

DIE PHYSIK UND IHRE ANWENDUNG IN BIOLOGIE UND MEDIZIN

BAND II

ELEKTRIK, OPTIK UND ATOMPHYSIK

VON

DR. PHIL. WALTER BEIER, LEIPZIG

DOZENT FÜR PHYSIK AM PHYSIKALISCHEN INSTITUT
DER KARL-MARX-UNIVERSITÄT LEIPZIG

UND

DR. MED. ERICH DÖRNER, LEIPZIG

FACHARZT FÜR INNERE MEDIZIN

MIT 535 ABBILDUNGEN



VEB GEORG THIEME · LEIPZIG

Als Lehrbuch an den Universitäten und Hochschulen
der Deutschen Demokratischen Republik eingeführt
Staatssekretariat für Hochschulwesen

Alle Rechte vorbehalten

Copyright 1957 by VEB Georg Thieme, Leipzig

Veröffentlicht unter der Lizenz-Nr. 211 / Gen.-Nr. 490/1/56
des Ministeriums für Kultur Hauptverwaltung Verlagswesen der
Deutschen Demokratischen Republik
Auftragsnummer des Verlages 1

Printed in Germany

Satz und Druck: (III/18/203) VEB Leipziger Druckhaus, Leipzig

Vorwort

An den ersten Band unseres Werkes „Die Physik und ihre Anwendung in Biologie und Medizin“, der die Mechanik, die Akustik und die Wärmelehre umfaßt, schließt sich nunmehr der zweite Band mit einer Darstellung der Elektrizitätslehre, der Optik, sowie der Atom- und der Kernphysik an.

Oft geäußerten Wünschen entsprechend enthält der zweite Band außerdem eine ausführliche Darstellung der medizinischen Statistik und der Fehlertheorie.

Wir hoffen, daß auch der zweite Band das gleiche lebhafte Interesse hervorruft wie der erste Band und daß er dazu beiträgt, eine Lücke im Schrifttum des physikalisch-medizinischen Grenzgebietes zu schließen.

Anregungen und Verbesserungshinweise würden wir dankbar begrüßen und sorgfältig bei Neudrucken auswerten.

Auch beim zweiten Band haben uns Herr Prof. Dr. W. Ilberg, Direktor des Physikalischen Instituts der Karl-Marx-Universität Leipzig, und Herr Prof. Dr. Ch. J. Keller, Ärztlicher Direktor des Bezirkskrankenhauses St. Georg und Chefarzt der inneren Abteilung, durch wertvolle Anregungen unterstützt, wofür wir unseren Dank aussprechen.

Wir danken ebenso dem wissenschaftlichen Mitarbeiter am Physikalischen Institut, Herrn O. Lukas, für seine Mitarbeit bei der Herausgabe des zweiten Bandes, Herrn Dr. P. Neubert für seine Unterstützung beim Korrekturlesen sowie den Herren Diplom-Physikern W. Lohmann (Phasenkontrast-Mikroskopie nebst Abbildungen) und A. Rau und G. Schumann (medizinische Statistik und Nierenclearance) für ihre wertvolle Mitarbeit.

Unser Dank gilt ferner allen Firmen, die unser Werk durch die Überlassung von Bildmaterial und Sonderdrucken gefördert haben.

Wir danken ferner Frau E. Beier für die sorgfältige Anfertigung des größten Teils der Zeichnungen und dem Verlag für die gute Zusammenarbeit und für das bereitwillige Eingehen auf alle unsere Wünsche.

Leipzig, im November 1956

Die Verfasser

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort	VII
I. Die Lehre vom Gleichstrom	1
1. Vorbemerkungen	1
2. Der elektrische Strom	2
3. Leiter und Nichtleiter	3
4. Die Grundgröße der elektrischen Ladung q	5
5. Strommeßgeräte	8
6. Das elektrische Feld	11
a) Die Feldstärke E	11
b) Die elektrische Spannung U	14
c) Das elektrische Feld eines Dipols	17
7. Das Ohmsche Gesetz	18
8. Atomistische Deutung des Gesetzes von Ohm	20
9. Elektrophorese und Elektroosmose	23
a) Physikalische Grundlagen	23
b) Die quantitative Elektrophorese	27
c) Die Bestimmung der apparatenten Konzentrationen	29
d) Die quantitative Elektrophorese in der Medizin	32
10. Iontophorese	32
11. Elektrolytische Einschmelzung von Geweben	34
12. Galvanisation	35
13. Reizstromtherapie	35
a) Allgemeine Grundlagen	35
b) Elektrodiagnostik	37
c) Elektrotherapie	39
d) Die Elektronarkose und der Elektroschock	40
14. Die Gesetze von Kirchhoff	40
a) Stromverzweigung	40
b) Die Maschenregel	41
15. Einige Kapitel elektrischer Meßtechnik	42
a) Strom- und Spannungsmessung	42
b) Schaltung elektrischer Widerstände	44
c) Widerstandsmessungen	46
d) Elektrodermatometrie	47
e) Das elektrische Wärmeäquivalent	49
16. Das freie Elektron	50
a) Vorbemerkungen	50
b) Thermische Elektronenemission	51

	Seite
ba) Die Elektronenröhre	53
bb) Die Röntgenröhre	55
bc) Medizinische Röntgenapparate	58
bd) Röntgendosimetrie	62
be) Die Braunsche Röhre	65
c) Photoemission	66
ca) Die Photozelle	67
cb) Der Photomultiplier	68
cc) Der Röntgenbildverstärker	70
d) Die Feldemission	71
17. Materie im elektrischen Feld	71
a) Vorbemerkungen	71
b) Die Kapazität C eines Kondensators	72
c) Die Ladungsdichte D	73
d) Die Influenz	74
e) Die elektrische Polarisierung	75
18. Elektrostatische Spannungsquellen	78
a) Reibungselektrizität	78
b) Der van-de-Graaff-Generator	79
19. Gleichspannungsquellen im Organismus	79
a) Vorbemerkungen	79
b) Die Ruhespannung (Ruhepotential).	80
c) Die Aktionsspannung (Aktionspotential)	82
II. Die Lehre vom Wechselstrom	84
1. Begriffsbildungen	84
a) Vorbemerkungen	84
b) Einwellige Wechselspannungen	85
c) Der Effektivwert und andere Mittelwerte	86
ca) Begriffsbestimmungen für periodische Ströme beliebiger Kurvenform	86
cb) Anwendung auf Sinusströme und Sinusspannungen	87
2. Die Messung biophysikalischer Wechselspannungen	87
a) Die Elektrokardiographie	87
aa) Vorbemerkungen	87
ab) Die Ableitungsverfahren	88
ac) Technische Elektrokardiographen	93
ad) Einige theoretische Betrachtungen über die Entstehung eines Elektro-	102
kardiogramms	102
ae) Die Auswertung eines Elektrokardiogramms	104
b) Elektroenzephalographie	106
3. Verknüpfung elektrischer und magnetischer Felder	111
a) Magnetische Feldlinien	111
b) Das magnetische Feld der Spule	112
c) Das Durchflutungsgesetz	114
d) Das Induktionsgesetz	115
e) Kraftwirkungen in einem magnetischen Feld	116
ea) Die Kraftflußdichte B und der magnetische Fluß Φ	118
eb) Die Regel von Lenz	120
ec) Das Betatron und seine Verwendung in der Medizin	122
4. Wechselstromwiderstände	125
a) Die Selbstinduktion	125
b) Der induktive Widerstand	125

	Seite
c) Der kapazitive Widerstand	129
d) Die Leistung eines Wechselstromes	132
5. Erzeugung von Wechselstrom	133
a) Induktive Spannungsquellen	133
b) Drehstrom	134
c) Das Induktorium	135
d) Der Transformator	136
e) Erzeugung gedämpfter elektrischer Schwingungen	137
ea) Der Schwingkreis	137
eb) Der Schwingkreis als Wechselstromquelle	138
f) Erzeugung ungedämpfter elektrischer Schwingungen	140
6. Biologische Objekte in elektromagnetischen Feldern	140
a) Wechselströme als physiologischer Reiz	140
b) Die Faradisation	141
c) Die Hochfrequenztherapie	143
ca) Klassische Diathermie	144
cb) Kondensatorfeldmethode	146
cc) Spulenfeldmethode	149
7. Die elektrische Messung von Kreislaufgrößen	151
a) Allgemeine Übersicht	151
b) Pulsrezeptoren	151
c) Messung der Pulswellengeschwindigkeit	152
d) Das Schlag- und das Herzminutenvolumen	153
e) Blutdruckregistrierung	154
f) Ballistokardiographie	156
8. Die Gefährdung des Menschen durch den elektrischen Strom	157
III. Elektromagnetische Wellen	158
1. Erzeugung elektromagnetischer Wellen	158
2. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen	162
3. Mikrowellentherapie	164
4. Elektromagnetische Wellen als Träger elektrischer Signale	167
5. Elektromagnetische Wellen kosmischen Ursprungs	170
IV. Die Optik	171
1. Lichtquellen	171
a) Vorbemerkungen	171
b) Temperaturstrahler	171
c) Lumineszenzstrahler	179
2. Die Gesetze der Lichtausbreitung	181
a) Lichtbündel und Lichtstrahlen	181
b) Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes	181
c) Reflexion und Brechung	182
3. Optische Abbildungen	184
a) Die Zentralprojektion und ihre Bedeutung für die Röntgenoptik	184
b) Abbildende Systeme	190
c) Beugung und Bündelbegrenzung	196
d) Abbildungsfehler	200

	Seite
4. Optische Geräte	203
a) Das Auflösungsvermögen einer optischen Apparatur	203
b) Das Mikroskop	205
c) Die Phasenkontrastmikroskopie	212
ca) Die Bildentstehung im Mikroskop	212
cb) Erklärung des Phasenkontrastverfahrens aus der Zeigerdarstellung von Lichtwellen.	221
d) Fluoreszenzmikroskopie	230
e) Das Röntgenmikroskop	232
f) Das Elektronenmikroskop	235
g) Die Optik des Auges	240
h) Der Sehvorgang	243
i) Die Brillen	252
k) Die Endoskopie	253
l) Der Augenspiegel.	256
m) Der Prismenspektralapparat	256
n) Das Refraktometer	257
o) Die Schlierenoptik	257
5. Interferenz elektrischer Wellen	260
a) Interferenz von Lichtwellen	260
b) Röntgenstrahlinterferenz	264
6. Die Polarisation elektromagnetischer Wellen	268
a) Vorbemerkungen	268
b) Die Doppelbrechung	269
c) Polarisatoren.	270
d) Polarisationsoptik.	271
e) Optisch aktive Stoffe	273
f) Polarisation von Röntgenlicht	273
g) Elektrooptische Effekte	273
7. Einige Grundlagen der Farbmatrik	274
8. Farbige Fernsehen	278
9. Photometrie	280
V. Atomphysik	284
1. Vorbemerkungen.	284
2. Das Atom	284
3. Das Bohrsche Modell des Wasserstoffatoms.	286
4. Das Periodensystem der Elemente	291
5. Molekül-Bindungen	295
VI. Kernphysik	300
1. Natürliche Radioaktivität.	300
a) Allgemeines	300
b) Nachweis ionisierender Strahlungen	301
c) Radioaktive Zerfallsreihen	307
d) Isotopie	309
2. Kernaufbau	310
a) Kernstruktur	310
b) Kernenergie	313

	Seite
3. Kernreaktionen	318
a) Grundlagen	318
b) Chemische Prozesse	320
c) Kernprozesse	320
ca) Beschuß mit Neutronen	321
cb) Beschuß mit Deutronen	324
cc) Beschuß mit α -Teilchen, Protonen und γ -Strahlen	327
4. Teilchenbeschleuniger	328
5. Künstliche Radioaktivität	331
a) Vorbemerkungen	331
b) Szilard-Chalmers-Prozesse	332
c) Zwei historisch bedeutungsvolle Kernprozesse	333
d) Der radioaktive Zerfall	333
e) α -Strahlen	334
f) β -Strahlen	334
fa) β -Strahlen (Negatronen)	334
fb) β^+ -Strahlen (Positronen)	335
fc) Vernichtungsstrahlen	337
fd) Inverse β -Strahlung	337
g) γ -Strahlen	338
h) Isomere Kerne	339
6. Kernreaktoren	339
7. Synthetische Elemente	346
8. Die Transurane	349
VII. Isotope in Biologie und Medizin	353
1. Physikalische, biologische und effektive Halbwertszeit	353
2. Dosimetrie	356
a) Das Curie	356
b) Die Röntgeneinheit r	357
c) Die Dosisformeln von Marinelli	360
ca) Dosisformeln für β -Strahlen	360
cb) Dosisformeln für γ -Strahlen	362
cc) Dosisformeln für Mischstrahler	364
d) Relativer Absorptionswert eines Isotops	365
3. Isotope in der Diagnostik	366
a) Autoradiographie	366
b) Indikatormethode	367
c) Kreislaufdiagnostik	369
d) Jodisotope	371
e) Die diagnostische Verwendung von Radiophosphor	374
f) Kohlenstoffisotope	375
4. Biologische Strahlenwirkungen	380
5. Strahlenschädigungen und Strahlenschutz	382
a) Schädigungen durch Radiumstrahlen	382
b) Strahlenschäden durch radioaktive Isotope	382
c) Wirkungen auf Gene	386
d) Radioaktive Aerosole	387
6. Strahlentherapie	389
a) Radiumtherapie	389
b) Isotopentherapie	390

	Seite
ba) Kobalt 60	390
bb) Gold 198	393
bc) Phosphor 32 in der Therapie der Blutkrankheiten (Polyzythämie)	394
7. Höhenstrahlen	396
VIII. Mathematischer Anhang	406
1. Mathematische Ergänzungen zur Elektrizitätslehre und zur Optik	406
a) Elektrostatische Kraftwirkungen	406
aa) Kräfte zwischen den Platten eines Plattenkondensators	406
ab) Das Gesetz von Coulomb	408
b) Elektromagnetische Kraftwirkungen	409
c) Die elektrische Feldenergie	410
d) Die magnetische Feldenergie	411
e) Das ballistische Galvanometer	412
f) Die Ableitung der Linsengleichung	413
2. Einige spezielle Kapitel der theoretischen Medizin	415
a) Einführung in die Grundlagen der biologischen und medizinischen Statistik	415
aa) Statistische Kenngrößen	416
aa 1) Mittelwerte	416
aa 2) Rückführung der Mittelwerte auf Ausgleichsprinzipien	419
aa 3) Streuungsmaße	422
aa 4) Die mittlere Abweichung des arithmetischen Mittels	426
aa 5) Das arithmetische Mittel und die mittlere Abweichung mit Gewichtsbelegung	427
ab) Die Normalverteilung (Gaußverteilung)	428
ab 1) Einführung in die Wahrscheinlichkeitsrechnung	428
ab 2) Ableitung der Normalverteilung	434
ab 3) Mittelwerte und Streuungsmaße in der Normalverteilung	439
ab 4) Statistische Sicherheit — Vertrauensintervall	441
ac) Prüfverfahren	444
ac 1) Das Prüfen von arithmetischen Mitteln	445
ac 2) Das Prüfen der Differenz zweier arithmetischer Mittel	447
ad) Ausgleichsrechnung für funktionelle und korrelative Abhängigkeiten	449
ad 1) Ausgleichsrechnung für lineare Zusammenhänge	449
ad 2) Rückführung nichtlinearer Beziehungen auf lineare	452
ae) Poisson-Verteilung	455
b) Die Treffertheorie der biologischen Strahlenwirkung	460
c) Die Ableitung der Formel für das Schlagvolumen und das Herzminutenvolumen auf Grund elektromechanischer Analogiebetrachtungen	463
d) Die Hexagonalanalyse eines Elektrokardiogramms nach Schlomka und Jungk	466
e) Mathematische Behandlung der renalen Clearance nach Rau und Schumann	471
ea) Aufstellung der allgemeinen Clearanceformel	472
eb) Zeitabhängigkeit der Plasmakonzentration	474
ec) Zeitabhängigkeit der im Harn ausgeschiedenen Menge der Testsubstanz	478
ed) Auswertung der Theorie zur Bestimmung der Nierenclearance	479
f) Elektrische Rechenmaschinen	481
g) Äquivalentwerte der Röntgeneinheit für ein Kubikzentimeter Normalluft bzw. 1,293 Milligramm Luft	484
h) Zahlenmäßige Berechnung der Zerfallsrate f_d	486
i) Der geometrische Faktor g in der Dosisformel für Gammastrahlen nach Marinelli	487

IX. Tabellenanhang	490
1. Tabelle der physikalischen Grundeinheiten	490
2. Tafel der gesetzlichen Einheiten	491
3. Umrechnungstabelle: Krafteinheiten	496
4. Umrechnungstabelle: Energieeinheiten	497
5. Umrechnungstabelle: Leistungen	497
6. Elektrische und magnetische Größen	498
7. Brechzahlen	498
8. Liste der gebräuchlichsten Isotope und der industriell hergestellten Präparate	499
9. Fehlerintegral $\Phi(y)$	500
10. Dosiskonstanten und Toleranzkonzentrationen für verschiedene Beta-Strahler (nach Meyer-Schützmeister)	501
11. Relative Radiotoxizität (nach E. H. Graul)	502
12. Konstanten	505
13. Isotopentabellen	505
a) Vorbemerkungen	505
b) Tabellen 1—19	506
Schrifttum	516
Namenverzeichnis	518
Sachverzeichnis	520

I. Die Lehre vom Gleichstrom

1. Vorbemerkungen

Wir haben im ersten Band die Grundgesetze der Mechanik, Akustik und Wärmelehre dargestellt. Im Zusammenhang mit der Besprechung der physikalischen Grundbegriffe erläuterten wir biologische und medizinische Anwendungen. Bei allen diesen Betrachtungen trat die Methode der Physik hervor und diente als Leitfaden. Diese Methode war durch ein quantitatives funktionales Vorgehen gekennzeichnet. Quantitatives Vorgehen aber war verknüpft mit meßtechnischen Gesichtspunkten, insbesondere mit der Festlegung geeigneter Grundgrößen. Mit den vier Grundgrößen der Länge, der Zeit, der Masse und der Temperatur gelang es, alle anderen physikalischen Größen aus dem Gebiete der Mechanik, Akustik und Wärmelehre mittels abgeleiteter Größen zu messen. Dieser Sachverhalt läßt sich auch so ausdrücken, daß bei Wahl der genannten 4 Grundgrößen alle anderen physikalischen Größen Einheiten erhalten, die sich aus denen der Grundgrößen zusammensetzen.

Ein weiteres Kennzeichen der Darstellungsart des ersten Bandes bestand darin, daß viele Erscheinungen unmittelbar mit den uns zur Verfügung stehenden Sinnesorganen wahrgenommen werden können. Auf besondere Täuschungsmöglichkeiten dieser Sinnesorgane wurde hingewiesen und das Bestreben zum Ausdruck gebracht, die Sinnesorgane soweit wie nur irgend möglich durch objektive Meßinstrumente zu ersetzen.

Solange man sich im Bereich der Mechanik, der Akustik und der Wärmelehre bewegt, gelingt die unmittelbare Erfassung des physikalischen Geschehens mit Hilfe der Sinnesorgane. In dem vorliegenden zweiten Band werden wir von dem Prinzip des unmittelbar möglichen Erkennens der physikalischen Erscheinungen in vielen Punkten absehen müssen. Schon bei dem ersten Gegenstand, dem wir uns im folgenden zuwenden, besteht keine Möglichkeit, die Erscheinung unmittelbar mit irgend einem Sinnesorgan wahrzunehmen, weil wir dafür keines besitzen. Die Erscheinung der Elektrizität, die hier gemeint ist, läßt sich nur an ihren Wirkungen beobachten und erkennen. Ob ein elektrischer Strom fließt, können wir einem Draht von außen nicht ansehen. Wir können jedoch Mittel ersinnen, die einen bestimmten Effekt erzeugen, wenn die Voraussetzung für das Fließen eines elektrischen Stromes vorliegt. Solch ein Mittel ist z. B. eine Magnetnadel, die in bestimmter Weise abgelenkt wird, wenn sie sich in der Nähe eines stromdurchflossenen Drahtes befindet. Wir werden schließlich in dem vorliegenden Band ein zweites Mal auf die unmittelbare Anschauung verzichten müssen, nämlich dann, wenn wir die Physik der Wellen und Korpuskularstrahlen mit Ausnahme des sichtbaren Lichtes besprechen. Hier werden

es Ionisationsereignisse und anderes mehr sein, die uns die Existenz der unseren Sinnesorganen nicht zugänglichen Strahlen nachzuweisen gestatten.

Den vorstehenden Ausführungen entsprechend muß unser Augenmerk bei der Besprechung elektrischer Erscheinungen zunächst darauf gerichtet sein, für unsere Sinnesorgane wahrnehmbare Erscheinungen festzustellen, die wir als Wirkungen der Elektrizität ansprechen. Da die Elektrizität in außerordentlich großem Maße Eingang in die Medizin gefunden hat, wird die Darstellung der Grundbegriffe einen breiten Raum einnehmen. Daneben aber besprechen wir, soweit es sich im Rahmen der vorliegenden Darstellung überhaupt ermöglichen läßt, einige der zahlreichen Anwendungen der Elektrizitätslehre in Therapie und Diagnostik. Die Kompliziertheit dieser Anwendungen in der Medizin erfordert ein genaues Eingehen auf viele physikalische Einzelheiten. Das muß beim Studium der vorliegenden Betrachtungen beachtet werden. Wir beginnen mit allgemeinen Gesetzmäßigkeiten des Gleichstromes.

2. Der elektrische Strom

Als Ausgangspunkt unserer Betrachtungen dient die Existenz von Strom- oder Spannungsquellen. Spannungsquellen, die zur Erzeugung eines Gleichstromes dienen können, stehen uns in Form der chemischen Elemente, z. B. des Bleiakkumulators, zur Verfügung. Mit ihrer Hilfe führen wir die ersten grundlegenden Versuche durch. Jeder Bleiakkumulator besitzt zwei Anschlußklemmen, den Plus- und den Minuspol. Verbindet man diese beiden Klemmen mit einem Draht, so sagt man, in dem Draht fließt ein elektrischer Strom. Wir sehen also die Existenz der Spannungsquelle als Ursache für den im Draht fließenden Strom an.

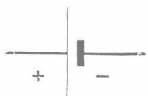


Abb. 1. Schalt-symbol für Gleichspannungsquelle

Zur einfacheren Darstellung der elektrischen Geräte dienen Symbolsymbole, die ähnlich wie die Formeln des Chemikers eine Kurzbezeichnung darstellen. Die Abbildung 1 zeigt das Symbolsymbol einer elektrischen Gleichspannungsquelle, also z. B. eines Bleiakkumulators oder einer Taschenlampenbatterie. In dem anfangs erwähnten Versuch werden die beiden Klemmen der Spannungsquelle mit einem Draht verbunden. So entsteht ein elektrischer Stromkreis. Die Bezeichnung rührt von der Vorstellung

her, daß der elektrische Strom in Form eines Kreislaufes Draht und Spannungsquelle durchfließt. Aus diesem Grunde sind auch die elektrischen Grundbegriffe, wie z. B. der Begriff der Stromstärke, unmittelbar der Physik des Kreislaufes von Flüssigkeiten entnommen. So hatten wir im ersten Band die Flüssigkeitsstromstärke, die z. B. im peripheren Kreislauf des menschlichen Organismus besteht, durch das Verhältnis des durchströmenden Volumens zur Flußzeit, also durch die Gleichung

$$J = \frac{V}{t} \quad (\text{I, 1})$$

bzw.

$$J = \frac{dV}{dt} \quad (\text{I, 2})$$

definiert. Wenn man versucht, die elektrische Stromstärke zu definieren, so wird man ähnlich vorgehen. Man wird also unter der elektrischen Stromstärke das Verhältnis

einer elektrischen Menge q zur Flußzeit verstehen, also die elektrische Stromstärke J durch die Gleichung

$$J = \frac{q}{t} \quad (\text{I, 3})$$

bzw.

$$J = \frac{dq}{dt} \quad (\text{I, 4})$$

beschreiben. In dieser Gleichung kommt noch nicht zum Ausdruck, was man sich unter der elektrischen Menge q vorzustellen hat. Während es sich im Falle des Flüssigkeitskreislaufes bei der strömenden Substanz lediglich um das anschauliche Volumen der strömenden Flüssigkeitsmenge handelt, haben wir es im Falle der elektrischen Stromstärke mit der für unsere Sinne nicht wahrnehmbaren elektrischen Substanz zu tun. Sie erhält den Namen elektrische Ladung. Wir stellen uns vor, daß diese elektrische Ladung von zahlreichen kleinen Ladungsträgern durch den Draht bzw. durch einen Leiter der Elektrizität transportiert wird, und zwar derart, daß jeder einzelne der Ladungsträger nur in der Lage ist, eine bestimmte Portion der gesamten elektrischen Ladungen zu transportieren. Die kleinstmögliche elektrische Ladung tragen die Elektronen. Alle elektrischen Ladungen stellen Vielfache der Elektronenladung e^- dar, weshalb man die Elektronenladung auch als Elementarladung bezeichnet. Das Fließen eines elektrischen Stromes ist somit identisch mit der Bewegung von Ladungsträgern. Wir werden später für den neuen Begriff der elektrischen Ladung eine neue Grundgröße definieren. Wir erheben also den Begriff der elektrischen Ladung zu einer Grundgröße¹⁾. Es wird dann unsere Aufgabe sein, zu zeigen, daß alle anderen elektrischen Größen sich auf diese Grundgröße zurückführen lassen bzw. durch Verbindung mit den schon bekannten 4 Grundgrößen der Länge, der Masse, der Zeit und der Temperatur abgeleitete Einheiten erhalten.

3. Leiter und Nichtleiter

Nachdem wir versucht haben, eine anschauliche Vorstellung mit dem Begriff der Elektrizität zu verbinden, indem wir die Erscheinung „elektrischer Strom“ auf das Wandern von Ladungsträgern in Leitern zurückführten, besprechen wir Erscheinungen der bewegten Ladungsträger, die unseren Sinnesorganen zugänglich sind. Wir kehren zu dem anfangs erwähnten Versuch zurück. In ihm waren lediglich die beiden Pole eines Bleiakкумуляtors mit einem metallischen Draht verbunden. Bei geeigneter Wahl des Drahtes spüren wir eine Erwärmung des Drahtes, die sich mitunter so steigert, daß der Draht zum hellen Leuchten kommt, eine Erscheinung, die wir im täglichen Leben bei der Betrachtung einer leuchtenden elektrischen Glühlampe jederzeit beobachten können. Wir stellen somit fest, das Fließen eines elektrischen Stromes ist mit einer Erwärmung des durchflossenen Drahtes verknüpft. Wir vermuten in der Erwärmung ein allgemeines Kennzeichen des elektrischen Stromes. Dann muß die Erscheinung auch auftreten, wenn der Strom andere Materialien durchfließt. Um das zu zeigen, verbinden wir zwei Drähte mit

¹⁾ Man beachte, daß in einem Gesetzesentwurf des Deutschen Amtes für Maße und Gewichte als elektrische Grundgröße nicht die elektrische Ladung, sondern die Stromstärke vorgeschlagen wird. Auf die sich hieraus ergebende Definition der Stromstärkeneinheit gehen wir an anderer Stelle ein. Siehe auch Tabellenanhang.

einem mittels einer Salzlösung angefeuchteten Fließpapierstreifen. Beim Berühren der Drähte mit den Klemmen einer Gleichspannungsquelle erkennt man nach kurzer Zeit die auftretende Erwärmung des feuchten Fließpapierstreifens durch aufsteigenden Flüssigkeitsdampf. Der Versuch zeigt zweierlei. Es läßt die Tatsache erkennen, daß auch ein feuchter Papierstreifen Elektrizität zu leiten vermag und daß zweitens dabei eine Erwärmung auftritt.

Man kann sich vorstellen, daß die Erwärmung des Leiters durch die Reibung der Elektrizitätsträger entsteht, die sie bei ihrer Bewegung durch den Leiter erfahren.

Unter bestimmten Bedingungen, wie sie z. B. bei einer elektrischen Glühlampe vorliegen, führt diese Reibungswärme schließlich zum hellen Glühen des metallischen Drahtes. Auf dieser Erscheinung kann man aufbauen, um für die folgenden qualitativen Versuche ein Nachweisgerät für elektrischen Strom zu erhalten. Wir verwenden lediglich eine Glühlampe, die bei geeigneter Wahl beim Fließen eines elektrischen

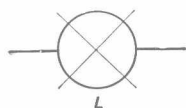


Abb. 2

Schaltsymbol für Lampe oder elektrisches Gerät

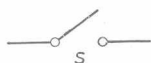


Abb. 3

Schaltsymbol für Schalter

Stromes aufleuchtet. Mit einer solchen Glühlampe können wir die Stoffe in zwei Gruppen aufteilen. In die eine Gruppe ordnen wir Substanzen ein, die den elektrischen Strom zu leiten vermögen, in die andere diejenigen, die ihn nicht leiten. Auf diese Weise gewinnen wir eine Unterscheidung von Leitern und Nichtleitern der Elektrizität. Die Unterteilung ist grob, z. B. müssen Metalle, Kohle und Elektrolyte in die Gruppe der Leiter, Luft, destilliertes Wasser und viele Kunststoffe in die Gruppe der Nichtleiter eingeordnet werden. Man stellt bald fest, daß diese Unterteilung der einzelnen Substanzen in Leiter und Nichtleiter je nach Art des Nachweisinstrumentes verschieden ausfällt. Würde man nämlich unser grobes Nachweisgerät, die Glühlampe, durch ein empfindliches elektrisches Strommeßgerät ersetzen, so würde dieses auch bei Verwendung von destilliertem Wasser einen zwar geringen, aber doch nachweisbaren Strom anzeigen. In Wahrheit sind sowohl ein

elektrischer Leiter als auch ein vollkommener Nichtleiter, den man als Isolator bezeichnet, idealisierte Grenzfälle. Die wirklichen Substanzen nehmen eine Mittelstellung zwischen dem idealen Leiter und dem idealen Isolator ein. Die Glühlampe als qualitatives Nachweisinstrument für den Strom ist durch das Schaltsymbol der Abbildung 2 schematisiert. Das in Abbildung 3 dargestellte Symbol kennzeichnet einen elektrischen Schalter.

Der Grenzfall des idealen Leiters kann bei einigen Metallen, z. B. beim Blei, bei sehr tiefen Temperaturen weitestgehend erreicht werden. Kühlt man einen Bleidraht bis auf wenige Grad Kelvin ab, so gibt es eine scharf definierte Temperatur, bei der der Bleidraht den sich bewegendenden Elektronen keinen Widerstand mehr entgegensetzt. In diesem Augenblick ist ein Zustand erreicht, den man als Supraleitung bezeichnet und der sich u. a. dadurch auszeichnet, daß der fließende Strom zu keiner Erwärmung des Leiters führt. Wir sehen also, daß das Kennzeichen des elektrischen Stromes, nämlich seine Erwärmung, nicht untrennbar mit dem Begriff „elektrischer Strom“ verknüpft ist. In dem Ausnahmefall der Supraleitung fließt ein elektrischer Strom, ohne eine Stromwärme zu erzeugen. Schließlich bemerken wir noch, daß es die moderne Silikon-Chemie ermöglicht, Stoffe herzustellen, die je nach der chemischen Zusammensetzung teils als gute Leiter teils als Isolatoren Verwendung finden können.

Silikone sind Verbindungen ähnlich denen der organischen Chemie, bei denen aber an Stelle des Kohlenstoffes teilweise Silizium tritt¹⁾. Silikonöle stellen die besten Isolatoren dar, die mit heutigen Mitteln erzeugt werden können.

Für die meisten elektrischen Experimente wirkt sich der Umstand außerordentlich günstig aus, daß trockene Luft von normaler Temperatur ebenfalls einen guten Isolator darstellt, so daß man blanke Drähte, lediglich durch einen Luftzwischenraum voneinander getrennt, benutzen kann, wodurch sich die Verhältnisse wesentlich einfacher und übersichtlicher als z. B. in der Wärmelehre gestalten, wo es praktisch schwer hält, zwei wärmeleitende Substanzen in ausreichendem Maße voneinander zu isolieren.

4. Die Grundgröße der elektrischen Ladung q

Die Erscheinung der Erwärmung eines Leiters durch einen elektrischen Strom ist nicht das einzige Kennzeichen des elektrischen Stromes. Er vermag auch chemische Veränderungen im Leiter hervorzubringen. Dazu muß jedoch der Leiter ein Elektrolyt sein, also eine wäßrige Lösung, in der die Moleküle der gelösten Substanz teilweise in elektrisch geladene Ionen aufgespaltet sind. Leitet man durch einen solchen flüssigen Leiter einen elektrischen Gleichstrom, indem man z. B. die Anordnung der Abbildung 4 verwendet, so erkennt man, daß während des Fließens des elektrischen Stromes an den beiden in den flüssigen Elektrolyten eintauchenden Elektroden Gasblasen entstehen. Man erkennt, daß die eine Elektrode sich von der anderen unterscheidet. Diejenige, die mit dem negativen Pol der Spannungsquelle verbunden ist, zeigt eine stärkere Gasblasenentwicklung als die mit dem positiven Pol der Spannungsquelle verbundene. Auch kann man feststellen, daß an den Elektroden chemische Veränderungen auftreten. Handelt es sich bei dem Elektrolyten um eine wäßrige Kochsalzlösung und gibt man dieser etwas Phenolphthalein zu, so färbt sich die Umgebung der mit dem negativen Pol der Spannungsquelle verbundenen Elektrode rot.

Man kann ferner bei der Verwendung von Bleinitrat in wäßriger Lösung etwa in einer Versuchsanordnung, wie sie in der Abbildung 5 schematisch dargestellt ist, beobachten, daß sich an der gleichen Elektrode, die sich durch stärkere Gasblasenentwicklung und Rotfärbung ihrer Umgebung auszeichnete, auch metallisches Blei in feinen spitzen Nadeln abscheidet. Alle diese Experimente zeigen chemische Wirkungen eines elektrischen Stromes in einem wäßrigen Elektrolyten. Diejenige Elektrode, an der sich das metallische Blei abscheidet und die mit dem negativen Pol

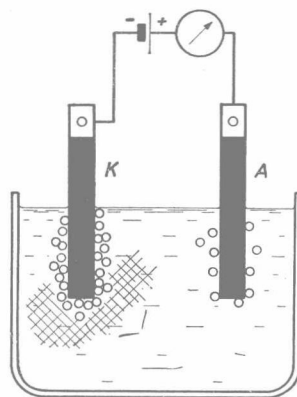
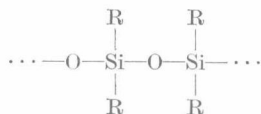


Abb. 4. Chemische Wirkung eines Stromes

Die Elektroden K und A tauchen in einen wäßrigen Elektrolyten ein. Gasblasen dargestellt durch kleine Kreise, chemische Veränderungen durch Kreuzschraffur

¹⁾ Grundsätzliche Struktur:



der Spannungsquelle verbunden ist, heißt die Kathode, die andere die Anode. Von der Tatsache, daß sich an der Kathode Metalle aus wäßriger Lösung abscheiden können, macht man zur Festlegung der Grundgröße der elektrischen Ladung Gebrauch. Wir haben früher ausgeführt, daß bei der Vereinbarung einer Grundgröße sowohl ein Meßverfahren als auch eine Meßvorschrift festgelegt werden müssen. Das Meßverfahren und die Meßvorschrift kann mit Hilfe der eben genannten chemischen Wirkung des elektrischen Stromes erfolgen. Scheiden sich an der aus Silber bestehenden Kathode durch den elektrischen Strom 1,118 Milligramm

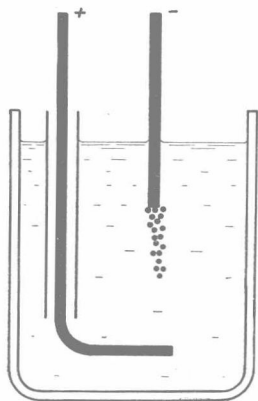


Abb. 5. Bleiabscheidung durch elektrischen Strom (Bleibaum)

Silber aus einer wäßrigen Lösung von Silbernitrat ab, so sagt man, daß die Ladungseinheit durch den elektrischen Stromkreis geflossen ist. Diese Ladungseinheit erhält den Namen Amperesekunde oder Coulomb. Eine Amperesekunde ist diejenige elektrische Ladung, die beim Fließen eines elektrischen Stromes aus einer wäßrigen Silbernitratlösung 1,118 Milligramm Silber zur Abscheidung bringt. Damit ist im Prinzip die Messung der elektrischen Ladung auf eine Wägung zurückgeführt. Man muß sich jedoch davor hüten, zu glauben, daß damit die Größe der elektrischen Ladung etwa auf die mechanische Größe des Gewichtes oder der Masse der abgeschiedenen Substanz zurückgeführt werden könnte. In früheren Zeiten war man bemüht, alle elektrischen Größen zwangsweise auf mechanische zurückzuführen. Es ergab sich dann eine durch Bruchpotenzen der Grundgrößen des alten CGS-Systems (Zentimeter-Gramm-Sekunde-System) gebildete elektrische Ladungs-

einheit. Von diesen Einheiten macht man in verschiedenen speziellen Zweigen der Physik noch Gebrauch. In der Technik, im täglichen Leben und in der Medizin setzt sich jedoch in immer stärkerem Maße das Einheitensystem durch, das unseren Ausführungen zugrunde liegt und in dem die elektrische Ladung die Einheit Amperesekunde oder Coulomb erhält.

Versuche haben für die Größe der elektrischen Elementarladung e^- , also der Ladung des Elektrons, den Wert

$$e^- = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Amperesekunde}$$

ergeben, und zwar trägt das Elektron eine negative elektrische Ladung. Daneben gibt es noch ein Elementarteilchen der positiven Elektrizitätsmenge im gleichen Betrage. Dieses erst in neuerer Zeit entdeckte Elementarteilchen heißt Positron. In einem metallischen Draht existieren vorwiegend freie Elektronen. Es findet also lediglich ein Transport von negativer elektrischer Ladung statt. In einem flüssigen Elektrolyten dagegen sind die Atome und Moleküle dissoziiert, d. h. aufgespalten in Ionen, von denen es positiv und negativ geladene gibt, und zwar deshalb, weil der Atomkern eine positive, durch Protonen gebildete elektrische Ladung verkörpert, während die Hüllenelektronen negative Ladungen repräsentieren. Werden nun durch den Vorgang der Dissoziation Elektronen der Hülle entfernt oder an ihr an-