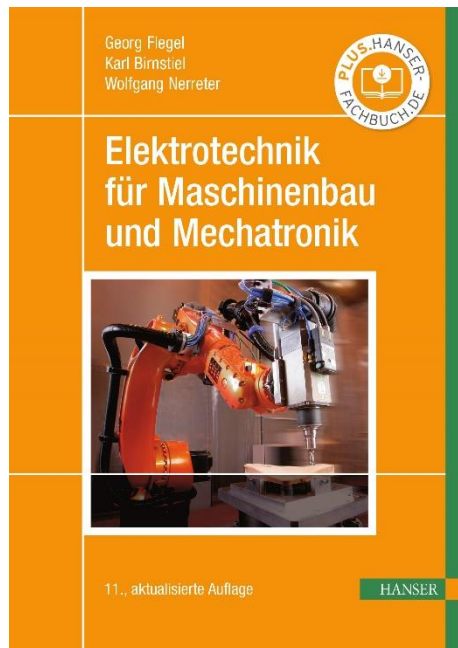


# HANSER



## Leseprobe

zu

## Elektrotechnik für Maschinenbau und Mechatronik

von Georg Flegel, Karl Birnstiel und Wolfgang Nerreter

Print-ISBN: 978-3-446-47275-4  
E-Book-ISBN: 978-3-446-47931-9

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446472754>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

## Vorwort zur 11. Auflage

Als Georg Flegel im Jahr 1961 die erste Auflage dieses Lehrbuches verfasste, war er der Ansicht, dass Maschinenbau und Elektrotechnik einander bedingen und nicht ausschließen. Seine sorgfältige Art, die Elektrotechnik dem Maschinenbauer zu erklären, hat diesem Werk viele Auflagen eingebracht.

Georg Flegel hat noch die 6. Auflage seines Werkes erlebt. Von der 3. bis zur 7. Auflage hat Karl Birnstiel das Werk mitbetreut. Zur 7. Auflage kam Wolfgang Nerreter als Autor hinzu.

Leider schied Karl Birnstiel vor Beginn der Bearbeitung zur 8. Auflage aus dem Autorenteam aus. Als neue Co-Autoren haben Holger Borchering das Kapitel Leistungselektronik und Uwe Meier das Kapitel Informationsübertragung bearbeitet.

Zwischen der 1. und dieser 11. Auflage sind mehr als sechs Jahrzehnte vergangen, in denen sich vor allem in der Technik viele Neuentwicklungen ergeben haben. Konnte 1961 noch das gesamte Fachwissen der Elektrotechnik weitgehend in einem Band untergebracht werden, so ist dies nunmehr unmöglich. Die aktuelle Auflage ist daher lediglich als Einführung in die Elektrotechnik zu verstehen.

Man kann den Umfang des Werkes nicht beliebig anwachsen lassen. Ein Lehrbuch muss nicht nur bezahlbar, sondern auch studierbar bleiben.

Wer in die einzelnen Fachgebiete tiefer eindringen will, sollte dies mithilfe der Fachliteratur tun. Deshalb ist im Anhang ein nach Kapiteln geordnetes Literaturverzeichnis enthalten.

In den Kapiteln 1 – 11 sind die Grundlagen dargestellt und in den Kapiteln 12 – 18 werden Anwendungen beschrieben. Der Lehrtext wird durch insgesamt 141 Rechenbeispiele mit Lösungen ergänzt, die zeigen sollen, wie der Lehrstoff anzuwenden ist. Unter <http://www.emaschtronik.de> und [plus.hanser-fachbuch.de](http://plus.hanser-fachbuch.de) lassen sich zusätzliche Informationen sowie zu etlichen Kapiteln Aufgaben mit Lösungen abrufen.

In dieser 11. Auflage haben wir das Kap. 8 auf das Programm LTspice umgestellt, weil es das bisher

verwendete Programm PSpice nicht mehr gibt. Vor allem in das Kap. 18, aber auch in andere Kapitel wurden einige Aktualisierungen eingebracht. Der Abschnitt Einheiten im Anhang wurde auf den neuesten Stand gebracht.

Zum zweispaltigen Satz sind wir auf den Rat von Fachleuten übergegangen. Das Auge vermag die Spaltenbreite „mit einem Blick“ zu erfassen, wodurch das Lesen erleichtert wird. Zwar sind viele Leser an einspaltig gesetzte Lehrbücher gewöhnt, aber wir sind der Meinung, dass sie den zweispaltigen Satz wegen seiner Vorteile akzeptieren.

Da sich die mathematischen Hilfsmittel geändert haben und weiterentwickelt worden sind, können wir auf umständliche Herleitungen verzichten. Wir brauchen nicht mehr zu zeigen, wie algebraische Gleichungen umgeformt oder z.B. die Lösungen eines linearen Gleichungssystems gefunden werden; die Studierenden können dies dem Taschenrechner oder einem Mathematikprogramm überlassen.

Die wichtigsten Fachausdrücke der Elektrotechnik werden beim ersten Erscheinen im Text auch in *englischer Sprache* gebracht; dabei bevorzugen wir die *amerikanische* Schreibweise, da sie in Veröffentlichungen überwiegend verwendet wird. Nicht nur in der Elektrotechnik, sondern auch im Maschinenbau und in der Mechatronik ist die englische Fachsprache zunehmend von Bedeutung.

Wir hoffen, dass unser Buch weiterhin gut aufgenommen wird, und sind dankbar für Nachrichten an den Verlag mit Verbesserungsvorschlägen, Kritik oder Fehlermeldungen.

Dem Carl Hanser Verlag danken wir für die gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit. Insbesondere danken wir Frau Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg für die Betreuung des Werkes.

Nun noch ein Wort an Sie, liebe Leserin und lieber Leser: Wir freuen uns, wenn Sie uns Vertrauen entgegenbringen und mit unserem Buch arbeiten. Für Ihr Studium wünschen Ihnen viel Erfolg

im Frühjahr 2023

die Verfasser.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Grundbegriffe</b>	11
1.1 Elektrische Ladung	11
1.2 Elektrischer Strom	14
1.3 Leistung und Energie	16
1.4 Elektrischer Widerstand	19
1.5 Quellen	23
<b>2 Gleichstrom-Schaltungen</b>	26
2.1 Bestimmung des Arbeitspunktes	26
2.2 Knotensatz	26
2.3 Maschensatz	29
2.4 Ersatzschaltungen	32
2.5 Überlagerungssatz	34
2.6 Knotenpotenzialverfahren	35
<b>3 Zeitabhängige Größen</b>	37
3.1 Periodische Größen	37
3.2 Sinusgrößen	39
<b>4 Elektrisches Feld</b>	42
4.1 Feldlinien und Äquipotenzialflächen	42
4.2 Kondensatoren	43
4.3 Flussdichte und Feldstärke	43
4.4 Energie eines geladenen Kondensators	45
4.5 Kondensator an Sinusspannung	45
4.6 Polarisationsverluste	46
4.7 Schaltvorgang in einer Schaltung mit einem Kondensator	47
<b>5 Magnetisches Feld</b>	48
5.1 Feldlinien von Magneten	48
5.2 Magnetische Flussdichte	49
5.3 Durchflutungsgesetz	50
5.4 Spulen	51
5.5 Materie im Magnetfeld	52
5.6 Magnetische Werkstoffe	54
5.7 Magnetische Kreise	56
5.8 Induktion	58
5.9 Energie des magnetischen Feldes	62
5.10 Verluste im magnetischen Feld	64
5.11 Kräfte im Magnetfeld	66
<b>6 Wechselstrom-Schaltungen</b>	69
6.1 Grundeintore	69
6.2 Widerstand und Leitwert	70
6.3 Leistung und Arbeit	71
6.4 Verbindung von Grundeintoren	75
6.5 Wechselstromnetze	78
6.6 Drehstrom	80

<b>7 Bauelemente</b>	86
7.1 Widerstände	86
7.2 Kondensatoren	88
7.3 Thermoelektrische Bauelemente	90
7.4 Dioden	91
7.5 Transistoren	98
<b>8 Rechnergestützte Simulation</b>	101
8.1 Netzwerkanalyse	101
8.2 Schaltplan	101
8.3 Gleichanalyse	102
8.4 Variation von Bauelement-Werten	102
8.5 Transientanalyse	103
8.6 Sinusanalyse	104
8.7 Großsignalanalyse	104
<b>9 Analoge Schaltungen</b>	105
9.1 Stabilisierungsschaltungen	105
9.2 Transistorschaltungen	106
9.3 Operationsverstärker	107
9.4 Rückkopplungsschaltungen	109
9.5 Filter	112
<b>10 Digitale Schaltungen</b>	115
10.1 Gatter	115
10.2 Schaltwerke	120
10.3 Kippschaltungen	123
10.4 Frequenzteiler und Zähler	126
10.5 Rechenoperationen mit Dualzahlen	128
10.6 Verarbeitung von Bitmustern	129
10.7 Integrierte Schaltungen	133
<b>11 Elektrochemie</b>	137
11.1 Elektrischer Strom in Flüssigkeiten	137
11.2 FARADAYSche Gesetze	138
11.3 Elektrochemische Spannungsreihe	139
11.4 Batterien	140
11.5 Akkumulatoren	142
11.6 Brennstoffzellen	144
11.7 Elektrolytische Korrosion	145
<b>12 Elektrische Maschinen</b>	146
12.1 Transformator	146
12.2 Rotierende elektrische Maschinen	160
12.3 Gleichstrommaschine	163
12.4 Drehstrom-Asynchronmaschine	174
12.5 Einphasen-Asynchronmotor	191
12.6 Synchronmaschine	193
12.7 Linearmotoren	201
12.8 Kleinmotoren	204

12.9	Erwärmung und Kühlung	210
12.10	Motorparameter	213
<b>13</b>	<b>Elektrische Antriebe</b>	<b>215</b>
13.1	Stationärer Betrieb	215
13.2	Betriebsarten	216
13.3	Trägheitsmoment	218
13.4	Dynamischer Betrieb	219
13.5	Anlauf	219
13.6	Statische Stabilität	221
13.7	Direktantriebe	221
<b>14</b>	<b>Elektrische Messtechnik</b>	<b>223</b>
14.1	Grundbegriffe des Messens	223
14.2	Elektromechanische Messgeräte	225
14.3	Oszilloskop	228
14.4	Digitale Messgeräte	232
14.5	Messbrücken	240
14.6	Sensoren	241
14.7	Messung von Spannung und Strom	244
14.8	Leistungs- und Energiemessung	247
14.9	Messung von $C$ und $L$	250
14.10	Zeitmessung	251
14.11	Elektromagnetische Verträglichkeit	252
<b>15</b>	<b>Steuer- und Regelungstechnik</b>	<b>253</b>
15.1	Die Begriffe Steuern und Regeln	253
15.2	Entwicklung der Steuerungstechnik	254
15.3	Komponenten von Steuerungen	255
15.4	Steuerung elektrischer Maschinen	258
15.5	Regelungstechnik	260
<b>16</b>	<b>Leistungselektronik</b>	<b>269</b>
16.1	Entwicklung der Leistungselektronik	269
16.2	Aufgaben der Leistungselektronik	269
16.3	Leistungshalbleiter	270
16.4	Ungesteuerte Gleichrichter	274
16.5	Netzgeführte Stromrichter	277
16.6	Selbstgeführte Stromrichter	282
16.7	Frequenzumrichter	286
16.8	Wechsel- und Drehstromsteller	293
16.9	EMV von Stromrichtern	294
<b>17</b>	<b>Informationsübertragung</b>	<b>296</b>
17.1	Grundbegriffe	296
17.2	Leitungen und Kabel	298
17.3	Lichtwellenleiter	303
17.4	Funkkanäle	307
17.5	LAN, Ethernet	312
17.6	TCP/IP, OSI-Modell	314

---

17.7	Feldbusse . . . . .	316
17.8	USB . . . . .	317
<b>18</b>	<b>Energieübertragung . . . . .</b>	<b>319</b>
18.1	Energieversorgung . . . . .	319
18.2	Energienetze . . . . .	320
18.3	Überstromschutz . . . . .	326
18.4	Erder und Erdung . . . . .	327
18.5	Schutzmaßnahmen . . . . .	328
18.6	USV . . . . .	333
	Verwendete Formelzeichen . . . . .	334
	Einheiten . . . . .	335
	Komplexe Rechnung . . . . .	337
	Literatur . . . . .	338
	Namenverzeichnis . . . . .	340
	Sachwortverzeichnis . . . . .	341
	Und zum Schluss: Bloß nicht ... . . . .	350

# 1 Grundbegriffe

## 1.1 Elektrische Ladung

### 1.1.1 Mit Bernstein fing alles an

Schon im klassischen Griechenland war folgendes Experiment bekannt: Wird Bernstein mit einem Katzenfell gerieben, so zieht er leichte Gegenstände, z. B. eine Flaumfeder, an. Nach dem griechischen Wort ἤλεκτρο für Bernstein wurden um 1600 alle derartigen Erscheinungen „elektrisch“ genannt. Man bezeichnet den Gegenstand, von dem die Kraftwirkung ausgeht, als „geladen“ und sagt, er trägt eine **Ladung** (*charge*).

Nach systematisch durchgeführten Experimenten erkannte man, dass es zwei Arten von Ladungen gibt, und formulierte:

Gleichartige Ladungen stoßen einander ab; ungleichartige Ladungen ziehen einander an.

Die unterschiedlichen Arten der Ladung werden durch die Vorzeichen „+“ und „-“ gekennzeichnet.

Das Formelzeichen für die physikalische Größe Ladung ist  $Q$ ; die Einheit

$$[Q] = 1 \text{ Coulomb} = 1 \text{ C}$$

der Ladung ist nach CHARLES AUGUSTIN DE COULOMB benannt, der als erster im Jahr 1785 genaue Messungen durchführte; auch werden nach ihm die Kräfte auf Ladungen als **COULOMB-Kräfte** bezeichnet. Er erkannte, dass der Betrag der Kraft proportional dem Produkt der Ladungen und umgekehrt proportional dem Quadrat des Abstandes  $a$  der Ladungen ist:

$$F \sim \frac{|Q_1 Q_2|}{a^2} \quad (1.1)$$

Zum Heben von Lasten sind die COULOMB-Kräfte zwar nicht geeignet, aber dennoch gibt es wichtige technische Anwendungen; so werden z. B. beim Laserdrucker die elektrisch geladenen Tonerpartikel durch COULOMB-Kräfte an den vorbestimmten Stellen festgehalten, bis sie durch Erhitzen aufgeschmolzen und damit fixiert sind.



Bild 1.1 COULOMB-Kräfte auf Ladungen

Die COULOMB-Kräfte auf Ladungen sind formelmäßig analog zur Gravitationskraft, mit der sich zwei schwere Massen  $m_1$  und  $m_2$  anziehen:

$$F \sim \frac{m_1 m_2}{a^2} \quad (1.2)$$

Im Gegensatz zu der stets positiven Masse können Ladungen unterschiedliche Vorzeichen haben; es gibt bei ihnen anziehende und abstoßende Kräfte.

### 1.1.2 Ausgleich und Trennung von Ladungen

Jede Ladung ist an einen **Ladungsträger** (*charge carrier*) gebunden. Diese sind die Atombausteine Elektron und Proton; ihre Ladung wird als **Elementarladung** (*elementary charge*) bezeichnet, sie erhält das Formelzeichen  $e$ :

$$e = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C} = 0,16022 \text{ aC} \quad (1.3)$$

Jedes Proton trägt eine positive, jedes Elektron eine negative Elementarladung; Neutronen sind ungeladen.

Für die Beschreibung der grundlegenden Vorgänge in der Elektrotechnik ist das **BOHRSCHE Atommodell** ausreichend; darin besteht ein Atom aus Protonen und Neutronen, die den Atomkern bilden, und Elektronen, welche diesen auf Kreis- oder Ellipsenbahnen umlaufen. Der Durchmesser eines Atomkerns ist wesentlich geringer als der des betreffenden Atoms. Im Atomkern wirken auf die Protonen und Neutronen starke Anziehungskräfte mit geringer Reichweite; diese **Kernkräfte** sind wesentlich stärker als die COULOMB-Kräfte, mit denen die Protonen einander abstoßen.

Jede Ladung  $Q$  ist ein ganzzahliges Vielfaches der Elementarladung  $e$ .

### Beispiel 1.1

Wir wollen die Anzahl der Elektronen berechnen, die zur Ladung  $Q = -1\text{ C}$  gehören.

$$Q = -1\text{ C} = k \cdot (-e)$$

$$k = -1\text{ C} / (-1,6022 \cdot 10^{-19}\text{ C}) = 6,24 \cdot 10^{18}$$

Werden zwei Stoffe, die Ladungen  $Q_1 = -Q_2$  (gleicher Betrag, aber unterschiedliche Vorzeichen) tragen, zur Berührung gebracht, so können sich die Ladungen ausgleichen, wobei Energie abgegeben wird; dies setzt allerdings voraus, dass die Ladungsträger in den betreffenden Stoffen beweglich sind. Der Ladungsausgleich wird durch die Kräfte bewirkt, mit denen sich die Ladungen anziehen.

Umgekehrt ist für die Trennung zweier Ladungen eine Energiezufuhr erforderlich; so sammeln sich z. B. beim Reiben des Bernsteins auf ihm und dem Katzenfell unterschiedliche Ladungen an. Dieses Experiment lässt sich auch mit einem Kunststoffkamm nachvollziehen, der an einem Pullover gerieben wird.

### 1.1.3 Leiter und Nichtleiter

Die elektrischen Wirkungen des geriebenen Gegenstandes sind dann längere Zeit nachweisbar, wenn sich die Ladungsträger in diesem Gegenstand nicht oder nur sehr wenig bewegen können. Man bezeichnet einen derartigen **Nichtleiter** als **Isolator** (*insulator*); hierzu gehören z. B. Glas, Porzellan und die meisten Kunststoffe, aber auch einige Flüssigkeiten, z. B. reines Wasser oder Transformatoröl, und sämtliche Gase.

Ein Stoff, in dem sich Ladungen *gut* bewegen können, wird als **Leiter** (*conductor*) bezeichnet. Zu diesen Stoffen gehören z. B. viele Metalle. Der beste Leiter ist Silber, dann folgen Kupfer, Aluminium und Gold.

In Metallen sind ausschließlich *Elektronen* die beweglichen Ladungsträger. Wie man sich diese Beweglichkeit erklären kann, soll im Folgenden kurz erläutert werden.

Man stellt sich vor, dass die Elektronen eines Atoms in *Schalen* angeordnet sind; das Bild 1.2 zeigt als Beispiel das **Modell** – eine vereinfachte Darstellung – des Aluminiumatoms, bei dem sich drei Elektronen in der äußeren Schale befinden, die **Valenzelektronen** genannt werden. Wegen des höheren Abstandes vom Atomkern sind sie mit geringeren COULOMB-Kräften an den positiv geladenen Atomkern gebunden als die übrigen Elektronen auf den inneren Schalen.

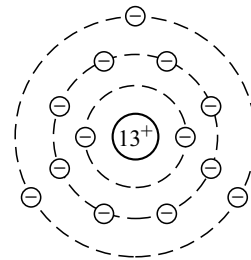


Bild 1.2 Modell des Aluminiumatoms

Der Abstand der Metallatome in einem Kristallgitter liegt in der Größenordnung des Atomdurchmessers. Auf die Valenzelektronen wirken auch die anziehenden Kräfte von den Atomkernen der benachbarten Atome mit der Folge, dass von jedem Atom im Durchschnitt ein Valenzelektron abgelöst wird, das als frei bewegliches Elektron nicht mehr an ein bestimmtes Atom gebunden ist, sondern der Gesamtheit der Atome im Kristallverband angehört.

Ein Atom oder ein Molekül, das nach außen hin elektrisch geladen wirkt, wird als **Ion** bezeichnet; die Metallatome, denen je ein Elektron entzogen wurde, sind also **ionisiert**. Die frei beweglichen Elektronen führen in dem Raum zwischen den positiven Metallionen regellose und ungeordnete Bewegungen aus, die sich nach außen im Allgemeinen nicht bemerkbar machen.

Die frei beweglichen Elektronen verhalten sich im Metall wie die Moleküle eines Gases in einem geschlossenen Gefäß; sie werden deshalb in ihrer Gesamtheit auch als **Elektronengas** bezeichnet.

Zwischen den Leitern und den Nichtleitern steht eine weitere Art von Stoffen, die man als



**Halbleiter** (*semiconductor*) bezeichnet; hierzu gehören nicht nur Germanium und Silizium, sondern auch Mischkristalle wie z. B. GaAs oder SiC.

Halbleiter besitzen bei Zimmertemperatur nur wenige frei bewegliche Ladungen und wirken dabei nahezu wie Isolatoren; durch Energiezufuhr, z. B. durch Erwärmung, wird die Anzahl der Ladungen stark erhöht. Halbleiter-Bauelemente erhalten ihre besonderen Eigenschaften durch die Einlagerung von Fremdatomen in das Kristallgitter, was als **Dotierung** bezeichnet wird.

### 1.1.4 Elektrische Spannung

Ist ein Körper ungeladen, so heißt das nicht etwa, dass er keine Ladung enthält, sondern vielmehr, dass sich die (stets vorhandenen) Ladungen nach außen hin in ihrer Wirkung aufheben.

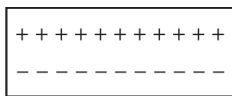


Bild 1.3 Die Elektrizitätsmengen eines ungeladenen Körpers heben sich nach außen hin auf

Sind in einem Körper A weniger und in einem anderen Körper B mehr Elektronen vorhanden als jeweils im ungeladenen Zustand, so wirkt der Körper A nach außen *positiv geladen* (Elektronenmangel) und der Körper B *negativ geladen* (Elektronenüberschuss). Zur besseren Übersichtlichkeit gibt man nur die jeweils über-zähligen Ladungen  $Q_p$  bzw.  $Q_n$  an.

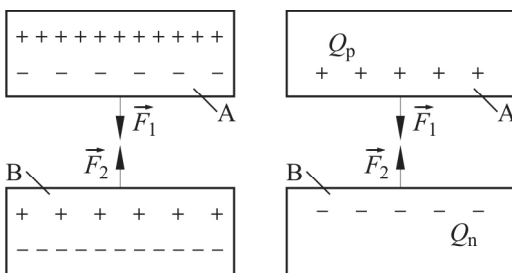


Bild 1.4 Elektronenmangel bewirkt die positive Ladung des Körpers A und Elektronenüberschuss die negative Ladung des Körpers B

Wie im Bild 1.4 dargestellt, bewirken die COULOMB-Kräfte eine Anziehung der beiden gegensinnig geladenen Körper A und B. Sollen nun die beiden Körper entgegen der Krafrichtung weiter voneinander entfernt werden, so wird hierfür *Energie* benötigt: Eine Ladungstrennung erfordert eine Energiezufuhr.

Man könnte nun, um die Ladungstrennung quantitativ zu beschreiben, die Energie  $W$  angeben, die für den Vorgang erforderlich ist. Diese Energie sagt jedoch nichts darüber aus, wie viel Ladung getrennt worden ist. Deshalb wird in der Elektrotechnik der Quotient aus Energie und Ladung verwendet, der als **elektrische Spannung** oder kurz **Spannung** (*voltage*)  $U$  bezeichnet wird:

$$U = \frac{W}{Q} \tag{1.4}$$

Die Einheit der Spannung  $U$  ist:

$$\frac{1 \text{ J}}{1 \text{ C}} = \mathbf{1 \text{ Volt}} = 1 \text{ V} \tag{1.5}$$

Der Begriff Spannung ist allgemein bekannt; so übt z. B. eine gespannte Zugfeder Kräfte auf ihre Endpunkte aus. Eine zeitlich konstante Spannung wird **Gleichspannung** (*direct voltage*) genannt.

Während es sich bei der Kraft um eine gerichtete Größe, also um einen **Vektor** handelt, ist die Spannung  $U$  als Quotient der ungerichteten Größen  $W$  und  $Q$  ebenfalls ungerichtet, sie ist also ein **Skalar**. Der Spannung  $U$  wird jedoch ein **Richtungssinn** von der positiven Ladung  $Q_p$  zur negativen Ladung  $Q_n$  zugeordnet (Bild 1.5).

Ist in einer Schaltung der Richtungssinn einer Spannung zunächst unbekannt, so nimmt man willkürlich einen **Bezugssinn** an, der durch einen **Bezugspfeil** dargestellt wird, und vereinbart:

Ist der Zahlenwert einer durch einen Bezugspfeil beschriebenen Spannung positiv (z. B.  $U_1$  im Bild 1.5), so stimmt der Richtungssinn mit dem Bezugssinn überein; ist der Zahlenwert einer Spannung negativ, so sind Richtungssinn und Bezugssinn einander entgegengesetzt.

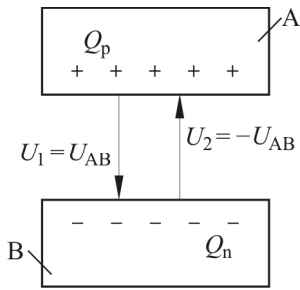


Bild 1.5 Zusammenhang zwischen dem Richtungssinn der Spannung  $U_{AB}$  und dem Bezugssinn  $U_1$  bzw.  $U_2$

Der Zusammenhang zwischen Bezugssinn und Richtungssinn ist bei der Spannungsmessung mit dem **Voltmeter** von Bedeutung. Der Bezugssinn der Spannung ist dabei von der mit „+“ bezeichneten Klemme zu der mit „-“ bezeichneten Klemme festgelegt (Bild 1.6). Wird bei der Messung ein positiver Wert angezeigt, so bedeutet dies, dass Bezugssinn und Richtungssinn übereinstimmen und eine Spannung mit dem Richtungssinn von „+“ nach „-“ anliegt.

Wird ein negativer Spannungswert angezeigt, so sind Bezugssinn und Richtungssinn einander entgegengesetzt und es liegt eine Spannung mit dem Richtungssinn von „-“ nach „+“ an.

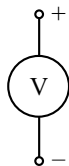


Bild 1.6 Voltmeter mit Klemmenbezeichnungen für Gleichspannung

## 1.2 Elektrischer Strom

### 1.2.1 Stromstärke

Eine geordnete Bewegung von Ladungsträgern wird als **elektrischer Strom** oder kurz als **Strom** (*current*) bezeichnet. Bewegen sich die Ladungsträger gleichmäßig mit konstanter Geschwindigkeit durch den Querschnitt eines Leiters, so liegt ein **Gleichstrom** (*direct current*) vor.

Die ungeordnete Bewegung der Elektronen in einem metallischen Leiter stellt keinen Strom dar.

Ein elektrischer Strom kann drei unterschiedliche **Wirkungen** hervorrufen:

- Erzeugung von Wärmeenergie;
- Erzeugung magnetischer Erscheinungen;
- Erzeugung chemischer Veränderungen der durchströmten Stoffe.

Jede dieser Wirkungen wird in der Elektrotechnik genutzt.

Unter der Stärke einer Strömung versteht man im Allgemeinen die auf die Zeit bezogene Menge der bewegten „Teilchen“. Beim elektrischen Strom wird Ladung bewegt und die **Stromstärke**  $I$  eines Gleichstromes ist der Quotient aus Ladung und Zeit:

$$I = \frac{Q}{t} \tag{1.6}$$

Die Einheit der Stromstärke  $I$  ist:

$$\frac{1 \text{ C}}{1 \text{ s}} = \mathbf{1 \text{ Ampere}} = 1 \text{ A} \tag{1.7}$$

Im technischen Sprachgebrauch wird zwischen dem Strom, also der Bewegung von Ladungen, und der Stromstärke häufig nicht unterschieden: Die Stromstärke wird meist kurz als „Strom“ bezeichnet.

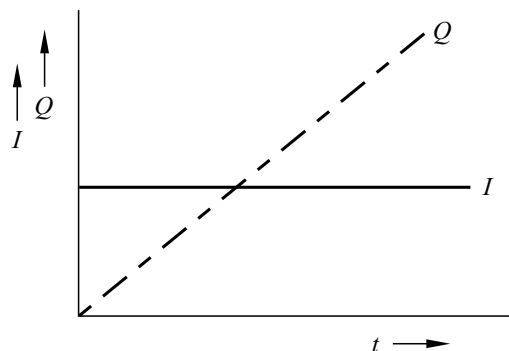


Bild 1.7 Ladungs-Zeit-Diagramm und Strom-Zeit-Diagramm eines Gleichstromes

### 1.2.2 Stromkreis

Ein Gleichstrom kann nur in einem geschlossenen Kreis fließen, der als **Stromkreis** (*circuit*) bezeichnet wird. Die Ladungsströmung wird von einer **Quelle** (*source*) angetrieben, welche die Ladungstrennung bewirkt. In einem Stromkreis mit metallischen Leitern liegt am Pluspol der Quelle ein *Mangel* und am Minuspol ein *Überschuss* negativer Ladungsträger vor.

Die Ladungstrennung kann durch elektrochemische Prozesse, z. B. bei Batterien oder Brennstoffzellen, oder durch einen elektromechanischen Energiewandler wie z. B. die sog. „Lichtmaschine“ im Kraftfahrzeug erfolgen.

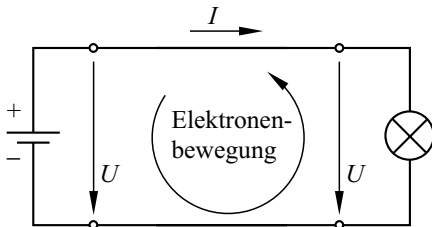


Bild 1.8 Einfacher Stromkreis mit Batterie und Glühlampe

Die COULOMB-Kräfte sorgen dafür, dass die Elektronen in den Leitungen vom Minuspol der Quelle abgestoßen und vom Pluspol angezogen werden.

### 1.2.3 Richtungssinn und Bezugssinn

Im Bild 1.8 ist auch der **Richtungssinn** des Stromes eingetragen. Willkürlich wurde festgelegt: Der elektrische Strom fließt *außerhalb der Quelle* von ihrem Pluspol zu ihrem Minuspol. Demzufolge fließt der elektrische Strom *innerhalb der Quelle* von ihrem Minuspol zum Pluspol.

Nach dieser Definition strömen in metallischen Leitern die Elektronen entgegen dem Richtungssinn des Stromes (Bild 1.8).

Die in der Gl. (1.4) zur Beschreibung der Stromstärke verwendete Ladung  $Q$  kann positiv oder negativ sein. Während sich in Metallen aus-

schließlich Elektronen als negative Ladungsträger bewegen, können in Flüssigkeiten oder in Gasen positive und negative Ladungsträger zur Stromstärke beitragen. Dies muss bei einer allgemein gültigen Definition der Stromstärke berücksichtigt werden.

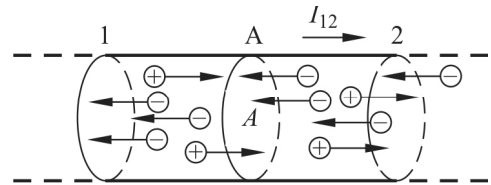


Bild 1.9 Bewegung positiver und negativer Ladungsträger durch einen Querschnitt A

Wie bei einer zweispurigen Straße, bei der die in entgegengesetzter Richtung strömenden Fahrzeuge zur Erhöhung der Belastung beitragen, wird die Stromstärke durch die in entgegengesetzter Richtung strömenden Ladungen *erhöht*. Mit der positiven Ladung  $Q_p$ , die in der Zeitspanne  $t$  durch den Querschnitt A strömt, und der entsprechenden negativen Ladung  $Q_n$  setzen wir an:

$$I_{12} = \frac{Q_p - Q_n}{t} \quad (1.8)$$

Wegen  $Q_p > 0$  und  $Q_n < 0$  ist die so definierte Stromstärke  $I_{12}$  positiv. Der zugehörige **Richtungssinn** des Stromes  $I_{12}$  stimmt mit der Bewegungsrichtung *positiver* Ladungsträger überein.

#### Beispiel 1.2

Ein Gleichstrom 1 A fließt in einem metallischen Leiter 1 min lang. Welche Ladung bewegt sich dabei durch einen Querschnitt?

$$Q_p = 0; \quad Q_n = -I t = -60 \text{ As} = -60 \text{ C}$$

Oft ist in einer Schaltung der Richtungssinn eines Stromes zunächst unbekannt. So kann z. B. die im Bild 1.10 dargestellte Batterie eines Fahrzeugs

- den Anlasser treiben und es fließt der Strom  $I_A$ ;
- von der „Lichtmaschine“ geladen werden und es fließt der Strom  $I_L$ .

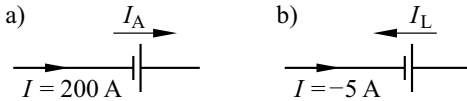


Bild 1.10 Zusammenhang zwischen dem Richtungssinn  $I_A$  bzw.  $I_L$  und dem Bezugssinn  $I$  des Stromes

Für die Bearbeitung eines Stromes mit unterschiedlichem Richtungssinn gibt man willkürlich einen **Bezugssinn** vor, der durch einen Bezugspfeil dargestellt wird, und vereinbart:

Ist der Zahlenwert eines durch einen Bezugspfeil beschriebenen Stromes positiv, so stimmt der Richtungssinn mit dem Bezugssinn überein; ist der Zahlenwert eines Stromes negativ, so sind Richtungssinn und Bezugssinn einander entgegengesetzt.

Die Begriffe Richtungssinn und Bezugssinn sind genormt und der Bezugspfeil wird *in* den Leitungszug gezeichnet. Im Bild 1.10a ist der Zahlenwert des Stromes  $I = 200$  A positiv und der Strom  $I_A = I$  treibt den Anlasser; im Bild 1.10b ist der Zahlenwert des Stromes  $I = -5$  A negativ und die Batterie wird mit dem Strom  $I_L = -I$  geladen.

Der Zusammenhang zwischen Bezugssinn und Richtungssinn ist bei der Strommessung mit dem **Amperemeter** von Bedeutung. Der Bezugssinn des Stromes ist dabei von der mit „+“ bezeichneten Klemme zu der mit „-“ bezeichneten Klemme festgelegt.

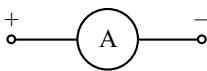


Bild 1.11 Amperemeter mit Klemmenbezeichnungen für Gleichstrom

Wird bei der Messung ein positiver Wert angezeigt, so bedeutet dies, dass Bezugssinn und Richtungssinn übereinstimmen und dass ein Strom mit dem Richtungssinn von „+“ nach „-“ fließt. Die Anzeige eines negativen Stromwertes bedeutet, dass Bezugssinn und Richtungssinn einander entgegengesetzt sind und dass ein Strom mit dem Richtungssinn von „-“ nach „+“ fließt.

## 1.3 Leistung und Energie

### 1.3.1 Erzeuger und Verbraucher

Ein elektrischer Stromkreis besteht im einfachsten Fall aus zwei Energiewandlern: Der eine wandelt nichtelektrische Energie in elektrische Energie um, er wird daher als **Erzeuger** (elektrischer Energie) bezeichnet; der andere wandelt elektrische Energie in nichtelektrische Energie um, er wird daher als **Verbraucher** (elektrischer Energie) bezeichnet.

Der im Bild 1.12 dargestellte einfache Stromkreis mit einem Gleichstromgenerator, der als Erzeuger arbeitet, und einem Motor, der als Verbraucher arbeitet, lässt sich mit einem Flüssigkeitsstromkreis vergleichen. Die Pumpe bzw. der Generator bewirken den Antrieb der Wassermoleküle bzw. der Ladungsträger. Die Wassermenge bzw. die Elektrizitätsmenge geben in der Turbine bzw. im Motor Energie ab. Ein Hahn bzw. ein Schalter dienen zur Unterbrechung der Strömung.

Es ist keinesfalls erforderlich, dass ein Wassermolekül vor der Energieabgabe in der Turbine die Pumpe durchlaufen haben muss. Die Energie steht vielmehr sofort nach dem Einschalten zur Verfügung, sie wird in einer Kraftwelle auf die Wasserteilchen in der Druckleitung übertragen. In gleicher Weise übertragen die COULOMB-Kräfte nach dem Einschalten des Stromkreises die Energie auf die bewegten Ladungsträger, die diese an den Motor abgeben. Die Ausbreitung dieser Kräfte läuft nach dem Einschalten des Stromkreises nahezu mit Lichtgeschwindigkeit ab, so dass ein Strom im gesamten Stromkreis unmittelbar nach dem Einschalten zu fließen beginnt.

Die beweglichen Ladungsträger im Stromkreis brauchen also nicht erst die Quelle zu durchlaufen, um Energie aufzunehmen; dies ist vor allem bei einem Wechselstrom von Bedeutung, bei dem die Elektronen nur um eine Ruhelage pendeln.

Wenn der Anteil der Zweidrahtleitung, die den Generator mit dem Motor verbindet, und des

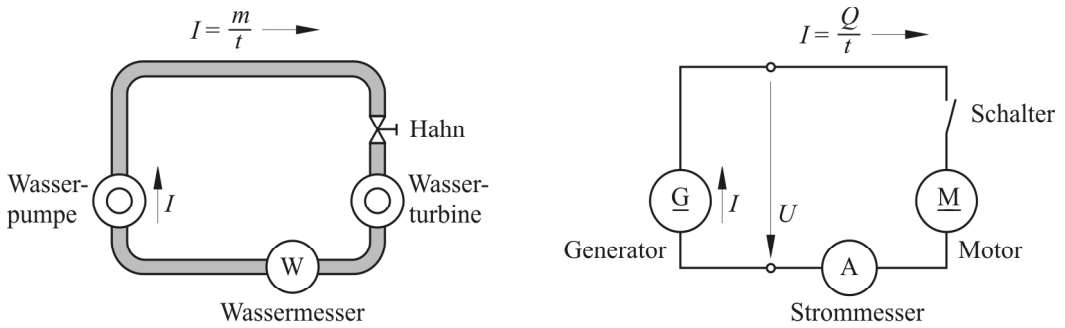


Bild 1.12 Vergleich zwischen einem Wasser- und einem elektrischen Stromkreis

Strommessers am Energieumsatz vernachlässigt werden kann, steht die gesamte Energie, die im Generator für die Ladungstrennung aufgewendet wird, dem Motor zur Verfügung. Bei gleichmäßigem Energiefluss kann die Leistung als Quotient aus Energie und Zeit berechnet werden:

$$P = \frac{W}{t} \tag{1.9}$$

Die Einheit der Leistung  $P$  ist:

$$\frac{1 \text{ J}}{1 \text{ s}} = \mathbf{1 \text{ Watt}} = 1 \text{ W} \tag{1.10}$$

Wir erweitern die Gl. (1.9) mit der Ladung  $Q$  und setzen die Gln. (1.4 und 1.6) ein:

$$P = \frac{W}{Q} \cdot \frac{Q}{t} = UI \tag{1.11}$$

Hieraus ergibt sich die Einheitengleichung:

$$1 \text{ W} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A} \tag{1.12}$$

### 1.3.2 Der Begriff Eintor

Viele Bauteile und Geräte der Elektrotechnik haben *zwei* Anschlussdrähte oder -klemmen. Da diese Anschlüsse früher auch **Pole** genannt wurden, bezeichnete man ein solches Bauteil oder Gerät als **Zweipol**.

Nun aber hat sich für zwei funktionell zusammengehörige Klemmen der Begriff **Tor** (*port*)

durchgesetzt. Die Begriffe **Eintor** (*one-port*) und **Zweipol** sind also gleichbedeutend. So sind z. B. in der Schaltung 1.12 der Generator, der Schalter, der Motor und das Amperemeter Eintore.

An jedem Eintor kann sowohl der Bezugssinn der Spannung als auch der Bezugssinn des Stromes frei gewählt werden. Dadurch können sich jedoch nur *zwei* unterschiedliche Zuordnungen – gleichsinnig oder gegensinnig – der Bezugspfeile für Spannung und Strom ergeben; diese Zuordnungen sind in den Bildern 1.13 und 1.14 dargestellt.

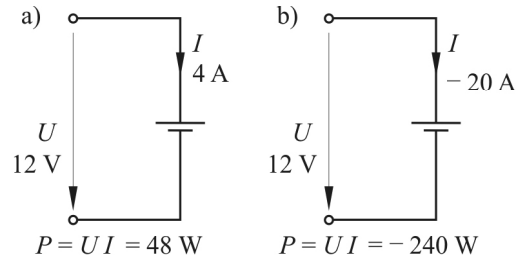


Bild 1.13 Bei gleichsinnigen Bezugspfeilen von Strom und Spannung ist die Leistung  $P = UI$  positiv, wenn das Eintor als Verbraucher wirkt (a); wirkt das Eintor als Erzeuger, so ist die Leistung  $P = UI$  negativ (b)

Die Eigenschaft eines Eintors, als Erzeuger oder Verbraucher zu wirken, ist vielfach nicht von vornherein festgelegt oder bekannt. So liefert z. B. der Akkumulator eines Kraftfahrzeugs beim Startvorgang die Energie für den Elektromotor, der „Anlasser“ genannt wird; er wirkt dabei als Erzeuger. Wird der Akkumulator dagegen von

der „Lichtmaschine“ geladen, so wirkt er als Verbraucher.

Werden an dem Akkumulator die Bezugspfeile für Strom und Spannung gleichsinnig gewählt (Bild 1.13a), so wirkt er wie der Motor im Bild 1.12 für  $U > 0$  und  $I > 0$  als Verbraucher mit der Leistung  $P = UI > 0$ . Wenn jedoch der Akkumulator als Erzeuger arbeitet, dann fließt der Strom entgegen dem gewählten Bezugspfeil und es ist  $I < 0$  (Bild 1.13b); die Leistung  $P = UI$  ist dabei negativ.

Am Vorzeichen der Leistung ist also erkennbar, ob ein Eintor als Erzeuger oder als Verbraucher wirkt. Dies hat vor allem den Vorteil, dass die Wirkungsweise eines Eintors nicht von vornherein bekannt sein muss: Ergibt sich im Zuge einer Berechnung, dass die Leistung eines Eintors *positiv* ist, so handelt es sich um einen *Verbraucher*; ist die Leistung *negativ*, so wirkt das Eintor als *Erzeuger*.

Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass die Leistungsbilanz für sämtliche Eintore einer Schaltung vereinfacht geschrieben werden kann:

$$\sum P = 0 \quad (1.13)$$

Die Summe der Leistungen sämtlicher Eintore in einer Schaltung ist gleich Null, wenn jede Verbraucherleistung positiv und jede Erzeugerleistung negativ eingesetzt wird.

Die gegensinnige Zuordnung der Bezugspfeile für Spannung und Strom wird nur noch in Ausnahme-

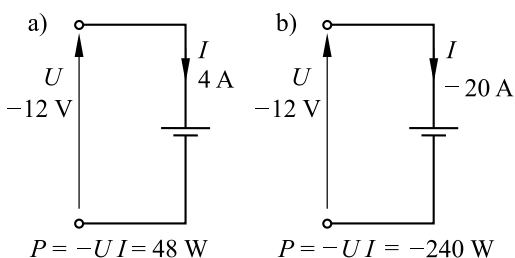


Bild 1.14 Bei entgegengesetzten Bezugspfeilen  $U$  und  $I$  ist die Leistung  $P = -UI$  positiv, wenn das Eintor als Verbraucher wirkt (a); wirkt das Eintor als Erzeuger, so ist die Leistung  $P = -UI$  negativ (b)

fällen verwendet, weil dabei für die Leistung die Gleichung  $P = -UI$  gilt.

Wir arbeiten im Folgenden ausschließlich mit der gleichsinnigen Zuordnung der Bezugspfeile, bei der für die Leistung gilt:

$$P = UI \quad (1.14)$$

### Beispiel 1.3

An einem Akkumulator werden mit zwei Messgeräten der Strom  $I = -2,4 \text{ A}$  und die Spannung  $U = 12,5 \text{ V}$  gemessen.

Wir wollen die Leistung berechnen, die dabei umgesetzt wird, und entscheiden, ob der Akkumulator als Erzeuger oder als Verbraucher wirkt.

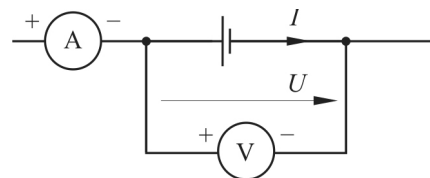


Bild 1.15 Akkumulator mit Messgeräten für Strom und Spannung

Die Bezugspfeile für  $U$  und  $I$  sind an jedem Messgerät von der „+“-Klemme zur „-“-Klemme festgelegt. Der Strom durch das Voltmeter wird vernachlässigt.

Am Akkumulator hat der Bezugspfeil für  $I$  die gleiche Richtung wie der Bezugspfeil für  $U$ ; wir berechnen die Leistung deshalb mit der Gl. (1.11):

$$P = UI = 12,5 \text{ V} \cdot (-2,4 \text{ A}) = -30 \text{ W}$$

Wegen  $P < 0$  wirkt der Akkumulator als Erzeuger.

### 1.3.3 Wirkungsgrad

Vielfach wird mit einem elektrischen Gerät eine Energiewandlung durchgeführt. Dabei ist die *nutzbare* abgegebene Leistung  $P_{\text{ab}}$  kleiner als die zugeführte Leistung  $P_{\text{zu}}$ . Der Quotient aus diesen beiden Leistungen wird als **Wirkungsgrad** (*efficiency*)  $\eta$  (griech. Buchstabe eta) bezeichnet:

$$\eta = \frac{P_{\text{ab}}}{P_{\text{zu}}} \quad (1.15)$$

**Beispiel 1.4**

Ein Motor mit dem Wirkungsgrad 0,78 gibt an der Welle die mechanische Leistung 1,5 kW ab. Welche Leistung nimmt der Motor auf und welche Verluste  $P_{\text{verl}}$  entstehen im Motor?

$$P_{\text{zu}} = \frac{P_{\text{ab}}}{\eta} = 1923 \text{ W}$$

$$P_{\text{verl}} = P_{\text{zu}} - P_{\text{ab}} = 423 \text{ W}$$

**1.3.4 Elektrowärme**

Wie schon erwähnt, ist die Erzeugung von Wärmeenergie eine der Wirkungen des elektrischen Stromes.

Ein Stoff der Masse  $m$ , der von der **CELSIUS-Temperatur**  $\vartheta_1$  (griech. Buchstabe theta) auf  $\vartheta_2 > \vartheta_1$  erwärmt wird, nimmt dabei die **thermische Energie**  $W_{\text{th}}$  auf, die auch *Wärmeenergie* genannt wird:

$$W_{\text{th}} = c m (\vartheta_2 - \vartheta_1) = c m \Delta\vartheta \quad (1.16)$$

Dabei ist  $c$  die Energie, die zur Erwärmung von 1 kg des Stoffes um 1 K erforderlich ist; sie wird als **spezifische Wärmekapazität** bezeichnet.

Tabelle 1.1: Spezifische Wärmekapazität  $c$  (Auswahl)

Stoff	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
Wasser	4,187
Transformatoröl	1,8
Luft	1
Aluminium	0,9
Stahl	0,46
Kupfer	0,39

Wird der Stoff durch einen elektrischen Heizleiter erwärmt, dann ist wegen der unvermeidlichen Verluste die nutzbare Leistung  $P_{\text{th}}$  kleiner als die dem Heizleiter zugeführte Leistung  $P = UI$ .

**Beispiel 1.5**

Ein Warmwasserbereiter mit dem Anschlusswert 1,5 kW hat den Wirkungsgrad 70 %. Wie lange dauert es, bis 1,5 l Wasser von 10 °C auf 80 °C erwärmt werden?

$$W_{\text{th}} = c m \Delta\vartheta = 439,6 \text{ kJ} = P_{\text{th}} t$$

Die Leistung  $P_{\text{th}}$  ist:

$$P_{\text{th}} = \eta P = 0,7 \cdot 1,5 \text{ kW} = 1050 \text{ W}$$

Mit den Gln. (1.9 und 1.10) berechnen wir:

$$t = \frac{W_{\text{th}}}{P_{\text{th}}} = 0,116 \text{ h} \approx 7 \text{ min}$$

**1.4 Elektrischer Widerstand****1.4.1 Der Begriff Widerstand**

Damit in einem Metalldraht ein Strom  $I$  fließt, muss Energie zugeführt werden; dies lässt sich durch Anlegen einer Spannung  $U$  erreichen. Bei einem Eintor, das ausschließlich als *Verbraucher* wirken kann, wird der Quotient aus Spannung und Strom als **Widerstand** (*resistance*)  $R$  bezeichnet:

$$R = \frac{U}{I} \quad (1.17)$$

Die Einheit des Widerstandes  $R$  ist:

$$\frac{1 \text{ V}}{1 \text{ A}} = \mathbf{1 \text{ Ohm}} = 1 \Omega \quad (1.18)$$

Der Widerstand eines metallischen Leiters lässt sich durch die Schwingungen der Atome des Kristallgitters erklären; diese Schwingungen stellen eine Bewegungshemmung, also einen *Widerstand*, für die in Leiterrichtung strömenden Elektronen dar. Wird die Bewegungshemmung durch Anlegen einer Spannung überwunden, so entsteht Wärme, da ein Strom fließt; im Leiter wird dabei Leistung umgesetzt.

Nach DIN 1324 ist der Widerstand  $R$  stets positiv. Ist eine der Größen  $U$  oder  $I$  negativ und die andere positiv, so führt der Ansatz  $R = -U/I$  zu einem positiven Widerstandswert.

Die Leistung  $P$ , die im Widerstand in Wärmeleistung  $P_{\text{th}}$  umgewandelt wird, berechnen wir mit den Gln. (1.11 und 1.17):

$$P = P_{\text{th}} = RI^2 = \frac{U^2}{R} \quad (1.19)$$

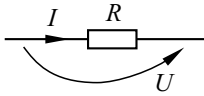


Bild 1.16 Schaltzeichen des Widerstandes mit Bezugspfeilen für Strom und Spannung

Der Kehrwert des Widerstandes  $R$  wird als **Leitwert** (*conductance*)  $G$  bezeichnet:

$$G = \frac{I}{U} = \frac{1}{R} \quad (1.20)$$

Im deutschen Sprachraum hat der Leitwert die Einheit 1 Siemens = 1 S = 1/Ω. Im englischen Sprachraum werden der Name Ohm und die Einheit Ω umgedreht: 1 mho = 1 Ω (sprich: mou).

#### 1.4.2 Das OHMSche Gesetz

Trägt man für einen Metalldraht, dessen Temperatur  $\vartheta$  konstant gehalten wird, den Strom  $I$  über der Spannung  $U$  auf, so erhält man als  $I$ - $U$ -Kennlinie eine Gerade. Der Widerstand des Drahtes hat für jeden Punkt der Geraden denselben Wert:

$$R = \frac{U}{I} = \text{const.} \quad (1.21)$$

Der durch diese Gleichung beschriebene Zusammenhang wird **OHMSches Gesetz** genannt. Ein konstanter, also vom Strom oder von der Spannung unabhängiger Widerstand wird dementsprechend als **OHMScher Widerstand** bezeichnet.

Die Steigung der  $I$ - $U$ -Kennlinie eines OHMSchen Widerstandes ist der konstante Leitwert  $G$ .

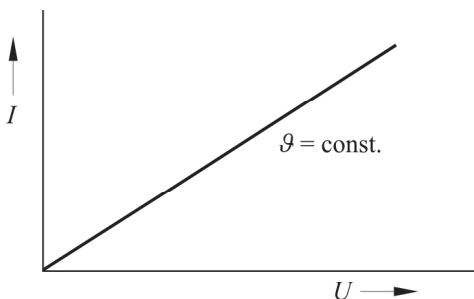


Bild 1.17  $I$ - $U$ -Kennlinie eines OHMSchen Widerstandes

#### Beispiel 1.6

Durch einen OHMSchen Widerstand  $R = 150 \Omega$  fließt der Strom 0,2 A. Welche Spannung liegt dabei an dem Widerstand?

$$U = R I = 150 \Omega \cdot 0,2 \text{ A} = 30 \text{ V}$$

#### Beispiel 1.7

Welcher Strom fließt durch den Leitwert  $G = 55 \text{ mS}$ , der an der Spannung 12 V liegt?

$$I = G U = 55 \text{ mS} \cdot 12 \text{ V} = 0,66 \text{ A}$$

#### 1.4.3 Linearer Leiter

Ein Leiter, der überall gleichen Querschnitt  $A$  hat und dessen Querschnittsabmessungen wesentlich kleiner als die Länge  $l$  sind, wird **linearer Leiter** genannt. Es ist unerheblich, ob der Leiter gerade ausgestreckt oder gekrümmt ist; so ist z. B. der gewendelte Glühdraht einer Glühlampe ein linearer Leiter.

Bei einem linearen Leiter ist der Strom  $I$  gleichmäßig auf den Querschnitt  $A$  verteilt. Der Quotient aus Strom und Querschnitt, der als **Stromdichte** (*current density*)  $J$  bezeichnet wird, hat an jeder Stelle des Leiters denselben Wert:

$$J = \frac{I}{A}; \quad \text{Einheit: } 1 \frac{\text{A}}{\text{m}^2} \quad (1.22)$$

Beim linearen Leiter fällt die Spannung  $U$  gleichmäßig über der Länge  $l$  ab. Der Quotient aus beiden Größen wird **elektrische Feldstärke** (*electric field strength*)  $E$  genannt:

$$E = \frac{U}{l}; \quad \text{Einheit: } 1 \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad (1.23)$$

Wenn das OHMSche Gesetz gilt, wie z. B. bei einem Metalldraht, dessen Temperatur konstant bleibt, dann ist die Stromdichte  $J$  linear von der Feldstärke  $E$  abhängig. Der konstante Proportionalitätsfaktor wird als **Leitfähigkeit** (*conductivity*)  $\gamma$  (griech. Buchstabe gamma) bezeichnet:

$$\gamma = \frac{J}{E}; \quad \text{Einheit: } 1 \frac{\text{S}}{\text{m}} \quad (1.24)$$



# Sachwortverzeichnis

- Abgleich 240
- Abschnürbereich 99
- Abschnürspannung 98
- Abschwächer 230
- Abspannmast 234
- Abtaste 236
- Abtasttheorem 236
- Abweichung, relative 223
- , systematische 223
- AC 230
- AC-Servomotor 207
- ADC 232
- AD-Wandler, paralleler 234
- Addition von Dualzahlen 128
- Äquipotenzialfläche 42
- AGND 102
- Akkumulator 142
- Aktor 256
- Akzeptor 95
- Alkali-Mangan-Zelle 141
- ALT 230
- Ampere 14, 336
- Amperemeter 16
- Amplitude 39
- Amplitudenspektrum 246
- Amplitudentastung 297
- Analog-Digital-Wandler 232
- Anfangsbedingung 47, 64
- Anfangswert 63
- Anionen 137
- Anker 66, 160, 193
- Ankerquerfeld 167
- Ankerückwirkung 168, 195
- Ankerverluste 166
- Anlasser 17, 172
- Anlasstransformator 184
- Anlauf 219
- Anlaufbereich 99
- Anlaufkondensator 192
- Anlaufstrom 183
- Anode 91, 137
- Anreicherungs-MOSFET 99
- Anstiegsgeschwindigkeit 109
- Antenne, isotrope 309
- Antennengewinn 309
- Antrieb, elektrischer 215
- Anzeige 223
- Anzeigebereich 232
- APD 303
- aperiodischer Fall 262
- aperiodischer Grenzfall 262
- Approximation, sukzessive 234
- Arbeitspunkt 26, 215
- Arbeitstabelle 133
- Arbitrierungsverfahren 317
- Aron-Schaltung 248
- ASCII-Code 296
- ASI-Bus 256
- ASIC 135
- Asynchronmaschine 174, 191
- , synchronisierte 190
- ATN 2340
- Atomuhr 251
- Auflösung 224, 232
- Ausbreitungsgeschwindigkeit 303
- Ausbreitungswiderstand 327
- Ausgleich 263
- Außenleiterspannung 81
- Aussetzbetrieb 217
- Austrittsarbeit 90
  
- B2C 280
- B6C 277
- Bändermodell 92
- Bandabstand 93
- Bandabstand-Referenz 234
- Bandbreite 114
- Bandmittenfrequenz 114
- Bandpass 114
- Bariumtitanat 87
- Barkhausen-Schaltung 205
- Basis 100
- Basiseinheit 223, 335
- Basisisolierung 332
- Batterie 140
- Baud 297
- Bauform 213
- BCD-Code 132
- Beharrungstemperatur 211
- Belastung, symmetrische 82
- Beleuchtungsstärke 96
- Bemessungsleistung 88
- Bemessungsspannung 88
- Bereich, verbotener 133
- Bernstein 11
- Berührungsspannung 327
- Beschleunigungsmoment 219
- Betrieb, dynamischer 219
- , stationärer 215
- Betriebserdung 327
- Betriebsfall, ungünstigster 133
- Betriebskondensator 192
- Bezugserde 327
- Bezugsknoten 35
- Bezugspfeil 13
- Bezugspotenzial 31
- Bezugspunkt 30
- Bezugssinn 13, 16
- Bezugstemperatur 22
- Binärteiler 126
- Binärzeichen 296
- Binärziffer 115
- bit 115, 293
- Bipolartransistor 100
- BITBUS 317
- Bitrate 297
- Bitraten-Längen-Produkt 298
- BJT 100
- Bleiakkumulator 142
- Blindarbeit 73
- Blindleistung 72
- Blindleitwert 70
- Blindstromkompensation 322
- Blindwiderstand 70
- Blocksteuerung 287
- Bode-Diagramm 113
- Boolesche Algebra 117
- Braunsche Röhre 228
- Bremsbetrieb 173, 179, 190
- Brems-Chopper 292
- Bremsversuch 162
- Bremswächter 190
- Brennstoffzelle 144
- Brückenschaltung 32, 34, 240, 275
- , halbgesteuerte 281
- , spannungsgespeiste 240
- , stromgespeiste 240
- , vollgesteuerte 280
- Buchholz-Relais 156
- Bündelleiter 325
- Bürde 157
- Bürstenfeuer 164
- Bürstenhalter 164
- Bürstenstern 165
- Bürstenverluste 166
- Bulk 99
- Bus 238, 298
- Bussystem 136
- Bus-Topologie 312
- Buszugriff 298
- Buszugriffsverfahren 257
- Byte 296

- CAN-Bus 257, 317  
 Candela 96, 336  
 CE-Konformitätserklärung 252  
 Celsius-Temperatur 22  
 CENELEC 252  
 chip 135  
 CHOP 230  
 CIS-Zelle 95  
 CMOS-Inverter 116  
 CMRR 109  
 COM-Port 299  
 Controller 238  
 Coulomb 11  
 CPLD 135  
 CPU 254, 255  
 CRC-Verfahren 308  
 CRT 228  
 CSMA/CD 313  
 Curie-Temperatur 54  
  
 DAB 296  
 d-Achse 199  
 Dämpferkäfing 193  
 Dämpfung 297  
 Dämpfungsgrad 262  
 Dämpfungskoeffizient 298  
 Dahlander-Schaltung 186  
 Daniell-Element 140  
 Datenbus 237  
 Datenprotokoll 299  
 Datenrate 297  
 Datentelegramm 299  
 Dauerbetrieb 216  
 Dauerkurzschlussstrom 149, 196  
 Dauermagnet 48  
 dB 108  
 DC 230  
 Dehnung 243  
 Dehnungsmessstreifen 243  
 Dekodierer 132  
 De Morgan, Gesetz von 118  
 Dezibel 108  
 D-Flipflop 129  
 Diagonalspannung 240  
 diamagnetisch 53  
 Diaphragma 140  
 Diazed 326  
 Dielektrikum 43  
 Differenz-Eingangsspannung 107  
 Diffusion 93  
 Diffusionsspannung 93  
  
 Digital-Analog-Wandler 237  
 Digital-Multimeter 235  
 Dimmer 293  
 Diode 91, 94, 268  
 Dipol 46, 308  
 Direkt-Methanol-FC 145  
 Disjunktion 115  
 Dissoziation 137  
 div 228  
 DMFC 145  
 DMS 243  
 Donator 93  
 don't-care-position 119  
 Doppelschlussmotor 172  
 Doppelstabläufer 185  
 Doppelwandler 333  
 Dotierung 13, 93  
 download 136  
 Drahtantenne 308  
 drahtlos 307  
 Drain 98  
 DRAM 131  
 D-Regler 263  
 Dreheisenmesswerk 226  
 Drehfeld, gegenläufiges 191  
 - , mitläufiges 191  
 Drehfelddrehzahl 161  
 Drehfeldmaschine 160  
 Drehmoment, inneres 167, 176  
 - , synchronisierendes 200  
 Drehrichtungswechsel 173  
 Drehpulsmesswerk 225  
 Drehstrom 80  
 Drehstrombank 152  
 Drehstromsteller 289  
 Drehstrom-Transformator 146, 152  
 Drehtransformator 189  
 Drehzahlstellung 259  
 Dreieckschaltung 83  
 Dreiecksspannung 83  
 Dreieckstrom 83  
 Dreileiternetz 83, 248  
 Dreiphasensystem 80  
 Drift 241  
 Drossel 76  
 D-Strecke 261  
 Dualzahl 127  
 duplex 295  
 Durchbruchbereich 92  
  
 Durchflutung 51  
 Durchflutungsgesetz 51  
 Durchgangsleistung 156  
 Durchkontaktierung 134  
 Durchlassbereich 91, 112  
 Durchlassstrom 91  
 DVB 296  
  
 Echt-Effektivwert 235  
 Echtzeit-Ethernet 317  
 EEPROM 131  
 Effektivwert 38  
 Effektivwertzeiger 41  
 Eigenfrequenz 200, 262  
 Eigenkühlung 210  
 Eigenleitfähigkeit 93, 271  
 Eigenwelle 304  
 Eindrahtnachricht 240  
 Einflussgröße 224  
 Eingangs-Offsetspannung 109  
 Eingangs-Offsetstrom 109  
 Eingangs-Ruhestrom 109  
 Einheiten 223, 335  
 Einphasen-Asynchronmotor 191  
 Einphasen-Transformator 146  
 Einpuls-Schaltung 274  
 Einschaltverhältnis 283  
 Eintor 17  
 Eintorgleichung 25  
 Einzelkompensation 323  
 Eisenfüllfaktor 65  
 Eisenkern 154  
 Eisenlinie 179  
 Eisenverluste 66, 147, 148, 166  
 Eisenverlustwiderstand 147  
 elektrisch 11  
 Elektrizitätszähler 237  
 Elektroblech 54, 65  
 Elektrode 43, 137  
 Elektrolyse 139  
 Elektrolyt 137  
 Elektrolytkondensator 89  
 Elektrolytkupfer 139  
 Elektromagnet 48, 66  
 Elektrometer 236  
 Elektronengas 12  
 Elektronikmotor 206  
 Elementarladung 11, 342  
 embedded controller 255  
 EMC 252  
 Emittor 100

- Emitterschaltung 106  
 Empfänger 300  
 Empfindlichkeit 232, 243  
 EMV 252, 294  
 Endwert 47, 63  
 Energie des Kondensators 45  
 Energie, magnetische 62  
 -, thermische 19  
 Energie-Ausnutzungsfaktor 143  
 Energiemessung 249  
 Entladung, elektrostatische 135  
 EOI 240  
 EPROM 131  
 Erder 327  
 Erdseil 325  
 Erregerstrom 163  
 Erregung 160  
 Ersatzgrößen 245  
 Ersatzzeitwert 28, 79  
 Ersatzquelle 32, 33  
 Ersatz-Reihenwiderstand 89  
 Ersatzwiderstand 28, 31, 32, 79  
 Erwärmung 210  
 Erzeuger 16  
 ESD 135  
 ESR 89  
 Ethernet 312  
 -, drahtloses 314  
 eV 93  
 Exklusiv-ODER 128  
 Explosionsschutz 214  
  
 FAN 316  
 Farad 43  
 Faraday-Konstante 138  
 Faradaysche Gesetze 138  
 Farbcode 86  
 Fast Ethernet 311  
 FC 144  
 Fehler 224, 228  
 Fehlerstrom-Schutzschalter 330  
 Feld, elektrisches 42  
 -, homogenes 42, 49  
 -, inhomogenes 43  
 -, magnetisches 48  
 Feldbus 256, 316  
 Feldebene 256  
 Feldeffekttransistor 96  
 Feldkonstante, elektrische 44, 340  
 -, magnetische 50, 340  
 Feldlinien 42, 48  
  
 Feldstärke, elektrische 20, 42  
 -, magnetische 50  
 Feldverluste 166  
 Feldwicklung 163  
 Fenster, optisches 305  
 ferromagnetisch 53  
 Festwertregelung 260  
 FET 98  
 FFT 246  
 Filter 112  
 -, aktive 112  
 FI-Schutzschalter 330  
 Flash-Converter 234  
 Flipflop 120  
 -, getaktetes 121  
 -, taktflankengesteuertes 122  
 -, taktzustandgesteuertes 122  
 Flüssigkristallelement 132  
 Fluss, magnetischer 50  
 Flussdichte, elektrische 44  
 -, magnetische 50  
 Flusssteuerung 259  
 Folgeregulierung 260  
 Formfaktor 40  
 Fourier-Reihe 246  
 FPGA 136  
 Freilaufdiode 271, 283  
 Freilaufzweig 281  
 Freileitung 324  
 Freiraumausbreitung 310  
 Fremdinduktion 61  
 Fremdkühlung 210  
 Frequenz 37  
 frequenzkompensiert 230  
 Frequenzteiler 126  
 -, asynchroner 127  
 -, synchroner 127  
 Frequenzrichter 269, 270, 286  
 Frequenzumtastung 297  
 Frequenzwandler 190  
 FTP 316  
 Führungsgröße 260  
 fullcustom IC 135  
 Fundamenterder 327  
 Funkkanal 307  
 Funktion 258  
 Funktionsbaustein 258  
 Funkuhr 251  
 Gage-Faktor 243  
  
 Galvanisches Bad 138  
 Galvanisches Element 139, 140  
 Galvanoplastik 138  
 Galvanostegie 138  
 Galvanotechnik 138  
 GaN 269  
 Garantiefehlergrenze 224  
 Gate 98, 271  
 Gatter 115  
 Gauß 336  
 Gegenkopplung 109  
 Gegenstrombremsung 173, 190  
 Genauigkeit 224  
 Genauigkeitsklasse 223  
 Generation 93  
 Generator 160  
 Generatorbetrieb 190  
 gesättigt 53  
 Gesetz, assoziatives 118  
 -, distributives 118  
 -, kommutatives 118  
 - von De Morgan 118  
 gesteuert 275  
 Getriebemotor 221  
 Gießharztransformator 156  
 Gigabit Ethernet 311  
 Glättung 276  
 Glättungsdrossel 277  
 Gleichanalyse 102  
 Gleichfeldmaschine 160  
 Gleichpolmotor 209  
 Gleichrichten 270  
 Gleichrichtung 37  
 Gleichrichtwert 38  
 Gleichspannung 13  
 Gleichspannungsverstärker 108  
 Gleichspannungs-Zwischenkr. 282  
 Gleichstrom 14  
 Gleichstrombremsung 190  
 Gleichstrommagnet 66  
 Gleichstrommaschine 163  
 Gleichstromsteller 282  
 Gleichstromumrichten 270  
 Gleichtaktunterdrückung 109  
 Gleichwert 37  
 GND 230  
 GPIB 238  
 Gradientenprofil 304  
 Grenzfrequenz 112  
 Großsignalanalyse 104  
 Grundeintore 69

- Grundgatter 116  
 Grundlast 320  
 Grundschiwingung 246  
 Grundverknüpfung 115  
 Gruppenkompensation 323  
  
 Halbaddierer 128  
 Halbbrücke 241  
 Halbelement 140  
 Halbleiter 13, 92  
 Halbleiter-Temperatursensor 244  
 Halbschrittbetrieb 208  
 Hall-Effekt 68  
 Hall-Generator 68  
 Hall-Spannung 68  
 Halteglied 258  
 Handshakebus 239  
 Hauptfeld 167  
 Hauptfeldspannung 148  
 Hauptfluss 147  
 Hauptpol 163  
 Hauptpotenzialausgleich 330  
 Hauptreaktanzen 147  
 HCS 305  
 Henry 56, 61  
 Hertz 37  
 Heterodiode 97  
 Heylandkreis 178  
 HGÜ 325  
 HIGH 133  
 Hochpass 113  
 Hochsetzsteller 282  
 Hochspannung 320  
 Hochstab 185  
 Hochtemperatur-Supraleiter 23  
 Hornstrahler 308  
 Host-Controller 314  
 HP-IB 238  
 HTS 23  
 HTTP 316  
 hub 313  
 Hysterese motor 208  
 Hysterese schleife 54  
 Hysterese verluste 65  
  
 IC 47, 64, 103, 107, 132  
 IEC 238, 252  
 IEC-Bus 238  
 IEEE 238, 309  
 IFC 240  
 IGBT 269, 273  
  
 IGFET 98  
 Impedanz 70  
 Induktion 58  
 Induktion bei Drehbewegung 60  
 Induktion bei ruhender Spule 60  
 Induktionsgesetz 58  
 Induktionsmesswerk 227  
 Induktionsschleife 255  
 Induktivität 61  
 Induktor 160  
 Industrial-Ethernet 314  
 Industrie-PC 254  
 Innenleitwert 24  
 Innenwiderstand 24  
 Inselbetrieb 196  
 Integrierer 111  
 Intensitätsmodulation 306  
 INTERBUS 257, 317  
 Internet-Protokoll 314  
 Ion 12, 137  
 ionisiert 12  
 IP 214, 314  
 IPC 254  
 I-Regler 263  
 i-Schicht 271  
 ISDN-Anschluss 301  
 Isolator 12, 92  
 Isolierschicht-FET 99  
 Isolierstoffklasse 210  
 Isthmus 207  
 I-Strecke 261  
 Ist-Zustand 253  
  
 JFET 98  
 JK-Flipflop 122  
  
 Kabel 295, 325  
 Käfigläufer 183  
 Kalendar 215  
 Kaltleiter 22  
 Kanal 98  
 Kanalcodierung 296  
 Kapazität 43, 143  
 Kappsches Dreieck 150  
 Kathode 93, 137  
 Kationen 137  
 Keilstab 185  
 Kern 304  
 Kernkräfte 11  
  
 Kerntyp 154  
 Kilogramm 335  
 Kippmoment 178, 198  
 Kippschaltung, monostabile 124  
 Kippschlupf 178  
 Kirchhoffscher Satz 27, 30  
 Kleinmotor 204  
 Kleinsignalanalyse 104  
 Kleintransformator 146, 158  
 Klirrfaktor 246  
 Knopfzelle 141  
 Knoten 27  
 Knotenpotenzialverfahren 35  
 Knotensatz 27, 78  
 Knotenspannung 35  
 Kodierer 132  
 Körper 330  
 Körperschluss 330  
 Koerzitivfeldstärke 54  
 Kohlebürsten 164  
 Kollektor 100  
 Kollision 312  
 Kommutator 163  
 Kommutierung 166, 278  
 Kommutierungsdrossel 277  
 Kommutierungsspannung 278  
 Komparator 123  
 Kompensation 109, 322  
 Kompensationswicklung 169  
 Komplement 129  
 Kondensator 43  
 Konformitätserklärung 252  
 konjugiert komplexer Strom 75  
 Konjunktion 115  
 Kontaktspannung 92  
 Körperschluss 329  
 Korrosion 145  
 Kraft auf eine Ladung 68  
 Kraft auf Leiter 68  
 Kraftmessdose 243  
 Kraftsensor 243  
 Kraftwerk 319  
 Kreisfrequenz 39  
 Kreisringpule 52  
 Kryolith 139  
 Kühler, thermoelektrischer 92  
 Kühlung 210  
 Kupferverluste 147, 150, 175, 175  
 Kurzschluss 23  
 Kurzschlussläufer-Motor 183

- Kurzschlussreaktanzen 149  
 Kurzschlussspannung 149  
 Kurzschlussstrom 23  
 Kurzschlussverluste 150  
 Kurzschlussversuch 181  
 Kurzstatormotor 202  
 Kurzzeitbetrieb 217  
 Kusa-Schaltung 294
- Ladung 11  
 Läufer 160  
 Läufereschiene 202  
 Läuferstillstandspannung 175  
 Lagerschild 165  
 Lamelle 163  
 LAN 296, 304, 312  
 Langstabilisator 325  
 Langstatormotor 203  
 LASER-Betrieb 306  
 LASER-Diode 303  
 Last, symmetrische 248  
 Laufzeitverzögerung 126, 133  
 Lawinen-Photodiode 306  
 LCD 132  
 LED 96, 132, 303  
 Leerlaufspannung 23  
 Leerlaufstrom 148  
 Leerlaufverluste 148  
 Leerlaufversuch 180  
 Leistung, innere 166, 175  
 -, natürliche 325  
 -, mechanische 176  
 Leistungselektronik 269  
 Leistungsfaktor 73  
 Leistungshalbleiter 270  
 Leistungsmessung 247  
 Leistungsschild 214  
 Leistungsschwingung 72  
 Leistungstransformator 146  
 Leiter 12  
 -, linearer 20  
 Leiterbahntflechtung 134  
 Leiterplatte 134  
 Leitfähigkeit 20  
 Leitung 295  
 Leitungsband 94  
 Leitungsschutzschalter 327  
 Leitungsschutzsicherung 326  
 Leitwert, elektrischer 20  
 -, komplexer 70  
 -, magnetischer 56
- Lenzsches Gesetz 59  
 Lesen 129  
 Leuchtdiode 96, 132, 303  
 Lichtausbeute 97  
 Lichtgeschwindigkeit 342  
 Lichtmaschine 18, 273  
 Lichtstärke 96  
 Lichtstrom 96  
 Lichtwellenleiter 303  
 Linearmotor 202  
 Linkslauf 163  
 Listener 238  
 Lithium-Iod-Batterie 141  
 Lithium-Ionen-Akku 144  
 Loch 93  
 Löttauge 134  
 Logikfamilie 133  
 Logikpegel 133  
 Lokalelement 145  
 Lorentzkraft 68  
 Losbrechmoment 215  
 LOW 133  
 LTSpice 101  
 Luftspalt 57, 160  
 Luftspaltleistung 175  
 Luftspaltlinie 178  
 Lumen 96  
 Lumineszenzdiode 96, 132  
 Lux 96
- M3C 278  
 MAC-Adresse 312  
 Magnet 48  
 magnetisch hart 54  
 magnetisch weich 54  
 Magnetisierungskurve 54  
 Magnetisierungsstrom 147  
 Magnetläufermotor 208  
 Magnetostriktion 54  
 Magnetventil 256  
 Mantel 304  
 Manteltyp 154  
 Masche 29  
 Maschengleichung 29  
 Maschensatz 30, 78  
 Maschinentransformator 152  
 Masse 31  
 -, molare 138  
 Master 257  
 Master-Slave-Flipflop 122
- Master-Slave-Prinzip 317, 318  
 Maxwell 336  
 Maxwell-Wien-Brücke 250  
 memory-Effekt 144  
 Messbrücke 240  
 Messgerät, elektrodynamisches 227  
 Messverfahren 223  
 Messwandler 157  
 Messwert 223  
 Methan 320  
 Mikanit 164  
 Mikroprozessor 254  
 Millmotor 169  
 Minterm 119  
 Mischspannung 37  
 Mischstrom 37  
 Mitkopplung 109  
 Mittellast 320  
 Mittelspannung 152, 320  
 Mittelpunktschaltung 275, 280  
 MK-Kondensator 89  
 Modell 12  
 MODEM 130, 301  
 Monoflop 124, 125  
 Monomode-LWL 304  
 Monopol 308  
 MOSFET 98, 272  
 Motor 160  
 -, fremderregter 171  
 Motorvollschutz 213  
 MP-Kondensator 88  
 MPP 96  
 Multi-Master-System 257  
 Multimeter 226  
 Multimode-LWL 304  
 Multitasking 257  
 Multivibrator, astabiler 125
- naheilen 39  
 Näherungssensor 255  
 NAND-Gatter 117  
 Nebenschlusskennlinie 170  
 Nebenschlussmotor 169  
 Nebenwiderstand 225  
 Negation 115  
 Negativlogik 134  
 Nennleistung 150  
 Nennspannung 148  
 Nennwirkungsgrad 151  
 Netz 35  
 -, lokales 299, 307, 312

- Netzdiode 271  
 Netzwerk 35  
 Netzwerkanalyse 35, 101  
 Neukurve 53  
 Neutralleiter 81  
 Neutralleiterstrom 82  
 Nichtleiter 12  
 NICHT-Verknüpfung 115  
 Nickel-Cadmium-Akku 143  
 Nickel-MH-Akku 144  
 Niederspannung 152, 320  
 NIGFET 98  
 n-Leiter 93  
 NMOS-Transistor 99  
 Nordpol 48  
 Normalform, disjunktive 119  
 Normalzuordnung 134  
 Norton-Theorem 32  
 NTC-Widerstand 88  
 Nullphasenwinkel 39  
 Nullzustand 284, 287  
 Nur-Lese-Speicher 131  
 Nutzbremmung 173  
  
 Oberflächenerder 327  
 oberflächenmontiert 134  
 Oberschwingung 246  
 Oberspannungswicklung 146  
 ODER-Verknüpfung 113  
 Öffner 254  
 Oersted 336  
 Ohm 19  
 Ohmscher Widerstand 20, 86  
 Ohmsches Gesetz 20  
 Operationsverstärker 107  
 -, kompensierter 109  
 -, realer 109  
 Optokoppler 256  
 Ortskurve 79  
 OSI-Modell 312  
 Oszillator, digitaler 125  
 Oszilloskop 228  
 Oxidation 139  
  
 PAFC 145  
 PAL 136  
 PAM 289  
 PAN 318  
 Parallelbetrieb 153  
 Parallelregister 129  
 Parallelresonanz 78  
 Parallelschaltung 28, 77  
  
 Parallel-Serien-Wandlung 130  
 Parallelwicklung 156  
 paramagnetisch 53  
 PARAM 103  
 Parameter 102  
 Paritätsbit 299  
 PCB 134  
 PCS 305  
 PE 332  
 Peltier-Effekt 90  
 PEM-FC 144  
 PEN-Leiter 331  
 Pendelmoment 208  
 Pendelungen 201  
 Periodendauer 37  
 periodisch 37  
 periodischer Fall 262  
 Permeabilität 52  
 Permeabilitätszahl 52  
 Permittivität 44  
 Permittivitätszahl 44  
 P-Form 41  
 Phasenanschnittsteuerung 277  
 Phasenspektrum 246  
 Phasenverschiebungswinkel 39  
 phasenverschoben 39  
 Phasenwinkel 39  
 Photodiode 303  
 PID-Regler 263, 267  
 piezoelektrischer Effekt 125  
 Piezowandler 256  
 pin-Diode 271  
 pin-Photodiode 306  
 Planartechnik 135  
 Plattenkondensator 43  
 PLD 135  
 p-Leiter 93  
 PM-DC-Motor 205  
 -, bürstenloser 206  
 PM-Motor 209  
 PMOS-Transistor 99  
 P-NET 256  
 pn-Übergang 93  
 POF 305  
 Pol 17, 48  
 Polarisation 309  
 Polarisationsverluste 48  
 Polkern 165  
 Polpaarzahl 160  
 Polrad 193  
 Polradspannung 195  
  
 Polradwinkel 197  
 Polschuh 165  
 Positivlogik 134  
 Potenziometer 87  
 Potenzial 30  
 Präambel 311  
 P-Regler 263  
 Primärelement 140  
 Primärenergie 319  
 Primärspannung 146  
 Primärwicklung 146  
 Probe 101  
 PROFIBUS 256, 317  
 programmierbare Logik 135  
 PROM 131  
 Proportionalstrecke 261  
 Prozess 253  
 P-Strecke 261  
 P-T<sub>1</sub>-Strecke 261  
 P-T<sub>2</sub>-Strecke 262  
 PTB 237, 251  
 PTC-Widerstand 87  
 Puls-Amplituden-Modulation 289  
 Pulsmuster 289  
 Pulsstromrichter 289  
 Pulsweite 283  
 Puls-Weiten-Modulation 282, 289  
 Pulszahl 275  
 Punkt maximaler Leistung 96  
 Punkt-zu-Punkt-Verbindung 298  
 PWM 282, 289  
  
 q-Achse 199  
 Quantisierungsfehler 232  
 Quarz 125  
 Quelle 15, 23  
 -, lineare 24  
 Quellenspannung 24  
 Quellenstrom 24  
  
 RAM 131  
 Raumwinkel 96  
 Raumzeiger 290  
 Raumzeiger-Modulation 289  
 Reaktionsmoment 193, 199  
 Reaktanz 70  
 -, synchrone 195  
 Rechtslauf 163  
 Redoxreaktion 139  
 Reduktion 139  
 Redundanz 115

- Referenz-Spannungsquelle 234  
 Reflektorantenne 308  
 Regeldifferenz 260  
 Regeleinrichtung 260  
 Regelgröße 260  
 Regelkreis 260  
 Regelstrecke 260  
 Regelung 253  
 Register 129  
 Regler 260  
 -, differenzierender 263  
 -, integrierender 263  
 -, proportional wirkender 263  
 -, stetiger 263  
 Reibungselektrizität 135  
 Reibungsverluste 166  
 Reihenresonanz 76  
 Reihenschaltung 31, 75  
 Reihenschlussmotor 171  
 Reihenschaltung 156  
 Rekombination 95  
 Relais 254  
 Reluktanzmotor 200, 208  
 Remanenzflussdichte 53  
 REN 240  
 Resolver 242  
 Resonanzfrequenz 76, 78  
 Resonanzüberhöhung 76, 78  
 R-Form 41  
 Richtdiagramm 308  
 Richtungssinn 13, 15  
 Ringzähler 130  
 RMS 38  
 ROM 131  
 -, programmierbares 131  
 Rost 145  
 Rotor 160  
 RS-232-Schnittstelle 131, 299  
 RS-422-Schnittstelle 301  
 RS-485-Schnittstelle 131, 302  
 RS-Flipflop 120  
 Rückkopplung 109  
 Rückstellmoment 200  
 Rundfeuer 168  
 Rundstab 185  
 Sättigung 53  
 Sattelmoment 219  
 Schaltalgebra 117  
 Schaltgruppe 152  
 Schalthysterese 124  
 Schaltnetz 120  
 Schaltperiode 283  
 Schaltung, analoge 105  
 -, integrierte 107, 132, 134  
 -, zweiwertige 115  
 Schaltwerk 120  
 Scheibenläufer-Motor 206  
 Scheinleistung 72  
 Scheinleitwert 70  
 Scheinwiderstand 70  
 Scheitelwert 37  
 Schematics 101  
 Schenkelpolmaschine 193  
 Schicht 315  
 Schieberegister 130  
 Schleifringläufer-Motor 187  
 Schließer 254  
 Schlupf 174  
 Schmitt-Trigger 124  
 Schnittstelle 295  
 Schottky-Diode 95  
 Schreiben 129  
 Schrittmotor 208  
 Schrittspannung 328  
 Schrittwinkel 208  
 Schütz 254  
 Schutz  
 -, bei indirektem Berühren 328  
 -, gegen direktes Berühren 328  
 Schutzart 214  
 Schutzisolierung 332  
 Schutzkleinspannung 329  
 Schutzleiter 331  
 Schutzschicht 304  
 Schutztrennung 333  
 Schweißtransformator 158  
 Schwellenspannung 99  
 Schwingung 37  
 -, nullphasige 39  
 Schwingungsbreite 37  
 Schwingungszustand 80  
 Schwungmoment 218  
 Seebeck-Effekt 90  
 Sekundärelement 142  
 Sekundärspannung 146  
 Sekundärwicklung 146  
 Selbsthaltung 213  
 Selbstinduktion 61  
 Selbstinduktivität 61  
 Selbstkühlung 210  
 Selektivität 327  
 SE-Magnete 202  
 semicustom IC 135  
 Sender 300  
 Sensor 223, 241 ff.  
 -, induktiver 242  
 -, kapazitiver 242  
 -, potenziometrischer 241  
 Servomotor 207, 256  
 SHE 140  
 shunt 225  
 SI 223  
 SiC 269  
 Sicherung 327  
 Siemens 20  
 Signal 106, 297  
 Signalverzerrung 297  
 Silberoxid-Zink-Batterie 141  
 Silikatglas 305  
 Silizium 92  
 simplex 295  
 Simulation, rechnergestützte 101  
 Sinusanalyse 104  
 Sinusgröße 39  
 Sinusspannung 39  
 Sinusstrom 39  
 Six-Pack 274  
 Skalar 13  
 Slave 257  
 slew rate 109  
 SMD 134  
 SMTP 316  
 Solarmodul 95  
 Solarzelle 94  
 Soll-Zustand 253  
 Source 96  
 Spaltpolmotor 207  
 Spannung, elektrische 13  
 -, magnetische 56  
 -, wiederkehrende 89  
 Spannungsänderung 150  
 Spannungsebene 322  
 Spannungseisen 228  
 Spannungsfall 29  
 Spannungsfolger 111  
 Spannungs-Frequenz-Betrieb 288  
 Spannungspfad 227  
 Spannungsquelle 24  
 -, spannungsgesteuerte 266  
 Spannungsreihe, thermoelektr. 90  
 -, elektrochemische 140

- Spannungsstabilisierung 105  
 Spannungssteuerung 259  
 Spannungsteiler 87  
 Spannungsteilerregel 31  
 Spannungs-Übertragungsfaktor 108  
 Spannungswandler 157  
 Spannungszustand 284  
 Spartransformator 156  
 Speicher mit beliebig, Zugriff 131  
 speicherprogrammierbar 254  
 Spektrum 246  
 Spektrumanalysator 246  
 Sperrbereich 91, 112  
 Sperrschicht 93  
 Sperrschicht-FET 98  
 Sperrstrom 91  
 Sperrverzugszeit 271  
 SPICE 101  
 Spitzenlast 320  
 Spitze-Spitze-Wert 37  
 Sprungantwort 261  
 Sprungtemperatur 23  
 SPS 254  
 Spule 51  
 SR 109  
 SRAM 131  
 SRQ 240  
 Stabilisierungsschaltung 105  
 Stabilität 268  
 -, statische 221  
 Ständer 160  
 Ständeranlasser 184  
 Standard-Wasserstoffelektrode 140  
 Standby-USV 333  
 Startbit 299  
 Startwort 311  
 Stator 160  
 Stauchung 243  
 Steg 163  
 Stegspannung 168  
 Stellgröße 260  
 Stelltransformator 157, 321  
 Step-lap-Schichtung 154  
 Steradian 96  
 Stern-Baum-Topologie 313  
 Stern-Dreieck-Schalter 184  
 Sternschaltung 81  
 Sternspannung 81  
 Sternstrom 82  
 Steuerbus 240  
 Steuerkennlinie 280, 293  
 Steuerung 253  
 Steuerwinkel 277  
 Störabstand 133  
 Störquelle 252  
 Störsenke 252  
 Stoffmenge 138  
 Stoppbit 299  
 Stoßkurzschlussstrom 149, 196  
 Strang 81  
 Strangspannung 81  
 Streufaktor 58  
 Streufluss 58, 147  
 Streureaktanz 147  
 Strom 14  
 Stromdichte 20  
 Stromeisen 228  
 Stromkreis 15  
 Strommesszange 245  
 Strompfad 227  
 Stromquelle 24  
 Stromrichter 269  
 -, maschinengeführter 268  
 -, netzgeführter 268, 275  
 -, selbstgeführter 268, 280  
 Stromrippel 284  
 Strom-Spannung-Wandler 110  
 Stromstabilisierung 106  
 Stromstärke 14  
 Stromteilerregel 29  
 Stromverdrängung 185  
 Stromwärmeverluste 147  
 Stromwandler 157  
 Stromwender 163  
 Stromwendung 165  
 Stufenprofil 304  
 Subtraktion von Dualzahlen 129  
 Südpol 48  
 Sulfatisierung 142  
 Summenrahmen 317  
 Summierer 111  
 Supraleiter 23  
 Supraleitung 23  
 Switch 313  
 Symbol 296  
 -, komplexes 41  
 symmetrisch 80  
 Synchrondrehzahl 161  
 Synchronisierung 201  
 Synchronmaschine 193  
 System-Multimeter 236  
 Tagesbelastungskurve 320  
 Takt 121  
 Talker 238  
 Task 257  
 Tastkopf 231  
 Tauchkernsensor 242  
 TCP/IP-Protokoll 314  
 TEC 92  
 Teile, aktive 329  
 TelNet 316  
 Temperaturkoeffizient 22  
 Temperatursensor 244  
 Tesla 50  
 Textur 56  
 T-Flipflop 126  
 Thermistor 87  
 Thermoelement 90  
 Thermospannung 90  
 Thévenin-Theorem 32  
 Thyristor 271  
 Tiefenerder 328  
 Tiefnutläufer 185  
 Tiefpass 112  
 Tiefsetzsteller 282  
 TN-Netz 331  
 Toggle 123  
 Tonerde 139  
 Tor 17  
 Totzeit 261  
 Trägheitsmoment 218  
 Trägheitsradius 218  
 Tragmast 324  
 Transformator 146  
 -, idealisierter 146  
 -, realer 147  
 Transientanalyse 103  
 Transistor 98  
 Transitfrequenz 108  
 Transrapid 203  
 Transversalflussmotor 222  
 Treiberstufe 132  
 triggern 122  
 TTL-Technik 134  
 TT-Netz 332  
 Trockenelement 141  
 Turbogenerator 194  
 Twisted-Pair-Kabel 301  
 Typenleistung 156



- UART 300  
 überregt 199  
 Übergabebus 239  
 Übergangsvorgang 63  
 Überlagerungssatz 34  
 Überlastbarkeit 178, 198  
 Überlastrelais 212  
 Überschwingweite 263  
 Übersetzungsverhältnis 146, 256  
 übersteuert 108  
 Übertemperatur 211  
 Übertrag 128  
 Übertragung, asynchrone 300  
 -, synchrone 301  
 Übertragungsfunktion 260  
 $U/f$ -Betrieb 288  
 Ultra-Kondensator 89  
 Umlaufsinn 29  
 Umrichter 270  
 UND-Verknüpfung 113  
 ungünstigster Betriebsfall 133  
 Universalmotor 204  
 Unsicherheit 224  
 unterregt 199  
 Unterspannungswicklung 146  
 USB 296, 317  
 USV 333
- V-24-Schnittstelle 131  
 Valenzband 92  
 Valenzelektronen 12  
 Variable, logische 115  
 Varistor 88  
 VDR 88  
 Vektor 13  
 Verarmungs-MOSFET 99  
 verbindungsprogrammiert 254  
 verbotener Bereich 133  
 Verbraucher 16  
 Verbundseil 324  
 Verkettungsfluss 59  
 Verknüpfung, logische 115  
 Verlustfaktor 77  
 Verlustlinie 178  
 Verschiebungsdichte 44  
 Versorzeichen 41  
 Verstärker 106  
 -, invertierender 110  
 -, nicht invertierender 110  
 Verträglichkeit, elektromagnet. 252  
 Verzögerungs-Flipflop 129  
 Verzögerungsstrecke 261
- Verzögerungszeit 124  
 Verzweigungspunkt 26  
 Vielfachmessgerät 226  
 Vier-Leitermessung 236  
 Vierleiternetz 85, 248  
 Vierquadrantenbetrieb 163, 279, 289  
 Vier-Quadranten-Steller 283  
 Viertelbrücke 241  
 Volladdierer 128  
 Vollaussteuerung 280  
 Vollbrücke 241  
 Vollpolmaschine 193  
 Vollschriftbetrieb 208  
 Volt 13  
 Volta-Spannung 90  
 Voltmeter 14  
 voreilen 39  
 Vorwärtsspannung 272  
 Vorwiderstand 226  
 VR-Motor 208
- Wärmeenergie 19  
 Wärmekapazität 19  
 wafer 135  
 Wahrheitstabelle 115  
 Wanderfeld 202  
 Watt 17  
 Weber 50  
 Wechselfeldmaschine 160  
 Wechselgröße 37  
 Wechselfeld-Schrittmotor 209  
 Wechselrichten 270  
 Wechselrichter 280  
 Wechselspannung 37  
 Wechselstrom 37  
 Wechselstrommagnet 67  
 Wechselstromsteller 290  
 Wechselstromumrichten 270  
 Weißsche Bezirke 53  
 Wellenlänge 303  
 Wellenlängenmultiplex 307  
 Wellenwiderstand 302  
 Welligkeit 275  
 Wendepol 168  
 Wendschutzschaltung 258  
 Wert, abgelesener 224  
 Wertigkeit 138  
 Wickelkondensator 89  
 Wicklung 155  
 Widerstand 19, 86  
 -, einstellbarer 86
- , komplexer 70  
 -, magnetischer 56  
 -, nichtlinearer 21  
 -, ohmscher 20  
 -, spannungsabhängiger 88  
 -, spezifischer 21  
 -, temperaturabhängiger 22  
 Widerstandsbremse 173  
 Widerstandsmoment 215  
 Widerstandsthermometer 244  
 Wien-Brücke 250  
 Wirbelströme 64  
 Wirbelstrombremse 65  
 Wirkarbeit 73  
 Wirkleistung 38  
 Wirkleitwert 70  
 Wirkwiderstand 70  
 Wirkungen des Stromes 14  
 Wirkungsgrad 18  
 worst case 133  
 Wort 130
- x-y-Betrieb 229
- Yagi-Antenne 309
- Z-Diode 95  
 Zähler 127  
 Zeiger 40  
 Zeitablenkung 229  
 Zeitbereich 103  
 zeitinvariant 260  
 Zeitkonstante 47, 63  
 Zeitmessung 251  
 Zeitzeichensender 251  
 Zickzackschaltung 152  
 Zink-Braunstein-Batterie 141  
 Zone, indifferente 48  
 -, neutrale 165  
 Zündimpuls 271  
 Zündschutzart 214  
 Zündzeitpunkt, natürlicher 277  
 Zustand 258  
 Zweig 28  
 Zwei-Leitermessung 236  
 Zweipol 17  
 Zweirampenumsetzer 232  
 Zweispeicherflipflop 122  
 Zweitor 87  
 Zylinderspule 51