

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.

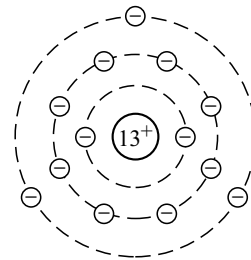


Bild 1.2 Modell des Aluminiumatoms

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.

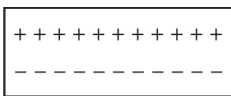


Bild 1.3 Die Elektrizitätsmengen eines ungeladenen Körpers heben sich nach außen hin auf

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.

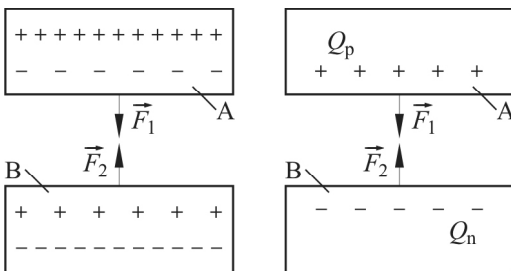


Bild 1.4 Elektronenmangel bewirkt die positive Ladung des Körpers A und Elektronenüberschuss die negative Ladung des Körpers B

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.

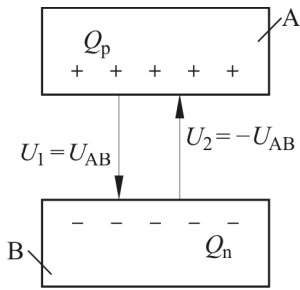


Bild 1.5 Zusammenhang zwischen dem Richtungssinn der Spannung U_{AB} und dem Bezugssinn U_1 bzw. U_2

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.

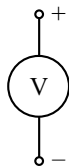


Bild 1.6 Voltmeter mit Klemmenbezeichnungen für Gleichspannung

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.

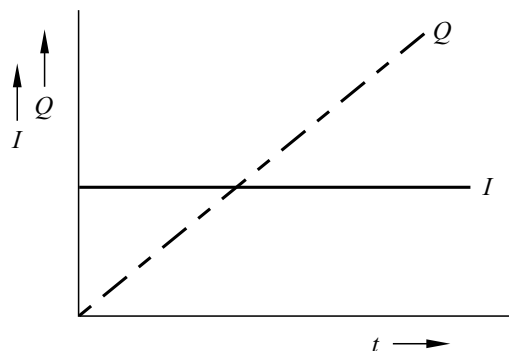


Bild 1.7 Ladungs-Zeit-Diagramm und Strom-Zeit-Diagramm eines Gleichstromes

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.

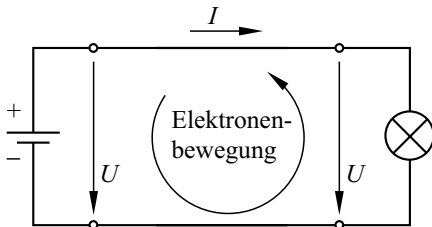


Bild 1.8 Einfacher Stromkreis mit Batterie und Glühlampe

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.

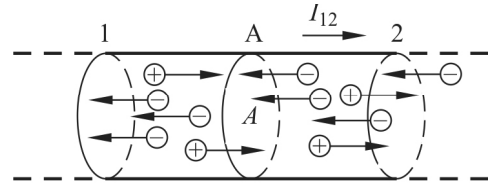


Bild 1.9 Bewegung positiver und negativer Ladungsträger durch einen Querschnitt A

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:

$$I_{12} = \frac{Q_p - Q_n}{t} \tag{1.8}$$

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?

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

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 .

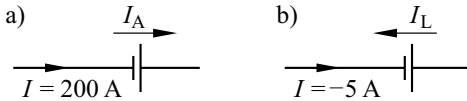


Bild 1.10 Zusammenhang zwischen dem Richtungssinn I_A bzw. I_L und dem Bezugssinn I des Stromes

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.

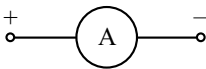


Bild 1.11 Amperemeter mit Klemmenbezeichnungen für Gleichstrom

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

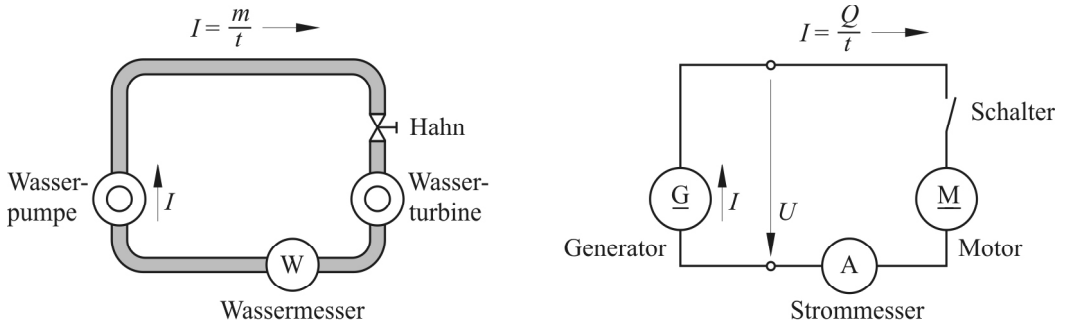


Bild 1.12 Vergleich zwischen einem Wasser- und einem elektrischen Stromkreis

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.

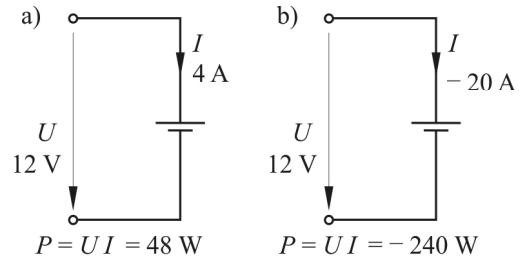


Bild 1.13 Bei gleichsinnigen Bezugspfeilen von Strom und Spannung ist die Leistung $P = UI$ positiv, wenn das Eintor als Verbraucher wirkt (a); wirkt das Eintor als Erzeuger, so ist die Leistung $P = UI$ negativ (b)

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:

$$\sum P = 0 \tag{1.13}$$

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-

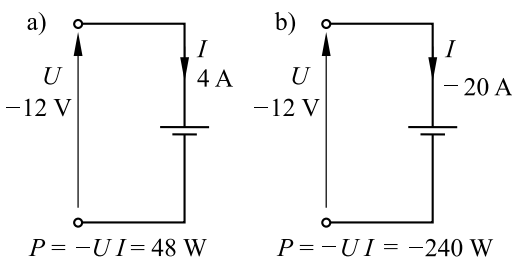


Bild 1.14 Bei entgegengesetzten Bezugspfeilen U und I ist die Leistung $P = -UI$ positiv, wenn das Eintor als Verbraucher wirkt (a); wirkt das Eintor als Erzeuger, so ist die Leistung $P = -UI$ negativ (b)

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:

$$P = UI \tag{1.14}$$

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.

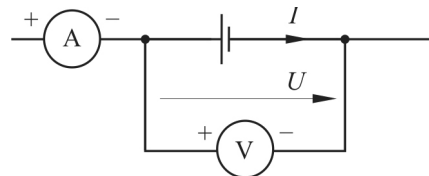


Bild 1.15 Akkumulator mit Messgeräten für Strom und Spannung

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_{ab} kleiner als die zugeführte Leistung P_{zu} . Der Quotient aus diesen beiden Leistungen wird als **Wirkungsgrad** (*efficiency*) η (griech. Buchstabe eta) bezeichnet:

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} \tag{1.15}$$

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_{verl} entstehen im Motor?

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

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

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

Die Leistung P_{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:

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

1.3.4 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** ϑ_1 (griech. Buchstabe theta) auf $\vartheta_2 > \vartheta_1$ erwärmt wird, nimmt dabei die **thermische Energie** W_{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_{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?

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_{th} umgewandelt wird, berechnen wir mit den Gln. (1.11 und 1.17):

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

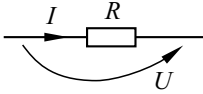


Bild 1.16 Schaltzeichen des Widerstandes mit Bezugspfeilen für Strom und Spannung

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 ϑ 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 .

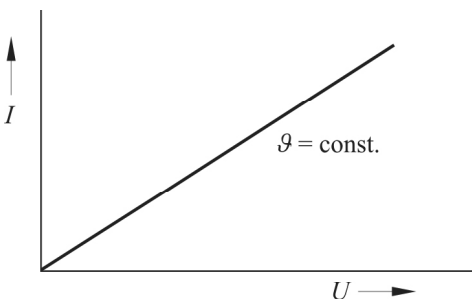


Bild 1.17 I - U -Kennlinie eines OHMSchen Widerstandes

Beispiel 1.6

Durch einen OHMSchen Widerstand $R = 150 \Omega$ fließt der Strom $0,2 \text{ A}$. 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:

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

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:

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

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*) γ (griech. Buchstabe gamma) bezeichnet:

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

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
 Drehpulmesswerk 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
 Elektrolech 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
 Emmitter 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
 Folgeregelung 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
 Lötauge 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-T₁-Strecke 261
 P-T₂-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
 Wendschüttschaltung 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