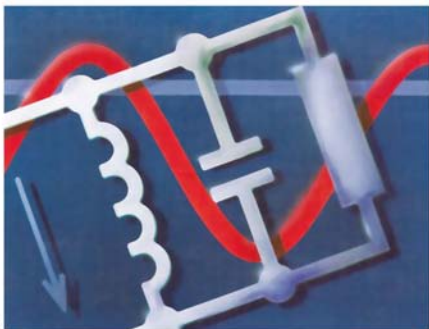


Vogel Fachbuch

Heinz Meister

Elektrotechnische Grundlagen

Elektronik 1



Elektronik 1

Heinz Meister

Elektrotechnische Grundlagen

Mit Versuchsanleitungen, Rechenbeispielen
und Lernziel-Tests

15. Auflage

Vogel Buchverlag

Zur Fachbuchgruppe «Elektronik» gehören die Bände:

Klaus Beuth/Olaf Beuth: Elementare Elektronik

Heinz Meister: Elektrotechnische Grundlagen
(Elektronik 1)

Klaus Beuth: Bauelemente
(Elektronik 2)

Klaus Beuth/Wolfgang Schmusch: Grundsaltungen
(Elektronik 3)

Klaus Beuth: Digitaltechnik
(Elektronik 4)

Helmut Müller/Lothar Walz: Mikroprozessortechnik
(Elektronik 5)

Wolfgang Schmusch: Elektronische Meßtechnik
(Elektronik 6)

Klaus Beuth/Richard Hanebuth/Günter Kurz/Christian Lüders: Nachrichtentechnik
(Elektronik 7)

Wolf-Dieter Schmidt: Sensorschaltungstechnik
(Elektronik 8)

Olaf Beuth/Klaus Beuth: Leistungselektronik
(Elektronik 9)

Weitere Informationen
www.vogel-buchverlag.de

ISBN 978-3-8343-3264-6

15. Auflage. 2012

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form
(Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen
Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des
Verlages reproduziert oder unter Verwendung
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt
oder verbreitet werden. Hiervon sind die in
§§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten
Ausnahmefälle nicht berührt.

Printed in Germany

Copyright 1974 by Vogel Business Media
GmbH & Co. KG, Würzburg

Vorwort

Dieses Lern- und Arbeitsbuch vermittelt grundlegende Kenntnisse, die zum Einarbeiten in die allgemeine Elektrotechnik, die Photovoltaik, die Elektronik oder deren spezielle Bereiche erforderlich sind.

Die oft abstrakten und komplexen elektrotechnischen Zusammenhänge werden anschaulich und leicht faßlich dargestellt. Viele Abbildungen, Skizzen, Schaltpläne, Versuchsbeschreibungen sowie eine ausführliche erklärende und herleitende Darstellung erleichtern das Verständnis und verdeutlichen die elektrotechnischen Vorgänge und Zusammenhänge. Auf allzuviel Mathematik wird bewußt verzichtet, aber auf das Klären des «Warum» bestimmter Fakten und Vorgänge großer Wert gelegt.

Zur Übung, Festigung, Sicherung und Kontrolle des Gelernten dienen durchgerechnete Beispiele und Merksätze in den einzelnen Abschnitten sowie Lernziel-Tests mit Verständnisfragen und Rechen- und Zeichenaufgaben am Ende eines jeden Kapitels. Die Lösungen der Lernziel-Testaufgaben befinden sich auf den letzten Buchseiten. Merksätze und bestimmte Formeln sind aus Gründen eines schnelleren Überblicks und des besseren Einprägens farbig hinterlegt.

Das Buch ist methodisch-didaktisch so gestaltet, daß es sowohl unterrichtsbegleitend in Schulen und in der beruflichen Weiterbildung wie auch zum Selbststudium erfolgreich eingesetzt werden kann. Es gibt Schülern, Studierenden, Ingenieuren, Meistern, Technikern und Facharbeitern aller Fachbereiche die Möglichkeit, die Grundlagen der Elektrotechnik/Elektronik auf leichtverständliche Art zu erwerben und anschließend auch in speziellen Bereichen zu erweitern.

Durch den Verzicht auf technische und mathematische Vorkenntnisse sowie Erarbeitung der elektrotechnischen Inhalte in kleinen verständlichen Schritten finden mit diesem Buch auch Nichtelektriker einfachen Zugang zur Elektrotechnik.

Freiburg

Heinz Meister

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Grundbegriffe der Elektrizität	17
1.1 Atome und Elektronen	17
1.2 Elektrische Ladung – Ladungsträger	18
1.2.1 Neutrale Atome – Atomaufbau	19
1.2.2 Ionen	20
1.3 Elektrischer Strom	21
1.3.1 Elektrische Leiter, Nichtleiter, Halbleiter	21
1.3.1.1 Leiter – Leitungsmechanismus	21
1.3.1.2 Nichtleiter	23
1.3.1.3 Halbleiter	23
1.3.1.4 Lernziel-Test	24
1.3.2 Stromkreis	25
1.3.3 Stromrichtung	25
1.3.3.1 Richtung des Elektronenstromes	25
1.3.3.2 Technische Stromrichtung	26
1.3.4 Stromstärke	27
1.3.5 Elektrizitätsmenge	28
1.3.6 Stromdichte in Leitern	29
1.3.7 Stromarten	30
1.3.8 Wirkungen des elektrischen Stromes	32
1.3.9 Lernziel-Test	34
1.4 Elektrische Spannung	34
1.4.1 Potential	36
1.4.2 Spannungsrichtung	37
1.4.3 Lernziel-Test	38
1.5 Elektrischerwiderstand	38
1.5.1 Spezifischer Widerstand	39
1.5.2 Elektrischer Widerstand von Leitungen	40
1.5.3 Leitwert und Leitfähigkeit	44
1.5.3.1 Lernziel-Test	46
1.5.4 Temperaturabhängigkeit des Widerstandes	47
1.5.4.1 Lernziel-Test	53
2 Stromkreisgesetze	55
2.1 Ohmsches Gesetz	55
2.1.1 Strom-Spannungs-Kennlinien (Widerstandskennlinien)	56
2.1.1.1 Lernziel-Test	58
2.2 Reihenschaltung von Widerständen	59

2.2.1	Unbelasteter Spannungsteiler	63
2.2.2	Vorwiderstand	65
2.2.3	Spannungsfall an Leitungen	66
2.2.3.1	Lernziel-Test	68
2.2.4	Leistungsarten	69
2.2.4.1	Leistungsbezeichnungen	70
2.2.4.2	Kennfarben von Adern bei isolierten Leitungen	71
2.2.4.3	Lernziel-Test	72
2.2.5	Überstrom-Schutzeinrichtungen	72
2.2.5.1	Leitungsschutzsicherungen (Schmelzsicherungen)	73
2.2.5.2	Geräteschutzsicherungen (Feinsicherungen)	73
2.2.5.3	Leitungsschutzschalter	74
2.2.5.4	Lernziel-Test	75
2.2.6	Strombelastbarkeit und Überstrom-Schutzeinrichtungen von Leitungen	76
2.2.6.1	Lernziel-Test	77
2.3	Parallelschaltung von Widerständen	77
2.3.1	Lernziel-Test	83
2.4	Kirchhoffsche Regeln	84
2.4.1	Erste Kirchhoffsche Regel (Knotenregel)	84
2.4.2	Zweite Kirchhoffsche Regel (Maschenregel)	85
2.4.2.1	Lernziel-Test	87
2.5	Gemischte Schaltungen	88
2.5.1	Erweiterte Reihenschaltung	88
2.5.2	Erweiterte Parallelschaltung	89
2.5.3	Belasteter Spannungsteiler	91
2.5.4	Widerstandsbrücke	92
2.5.4.1	Lernziel-Test	93
3	Arbeit und Leistung	95
3.1	Elektrische Arbeit – Energie	95
3.1.1	Zusammenhang zwischen Arbeit und Energie	97
3.2	Elektrische Leistung	98
3.3	Energieumwandlung	100
3.3.1	Einheiten für Energie und Arbeit – Umrechnungen	100
3.3.2	Umwandlungen von elektrischer Energie in Wärme	101
3.4	Wirkungsgrad	103
3.4.1	Lernziel-Test	105
4	Spannungserzeuger	107
4.1	Arten und Prinzip der Spannungserzeugung	107
4.1.1	Spannungserzeugung durch chemische Vorgänge	107
4.1.2	Spannungserzeugung durch Wärme	108
4.1.3	Spannungserzeugung durch Licht	109
4.1.4	Spannungserzeugung durch Verformung von Kristallen	110

4.1.5	Spannungserzeugung durch Induktion	111
4.1.6	Spannungserzeugung durch Reibung	111
4.2	Verhalten von Spannungserzeugern	111
4.2.1	Quellenspannung und Klemmenspannung	111
4.2.1.1	Leerlauf	111
4.2.1.2	Belastung	112
4.2.1.3	Kurzschluß	113
4.2.2	Leistungsanpassung	113
4.2.3	Spannungsanpassung (Konstant-Spannungsquellen)	115
4.2.4	Stromanpassung (Konstant-Stromquellen)	116
4.3	Schaltung von Spannungserzeugern	117
4.3.1	Reihenschaltung	117
4.3.2	Parallelschaltung	118
4.3.2.1	Parallelschaltung ungleicher Spannungsquellen	119
4.4	Lernziel-Test	120
5	Chemische Wirkung des Stromes	123
5.1	Elektrolyse	123
5.2	Technische Anwendung der Elektrolyse	124
5.3	Galvanische Elemente	125
5.3.1	Primärelemente	126
5.3.1.1	Zink-Kohle-Elemente	127
5.3.1.2	Alkali-Braunstein-Zink-Elemente (Alkali-Mangan- Element)	128
5.3.1.3	Quecksilberoxid-Knopfzellen	128
5.3.1.4	Weitere Primärelemente	129
5.4	Sekundärelemente	129
5.4.1	Bleiakkumulator	129
5.4.1.1	Aufbau des Bleiakkumulators	131
5.4.1.2	Kapazität des Akkumulators	132
5.4.1.3	Betrieb des Bleiakkumulators	132
5.4.2	Stahlakkumulator	132
5.4.3	Ladung von Akkumulatoren	133
5.4.4	Vergleich von Stahlakkumulatoren mit Bleiakkumulatoren	134
5.5	Elektrochemische Korrosion	134
5.5.1	Elektrochemische Korrosion durch Elementbildung	135
5.5.2	Streustromkorrosion	136
5.6	Lernziel-Test	136
6	Magnetismus	139
6.1	Erscheinungsformen des Magnetismus	139
6.1.1	Magnete	139
6.1.2	Kraftwirkung zwischen Magnetpolen	140
6.1.3	Molekularmagnetismus	140
6.1.4	Magnetfelder	141

6.1.5	Lernziel-Test	144
6.2	Größen und Einheiten des Magnetismus	145
6.2.1	Magnetische Durchflutung (magnetische Urspannung)	145
6.2.2	Magnetische Feldstärke	146
6.2.3	Magnetischer Fluß	147
6.2.4	Magnetische Flußdichte	148
6.2.5	Lernziel-Test	149
6.3	Magnetisches Verhalten von Werkstoffen	150
6.3.1	Magnetischer Widerstand	150
6.3.2	Permeabilität (magnetische Leitfähigkeit)	150
6.3.3	Beziehung zwischen magnetischer Flußdichte und Feldstärke	153
6.3.3.1	Magnetisierungskennlinien	153
6.3.3.2	Ummagnetisierungskennlinie (Hysteresekurve)	155
6.3.3.3	Magnetwerkstoffe	156
6.3.4	Lernziel-Test	158
6.4	Kraftwirkungen im Magnetfeld	159
6.4.1	Kraftwirkung zwischen zwei Magneten	159
6.4.2	Kraftwirkung auf stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld	160
6.4.3	Kraftwirkung zwischen zwei stromdurchflossenen Leitern	163
6.4.4	Lernziel-Test	165
6.5	Induktionsvorgänge	166
6.5.1	Induktion der Bewegung (Generatorprinzip)	166
6.5.2	Induktion der Ruhe (Transformatorprinzip)	168
6.5.3	Wirbelströme	171
6.5.3.1	Wirbelströme infolge Induktion der Bewegung	171
6.5.3.2	Wirbelströme infolge Induktion der Ruhe	172
6.5.4	Selbstinduktion	173
6.5.5	Induktivität	175
6.5.6	Lernziel-Test	176
7	Elektrisches Feld mit Kondensator	177
7.1	Elektrisches Feld	177
7.1.1	Elektrische Feldlinien	178
7.1.2	Elektrische Feldstärke	179
7.1.3	Influenz	181
7.1.4	Abschirmung elektrischer Felder	182
7.1.5	Dielektrische Polarisation	183
7.1.6	Lernziel-Test	184
7.2	Kondensator	184
7.2.1	Laden und Entladen des Kondensators	185
7.2.2	Kapazität und Ladungsmenge	186
7.2.3	Kondensatorarten	189
7.2.3.1	Kondensatoren mit fester Kapazität	190
7.2.3.2	Kondensatoren mit veränderlicher Kapazität	192

7.2.3.3	Beschriftung von Kondensatoren	192
7.2.4	Schaltung von Kondensatoren	193
7.2.4.1	Parallelschaltung von Kondensatoren	193
7.2.4.2	Reihenschaltung von Kondensatoren	194
7.2.5	Lernziel-Test	196
8	Wechselstrom	199
8.1	Grundbegriffe des Wechselstromes	199
8.1.1	Arten von Wechselgrößen	200
8.1.2	Erzeugen einer sinusförmigen Wechselspannung	201
8.1.3	Kennwerte der Sinusspannung	203
8.1.3.1	Amplitude, Augenblickswert	203
8.1.3.2	Periode, Frequenz, Phase	204
8.1.3.3	Kreisfrequenz	206
8.1.3.4	Gleichrichtwert	207
8.1.3.5	Effektivwert	208
8.1.3.6	Grafische Darstellung von Wechselspannungen und Wechselströmen	210
8.1.3.7	Phasenverschiebung	211
8.1.4	Lernziel-Test	212
8.2	Wechselstromwiderstände	213
8.2.1	Ohmscher Widerstand an Wechselspannung (Wirkwiderstand)	213
8.2.2	Spule an Wechselspannung (induktiver Blindwiderstand und Wirkwiderstand)	214
8.2.2.1	Ideale Spule (rein induktiver Blindwiderstand)	215
8.2.3	Scheinwiderstand	218
8.2.4	Kondensator an Wechselspannung (kapazitiver Blindwiderstand)	219
8.2.5	Frequenzabhängigkeit der Wechselstromwiderstände	223
8.2.5.1	Wirkwiderstand	223
8.2.5.2	Induktiver Blindwiderstand	224
8.2.5.3	Kapazitiver Blindwiderstand	224
8.2.6	Lernziel-Test	224
8.3	Schaltung von Wechselstromwiderständen	225
8.3.1	Reihenschaltung von Wirkwiderstand und induktivem Blindwiderstand (Spule)	225
8.3.1.1	Zeigerbild	226
8.3.1.2	Spannungsdreieck	227
8.3.1.3	Widerstandsdreieck	228
8.3.2	Reihenschaltung von Wirkwiderstand und kapazitivem Blindwiderstand	232
8.3.2.1	Zeigerbild	232
8.3.2.2	Spannungsdreieck	232
8.3.2.3	Widerstandsdreieck	233

8.3.3	Reihenschaltung von Wirk-, induktivem und kapazitivem Blindwiderstand	234
8.3.3.1	Zeigerbild, Spannungsdreieck	234
8.3.3.2	Widerstandsdreieck	235
8.3.4	Parallelschaltung von Wirkwiderstand und kapazitivem Blindwiderstand	236
8.3.4.1	Zeigerbild	237
8.3.4.2	Stromdreieck	238
8.3.4.3	Leitwertdreieck	239
8.3.5	Parallelschaltung von Wirk-, induktivem und kapazitivem Blindwiderstand	239
8.3.5.1	Zeigerbild, Stromdreieck	240
8.3.5.2	Leitwertdreieck	241
8.3.6	Lernziel-Test	241
8.4	Resonanz im Wechselstromkreis	242
8.4.1	Spannungsresonanz (Reihenresonanz)	243
8.4.2	Resonanzfrequenz (Thomsonsche Schwingungsformel)	246
8.4.3	Stromresonanz (Parallelresonanz)	247
8.4.4	Lernziel-Test	250
8.5	Leistung und Arbeit bei Wechselstrom	250
8.5.1	Leistung bei Wirklast	250
8.5.2	Leistung bei induktiver Belastung	251
8.5.3	Leistung bei kapazitiver Belastung	252
8.5.4	Leistung bei Belastung durch Wirkwiderstand und induktiven Blindwiderstand	253
8.5.5	Leistungsdreieck – Leistungsgleichungen	254
8.5.6	Leistungsfaktor	256
8.5.7	Arbeit bei Wechselstrom	257
8.5.8	Lernziel-Test	258
9	Dreiphasenwechselstrom – Drehstrom	261
9.1	Erzeugung und Darstellung	261
9.2	Verkettungsschaltungen	262
9.2.1	Sternschaltung	263
9.2.2	Dreieckschaltung	267
9.3	Leistung bei Drehstrom	269
9.4	Drehfeld	272
9.5	Vorteile von Drehstrom gegenüber Wechselstrom	274
9.6	Lernziel-Test	274
10	Transformatoren	277
10.1	Aufbau und Wirkungsweise	277
10.2	Bauformen	278
10.3	Verhalten bei Leerlauf und bei Belastung	279
10.4	Spannungsübersetzung	280

10.5	Stromübersetzung	282
10.6	Übersetzungsverhältnis, Nennübersetzung	283
10.7	Widerstandsübersetzung	284
10.8	Leistung, Verluste und Wirkungsgrad	285
10.8.1	Lernziel-Test	286
10.9	Arten und Verwendung von Transformatoren	287
10.9.1	Spartransformatoren	287
10.9.2	Kleintransformatoren	288
10.9.2.1	Sicherheits- oder Schutztransformatoren	289
10.9.2.2	Spielzeugtransformatoren	290
10.9.2.3	Klingeltransformatoren	290
10.9.2.4	Trenntransformatoren	290
10.9.2.5	Handleuchtentransformatoren	291
10.9.2.6	Netzanschlußtransformatoren	291
10.9.3	Meßwandler	291
10.9.3.1	Spannungswandler	292
10.9.3.2	Stromwandler	292
10.9.4	Lernziel-Test	294
11	Elektrische Meßtechnik	295
11.1	Meßtechnische Grundbegriffe	295
11.1.1	Analoge und digitale Meßgeräte	295
11.1.2	Vor- und Nachteile von Analog- und Digitalanzeigen	295
11.2	Analoge Meßgeräte	296
11.2.1	Meßfehler, Genauigkeitsklassen	296
11.2.2	Empfindlichkeit, Eigenverbrauch, innerer Widerstand	297
11.2.3	Kennzeichnung von Meßgeräten	298
11.2.3.1	Lernziel-Test	298
11.2.4	Meßwerke von analogen Meßgeräten	299
11.2.4.1	Dreheisenmeßwerk	299
11.2.4.2	Drehspulmeßwerk	301
11.2.4.3	Elektrodynamisches Meßwerk	303
11.2.4.4	Elektronenstrahl-Oszilloskop	304
11.2.4.5	Lernziel-Test	307
11.3	Messen mit analogen Meßgeräten	308
11.3.1	Strommessung	308
11.3.2	Spannungsmessung	309
11.3.3	Meßbereichserweiterung	310
11.3.3.1	Meßbereichserweiterung von Spannungsmessern	310
11.3.3.2	Meßbereichserweiterung von Strommessern	312
11.3.3.3	Lernziel-Test	313
11.3.4	Widerstandsmessung	314
11.3.4.1	Indirekte Widerstandsmessung mit Strom- und Spannungsmeßgerät	314
11.3.4.2	Direkte Widerstandsmessung mit Widerstandsmesser	315

11.3.4.3	Widerstandsmeßbrücke	315
11.3.5	Leistungsmessung	316
11.3.5.1	Leistungsmessung durch Strom- und Spannungsmessung	316
11.3.5.2	Leistungsmessung mit Leistungsmesser	317
11.3.6	Messung mit Vielfachmeßgeräten (Universal-Meßinstrumente)	317
11.3.7	Lernziel-Test	319
11.4	Digitale Meßgeräte	320
11.4.1	Aufbau und Wirkungsweise von Digitalmeßgeräten	320
11.4.2	Meßfehler, Genauigkeit	321
11.5	Messen mit digitalen Meßgeräten	323
11.5.1	Gleichspannungsmessung	323
11.5.2	Gleichstrommessung	323
11.5.3	Wechselspannungs- und Wechselstrommessung	323
11.5.4	Widerstandsmessung	323
11.5.5	Vielfachmeßgeräte (digitale Multimeter)	323
11.5.6	Leistungsmessung	324
11.5.7	Handhabung von digitalen Multimetern	324
11.5.8	Lernziel-Test	325
11.6	Messen und darstellen mit dem Oszilloskop	325
11.6.1	Bedienungselemente des Oszilloskops	325
11.6.2	Grundeinstellung des Oszilloskops	326
11.6.3	Spannungsdarstellung und -messung	326
11.6.4	Stromdarstellung und -messung	327
11.6.5	Frequenzmessung	327
11.6.6	Darstellung von zwei Größen	328
11.6.7	Lernziel-Test	328
12	Installationsschaltungen (Lichtstromkreise)	329
12.1	Schaltzeichen und Kennbuchstaben	329
12.2	Schaltpläne für Installationsschaltungen	331
12.2.1	Ausschaltung	331
12.2.1.1	Stromlaufplan in zusammenhängender Darstellung	331
12.2.1.2	Stromlaufplan in aufgelöster Darstellung	333
12.2.1.3	Installationsplan	334
12.2.1.4	Übersichtsschaltplan	334
12.2.2	Ausschaltung mit Steckdose	335
12.2.3	Serienschaltung	336
12.2.4	Wechselschaltung	336
12.3	Lernziel-Test	338
13	Elektrische Unfälle und deren Verhütung	339
13.1	Ursachen elektrischer Unfälle	339
13.2	Unfallgefahren des elektrischen Stromes	340
13.3	Maßnahmen bei Stromunfällen	342

13.4	Schutzmaßnahmen gegen gefährliche Körperströme	342
13.4.1	Schutz gegen direktes Berühren	343
13.4.2	Schutz bei indirektem Berühren	343
13.4.2.1	Fehlerarten	344
13.4.3	Schutzmaßnahmen ohne Schutzleiter	345
13.4.3.1	Schutzisolierung	345
13.4.3.2	Schutzkleinspannung	346
13.4.3.3	Schutztrennung	347
13.4.4	Schutzmaßnahmen mit Schutzleiter	348
13.4.4.1	Leiterarten	348
13.4.4.2	Netzformen	350
13.4.4.3	Schutzmaßnahmen im TN-Netz	350
13.4.4.4	Fehlerstrom(FI)-Schutzeinrichtung	350
13.4.4.5	Schutzmaßnahmen im TT-Netz	353
13.4.4.6	Schutzmaßnahmen im IT-Netz	354
13.5	Schutzklassen	354
13.6	Lernziel-Test	355
14	Photovoltaik (Solarstromtechnik)	357
14.1	Grundelemente der Solarstromtechnik	357
14.1.1	Solarzellen	357
14.1.1.1	Aufbau, Wirkungsweise und Verhalten von Solarzellen	357
14.1.2	Solarmodule	360
14.1.3	Solargeneratoren	360
14.1.4	Bausteine von Solarstromanlagen	361
14.1.4.1	Stromspeicher	361
14.1.4.2	Laderegler	361
14.1.4.3	Wechselrichter	361
14.1.4.4	Schaltzeichen der Bausteine von Solarstromanlagen	361
14.2	Aufbau und Wirkungsweise von Solarstromanlagen	362
14.2.1	Autonome Solarsysteme (Solare Inselssysteme)	362
14.2.1.1	Direktversorgung von Gleichstromverbrauchern ..	362
14.2.1.2	Autonome Solarsysteme mit Speicherung	362
14.2.1.3	Autonome Solarsysteme für Wechselstrom	363
14.2.1.4	Autonome Solarsysteme mit Zusatzenergie	364
14.2.2	Netzgekoppelte Solarsysteme	365
14.2.3	Lernzieltest	366
15	Größen, Einheiten und Kurzzeichen	367
15.1	Grundbegriffe	367
15.2	Basisgrößen und Basiseinheiten	368
15.3	Dezimale, Vielfache und Teile von Einheiten	369
15.4	Abgeleitete gesetzliche Einheiten	370
15.5	Lernziel-Test	371

16 Anhang	373
Spezifischer Widerstand, Elektrische Leitfähigkeit, Temperaturkoeffizient	373
17 Lösungen der Lernziel-Tests	375
Stichwortverzeichnis	401

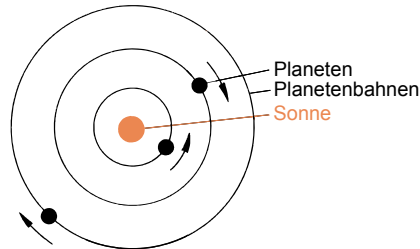
1 Grundbegriffe der Elektrizität

1.1 Atome und Elektronen

Zerlegt man einen Körper, z. B. aus Kupfer, in immer kleinere Teile, so erhält man am Ende das Atom. Das Wort Atom kommt aus dem Griechischen und heißt «das Unteilbare».

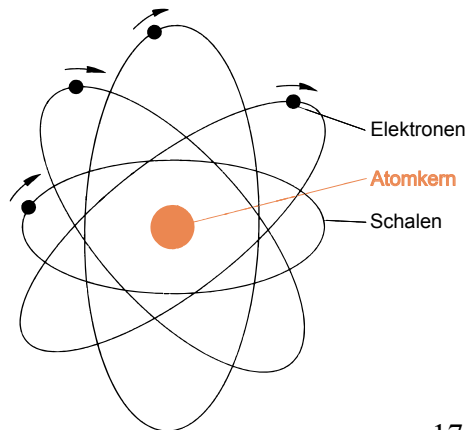
Erst in neuerer Zeit konnte durch Versuche der Nachweis erbracht werden, daß auch das Atom zusammengesetzt ist. Aus vielen Versuchsergebnissen haben Physiker wie RUTHERFORD und BOHR den Schluß gezogen, daß ein Atom ähnlich aufgebaut sein muß wie unser Sonnensystem (Bild 1.1).

Bild 1.1 Modell des Sonnensystems



Nach dieser Modellvorstellung besteht ein Atom aus einer Sonne – dem *Atomkern* – und aus den um diesen Kern auf kreisförmigen oder elliptischen Bahnen kreisenden Planeten – den *Elektronen*. Ihre Bahnen umgeben den Kern schalenförmig und bilden die sogenannten *Elektronenschalen* (Bild 1.2).

Bild 1.2 Atommodell



Die Elektronen der äußersten Schale heißen *Valenzelektronen*; sie sind vom Kern am weitesten entfernt und daher am besten von außen zu beeinflussen. Sie bestimmen das chemische und elektrische Verhalten des Atoms.

1.2 Elektrische Ladung – Ladungsträger

Die Elektronen umkreisen den Atomkern mit einer sehr großen Geschwindigkeit (ca. 2200 km/s). Trotz des geringen Elektronengewichts muß daher bei der Kreisbewegung eine relativ große Fliehkraft auftreten, die nach außen wirkt und versucht, die Elektronen aus der Kreisbahn zu befreien. Welche Kraft hält nun das Elektron auf seiner Kreisbahn um den Kern fest?

Die Kraft, die die Erde auf ihrer Kreisbahn festhält, ist die Massenanziehung. Die Massenanziehung zwischen Elektronen und Atomkern reicht aber, wie sich rechnerisch nachweisen läßt, bei weitem nicht aus, um die Elektronen auf ihrer Kreisbahn zu halten. Es muß sich also hier um andere Kräfte handeln, nämlich elektrische Kräfte.

Zwischen Atomkern und Elektronen bestehen elektrische Kräfte.

Solche elektrischen Kräfte lassen sich einfach nachweisen. Reibt man z. B. eine Kunststoffolie mit einem Wollappen, so üben diese auf Papier, Watte oder Staub eine Anziehungskraft aus, die wesentlich größer ist als die Massenanziehungskraft.

Die Ursache für elektrische Kräfte nennt man elektrische Ladung.

Das Elektron hat die Eigenschaft, auf den Atomkern eine elektrische Kraft auszuüben. Das Elektron besitzt also elektrische Ladung. Man spricht vom Elektron als einem *Ladungsträger*.

Da der Atomkern ebenfalls die Eigenschaft hat, elektrische Kraft auszuüben, besitzt er ebenfalls elektrische Ladung.

Es läßt sich nachweisen, daß sich Elektronen nicht anziehen, sondern abstoßen. Ebenso verhalten sich Atomkerne (Bild 1.3).

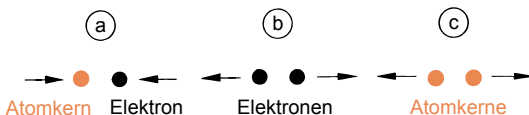


Bild 1.3

Kraftwirkung zwischen

a) Atomkern und Elektron,

b) Elektronen,

c) Atomkernen

Da Elektronen sich gegenseitig abstoßen, Atomkern und Elektronen sich aber anziehen, muß der Atomkern anders geladen sein, d. h. eine andere Ladungsart tragen als das Elektron.

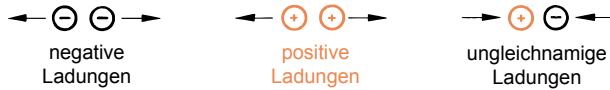
Die Ladung des Atomkerns wird *positive Ladung* und die Ladung des Elektrons *negative Ladung* genannt.

Damit gilt für elektrische Ladungen:

Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab, ungleichnamige Ladungen ziehen sich an.

Bild 1.4

Kraftwirkung von elektrischen Ladungen



1.2.1 Neutrale Atome – Atomaufbau

Den einfachsten Aufbau zeigt das Wasserstoffatom. Es setzt sich zusammen aus einem *Elektron* und einem *Proton*, das den Atomkern darstellt.

Das Elektron trägt die kleinste vorkommende elektrische Ladung, die sogenannte *Elementarladung*.

Elektronen sind die Träger der negativen Elementarladungen – Protonen die Träger der positiven Elementarladungen.

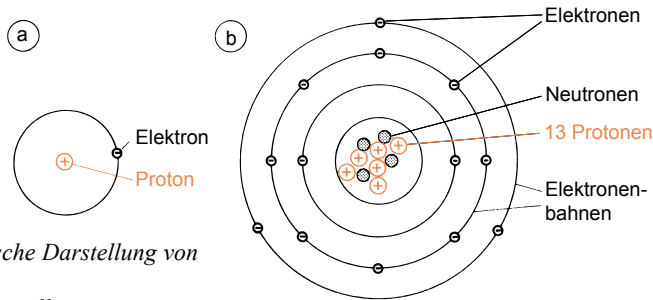


Bild 1.5 Schematische Darstellung von Atomen

- a) Wasserstoffatom,
- b) Aluminiumatom

Die negative Elementarladung des Elektrons ist genauso groß wie die positive Elementarladung des Protons. Die Ladungen des Atoms heben sich daher in ihren Wirkungen genau auf. Das Atom ist nach außen *elektrisch neutral*.

Elektrisch neutrale Atome besitzen genauso viele positive wie negative elektrische Ladungen.

Das Aluminiumatom z. B. besitzt 13 Elektronen und daher auch 13 Protonen. Außer Protonen enthalten Atomkerne auch elektrisch neutrale Teilchen, die sogenannten *Neutronen*. Protonen und Neutronen bestimmen im wesentlichen das Gewicht des Atoms.

Alle anderen Atome, man kennt insgesamt über 100, sind ähnlich aufgebaut. Die Verteilung der Elektronen auf den Elektronenbahnen erfolgt nach bestimmten Gesetzen. Dabei ist aber die Zahl der Elektronen immer gleich der Zahl der Protonen.

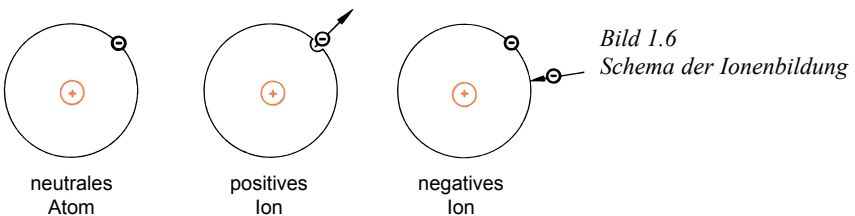
1.2.2 Ionen

Entnimmt man einem Atom Elektronen, so besitzt das Atom mehr positive Ladungen als negative. Das Atom, das nun insgesamt positiv geladen ist, übt daher nach außen eine elektrische Wirkung aus, es zieht negative Ladungen an.

Lagert man einem Atom Elektronen an, so ist es insgesamt negativ geladen und zieht positive Ladungen an.

Solche geladenen Atome können umgekehrt auch von entgegengesetzten Ladungen angezogen, d. h. bewegt werden. Aus diesem Grund heißen solche Atome *Ionen* (Ion = der Wandernde, griech.).

Positiv oder negativ geladene Atome oder Atomverbände heißen Ionen.



Zusammenfassend läßt sich noch sagen:

Elektronenüberschuß ergibt negative Ladung,
Elektronenmangel ergibt positive Ladung.

1.3 Elektrischer Strom

Unter elektrischem Strom versteht man grundsätzlich die gerichtete Bewegung von Ladungen.

Die Ladungsträger können sowohl Elektronen als auch Ionen sein. Ein elektrischer Strom kann also nur in solchen Stoffen fließen, in denen Ladungsträger in genügender Zahl vorhanden und frei beweglich sind.

1.3.1 Elektrische Leiter, Nichtleiter, Halbleiter

1.3.1.1 Leiter – Leitungsmechanismus

Stoffe, die viele und frei bewegliche Ladungsträger besitzen, heißen Leiter.

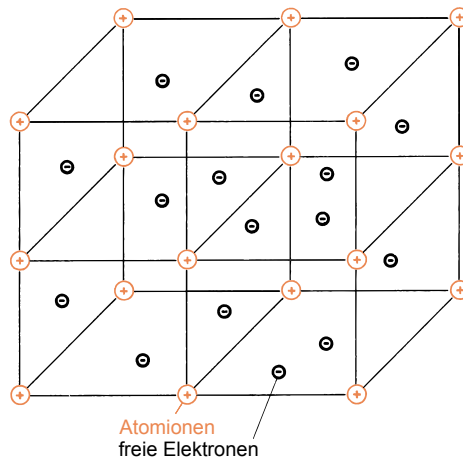
Man unterscheidet:

Elektronenleiter

Zu ihnen gehören die *Metalle*, wie z. B. Kupfer, Aluminium, Silber, Gold, Eisen und auch Kohle.

Metallatome gehen eine sogenannte *Metallbindung* ein. Dabei geben die einzelnen Metallatome alle Valenzelektronen (Elektronen der äußersten Schale) ab und werden hierdurch zu positiven Atomionen.

Bild 1.7
Raumgitter von Metallen
mit Elektronenwolke



Die Ionen nehmen einen bestimmten gleichmäßigen Abstand zueinander ein und bilden ein sogenanntes *Raumgitter* (Bild 1.7).

Die Elektronen bewegen sich zwischen den fest verankerten Ionen wie eine Wolke oder ein Gas und sind deshalb innerhalb des Raumgitters relativ leicht beweglich. Sie werden *freie Elektronen* genannt. Die negativ geladene Elektronenwolke hält praktisch die positiv geladenen Atomionen zusammen.

Ein Kupferwürfel mit 1 cm Kantenlänge enthält ca. 10^{23} (das ist eine Eins mit 23 Nullen) freie Elektronen.

Durch elektrischen Druck in einer bestimmten Richtung, den man in der Elektrotechnik Spannung nennt, werden die freien Elektronen des Leiters durch das Gitter getrieben (Bild 1.8). Die Leitungselektronen transportieren damit ihre negative Ladung in eine bestimmte Richtung. Man erhält einen *Elektronenstrom*.

Es steht damit fest:

Der elektrische Strom (Elektronenstrom) in einem metallischen Leiter besteht in der gerichteten Bewegung der freien Elektronen des Leiterwerkstoffes. Durch Ladungsbewegung tritt keine stoffliche Veränderung ein.

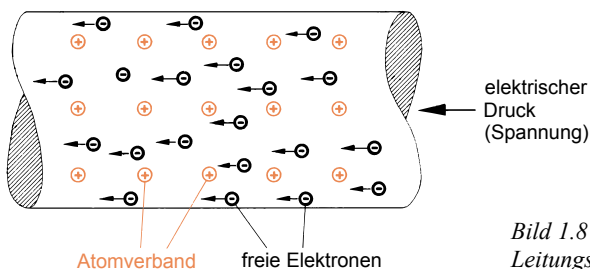


Bild 1.8
Leitungselektronenbewegung bei Metallen

Die Strömungsgeschwindigkeit ist von der *Stromdichte* (s. Abschnitt 1.3.6) abhängig. In metallischen Leitern üblicher Belastung beträgt die Elektronengeschwindigkeit nur etwa 3 mm/s, jedoch pflanzt sich der Anstoßimpuls annähernd mit Lichtgeschwindigkeit $c = 300\,000$ km/s fort. Man unterscheidet daher zwischen Impulsgeschwindigkeit und Elektronengeschwindigkeit.

Beispiel:

- a) Wie lange braucht ein Elektron bei einer mittleren Geschwindigkeit $v = 3$ mm/s, um $s = 1200$ m in einem Drahtleiter zurückzulegen?
- b) Wie lange braucht der Impuls für die gleiche Entfernung?

Lösung: a) Geschwindigkeit: $v = \frac{s}{t}$; Zeit: $t = \frac{s}{v}$

$$t = \frac{1200 \text{ m}}{0,003 \text{ m/s}} = 400\,000 \text{ s} = \frac{400\,000}{3600} \text{ h} = 111 \text{ Stunden}$$

b) $t = \frac{s}{v}$

$$t = \frac{1200 \text{ m}}{300\,000\,000 \text{ m/s}} = \frac{4}{1\,000\,000} \text{ s} = \underline{0,000004 \text{ s}}$$

Ionenleiter

Dazu gehören *Elektrolyte* (leitende Flüssigkeiten), *Schmelzen* (z. B. Aluminiumschmelze) und *ionisierte Gase*. Die Träger der Ladungen sind hierbei positive und negative Ionen. Man erhält einen *Ionenstrom*.

Der elektrische Strom (Ionenstrom) in einem Elektrolyt, einer Schmelze oder einem ionisierten Gas besteht in der gerichteten Bewegung der Ionen des leitenden Stoffes. Es tritt hierbei ein Stofftransport ein.

Der Vorgang der Ionenleitung wird in Abschnitt 5.1 ausführlich behandelt.

1.3.1.2 Nichtleiter

Stoffe, die nur wenige und an die einzelnen Moleküle gebundene Ladungsträger besitzen, heißen Nichtleiter.

Zu ihnen zählen *feste Stoffe*, wie Kunststoffe, Gummi, Glas, Porzellan, Glimmer, Lacke, Hartpapier, Papier, Seide, Asbest, und *Flüssigkeiten*, wie reines Wasser, Öle, Fette, und auch *Vakuum* sowie *Gase* (auch Luft) unter bestimmten Bedingungen. Diese Stoffe werden teilweise auch *Isolierstoffe* genannt, da man hiermit stromführende Leiter gegeneinander elektrisch isolieren kann.

1.3.1.3 Halbleiter

Halbleiter sind Stoffe, bei denen erst durch äußere Einflüsse Valenzelektronen freiwerden und dadurch Leitfähigkeit eintritt.

Zu ihnen gehören Silizium, Selen, Germanium und Kupferoxidul.

Bei tiefen Temperaturen sind die Valenzelektronen dieser Stoffe so gebunden, daß keine freien Elektronen im Gitter vorhanden sind. Es liegt somit ein Nichtleiter vor.

Durch Erwärmen (Energiezufuhr) werden teilweise Elektronen aus dem Verband gelöst, und es entstehen frei bewegliche Elektronen. Damit liegt ein Leiter vor. Auch durch andere Einflüsse, wie z. B. Licht und magnetische Felder, ändern sich die elektrischen Eigenschaften der Halbleiter.

1.3.1.4 Lernziel-Test

Verständnisfragen

1. Woraus setzt sich ein Atom zusammen?
2. Was versteht man unter Valenzelektronen?
3. Was versteht man unter einem Ladungsträger?
4. Wodurch ist ein neutrales Atom gekennzeichnet?
5. Was versteht man unter der Elementarladung?
6. Wie wirken Ladungen aufeinander?
7. Wann spricht man von Ionen?
8. Was versteht man unter elektrischem Strom?
9. Welche Ladungsträger bestimmen den Strom in Metallen und welche in Elektrolyten?
10. Was versteht man unter freien Elektronen?
11. Mit welcher Idealgeschwindigkeit pflanzt sich ein elektrischer Impuls in einer Leitung fort?
12. Wodurch unterscheiden sich prinzipiell elektrische Leiter, Nichtleiter und Halbleiter?
13. Nennen Sie einige Leiterwerkstoffe.
14. Was versteht man unter elektrischen Isolierstoffen? Nennen Sie einige.

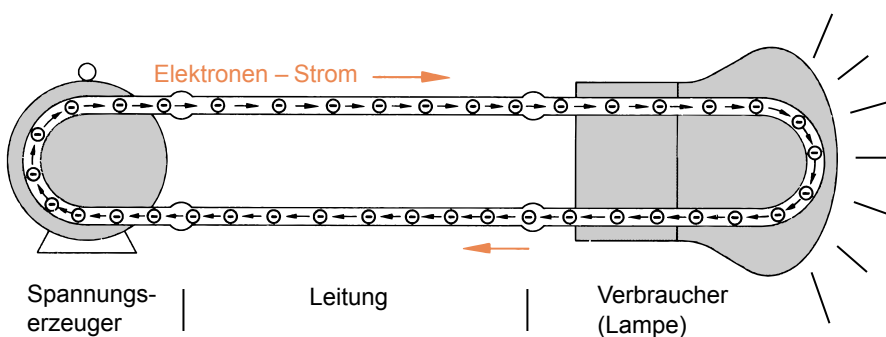


Bild 1.9 Modell eines Stromkreises

1.3.2 Stromkreis

Elektrische Geräte, allgemein als Verbraucher bezeichnet, werden mit dem Spannungserzeuger durch eine Leitung verbunden, die aus zwei Leitern (zwei Adern) besteht, nämlich dem Hin- und Rückleiter (Bild 1.9). Die durch den Spannungserzeuger verursachte Strömung der freien Elektronen legt einen in sich geschlossenen Weg zurück, den man als Stromkreis bezeichnet.

Ein einfacher elektrischer Stromkreis besteht aus dem Spannungserzeuger, dem Verbraucher und der Verbindungsleitung (Hin- und Rückleiter).

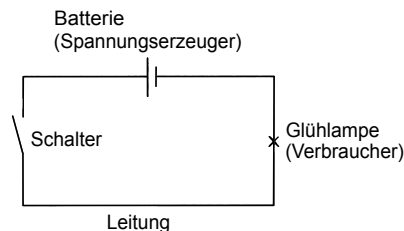
Zu beachten ist dabei:

Ein elektrischer Strom kann nur in einem geschlossenen Leiterkreis fließen.

Durch Einbau eines Schalters in den Stromkreis kann der Strom beliebig eingeschaltet oder unterbrochen werden.

Da obige gegenständliche Darstellung eines Stromkreises zu kompliziert ist, wählt man in der Praxis Schaltpläne mit einfachen genormten Symbolen, die man Schaltzeichen nennt. Der Schaltplan veranschaulicht dabei das Zusammenwirken zwischen den Bauteilen einer Schaltung.

*Bild 1.10
Schaltplan eines einfachen
Stromkreises*



1.3.3 Stromrichtung

1.3.3.1 Richtung des Elektronenstromes

Bildet man einen geschlossenen elektrischen Stromkreis, so ergibt sich folgender Vorgang:

Am negativen Pol des Spannungserzeugers (Elektronenüberschuß) werden die angrenzenden freien Leitungselektronen zum Verbraucher gestoßen. Am positiven Pol (Elektronenmangel) werden die angrenzenden freien Leitungselektronen angezogen. Dadurch entsteht insgesamt ein Elektronenstrom in einer bestimmten Richtung.

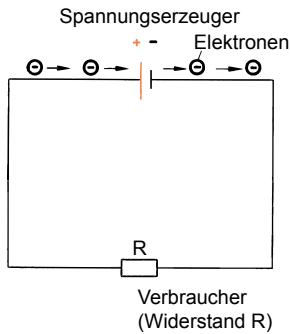


Bild 1.11 Elektronenstromrichtung

Der Elektronenstrom fließt vom negativen Pol des Spannungserzeugers über den Verbraucher zum positiven Pol.

1.3.3.2 Technische Stromrichtung

Vor Kenntnis der Elektronentheorie hatte man angenommen, daß in Metallen positive Ladungsträger für den Leitungsmechanismus verantwortlich sind und demzufolge der Strom vom positiven Pol über den Verbraucher zum negativen Pol, also dem tatsächlichen Elektronenstrom gerade entgegengesetzt, fließt. Obwohl heute diese ursprüngliche Annahme widerlegt ist, hat man in der Elektrotechnik die ursprünglich angenommene Stromrichtung aus praktischen Erwägungen beibehalten. Man spricht dabei zur Unterscheidung gegenüber der *Elektronenstromrichtung* von der *technischen Stromrichtung* oder auch allgemein von der *Stromrichtung*.

Der elektrische Strom fließt vom positiven Pol des Spannungserzeugers über den Verbraucher zum negativen Pol.

Die Stromrichtung wird in Schaltungen durch einen Strompfeil angezeigt (Bild 1.12).

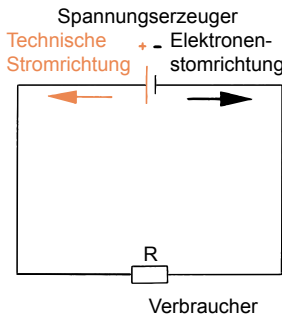


Bild 1.12 Technische und Elektronenstromrichtung

1.3.4 Stromstärke

Je mehr Elektronen in einer Sekunde durch einen Leiter fließen, um so größer ist die Stärke des elektrischen Stromes, die *Stromstärke*.

Durchströmen 6,24 Trillionen Elektronen ($6,24 \cdot 10^{18}$) je Sekunde den Leiterquerschnitt, so nennt man diese Stromstärke 1 *Ampere*.

Damit läßt sich sagen:

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{Elektrizitätsmenge}}{\text{Zeit}}$$

Das Ampere ist die gesetzliche Basiseinheit für die elektrische Stromstärke.

In der Technik ist es nun üblich, zur Vereinfachung Wortbezeichnungen für technische Größen, wie z. B. Stromstärke, durch *Formelzeichen* zu ersetzen und für Einheitenennamen Kurzzeichen (*Einheitenzeichen*) zu führen.

Formelzeichen für Stromstärke ist I

Einheitenzeichen für Ampere ist A

Vielfache und Teile der Einheit:

1 kA	= 1 Kiloampere	= 1000 A	= 10^3 A
1 mA	= 1 Milliampere	= $\frac{1}{1000}$ A	= 10^{-3} A
1 μ A	= 1 Mikroampere	= $\frac{1}{1000000}$ A	= 10^{-6} A
1 nA	= 1 Nanoampere	= $\frac{1}{1000000000}$ A	= 10^{-9} A

Im «Gesetz über Einheiten im Meßwesen» vom 2. Juli 1969 ist die Stromstärke als *Basisgröße* festgelegt und die Basiseinheit Ampere mit Hilfe der Kraftwirkung des Stromes (siehe Abschnitt 6.4.3) definiert.

Nähere Erläuterungen und Angaben über Einheiten, Einheitenennamen, Einheitenzeichen sowie das Gesetz über Einheiten im Meßwesen finden sich in Kapitel 15.

Die Stromstärken in der Elektrotechnik bewegen sich in sehr weiten Grenzen:

Glühlampen: 100 bis 1000 mA

Elektromotoren: 1 bis 1000 A

Schmelzöfen: 10 bis 100 kA

Fernsprecher: einige μ A

1.3.5 Elektrizitätsmenge

Die Summe der Elementarladungen (an elektrischen Vorgängen sind meist viele Milliarden Elektronen und damit Elementarladungen beteiligt) ergibt eine bestimmte *Elektrizitätsmenge* (Formelzeichen Q).

Für die Elektrizitätsmenge hat man die Einheit 1 *Coulomb* (Kurzzeichen: C) festgelegt. Es gilt:

$$1 \text{ C} = 6,24 \cdot 10^{18} \text{ Elementarladungen.}$$

Zuvor wurde schon festgehalten, daß

$$\text{Stromstärke } I = \frac{\text{Elektrizitätsmenge } Q}{\text{Zeit } t}$$

ist

Stromstärke

$$I = \frac{Q}{t}$$

Stellt man diese Gleichung nach Q um, $Q = I \cdot t$,

so erhält man die Möglichkeit, eine Elektrizitätsmenge Q aus Strom I und der Zeit t zu bestimmen.

Setzt man hierbei den Strom I in A und die Zeit t in s ein, so ergibt sich als Einheit für die Elektrizitätsmenge 1 As, die gleichbedeutend ist mit 1 C.

1 Coulomb = 1 Amperesekunde

$$1 \text{ C} = 1 \text{ As}$$

Beispiel:

Ein Autoakkumulator wird mit 2,5 A geladen.

Welche Elektrizitätsmenge hat der Akkumulator nach 10 Stunden Ladezeit aufgenommen?

Lösung:

$$Q = I \cdot t$$

$$\underline{Q} = 2,5 \text{ A} \cdot 10 \text{ h} = \underline{25 \text{ Ah}} = 25 \text{ A} \cdot 3600 \text{ s} = \underline{90\,000 \text{ As}} = \underline{90\,000 \text{ C}}$$

1.3.6 Stromdichte in Leitern

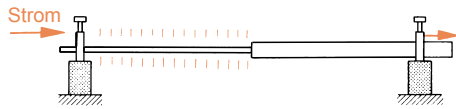
Versuch:

Ein Konstantdraht mit 0,2 mm Durchmesser und ein zweiter Konstantdraht mit 0,4 mm Durchmesser werden an einem Ende miteinander verbunden, die beiden anderen Enden an einen Stelltransformator angeschlossen.

Der Strom wird soweit erhöht, bis ein Draht anfängt zu glühen.

Der Draht mit dem kleineren Querschnitt glüht, während der Draht mit dem größeren Querschnitt noch keine Wärmewirkung zeigt.

Bild 1.13 Strom in Leitern mit verschiedenem Querschnitt



Obwohl in beiden Drähten der gleiche Strom fließt, erwärmt sich der Leiter mit dem kleineren Querschnitt stärker. Für die Erwärmung der Leiter ist also nicht nur der Strom, sondern auch der Leiterquerschnitt maßgebend. Je dichter der Strom im Leiter zusammengedrängt ist, um so mehr und heftigere Zusammenstöße von Elektronen mit Atomionen finden statt und um so stärker ist die Erwärmung. Die Erwärmung der Leiter hängt praktisch von der Dichte des Stromes ab. Man verwendet daher den Begriff *Stromdichte* (Kurzzeichen J).

$$\text{Stromdichte } J = \frac{\text{Stromstärke } I}{\text{Leiterquerschnitt } A}$$

<i>Stromdichte</i>	$J = \frac{I}{q}$	I Strom in A
		q Querschnitt in mm^2
		J Stromdichte in $\frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$

Die Einheit der Stromdichte ist demzufolge $\frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$.

Bei der Bemessung von metallischen Leitern, Spulen und anderen Bauelementen hinsichtlich der zulässigen Erwärmung ist die Stromdichte eine wichtige Konstruktionsgröße.

Beispiel:

Ein Kupferleiter mit $2,5 \text{ mm}^2$ Querschnitt darf nach den VDE-Vorschriften mit 16 A belastet werden.

Wie groß ist hierbei die Stromdichte?

$$\text{Lösung: } J = \frac{I}{q}; \quad J = \frac{16 \text{ A}}{2,5 \text{ mm}^2} = 6,4 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

1.3.7 Stromarten

Man unterscheidet prinzipiell Gleichstrom, Wechselstrom und Mischstrom.

Gleichstrom

Gleichstrom ist ein elektrischer Strom, der stets in gleicher Richtung und gleicher Stärke fließt.

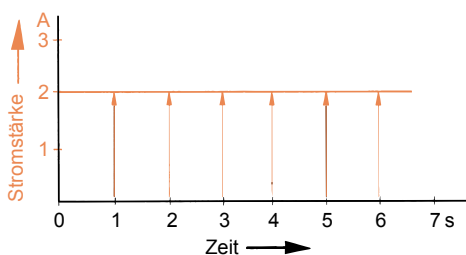
Die Ladungsträger bewegen sich dabei in einer Richtung (genormtes Schaltzeichen: –).

Strom-Zeit-Schaubild (Linienschaubild)

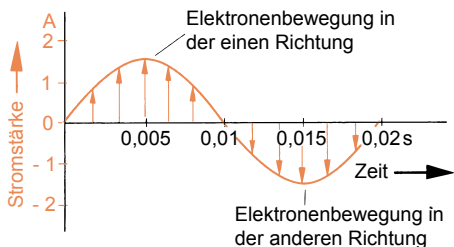
Die Stromstärken, die zu verschiedenen Zeiten vorliegen, lassen sich in einem Schaubild (Strom-Zeit-Schaubild) darstellen. Zu diesem Zweck trägt man auf einer waagerechten Achse die Zeit (z. B. 1 Sekunde, 2 Sekunden, 3 Sekunden usw.) und auf der senkrechten Achse den Strom (z. B. 1 Ampere, 2 Ampere usw.) an.

Die Stromstärke, die nun nach 1, 2, oder 3 Sekunden festzustellen ist, wird zu der jeweiligen Zeit senkrecht nach oben oder unten angetragen (Bild 1.14).

Verbindet man die dadurch gewonnenen Punkte durch eine Linie, so erhält man ein *Linien-Schaubild*. Solche Schaubilder können mit einem Oszilloskop sichtbar gemacht werden (siehe Abschnitt 11.6.4).



*Bild 1.14
Schaubild eines
Gleichstromes*



*Bild 1.15
Schaubild eines
Wechselstromes*