. Wechselstrom induziert aber in den massiven Eisenteilen starke Wirbelströme, die den Wirkungsgrad sehr beeinträchtigen würden. Anker und Feldmagnet müssen daher aus dünnen, durch Papier voneinander isolierten Blechen geschichtet werden. Die Stromzufuhr geschieht dann wie beim Gleichstrommotor über einen auf der Ankerwelle sitzenden Kollektor. Die Drehzahl solcher Universalmotoren, die meist nur für kleinere Leistungen, z. B. zum Betrieb von Haushaltgeräten, gebaut werden, ist von der Frequenz unabhängig. Sie sind daher **Asynchronmotoren** (nicht gleichlaufende Motoren).

2. Der Kurzschlußläufermotor

Der Ständer eines nach Bild 277 gebauten Motors wird mit Drehstrom gespeist. Das Strommaximum entsteht in den Ständerspulen entsprechend der zeitlichen Verschiebung der 3 Stromphasen nacheinander. Das sich zwischen je zwei gegenüberliegenden Ständerspulen ausspannende Magnetfeld wandert daher im Kreise. Man nennt es ein

Drehfeld (Bild 285). Der einfachste und zuverlässigste Drehstrommotor hat einen sogenannten **Käfiganker** (Kurzschlußläufer, Bild 286). Er besteht aus achsenparallelen Kupferstäben, die beiderseits durch je einen Kupferring verbunden sind. Die Kraftlinien des umlaufenden Feldes schneiden die Stäbe und induzieren in ihnen Ströme. Nach der Lenzschen Regel (S. 127) sind diese so gerichtet, daß sie ihrer Bewegungsursache entgegenwirken, d. h., die anfangs große Relativgeschwindigkeit zwischen Feld und Läufer wird immer kleiner, der Motor läuft immer schneller. Er kann jedoch die Geschwindigkeit des Feldes nie ganz einholen, da sonst keine Kraftlinien mehr geschnitten würden und der Antrieb wegfiele.

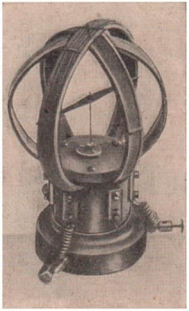


Bild 285. Kompaßnadel rotiert im Drehfeld dreier Spulen

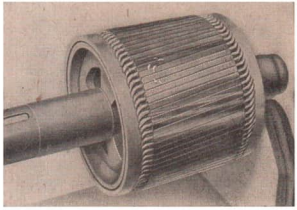


Bild 286. Käfiganker

Man versteht ferner unter dem

$$\textbf{Schlupf} = \frac{\textbf{Differenz der Drehzahlen von Feld und Läufer}}{\textbf{Drehzahl des Feldes}}.$$

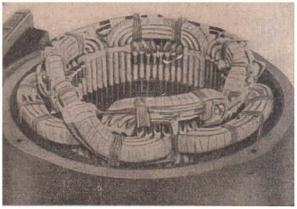


Bild 287. Wickelkopf eines Drehstrommotors

Wegen des geringen Widerstandes des Käfigs wird schon bei sehr kleinem Schlupf ein starker Strom induziert, weshalb die Drehzahl auch bei veränderlicher Belastung fast konstant bleibt. Daher ist auch das Anzugsmoment groß.

Dem Vorteil des starken Anzugsmomentes steht jedoch ein Nachteil gegenüber. Beim Einschalten entsteht ein starker Stromstoß, der das 6- bis 8fache des Betriebsstromes betragen kann. Um diesen hohen Einschaltstrom herabzusetzen, kann man der Ständerwicklung z. B. einen Anlaßwiderstand oder einen regelbaren Transformator vorschalten. Eine einfachere Möglichkeit besteht indes darin, die normalerweise im Dreieck geschaltete Ständerwicklung vor dem Anlegen der Netzspannung

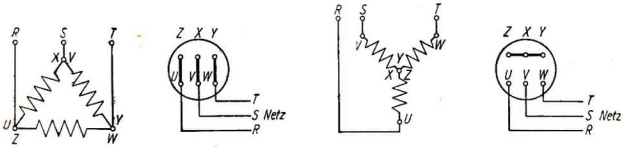


Bild 288. Schema der Stern-Dreieck-Umschaltung

in einen Stern umzuschalten. Zu diesem Zweck führen dann die 6 Wicklungsenden $U \cdots Z$ nach dem auf Bild 288 angegebenen Schema zu einem **Stern-Dreieck-Umschalter.** Ist also der Motor für eine Betriebsspannung von 380 V gebaut, so liegen nach der Umschaltung in einen Stern je zwei Phasenwicklungen in Reihe, wodurch an jeder Wicklung nur noch $\frac{380}{\sqrt{3}} = 220$ V liegen. Erst nach Erreichen einer höheren Drehzahl wird dann auf ein Dreieck zurückgeschaltet.

3. Der Schleifringläufermotor

An Stelle der kurzgeschlossenen Stäbe trägt der Läufer dieses Motors eine dreiphasige Wicklung, deren Enden zu drei auf der Welle sitzenden Schleifringen führen (Bild 289). Drei Bürsten nehmen den im Läufer induzierten Strom ab und führen ihn zu einem regelbaren Widerstand. Damit wird der hohe Anlaufstrom herabgesetzt. Erst bei zunehmender Drehzahl wird der Widerstand allmählich kleiner gemacht. Zuletzt können die drei Schleifringe kurzgeschlossen und die Bürsten abgehoben werden, worauf dann der Läufer als Kurzschlußläufer weiterarbeitet.

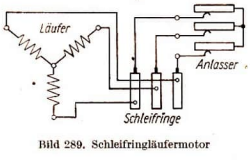


Bild 289. Schleifringläufermotor

10. Elektromagnetische Schwingungen und Wellen

10.1. Der einfache Schwingkreis

Einen Kondensator mit angeschalteter Spule (Bild 290) nennt man einen **geschlossenen Schwingkreis.** Durch kurzdauerndes Verbinden mit einer Spannungsquelle werde der Kondensator (C) aufgeladen. Man könnte dann annehmen, daß nach Lösen der Verbindung sich die auf den Platten befindliche Ladung über die leitende Verbindung der Spule (L) sofort ausgleichen müßte. Statt dessen aber pulsiert der Strom in raschem Wechsel von der einen Belegung des Kondensators über die Spule zur anderen Belegung hin und her.
Erst nachdem die elektrische Energie durch Wärmeentwicklung und andere Verluste aufgezehrt ist, kommen diese elektrischen **Schwingungen** zum Stillstand. Je geringer

diese Verluste sind, desto länger halten die Schwingungen an. Man spricht dann von größerer oder kleinerer **Dämpfung** des Schwingkreises.

Der Vorgang sei an Hand von Bild 291 näher verfolgt.

Man sieht, daß hierbei ein Wechselstrom zustande kommt, den die darunter gezeichnete Kurve wiedergibt. Wie sich beweisen läßt, verläuft er exakt sinusförmig. Unmittelbar ist erkennbar:

Die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung beträgt 90°.

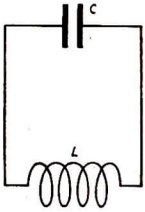


Bild 290. Geschlossener Schwingkreis

Ferner ist ersichtlich, daß die gesamte elektrische Energie, die der Kondensator bei a) enthält, bei c) im Spulenfeld als magnetische Energie aufgespeichert ist.

Während der Schwingungen findet eine periodische gegenseitige Umwandlung elektrischer in magnetische Energie statt.

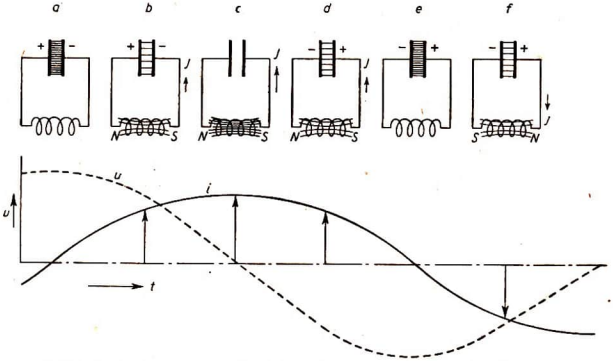


Bild 291. Vorgänge im geschlossenen Schwingkreis. Darunter Verlauf von Strom i und Spannung u

Der Einfachheit halber sei zunächst angenommen, daß der ohmsche Widerstand des Schwingkreises gleich 0 sei. Da sonst keine andere Energieform auftritt, gilt nach (55) und (89):

$$\frac{1}{2}\,CU^2 = \frac{1}{2}\,LI^2.$$

Der durch die Spule fließende Strom I wird dabei vom Kondensator als Spannungsquelle geliefert. Es ist dann nach (99) $I = \frac{U}{\omega L}$. Dies in die Energiegleichung ein-

Vorgänge im Schwingkreis

Bild	Vorgang	elektrisches Feld des Kondensators	Strom	magnetisches Feld der Spule	Spannung am Kondensator
a	Anfangszustand	in voller Stärke	0	0	in voller Höhe
b	Beginn der Entladung	abnehmend	anschwellend	in Bildung begriffen	abnehmend
c	Entladung beendet	0	Maximum	in voller Stärke	0
d	Beginn der umgekehrten Aufladung	in umgekehrter Richtung zunehmend	abklingend	abnehmend	im umgekehrten Sinne zunehmend
e	Aufladung beendet	in voller Stärke	0	0	in voller Höhe
f	Beginn der nächsten Entladung	abnehmend	anschwellend	in umgekehrter Richtung zunehmend	abnehmend

gesetzt, ergibt $CU^2 = \frac{LU^2}{(\omega L)^2}$, woraus $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ und die

(126) **Frequenz der ungedämpften Schwingung:** (Thomsonsche Formel)

$$\boxed{f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}}}$$

Dies steht übrigens im Einklang mit den Ergebnissen der in Abschnitt 9.2.7. behandelten Strom- bzw. Spannungsresonanz. Auch dort findet zwischen Kondensator und Spule ein Hin- und Herpendeln der Energie statt.

Beispiel: Welche Frequenz besitzt ein Schwingkreis, der aus einem Kondensator von 500 pF und einer Spule von 45 μH besteht? — Nach (126) ist

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{10^6\ \mathrm{A}\ 10^{12}\ \mathrm{V}}{45\ \mathrm{Vs}\ 500\ \mathrm{As}}} = 1{,}06 \cdot 10^6\ {}^1/\mathrm{s} = 1060\ \mathrm{kHz}.$$

Wie aus diesem Beispiel hervorgeht, wird bei kleiner Kapazität und Induktivität die Frequenz der Schwingungen außerordentlich groß. Derartige Frequenzen von über 100000 Hz = 100 kHz bezeichnet man als **Hochfrequenz.**

Hochfrequente Schwingungen wurden erstmalig bei **Funkenentladungen** von Feddersen (1862) festgestellt, als er einen zwischen zwei Kugeln überspringenden Funken mit einem Drehspiegel auseinanderzog und photographierte (Bild 292). Wichtig ist hierbei aber, daß an die Funkenstrecke nach Bild 293 ein Schwingkreis angeschlossen ist. Der erste Funke macht die Luft durch Ionisation genügend leitend, so daß sich der Entladungsvorgang pendelnd fortsetzen

Bild 292. Schwingende Funkenentladung

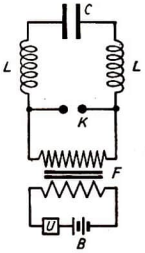


Bild 293. Erzeugung elektrischer Schwingungen.
C Kondensator
L Spulen
K Kugelfunkenstrecke
F Funkeninduktor
U Unterbrecher
B Batterie

kann, bis seine Energie verbraucht ist. Schließlich leitet der nächste Hauptfunke eine neue Serie von Schwingungen ein.

Derartige Schwingungen klingen deshalb nach der einleitenden Erregung schnell ab, sie verlaufen stark gedämpft. Längere Zeit waren durch Funken angeregte Schwingkreise der Hauptbestandteil drahtloser Sendeanlagen.

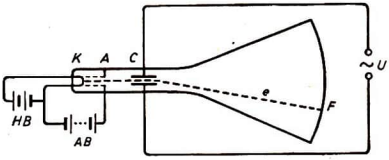


Bild 294. Schema einer Braunschen Röhre.
K Katode, A Anode mit Öffnung, C Ablenkplatten, F Leuchtfleck, e Elektronenstrahl, U zu untersuchende Wechselspannung, HB Heizbatterie, AB Anodenbatterie

10.2. Der Katodenstrahl-Oszillograph

Eine kolbenförmig erweiterte Glasröhre (Bild 294), deren Boden mit einer fluoreszierenden Schicht bedeckt ist, enthält eine Glühkatode und eine durchlochte Anode. Die zur Anode hin beschleunigten Elektronen fliegen geradlinig durch das Loch weiter und erzeugen auf dem Boden der Röhre einen hell leuchtenden Fleck. Der Strahl wird nun zwischen zwei kleinen Kondensatorplatten hindurchgeleitet. Legt man an diese eine Wechselspannung, so wird der Strahl je nach der Frequenz langsamer oder schneller hin- und herbewegt, wodurch sich der Lichtfleck zu einem Strich auseinanderzieht.

Diese Form der **Braunschen Röhre** gestattet die Untersuchung des Schwingvorganges, wenn man den hin- und hereilenden Strahl über einen Drehspiegel betrachtet. Letzterer wird beim **Katodenstrahl-Oszillograph** entbehrlich, wenn man ein zweites Plattenpaar rechtwinklig zum ersten anbringt und eine Kippspannung an dieses legt. Diese für sich allein läßt den Strahl in rasch fortlaufender Wiederholung mit gleichförmiger Geschwindigkeit von links nach rechts über den Schirm wandern. Die zu untersuchende Wechselspannung läßt den Strahl quer zu dieser Richtung schwingen, so daß sich auf dem Bildschirm eine genaue Kurve des Vorganges abzeichnet.

Anstatt der elektrostatischen Ablenkung durch Kondensatoren kann man auch elektromagnetische Ablenkung verwenden. Die hierzu notwendigen beiden Spulenpaare können von außen an den Hals der Röhre gelegt werden.

10.3. Die Triode als Schwingungserzeuger

Zur Herstellung hochfrequenter, sinusförmiger Schwingungen wird heute überwiegend die **Triode** (Dreielektrodenröhre und ihre Abarten) verwendet (Bild 295).

In den Anodenkreis einer Triode werde ein Schwingkreis geschaltet. Beim Anschluß der Anodenspannung setzt der Anodenstrom stoßartig ein, wodurch im Anodenkreis L_2—C_2 rasch abklingende Schwingungen entstehen. Um sie zu entdämpfen, d. h. beliebig lange aufrechtzuerhalten, erfand Meißner (1913) das Prinzip der **Rückkopplung.**

Die im Anodenkreis eingeleiteten Schwingungen induzieren in der Spule (L_1) des Gitterkreises im gleichen Takt verlaufende Spannungsschwankungen. Diese steuern wiederum den Anodenstrom, so daß die Schwingungen nicht nur aufrechterhalten, sondern außerdem noch verstärkt werden. Durch Regelung des Abstandes von (L_1) und (L_2) läßt sich der Grad dieser induktiven Rückkopplung verändern.

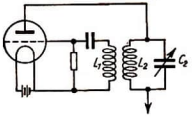


Bild 295. Schwingungserzeugung durch Rückkopplung

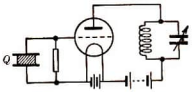


Bild 296. Schwingkreis mit Quarzsteuerung. Zur Rückkopplung dient die Kapazität zwischen Anode und Gitter

Mechanische Vergleiche: 1. Das Schwungrad einer Dampfmaschine würde schnell zum Stillstand kommen, wenn es nicht mit der Schiebersteuerung in Verbindung stünde. Diese steuert die Dampfzufuhr zum Zylinder im Takt der Umdrehungen des Schwungrades.

2. Die Schwingungen einer Schaukel hören infolge der Reibungsdämpfung bald auf. Durch periodisches Anstoßen der Schaukel wird die verlorengehende Energie immer wieder ersetzt, so daß die Schwingungen beliebig lange anhalten.

Bei Rundfunksendern, Quarzuhren usw. kommt es auf strengste Konstanthaltung der Frequenz an. Dies wird erreicht, wenn man zwischen den Platten eines im Gitterkreis liegenden Kondensators eine Quarzplatte (Q) **(Schwingquarz)** anbringt (Bild 296). Wie erwähnt (Abschn. 3.7.5.), erfährt der Kristall im elektrischen Feld eine periodische Dickenänderung, die ihn zu Eigenschwingungen veranlaßt, die ihrerseits gleichlaufende Kapazitätsschwankungen hervorrufen. Die Frequenz ist dann bei geeignetem Aufbau nur noch von der Temperatur des Kristalls abhängig.

10.4. Der Dipol als Schwingkreis

Als die beiden Bestandteile eines elektromagnetischen Schwingkreises hatten wir Kapazität und Induktivität erkannt. Es ist nun im Prinzip belanglos, welche technische Form diese beiden Schaltglieder haben. Jeder einfache, gerade Draht hat sowohl eine bestimmte Kapazität als auch Induktivität, wenngleich beide Werte auch sehr klein sein mögen.

So stellt der kreisförmige Drahtbügel mit zwei Endplatten auf Bild 297 einen recht einfachen **geschlossenen Schwingkreis** dar. Läßt man die beiden Platten verkümmern und biegt den Bügel auseinander, so wirken die beiden Drahthälften wie die zwei Platten eines Kondensators und sind abwechselnd positiv und negativ geladen. Man nennt diesen **offenen Schwingkreis** einen **elektrischen Dipol.** Der Leitungs-

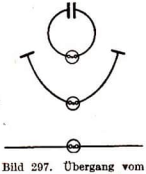


Bild 297. Übergang vom geschlossenen zum offenen Schwingkreis

strom pendelt zwischen den beiden Enden hin und her, wenn der Dipol zu Schwingungen angeregt wird.

Dies kann z. B. dadurch geschehen, daß in die Mitte des Dipols eine kleine Funkenstrecke eingefügt wird. Mit dieser Anordnung, Oszillator (Schwinger) genannt, entdeckte **Heinrich Hertz** 1888 die elektromagnetischen Wellen, deren Existenz von **Maxwell** bereits 1865 theoretisch vorausgesagt worden war.

Bild 298. Heinrich Hertz (1857 ··· 1894)

10.5. Freie elektromagnetische Wellen

10.5.1. Die Entstehung elektromagnetischer Wellen

Der Oszillator werde jetzt mit einem Funkeninduktor verbunden. Der zwischen den beiden Polen hin- und herpendelnde Strom ist von ringförmigen magnetischen Feldlinien (Korkenzieherregel) umgeben. Im Augenblick der Stromumkehr verschwindet das Feld, und die dem Oszillator zunächst gelegenen Feldlinien sinken in die Strombahn zurück. Die weiter entfernten jedoch fliegen vermöge einer ihnen innewohnenden Trägheit weiter nach außen, wobei sie ihren Umlaufsinn beibehalten. So befindet sich dieser Anteil des Feldes schon in größerer Entfernung vom Dipol, wenn sich nach der Stromumkehr ein neues Feld bildet. Nach der Korkenzieherregel hat dieses aber entgegengesetzten Umlaufsinn. So setzt sich das Spiel weiter fort. Gleichzeitig aber bildet sich ein System von elektrischen Feldlinien; denn wenn der Strom gleich Null ist, trägt die Kapazität des Dipols ihre maximale Ladung. Die Feldlinien greifen dabei seitlich in den Raum. Mit dem Anwachsen des Stromes wird dieses Feld wieder schwächer, ein Teil des Feldes sinkt in den Dipol zurück. Die weiter außen gelegenen Feldlinien schnüren sich ab, schließen sich zu nierenförmigen Ringen und wandern davon (Bild 299).

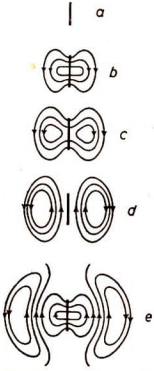


Bild 299. Abschnürung und Ablösung elektrischer Feldlinien von einem schwingenden Dipol

In der unmittelbaren Umgebung eines schwingenden Dipols schwingen, um 90° gegenseitig versetzt, ein magnetisches und elektrisches Feld.

Dieses in den Raum hinauseilende Kraftfeld bezeichnet man als **elektromagnetische Wellen.** Theorie und Erfahrung ergeben ferner, daß mit der Abschnürung vom Dipol die Phasenverschiebung zwischen elektrischem und magnetischem Feld verschwindet.

In freien elektromagnetischen Wellen schwingen elektrische und magnetische Feldstärke in gleicher Phase. Elektromagnetische Wellen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus.

Aus der Entstehung der Wellen geht anschaulich unmittelbar hervor:

Elektrischer und magnetischer Feldvektor stehen rechtwinklig aufeinander und quer zur Ausbreitungsrichtung (Bild 300).

Die elektromagnetischen Wellen sind also **Tranversalwellen.** Aus dem, was bereits über Wellen im allgemeinen gesagt wurde (I, Abschn. 7), folgt

Wellenlänge: Abstand zweier gleichgerichteter Maxima der elektrischen bzw. magnetischen Feldstärke

(127) $$\boxed{f\lambda = c}$$

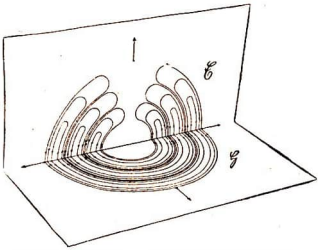


Bild 300. Vertikaler und horizontaler Schnitt durch ein Strahlungsfeld

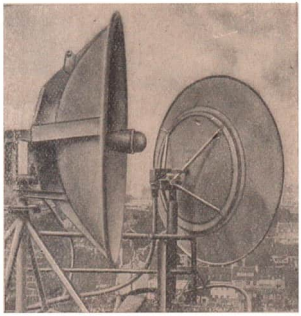


Bild 301. Parabolische Richtstrahler für Dezimeterwellen

Heinrich Hertz stellte bei seinen Versuchen ferner fest: Elektromagnetische Wellen werden von metallenen Flächen **reflektiert** und wie Licht im metallenen Hohlspiegel gesammelt. Ein solcher „Spiegel" kann aus Drahtnetz bestehen (Bild 301). Sie werden von großen Prismen (Hertz verwendete z. B. Pech) **gebrochen.** Sie gehen durch ein Gitter aus parallelen Drähten, wenn diese quer zum elektrischen Feldvektor stehen, nicht aber, wenn die Drähte diesem parallel liegen. Aus alledem ergibt sich:

Elektromagnetische Wellen haben alle Eigenschaften polarisierten Lichtes und unterscheiden sich vom sichtbaren Licht nur durch ihre Wellenlänge.

10.5.2. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen

Wie direkte Messungen ergeben haben und sich theoretisch zeigen läßt, beträgt die

Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen im Vakuum:

$$\boxed{c = 299\,793 \text{ km/s} \approx 300\,000 \text{ km/s}}$$

Diese ist mit der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum identisch.

Berechnung: Zum Vergleich diene ein sehr dünner Metallring vom mittleren Radius r und der Breite b, der eine elektrische Ladung Q trägt und mit der Frequenz f rotiert (Bild 302). Auf seiner Oberfläche stehen senkrecht elektrische Feldlinien, die sich also quer zu ihrer eigenen Richtung mit der Geschwindigkeit $v_1 = 2\pi r f$ bewegen. Dadurch erzeugen sie ein Magnetfeld, das den Ringquerschnitt ringförmig umfaßt. Die Oberfläche des Ringes ist für beide Seiten zusammen $2 \cdot 2\pi r b$ und damit die Flächendichte des geladenen Körpers $\sigma = \frac{Q}{4\pi r b}$, woraus sich an der Ringoberfläche eine Feldstärke von $E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{Q}{4\pi r b \varepsilon_0}$ ergibt. Der rotierende Ring kann auch als ein Strom von der Stärke $I = Qf$ aufgefaßt werden, da die Ladung Q sekundlich f mal den Querschnitt durcheilt. Es ist daher $I = E 4\pi\varepsilon_0 r b f$. Nach dem Durchflutungssatz (S. 109) ist die magnetische Spannung um den Reifenquerschnitt $H 2b = I$ (1 Stromwindung, Ringdicke 0) oder $H 2b = E 4\pi\varepsilon_0 r b f$. Wegen $f = \frac{v_1}{2\pi r}$ ergibt sich hieraus $H = v_1 \varepsilon_0 E$. Da sich nun in einer elektromagnetischen Welle gleichfalls ein E-Feld quer zu seiner eigenen Richtung bewegt, erzeugt dieses demnach ein H-Feld von

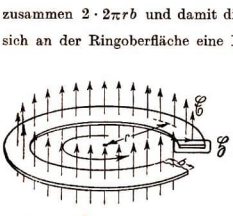


Bild 302. Zur Berechnung der Lichtgeschwindigkeit c

$$\text{a)}\quad H = c\varepsilon_0 E.$$

Einen zweiten Zusammenhang zwischen H und E liefert der Induktionsvorgang (80) $u = Blv_2$. Bringt man l auf die linke Gleichungsseite, so stellt diese die induzierte Feldstärke E dar. Ferner ist $B = \mu_0 H$, womit $E = v_2 \mu_0 H$. Dies besagt also, daß ein quer zur eigenen Richtung bewegtes H-Feld ein E-Feld erzeugt. Dies ist nun gerade in der elektromagnetischen Welle der Fall, wo je ein H- und E-Feld phasengleich mit der gemeinsamen Geschwindigkeit c vorwärtsschreiten:

$$\text{b)}\quad E = c\mu_0 H.$$

Diese gemeinsame Geschwindigkeit c erhält man durch Einsetzen von b) in a): $H = c\varepsilon_0 c\mu_0 H$

$$\text{(128)}\qquad \boxed{c = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0}}}$$

Mit Hilfe dieser Beziehung läßt sich aus den bekannten Werten für $c = 2{,}99793 \cdot 10^8$ m/s und der Induktionskonstanten $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am (S. 127) die Influenzkonstante ε_0 (S. 43) berechnen. Aus der letzten Gleichung erhält man

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2} = \frac{1\ \text{Am s}^2}{4\pi\ 10^{-7}\ \text{Vs}\ 2{,}99793^2 \cdot 10^{16}\ \text{m}^2} = 8{,}854 \cdot 10^{-12}\ \text{As/Vm}.$$

10.6. Nachweis und Empfang elektromagnetischer Wellen

10.6.1. Resonanz zweier Schwingkreise

Zwei Schwingkreise (z. B. zwei Dipole) stehen einander gegenüber (Bild 303). Der eine ist mit einem Funkeninduktor verbunden. Die an der Unterbrechungsstelle auftretende Funkenentladung regt diesen Sender nach S. 159 zu kräftigen hochfrequenten Schwingungen an. Die beiden Drosseln D verhindern den Rückfluß des hochfrequenten Wechselstroms in die Zuleitung.

Der andere Dipol enthält in der Mitte ein kleines Glühlämpchen. Die Eigenfrequenz dieses Dipols kann durch Verschieben seiner Länge verändert werden. Bei einer bestimmten Länge leuchtet das Lämpchen auf und zeigt an, daß im **Empfänger** ebenfalls Schwingungen auftreten. Man nennt diesen Fall

Resonanz = Übereinstimmung der Eigenfrequenz von Sender und Empfänger.

Es bestehen demnach die gleichen Verhältnisse wie im Resonanzfall mechanischer und akustischer Schwingungen. Während aber dort eine stoffliche Verbindung (z. B. Luft) zwischen Oszillator und Resonator bestand, bedarf es hier einer solchen nicht. Der Überträger ist das elektromagnetische Feld, das auch die meisten festen, flüssigen und gasförmigen Körper durchdringt.

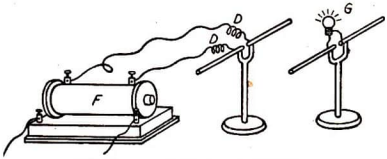


Bild 303. Einfacher Sender und Empfänger.
F Funkeninduktor, D Drosselspulen, G Glühlämpchen

Untersucht man die Amplitude der im Empfänger auftretenden Schwingungen in Abhängigkeit von der Frequenz, so ergibt sich eine Resonanzkurve von gleichem Aussehen wie in Bild 263.

Die Resonanzkurve ist um so spitzer und damit die Abstimmschärfe um so größer, je geringer die Dämpfung im Empfangskreis ist.

Dieser Satz folgt aus dem behandelten mechanischen Resonanzvorgang (I, Abschn. 6.5). In seiner Anwendung auf elektromagnetische Schwingungen ergibt sich, daß der elektrische Widerstand im Empfangskreis möglichst klein sein soll.

Die im Dipol auftretenden Resonanzschwingungen können auch als **stehende Wellen** aufgefaßt werden. In der Mitte zeigt das aufleuchtende Lämpchen ein Strommaximum an. In dieser Form faßt der Dipol gerade eine halbe Wellenlänge $\frac{\lambda}{2}$ (Bild 304). An seinen beiden Enden liegen die Maxima der Spannung. Das Bild gleicht vollkommen dem einer schwingenden Saite (II, Abschn. 13.1). Wie bei dieser kann ein entsprechend längerer Dipol auch mehrere ganzzahlige Vielfache von $\frac{\lambda}{2}$ fassen, wie sich mit eingeschalteten Lämpchen beweisen läßt. Zu einer Schleife zusammengebogen, entsteht daraus der zum Empfang ultrakurzer Wellen viel verwendete **Faltdipol** (Bild 305).

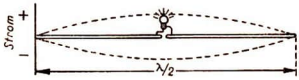


Bild 304. Verteilung der Stromstärke in einem Dipol

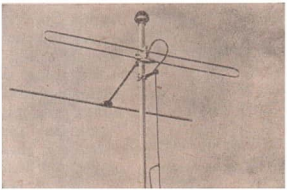


Bild 305. Faltdipol zum Empfang ultrakurzer Wellen

10.6.2. Drahtlose Telegrafie und Rundfunk

Der Sender

Die in einem geschlossenen Schwingkreis aufgespeicherte Energiemenge ist um ein vielfaches größer, als ein offener aufnehmen kann, dessen Kapazität und Induktivität nur sehr klein sind. Daher kann die von einem einfachen Dipol abgestrahlte Leistung nur sehr gering sein. Verbindet man aber einen geschlossenen Schwingkreis mit einem offenen, so lassen sich die Vorteile beider — große Schwingungsenergie und gute Strahlungsleistung — miteinander vereinigen und beliebig große Entfernungen überbrücken.

Die ersten historisch gewordenen Versuche, Signale auf drahtlosem Wege zu übertragen, gelangen Popow (1895). Dies war mit Hilfe der **Antenne** möglich, d. i. ein vom Schwingkreis senkrecht nach oben geführter langer Draht (Bild 306). Dieser stellt einen halben Dipol dar, dessen andere Hälfte durch eine kurze Verbindung mit der

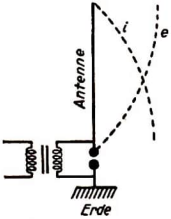


Bild 306. Einfachster Sender

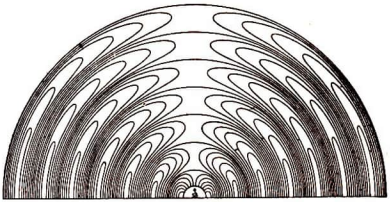


Bild 307. Ausbreitung halbfreier Wellen entlang der Erdoberfläche

Erde ersetzt ist. Damit schwingt in der Antenne nur eine viertel Wellenlänge. Die elektrischen Feldlinien enden dabei überall senkrecht auf der gut leitenden Erdoberfläche, so daß sich **halbfreie Wellen** (Bild 307) ausbilden. Sie werden für Wellenlängen von 100 m bis zu einigen Kilometern für Telegrafie und Rundfunk benutzt. Für Kurz- (10···100 m) und Ultrakurzwellen (1 bis 10 m) benutzt man die bereits erwähnten **freien Wellen.**

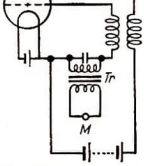


Bild 308. Modulation hochfrequenter Schwingungen durch Mikrophon (M) und Transformator (Tr)

Als Schwingungserzeuger verwendet man heute nur noch Röhren, meistens die Triode.

Bei der Übertragung von Sprache und Musik müssen die vom Sender abgestrahlten Schwingungen noch **moduliert** werden. Der nach Bild 308 vom Mikrophon (M) gelieferte Sprechstrom erzeugt an der Sekundärseite des Transformators (Tr) Spannungsschwankungen, die an das Gitter der Senderöhre gelangen. Damit wird der Anodenstrom im gleichen Rhythmus geändert, d. h., die sonst konstanten Amplituden der Hochfrequenzschwingungen werden abwechselnd größer und kleiner (Bild 309). Der Umriß des hochfrequenten Schwingungsbildes ist das getreue Abbild des Sprechstromes.

Im Gegensatz zu dieser **Amplitudenmodulation** (AM) wendet man (vor allem bei Ultrakurzwellen) auch die **Frequenzmodulation** (FM) an. Diese besteht darin, die Frequenz der ausgesandten Schwingungen im Takt der Sprechströme zu ändern.

Der Empfänger

Der **Empfänger** besteht gleichfalls aus einer Antenne, die mit dem Schwingkreis einer Röhre gekoppelt ist (auf Bild 310 induktiv). Seine Frequenz kann mit dem **Abstimmkondensator** und einem passenden Spulensatz nach Belieben geändert werden, um mit dem gewünschten Sender in Resonanz zu treten.

Die Hauptaufgabe des Empfängers besteht darin, die hochfrequenten Schwingungen zu verstärken und zu demodulieren. Dann bleibt von den auf Bild 309 gezeigten Schwingungen nur die obere oder untere Hälfte erhalten, d. h. ein im Takt der gesendeten Sprache schwankender Gleichstrom.

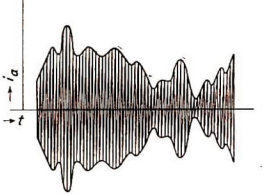


Bild 309. Sprachschwingungen als Amplitudenschwankungen hochfrequenter Schwingungen

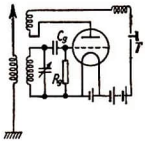


Bild 310. Audion mit induktiver Rückkopplung

Von den vielen möglichen Schaltungen eines Rundfunkempfängers sei hier nur das weitverbreitete **Audion** (Gittergleichrichtung) (Bild 310) erwähnt. Die im Gitterschwingkreis auftretende hochfrequente Wechselspannung liegt zwischen Katode und Gitter und wird hier wie bei der Diode (ohne Mitwirkung der Anode) gleichgerichtet. Dabei entsteht ein Gittergleichstrom, der, über den großen Widerstand R_g fließend, in diesem den Spannungsabfall $\Delta U_g = \Delta I_g R_g$ erzeugt. Da nun die Amplitude der Hochfrequenzschwingung im Takt der Tonfrequenz schwankt, ist dies auch mit der Gitterspannung ΔU_g der Fall. Diese steuert nunmehr den Anodenstrom, der dem Telefon (T) zugeführt wird. Statt dessen ist meist ein Niederfrequenzverstärker (S. 88) mit Lautsprecher angeschlossen.

Das Audion ist eine Verbindung eines Diodengleichrichters (Katode — Gitter) mit anschließender Spannungsverstärkung (Katode — Anode).

Mittels Rückkopplung (S. 161) erfolgt gleichzeitig eine nochmalige Verstärkung. Der Kondensator C_g verschafft der Wechselspannung ungehinderten Zugang zum Gitter.
Bei kurzer Senderentfernung genügt statt des Audions ein **Kristalldetektor,** der nur als Gleichrichter dient, nicht aber als Verstärker. Im einfachsten Fall ruht, leicht federnd, eine feine Metallspitze auf einem Bleiglanzkristall. Der Strom kann in dieser

Halbleiteranordnung nur in einer Richtung fließen und genügt zum Betrieb eines Kopfhörers. In der Wirkung vollkommener sind die in letzter Zeit an Bedeutung gewinnenden **Germaniumdioden** (Bild 117).

10.7. Das Fernsehen

Im Prinzip handelt es sich darum, das zu übertragende Bild (bzw. wie beim Kinematograph schnell aufeinanderfolgende Momentbilder) zeilenweise so abzutasten (Bild 311), daß von jedem Bildpunkt eine je nach Helligkeit verschiedene Spannung hergestellt wird. Auf der Empfängerseite steuert die Spannung eine Braunsche Röhre, deren Strahl in genau gleicher Weise und Geschwindigkeit über den Bildschirm eilt (Bild 321). Hier entsteht dann an denselben Stellen Hell oder Dunkel wie im Aufnahmegerät und damit wieder das ursprüngliche Bild. Das ganze Bild muß in $^1/_{25}$ s fertig sein, während welcher Zeit der Strahl 625 (deutsches Fernsehsystem) Zeilen schreibt; denn das Auge nimmt bei einer Bildfrequenz von etwa $20^1/s$ kein Flimmern mehr wahr.

Der Hauptteil der Sendeanlage ist das **Ikonoskop** (Bildfänger) (Bilder 313, 314). Eine Röhre (J) enthält eine dünne Glimmerplatte (G). Auf ihrer Vorderseite befinden

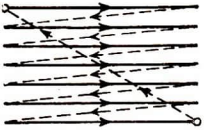


Bild 311. Schema der zeilenweisen Abtastung eines Bildes aus quadratischen Elementen

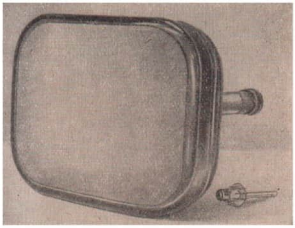


Bild 312. Moderne Bildröhre mit magnetischer Ablenkung

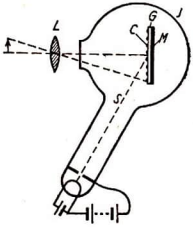


Bild 313. Schema des Ikonoskops

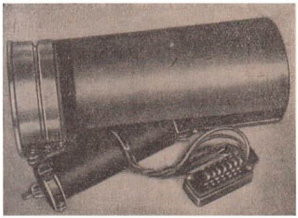


Bild 314. Modernes Ikonoskop

sich Millionen winziger, voneinander isolierter, photoelektrisch wirksamer Zäsiumteilchen (C), auf der Rückseite ein Metallbelag (M). Damit entstehen zahlreiche äußerst kleine Kondensatoren. Eine Linse (L) entwirft auf der Glimmerscheibe das zu übertragende Bild. Jedes einzelne, vom Licht getroffene Zäsiumteilchen gibt (lichtelektrischer Effekt) mehr oder weniger Elektronen ab, wodurch sich die kleinen Kondensatoren verschieden stark positiv aufladen.
Schräg von der Seite her läßt man nun einen Katodenstrahl (S) über die Platte wandern. Sobald einer der kleinen Kondensatoren von den negativen Elektronen getroffen wird, entlädt sich dieser. Die so entstehenden Spannungsschwankungen werden dann verstärkt und dem Fernsehsender zugeleitet. Erforderlich ist natürlich, daß die Katodenstrahlen auf der Sender- und Empfängerseite genau synchron laufen.

10.8. Energie und Stoff

10.8.1. Der Strahlungsdruck

Der von einer elektromagnetischen Welle durchflutete Raum enthält sowohl elektrische als auch magnetische Energie. Auf die Volumeneinheit bezogen, ergibt das eine bestimmte **Energiedichte** S. Da sich die Energie einer elektromagnetischen Welle mit der Lichtgeschwindigkeit c vorwärtsbewegt, trifft in einer Sekunde das c-fache der Energiedichte auf der empfangenden Fläche ein — oder anders ausgedrückt — die Energiedichte S ist der c. Teil der sekundlich auffallenden Strahlungsenergie.

(129) **Energiedichte:** $S = \dfrac{\textbf{sekundlich auftreffende Energiemenge}}{c}$.

Als **Maßeinheit der Energiedichte** kann man z. B. $\frac{\text{Ws}}{\text{m}^3}$ verwenden, oder was dasselbe ist, auch $\frac{\text{Nm}}{\text{m}^3}$. Nach Kürzen entsteht daraus $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$, d.h. die **Maßeinheit eines Druckes.**

Wie der russische Physiker Lebedew im Jahre 1901 erstmalig nachwies, ist dieser **Strahlungsdruck** tatsächlich vorhanden:

> **Jede gegen einen Körper treffende elektromagnetische Strahlung übt auf diesen einen Druck aus. Seine Größe ist gleich der vor der auffangenden Fläche bestehenden Energiedichte.**

Beispiele: 1. 1 cm² der Erdoberfläche erhält je min von der Sonne 2 cal zugestrahlt. Da 1 cal = 4,1868 J (Nm), sind dies $\frac{2 \cdot 4{,}1868\ \text{Nm}}{1 \cdot 10^{-4}\ \text{m}^2\ 60\ \text{s}} = 1{,}396 \cdot 10^3\ \text{Nm/m}^2\,\text{s}$.

Das ergibt nach (129) den Strahlungsdruck

$$p = \frac{1{,}396 \cdot 10^3\ \text{Nm s}}{\text{m}^2\ \text{s}\ 3 \cdot 10^8\ \text{m}} = 0{,}465 \cdot 10^{-5}\ \text{N/m}^2 = 0{,}465\ \text{dyn/m}^2.$$

2. Trifft die Sonnenstrahlung gegen einen vollkommen reflektierenden Spiegel, so ist die Energiedichte vor dem Spiegel doppelt so groß, da hier eine gleichgroße Energiemenge hin und zurück läuft. Hat der Spiegel die Fläche 1 m², so wirkt gegen diesen die Kraft $2 \cdot 0{,}465$ dyn = = 0,93 dyn.

3. Der Schweif der Kometen besteht aus Gasen oder Dämpfen, die vom Lichtdruck der Sonne zur Seite geblasen werden (Bild 315).

Bild 315. Der Halleysche Komet

10.8.2. Die Masse eines Strahlungsquants

Eine elektromagnetische Welle verbreitet sich, ähnlich wie eine Schallwelle in der freien Luft, von ihrem Entstehungsort aus kugelschalenförmig in den Raum. Mit zunehmendem Abstand vom Wellenzentrum muß daher die Energiedichte immer kleiner werden und bei sehr großen (z. B. kosmischen) Abständen praktisch den Wert Null erreichen. Es scheint dem auch nichts im Wege zu stehen, die Energie einer Strahlung — wenigstens gedanklich — in Beträge von beliebiger Kleinheit aufzuteilen. Doch zeigte sich bei der Untersuchung des von einem glühenden Körper erzeugten Spektrums, daß die Energie einer elektromagnetischen Welle sich aus bestimmten, unteilbaren Mindestbeträgen, den sogenannten **Strahlungsquanten,** zusammensetzt.

Welche Rolle diese Quanten bei der Wechselwirkung zwischen Licht und Stoff spielen, wurde im Band II (Abschn. 30) bereits angedeutet. Es wurde auch angegeben (II, Abschn. 30.1), daß die

(130) **Energie eines Strahlungsquants:** $\boxed{E = h\nu}$

($h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}$ Ws · s, ν Frequenz der Strahlung)

beträgt. Die Quanten sehr kurzwelliger Strahlungen sind daher bedeutend energiereicher als die langwelligeren.

Beispiel: Röntgenstrahlen der Wellenlänge $\lambda = 0{,}001$ nm besitzen wegen $\nu = \frac{c}{\lambda}$ eine Frequenz von $\nu = \frac{3 \cdot 10^8}{10^{-12}}$ Hz $= 3 \cdot 10^{20}$ Hz. Ein Quant dieser Strahlung besitzt demnach

$$6{,}625 \cdot 10^{-34}\ \text{Ws} \cdot \text{s} \cdot 3 \cdot 10^{20}\ {}^1/\text{s} = 19{,}875 \cdot 10^{-14}\ \text{Ws}.$$

Ein Quant sichtbaren Lichtes der Wellenlänge $\lambda = 500$ nm hat dagegen nur die Energie $3{,}975 \cdot 10^{-19}$ Ws.

Der letzte Abschnitt hat nun ergeben, daß die Strahlung einen Druck erzeugt. Man könnte aber auch daran denken, daß dieser Strahlungsdruck von kleinen Teilchen herrührt, welche gegen die bestrahlte Fläche prallen und dabei einen Teil ihres Impulses übertragen. Im Band II (Abschn. 30.1) wurde bereits erwähnt, daß die moderne Auffassung den Lichtquanten tatsächlich die Eigenschaften kleiner Masseteilchen zuschreibt (wobei die Welleneigenschaften gleichzeitig erhalten bleiben). Es fragt sich nunmehr, wie groß die **Masse eines einzelnen Strahlungsquants** wohl sein mag.

Es werde angenommen, 1 cm³ enthalte n Quanten, die sich mit der Lichtgeschwindigkeit c gegen eine Würfelfläche bewegen (Bild 316). Dann ist die Energiedichte $nh\nu$ gleichbedeutend mit dem Strahlungsdruck

a) $p = nh\nu$.

Schreibt man jedem Quant die Masse m zu, so besitzt es vermöge seiner Geschwindigkeit c den Impuls mc. In der Zeiteinheit treffen also nc Quanten vom Gesamtimpuls $ncmc$ gegen die Fläche. Nach der Absorption der Strahlung ist dieser Impuls verschwunden. Gemäß (I, 5.08) ist die Impulsänderung gleich der wirkenden Kraft. Da es sich hier um die Flächeneinheit handelt, ergibt sich der Druck in der Form

$$\text{b)}\quad p = nc\,mc.$$

Durch Gleichsetzen von a) und b) erhält man

$$n\,h\nu = nc\,mc$$

und hieraus die

(130a) **Masse eines Strahlungsquants:** $m = \dfrac{h\nu}{c^2}$.

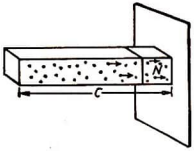


Bild 316. Strahlungsquanten als stoßende Masseteilchen

10.8.3. Die Masse-Energie-Beziehung

Die Bedeutung der letzten Formel wird noch umfassender, wenn man $h\nu = E$ (Energie) setzt, wonach sich $m = \dfrac{E}{c^2}$ und damit $E = mc^2$ ergibt. Diese Gleichung bringt die fundamentale Tatsache zum Ausdruck, daß die Masse m eines Teilchens (z. B. eines Elektrons) sich in eine entsprechende Energiemenge umrechnen läßt, indem man sie mit Faktor c^2 multipliziert.

(131) **Einsteinsche Gleichung:** $\boxed{E = mc^2}$

Ja, weiter noch: Bei atomphysikalischen Untersuchungen hat sich einwandfrei experimentell ergeben, daß diese Umwandlung unter besonderen Verhältnissen tatsächlich stattfinden kann! Auch der umgekehrte Vorgang, bei dem sich aus einer Strahlung elektromagnetischer Wellen Masseteilchen bilden, ist beobachtet worden.
Während man früher Masse und Energie als völlig getrennte physikalische Erscheinungen betrachtet hatte und auch in den üblichen physikalischen Gleichungen und Formeln die Größen m und E grundverschiedene Bedeutung haben, so zeigt sich doch heute, daß beide Größen in einer tiefen inneren Beziehung zueinander stehen. Es gibt keine Masse, die nicht gleichzeitig eine bestimmte Energie und keine Energie, die nicht gleichzeitig eine bestimmte Masse darstellt. Klarheit über dieses wechselseitige Verhältnis bringt erst die Philosophie des dialektischen Materialismus.
Hiernach faßt man unter dem Oberbegriff der „Materie" auch die Gesamtheit aller physikalischen Objekte zusammen. Alles, was außerhalb und unabhängig vom Bewußtsein des Menschen existiert, ist Materie. Stoff und Feld, Masse und Energie, Elementarteilchen und Strahlungsquanten dagegen sind spezielle Formen oder Eigenschaften dieser Materie. Die frühere Auffassung, wonach die stoffliche Seite der physikalischen Erscheinungen materieller und die energetische Seite nichtmaterieller Art sei, ist demnach irrig. Die Einsteinsche Formel $E = mc^2$ ist der beste physikalische Beweis für die materielle Einheit der Welt.
Möglichkeiten, derartig gewaltige Energiemengen frei zu machen, bieten die modernen Anlagen zur Gewinnung von **„Atomenergie"**.

Beispiel: Eine einfache Rechnung läßt erkennen, daß selbst in kleinen Mengen von Masse ungeheure Energiemengen konzentriert sind. Nimmt man z. B. 1 g irgendwelcher Masse an, so liefert die letzte Formel $E = 1\,\text{g} \cdot 9 \cdot 10^{20}\,\text{cm}^2/\text{s}^2 = 9 \cdot 10^{20}$ erg oder 25 Millionen Kilowattstunden.

ATOMPHYSIK

Eine ausführliche Atomtheorie in modernem Sinne zu entwickeln würde den Rahmen dieses Lehrbuches überschreiten, zumal hierzu größere mathematische Hilfsmittel nötig wären. Es können daher nur einige Hauptzüge des Atombaus geschildert werden, soweit dies zum Verständnis einiger bereits angeschnittener Fragen (Entstehung des Lichtes, Röntgenstrahlung, Ionenbildung, elektrische Leitungsvorgänge, Ursache des Magnetismus usw.) notwendig ist und sich dies mit einfachen Mitteln beschreiben läßt.

11. Die Elementarteilchen

11.1. Die Atome

Unter den **Atomen**[1]) verstand man bereits im Altertum die unteilbaren, kleinsten Bausteine der Materie. Man dachte dabei daran, daß z. B. ein Stück Schwefel oder Kupfer durch Zerschlagen und Zerreiben in immer feinere Teile sich zerlegen läßt, und stellte sich dann vor, daß diese Teilbarkeit schließlich eine untere Grenze haben müsse. Geht man von diesem Grundgedanken aus, so müssen sich die Haupteigenschaften eines chemischen Elementes irgendwie in jedem einzelnen seiner Atome wiederfinden.

Es gibt so viel verschiedene Atomarten, wie es chemische Elemente gibt.

Nach außen hin haben die Atome die Eigenschaft, sich mit anderen Atomen zusammenzuhängen. Sind es Atome der gleichen Art, so entsteht der feste oder flüssige Körper eines **chemischen Elementes.** Verbände verschiedener Atomarten nennt man **chemische Verbindungen.** Da im chemischen Element die Stoffe offenbar in ihrer reinsten Form vorliegen, kam man auch vom chemischen Standpunkt zu der Ansicht, daß die Atome prinzipiell nicht weiter zerlegbar seien.
Eine Reihe wichtiger Entdeckungen um die Jahrhundertwende zwangen jedoch dazu, diese naive Anschauung aufzugeben und anzunehmen, daß jedes einzelne Atom selbst ein kompliziertes Gebilde sein muß, das wiederum aus noch kleineren Elementarteilchen besteht.
Die heutigen Kenntnisse vom Bau der Atome fußen besonders auf der Entdeckung des Radiums (S. 189) und den dabei gemachten Beobachtungen. Von hier aus und auf Grund weiterer Erfahrungen wurde der englische Physiker **Rutherford** (1911) zum ersten brauchbaren Entwurf eines **Atommodells** geführt.

---

[1]) Griech.: atomos = unteilbar.

Jedes Atom besteht aus einem elektrisch positiven Kern und einer Anzahl ihn umkreisender negativer Elektronen.

Man muß demnach unterscheiden zwischen dem **Atomkern** und der **Atomhülle.**
Unter Hinzunahme der Quantenvorstellung Max Plancks (Abschn. 10.8.2.) schuf dann der Däne **Niels Bohr** (1913) ein verbessertes Modell. Weitere Verfeinerungen erfuhr die Atomtheorie später durch Sommerfeld, Schrödinger, Heisenberg und andere Forscher. Auf dem Gebiet der Kernphysik traten insbesondere die sowjetischen Forscher D. Iwanenko und I. Tamm hervor.

Insbesondere beschreibt das **wellenmechanische Modell** Schrödingers (1928) das Elektron mathematisch als eine stehende räumliche Welle in verschiedenen Schwingungszuständen, die in Form einer Ladungswolke rings um den Kern gebreitet ist.

11.2. Die Arten der Elementarteilchen

11.2.1. Im Atom enthaltene Teilchen

Soweit heute bekannt ist, bestehen alle Atome aus 3 Arten von Teilchen: den Protonen, Neutronen und Elektronen. Die ersten beiden setzen den Kern zusammen, während die Atomhülle von den Elektronen gebildet wird.
Die Masse dieser Teilchen drückt man in Einheiten des **physikalischen Atomgewichtes,** den sog. **Massenwerten** aus. Diese unterscheiden sich ein wenig von den chemischen Atomgewichten (s. S. 187), die im periodischen System angegeben sind.

1. Proton: elektrisch positiv geladenes Masseteilchen

Seine elektrische Ladung ist gleich der eines Elektrons $e_0 = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ As, jedoch positiv. Die Ruhmasse ist nahezu gleich der eines Wasserstoffatoms. Der genaue **Massenwert** des Protons ist $m_p = 1{,}007597$.

2. Neutron: elektrisch neutrales Masseteilchen

Es trägt keine elektrische Ladung. Sein Massenwert ist mit $m_n = 1{,}008981$ ebenfalls nahezu gleich dem des Wasserstoffatoms.

3. Elektron: elektrisch negatives Elektrizitätsteilchen

Seine elektrische Ladung ist $e_0 = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ As, sein Massenwert beträgt 0,000549 und damit nur den 1835. Teil von der des Protons. Die Masse der Elektronen trägt somit zur Gesamtmasse des Atoms kaum etwas bei.

Die Hauptmasse des Atoms ruht im Atomkern.

11.2.2. Weitere Elementarteilchen

Es hat sich aber gezeigt, daß dies nicht die einzigen Elementarteilchen sind. Vielmehr werden bei künstlichen radioaktiven Vorgängen und in der Höhenstrahlung (S. 210) noch andere Partikel beobachtet, die im Atom selbst nicht enthalten sind.

Im Gegensatz zum Proton, Neutron und Elektron sind sie aber keine stabilen Gebilde, sondern vermögen nur außerordentlich kurze Zeit zu existieren.

4. Positron: elektrisch positives Elektrizitätsteilchen

Die Masse ist gleich der des Elektrons, ebenfalls seine Ladung, die jedoch positiv ist.

5. Neutrino: neutrales Teilchen von der Ruhmasse 0

Dieses Teilchen, dessen Ruhmasse Null ist, wird von der Theorie gefordert, konnte aber erst im Jahre 1956 experimentell nachgewiesen werden.

6. Mesonen: negative oder positive Teilchen

Sie tragen die Ladung eines Elektrons bzw. Positrons, sind aber erheblich schwerer als Elektronen. Ihre Masse beträgt mehr als das 200fache der Elektronenmasse und ist nicht einheitlich. Es gibt auch neutrale Mesonen.

7. Hyperonen (überschwere Teilchen)

Dies sind positive, negative oder neutrale Teilchen von über 2000facher Elektronenmasse. Sie konnten bei gewissen Vorgängen in der kosmischen Strahlung nachgewiesen werden.

Als sicher kann heute ferner gelten, daß es zu jedem Teilchen ein entsprechendes **Antiteilchen** gibt. So ist z. B. das Positron das Antiteilchen des Elektrons, und das dem Proton entsprechende Antiteilchen ist das negative **Antiproton,** das im Jahre 1955 künstlich hergestellt wurde, usw.

Schließlich kann man auch die **Lichtquanten (Photonen)** zu den Elementarteilchen zählen, deren Masse sich nach (130a) zu $m = \frac{h\nu}{c^2}$ berechnet. Ihre Ruhmasse ist gleich Null.

11.3. Die Größe der Elementarteilchen

Der Radius eines einzelnen freien Elektrons läßt sich aus bekannten Zusammenhängen leicht berechnen. Hiernach erhält man den

(132) **klassischen Elektronenradius:** $\boxed{r_0 = 1{,}4 \cdot 10^{-13}\ \mathrm{cm}}$

Berechnung: Man geht von der Vorstellung aus, daß die Ladung des kugelförmig gedachten Elektrons auf seiner Oberfläche sitzt. Dann hat das im gesamten Außenraum befindliche Feld einen bestimmten Energieinhalt. Man stellt sich ferner vor, daß das Elektron selbst keine Masse hat, sondern diese lediglich in Form von Energie im elektrischen Feld enthalten ist, denn die Feldenergie stellt gemäß der Beziehung (131) $E = mc^2$ auch eine Masse dar. Nach (57) ist die Feldenergie $W = \frac{1}{2}\int E^2 \varepsilon_0 \, \mathrm{d}V$, wobei über das gesamte im Außenraum liegende Volumen zu integrieren ist. Die Feldstärke an der Oberfläche einer geladenen Kugel beträgt nach (43) $E = \frac{Q}{4\pi r^2 \varepsilon_0}$; hierbei ist Q die Ladung des Elektrons e_0 und $\mathrm{d}V$ das Volumen einer Kugelschale $4\pi r^2 \, \mathrm{d}r$. Es ist also $W = \frac{1}{2}\int_r^\infty \frac{e_0^2 \varepsilon_0 \, 4\pi r^2}{16\pi^2 r^4 \varepsilon_0^2} \mathrm{d}r = \frac{e_0^2}{8 r \pi \varepsilon_0}$. Setzt man diesen Ausdruck gleich mc^2, so wird $r = \frac{e_0^2}{8\, m\, c^2 \pi \varepsilon_0}$ oder $r = \frac{1{,}6^2 \cdot 10^{-38}\ \mathrm{A^2\, s^2\, Vm}}{8 \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31}\ \mathrm{kg}\ 9 \cdot 10^{16}\ \mathrm{m^2}\ \pi\ 8{,}854 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{As}}$ $= 1{,}4 \cdot 10^{-15}\ \mathrm{m} = 1{,}4 \cdot 10^{-13}\ \mathrm{cm}$.

Sobald Elementarteilchen in der Nähe eines Atomkerns vorbeikommen, werden sie mehr oder weniger stark aus ihrer Richtung abgelenkt. Aus den dabei gemessenen Streuwinkeln wird der Radius eines Atomkerns in der Größenordnung von 10^{-13} cm geschätzt. Die Atomkerne sind trotz ihrer viel größeren Masse demnach kaum größer als die Elektronen.

Für den Radius eines Atomkerns hat man den Ausdruck

(133) **Radius eines Atomkerns:** $\boxed{r = r_0 \sqrt[3]{A}}$

($r_0 = 1{,}4 \cdot 10^{-13}$ cm, A Atomgewicht)

ermittelt. Hiernach berechnet sich die Dichte der Kernmasse zu ca. 200 Billionen g/cm³.

Da der Radius eines ganzen Atoms zwischen 1 und $2 \cdot 10^{-8}$ cm liegt, folgt daraus, daß der größte Teil des Atomvolumens leer und die Hauptmasse in einem vergleichsweise winzigen Pünktchen, dem Atomkern, konzentriert ist.

12. Das Wasserstoffatom

12.1. Bau des Wasserstoffatoms

Da der Wasserstoff das spezifisch leichteste aller Elemente ist und auch das kleinste Atomgewicht besitzt, hat man schon vor langer Zeit vermutet, daß der Wasserstoff als Grundbestandteil aller übrigen Elemente in Frage käme. Es hat sich später auch tatsächlich herausgestellt, daß das Wasserstoffatom gegenüber allen anderen Atomen den einfachsten Aufbau besitzt.

Sein Kern besteht aus einem Proton, dessen elektrisch positive Ladung durch ein einzelnes Hüllenelektron ausgeglichen wird. Betrachtet man dieses nach Rutherford als ein kleines Körperchen (Korpuskel), so muß es auf einer — wie man zunächst annehmen kann — kreisförmigen Bahn um den Kern laufen. Fliehkraft und elektrostatische Anziehung halten einander das Gleichgewicht. Andernfalls müßte es, der elektrischen Kraft folgend, in den Kern hineinfallen und diesen neutralisieren.

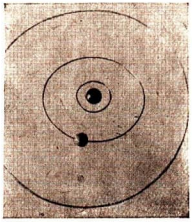


Bild 317. Wasserstoffatom mit den Kreisbahnen der Hauptquantenzahlen $n = 1$, 2 und 3 (vergrößertes Modell) nach Bohr

Auf dieser Kreisbahn laufend, müßte aber das Elektron fortwährend Energie ausstrahlen, da es eine schwingende elektrische Ladung darstellt. Bohr nahm daher im bewußten Widerspruch zur klassischen Elektrodynamik an, daß gewisse **strahlungsfreie Bahnen** existieren, auf denen das Elektron umläuft (Bild 317). Welche Bahnen hierfür in Frage kommen, ergibt sich aus dem nächsten Abschnitt.

12.2. Das Bohrsche Atommodell

Vermöge seiner Umlaufbewegung besitzt das Elektron kinetische Energie. Anderseits enthält es aber auch potentielle Energie in bezug auf den Kern; denn es bedarf einer bestimmten Arbeit, das Elektron entgegen der elektrostatischen Anziehung auf das Bahnniveau zu bringen.

Für den Fall, daß das Elektron vom Atom völlig entfernt ist (Bahnradius $r = \infty$), setzt man seine potentielle Energie jedoch gleich 0. Da für jede Bahn von end-

lichem Radius r die auf den Kern bezogene potentielle Energie aber kleiner ist, ergeben sich für das Elektron negative Energiewerte. Die kernnächste Bahn hat also den größten Zahlenwert an potentieller Energie mit negativem Vorzeichen. Nun besagt aber das Quantenpostulat Plancks (Abschn. 10.8.2.), daß die Energie eines Körpers nicht stetig zunehmen, sondern nur ganzzahlige Vielfache von $h\nu$ betragen kann. Hieraus folgert Bohr die

Quantenbedingung: Die potentielle Energie des umlaufenden Elektrons beträgt nur ganzzahlige Vielfache eines Strahlungsquants [1])

oder kurz: $E_{\text{pot}} = nh\nu \quad (n = 1, 2, 3, \ldots)$.

Um diese potentielle Energie zu berechnen, geht man davon aus, daß

$$\text{Arbeit} = \text{Kraft} \cdot \text{Weg} = P\,\mathrm{d}s,$$

wobei P die Coulombsche Kraft (47) darstellt. Mit der Kernladung $+e$ und der Elektronenladung $-e$ ist dann die potentielle Energie des Elektrons

$$E_{\text{pot}} = -\int_r^\infty \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\,\mathrm{d}r = -\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r}. \tag{134}$$

Es ist demnach $\left|\dfrac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r}\right| = nh\nu$ und

$$\nu = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r n h}. \tag{135}$$

Fliehkraft und elektrostatische Anziehung ergeben die Gleichung

$$mr\omega^2 = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}. \tag{136}$$

Bedenkt man, daß $\omega = 2\pi\nu$, und setzt (135) in (136) ein, so erhält man den Bahnradius und damit zugleich den

(137) **Radius eines Wasserstoffatoms:** $\boxed{r = \dfrac{\varepsilon_0 n^2 h^2}{\pi e^2 m}}$

Die Bahn mit dem kleinsten Energiewert erhält man, wenn $n = 1$ gesetzt wird. Das ergibt mit $\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12}\,\text{As/Vm}$, $e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\,\text{As}$, $m = 9{,}1 \cdot 10^{-31}\,\text{kg}$ und $h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}\,\text{Ws}^2$, $r = 0{,}53 \cdot 10^{-8}\,\text{cm}$.
Wenn sich das Elektron auf dieser eben berechneten Bahn bewegt, befindet sich das Atom im Grundzustand. Der berechnete Atomradius stimmt übrigens sehr gut mit dem Wert überein, der sich aus der kinetischen Gastheorie (II, Abschn. 18.4) ergibt.

---

[1]) Die Bohrsche Quantenbedingung lautet eigentlich, daß die Drehimpulse (nach I, 5.083 ist $p = \Theta\omega$ bzw. für einen Massenpunkt $mr^2\omega$) gequantelt werden müssen. Die Quantenbedingung hat dann die Form $p_n = mr^2 2\pi\nu = \dfrac{nh}{2\pi}$. Das gibt umgeformt $mr^2\omega^2 = nh\nu$. Die linke Seite dieser Gleichung ist dann der doppelte Betrag der kinetischen Energie und im Fall der Kreisbahn gleich der potentiellen Energie des Elektrons.

Unter bestimmten Umständen (Abschn. 12.3.) kann sich das Elektron auch auf den höheren Bahnen bewegen, die sich ergeben, wenn man n der Reihe nach gleich 2, 3, 4, ... setzt (Bild 317). Dann ergibt die letzte Formel:

Die Bahnradien des Wasserstoffatoms verhalten sich wie die Quadrate ganzer Zahlen zueinander.

12.3. Emission und Absorption des Lichtes

Solange das Elektron auf einer der erwähnten Bahnen umläuft, geschieht noch nichts weiter. Wenn es aber von einer höheren Bahn auf eine andere, kernnähere Bahn überwechselt, wird sein Energiegehalt geringer. Die Differenz dieser Energien wird dann als **Lichtquant** von der Größe $h\nu$ **emittiert.** Umgekehrt vollzieht sich die Absorption eines Lichtquants dadurch, daß das Elektron auf eine kernfernere Bahn gehoben wird (Bild 318).

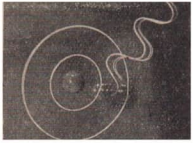


Bild 318. Emission eines Lichtquants beim Übergang des Elektrons auf eine dem Kern nähere Bahn (schematisch)

Emission und Absorption von Lichtquanten werden durch Bahnwechsel der Elektronen verursacht.

Wenn das Elektron durch Aufnahme eines Lichtquants auf eine kernfernere Bahn gehoben ist, sagt man, das Atom sei **angeregt.** Dies kann z. B. durch Erhitzen des betr. Stoffes geschehen. Dadurch erleiden die Atome infolge ihrer sich steigernden Bewegung zahlreiche Zusammenstöße, wodurch die am weitesten außen liegenden Elektronen angeregt werden und bei Rückkehr in den **Grundzustand** Licht ausstrahlen. Die **Verweilzeit** im angeregten Zustand ist außerordentlich kurz und beträgt etwa 10^{-8} s.

Das sichtbare Licht wird von den äußersten Elektronen (Leuchtelektronen) der Hülle ausgestrahlt.

Damit wird auch das Leuchten verdünnter Gase beim Durchgang von Katodenstrahlen verständlich. Die Anregung geschieht hierbei durch Elektronen, die mit großer Geschwindigkeit gegen die Atomhülle prallen.

12.4. Die Spektrallinien des Wasserstoffs

Es werde nun die Frequenz des ausgestrahlten Lichtes berechnet.

Neben der potentiellen Energie besitzt das Elektron noch kinetische Energie

$$\frac{mv^2}{2} \text{ oder } \frac{mr^2\omega^2}{2}.$$

Nach Gleichung (136) ist diese

$$\frac{mr^2\omega^2}{2} = \frac{e^2}{2 \cdot 4\pi\varepsilon_0 r}.$$

Man sieht beim Vergleich mit (134), daß die kinetische Energie den halben Betrag der potentiellen Energie hat. Die Gesamtenergie des Elektrons ist dann

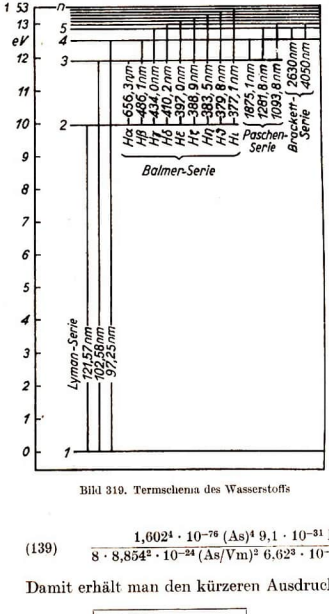


Bild 319. Termschema des Wasserstoffs

$$E = E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}} = -\frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r}.$$

Setzt man in diesen Ausdruck den Atomradius (137) ein, so ergibt sich für die

Energie des Elektrons auf der n-ten Bahn: $E_n = -\dfrac{e^4 m}{8\varepsilon_0^2 h^2}\cdot\dfrac{1}{n^2}.$

Wie schon gesagt, geschieht die Emission eines Lichtquants dadurch, daß das Elektron von der n'-ten (mit größerer Energie) auf die n-te (mit kleinerer Energie) Bahn überwechselt. Die dabei frei werdende Energie ist notwendig gleich der Differenz

$$E_{n'n} = E_{n'} - E_n = h\nu.$$

Damit wird die

(138) **Frequenz des ausgestrahlten Lichtes:** $\nu = \dfrac{e^4 m}{8\varepsilon_0^2 h^3}\left(\dfrac{1}{n^2} - \dfrac{1}{n'^2}\right)$

(Man beachte beim Nachrechnen die Vorzeichen!)

Der vor der Klammer stehende Ausdruck heißt **Rydberg-Frequenz R** und hat für das Wasserstoffatom den Wert

(139) $$\frac{1{,}602^4\cdot 10^{-76}\,(\text{As})^4\; 9{,}1\cdot 10^{-31}\,\text{kg}}{8\cdot 8{,}854^2\cdot 10^{-24}\,(\text{As/Vm})^2\; 6{,}62^3\cdot 10^{-102}\,\text{W}^2\text{s}^2} = 3{,}29\cdot 10^{15}\,{}^1/\text{s}.$$

Damit erhält man den kürzeren Ausdruck

(140) $$\boxed{\nu = R\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2}\right)}$$

Mit dieser Formel lassen sich die hauptsächlichsten, von leuchtendem Wasserstoff ausgesandten Wellenlängen ermitteln, wobei die Rechenergebnisse sehr gut mit den optisch gemessenen Werten übereinstimmen.

Dabei besteht für das Elektron eine ganze Reihe von Sprungmöglichkeiten (Bild 319). Es kann übergehen

1. von der n., ··· 5., 4., 3., 2. auf die 1. Bahn (Lyman-Serie im Ultraviolett);
2. von der n., ··· 5., 4., 3. auf die 2. Bahn (Balmer-Serie im Sichtbaren);
3. von der n., ··· 5., 4. auf die 3. Bahn (Paschen-Serie im Ultrarot);
4. von der n., ··· 5. auf die 4. Bahn (Brackett-Serie im Ultrarot).

Bild 320. Spektroskopische Aufnahme der Balmer-Serie

Wie sich leicht nachrechnen läßt, gehören die 3 im Band II (Abschn. 22.13) aufgeführten Spektrallinien des Wasserstoffs (656,3, 486,1 und 434,0 nm) der zuerst von **Balmer 1885** ohne Kenntnis des Atombaues berechneten Serie an (Bild 320).

Balmer entdeckte damals, daß sich diese Frequenzen durch den Ausdruck $\nu = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right)$ ($n = 3, 4, 5, \ldots$) darstellen lassen.

12.5. Die Quantenzahlen

Die im letzten Abschnitt dargestellte Berechnung der Spektrallinien geht von der an sich willkürlichen Annahme aus, daß die Elektronenbahnen Kreise sind. Man bezeichnet die Nummern dieser Bahnen als

Hauptquantenzahl n = Bahnnummer der Kreisbahnen.

Es sind aber auch Ellipsenbahnen möglich von der Art, wie sie die Planeten bei ihrem Lauf um die Sonne beschreiben. Der Kern befindet sich in einem der beiden Brennpunkte. Die von Sommerfeld (1915) verbesserte Theorie ergab:

Zu jeder Kreisbahn gehören ($n - 1$) Ellipsenbahnen.

Rechnet man die Kreisbahn selbst mit dazu, so umfaßt die Hauptquantenzahl n auch n mehr oder weniger langgestreckte Ellipsen (Bild 321). Es zeigt sich weiter, daß die zu einem bestimmten n gehörigen Ellipsen dasselbe Energieniveau besitzen. Da sich aber das Elektron auf einer elliptischen Bahn mit verschiedener Geschwindigkeit bewegt, führt die relativistische Massenänderung (65) zu kleinen Energiedifferenzen. Daher gibt man jeder Ellipsenbahn eine

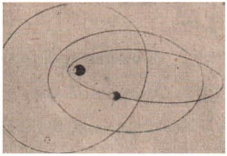


Bild 321 Die zur Hauptquantenzahl $n = 3$ gehörigen beiden Ellipsenbahnen $3s$ und $3p$ sowie die Kreisbahn $3d$ selbst

Nebenquantenzahl l = Nummer der Ellipsenbahn.

Anstatt mit Nummern (0, 1, 2, 3, ...) bezeichnet man die Nebenquantenzahlen mit den Buchstaben $s, p, d, f, \ldots$, wobei z. B. $3d$ die Kreisbahn 3 selbst, $3p$ die der Kreisform am nächsten kommende Ellipse und $3s$ die schmalste Ellipse bedeuten.[1])

Wenn sich die lichtaussendenden Atome in einem starken Magnetfeld befinden, werden die einzelnen Spektrallinien in nahe beieinanderliegende Einzellinien aufgespalten. Die Deutung dieses **Zeeman-Effektes** gelingt, wenn man das kreisende Atom als einen winzigen Kreisstrom betrachtet, der ein kleines magnetisches Feld erzeugt. Bei Einwirkung eines äußeren Feldes führt die Achse dieses atomaren „magnetischen Kreisels" eine Präzessionsbewegung (Band I, Abschn. 5.092) um die

[1]) Diese Buchstaben sind ursprünglich Abkürzungen für bestimmte Spektralserien.

Richtung der Feldlinien aus. Dabei sind nur bestimmte Winkel der Bahnebene gegenüber ihrer ursprünglichen Lage möglich (sogenannte **Richtungsquantelung**, Bild 322). Zu jeder Ellipsenbahn gibt es dann $m = 2l + 1$ verschiedene Bahnlagen im Raum. Beispielsweise kann die Ellipse $4d$ (wegen $l = 2$) 5 verschiedene Lagen im Raum annehmen. Die Zahl dieser Möglichkeiten bezeichnet man als

magnetische Quantenzahl m = Nummer der Bahnebene.

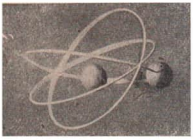


Bild 322. Richtungsquantelung (modellmäßig)

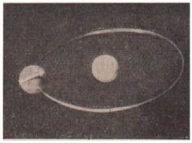


Bild 323. Elektronenspin (schematisch)

Schließlich wird die eben erwähnte magnetische Eigenschaft des Atoms noch dadurch beeinflußt, daß das Elektron selbst um seine eigene Achse rotieren kann. Man nennt diese Rotation den **Elektronenspin** (Bild 323). Es gibt hierbei entweder Rechts- oder Linksspin:

Spin-Quantenzahl s = Nummer des Rotationssinnes.

13. Atombau und periodisches System

13.1. Atomgewicht und Ordnungszahl

Wie **Mendelejew und Meyer 1869** unabhängig voneinander fanden, lassen sich alle chemischen Elemente nach ihrem **Atomgewicht A** und ihren chemischen Eigenschaften in ein übersichtliches System bringen, das **periodische System der Elemente** (s. die folgende Tafel).

Der Reihe nach tragen die Elemente Nummern, die sogenannte **Ordnungszahl Z (Kernladungszahl).** Bis auf wenige Ausnahmen nimmt das Atomgewicht mit steigender Ordnungszahl Z zu.

Wie schon gesagt, setzen sich die Atomkerne aller Elemente lediglich aus Protonen und Neutronen zusammen. Da die Masse dieser beiden Teilchen, in Einheiten des Atomgewichtes ausgedrückt, fast gleich 1 ist, würde sich hieraus grundsätzlich ergeben, daß alle Atomgewichte nahezu ganzzahlig sein müßten.

An Hand des periodischen Systems läßt sich daher die Zusammensetzung eines Kerns in einigen Fällen sofort angeben. Am einfachsten ist der Kern des Wasserstoffatoms. Er besteht aus einem einfachen Proton. Die Ordnungszahl ist $Z = 1$, das Atomgewicht ebenfalls gleich 1. Hierauf folgt das Helium. Der Kern besteht aus 2 Protonen und 2 Neutronen, so daß $Z = 2$ und $A = 4$. Dann kommt das Lithium mit $Z = 3$ und $A = 7$. Also muß sein Kern 3 Protonen und 4 Neutronen enthalten. So fortfahrend, findet man:

Ordnungs- (Kernladungs-) Zahl Z = Zahl der Protonen.

Das periodische System der Elemente (Chemische Atomgewichte 1955)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
1	**1** H 1.0080								**2** He 4.003
2	**3** Li 6.940	**4** Be 9.013	**5** B 10.82	**6** C 12.010	**7** N 14.008	**8** O 16.0000	**9** F 19.00		**10** Ne 20.183
3	**11** Na 22.997	**12** Mg 24.32	**13** Al 26.98	**14** Si 28.09	**15** P 30.975	**16** S 32.06	**17** Cl 35.457		**18** Ar 39.944
4	**19** K 39.100	**20** Ca 40.08	**21** Sc 44.96	**22** Ti 47.90	**23** V 50.95	**24** Cr 52.01	**25** Mn 54.93	**26** Fe **27** Co **28** Ni 55.85 58.94 58.71	
4	**29** Cu 63.54	**30** Zn 65.38	**31** Ga 69.72	**32** Ge 72.60	**33** As 74.91	**34** Se 78.96	**35** Br 79.916		**36** Kr 83.80
5	**37** Rb 85.48	**38** Sr 87.63	**39** Y 88.92	**40** Zr 91.22	**41** Nb 92.91	**42** Mo 95.95	**43** Tc 98.913	**44** Ru **45** Rh **46** Pd 101.7 102.91 106.4	
5	**47** Ag 107.880	**48** Cd 112.41	**49** In 114.82	**50** Sn 118.70	**51** Sb 121.76	**52** Te 127.61	**53** I 126.91		**54** X 131.3
6	**55** Cs 132.91	**56** Ba 137.36	**57** La 138.92 **58-71**	**72** Hf 178.5	**73** Ta 180.88	**74** W 183.86	**75** Re 186.22	**76** Os **77** Ir **78** Pt 190.2 193.1 195.09	
6	**79** Au 197.2	**80** Hg 200.61	**81** Tl 204.39	**82** Pb 207.21	**83** Bi 209.00	**84** Po 210.00	**85** At 210		**86** Rn 222.00
7	**87** Fr 223	**88** Ra 226.05	**89** Ac 227.04 **90-101**						

6	**58** Ce 140.13	**59** Pr 140.92	**60** Nd 144.27	**61** Pm 145	**62** Sm 150.35	**63** Eu 152.0	**64** Gd 157.26	**65** Tb 159.2	**66** Dy 162.51	**67** Ho 164.94	**68** Er 167.27	**69** Tm 169.4	**70** Yb 173.04	**71** Lu 174.99
7	**90** Th 232.12	**91** Pa 231.0	**92** U 238.07	**93** Np 237	**94** Pu 242	**95** Am 243	**96** Cm 243	**97** Bk 245	**98** Cf 246	**99** Es	**100** Fm	**101** Md	**102** No	

Da das Atom als Ganzes elektrisch neutral ist, muß die Atomhülle die gleiche Zahl von Elektronen enthalten:

Ordnungszahl Z = Zahl der in der Hülle enthaltenen Elektronen.

Die Summe der im Kern enthaltenen Teilchen nennt man die Massenzahl A, die in vielen Fällen etwa dem gerundeten Atomgewicht entspricht:

Massenzahl A = Zahl der Protonen + Zahl der Neutronen

(141) $$\boxed{A = Z + N}$$

13.2. Die Atomhüllen der übrigen Elemente

Im Abschnitt 12.5. war geschildert worden, auf welchen Bahnen sich ein einzelnes Elektron bewegen kann. Die möglichen Bewegungen ließen sich dabei mit Hilfe der 4 Quantenzahlen darstellen. Da nun die Atome der schwereren Elemente mehr als ein Elektron enthalten, fragt es sich, in welcher Weise diese dann in der Hülle verteilt sind. Hierfür sind zunächst grundsätzlich dieselben 4 Quantenzahlen maßgebend. Die weitere Einordnung der Elektronen vollzieht sich nach dem

(142) **Pauli-Prinzip: Es dürfen niemals 2 Elektronen in allen 4 Quantenzahlen übereinstimmen.**

Es ist daher z. B. nicht möglich, daß sich auf der innersten Bahn $1s$ mehr als 2 Elektronen befinden können; denn zur Hauptquantenzahl $n = 1$ gehört keine weitere Ellipse ($l = 0$), auch existiert nur eine einzige Bahnebene ($m = 2l + 1 = 1$). Lediglich 2 Spinquantenzahlen ($+{}^1/_2$ und $-{}^1/_2$) sind möglich. Diese beiden Elektronen haben also die Quantenzahlen (1, 0, 1, $+{}^1/_2$) bzw. (1, 0, 1, $-{}^1/_2$). Die Quantenzahlen eines auf derselben Bahn befindlichen 3. Elektrons müßten mit einem der beiden anderen Elektronen übereinstimmen, was nach dem Pauli-Prinzip aber nicht der Fall sein darf.

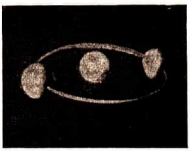


Bild 324. Heliumatom

Der im folgenden beschriebene Aufbau der Atomhüllen bezieht sich auf den Grundzustand, d. h. diejenige Lage der Elektronen, in der sie noch keine Strahlungsenergie von außen aufgenommen haben.

An Hand des periodischen Systems ergibt sich der Reihe nach:

Helium: (2 Elektronen wegen $Z = 2$). Die Bahn $n = 1$ des H-Atoms kann noch ein Elektron von entgegengesetztem Spin aufnehmen, weil sich dann beide Elektronen durch ihre Spinquantenzahl unterscheiden (Bild 324)[1]).

Lithium: (3 Elektronen wegen $Z = 3$). Das dritte, neu hinzutretende Elektron läuft auf der Bahn $2s$. Dies ist die zur Hauptquantenzahl $n = 2$ gehörige Ellipse (Bild 325).

---

[1]) Die hier wiedergegebenen Bilder stellen nur schematische Modelle nach der ursprünglichen Vorstellung von Bohr dar. Nach der neuen wellenmechanischen Theorie ergibt sich eine fast vollständige Raumerfüllung. Form und Größe des von den Elektronen eingenommenen Raumes ist von deren Energiezustand abhängig und kann mathematisch genau berechnet werden. Jedoch muß dann von der Annahme bestimmter Bahnen abgesehen werden.

Beryllium: (4 Elektronen). Die Ellipse $2s$ nimmt noch ein zweites Elektron von entgegengesetztem Spin auf (Bild 326).

Bor: (5 Elektronen). Die Kreisbahn $2d$ nimmt ein Elektron auf. Diese Kreisbahn kann aber wegen $m = (2 \cdot 1 + 1) = 3$ und wegen jeweils zweier Spinrichtungen im ganzen 6 Elektronen aufnehmen (Bild 327). Damit folgt mit einem weiteren Elektron auf Bahn $2p$ der Kohlenstoff.

Neon: (6 Elektronen). In dieser Weise ist der Aufbau der Bahn $2p$ beim Edelgas Neon mit seinen (wegen $Z = 10$) 10 Elektronen beendet (Bild 328).

Natrium: (11 Elektronen). Als nächste Bahn der Hauptquantenzahl $n = 3$ wird die Ellipse $3s$ mit einem Elektron belegt (Bild 329). Wie die Besetzung der weiteren Bahnen vor sich geht, zeigt die nachstehende Übersicht. Man entnimmt ihr, daß z. B. die Bahn $3d$ nicht im Anschluß an $3p$ aufgebaut wird, sondern sich erst die Ellipse $4s$ dazwischenschiebt.

Im übrigen faßt man die Elektronenbahnen mit gleicher Hauptquantenzahl zu einer **Elektronenschale** zusammen und erhält so die Schalen K, L, M, N, O, P und Q.

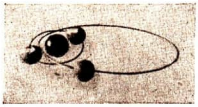


Bild 325. Lithiumatom

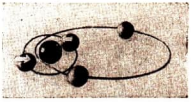


Bild 326. Berylliumatom

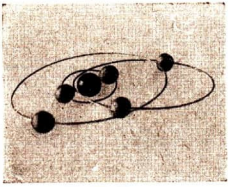


Bild 327. Boratom

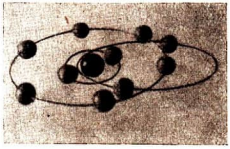


Bild 328. Neonatom

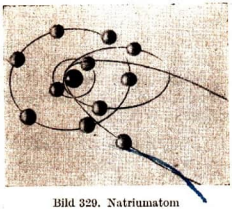
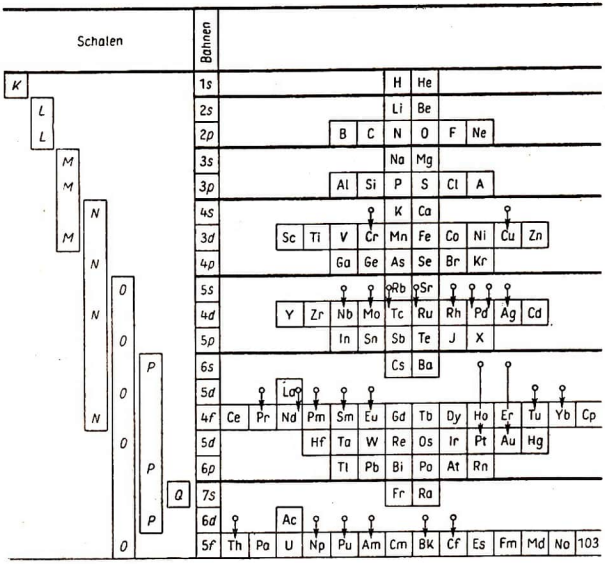


Bild 329. Natriumatom

Elektronenverteilung der Elemente

Auffüllung der Elektronenschalen in der Reihenfolge der Ordnungszahl



Die Elemente mit dem Zeichen ↕ übernehmen ein s-Elektron in die d-Bahn bzw. ein d-Elektron in die f-Bahn.

Aus der Übersicht erkennt man ferner, daß der Aufbau jeder Schale mit einem Alkalimetall beginnt. Zum Beispiel leitet das Kalium auf Bahn $4s$ die N-Schale ein. Mit der Besetzung der jeweiligen p-Bahn aber wird die Schale vorläufig abgeschlossen, womit eine besonders stabile Konfiguration erreicht wird. Hier steht am Schluß jeweils ein Edelgas. Zum Beispiel beschließt das Krypton die Bahn $4p$. Die zum vollständigen Ausbau der N-Schale noch fehlende Besetzung der Bahnen $4d$ und $4f$ wird erst später nachgeholt.

Jede Elektronenschale beginnt mit einem Alkalimetall und schließt mit einem Edelgas vorläufig ab.

Das jeweils erste Elektron einer neu angefangenen Schale gehört als s-Elektron einer langgestreckten Ellipse an und kann daher leicht abgetrennt werden. Dies ist die Ursache der

leichten Ionisierbarkeit und chemischen Aktivität der Alkalimetalle. Das gilt auch für das 2. Elektron auf dieser Bahn, womit sich die Zweiwertigkeit der Erdalkalimetalle erklärt.

In dieser Weise lassen sich viele chemische Eigentümlichkeiten der Elemente zwanglos aus dem periodischen System und dem ihm zugrunde liegenden Schalenbau der Elektronenhüllen ableiten.

Beispiele: 1. Aus der analogen Stellung der Elemente F, Cl, Br, J in der Übersicht erklärt sich das chemisch ähnliche Verhalten der Halogene.

2. Welchen Elektronenaufbau hat das Kupfer? — In der Übersicht S. 184 sind alle Bahnen von $1s$ bis $4s$ voll besetzt, das sind 20 Elektronen. Die außerdem noch eingebaute Bahn $3d$ ist mit 9 Elektronen besetzt, wozu noch 1 Elektron kommt, das aus der Bahn $4s$ übernommen wird und dafür dort fehlt. Im ganzen sind das mithin 29 Elektronen entsprechend der Ordnungszahl 29 im periodischen System (S. 181).

3. Das chemisch außerordentlich ähnliche Verhalten der seltenen Erden in der Reihe $4f$ einschließlich des Lanthans (daher auch die Gruppe der „Lanthaniden" genannt) liegt daran, daß die Bahn $4f$ nachträglich eingebaut wird und relativ tief liegt, da bereits die P-Schale angefangen wurde. Da die chemischen Eigenschaften von den äußersten Elektronen einer Schale bestimmt werden, kann eine mehr oder weniger vollständige Nachbesetzung der N-Schale sich chemisch kaum bemerkbar machen.

4. Die Elemente Kohlenstoff, Silizium und Germanium sind chemisch 4wertig, weil sie in der äußeren Schale je $2s$- und p-Elektronen besitzen. Dabei können sie diese 4 Elektronen entweder an ihren Verbindungspartner abgeben (z. B. in der Verbindung CCl_4) oder 4 Elektronen von ihren Partnern aufnehmen, um die p-Bahn zu vervollständigen (z. B. SiH_4).

13.3. Entstehung der Röntgenspektren

Mit Hilfe des Bohrschen Atommodells ist auch die Entstehung der **charakteristischen Röntgenstrahlung** (S. 82) leicht zu deuten. Das Spektrum dieses Anteils des Röntgenlichtes läßt sich, ähnlich wie das des sichtbaren Lichtes, in einzelne Serien gruppieren, die mit einer gewissen Verschiebung bei allen Elementen wiederkehren.

Beim Eindringen von Katodenstrahlen (schnell bewegten Elektronen) in das Material der Anode werden einzelne tiefer liegende Elektronen aus der Atomhülle gerissen. Auf diese Weise entsteht z. B. in der K-Schale eine Lücke, die dadurch wieder geschlossen wird, daß ein Elektron aus der benachbarten L-Schale in diese Lücke zurückfällt. Der hierbei frei gewordene Platz in der L-Schale wird durch ein Elektron aus einer noch höheren Schale ausgefüllt usw. (Bild 330).

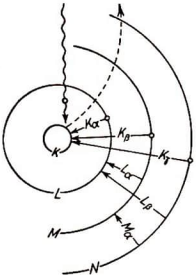


Bild 330. Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung

In die K-Schale zurückfallende Elektronen geben die dann frei werdende Energie als Strahlung der ***K*-Serie** ab. Entsprechend ergeben Quantensprünge in die L-Schale die ***L*-Serie** usw.

Die charakteristische Röntgenstrahlung entsteht demnach durch Quantensprünge innerhalb der dem Kern nächstliegenden Elektronenbahnen, während das sichtbare Licht von den äußersten Elektronen der Hülle („Leuchtelektronen") erzeugt wird.

Zur Berechnung der dabei entstehenden Frequenzen bzw. Wellenlängen dient wieder die Formel (140), wobei

noch die Ordnungszahl Z des Anodenmaterials maßgebend ist.[1]) Damit erhält man für die K-Serie $(n = 1)$ $\nu = Z^2 R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n'^2}\right)$. Nach dem Entdecker dieses Gesetzes Moseley (1914) ist die Formel noch etwas abzuändern, so daß beispielsweise die

(143) **Frequenzen der K-Serie des Röntgenspektrums:**

$$\boxed{\nu = (Z - 1)^2 R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n'^2}\right)}$$

Hiernach geben Metalle großen Atomgewichtes auch die höchsten Frequenzen, d. h. kurzwelligsten (härtesten) Röntgenstrahlen ab. Die Linien einer Serie tragen die Indizes α $(n' = 2)$, β $(n' = 3)$ usw.

Beispiel: Die härteste Röntgenstrahlung liefert das Uran $(Z = 92)$. Für die Linie K_α erhält man $\nu = (92 - 1)^2 \cdot 3{,}29 \cdot 10^{15}\ {}^1/\mathrm{s}\ (1 - {}^1/_4) = 2{,}04 \cdot 10^{19}$ Hz und damit die Wellenlänge

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \cdot 10^{10}\ \mathrm{cm\ s}}{\mathrm{s}\ 2{,}04 \cdot 10^{19}} = 1{,}47 \cdot 10^{-9}\ \mathrm{cm}.$$

14. Die Isotopie

14.1. Isotope und Isobare

Betrachtet man die chemischen Atomgewichte, so muß auffallen, daß diese in vielen Fällen recht stark von der Ganzzahligkeit abweichen. Beispielsweise hat Chlor das Atomgewicht 35,457, Kupfer 63,54 usw. Die Ursache liegt im folgenden:
Ein großer Teil der in der Natur vorkommenden Elemente existiert in mehreren **Isotopen,** die stets in demselben Mischungsverhältnis miteinander vermengt sind, sich aber chemisch nicht voneinander trennen lassen. So besteht das Chlor aus zwei Isotopen vom Atomgewicht 35 und 37, die im Verhältnis 75,7 : 24,3 miteinander vermischt sind. Beide Isotope haben dieselbe Ordnungszahl.

Ein chemisches Element ist durch seine Ordnungszahl definiert.

Isotope: Atomarten von gleicher Ordnungszahl und gleichen chemischen Eigenschaften, aber verschiedenem Atomgewicht.

Die meisten natürlichen Elemente sind daher physikalisch nicht rein, sondern sind **Mischelemente.** Nur 17 Elemente des periodischen Systems bestehen aus einer einzigen Atomart. Diese **Reinelemente** sind Be, F, Na, Al, P, Sc, Mn, Co, As, Y, Nb, Rh, J, Cs, Tb, Au und Bi.
Die Atomgewichte der Isotope sind in der Tat nahezu ganzzahlig, so daß die Regel $A = Z + N$ bestätigt ist.
Will man ein chemisches Element bzw. eines seiner Isotope eindeutig bezeichnen, so setzt man vor das chemische Zeichen als unteren Index die Ordnungszahl Z und als oberen Index die Massenzahl A, z. B.:

Jod: ${}^{127}_{53}\mathrm{J}$.

[1]) Dies rührt daher, daß in den Zählern der Ausdrücke (134) bis (136) an Stelle von e^2 das Produkt Ze^2 tritt. Im allgemeinen Falle ist die elektrostatische Anziehung zwischen Kern und einem Elektron der Hülle proportional der Kernladung Z.

Beispiele: 1. Aus dem eben angeführten Symbol des Jods erkennt man, daß sein Kern aus 53 Protonen und (127 – 53) = 74 Neutronen besteht.

2. Der Kern des Uranisotops $^{238}_{92}$U enthält 92 Protonen und (238 – 92) = 146 Neutronen.

In einzelnen Fällen ist der Anteil der Isotope im Verhältnis zum Hauptisotop nur geringfügig, so daß er an dessen Atomgewicht kaum etwas ändert. So besteht der natürliche Wasserstoff hauptsächlich aus dem Isotop $^{1}_{1}$H und zu 0,015% aus dem Isotop $^{2}_{1}$H **(Deuterium).** Ausnahmsweise hat dieses Isotop das chemische Zeichen D erhalten. Das **schwere Wasser** D_2O reichert sich bei der Elektrolyse großer Wassermengen in der Restflüssigkeit an. Das noch viel seltenere Isotop **Tritium** $^{3}_{1}$H ist radioaktiv, nur von kurzer Lebensdauer und kommt nur in Spuren in der Atmosphäre vor.

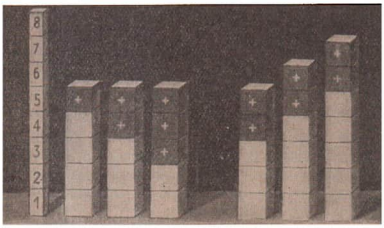


Bild 331. Schematischer Kernaufbau isobarer (links) und isotoper (rechts) Elemente

Da die meisten Elemente mehrere Isotope besitzen, kommt auch der Fall vor, daß die Isotope zweier verschiedener Elemente (also mit verschiedener Ordnungszahl) das gleiche Atomgewicht aufweisen. Man spricht dann von isobaren Elementen (Bild 331).

Isobare Elemente: Elemente mit gleichem Atomgewicht, aber verschiedener Kernladungszahl.

14.2. Das physikalische Atomgewicht

Die in der Chemie benutzten Atomgewichte (s. periodisches System) beziehen sich auf das natürliche Element Sauerstoff, dessen Atomgewicht (willkürlich) auf den genauen Wert 16,000 festgesetzt wurde. Da der Sauerstoff aber ein Gemisch der 3 Isotopen $^{16}_{8}$O (99,757%), $^{17}_{8}$O (0,039%) und $^{18}_{8}$O (0,204%) darstellt, bezieht man die Atomgewichte in der Kernphysik auf das reine Isotop $^{16}_{8}$O, dem man den genauen Wert 16,000 zuordnet und erhält damit die **physikalischen Atomgewichte** oder **Massenwerte.**

Die physikalischen Atomgewichte oder Massenwerte beziehen sich auf das reine Sauerstoffisotop $^{16}_{8}$O.

Das physikalische Atomgewicht des natürlichen Sauerstoffs ist daher ein klein wenig größer als 16,000, nämlich gleich 16,00447.

Der 16. Teil des Massenwertes vom $^{16}_{8}$O wird als **1 Masseneinheit** (1 ME) bezeichnet.

(144) **1 ME = $\frac{1}{16}$ des Massenwertes des Sauerstoffisotopes $^{16}_{8}$O.**

Die in Gramm ausgedrückte absolute Masse einer Masseneinheit ergibt sich aus der Definition der Loschmidtschen Zahl N_L. Da diese der in einem Grammatom enthaltenen Anzahl von Atomen entspricht, beträgt

$$1\ \text{ME} = \frac{1}{6{,}023 \cdot 10^{23}}\ \text{g} = 1{,}66 \cdot 10^{-24}\ \text{g}. \tag{145}$$

14.3. Der Massendefekt

Da die Massenwerte der Elementarteilchen genau bekannt sind, könnte man annehmen, daß es möglich sei, den Massenwert eines beliebigen Atoms als Summe seiner elementaren Bestandteile rechnerisch zu finden. Führt man diese Rechnung beispielsweise beim $^{2}_{4}$He durch, so findet man die Summe aus 2 Protonen, 2 Neutronen und 2 Elektronen mit $2 \cdot 1{,}0076 + 2 \cdot 1{,}0090 + 2 \cdot 0{,}00055 = 4{,}034$ ME. Im periodischen System ist jedoch der Wert 4,003 angegeben.[1]
Das tatsächliche Atomgewicht ist demnach geringer als die Summe der einzelnen Bausteine des Atoms! Dies ist bei sämtlichen Atomen in ähnlicher Weise der Fall. Man nennt diese Erscheinung den

Massendefekt: Die Masse eines Atoms ist stets kleiner als die Summe der Massen der darin enthaltenen Bestandteile.

Die Differenz erklärt sich daraus, daß beim gedachten Zusammentritt der Elementarteilchen ein Teil der in ihnen enthaltenen Masse verschwindet und als Energie abgestrahlt wird (Bild 332). Um dies zu verstehen, muß man wieder daran denken, daß die in den Elementarteilchen vor dem Zusammentritt enthaltene Materie Masse und Energie zugleich darstellt, deren Gesamtsumme bei dem Vorgang erhalten bleibt. Zur Berechnung dieser Energie hatten wir die Gleichung (131) $E = mc^2$ gefunden. Umgekehrt müßte man eine gleich große Energiemenge aufwenden, wenn man den Heliumkern wieder in seine Bestandteile auflösen wollte.

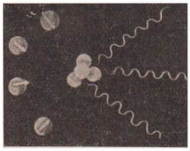


Bild 332. Zusammentritt von vier Elementarteilchen zu einem Heliumkern unter Aussendung von Strahlung (schematisch)

Diese Vereinigung von Wasserstoff- zu Heliumkernen ist die Hauptquelle der von der Sonne ausgestrahlten Energie. Allerdings findet hierbei die Umsetzung nicht unmittelbar, sondern in einer komplizierten Reaktionsreihe statt (sogenannter Bethe-Prozeß).

15. Die natürliche Radioaktivität

15.1. Das Wesen der radioaktiven Strahlungen

Als der französische Physiker **Becquerel** 1896 ein Stück Uranpechblende auf eine in schwarzes Papier gehüllte fotografische Platte legte, stellte er nach dem Entwickeln fest, daß die Platte geschwärzt war. Es mußte von der Pechblende eine bis dahin

[1]) Der geringfügige Unterschied zwischen physikalischem und chemischem Atomgewicht spielt hierbei keine Rolle.

unbekannte Strahlung ausgegangen sein. Auf der Suche nach der Herkunft dieser Strahlen entdeckte das Ehepaar **Pierre und Marie Curie** 1898 die Elemente **Radium** und **Polonium,** die sie als **radioaktiv** strahlend erkannten.
Da aber diese Elemente jeweils durch mehrere Isotope vertreten sind, ist es besser, von **radioaktiven Isotopen** zu sprechen. Die Anzahl der in der Natur vorkommenden Isotopen beträgt etwa 320. Davon sind etwa 50 radioaktiv.

Bild 333 Marie Curie (1867···1934)

Versuch: Man lege ein Stück Pechblende auf den Teller eines geladenen Elektroskops (Bild 334). Der Ausschlag des Instruments geht schnell auf 0 zurück.

Die von radioaktiven Isotopen ausgesandten Strahlen können dreierlei Art sein (Bild 335). Bis auf wenige Ausnahmen ist ein radioaktives Isotop ein α- oder ein β-Strahler, wobei jeweils noch γ-Strahlung auftreten kann.

1. α-Strahlung. Sie wird durch einen Magneten abgelenkt und zeigt dabei, daß sie aus positiv geladenen Teilchen, den sogenannten **α-Teilchen,** besteht. Man weiß heute, daß es positiv geladene Heliumkerne vom Massenwert 4,0039 und der Ordnungszahl 2 sind.

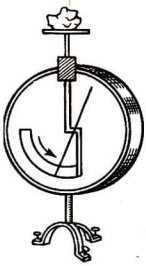


Bild 334
Nachweis radioaktiver Strahlen mit Elektroskop

2. β-Strahlung. Sie wird vom Magneten entgegengesetzt wie die α-Strahlung abgelenkt und besteht aus Elektronen großer, aber nicht einheitlicher Geschwindigkeit.

3. γ-Strahlung. Sie wird von einem Magneten nicht abgelenkt und stellt eine elektromagnetische Strahlung von außerordentlich kleiner Wellenlänge dar (kürzer als diejenige der Röntgenstrahlung). Sie kommt dadurch zustande, daß der Kern nach Aussendung eines α- oder β-Teilchens in angeregtem Zustand zurückbleiben kann. Er gibt die überschüssige Energie anschließend als γ-Strahlung von großem Durchdringungsvermögen ab.

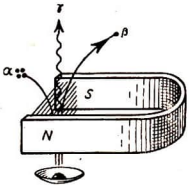


Bild 335
Ablenkung der radioaktiven Strahlen im Magnetfeld

15.2. Das Zerfallsgesetz

Da die genannten Strahlungen aus dem Atomkern des betreffenden Elementes stammen, muß dieser dadurch eine Veränderung erleiden. Man sagt, der Kern **zerfällt** dabei. Die Ursache beruht auf einem Überschuß des Kerns an Protonen oder Neu-

tronen, wodurch der Kern instabil ist. Man unterscheidet also **stabile** (die beständigen) und **instabile** (die radioaktiven) Kernarten.

Es zerfallen aber nicht alle Kerne der betreffenden Substanz mit einem Mal, es gäbe sonst längst keine derartigen Stoffe mehr. Man kann überhaupt nicht sagen, wann ein bestimmter, ins Auge gefaßter Atomkern zerfallen wird. Er kann, obwohl seit seiner Entstehung schon Milliarden Jahre verflossen sind, noch viele Millionen Jahre völlig unverändert bleiben, ebensogut sich schon im nächsten Augenblick explosionsartig umwandeln.

Die Labilität zeigt sich nur in der Gesamtheit sehr vieler Kerne dadurch, daß in jedem Augenblick ein bestimmter Prozentsatz der Umwandlung anheimfällt. Es ist damit ähnlich wie mit der Bevölkerung eines Landes, von der die Versicherungsgesellschaft genau weiß, wieviel Menschen in jedem Jahre sterben, ohne aber das geringste über das Schicksal eines einzelnen sagen zu können. Das bedeutet allerdings nicht, daß wir grundsätzlich darauf verzichten müssen, den Zerfallsvorgang eines einzelnen Atoms als nach bestimmten Gesetzen vor sich gehend zu betrachten.

Es wird also eine bestimmte Zeit vergangen sein, bis die Hälfte aller ursprünglich vorhandenen Kerne zerfallen sein wird. Man nennt sie die

Halbwertszeit T: diejenige Zeit, innerhalb deren die Hälfte aller jeweils vorhandenen Atomkerne zerfallen ist.

Bis dann von der verbliebenen Hälfte wieder die Hälfte zerfallen ist, vergeht wieder die gleiche Zeit T, so daß in gleichen Zeitabständen T von einer ursprünglich vorhanden gewesenen Menge 1 noch vorhanden sind: $1, {}^1/_2, {}^1/_4, {}^1/_8, \ldots$

Die Halbwertszeit ist für jede radioaktive Kernart konstant und charakteristisch. Der Zerfallsvorgang läßt sich durch keinerlei äußere physikalische (z. B. Erhitzung) oder chemische Mittel beeinflussen. Mit anderen Worten:

Gesetz des radioaktiven Zerfalls: Die Anzahl der je Zeiteinheit zerfallenden Atomkerne ist der Zahl der jeweils vorhandenen Kerne proportional.

Der Proportionalitätsfaktor ist die **Zerfallskonstante λ:**

Zerfallskonstante λ: Derjenige Bruchteil der in einem radioaktiven Isotop enthaltenen Atomkerne, der in der Zeiteinheit zerfällt.

Betrachtet man N Atomkerne, so zerfällt demnach in der sehr kurzen Zeitspanne dt die Anzahl $dN = -\lambda N dt$ Kerne. Durch Integration erhält man daraus das

(146) **Zerfallsgesetz:** $$\boxed{N = N_0 e^{-\lambda t}}$$

(N_0 Anzahl der zur Zeit $t = 0$ vorhandenen Atomkerne.)

Setzt man $N = N_0/2$, so ergibt sich daraus die Halbwertszeit T nach

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T} \quad \text{oder} \quad \lambda T = \ln 2.$$

(147) **Halbwertszeit:** $$\boxed{T = \frac{0{,}693}{\lambda}.}$$

15.3. Die radioaktiven Zerfallsreihen

Der durch einen solchen Umwandlungsakt entstehende neue Kern braucht aber seinerseits nicht stabil zu sein, sondern stellt in vielen Fällen einen neuen radioaktiven Stoff dar. Zerfallsart und Halbwertszeit dieses neuen Kerns sind aber, ganz unabhängig vom ersten, durchaus anders. Der neu gebildete Kern ist demnach oft radioaktiv, so daß eine Kette von Umwandlungen zustande kommt, die erst dann abschließt, wenn der letzte Kern vollkommen stabil ist. Auf diese Weise entsteht eine radioaktive **Zerfallsreihe.**
Fast alle in der Natur vorkommenden radioaktiven Isotope gehören drei Familien, d. h. drei Zerfallsreihen, an, innerhalb deren jedes Glied aus dem vorhergehenden entsteht.

15.3.1. Die Uranreihe

Ausgangselement ist das Uran $^{238}_{92}$UI ($T = 4{,}56 \cdot 10^9$ Jahre). Endglied ist das stabile Bleiisotop $^{206}_{82}$Pb.

Die Übersicht Seite 192 gibt die Uranreihe wieder, aus der man erkennt, wie sich aus dem Uran das Ionium, das Radium, Polonium und zum Schluß Blei bilden.

Aus der Reihe ist ersichtlich, wie UI zunächst ein (positiv 2fach geladenes) α-Teilchen abgibt, wodurch die Kernladungszahl Z um 2 Einheiten abnimmt, die Massenzahl dagegen um 4 Einheiten, da die Massenzahl des α-Teilchens $A = 4$ ist. Das so entstandene Element UX_1 gibt ein β-Teilchen ab. Da dieses negativ ist, muß die Kernladungszahl um 1 Einheit zunehmen, weil dabei ein Neutron zu einem Proton wird:

Neutron → Elektron + Proton.

In ähnlicher Weise geht die Reihe weiter und endigt beim Bleiisotop RaG, das in dieser Form endgültig verharrt.
Die beim Zerfall des Neutrons entstehenden β-Teilchen haben keine einheitliche Reichweite, sondern besitzen ein kontinuierliches Geschwindigkeitsspektrum mit scharfer oberer Grenze. Daher fordert der Energieerhaltungssatz ein Teilchen, welches die dem jeweiligen β-Teilchen fehlende Energie mit sich führt, elektrisch aber neutral sein muß. Es wird Neutrino genannt (S. 206).

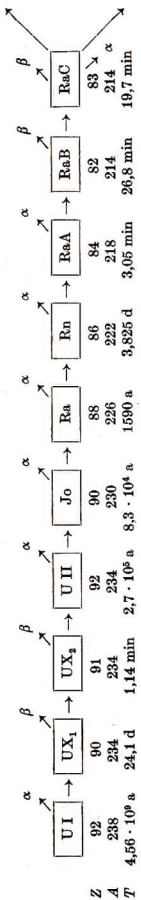
Wenn man demnach ein Stück natürliches Uran untersucht, so finden sich darin zu gleicher Zeit sämtliche Glieder der Zerfallsreihe. Von den Gliedern mit kurzer Halbwertszeit wird aber nur wenig vorhanden sein, weil diese Kerne zwar fortlaufend neu gebildet werden, aber schnell wieder zerfallen. So entsteht in der ganzen Substanz im Laufe längerer Zeiträume ein

(148) **radioaktives Dauergleichgewicht: Die einzelnen Gleichgewichtsmengen verhalten sich wie die Halbwertszeiten zueinander.**

Beispiel: 1 kg natürliches Uran enthält eine stets konstante Menge von $\frac{1590}{4{,}56 \cdot 10^9} \cdot \frac{214}{238}$ kg = $= 0{,}33 \cdot 10^{-6}$ kg = 0,33 mg Radium (der zweite Bruch berücksichtigt die Atomgewichte).

Eines der bemerkenswertesten Glieder dieser Reihe ist das Element Rn (Radon oder Radium-Emanation), das gasförmig ist und aus dem Radium entsteht. Es gelangt aus den stets uranhaltigen Gesteinen der Erdrinde in die Atmosphäre und ist in vielen natürlichen Quellwässern enthalten (Radiumbäder).

Die Zerfallsreihe des Urans



15.3.2. Die Thoriumreihe

Ausgangselement ist das Thorium $^{232}_{90}$Th ($T = 1{,}39 \cdot 10^{10}$ Jahre), Endprodukt das stabile Bleiisotop $^{208}_{82}$Pb.

15.3.3. Die Aktiniumreihe

Ausgangselement ist das Actinuran $^{235}_{92}$U ($T = 713$ Millionen Jahre). Endglied das stabile Bleiisotop $^{207}_{82}$Pb.

15.4. Weitere natürliche radioaktive Isotope

In der Natur existieren noch etwa 12 weitere radioaktive Isotope, die nicht in den drei genannten Zerfallsreihen enthalten sind. Ihre Halbwertszeiten sind meist außerordentlich groß. Von ihnen sei hier nur das Isotop $^{40}_{19}$K genannt, das im gewöhnlichen Element Kalium zu 0,012% enthalten ist. Seine Halbwertszeit beträgt $1{,}25 \cdot 10^9$ Jahre. Es ist zu 89% β-aktiv und zerfällt dabei in das stabile Isotop $^{40}_{20}$Ca. Ein weiterer Prozentsatz (11%) des $^{40}_{19}$K wandelt sich dadurch um, daß es aus der K-Schale der Hülle ein Elektron in den Kern übernimmt, wobei sich ein Kernproton in ein Neutron umwandelt. Hierbei entsteht das stabile $^{40}_{18}$Ar und gleichzeitig noch eine γ-Strahlung. Diese Art einer Kernumwandlung nennt man deshalb **K-Einfang** (oder auch E-Einfang).

15.5. Nachweis der Strahlungen

Die zu untersuchenden Mengen radioaktiver Stoffe sind meist so gering, daß sie nicht durch Wägung bestimmt werden können. Man stellt sie daher indirekt mit Hilfe der von ihnen ausgesandten Strahlungen fest.

1. Das Spinthariskop. Am einen Ende einer kleinen Metallhülse (Bild 336) befindet sich inwendig ein Leuchtschirm (mit Kupfer aktiviertes Zinksulfid), der mit einer Lupe betrachtet wird. Dem Schirm gegenüber ist auf einer Nadelspitze das Präparat angebracht. Jedes auf den Schirm treffende α-Teilchen erzeugt dort einen sichtbaren Lichtblitz **(Szintillation).** Man vermag so die ausgesandten α-Teilchen mit dem Auge einzeln direkt zu zählen. Rutherford hat damit seine historischen Versuche angestellt. Die Methode gewinnt neuerdings wieder an Bedeutung. β- und γ-Strahlen wirken in ähnlicher Weise in Anthrazen-, Naphthalin- und anderen Kristallen, wobei die Lichtblitze mit Hilfe elektrischer Vorrichtungen registriert und gezählt werden können **(Szintillationszähler).**

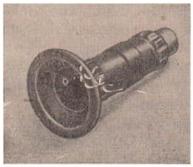


Bild 336. Spinthariskop

2. Ionisationskammern. α-, β- und γ-Strahlen machen die in einem geschlossenen Gefäß befindliche Luft und andere Gase durch Bildung von Ionen elektrisch mehr oder weniger leitend. Von den zahlreichen Ausführungsformen solcher Ionisationskammern

sei hier nur das **γ-Strahlen-Elektroskop** erwähnt. Ein mit mindestens 2 mm dickem Blei abgeschirmtes Gefäß (P) enthält ein empfindliches Goldblattelektroskop (G), das mittels des Hebels (H) (Bild 337) elektrisch geladen wird. Der Bleipanzer ist für α- und β-Strahlen undurchdringlich, läßt aber die γ-Quanten durch.
Aus dem Blei werden Elektronen befreit, wodurch das Füllgas ionisiert wird. Dadurch entlädt sich das Elektrometer mehr oder weniger schnell. Zur Eichung des Instrumentes dienen Standardpräparate (Etalons), die in Wien oder Paris mit dem dort befindlichen **Radiumstandard,** einem 22,23 mg $RaCl_2$ enthaltenden Präparat, verglichen sind.

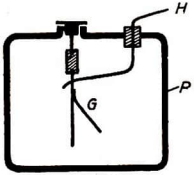


Bild 337. γ-Strahlen-Elektroskop

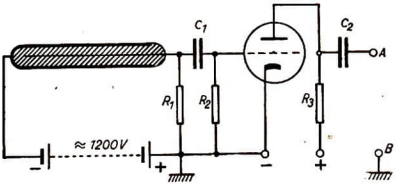


Bild 338. Anschluß eines Zählrohres an einen gewöhnlichen Rundfunkverstärker bei A—B. (C_1 = 50 pF, C_2 = 1000 pF, R_1 = $10^6 \cdots 10^8$ Ohm, R_2 = 10^7 Ohm, R_3 = 10^8 Ohm)

Zur Messung von β-Strahlen muß die Kammer ein strahlendurchlässiges Fenster (z. B. Papier) haben, während α-Strahler in das Innere der Kammer gebracht werden müssen.

3. Das Geiger-Müllersche Zählrohr (Bild 338). Es enthält einen axial ausgespannten Draht in einer Argon-Alkoholdampf-Atmosphäre von etwa 100 Torr. Zwischen Zähldraht und metallisierte Innenwand des Rohres wird eine Spannung von etwa 1000 bis 1500 V gelegt. Wenn z. B. ein β-Teilchen in das Innere eindringt, bildet sich eine selbständige Entladung, die sogleich wieder abreißt. Jeder Entladungsstoß gibt einen Impuls an den Verstärker und kann dann im Lautsprecher gehört oder durch ein Zählwerk registriert werden (Bild 339). Mittels besonderer Zählrohre können auch γ- und α-Strahlen registriert werden.

4. Die Wilsonsche Nebelkammer. Fliegt ein α- oder β-Teilchen durch eine mit Wasserdampf übersättigte Atmosphäre, so zieht es einen feinen Nebelstreifen hinter sich her, der bei kräftiger Beleuchtung deutlich sichtbar ist und fotografiert werden kann (Bild 340). Er kommt dadurch zustande, daß sich an den zahlreich gebildeten Ionen Wasserdampf kondensiert. Hierzu dient eine zylindrische, mit einem Glasboden versehene Kammer, deren Luft feucht gehalten wird (Bild 341). Durch einen eingesetzten Kolben wird die feuchte Luft

Bild 339. Impulszählgerät des VEB Vakutronik

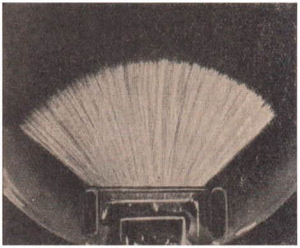


Bild 340. Nebelspuren von α-Teilchen (RaC') in der Wilsonkammer

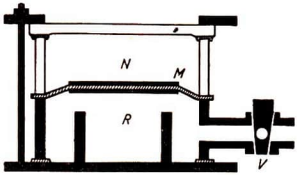


Bild 341. Einfache Nebelkammer. Der unterhalb der eigentlichen Kammer N befindliche Raum R wird durch Drehen des Hahnes H plötzlich mit einem evakuierten Gefäß verbunden. Dadurch springt die Membran M nach unten und expandiert die in N enthaltene feuchte Luft

plötzlich expandiert, wodurch Abkühlung und damit Übersättigung eintritt. Mit der Nebelkammer wurden die ersten Kernreaktionen (Abschn. 16.1.) entdeckt.

5. Kernspurplatten. In Fotoplatten mit besonders dicker lichtempfindlicher Schicht hinterlassen Elementarteilchen eine Schwärzungsspur, die sich bei etwa 400facher Vergrößerung nach dem Entwickeln bequem erkennen läßt (Bild 342). Einem Zentimeter Bahnlänge in Luft entsprechen etwa 6···7 μm in der Schicht.

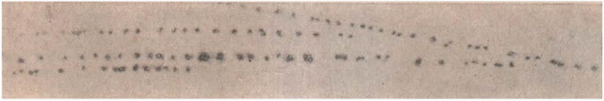


Bild 342. Deuteronenspur in der Schicht einer fotografischen Platte bei 600facher Vergrößerung

15.6. Die Maßeinheit der Aktivität

Für die Wirksamkeit einer strahlenden Substanz kommt es weniger auf deren absolute, etwa in Gramm ausgedrückte Menge an, sondern darauf, wieviel Kerne je Zeiteinheit eine radioaktive Umwandlung erleiden.

Zur Festlegung einer entsprechenden Maßeinheit ist man vom Radium ausgegangen. 1 g Radium enthält $\frac{N_L}{A}$ (N_L Loschmidtsche Zahl, A Atomgewicht) oder $\frac{6{,}023 \cdot 10^{23}}{226} = 2{,}665 \cdot 10^{21}$ Kerne. Die Zerfallskonstante ist nach (147) $\lambda = \frac{0{,}693}{1590 \cdot 365 \cdot 86400\ \mathrm{s}} = 1{,}382 \cdot 10^{-11}\ 1/\mathrm{s}$. Dann zerfallen in einem Gramm frischen Radiums

$$2{,}665 \cdot 10^{21} \cdot 1{,}382 \cdot 10^{-11} = 3{,}68 \cdot 10^{10} \text{ Atomkerne.}$$

Da die genaue Bestimmung der Halbwertszeit des Radiums mit großen meßtechnischen Schwierigkeiten verbunden ist, hat man festgesetzt:

(148) **Maßeinheit der Aktivität: 1 Curie (1 c) ist diejenige Menge einer radioaktiven Substanz, in der je Sekunde $3{,}7000 \cdot 10^{10}$ Zerfallsakte stattfinden.**

Kleinere Aktivitäten werden in mc (Millicurie) bzw. in μc (Mikrocurie) ausgedrückt. Im allgemeinen (insbesondere bei den künstlich hergestellten radioaktiven Isotopen) ist nicht jedes der darin enthaltenen Atome radioaktiv. Diese sind dann mit anderen stabilen Isotopen bzw. mit Zerfallsprodukten vermischt. In solchen Fällen rechnet man mit der

$$\textbf{spezifischen Aktivität} = \frac{\textbf{Aktivität}}{\textbf{Masse}}.$$

Wenn z. B. 0,1 g $^{60}_{27}$Co vorliegen, dessen spezifische Aktivität 1,8 mc/g beträgt, so ist die Aktivität 1,8 mc/g · 0,1 g = 0,18 mc.

16. Kernumwandlungen und künstliche Radioaktivität

16.1. Kernreaktionen

Die Erscheinungen der natürlichen Radioaktivität sind Vorgänge, die von selbst verlaufen und ohne Zutun des Menschen vor sich gehen. Ein neuer Abschnitt in der Entwicklung wurde eingeleitet, als Rutherford (1919) entdeckte, daß ein von einem α-Teilchen getroffener Stickstoffkern einen Wasserstoffkern erzeugt und sich dabei in einen Sauerstoffkern umwandelt. Dabei wird eine beträchtliche kinetische Energie frei, so daß die beiden neuen Teilchen mit großer Geschwindigkeit auseinanderfliegen.

Bild 343. Kernumwandlung durch Beschießen eines Stickstoffatoms mit einem α-Teilchen

Bild 343 zeigt eine derartige Nebelkammeraufnahme. Man sieht hier, wie am Ende einer α-Spur sich die lange Spur des ausgeschleuderten Protons und die kurze dicke Spur des Kerns $^{17}_{8}$O abzweigen.

Das schnell bewegte α-Teilchen dringt dabei in den Stickstoffkern ein und vereinigt sich mit ihm. Gleich danach wird aber ein Proton (p) ausgestoßen, so daß ein Isotop des Sauerstoffs $^{17}_{8}$O zurückbleibt. Diesen Prozeß beschreibt man abgekürzt durch das Symbol

$$^{14}_{7}\mathrm{N}(\alpha, \mathrm{p})\,^{17}_{8}\mathrm{O}.$$

Die Klammer enthält an erster Stelle stets das aufgeschossene und an zweiter Stelle das emittierte Teilchen.

In der Folgezeit gelangen derartige Umwandlungen [(α, p)Prozesse] bei fast allen leichteren Elementen. Die Ausbeute ist außerordentlich gering, da es nur gelegentlich gelingt, ein Atom wirksam zu treffen. Bei obiger Reaktion erzielen etwa 100000 α-Teilchen einen Treffer.

Ein neuer Reaktionstyp wurde 1932 entdeckt, als man stark beschleunigte Wasserstoffkerne (Protonen) auf Lithium einwirken ließ:

$$^{7}_{3}\mathrm{Li}\,(\mathrm{p},\alpha)\,^{4}_{2}\mathrm{He}.$$

Dies bedeutet: Ein Proton dringt in den Lithiumkern ein (zusammen 7 + 1), worauf dann ein α-Teilchen emittiert wird und ein Heliumkern zurückbleibt (zusammen 4 + 4). Man erkennt, daß die Summen der Massenzahlen und der Ladungen konstant bleiben.

Besonders geeignet für ähnliche Reaktionen erwiesen sich die Kerne des schweren Wasserstoffs $^{2}_{1}\mathrm{H}$, die **Deuteronen** genannt werden.

Die „Beschießung" von Atomkernen mit elektrisch geladenen Teilchen erfordert sehr große Teilchenenergien, um die elektrostatische Abstoßung des Atomkerns zu überwinden. Ein bedeutender Fortschritt wurde daher mit der Entdeckung (1932) des **Neutrons** (n) erreicht, da für dieses Teilchen das Coulombfeld des Kerns nicht existiert. Es wird daher leicht von Atomkernen eingefangen.

Neutronen entstehen z. B. bei der Reaktion

$$^{9}_{4}\mathrm{Be}\,(\alpha,\mathrm{n})\,^{12}_{6}\mathrm{C}.$$

Eine gute Neutronenquelle erhält man z. B., wenn man Berylliumpulver in eine Metallampulle füllt, etwas Radium oder Polonium dazugibt und das Röhrchen abschmilzt.

Die Anzahl der heute bekannten Kernreaktionen beträgt bereits viele Hunderte. Man unterscheidet dabei — ähnlich wie in der Chemie — endotherme und exotherme Reaktionen. Die bei letzteren frei werdende Energie rührt von dem dabei auftretenden Massendefekt (S. 188) her, wobei die scheinbar verlorengehende Masse in Form von Energie (meist als γ-Quanten) abgestrahlt wird:

$\frac{\text{Endotherme}}{\text{Exotherme}}$ Kernreaktionen sind solche, bei denen die Summe von (Ausgangskern + Stoßteilchen) $\frac{\text{kleiner}}{\text{größer}}$ als die Summe der entstehenden Massen ist.

16.2. Die Erzeugung schneller Teilchen

In Form von Präparaten radioaktiver Stoffe stehen zwar natürliche Strahlungsquellen für α-Teilchen und Neutronen für kernphysikalische Untersuchungen zur Verfügung. Um jedoch weiter in dieses vielversprechende Neuland vorzudringen und vor allem größere Ausbeuten zu erhalten, mußte man Einrichtungen schaffen, welche Kerngeschosse von noch größerer Energie und in großer Menge herzustellen erlauben. Es stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung.

1. Kaskadenschaltung von Greinacher. Mit den auf S. 76 erwähnten Gasentladungsröhren hat man bereits ein Mittel in der Hand, Ströme von elektrisch geladenen Teilchen herzustellen, z. B. Kanalstrahlen (S. 80), die aus Wasserstoffkernen, d. h. Protonen, bestehen. Doch sind wegen der geringen Spannungen die erzielbaren Geschwindigkeiten zu gering. Man braucht also extrem hohe Spannungen und entsprechend lange Entladungsrohre.

In der Kaskadenschaltung von Greinacher ist nach Bild 344 eine Reihe von Kondensatoren (C) und Glühventilen (V) (Gleichrichterröhren) an einen Hochspannungstransformator (Tr) angeschlossen. Durch die Ventile kann nur negative Ladung nach unten fließen. Alle Kondensatoren laden sich daher mit den oberen Platten positiv auf, und jeder Kondensator erreicht die doppelte Scheitelspannung des Transformators. Zwischen E und A liegt dann bei 6 Kondensatoren die 6fache Scheitelspannung. Bild 345 zeigt eine derartige Anlage für 1,2 Millionen Volt in Verbindung mit einer im Hintergrund stehenden großen Röntgenröhre.

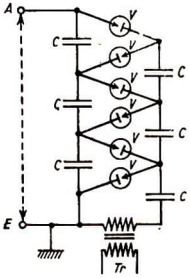


Bild 344. Kaskadenschaltung von Greinacher

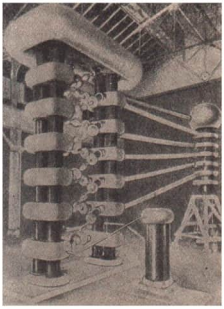


Bild 345. Gleichspannungsanlage für 1,2 Millionen Volt

2. Der Bandgenerator. Rein elektrostatisch arbeitet der van de Graaffsche Bandgenerator (Bild 346). Auf ein endloses Band aus Isolierstoff wird unten mit einer Hilfsspannung positive Ladung aufgesprüht und dem Innern einer großen Metallkugel zugeführt, auf deren Oberfläche sie sich bis zur Durchschlagsspannung der Luft ansammelt.

Hat die Kugel z. B. einen Radius von 1 m, so wird bei einer Durchschlagsfestigkeit der Luft von 25000 V/cm nach (58) eine Spannung von $U = Er = 25000$ V/cm 100 cm $= 2{,}5$ Millionen Volt erreicht. Die auf Bild 347 gezeigte Anlage enthält im Innern der hinteren Tragsäule das Ladeband. Das vorn sichtbare Beschleunigungsrohr ist aus Porzellan. Mit Bandgeneratoren wurden 5 MV erreicht.

3. Linearbeschleuniger. In diesen Apparaten wird dasselbe Teilchen in gerader Richtung mehrmals nacheinander von der gleichen Spannung beschleunigt.

4. Das Zyklotron. Wie auf S. 124 erwähnt, bewegen sich elektrisch geladene Teilchen auf einer Kreisbahn, wenn sie in ein magnetisches Feld geraten. Die Ebene dieser Bahn liegt quer zu den Polschuhen. Die beiden Elektroden, zwischen denen sich die Teilchen bewegen, werden als halbkreisförmige Dosen (D_1) und (D_2) ausgebildet. Bild 348 zeigt sie in der Draufsicht. Die Magnetpole hat man sich unter bzw. über der Zeichenebene vorzustellen. Werden im Mittelpunkt O Ionen erzeugt,

so werden sie zunächst im elektrischen Feld zwischen D_1 und D_2 nach der unteren Elektrode hin beschleunigt. Wegen des Magnetfeldes ist die Bahn der Ionen in den Dosen kreisförmig gekrümmt. Nach Verlassen dieser unteren Halbdose werden die Elektroden umgepolt, wodurch die Teilchen jetzt von der oberen Elektrode angezogen werden und ihre Kreisbahn dort fortsetzen, bis nach abermaligem Polwechsel die untere Halbdose wieder erreicht ist usw. Der Polwechsel muß der Teilchengeschwindigkeit genau angepaßt sein. Die erforderliche hochfrequente Wechselspannung wird mit einem starken Kurzwellensender (S) erzeugt. Der wegen der zunehmenden Geschwindigkeit auf spiraliger Bahn laufende Strahl wird mit einer Hilfselektrode (H) durch das Fenster (F) nach außen gelenkt.

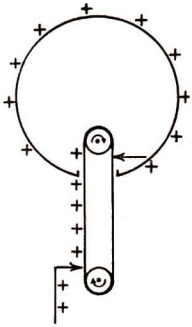


Bild 346. Schema des Bandgenerators

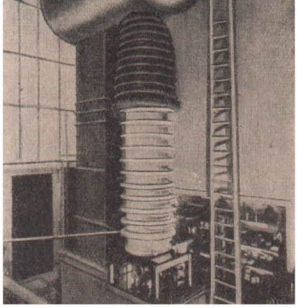


Bild 347. Bandgenerator für 900 kV

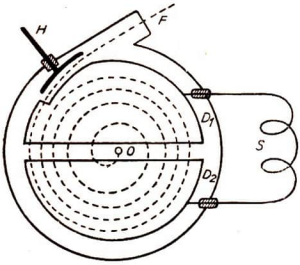


Bild 348. Schema des Zyklotrons

Das größte Zyklotron der Welt (Sowjetunion) hat eine Eisenmasse von 7000 t und erzeugt Protonen von 680 MeV, Deuteronen von 350 MeV und He-Ionen von 750 MeV Energie. (Zum Vergleich: Die α-Teilchen des Radiums besitzen nur 9 MeV!)

Große Anlagen können wegen der Gefährlichkeit der Strahlungen nur hinter dicken Schutzwänden und aus der Ferne bedient werden.

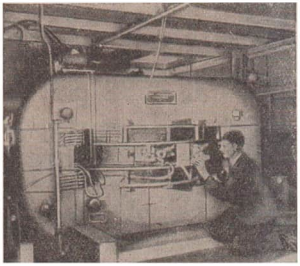


Bild 349. Kleines Zyklotron von Joliot in Paris (Masse 27 t)

Bild 350. Frédéric Joliot-Curie (1900 bis 1958), Physiker und ehem. Präsident des Weltfriedensrates

16.3. Die künstliche Radioaktivität

Die Entwicklung trat in ein neues Stadium, als das französische Forscherehepaar **Joliot-Curie** (1934) die ersten radioaktiven Elemente auf künstlichem Wege herstellte. Bringt man z. B. einen α-Strahler (etwa Polonium) in ein Aluminiumgefäß, so findet man, daß dieses nach Entfernen des Präparates weiterstrahlt, und zwar sendet es **Positronen** (positiv geladene Elektronen) aus. In dem Aluminium hat sich radioaktiver Phosphor mit der Halbwertszeit $T = 2{,}55$ min gebildet nach dem Schema

$$^{27}_{13}\mathrm{Al}\,(\alpha, \mathrm{n})\,^{30}_{15}\mathrm{P}\,(\mathrm{e}^{+})\,^{30}_{14}\mathrm{Si}\,.$$

Außer dem $^{30}_{15}$P sind heute noch viele andere radioaktive Isotope bekannt, die unter Aussendung von Positronen zerfallen. Im Gegensatz zu den negativen Elektronen aussendenden β^--Strahlern bezeichnet man sie als β^+-Strahler.

Das Positron selbst hat genau die gleiche Masse wie das Elektron, trägt jedoch eine Elementarladung $e_0 = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ As von positivem Vorzeichen. An sich ist dieses Teilchen stabil. Trotzdem kann es nur kurze Zeit existieren, da es beim Durchqueren stofflicher Medien sehr bald auf ein Elektron trifft. Beide Teilchen verschwinden dann, wobei ihre Masse in Form zumeist zweier γ-Quanten als Energie abgestrahlt wird. Man nennt diesen Vorgang **Zerstrahlung (Annihilation).**

Die Energie dieser beiden γ-Quanten läßt sich nach der Formel (131) $E = mc^2$ leicht berechnen. Der Massenwert der beiden Teilchen ist $2 \cdot 0{,}00055 = 0{,}0011$ ME. Da 1 ME nach (145) gleich $1{,}66 \cdot 10^{-24}$ g ist, beträgt die verlorengehende Masse $m = 0{,}0011 \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-24}$ g $= 1{,}826 \cdot 10^{-30}$ kg und die frei werdende Energie $E = 1{,}826 \cdot 10^{-30}$ kg $9 \cdot 10^{16}$ m²/s² $= 1{,}6434 \cdot 10^{-13}$ kg m²/s² (oder Ws). Nach (63) sind das $\dfrac{1{,}6434 \cdot 10^{-13}}{1{,}602 \cdot 10^{-19}} = 1{,}03 \cdot 10^{6}$ eV oder 1,03 MeV.

Positronen werden bei natürlicher Radioaktivität nicht beobachtet.

Es stehen heute viele Methoden zur Verfügung, von jedem beliebigen Element radioaktive Isotope herzustellen. Da die chemischen Eigenschaften nur von der Elektronenhülle abhängen, sind diese radioaktiven Isotope chemisch von den entsprechend inaktiven Elementen nicht zu unterscheiden und bilden auch dieselben chemischen Verbindungen.

17. Die Kernspaltung

17.1. Der Grundvorgang der Kernspaltung

1938 entdeckten Otto Hahn und F. Straßmann, daß bei der Bestrahlung von Uran ($Z = 92$) mit Neutronen die Elemente Barium ($Z = 56$) und Krypton ($Z = 36$) entstanden. Da die Summe der Ordnungszahlen ($56 + 36$) gerade die Ordnungszahl des Urans ausmacht, mußte gefolgert werden, daß der Urankern in zwei Teile zerplatzt war. Weitere Untersuchungen ergaben, daß für diese Spaltreaktion nicht das gewöhnliche Uran ${}^{238}_{92}\mathrm{U}$, sondern das mit einem Mengenanteil von 0,7% darin enthaltene Isotop ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ in Frage kommt.

Bald war es möglich, auch viele andere dabei entstehende Spaltprodukte aufzufinden, die paarweise zusammen die Ordnungszahl 92 ergeben. Außerdem entstehen bei der Spaltung 2 bis 3 weitere Neutronen.
Eine von den vielen Möglichkeiten, nach denen sich der Spaltakt abspielen kann, wird durch folgende Gleichung wiedergegeben:

$$ {}^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{235}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{140}_{55}\mathrm{Cs} + {}^{94}_{37}\mathrm{Rb} + \mathbf{2}\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}. $$

Wie aus der Gleichung hervorgeht, sind die Summen sowohl der oben angeschriebenen Massenzahlen als auch der untenstehenden Kernladungen auf beiden Seiten gleich groß. Die beiden Spaltstücke ${}^{140}_{55}\mathrm{Cs}$ und ${}^{94}_{37}\mathrm{Rb}$ sind β^--aktiv und wandeln sich in mehreren aufeinanderfolgenden Zerfällen schließlich in die stabilen Endprodukte ${}^{140}_{58}\mathrm{Ce}$ und ${}^{94}_{40}\mathrm{Zr}$ um.

17.2. Die Kernspaltungsenergie

Bildet man in der als Beispiel gegebenen Gleichung die Summen der genauen Massenwerte, so erhält man für die Ausgangsmassen

$$ {}^{1}_{0}\mathrm{n} \text{ und } {}^{235}_{92}\mathrm{U}\colon\ 1{,}0090 + 235{,}1252 \qquad = \underline{236{,}134 \text{ ME}} $$

und für die Spaltprodukte

$$ {}^{140}_{58}\mathrm{Ce} \text{ und } {}^{94}_{40}\mathrm{Zr}\colon\ 139{,}949 + 93{,}934 \qquad = 233{,}883 \text{ ME} $$

sowie für die freigesetzten Neutronen: $2 \cdot 1{,}0090 \quad = \underline{2{,}018 \text{ ME}}$

$$ \underline{235{,}901 \text{ ME}} $$

Wie zu ersehen ist, ergibt sich bei der Kernspaltung ein Massendefekt von $\Delta m = 236{,}134 - 235{,}901 = 0{,}233$ ME. Dieser Massendefekt wird beim Spaltvorgang in Form von Energie frei:

Kernspaltungsenergie: Bei der Kernspaltung ist die Gesamtmasse der entstehenden Spaltprodukte kleiner als die Ausgangsmasse. Der Massendefekt wird in Form von Energie frei, die sich nach der Formel $E = \Delta m c^2$ berechnet.

Der größte Teil dieser Energie erscheint als kinetische Energie der mit großer Gewalt auseinanderfliegenden Bruchstücke. Nach außen hin tritt sie als Wärmeenergie in Erscheinung, indem sich die der Spaltung unterworfene Uranmasse erhitzt. Etwa $^1/_6$ der Energie erscheint als radioaktive Strahlung der Spaltprodukte und als kinetische Energie der entstehenden Spaltneutronen.

Berechnung der bei der vollständigen Spaltung von 1 kg reinem Isotop $^{235}_{92}$U freiwerdenden Energie.

Da auf 235 Masseneinheiten ein Massendefekt von $\Delta m = 0{,}233$ ME entfällt, beträgt dieser bei 1 kg $\frac{0{,}233}{235}$ kg. Die entsprechende Energie ist dann $E = \frac{0{,}233 \text{ kg } 9 \cdot 10^{16} \text{ m}^2}{235 \text{ s}^2} = 8{,}92 \cdot 10^{13} \text{ kg m}^2/\text{s}^2$ oder Ws. Das sind rund **25 Millionen Kilowattstunden**, die einem Heizwert von etwa 2500 t Steinkohle entsprechen.

17.3. Die Kettenreaktion

Wie schon erwähnt, entstehen bei der Uranspaltung jeweils 2—3 freie Neutronen. Diese neuen Neutronen können ihrerseits Kernspaltungen hervorrufen. Allerdings muß dafür gesorgt werden, daß sie vorher nicht von Fremdstoffen absorbiert werden oder aus der Anordnung entweichen. Letzteres tritt nicht ein, wenn eine bestimmte Mindestmenge von Uran angewandt wird **(kritische Menge)**, so daß jedes Neutron mit Sicherheit einen Urankern trifft.

Aus der ursprünglichen Spaltung eines einzelnen Atoms kann sich also in kürzester Zeit eine ungeheure Lawine von Spaltprozessen entwickeln. Die bei dieser **Kettenreaktion** entstehenden Neutronen haben aber eine zu hohe Geschwindigkeit, und diese sogenannten **schnellen Neutronen** werden von dem in der überwiegenden Menge vorhandenen Kernen des Isotops $^{238}_{92}$U eingefangen, ohne daß es dabei zur Spaltung kommt. Um den Einfang zu unterbinden, müssen die Neutronen möglichst rasch auf **thermische Geschwindigkeit** (d. i. etwa die Geschwindigkeit von Wasserstoffatomen bei Zimmertemperatur) abgebremst werden. Dies erreicht man durch Einbau von **Bremssubstanzen (Moderatoren)**, die Neutronen durch elastische Zusammenstöße verlangsamen, aber möglichst wenig Neutronen dabei absorbieren. Hierzu eignen sich besonders reinster Kohlenstoff (Graphit) und schweres Wasser (D_2O). Bei der Verwendung gewöhnlichen Wassers muß man größere Einfangverluste in Kauf nehmen.

Den Ablauf einer derartigen Kettenreaktion zeigt schematisch Bild 351.

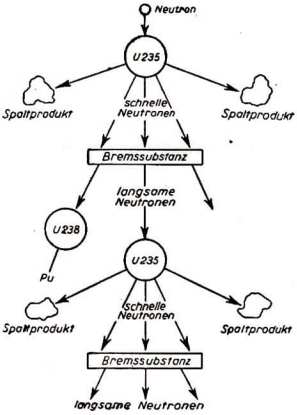


Bild 351. Schema einer Kettenreaktion

17.4. Die Transurane

Bereits vor Auffindung der Uranspaltung stießen Hahn, Meitner und Straßmann auf eine Kernreaktion, bei der unter Anlagerung eines Neutrons an den Urankern ein radioaktives Uranisotop entstand:

$$^{238}_{92}\mathrm{U}(\mathrm{n},\gamma)\,^{239}_{92}\mathrm{U}.$$

Dieses Uran 239 aber erwies sich als seinerseits radioaktiv, indem es mit einer Halbwertszeit von 23 Minuten β-Strahlen aussandte. Die Forscher zogen daraus den Schluß, daß sich hierbei ein neues, in der Natur nicht existierendes Element mit der Ordnungszahl 93 (später **Neptunium** genannt) bilden müsse. Der Nachweis gelang erst 1940, wobei festgestellt wurde, daß auch dieses Element 93 mit einer Halbwertszeit von 2,3 Tagen unter β-Strahlung in ein Element der Ordnungszahl 94 (später **Plutonium** genannt) übergeht. Die gesamte Umwandlung geht demnach so vor sich:

$$^{238}_{92}\mathrm{U}(\mathrm{n},\gamma)\,^{239}_{92}\mathrm{U}\xrightarrow[23\ \mathrm{min}]{\beta}\,^{239}_{93}\mathrm{Np}\xrightarrow[2{,}3\ \mathrm{d}]{\beta}\,^{239}_{94}\mathrm{Pu}\xrightarrow[24\,000\ \mathrm{a}]{\alpha}\,^{235}_{92}\mathrm{U}.$$

Hieraus ist zu ersehen, daß auch das Plutonium nicht stabil ist. Inzwischen sind noch weitere **Transurane** entdeckt worden, von denen es, wie auch beim Np und Pu, eine Reihe von Isotopen gibt. Alle Transurane sind radioaktiv.

Transurane: künstlich geschaffene radioaktive Elemente, deren Ordnungszahl größer als 92 ist.

Es sind die in der letzten Reihe des periodischen Systems (S. 181) aufgezählten Elemente: **Neptunium, Plutonium, Americium, Curium, Berkelium, Californium, Einsteinium, Fermium, Mendelevium, Nobelium.** Die dort aufgeführten Atomgewichte sind die Massenzahlen des jeweils langlebigsten Isotops.

Das Plutonium ist deshalb besonders wichtig, weil es sich im Kernreaktor (Abschnitt 17.5.) aus dem Hauptisotop $^{238}_{92}\mathrm{U}$ von selbst bildet, indem dieses — wie bereits erwähnt — schnelle und mittelschnelle Neutronen stark absorbiert. Das $^{239}_{94}\mathrm{Pu}$ ist ebenso wie $^{235}_{92}\mathrm{U}$ leicht spaltbar und kann als selbständiges chemisches Element auch verhältnismäßig leicht abgetrennt werden.

17.5. Gewinnung von Atomenergie für friedliche Zwecke

Eine in technischem Maßstab arbeitende Anlage, in der sich eine **gesteuerte Kettenreaktion** abwickelt, ist der **Kernreaktor** (Uranmeiler). Das Prinzip eines Uran-Graphit-Reaktors zeigt Bild 352.

Stäbe von reinstem Uranmetall liegen in den Aushöhlungen eines großen Graphitblockes als Bremssubstanz. Die zur Auslösung der Reaktion notwendigen wenigen Neutronen sind von Natur aus immer vorhanden. Der Reaktionsablauf wird mit Hilfe von Kadmiumstäben, die mehr oder weniger tief eingesenkt werden, nach Bedarf gesteuert. Cd hat ein starkes Absorptionsvermögen für langsame Neutronen.

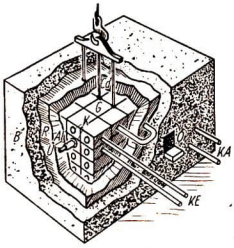


Bild 352.
Schema eines Uran-Graphit-Reaktors

U Uranstab
Al Aluminium-Schutzhülse
G Graphitziegel
R Reflektor aus Graphit
Cd Kadmiumstab zur Regulierung
B Betonschutz
K Kanäle für das Kühlmittel
KE Kühlmittelzufluß
KA Kühlmittelabfluß
O Öffnung für Versuche und Messungen

Bei Inbetriebnahme wird die Energie allein vom Uran 235 geliefert, das zu 0,7% im gewöhnlichen Uran enthalten ist. Jeweils ein Neutron ist zur Aufrechterhaltung der Kettenreaktion notwendig. Weitere Neutronen werden zur Umwandlung von U 238 in Pu 239 verbraucht. Letzteres beteiligt sich im ferneren Verlauf ebenfalls mit aktiv.

Die im Reaktor entstehenden Energiemengen sind gewaltig. 1 kg natürliches Uran liefert 170000 kWh, wenn nur das darin enthaltene U 235 zur Wirkung kommt. Bei vollständiger Ausnützung des Urans (auf dem Umweg über Plutonium) vermag 1 kg Uran 25 Millionen kWh zu entwickeln, entsprechend dem Heizwert von etwa 2500 t Steinkohle. Demgegenüber liefert die Verbrennung von 1 kg Kohle im Höchstfall nur 9,14 kWh. Es liegt daher sehr nahe, diese Kernenergie, die in Form von Wärme frei wird, nutzbringend zu verwerten. Außerdem sind im Kernreaktor wertvollste radioaktive Elemente bereits kilogrammweise gewonnen worden.

Es gibt heute eine ganze Anzahl von Reaktortypen, die sich hinsichtlich des spaltbaren Materials (natürliches Uran, angereichertes Uran, reines U235 oder Pu), des Moderators (Graphit, D_2O, Beryllium), des Wärmeübertragers (gasförmiges CO_2, H_2O, D_2O, flüssiges Natrium oder Wismut) und der Verteilung des Spaltstoffs (Stäbe, Bleche oder im Moderator aufgelöst) voneinander unterscheiden. Besondere Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit hat der **Brutreaktor**, der so angelegt ist, daß aus dem gewöhnlichen Uran 238 möglichst viel Plutonium gebildet (ausgebrütet) wird. Dieses läßt sich genauso verwerten wie das teure U235 und erlaubt theoretisch die vollständige Ausnutzung des Urans.

In einem **Atomkraftwerk** dient ein großer Reaktor dazu, ein in einem 1. Kreislauf zirkulierendes, wärmeübertragendes Medium (Wasser oder gasförmiges CO_2) zu erhitzen. Dieses gibt in Wärmeaustauschern die Wärme an einen 2. Kreislauf ab, in dem hochgespannter Dampf erzeugt wird. Dieser betreibt dann Turbogeneratoren üblicher Bauart. Das erste Atomkraftwerk mit einer elektrischen Leistung von 5000 kW wurde am 27. 6. 1954 in der Sowjetunion seiner Bestimmung übergeben.

Inzwischen ist bereits eine ganze Reihe von Großkraftwerken in verschiedenen Ländern in Betrieb genommen worden.

Prinzip der Atombombe. Zwei Klötze aus reinem U235 oder Pu239, deren Größen einzeln unterhalb der kritischen Menge liegen, werden durch eine kleine Sprengladung aufeinandergeschossen. Im Augenblick des Zusammentreffens ist die kritische Menge überschritten, womit die Reaktion sofort einsetzt. Die zur Einleitung dieser ungesteuerten Kettenraktion notwendigen Neutronen sind von Natur aus in der Substanz bereits vorhanden.

Bei der Wasserstoffbombe entsteht die frei werdende Energie nicht durch Kernspaltung, sondern durch den in Abschn. 14.3. erwähnten Massendefekt beim Zusammentritt einzelner Teilchen zu einem Heliumkern. Der Prozeß kann aber nur bei einer Temperatur von vielen Millionen Grad stattfinden. Zu diesem Zweck enthält die Wasserstoffbombe im Innern eine normale Pu-Bombe. Die weitere Füllung besteht wahrscheinlich aus festem Lithiumdeuterid LiD (D = schwerer Wasserstoff $^2_1$H). Es finden dann die Reaktionen statt:

$$^6_3\text{Li} + ^2_1\text{H} \Rightarrow 2\,^4_2\text{He}$$
$$^6_3\text{Li} + ^1_0\text{n} \Rightarrow ^4_2\text{He} + ^3_1\text{H}$$
$$^6_3\text{Li} + ^3_1\text{H} \Rightarrow 2\,^4_2\text{He} + ^1_0\text{n}$$

1 kg LiD hat die Sprengkraft von 50000 t Nitrotoluol.

Es muß jedoch Aufgabe der gesamten zivilisierten Menschheit sein, die Anwendung der Atomenergie für Zwecke der Massenvernichtung zu verhindern.

18. Eigenschaften radioaktiver Strahlungen

Die von radioaktiven Isotopen ausgehenden Strahlen sind entweder korpuskularer Art (α-, β^-- oder β^+-Strahlen) oder bestehen aus Energiequanten (γ-Strahlen). In fast allen Fällen ist ihre Energie außerordentlich groß und liegt in der Größenordnung von MeV. Die wichtigste Eigenschaft ist ihr starkes Ionisierungsvermögen.

18.1. Eigenschaften der α-Strahlen

Je nach ihrer Energie bilden die α-Strahlen beim Durchqueren der Luft je cm Bahnlänge 20000 bis 40000 Ionen. Da zur Bildung eines Ionenpaares in Luft etwa 32,5 eV verbraucht werden, ist die Reichweite in Luft auf wenige cm begrenzt (Bild 353). Jeder α-Strahler hat eine bestimmte, charakteristische Reichweite. Die Reichweite in festen Stoffen beträgt nur Bruchteile von mm.

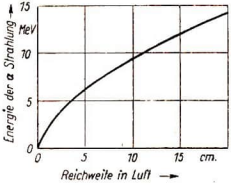


Bild 353.
Reichweite von α-Strahlen in der Luft

Beispiel: Die α-Energie des Radiums 226 beträgt 4,86 MeV. Nach Bild 353 ergibt das eine Reichweite in Luft von 3,4 cm. In Aluminium ist sie nur etwa 0,02 mm.

18.2. Eigenschaften der β-Strahlen

Die Energiewerte der von einem bestimmten β-Strahler emittierten Teilchen sind nicht einheitlich, sondern bilden ein kontinuierliches Spektrum. Dies erklärt sich daraus, daß zugleich mit jedem β-Teilchen ein **Neutrino** entsteht.

Das Neutrino ist ein mit den üblichen Strahlennachweisgeräten nicht feststellbares, elektrisch neutrales Teilchen von der Ruhmasse 0.

Die Summe der Energien des β-Teilchens und des Neutrinos ist jedoch konstant und gleich der Maximalenergie $E_{\beta\max}$ des betreffenden Strahlers.
Die β-Strahlung wird beim Durchgang durch stoffliche Medien durch verschiedene Vorgänge (Ionisation, Streuung, Bremsstrahlung) nach einem Exponentialgesetz geschwächt:

(149) **Absorptionsgesetz:** $\boxed{N = N_0 e^{-\mu' F}}$

Hierbei ist N_0 die Anzahl der Teilchen hinter und N die Teilchenzahl vor dem Absorber, μ' der vom Material unabhängige Massenabsorptionskoeffizient (cm²/mg) und F die Flächendichte (mg/cm²). Die Größe von μ' ist allein von der Energie $E_{\beta\max}$ der β-Teilchen abhängig und ist aus Bild 354 zu ersehen.

Beispiel: Ein Zählrohr registriert von einem Phosphor 32-Präparat in einem bestimmten Abstand 6500 β-Teilchen je min. Es wird dann ein $d = 3$ mm dickes Aluminiumblech dazwischengesetzt. Wieviel Teilchen werden noch gezählt? — Die Flächendichte ist

$$F = \varrho d = \frac{2{,}7 \text{ g } 0{,}3 \text{ cm}}{\text{cm}^3} = 0{,}81 \text{ g/cm}^2 = 810 \text{ mg/cm}^2.$$

Die β-Energie von P32 ist 1,7 MeV, so daß nach Bild 354 $\mu = 0{,}008$ cm²/mg. Damit wird

$$N = 6500\, e^{-0{,}008 \cdot 810} = \frac{6500}{650} = 10 \text{ Teilchen je min.}$$

18.3. Eigenschaften der γ-Strahlen

Die γ-Strahlung breitet sich wie das Licht- oder die Röntgenstrahlung aus, indem ihre Intensität mit dem Quadrat des Abstandes von der Strahlenquelle abnimmt. Ohne Berücksichtigung der Absorption gilt also

(150) $$I = \frac{I_0}{r^2}.$$

Die γ-Strahlung ist von außerordentlicher Durchdringungskraft und wird von stofflichen Medien mehr oder weniger geschwächt. Diese Schwächung erfolgt durch das Zusammenwirken von drei Vorgängen (Bild 355):

a) Fotoeffekt: Das γ-Quant reißt ein Elektron aus der Atomhülle, wodurch die Atome des durchstrahlten Stoffes ionisiert werden.

b) Comptoneffekt: Das γ-Quant übergibt dem befreiten Elektron nur einen Teil seiner Energie und bewegt sich unter Richtungsänderung **(Streuung)** mit verminderter Frequenz und damit kleinerer Energie $E' = h\nu'$ weiter.

c) Paarbildung: Das γ-Quant verwandelt sich in ein Elektron-Positron-Paar. Dazu muß seine Energie größer als 1,02 MeV sein, um nach der Beziehung $E = mc^2$ die

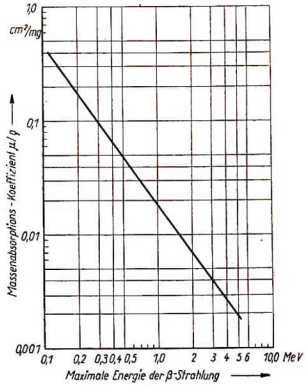


Bild 354
Massenabsorptionskoeffizient für β-Strahlen

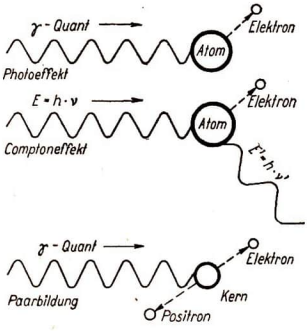


Bild 355. Die 3 Grundvorgänge bei der Schwächung von γ-Strahlen

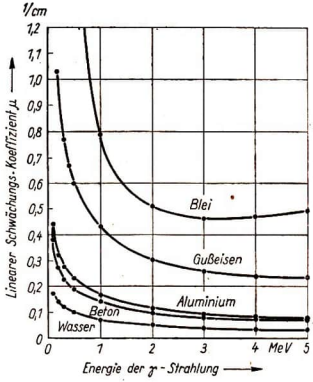


Bild 356. Linearer Schwächungskoeffizient für γ-Strahlen in verschiedenen Stoffen

erforderliche Masse zweier Elektronen zu bilden. Dies ist die Umkehrung des in Abschn. 16.3. besprochenen Zerstrahlungsvorganges.

Die Schwächung der γ-Strahlung erfolgt ebenfalls nach einem Exponentialgesetz:

$$I = I_0 e^{-\mu d}, \tag{151}$$

wobei I bzw. I_0 die Intensität der Strahlung hinter bzw. vor dem Absorber, μ (1/cm) der lineare Schwächungskoeffizient und d (cm) die durchstrahlte Schichtdicke ist. Der Schwächungskoeffizient μ für einige wichtige Stoffe ist aus Bild 356 ersichtlich. Diejenige Schichtdicke, welche die γ-Strahlung auf die Hälfte ihres Anfangswertes abschwächt, ist die **Halbwertsdicke** $d_{1/2}$. Sie ergibt sich nach (151) zu

$$d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}. \tag{152}$$

Beispiel: Welche Schichtdicke Beton ist erforderlich, um die Intensität einer γ-Strahlung von 2 MeV auf $^1/_8$ ihres Anfangswertes abzuschwächen? — Nach Bild 356 ist $\mu = 0{,}1$ 1/cm. Die Halbwertsdicke ist nach (152) $d_{1/2} = \frac{0{,}693}{0{,}1} = 6{,}93$ cm. Zur Schwächung auf $^1/_8$ sind 3 Halbwertsdicken mithin $3 \cdot 6{,}93$ cm $= 20{,}8$ cm Beton erforderlich.

18.4. Die Strahlendosis

Die Anzahl der Kernzerfallsakte sagt jedoch noch nichts über die Wirkung der dabei entstehenden Strahlen aus; denn diese hängt wiederum von deren Energie und dem Ionisationsvermögen ab. Als Maßeinheit für die von einem Körper empfangene

Strahlungsmenge **(Dosis)** gilt die schon auf Seite 82 erwähnte **Röntgeneinheit** (1 r). Trifft diese Strahlungsmenge auf einen Körper, so setzt sie in diesem durch Bildung von Ionen eine bestimmte Energiemenge frei. Die Berechnung ergibt dann:

(153) **1 Röntgen (1 r) ist diejenige Dosis einer Röntgen- oder γ-Strahlung, die in 1 g Luft die Energie von 84 erg umsetzt.**

Neuerdings wird statt dessen die für alle Arten radioaktiver Strahlen geltende Einheit bevorzugt:

(154) **1 rad ist diejenige absorbierte Dosis einer beliebigen Strahlung, die in 1 g eines beliebigen Stoffes die Energie 100 erg umsetzt.**

Die große Gefährlichkeit radioaktiver Strahlungen macht es notwendig, gewisse Richtlinien für die zulässigen Höchstwerte festzulegen. Für Personen, die beruflich mit strahlenden Substanzen umgehen, gilt nach internationalen Vereinbarungen z. Z. als **Höchstgrenze 0,1 r je Arbeitswoche.** Als Gefährlichkeitsgrenze bei einmaliger starker Strahlenwirkung können 25 r angesehen werden, d. i. also diejenige Dosis, bei deren Einwirkung mit ernsten körperlichen Schäden zu rechnen ist. Absolut tödlich wirkt eine Strahlendosis von 600···800 r.

18.5. Die Dosisleistungskonstante

Die Aktivität (S. 195) einer strahlenden Substanz allein gibt noch keinen Anhaltspunkt für die Wirkung der von ihr ausgehenden Strahlung. Hierüber gibt aber die für jeden radioaktiven Stoff charakteristische **Dosisleistungskonstante K_γ** Auskunft:

(155) **Die Dosisleistungskonstante K_γ gibt die Dosisleistung in r/h an, die eine Strahlenquelle von 1 c im Abstand 1 m erzeugt.**

Dosisleistungskonstanten

$^{22}_{11}$Na	1,2 r m²/h · c	$^{226}_{88}$Ra	0,83 r m²/h · c
$^{60}_{27}$Co	1,32 „	$^{238}_{92}$U	0,009 „

Beispiel: Welche Dosis erzeugen 50 mc Kobalt 60 im Abstand von 0,3 m bei 3stündiger Einwirkung? — Da die Intensität mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt (150), gilt für die Dosis $D = \frac{K_\gamma\, m t}{r^2} = \frac{1{,}32\ \mathrm{r\ m^2}\ 0{,}05\ \mathrm{c}\ 3\ \mathrm{h}}{\mathrm{h\ c}\ 0{,}09\ \mathrm{m^2}} = 2{,}2\ \mathrm{r}$.

19. Anwendung von Radioisotopen

Durch Bestrahlung mit Neutronen im Kernreaktor kann man von jedem stabilen Element entsprechende radioaktive Isotope herstellen.

Radioisotope sind Isotope der natürlichen Elemente, die durch Neutronenbestrahlung oder Abtrennung von Spaltprodukten des Kernreaktors gewonnen werden.

Sie sind β- und γ-Strahler von verschiedenster Halbwertszeit und können je nach ihren Eigenschaften vielen Zwecken dienstbar gemacht werden. Beispielsweise kann an Stelle des kostbaren Radiums in der Medizin (Krebsbekämpfung) das viel billigere Isotop $^{60}_{27}Co$ verwendet werden, das in beliebigen Mengen hergestellt werden kann. Abgesehen von den zahlreichen Anwendungen in Forschung, Chemie, Medizin, Biologie und Landwirtschaft (Pflanzenzüchtung), haben die Radioisotope auch große technische Bedeutung.

Verabreicht man einem Tier z. B. ein Präparat mit radioaktivem Phosphor, so läßt sich mit Hilfe der von diesen Atomen ausgesandten Strahlen genau feststellen, welchen Weg der Phosphor im Tierkörper zurücklegt und an welchen Stellen er schließlich abgelagert wird. In der Chemie sind damit wertvolle Erkenntnisse über die Struktur von Molekülen gewonnen worden.

1. Gammadefektoskopie. Zum Aufsuchen von Materialfehlern wie Gußlunkern, zur Kontrolle von Schweißnähten usw. werden die Werkstücke von der intensiven γ-Strahlung eines starken Präparates (z. B. Thulium 170, Iridium 195, Kobalt 60) „durchleuchtet". Der dahinter angebrachte fotografische Film gibt dann die innere Beschaffenheit wie im Röntgenbild wieder.

2. Radiographie. Durch Beifügen eines Radioisotopes zur Schmelze von Legierungen kann deren Feingefüge nach dem Erstarren dadurch sichtbar gemacht werden, daß man das Probestück anschleift und hier einen Film auflegt. Auf dem Film bildet die Strahlung bestimmter Kornteile die Feinstruktur unmittelbar ab.

3. Kontaktfreie Dickenmessung. Zur laufenden Kontrolle des Flächengewichtes von Papier, Folien oder Aufstrichen läuft das Meßgut kontinuierlich zwischen einem β-Strahler (z. B. Thallium 204) und einem Strahlungsempfänger hindurch. Je nach der Dicke wird die Strahlung verschieden stark absorbiert und die Dicke dadurch registriert. Wenn die eine Seite des Meßgutes nicht zugänglich ist, kann auch die Rückstreuung der β-Teilchen zur Messung herangezogen werden.

4. Dichtemessungen. Innerhalb gewisser Grenzen ist die Absorption der γ-Strahlen der Dichte des durchstrahlten Mediums proportional. Durch Versenken einer aus γ-Präparat und Zählrohr bestehenden Anordnung kann die Dichte von Baustoffen, Erdböden u. dgl. bestimmt werden.

5. Füllstandmessung. Von außen her kann die Höhe des Füllstandes geschlossener Behälter kontrolliert werden, indem auf bestimmter Höhe seitlich ein γ-Strahler angebracht wird. Gegenüber befindet sich auf der anderen Außenseite ein Zählrohrgerät, das sofort anspricht, wenn das die Strahlung absorbierende Füllgut unter das festgelegte Niveau absinkt.

6. Feuchtigkeitsmessungen. Eine Neutronenquelle wird zusammen mit einem Neutronenzählrohr in das zu untersuchende Material versenkt. Ist dieses wasserhaltig, so werden die schnellen Neutronen von dem darin enthaltenen Wasserstoff stark abgebremst, wodurch die Dichte der in der Umgebung der Quelle vorhandenen Neutronen entsprechend zunimmt und vom Zählrohr registriert wird. Das Verfahren ist für Feuchtigkeitsbestimmungen in Kohle, Sand usw. verwendbar.

7. Untersuchung von Verschleißvorgängen. Mischt man einem gewöhnlichen Werkstoff eine Spur radioaktiven Isotops bei, so verraten sich selbst kleinste Materialmengen durch ihre Strahlung. Von derartigen **radioaktiven Indikatoren** macht man in Chemie und Medizin weitgehend Gebrauch. In der Technik benutzt man sie z. B. zur

Untersuchung von Verschleißvorgängen. Durch Beigabe während der Herstellung oder durch nachträgliches Bestrahlen mit Neutronen kann man Drehmeißel und andere Werkzeuge aktivieren. Die mehr oder weniger starke Abnützung ergibt sich aus der gemessenen Aktivität der Drehspäne. Auch gleitende Maschinenteile wie etwa Kolbenringe von Motoren können so präpariert werden. Die ins Schmieröl gelangenden Teilchen geben durch ihre Strahlung die Menge des abgeriebenen Materials an.
Damit sind nur einige Anwendungsbeispiele aufgezählt. Ihre Anzahl und Bedeutung nimmt ständig zu.

20. Die kosmische Strahlung

Infolge des natürlichen Gehaltes der Erdrinde an radioaktiven Substanzen werden in der Luft ständig Ionen gebildet. Wenn man aber eine Ionisationskammer durch einen Bleipanzer abschirmt, bleibt dennoch ein Rest von Leitfähigkeit zurück. Ebenso spricht ein Zählrohrgerät auch bei Abwesenheit von radioaktiven Substanzen ständig auf eine harte Strahlung an, die aus der Atmosphäre kommt.
Wie 1912 durch Ballonaufstiege von Heß festgestellt wurde, rührt diese von einer Strahlung her, die aus dem Weltenraum in die Lufthülle eindringt. Sie wird **kosmische oder Höhenstrahlung** genannt und ist von besonders durchdringender Kraft. Erst eine Schicht von mehr als 100 m Wasser vermag sie völlig zu absorbieren.

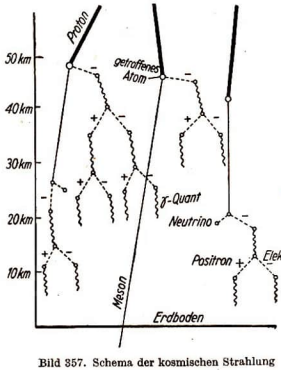


Bild 357. Schema der kosmischen Strahlung

Über ihren Ursprung ist nichts Sicheres bekannt.[1]) Aus der Ablenkung im magnetischen Erdfeld schließt man, daß es zunächst vorwiegend Protonen und andere Atomkerne sind, die bereits oberhalb von 20 km völlig absorbiert werden (Bild 357). Ihre Anfangsenergie liegt zwischen 10^9 und 10^{15} eV. Dabei entstehen in den höchsten Luftschichten einerseits Elektronen (weiche Komponente) und andererseits Mesonen (harte Komponente, schwere Elektronen, s. S. 174).

1. Die weiche Komponente. Beim Zusammentreffen der Elektronen mit den Atomen der Luft entsteht eine Bremsstrahlung (Abschn. 6.4.), d. h. äußerst energiereiche γ-Quanten (Photonen). Die Photonen werden von anderen Kernen wiederum absorbiert und erzeugen dabei je Quant ein Elektronenpaar (Elektronenzwilling), d. h. je ein Positron und Elektron. Diese beiden Teilchen wandeln sich ihrerseits in Photonen um usw., so daß eine **Kaskade (Schauer)** von Teilchen entsteht. Der

[1]) Man vermutet Kernprozesse im interstellaren Raum oder Vorgänge auf bestimmten Fixsternen als Ursache. Von der Sonne scheint nur ein kleiner Bruchteil zu stammen.

Schauer bricht ab, wenn die Energie der Teilchen zu klein geworden ist, was meist schon in großer Höhe der Fall ist.

2. Die harte Komponente. 75% der in Meereshöhe registrierten Teilchen sind Mesonen. Da ihre Halbwertszeit nur $2{,}2 \cdot 10^{-6}$ s beträgt, können sie erst in der Lufthülle entstanden sein. Sie zerfallen schließlich in Elektronen, Positronen, Photonen und Neutrinos.

Bildquellenverzeichnis

Lehrbuch der Physik der Grundschule. 6.···8. Schuljahr. Volk und Wissen Volkseigener Verlag, Berlin, 3. Aufl. 1949: Bilder 2, 94, 235, 334

Trapp, Elektrische Anlagen. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1932: Bilder 37, 39, 104

Varduhn/Nell, Handbuch der Elektrotechnik, Bd. I. VEB Fachbuchverlag Leipzig, 5. Aufl. 1953: Bild 270

Varduhn/Nell, Handbuch der Elektrotechnik, Bd. II. VEB Fachbuchverlag Leipzig, 5. Aufl. 1954: Bilder 124, 125

Moeller/Wolff, Grundlagen der Elektrotechnik, Bd. I. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1952: Bilder 164, 214

Petzoldt, Das Fernmelderelais und seine Schaltung. Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, Leipzig 1951: Bild 172

Grimsehl, Lehrbuch der Physik, Bd. II. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1951: Bilder 293, 300, 309

Stamm, Über die Erzeugung hoher Spannungen. Aufbau-Verlag, Berlin 1952: Bild 345

VEB Vakutronik, Dresden: Bild 339

Sachwortverzeichnis

α-Strahlen 189, 205
Abstimmschärfe 165
Actinuran 193
Addition von Wechselgrößen 138
Akkumulator 67
Aktiniumreihe 193
Aktivität 195
Aluminiumgewinnung 63
Ampere 14, 126
Amperesekunde, -stunde 15
Amperewindungen 99, 111
Amplitudenmodulation 166
Anionen 59
Annihilation 200
Anker 116, 156
Anlasser 121
Anode 59
Anodenbatterie 85
Anodenspannung 85
Anodenstrom 85
Antenne 166
Antiteilchen 174
Äquivalent, elektrochemisches 61
Äquivalentgewicht 61
Arago, Versuch von 128
Arbeit des Stromes 31
Astonscher Dunkelraum 76
Asynchronmotor 155
Äther 40
Atombombe 205
Atome 172
Atomenergie, Gewinnung von 201
Atomgewicht 180, 187
—, physikalisches 187
Atomhülle 173
Atomkern 175
Atomkraftwerk 204
Atomradius 176
Audion 167
Augenblickswerte von Wechselgrößen 131
Austrittsarbeit 85
β-Strahlen 189, 205
Bandgenerator 198
Bariumoxydkatode 85
Batterie 29
Becquerel 188
Berührungsspannung 56
Blättchenelektrometer 37
Blindleistung 146
Blindstrom 147, 149
Blindwiderstand, induktiver 136
—, kapazitiver 137
Blitz 56
Blockkondensator 49
Bogenlampe 34, 80
Bohr, Niels 173, 175
Braunsches Elektrometer 37
— Röhre 160
Bremsstrahlung 81
Bremssubstanz 202
Brennfleck 81
Brücke, Wheatstonesche 25
Brutreaktor 204

charakteristische Strahlung 82, 185
Coehnsche Regel 56
Comptoneffekt 206
Coulomb 15
Coulombsches Gesetz der elektr. Anziehung 45
Curie, Marie 189
Curie, Maßeinheit 195
Curie-Punkt 105

Dämpfung 165
Daniell-Element 66
Dauermagnet 90, 106
Defektelektronen 71
Deklination 93
Depolarisator 66
Deuterium 187
Deuteronen 197
Diamagnetismus 107

Dichtemessung 209
Dielektrikum 47
—, Vorgänge im 53
Dielektrizitätskonstante 47
Diode 85
Dipol 53, 161
Dochtkohle 34
Doppelschicht, elektrische 55
Doppel-T-Anker 116
Doppelweggleichrichtung 74
Dosisleistungskonstante 208
Drehfeld 156
Drehspulinstrument 122
Dreieckschaltung 153
Dreiphasenstrom 152
Drosselspule 136
Durchflutungssatz 108
Durchschlagsfestigkeit 42
Dynamomaschine 115

Effektivwert 134
Eigenleitung 71
Einphasen-Kollektormotor 155
Einweggleichrichtung 74
Eisen-Nickel-Akkumulator 68
Elektret 54
Elektrizitätsmenge 14
elektrodynamischer Lautsprecher 122
Elektrofilter 52
Elektrolyse 60
Elektrolyt 58
Elektrolytkondensator 49
Elektrolytkupfer 62
elektrolytischer Mittelwert 134
elektromagnetische Schwingungen 157
— Wellen 157
Elektrometer 37
Elektromotor 121
elektromotorische Kraft 27
Elektronen 13, 173
—, Ablenkung in Feldern 124
Elektronenbahnen 178
Elektronengas 69
Elektronengeschwindigkeit 83
Elektronenleitung in Metallen 70
Elektronenmasse 84
Elektronenradius 174
Elektronenröhren 85
Elektronenschalen 183
Elektronenspin 180
Elektronenverteilung der Elemente 184
Elektronenvolt 83
Elektronenzwilling 210
Elektroöfen 35
Elektroosmose 69
Elektrophorese 68
Elektroskop 37
Elektrostatik 35
elektrostatisches Meßwerk 45
Elementarladung 15
Elementarteilchen 172
Elemente, chemische 172
—, galvanische 64
—, isobare 187
—, isotope 186
—, periodisches System der 181
Ellipsenbahnen 179
Emanation 191
Emission von Elektronen 84
Emissionsstrom 87
Emitter 74
EMK 27
Empfänger 167
Energie des elektr. Feldes 50
— des magnetischen Feldes 128
— und Masse 171
Energiedichte des Feldes 169
Energiestufen, -niveaus 178
Entmagnetisierung 107
Erde, Magnetfeld 92, 124
Erdinduktor 124

Faltdipol 165
Farad 47
Faradayscher Becher 40
— Dunkelraum 76
— Gesetz, erstes 61
— —, zweites 61
— Käfig 40
— Zahl 61
Faustregel 94
Feld, elektrisches 35
—, in Stoffen 47
—, elektromagnetisches 162
—, Energie 50, 128
—, magnetisches in Stoffen 104
Feldlinien, elektrische 39
—, magnetische 91
Feldmagnet 117
Feldspule 101
Feldstärke, elektrische 42
—, —, an Oberflächen 44, 51
—, —, im Dielektrikum 53
—, —, — Plattenkondensator 42
—, —, und Krümmungsradius 51
—, magnetische 99

Feldstärke, magnetische, eines geraden Leiters 110
Fernsehen 168
Fernsprecher 97
Ferritkern 151
Ferrocart 151
Ferromagnetismus 104
Feuchtigkeitsmessung 209
Flächendichte 41
Fluß, magnetischer 103
Fotoeffekt 206
Frequenz 132
Frequenzmodulation 167
Funkenentladung 159
Funkeninduktor 151

γ-Defektoskopie 209
γ-Strahlen 189, 206
γ-Strahlen-Elektroskop 193
Galvani 64
galvanische Elemente 64
— —, konstante 66
Galvanometer, ballistisches 123
Galvanoplastik, -stegie 63
Gasentladung 75
Gauß 103
Geiger-Müller-Zählrohr 194
Geißlersche Röhren 75
Gerdienbogen 34
Germanium 70
Germaniumdiode 73
Gewitter 56
Gittergleichrichtung 167
Gitterstrom 87
Gitter von Röhren 86
Gleichrichter 73
Gleichrichterröhre 86
Gleichstromgenerator 115
Gleichstrommotor 121
Glimmlampe 78
Glimmlicht 76
Glühkatode 85
Glühlampe 33
Graetzschaltung 74
Greinacher-Schaltung 197
Grenzfrequenz 82
Gruppenschaltung 29

Hahn, Otto 201
Halbleiter 70
—, Photoelement 75
Halbwertsdicke 207
Halbwertszeit 190
Halleffekt 125
Hauptquantenzahl 179
Hauptschlußmaschine 117
Hauptschlußmotor 121
Hauteffekt 145
Heizung, elektrische 33
Henry 118
Hertz, Heinrich 162
Heuslersche Legierung 105
Hittorffscher Dunkelraum 76
Hochfrequenz 159
Hofmannscher Apparat 62
Höhensonne 78
Höhenstrahlung 210
Horizontalkomponente 124
Hyperonen 174
Hysteresis 105
Hysteresisverluste 150

Ikonoskop 168
Impedanz 140
Induktanz 136
Induktion 101, 111
— in bewegten Leiterteilen 114
Induktionsgesetz 111
Induktionskonstante 103, 127
Induktionsvorgänge 111
induktiver Widerstand 135
Induktivität 118
induzierte EMK 115
Influenz, elektrische 40
—, magnetische 91
Influenzkonstante 43, 164
Inklination 93
innerer Widerstand von Elementen 27
Ionen 59
Ionenlawine 77
Ionisationskammer 193
isobare und isotope Elemente 186
isoelektrischer Punkt 69
Isogonen und Isoklinen 93
Isolatoren 19

Joliot-Curie 200
Joulesches Gesetz 30

Käfiganker 156
Kalorie 32
Kanalstrahlen 79
Kapazität 46
— von Kondensatoren 48
kapazitiver Widerstand 137
Kaskaden 210

Kaskadenschaltung 197
Kataphorese 69
Kationen 59
Katode 59,85
Katodenfall 77
Katodenstrahlen 79
Katodenstrahl-Oszillograph 160
K-Einfang 193
Kennlinien von Röhren 87
Kernladungszahl 180
Kernreaktor 204
Kernspaltung 201
Kernspaltungsenergie 202
Kernumwandlung 196
Kettenreaktion 202
Kilowatt 31
Kilowattstunde 31
Kirchhoffsche Regel, erste 22
— —, zweite 27
Klemmenspannung 27
— bei Wechselstrom 140
Klingel, elektrische 97
Knotenpunkt 22
Koerzitivkraft 106
Kohlebogenlampe 34
Kohlefadenlampe 33
Kollektor 74, 115
Kompaß 91
Kondensator 38
—, Kapazität 48
—, Schaltung 49
kosmische Strahlung 210
Korkenzieherregel 94, 96
Kraftfluß 103
Kraftlinien, elektrische 38
—, magnetische 91
Kreis, magnetischer 110
Kreisfrequenz 132
kritische Menge 202
Kupferverluste 150
Kurzschlußläufermotor 155

Ladung einer Kugel 41
—, elektrische 35
—, freie und gebundene 41
Ladungstrennung in Doppelschichten 55
Lautsprecher 122
Leclanché-Element 67
Leidener Flasche 49
Leistung des Stromes 30
— des Wechselstroms 146
Leistungsfaktor 148, 151
Leiter 1. und 2. Klasse 13
Leitfähigkeit 19
Leitungsspannung bei 3 Phasen 154
Leitungsstrom bei 3 Phasen 154
Leitwert 17
Lenzsche Regel 127
Leuchtelektron 177
Leuchtstoffröhre 78
Licht, Emission u. Absorption 177
Lichtgeschwindigkeit 164
Lichtquanten 174, 177
Lichtbogen 34, 80
Lichtdruck 169
Liniendiagramm 139
Linke-Hand-Regel 119
Löcher 71
Lorentz-Kraft 124
Löschspannung 79
Luftsauerstoffelement 67
Luftspalt, Wirkung 111

Magnet 89
—, Pole 90
—, Zugkraft 129
Magnetfeld der Erde 92
— in Spulen 95
magnetische Ablenkung von Elektronen 124
— Feldstärke 99
— Fluß 103
— Kreis 110
— Quantenzahl 180
— Spannung 100
Magnetisierung 107
—, Kurve 105
Magnetismus 89
—, remanenter 96
magnetomotorische Kraft 101
Mangelhalbleiter 72
Masse und Energie 171
Massendefekt 188
Masseneinheit (ME) 187
Massenwert 187
Massenzahl 182
Massenzunahme, relativistische 84
Maxwell 104
Meidinger-Element 66
Mendelejew 180
Meson 174, 210
Meyer 180
Mißweisung 93
Mittelwert, arithmetischer 132
—, elektrolytischer 133
Moderatoren 202
Modulation 167

Molekularmagnet 90
Momentanwerte von Wechselgrößen 131
Morsetelegraf 97
Morsealphabet 98

n-Leitung 71
Nadelgalvanometer 98
Natriumdampflampe 78
Nebenschlußmaschine 117
Nebenschlußmotor 121
Nebenwiderstand 23
Nebelkammer 194
Nebenquantenzahl 179
Neptunium 203
Neutrino 174, 205
Neutron 173, 191, 202
Niederfrequenzverstärker 89
Normalelement 67

Ohm 17
Ohmsches Gesetz 21, 27
ohmscher Widerstand bei Wechselstrom 138
Ordnungszahl 180
Orientierungspolarisation 54

p-Leitung 72
Paarbildung 206
Parallelresonanz 144
Parallelschaltung 22
Parallelschaltung von Elementen 29
— — Kondensatoren 49
— — Wechselstromwiderständen 142
Paramagnetismus 107
Pauli-Prinzip 182
Peltiereffekt 58
Periode des Wechselstroms 132
periodisches System 180
Permeabilität 104
Phasenspannung, -strom 154
Phasenverschiebung 136
Phasenwinkel 136, 139
Photoelemente und -zellen 75
Photonen 174
piezoelektrischer Effekt 54
Plasma 76
Plattenkondensator 38
Plutonium 203
Polarisation, elektrische 53
—, elektrolytische 65
Polarisationsspannung 66
Polonium 191
Polreagenzpapier 63
Positron 173
Potentiometer 26
Protonen 13, 173, 191

Quantenbedingung 176
Quantenzahlen 178
Quecksilberdampf-Gleichrichter 80
Quecksilberdampflampe 78

rad 208
Radioaktivität, künstliche 200
—, natürliche 188
radioaktives Gleichgewicht 191
— Radioisotope 189
Radium 189
Radiumstandard 194
Radon 191
Raumladung 77
Rechte-Hand-Regel 114
Reibungs-Elektrisiermaschine 38
Reibungselektrizität 36, 56
Reihenresonanz 143
Reihenschaltung 24
Relais 97
relativistische Massenzunahme 84
remanenter Magnetismus 96, 106
Resonanz 143, 164
Ringspule 96
Röntgeneinheit 82, 208
Röntgenspektrum 185
Röntgenstrahlung 81, 185
Rückkopplung 161
Ruhestromschaltung 97
Rundfunk 166
Rutherford 172
Rydberg-Frequenz 178

Sättigungsstrom 85
Salmiakelement 67
Sammler 68
Schauer 210
Scheinleistung 148
Scheinwiderstand 140
Scheitelwert 136
Schleifenoszillograph 122
Schleifringläufermotor 157
Schleifenwicklung 116
Schlupf 156
Schutzringkondensator 48
Schwingkreis 157
Schwingquarz 161
Schwingungen, elektromagnetische 158
Selbstinduktion 117
Selengleichrichter 73

Sender 166
Serienschaltung 24
Shunt 23
Sicherung 33
Siebkette 86
Siemens 17
sinusförmiger Wechselstrom 131
Skineffekt 145
Sonnenenergie 188
Spannung, elektrische 15
—, magnetische 100
Spannungsabfall 27
Spannungsdiagramm 140
Spannungskompensation 28
Spannungsmesser 17
Spannungsquelle 27
—, Schaltung von 29
Spannungsreihe, elektrochemische 65
—, thermoelektrische 57
Spannungsresonanz 143
Spannungsstoß 101, 123
Spannungsteiler 25
Spannungsverstärkung 89
Spektrallinien 177
Sperrschicht 72
Spiegelgalvanometer 123
Spin 180
Spinquantenzahl 180
Spinthariskop 193
Spitzenwirkung 52
Sprungtemperatur 70
Stabmagnet 95
Stator 132
Steilheit 88
Sternschaltung 154
Steuergitter 86
Stöpselrheostat 17
Störstellen 71
Strahlendosis 207
Strahlung, kosmische 210
Strahlungsdruck 169
Strahlungsquanten 170
Strömungsspannung 69
Stromkreis 18
—, unverzweigter 20, 24
—, verzweigter 22
Strommesser 14
Stromresonanz 144
Stromstärke 14, 126
Stromtor 89
Stromwärme 32
Summer 97
Supraleitung 70
Suszeptibilität 108
Synchronmotor 154
Szintillation 193

Taschenlampenbatterie 67
Telegraf 97
Telegrafie, drahtlose 166
Temperaturkoeffizient 20
Termschema 178
thermische Emission 84
Thermoelektrizität 56
Thermoelement 57
Thomsonsche Schwingungsformel 159
Thoriumreihe 193
Thyratron 89
Toroid 96
Totalintensität 124
Träger 75
Transformator 149
Transistor 74
Transurane 203
Triode 86, 160
Tritium 187
Trockenbatterie 67
Trommelanker 116

Überschußhalbleiter 71
Übersetzungsverhältnis 149
Umspanner 149
Uranmeiler 204
Uranreihe 191, 192
Uranspaltung 201
Urspannung 27

var 147
Ventilwirkung 80
Verlustfaktor, -winkel 19, 142
Vernickelung 63
Verschiebungsdichte 43
Verschiebungsfluß 43
Verschiebungskonstante 43
Verschiebungspolarisation 43
Verstärkerröhre 86
Verstärkung einer Röhre 88
Vertikalkomponente 124
Volt 15
Volta 64
Voltaelement 64
Voltampere 148
Voltmeter 17
Voltsekunde 103
Vorschaltwiderstand 25

Wagnerscher Hammer 97
Wasser, schweres 187
Wasserstoffatom 175
Wasserstoffbombe 205
Wasserstoffelektrode 65
Wasserzersetzung 62
Watt 31
Wattmeter 126
Wattsekunde 31
Weber 103
Wechselspannung 131
Wechselstrom 130
Wechselstromgenerator 132
Wechselstrommotoren 154
Wehnelt-Unterbrecher 152
Weicheiseninstrument 99
Wellen, elektromagnetische 157
—, halbfreie 166
Wellenlänge 163
Weston-Normalelement 67
Wheatstonesche Brücke 29
Wickelkondensator 49
Widerstand, elektrischer 17
—, induktiver 135
Widerstand, innerer, von Elementen 27
—, kapazitiver 137
—, spezifischer 18
— und Temperatur 20
— von Isolatoren 19
— von Metallen 19
Wilsonsche Nebelkammer 194
Wirbelstrom 115
—, Verluste 150
Wirkleistung 146
Wirkstrom 147
Wirkwiderstand 135
Wismutspirale 125

Zählrohr 194
Zeigerdiagramm 139
Zerfallsgesetz 189
Zerfallskonstante 190
Zerfallsreihe des Urans 191, 192
Zersetzungsspannung 66
Zerstrahlung 200
Zündspannung 78
Zweiplattenkondensator 48
Zyklotron 198