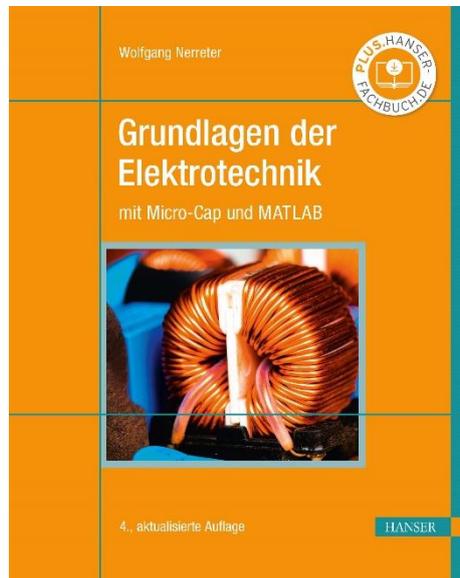


HANSER



Leseprobe

zu

Grundlagen der Elektrotechnik

von Wolfgang Nerreter

Print-ISBN: 978-3-446-48146-6

E-Book-ISBN: 978-3-446-48159-6

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446481466>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort zur 4. Auflage

Für die Entwicklung dieses Lehrbuches, dessen 1. Auflage im August 2006 erschien, gab es mehrere Gründe; die zwei wichtigsten waren:

- Die Grundlagen der Elektrotechnik sollten in *einem* Band zusammengefasst werden. Dies erforderte eine Konzentration des Stoffes, die vor allem unter dem Gesichtspunkt der Ordnung und der Systematik erfolgte.
- Für einige Teilgebiete gibt es Software, die weitgehend anerkannt ist und Verwendung findet. Im vorliegenden Buch werden Micro-Cap für die Schaltungssimulation sowie das Mathematik-Programm MATLAB erläutert und angewendet.

In der 4. Auflage wurden Korrekturen durchgeführt und Ergänzungen eingebracht.

Unser Wissen ist nicht vom Himmel gefallen, sondern wurde von einer Vielzahl kluger Köpfe erarbeitet und uns als Erbschaft hinterlassen. Die eingestreuten kurzen Hinweise mögen zu mehr Achtung vor der Wissenschaft führen und vor den Personen, die sie entwickelt haben. Diese Hinweise sollen aber keineswegs erschöpfend sein, sondern nur die Möglichkeit eröffnen, bei Interesse im Internet mehr über die Wissenschaftler zu erfahren.

Die wichtigsten Fachausdrücke der Elektrotechnik werden im Text auch in *englischer Sprache* gebracht; dabei wird die *amerikanische* Schreibweise bevorzugt, da sie in der überwiegenden Zahl von Veröffentlichungen angewendet wird.

Zur Überprüfung der Kenntnisse wurden 100 Aufgaben ausgewählt, deren Lösungen nach dem Lehrtext zu finden sind. Weitere Aufgaben mit Lösungen sowie zusätzliche Informationen werden auf den Websites plus.hanser-fachbuch.de und grundlagen-elektrotechnik.de angeboten.

Dem Carl Hanser Verlag und insbesondere Frau Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg gilt mein Dank für die vertrauensvolle und erfolgreiche Zusammenarbeit. Außerdem danke ich Herrn Prof. Dr. Helmut Haase, Lemgo, und Herrn Prof. Dr. Uwe Meier, Lemgo, für wichtige Hinweise.

Liebe Leserin, lieber Leser, ich würde mich freuen, wenn Ihnen das Buch gefällt und Sie erfolgreich damit arbeiten. Für Ihr Studium wünsche ich Ihnen viel Erfolg.

April 2024

Wolfgang Nerreter

Die Konzentration auf das Wesentliche ist natürlich eine Gratwanderung, bei der stets zu entscheiden ist, was wichtig und was entbehrlich ist. Eugen Roth formulierte dies so:

Der Leser, traurig, aber wahr,
ist häufig unberechenbar.
Hat er nicht Lust, hat er nicht Zeit,
dann gähnt er: „Alles viel zu breit.“
Wenn er jedoch nach etwas sucht,
was ich aus Raumnot nicht verbucht,
wirft er voll Stolz sich in die Brust:
„Aha, das hat er nicht gewusst!“

Manches von dem, was ich „nicht gewusst“ habe, finden Sie, liebe Leserin und lieber Leser, in dem zweibändigen Lehrbuch „Grundgebiete der Elektrotechnik“ von A. Führer, K. Heidemann und W. Nerreter, zu dem es auch noch einen Aufgabenband gibt.

Liebe Leserin, lieber Leser,

wahrscheinlich fällt Ihnen erst auf den zweiten Blick auf, dass die Formelzeichen für physikalische Größen kursiv stehen, d. h. um 15° nach rechts geneigt sind. Zahlen und Einheiten sind gerade gesetzt. So ist z. B. $e = 2,71828$ die Basis des natürlichen Logarithmus und e das Formelzeichen für die Elementarladung. Ein weiteres Beispiel: Ω ist die normierte Frequenz und Ω die Einheit des Widerstandes. Auch wenn der Zahlenwert einer physikalischen Größe festliegt, muss nach Norm das Formelzeichen kursiv stehen, z. B. $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs}/(\text{Am})$.

Eine Liste der verwendeten Formelzeichen finden Sie am Schluss des Buches. Die Einheiten sind im Anhang A2 auf den Seiten 364 und 365 aufgeführt, ebenso die Vorsatzzeichen, die den Faktor angeben, mit dem die Einheit multipliziert wird; so ist z. B. $1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F}$.

Wenn Sie einen Begriff suchen, schlagen Sie am besten im Sachwortverzeichnis nach. Besteht der Begriff aus nur *einem* Wort, so werden Sie ihn ohne Probleme finden. Suchen Sie jedoch einen aus zwei Worten bestehenden Begriff, wie z. B. differenzieller Widerstand, so schauen Sie bitte unter „Widerstand“ nach und Sie finden dort unter „-, differenzieller“ das Gesuchte.

Personennamen finden Sie im Namenverzeichnis am Ende des Buches. Im Text sind Namen in Kapitälchen gesetzt, damit z. B. klar wird, dass das LENZsche Gesetz von Herrn LENZ stammt und nichts mit dem Frühling zu tun hat. Lediglich im Literatur- und im Sachwortverzeichnis wurde auf die Kapitälchenschreibweise verzichtet.

Hinweise auf Literatur sind im Text in eckigen Klammern am Ende eines Satzes angegeben. Die zugehörigen Angaben von Autor, Titel des Werkes und Verlag bzw. Fundort finden Sie auf den Seiten 374 und 375. So ist z. B. [FHN1] ein Hinweis auf den Band 1 des Buches „Grundgebiete der Elektrotechnik“ der Autoren Führer, Heidemann und Nerretter, das im Carl Hanser Verlag erschienen ist.

Die ISBN eines Buches ist nicht angegeben, weil sich diese Nummer bei jeder Neuauflage ändert.

Etliche Aufgaben und Beispiele, aber auch einige Bilder wurden mit dem Programm MATLAB berechnet. Die zugehörigen Programme können Sie im Internet unter www.grundlagen-elektrotechnik.de abrufen. Unter dieser Adresse sind auch die Micro-Cap-Schaltungen zu finden, die Sie herunterladen können. Bitte lesen Sie hierzu den Text zum Haftungsausschluss auf der Seite 4.

Hinweise zur Benutzung des Buches

Formelzeichen

Vorsatzzeichen

Sachwortverzeichnis

Personennamen

Literatur

MATLAB-Programme

Micro-Cap-Schaltungen

Inhaltsverzeichnis

1 Grundbegriffe	11
1.1 Elektrischer Strom	11
1.1.1 Ladung; 1.1.2 Ladungsträger; 1.1.3 Ionisation; 1.1.4 Stromkreis; 1.1.5 Stromstärke; 1.1.6 Stromdichte; 1.1.7 Richtungssinn und Bezugssinn; 1.1.8 Strommessung	
1.2 Elektrische Spannung	20
1.2.1 Ladungstrennung; 1.2.2 Richtungssinn und Bezugssinn; 1.2.3 Spannungsmessung	
1.3 Leistung und Energie	21
1.3.1 Erzeuger und Verbraucher; 1.3.2 Leistung an einem Eintor; 1.3.3 Wirkungsgrad; 1.3.4 Elektrowärme	
1.4 Elektrischer Widerstand	26
1.4.1 Der Begriff Widerstand; 1.4.2 Das OHMSche Gesetz; 1.4.3 Linearer Leiter; 1.4.4 Widerstand von Isolierstoffen; 1.4.5 Nichtlinearer Widerstand; 1.4.6 Temperaturabhängigkeit; 1.4.7 Supraleitung	
1.5 Quellen	33
1.5.1 Leerlauf und Kurzschluss; 1.5.2 Ideale Quellen; 1.5.3 Lineare Quellen	
2 Netze an Gleichspannung	37
2.1 Verbindung von Eintoren	37
2.1.1 Bestimmung des Arbeitspunktes; 2.1.2 Leistungsanpassung	
2.2 Knotensatz	39
2.2.1 Der Begriff Knoten; 2.2.2 Knotengleichung; 2.2.3 Parallelschaltung von Widerständen	
2.3 Maschensatz	43
2.3.1 Maschengleichung; 2.3.2 Potenzial; 2.3.3 Reihenschaltung von Widerständen	
2.4 Ersatzschaltungen	47
2.4.1 Ersatzwiderstand; 2.4.2 Ersatzquelle	
2.5 Überlagerungssatz	51
2.6 Zweitore	52
2.6.1 Strombedingung; 2.6.2 Zweitorgleichungen; 2.6.3 Berechnung der Zweitorparameter; 2.6.4 Umwandlung der Zweitorparameter; 2.6.5 Zweitorschaltungen; 2.6.6 Gesteuerte Quellen; 2.6.7 Zweitor-Ersatzschaltung; 2.6.8 Symmetrie von Zweitoren	
2.7 Schaltungsberechnung	62
2.7.1 Netzwerkanalyse; 2.7.2 Knotenpotenzialverfahren; 2.7.3 Netzwerkanalyse mit SPICE; 2.7.4 Start mit Schematics; 2.7.5 Gleichanalyse; 2.7.6 Variation von Bauelementwerten	
3 Zeitkonstante Felder	68
3.1 Elektrisches Strömungsfeld	68
3.1.1 Homogenes Feld; 3.1.2 Inhomogenes Feld	
3.2 Elektrostatisches Feld	74
3.2.1 Homogenes Feld; 3.2.2 Influenz; 3.2.3 Inhomogenes Feld; 3.2.4 Punktladungen; 3.2.5 Permittivität; 3.2.6 Elektret; 3.2.7 Kapazitive Eintore; 3.2.8 Kondensatorschaltungen; 3.2.9 Kapazität von Leiteranordnungen	

3.3 Magnetisches Feld	85
3.3.1 Feldlinien von Magneten; 3.3.2 Magnetische Flussdichte; 3.3.3 Durchflutungsgesetz;	
3.3.4 Das Gesetz von BIOT-SAVART; 3.3.5 Materie im Magnetfeld; 3.3.6 Magnetische Werkstoffe;	
3.3.7 Magnetische Kreise; 3.3.8 Magnetischer Kreis mit Dauermagnet; 3.3.9 Kraft auf eine bewegte Ladung	
3.4 Energietransport	105
4 Zeitabhängige Größen	107
4.1 Periodische Größen	107
4.1.1 Periodendauer und Frequenz; 4.1.2 Gleichwert und Gleichrichtwert;	
4.1.3 Wirkleistung und Effektivwert; 4.1.4 Verhältniszahlen	
4.2 Sinusgrößen	112
4.2.1 Kreisfrequenz und Phasenwinkel; 4.2.2 Kenngrößen;	
4.2.3 Zeigerdarstellung; 4.2.4 Komplexe Symbole	
5 Zeitabhängige Felder	117
5.1 Vorgänge im elektrischen Feld	117
5.1.1 Der Begriff Grundeintor; 5.1.2 Kondensator an Sinusspannung;	
5.1.3 Energie eines geladenen Kondensators; 5.1.4 Elektrische Energiedichte;	
5.1.5 Kräfte auf Kondensatorplatten; 5.1.6 Polarisationsverluste; 5.1.7 Piezoelektrischer Effekt	
5.2 Vorgänge im magnetischen Feld	125
5.2.1 Induktionsgesetz; 5.2.2 Induktion bei Drehbewegung; 5.2.3 Ruheinduktion; 5.2.4 Selbstinduktion;	
5.2.5 Induktivität von Leiteranordnungen; 5.2.6 Gegenseitige Induktion; 5.2.7 Idealer Übertrager;	
5.2.8 Energie im Magnetfeld; 5.2.9 Verluste im Magnetfeld; 5.2.10 Kraft auf Magnetpole	
5.3 Elektromagnetisches Feld	143
5.3.1 MAXWELLSche Gleichungen; 5.3.2 Induzierte Spannung	
6 Netze an Sinusspannung	145
6.1 Grundeintore an Sinusspannung	145
6.1.1 Komplexer Widerstand; 6.1.2 Grundeintor R ; 6.1.3 Grundeintor L ; 6.1.4 Grundeintor C	
6.2 Verbindung von Grundeintoren	154
6.2.1 Reihenschaltung von R und L ; 6.2.2 Parallelschaltung von R und C ; 6.2.3 Reihenresonanz;	
6.2.4 Parallelresonanz	
6.3 Lineare Netze	164
6.3.1 Ersatzeintor; 6.3.2 Ersatzschaltung; 6.3.3 Berechnungsverfahren; 6.3.4 Resonanz	
6.4 Netze mit Quellen	170
6.4.1 Belastung idealer Sinusquellen; 6.4.2 Ersatzquellen; 6.4.3 Kompensation	
6.5 Netze mit linearen Zweitoren	175
6.5.1 Nachrichten-Übertragungssystem; 6.5.2 Ersatz-Widerstände;	
6.5.3 Anpassung; 6.5.4 Frequenzgang	
6.6 Ortskurven	183
6.6.1 Verbindungen von Grundeintoren; 6.6.2 Inversion; 6.6.3 Normierung	
6.7 Sinusanalyse	187

7 Drehstrom	190
7.1 Ströme und Spannungen	190
7.1.1 Symmetrische Größen; 7.1.2 Drehstromerzeuger; 7.1.3 Spannungssysteme	
7.2 Symmetrische Belastung	194
7.2.1 Sternschaltung; 7.2.2 Dreieckschaltung; 7.2.3 Zeitabhängigkeit der Leistung; 7.2.4 Drehfeld; 7.2.5 Kompensation	
7.3 Unsymmetrische Belastung	203
7.3.1 Sternschaltung am Vierleiternetz; 7.3.2 Dreieckschaltung; 7.3.3 Sternschaltung am Dreileiternetz	
7.4 Symmetrische Komponenten	207
7.4.1 Geschlossenes Zeigerdreieck; 7.4.2 Beliebige Lage der Zeiger	
8 Schaltvorgänge	212
8.1 Lineare Netze	212
8.1.1 Übergangsvorgang; 8.1.2 Schalterarten; 8.1.3 Netz mit einem Grundeintor C ; 8.1.4 Netz mit einer Spule; 8.1.5 Netz mit einem Schwingkreis	
8.2 Transientanalyse	224
8.2.1 BDF-Verfahren; 8.2.2 Durchführung der Analyse	
9 Nichtsinusförmige Größen	229
9.1 Synthese periodischer Größen	229
9.1.1 Zeitabhängige Größen; 9.1.2 FOURIER-Reihe	
9.2 Harmonische Analyse	230
9.2.1 Berechnung der FOURIER-Koeffizienten; 9.2.2 Analyse mit Micro-Cap	
9.3 Eigenschaften periodischer Größen	235
9.3.1 Wirkleistung; 9.3.2 Effektivwert; 9.3.3 Leistungsgrößen; 9.3.4 Verzerrungsleistung; 9.3.5 Klirrfaktor	
9.4 Nichtperiodische Größen	240
9.4.1 Komplexe FOURIER-Reihe; 9.4.2 FOURIER-Transformation; 9.4.3 Eigenschaften der FOURIER-Transformation	
10 Leitungen	244
10.1 Wellenausbreitung auf Leitungen	244
10.1.1 Leitungsarten; 10.1.2 Leitungsparameter; 10.1.3 Leitungsgleichungen; 10.1.4 Verlustlose Leitung; 10.1.5 Reflexion; 10.1.6 Reflexionsfaktor; 10.1.7 Verlustbehaftete Leitung	
10.2 Leitung an Sinusspannung	251
10.2.1 Wellengleichung; 10.2.2 Phasengeschwindigkeit; 10.2.3 Ströme und Spannungen; 10.2.4 Leitung als Zweitor; 10.2.5 Natürliche Leistung; 10.2.6 Verlustlose Leitung	
11 Bauelemente	259
11.1 Erwärmung und Kühlung	259
11.1.1 Leistungsbilanz; 11.1.2 Thermische Ersatzschaltung; 11.1.3 Maximal zulässige Verlustleistung; 11.1.4 Thermische Stabilität	

11.2	Widerstände	268
	11.2.1 Konstante Widerstände; 11.2.2 Einstellbare Widerstände; 11.2.3 Temperaturabhängige Widerstände; 11.2.4 Spannungsabhängige Widerstände	
11.3	Kondensatoren	273
	11.3.1 Wickelkondensator; 11.3.2 Verlustfaktor; 11.3.3 Kondensatoren mit konstanter Kapazität; 11.3.4 Spannungsabhängige Kapazität	
11.4	Spulen	276
11.5	Dioden	277
	11.5.1 Eigenschaften einer Halbleiterdiode; 11.5.2 Das Halbleiter-Grundmaterial Silizium; 11.5.3 Dotierung; 11.5.4 pn-Übergang; 11.5.5 pn-Diode; 11.5.6 Solarzelle; 11.5.7 Z-Diode; 11.5.8 SCHOTTKY-Diode	
11.6	Transistoren	284
	11.6.1 Feldeffekttransistor; 11.6.2 Bipolartransistor	
12	Analoge Schaltungen	289
12.1	Stabilisierungsschaltungen	289
	12.1.1 Spannungsstabilisierung; 12.1.2 Stromstabilisierung	
12.2	Rückkopplung	291
	12.2.1 Mit- und Gegenkopplung; 12.2.2 Rückkopplungsschaltungen; 12.2.3 MILLER- und Bootstrap-Effekt; 12.2.4 Über-alles-Gegenkopplung	
12.3	Stabilität	301
	12.3.1 Stabilisierung und Stabilität; 12.3.2 Übertragungsfunktion; 12.3.3 Grundlegendes Stabilitätskriterium; 12.3.4 NYQUIST-Kriterium; 12.3.5 Stabilität von Verstärkern	
12.4	Transistorverstärker	309
	12.4.1 Schaltungsarten; 12.4.2 Einstellung der Arbeitspunkte; 12.4.3 Thermische Stabilität; 12.4.4 Emitter- bzw. Sourceschaltung; 12.4.5 Kollektor- bzw. Drainschaltung; 12.4.6 Basis- bzw. Gateschaltung	
12.5	Operationsverstärker	317
12.6	Operationsverstärker-Schaltungen	320
	12.6.1 Invertierender Verstärker; 12.6.2 Nicht invertierender Verstärker; 12.6.3 Addierer; 12.6.4 Subtrahierer; 12.6.5 Integrierer; 12.6.6 Betragsbildung; 12.6.7 Aktive Filter	
13	Elektrochemie	329
13.1	Elektrischer Strom in Flüssigkeiten	329
	13.1.1 Chemische Wirkung des Stromes; 13.1.2 Dissoziation; 13.1.3 Elektrolyse	
13.2	FARADAYSche Gesetze	331
13.3	Elektrochemische Spannungsreihe	332
	13.3.1 Reduktion und Oxidation; 13.3.2 DANIELL-Element; 13.3.3 Standard-Wasserstoffelektrode	
13.4	Batterien	334
13.5	Akkumulatoren	336
	13.5.1 Bleiakkumulator; 13.5.2 Nickel-Cadmium-Akkumulator; 13.5.3 Nickel-Metallhydrid-Akkumulator; 13.5.4 Lithium-Ionen-Akkumulator	
13.6	Brennstoffzellen	340
13.7	Elektrolytische Korrosion	341

14 Ströme in Nichtleitern	343
14.1 Stromleitung im Vakuum	343
14.2 Stromleitung in Gasen	345
14.2.1 Ladungsträger in Gasen; 14.2.2 Elektrische Erscheinungen in Luft; 14.2.3 Dunkelentladung; 14.2.4 Stoßionisation; 14.2.5 Durchschlag im homogenen Feld; 14.2.6 Sichtbare Gasentladungen; 14.2.7 Anwendungen des Lichtbogens	
Lösungen der Aufgaben	353
Anhang	
A1: Winkelfunktionen	363
A2: SI-Einheiten	364
A3: Rechenoperationen mit Matrizen	366
A4: Komplexe Rechnung	367
A5: Wichtige Konstanten	368
M1: Berechnungen mit MATLAB	368
M2: MATLAB-Einführung	368
M2.1 Reelle Zahlen; M2.2 Ein- und Ausgabe; M2.3 Komplexe Zahlen; M2.4 Matrizen; M2.5 Kontrollstrukturen; M2.6 Symbolische Rechnung; M2.7 Programmierung	
M3: Konforme Abbildung	371
Literatur	374
Sachwortverzeichnis	376
Namen	384
Zeittafel	384
Verwendete Formelzeichen	385
Bildquellen	386

1 Grundbegriffe

1.1 Elektrischer Strom

„Sag mal, Jan, du bist doch schon im 5. Semester, kannst du mir erklären, was eigentlich Strom wirklich ist? Ich weiß zwar, dass er eine Wärmewirkung und eine chemische und eine magnetische Wirkung hat, aber wie das alles zusammenhängt, ist mir noch unklar.“

„Mir auch, aber es genügt, wenn du weißt, dass ein Gleichstrom eine Bewegung von Ladungen ist. Mehr will kein Prof in der Prüfung hören. Und wenn du dann noch darauf hinweist, dass die Wärmewirkung bei supercoolen Leitern entfällt, dann bist du gut drauf.“

So einfach soll das sein? Für uns bleibt da noch eine Reihe von Fragen offen:

- Was ist Ladung?
- Wie fließen diese Ladungen durch einen Draht?
- Wie transportiert der Strom die Energie?

Auf diese Fragen wollen wir im Folgenden eine Antwort finden.

1.1.1 Ladung

Seit mehr als zweitausend Jahren ist bekannt, dass sich bestimmte Gegenstände anziehen, wenn man sie reibt. Wird z. B. Bernstein mit einem Katzenfell gerieben, so zieht er leichte Gegenstände wie z. B. eine Flaumfeder an. Nach dem griechischen Wort $\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho$ 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) Q** . 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.

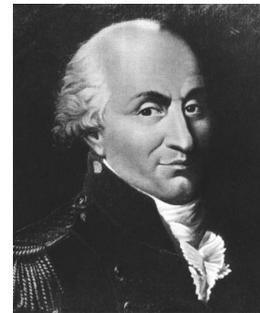
Die unterschiedlichen Arten der Ladung werden durch die Vorzeichen „+“ und „-“ gekennzeichnet.

Als erster führte DE COULOMB genaue Messungen durch; nach ihm werden die Kräfte als **COULOMB-Kräfte** bezeichnet. Auch die Einheit der Ladung ist nach ihm benannt:

$$[Q] = 1 \text{ Coulomb} = 1 \text{ C} \quad (1.1)$$

Wirkungen des Stromes:

- Die magnetische Wirkung liegt immer vor: Jeder Strom baut in seiner Umgebung ein Magnetfeld auf. Dies gilt allgemein: Jede Bewegung von Ladungen ist mit einem Magnetfeld verknüpft.
- Die Wärmewirkung entfällt bei Strömen in Supraleitern (s. Abschn. 1.4.7).
- Mit der chemischen Wirkung des Stromes befassen wir uns im Kap. 13.



CHARLES AUGUSTIN DE COULOMB (1736 – 1806) aus Angoulême in Frankreich entwickelte genaue Torsionswaagen, führte mit ihnen Messungen durch und formulierte 1788 das Gesetz für Kräfte auf Ladungen (s. Abschn. 3.2.4).

Der Begriff Ladung ist nicht weiter erklärbar. Man kann auf Ladungen nur aufgrund der Kräfte schließen, die sie aufeinander ausüben.

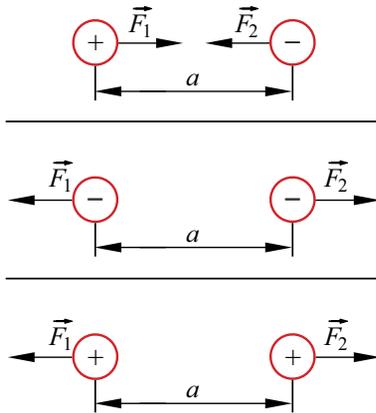


Bild 1.1 COULOMB-Kräfte auf Ladungen

Mit dem COULOMB-Gesetz für Kräfte auf Ladungen wollen wir uns im Abschn. 3.2 befassen. Vorweggenommen sei, dass der Betrag der Kraft, die zwei Ladungen Q_1 und Q_2 aufeinander ausüben, proportional dem Produkt der Ladungen und umgekehrt proportional dem Quadrat des Abstandes a der Ladungsschwerpunkte (Bild 1.1) ist:

$$F \sim \frac{|Q_1 Q_2|}{a^2} \quad (1.2)$$

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

$$F \sim \frac{m_1 m_2}{a^2} \quad (1.3)$$

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

Zum Heben schwerer Lasten sind die COULOMB-Kräfte zwar nicht geeignet, aber es gibt 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 endgültig fixiert sind.

1.1.2 Ladungsträger

Jede Ladung ist an einen **Ladungsträger (charge carrier)** gebunden. Diese sind die Atombausteine Elektron und Proton; ihre Ladung wird **Elementarladung (elementary charge)** e genannt:

$$e = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad (1.4)$$

Jede Ladung Q ist ein ganzes Vielfaches der Elementarladung; so besteht z. B. die Ladung $Q = 1 \text{ C}$ aus $6,24 \cdot 10^{18}$ Elementarladungen.

Die Vorgänge im Bereich von Atomen sind sehr kompliziert. Man versucht deshalb, sie mithilfe eines Modells zu veranschaulichen.

Ein **Modell** ist ein gedankliches Hilfsmittel, das einen unanschaulichen Vorgang oder Zusammenhang in einfacher und damit leicht verständlicher Form beschreibt.

Ein Modell wird als brauchbar angesehen, wenn die sich daraus ergebenden Schlussfolgerungen mit den in der Natur beobachteten Erscheinungen übereinstimmen; dies ist oft nur bei einem Teil der Vorgänge der Fall.

Für die Beschreibung grundlegender Vorgänge der Elektrotechnik ist das **BOHRsche Atommodell** ausreichend; darin besteht ein Atom aus Protonen und Neutronen, die den **Atomkern** bilden, und aus Elektronen, die diesen in der **Elektronenhülle** auf Kreis- oder Ellipsenbahnen umlaufen. Die Protonen des Atomkerns binden die Elektronen durch COULOMB-Kräfte an das Atom.

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

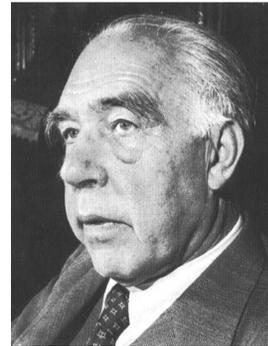
Man stellt sich vor, dass die Elektronen eines Atoms in *Schalen* angeordnet sind; das Bild 1.2 zeigt als Beispiel das Modell des Aluminiumatoms, bei dem sich drei Elektronen in der äußeren Schale befinden, die **Valenzelektronen** genannt werden. Wegen des höheren Abstandes vom Atomkern sind sie mit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

Das BOHRsche Atommodell stimmt zwar nicht in jedem Detail, aber das überlassen wir mal den Physikern. Für uns bleibt zunächst noch die Frage, warum der Atomkern nicht auseinanderfliegt, wenn er mehr als ein Proton enthält, denn die Protonen stoßen doch einander aufgrund der COULOMB-Kräfte ab.

Der Durchmesser eines Atomkerns liegt in der Größenordnung 10^{-15} m; er ist wesentlich kleiner als der Durchmesser des Atoms, der in der Größenordnung 10^{-10} m liegt. Im Atomkern wirken auf die Protonen und Neutronen starke Anziehungskräfte geringer Reichweite; diese **Kernkräfte** sind wesentlich stärker als die COULOMB-Kräfte, mit denen die Protonen einander abstoßen.

1.1.3 Ionisation

Ein elektrisch neutrales Atom enthält genau so viele Elektronen wie Protonen; die Zahl der Protonen bzw. Elektronen ist übrigens die **Ordnungszahl** des Atoms. Wird jedoch z. B. ein Elektron durch Reiben des Stoffes von einem Atom entfernt, so überwiegt die positive Ladung und das Atom wirkt elektrisch geladen; man sagt, es ist **ionisiert**, und bezeichnet ein derartiges Atom als **Ion (ion)**.



NIELS BOHR

(1885 – 1962), dänischer Physiker, formulierte im Jahr 1913 das erste brauchbare Atommodell und erhielt dafür 1922 den NOBEL-Preis. Ab 1916 war NIELS BOHR Professor für Physik an der Universität Kopenhagen. 1943 floh er vor den Nazis im Segelboot nach Schweden. Insgesamt gibt es von ihm 115 Publikationen. Nach NIELS BOHR ist das Transuran Bohrium mit der Ordnungszahl 107 benannt.

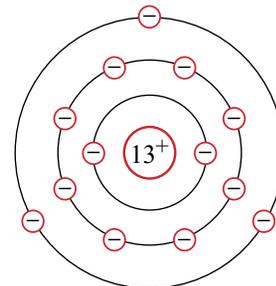


Bild 1.2 Modell des Aluminiumatoms

Ein Modell ist nicht unbedingt maßstäblich. Im Bild 1.2 ist z. B. der Atomkern viel zu groß dargestellt; bei maßstäblicher Darstellung wäre er nicht sichtbar.

In der Einzahl Ion liegt die Betonung auf dem „I“, in der Mehrzahl Ionen auf dem „o“.

Dass die elektrisch geladenen Kupferatome als Atomrümpfe bezeichnet werden, hat lediglich sprachliche Gründe.

Der Begriff Ion stammt aus dem Griechischen, er bedeutet „gehend“. ARRHENIUS (s. Kap. 13) prägte diesen Begriff für geladene Moleküle in Flüssigkeiten, wo sie sich tatsächlich bewegen können. Im Kupferdraht aber bewegen sich die Atomrümpfe nicht, sie sind also keine „gehenden“ Ionen.

Andererseits stehen die Atomrümpfe auch nicht still, denn sie schwingen mit zunehmender Temperatur immer heftiger um eine Ruhelage. Diese Schwingungen stellen für die Leitungselektronen eine Bewegungshemmung dar.

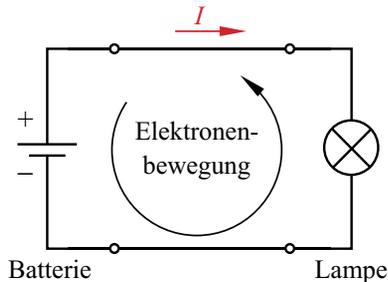


Bild 1.3 Einfacher Stromkreis

Das aus dem Griechischen stammende Wort Elektrotechnik kann man wortwörtlich mit *Bernsteinkunst* übersetzen.

Ein Ion kann auch negativ elektrisch geladen sein, dann überwiegt die Anzahl der Elektronen.

Infolge der COULOMB-Kräfte sind Ionen bestrebt, sich durch Einfangen freier Elektronen oder durch Anlagern an ungleichartige Ionen zu neutralisieren. Man bezeichnet dies als **Rekombination** (*recombination*).

Wie aber wandern nun die Ladungen durch einen Kupferdraht?

In einem Festkörper wie z. B. einem Kupferkristall können sich die benachbarten Atome gegenseitig so beeinflussen, dass von jedem Atom ein Valenzelektron abgelöst wird, das **Leitungselektron** heißt. Die positiv geladenen Kupferionen werden **Atomrümpfe** genannt. Zwischen ihnen sind die Leitungselektronen frei beweglich.

Die Leitungselektronen sind zwar nicht an das einzelne Atom, aber durch COULOMB-Kräfte an die Atomrümpfe des Metalls gebunden. Sie können diesen Metallverband nur dann verlassen, wenn ihnen die **Austrittsarbeit** (*electron work function*) W_A zugeführt wird, die thermisch durch Aufheizen des Metalls oder optisch durch Licht zugeführt werden kann.

1.1.4 Stromkreis

Die Erklärung „Bewegung von Ladungen“ für einen Strom ist sehr allgemein gefasst – man könnte darunter auch eine beliebige Bewegung weniger Ladungen oder die Bewegung der Elektronen um einen Atomkern verstehen.

Als **Strom** (*current*) bezeichnet man die *geordnete* Bewegung der Ladungen, die in einem geschlossenen **Stromkreis** (*circuit*) stattfindet. Bei einem einfachen Stromkreis, der z. B. aus einer Batterie, den Leitungen und einer Glühlampe besteht (Bild 1.3), bewegen sich die Leitungselektronen vom Minuspol der Batterie zur Glühlampe und weiter zum Pluspol und von dort zum Minuspol der Batterie.

1.1.5 Stromstärke

„Strom fließt“ sagt man, weil hierbei die Begriffe der Geografie auf die Elektrotechnik übertragen wurden. Wie viel Wasser in einem Fluss bzw. Strom, z. B. dem Rhein an Köln vorbeifließt, gibt man in der Einheit m^3/s an. Entsprechend geht man beim elektrischen Strom vor und ermittelt die Ladungsmenge ΔQ , die sich in einer Zeitspanne Δt durch den Querschnitt z. B. eines Drahtes bewegt.

Den Quotienten aus diesen beiden Größen bezeichnet man als **elektrische Stromstärke** (*current intensity*) I :

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (1.5)$$

Die Einheit der Stromstärke ist:

$$[I] = \frac{1 \text{ C}}{1 \text{ s}} = 1 \text{ Ampere} = 1 \text{ A} \quad (1.6)$$

Im Allgemeinen bewegen sich in einem *beliebigen* Leiter sowohl positive Ladungen ΔQ_p als auch negative Ladungen ΔQ_n in der Zeitspanne Δt durch den Querschnitt A , für den die Stromstärke ermittelt wird. Die Bewegungsrichtung der positiven Ladungen stimmt dabei mit dem **Richtungssinn des Stromes** überein.

Da beide Ladungsträgerarten in *gleicher* Weise zum Strom beitragen und $\Delta Q_p > 0$ sowie $\Delta Q_n < 0$ ist, setzt man für die Ladung ΔQ an:

$$\Delta Q = \Delta Q_p - \Delta Q_n \quad (1.7)$$

Damit ergibt sich für die Stromstärke I in der Gl. (1.5) ein positiver Wert. 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*.

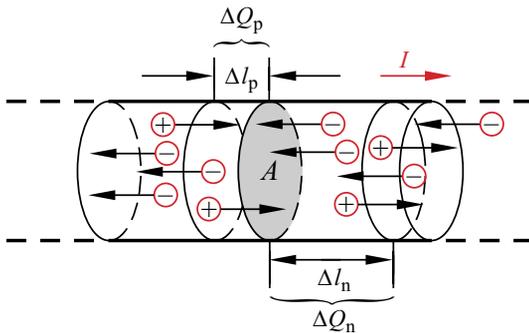


Bild 1.4 Bewegung positiver und negativer Ladungsträger durch den Querschnitt A eines Leiters und Richtungssinn des Stromes

Bewegen sich die Ladungsträger gleichmäßig mit konstanter Geschwindigkeit, so spricht man von einem **Gleichstrom** (**direct current, DC**). Hierfür gilt entsprechend Gl. (1.5):

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1.8)$$



ANDRÉ-MARIE AMPÈRE (1775 – 1836), französischer Physiker, Chemiker und Mathematiker, untersuchte die Kräfte, die zwei stromdurchflossene Leiter aufeinander ausüben (s. Abschn. 3.3.9). MAXWELL bezeichnete ihn als „NEWTON der Elektrizität“. Die Federzeichnung wird AMPÈRE selbst zugeschrieben.

Die Stromstärke ist eine der sieben Basiseinheiten des Internationalen Einheitensystems „Système International d’Unités“ (s. Anhang A2). Eine solche Basiseinheit wird kurz als **SI-Einheit** bezeichnet.

In Metallen strömen nur Elektronen und es ist $\Delta Q_p = 0$; dabei ist der Richtungssinn des Stromes I entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung der Leitungselektronen festgelegt. Dies liegt daran, dass man den Richtungssinn des Stromes lange vor der Erkenntnis definiert hatte, dass sich in einem Metalleitdraht negative Ladungen bewegen.

Wir zeichnen für den *Richtungssinn* des Stromes einen Pfeil *neben* die Leitung (siehe auch Bild 1.3).

Ein Strom ist eine geordnete Bewegung von Ladungen; diesem Oberbegriff kann man kein Formelzeichen zuordnen. Das Formelzeichen I und die Einheit 1 A gehören zur elektrischen Stromstärke. In der Praxis vermeidet man jedoch die umständliche Ausdrucksweise „es fließt ein Strom der Stromstärke 1 A“ und sagt kurz: „Es fließt ein Strom 1 A.“

Beispiel 1.1

Wir wollen für einen Gleichstrom $I = 1$ A, der durch einen Metalldraht fließt, die Ladung Q und die Anzahl k der Elektronen berechnen, die sich in einer Minute durch einen Querschnitt bewegen.

Mit der Gl. (1.8) berechnen wir:

$$Q = It = 60 \text{ A s} = 60 \text{ C}$$

Im Draht ist $Q_p = 0$ und gemäß Gl. (1.7) $Q_n = -60$ C. Wir dividieren Q_n durch die Ladung eines Elektrons:

$$k = \frac{Q_n}{-e} = \frac{-60 \text{ C}}{-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = 3,745 \cdot 10^{20}$$

Beispiel 1.2

Wir wollen abschätzen, wie viele Leitungselektronen in 1 g Kupfer enthalten sind. Die Zahl der Leitungselektronen ist bei Kupfer etwa gleich der Zahl der Atome.

Kupfer hat die molare Masse $M = 63,546$ g/mol (s. Tab. 13.2). Die Avogadro-Konstante¹⁾ $6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ gibt an, wie viele Atome eines Stoffes in 1 Mol enthalten sind. In 1 g Kupfer sind demnach $6,022 \cdot 10^{23} / 63,546 = 9,5 \cdot 10^{21}$ Atome und damit etwa $9,5 \cdot 10^{21}$ Leitungselektronen enthalten.

1.1.6 Stromdichte

Ein Stoff, in dem sich Ladungsträger gut bewegen können, wird als **Leiter (conductor)** bezeichnet. In einem Volumen V eines Leiters befinden sich pV positive Ladungsträger und nV negative Ladungsträger mit je einer Elementarladung; dabei ist p bzw. n die Anzahl der Ladungsträger je Volumen. Die Größe p bzw. n wird auch als **Ladungsträgerdichte** bezeichnet. Wir setzen an:

$$\Delta Q_p = p \Delta V_p e; \quad \Delta Q_n = -n \Delta V_n e \quad (1.9)$$

Nun untersuchen wir die Strömung der Ladungsträger durch den Querschnitt A eines Leiters, wobei $\Delta V_p = A \Delta l_p$ und $\Delta V_n = A \Delta l_n$ gilt (Bild 1.4). Wir setzen voraus, dass der Leiter **homogen** (d. h. sein Material und dessen Eigenschaften sind gleichmäßig verteilt) und sein Querschnitt konstant ist. Mit den Gln. (1.5 und 1.7) ergibt sich:

¹⁾ AMADEO AVOGADRO (1776 – 1856), italienischer Physiker und Chemiker, war im Jahr 1811 zu der Erkenntnis gekommen, dass 1 Mol jedes Stoffes stets die gleiche Anzahl Moleküle enthält. Diese zunächst unbekannt Zahl wurde erstmals im Jahr 1865 von dem Österreicher JOSEPH LOSCHMIDT (1821 – 1895) bestimmt.

$$I = \frac{\Delta Q_p - \Delta Q_n}{\Delta t} = e A \left(p \frac{\Delta l_p}{\Delta t} + n \frac{\Delta l_n}{\Delta t} \right) \quad (1.10)$$

In dieser Gleichung ist $\Delta l_p / \Delta t = v_p$ die Geschwindigkeit der positiven und $\Delta l_n / \Delta t = v_n$ die Geschwindigkeit der negativen Ladungsträger; bei einem Gleichstrom bezeichnet man jede dieser Geschwindigkeiten als **Driftgeschwindigkeit**. Damit gilt für den Strom:

$$I = e A (p v_p + n v_n) = I_p + I_n \quad (1.11)$$

Die Driftgeschwindigkeiten der Ladungsträger sind umso höher, je kleiner der Querschnitt A ist:

$$v_p = \frac{1}{e p} \cdot \frac{I_p}{A} ; \quad v_n = \frac{1}{e n} \cdot \frac{I_n}{A} \quad (1.12)$$

Beispiel 1.3

Wir wollen die Driftgeschwindigkeit der Elektronen berechnen, die sich in einem Kupferdraht mit dem Querschnitt 1 mm^2 bewegen, in dem der Strom 1 A fließt. Der Kupferdraht wird aus Elektrolytkupfer (s. Kap. 13) mit der Dichte $\rho = 8,93 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ hergestellt.

Im Beispiel 1.2 sind wir zu dem Ergebnis gekommen, dass in 1 g Kupfer $9,5 \cdot 10^{21}$ Atome enthalten sind. Die Ladungsträgerdichte ist:

$$n \approx 9,5 \cdot 10^{21} \text{ g}^{-1} \cdot 8,93 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 8,5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$$

Mit der zweiten Gleichung der Gln. (1.12) berechnen wir:

$$v_n = \frac{1}{e n} \cdot \frac{I}{A} \approx 0,074 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Obwohl man sagt, dass Strom „fließt“, ist die Driftgeschwindigkeit der Leitungselektronen im Kupferdraht sehr niedrig.

Man bezeichnet den Quotienten aus der Stromstärke I und der Querschnittsfläche A des Leiters als **Stromdichte** (current density) J :

$$J = \frac{I}{A} \quad (1.13)$$

Wie die Geschwindigkeit ist auch die Stromdichte ein **Vektor**, also eine physikalische Größe, der eine Richtung zugeordnet wird.

Die Einheit der Stromdichte ist zwar 1 A/m^2 , aber da Leiterquerschnitte im Allgemeinen in mm^2 angegeben werden, verwendet man für J meist die Einheit 1 A/mm^2 .

Ein Vektor wird durch einen Pfeil über dem Formelzeichen gekennzeichnet: Im Bild 1.1 sind die Kräfte \vec{F}_1 und \vec{F}_2 als Vektoren dargestellt.

Auch die Fläche ist ein Vektor \vec{A} mit dem Betrag A ; dieser Vektor steht senkrecht auf der Fläche.

Die Stromstärke I ist eine ungerichtete Größe; man bezeichnet eine solche Größe als **Skalar**. Der *Richtungssinn* des Stromes ist eine willkürlich gewählte Größe, die keine geometrische Bedeutung hat.

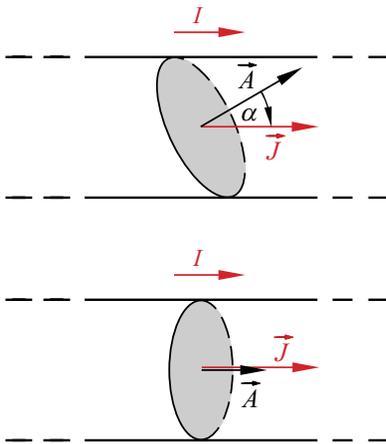


Bild 1.5 Bei unterschiedlicher Richtung von Stromdichtevektor und Flächenvektor muss die Stromstärke mit der Gl. (1.14) berechnet werden; bei gleicher Richtung von Stromdichtevektor und Flächenvektor ist $I = JA$

In der Gl. (1.13) ist lediglich der Zusammenhang für die Beträge der Vektoren angegeben. Für den Zusammenhang zwischen der Stromstärke und den Vektoren \vec{J} und \vec{A} gilt:

$$I = \vec{J} \cdot \vec{A} \quad (1.14)$$

Die mathematische Operation in dieser Gleichung ist das **Skalarprodukt** zweier Vektoren, das als Produkt aus den Vektorbeträgen und dem Kosinus des von den Vektoren eingeschlossenen Winkels α definiert ist:

$$I = \vec{J} \cdot \vec{A} = |\vec{J}| \cdot |\vec{A}| \cdot \cos \alpha = J \cdot A \cdot \cos \alpha \quad (1.15)$$

Im einfachsten Fall haben die Vektoren \vec{J} und \vec{A} gleiche Richtung und es ist $\alpha = 0$; dabei ergibt sich die Gleichung $I = JA$ für die Beträge der Vektoren, die man auch der Gl. (1.13) entnehmen kann (Bild 1.5).

Haben die Ladungsträger konstante Geschwindigkeit, wie dies bei einem Gleichstrom der Fall ist, so liegt der **stationäre Zustand (steady state)** des Systems vor; dabei bleiben seine *charakteristischen Parameter* wie z. B. die Stromstärke I zeitlich konstant.

Die Stromdichte J (und nicht etwa die Stromstärke I) ist die wichtigste Beanspruchungsgröße für das Leitermaterial; sie darf nicht zu hoch gewählt werden, weil sonst der Leiter entfestigt wird oder sogar schmilzt.

Es bleibt die Frage, welche maximale Stromdichte man bei einem Anwendungsfall wählen darf. Dies hängt von der Erwärmung, der Temperaturfestigkeit des Leiters und der Isolation sowie von der Kühlung ab. Mit dem zuletzt genannten Problem wollen wir uns im Abschn. 11.1 befassen.

1.1.7 Richtungssinn und Bezugssinn

Beim einfachen Stromkreis (Bild 1.3) ist der Richtungssinn des Stromes bekannt: Der Strom I fließt außerhalb der Batterie von ihrem Pluspol zum Minuspol und innerhalb der Batterie von ihrem Minuspol zum Pluspol.

In einer umfangreichen Schaltung mit Stromverzweigungen ist häufig der Richtungssinn eines Stromes nicht von vornherein bekannt. In diesem Fall nimmt man *willkürlich* einen **Bezugssinn** (reference direction) an 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.

Der Bezugssinn wird durch einen **Bezugspfeil** (reference arrow) dargestellt, den wir stets in den Leitungszug zeichnen (Bild 1.6).

So ist z. B. in der Schaltung 1.7, die als **Brückenschaltung** (bridge network) bezeichnet wird, der Richtungssinn der Ströme $I_1 \dots I_4$ von vornherein bekannt, aber der Richtungssinn des Stromes I_5 ist zunächst unbekannt. Wir zeichnen daher für diesen Strom willkürlich einen Bezugspfeil z. B. von links nach rechts. Ergibt eine Berechnung z. B. die Stromstärke $I_5 = 0,6 \text{ mA}$, so hat der Strom den Richtungssinn von links nach rechts; bei einem Ergebnis $I_5 = -0,6 \text{ mA}$ hat der Strom den Richtungssinn von rechts nach links.

Ein Bezugssinn kann auch durch einen Doppelindex angegeben werden. Benennt man z. B. in der Schaltung 1.7 die Brückeneckpunkte mit „A“ und „B“, so kann man den Strom I_5 durch den Strom I_{AB} ersetzen; in diesem Fall ist ein Bezugspfeil für den Strom $I_{AB} = I_5$ nicht erforderlich.

Unerlässlich ist die Angabe des Bezugssinns bei einem Wechselstrom. Damit werden wir uns im Kap. 4 befassen.

1.1.8 Strommessung

Eine Strommessung wird im Allgemeinen mit einem **Strommesser** durchgeführt, der auch als **Amperemeter** (ammeter) bezeichnet wird. Das Bild 1.8 zeigt das Schaltzeichen und die Klemmenbezeichnungen für Gleichstrom. Statt „+“ wird auch „HI“ oder „mA“ geschrieben und statt „-“ ist dementsprechend „LO“ oder „COM“ üblich.

Früher wurde der Bezugspfeil als Zählpfeil bezeichnet. Die Feststellung zweier Möglichkeiten hat jedoch mit dem Begriff „zählen“ nichts zu tun. Deshalb sollte man von der Verwendung des Wortes Zählpfeil absehen.

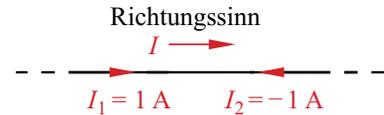


Bild 1.6 Zusammenhang zwischen den Bezugspfeilen und dem Richtungssinn eines Stromes

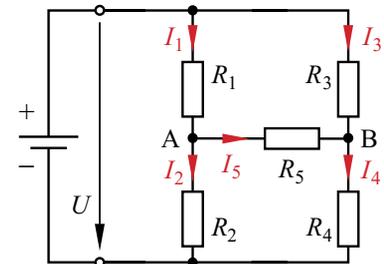


Bild 1.7 Brückenschaltung

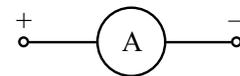


Bild 1.8 Schaltzeichen Amperemeter mit Klemmenbezeichnungen für eine Gleichstrommessung und Anzeige eines digitalen Multimeters in der Betriebsart Strommessung; die Buchstaben DC bedeuten **direct component** (Gleichgröße).

Durch die Klemmenbezeichnungen ist der Bezugssinn von „+“ nach „-“ (bzw. von „HI“ nach „LO“ oder von „mA“ nach „COM“) festgelegt. Zeigt das Messgerät einen positiven Wert an, so stimmt der Richtungssinn des Stromes mit diesem Bezugssinn überein, andernfalls ist er dem Bezugssinn entgegengesetzt.

1.2 Elektrische Spannung

1.2.1 Ladungstrennung

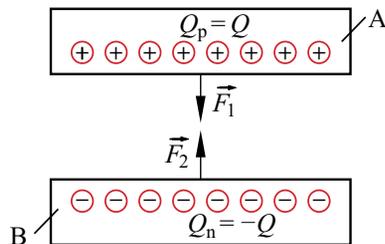
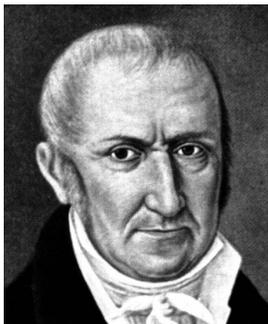


Bild 1.9 Elektronenmangel bewirkt die positive Ladung des Körpers A und Elektronenüberschuss die negative Ladung des Körpers B



ALESSANDRO VOLTA (1745–1806) aus Como in Italien konnte GALVANIS Froschschenkelversuche (s. Kap. 13) erklären, denn er erkannte, dass zwischen zwei sich berührenden Metallen eine Spannung entsteht. VOLTA konstruierte aus Zink-Kupfer-Elementen 1800 eine Batterie. NAPOLEON war nach einem Experimentalvortrag von VOLTA begeistert und ernannte ihn im Jahr 1804 zum Grafen.

Ist ein Körper ungeladen, so heißt das nicht etwa, dass er keine Ladung enthält, sondern vielmehr, dass sich die (stets vorhandenen) Ladungen nach außen in ihrer Wirkung aufheben; dies ist z. B. bei einem elektrisch neutralen Atom der Fall.

Die Ladungen heben sich jedoch nur dann nach außen in ihrer Wirkung auf, wenn die Schwerpunkte der positiven und der negativen Ladungen zusammenfallen. Ist dies nicht der Fall, so liegt ein **Dipol (dipole)** vor. Viele Moleküle, z. B. das Wasser H_2O , sind Dipole. Wir werden uns damit im Kap. 3 befassen.

Bei einem geladenen Körper gibt man nur die jeweils überzähligen Ladungen an. Das Bild 1.9 zeigt als Beispiel einen positiv geladenen Körper A mit der Ladung $Q_p = +Q$ und einen negativ geladenen Körper B mit der Ladung $Q_n = -Q$, bei denen die COULOMB-Kräfte eine Anziehung bewirken. Sollen nun die beiden Körper entgegen der Krafrichtung weiter voneinander entfernt werden, so wird hierfür *Energie* benötigt. Wir stellen fest:

Eine Ladungstrennung erfordert eine Energiezufuhr.

Man könnte nun, um die Ladungstrennung quantitativ zu beschreiben, die hierfür erforderliche Energie W angeben. Diese Energie sagt jedoch nichts darüber aus, wie viel Ladung getrennt worden ist. Deshalb wird der Quotient aus Energie und Ladung gebildet, der **elektrische Spannung** oder kurz **Spannung (voltage)** U genannt wird:

$$U = \frac{W}{Q} \quad (1.16)$$

Die Einheit der Spannung U ist:

$$[U] = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ C}} = 1 \text{ Volt} = 1 \text{ V} \quad (1.17)$$

Sachwortverzeichnis

- Abklingkoeffizient 220
Ableitung, partielle 245
Abschnürbereich 286
Abschnürspannung 285
Abschwächer 52
absolute permeability 89
absolute permittivity 75
acceptor 280
accumulator 336
active power 109
Addierer 323
admittance 146
Admittanz 146
air gap 99
Akkumulator 336
Akzeptor 280
Alkali-Mangan-Zelle 335
alternating current 108
alternating voltage 108
ammeter 19
Ampere 15, 104, 364
Amperemeter 19
Amplitude 112
amplitude 112
Amplitudenrand 308
Amplitudenspektrum 233
Analyse, harmonische 230
Anfangsfeldstärke 348
Anfangswert 213, 217
angular frequency 112
Anion 330
Anker 141
Anlaufbereich 286
Anode 277, 329
anode 329
Anpassung 39, 178
Anstiegsgeschwindigkeit, max. 319
aperiodischer Grenzfall 221
aperiodischer Verlauf 221
apparent power 148
Äquipotenzialflächen 69
Äquipotenziallinien 69
Aräometer 336
Arbeitspunkt 37
Arbeitspunktstabilisierung 310
Anreicherungs-MOSFET 286
arc 350
Aron-Schaltung 206
Asymptote 180, 182
Atomkern 13
Atomrumpfe 14
attenuator 52
Ausbreitungskoeffizient 252
Ausgang 58, 175
Ausgangswiderstand 177
Außenleiter 191
Austrittsarbeit 14, 343
Avogadro-Konstante 16, 368
backward differentiation formula 224
Bad, Galvanisches 331
Bändermodell 279
Bahnwiderstand 282
Bandabstand 279
band gap 279
Basis 287
basis 287
Basisschaltung 316
Batterie 334
battery 334
Bauelement, konzentriertes 117
Baum, vollständiger 62
Baumzweig 62
BDF-Verfahren 224
Belag 245
Belastung, symmetrische 194
–, unsymmetrische 203
Bemessungsleistung 268
Bemessungsspannung 268
Bernstein 11, 14
Betragsbildung 326
Bezugsknoten 62
Bezugspfeil 19, 21
Bezugspotenzial 45
Bezugspunkt 45
Bezugssinn der Spannung 21
Bezugssinn des Stromes 19
Bezugstemperatur 30
bias point 37
bipolar junction transistor 287
Bipolartransistor 287
BJT 287
Bleiakkumulator 336
Blindarbeit 150
Blindleistung 150, 237
–, induktive 150
–, kapazitive 152
Blindleistungskompensation 173
Blindleistungsschwingung 150
Blindleitwert 146
Blindwiderstand 146
Blitz 346
Bode-Diagramm 180
Bode, Gesetz von 307
Bogenentladung 350
Bohrsches Atommodell 13
Boltzmann-Konstante 281, 368
Bootstrap-Effekt 299
branch 41
branch point 39
breakdown voltage 348
Brennstoffzelle 340
bridge network 19
Brückenschaltung 19
Bulk 286
bulk 286
capacitance 80
capacitor 80
Capture 64
cathode 329
cathode ray tube 343
Celsius-Temperatur 30
channel 284
characteristic impedance 247
charge 11
charge carrier 12
Chip 260
chip 260
circuit 14
CIS-Zellen 283
CMRR 319
coaxial line 83
co-efficient of mutual inductance 134
coil 276
collector 287
common mode rejection ratio 319
conductance 27, 146
conductivity 28
conductor 16
controlled source 58
corrosion 341
Coulomb 11

- Coulomb-Gesetz 77
 Coulomb-Kräfte 11
 crest factor 111
 crest value 108
 critical temperature 32
 CRT 343
 Curie-Temperatur 95
 current 14
 current density 17
 current law 40
 current intensity 14
 cutoff frequency 179

 Dämpfung 175
 Dämpfungsgrad 220
 Dämpfungskoeffizient 252
 damping ratio 220
 Daniell-Element 332
 Dauermagnet 85, 96
 dB 180
 DC 15
 DC analysis 65
 Defektelektron 279
 Deklination 86
 delta connection 196
 depletion layer 280
 derating curve 263
 Determinante (det) 55
 Dezibel 180
 diamagnetisch 93
 Diaphragma 333
 dielectric displacement 75
 Dielektrikum 80
 Diffusion 280
 diffusion 280
 Diffusionsspannung 280
 Diode 277, 281
 diode 277, 281
 Dipol 20, 78
 dipole 20, 78
 Dirac-Impuls 243
 direct current 15
 direct methanol fuel cell 341
 direct voltage 21
 displacement current 143
 dissipative power 259
 dissociation 330
 Dissoziation 330
 DMFC 341
 Donator 280

 Donner 351
 donor 280
 Doppelleitung 132
 dotieren 280
 Drain 284
 drain 284
 Drainstrom 285
 Drehfeld 199
 Drehfelddrehzahl 200
 Drehstrom 190
 Dreieckschaltung 196
 Dreiecksspannung 196
 Dreieckstrom 196
 Dreileiternetz 195, 204
 Dreiphasensystem 190
 Driftgeschwindigkeit 17
 Drossel 154
 dry cell 334
 Dünnschicht-Solarzellen 283
 Dunkelentladung 346
 Durchbruchbereich 277
 Durchflutung 90
 Durchflutungsgesetz 90
 Durchlassbereich 179, 182, 277
 Durchlassstrom 277
 Durchschlagsspannung 348

 Eckfrequenz 180, 182
 eddy current 138
 Effektivwert 109, 114, 237
 Effektivwertzeiger 115
 efficiency 25
 Eigenfrequenz 221
 Eigenleitfähigkeit 278
 Eigenleitungsdichte 281
 Eingang 58, 175
 Eingangs-Offsetspannung 319
 Eingangs-Offsetstrom 319
 Eingangs-Ruhestrom 319
 Eingangswiderstand 177
 Eintor 23
 –, ideales induktives 130
 –, ideales kapazitives 118
 –, lineares kapazitives 80
 –, nichtlineares kapazitives 80
 Eintorgleichung 36
 Einzelkompensation 201
 Eisenfüllfaktor 139

 Eisenverluste 141
 Elektret 80
 electret 80
 electric field 68
 electric field strength 28, 68
 electric induction 75
 electrode 329
 electrolysis 331
 electrolytic capacitor 275
 electromagnetic field 144
 electron work function 14
 electrostatic field 74
 elektrisch 11
 Elektrolech 96, 139
 Elektrode 71, 329
 Elektrodynamik 143
 Elektrolyse 331
 Elektrolyt 330
 Elektrolytkondensator 275
 Elektrolytkupfer 331
 Elektromagnet 85
 Elektronenhülle 13
 Elektronenröhre 343
 Elektronenstrahl 344
 Elektronvolt 279, 365
 Elektroschweißen 351
 Elementarladung 12, 368
 elementary charge 12
 Element, galvanisches 332, 334
 Elko 275
 Elmsfeuer 345
 emission co-efficient 282
 Emissionskoeffizient 282
 Emission, thermische 343
 Emitter 287
 emitter 287
 Emitterschaltung 309, 313
 Empfänger 175
 Endwert 213, 217
 Energie, thermische 25
 – des geladenen Kondensators 119
 – im Magnetfeld 136
 Energie-Ausnutzungsfaktor 338
 Energiedichte 121, 137
 enhancement type FET 286
 Entladung, selbstständige 348
 –, unselbstständige 346
 Entmagnetisierungskurve 102
 EPR 273

- equivalent circuit 35
 equivalent parallel resistor 273
 equivalent resistance 41, 47
 equivalent series resistor 273
 Erdmagnetfeld 85
 Ersatzteintor 154, 157
 Ersatzquelle 48, 171
 Ersatz-Parallelwiderstand 273
 Ersatz-Reihenwiderstand 273
 Ersatzschaltung 35, 47
 –, thermische 261
 Ersatzwiderstand 41, 47
 Erzeuger 21
 Erzeugerpeilsystem 23
 ESR 273
 eta 25
 Euler-Verfahren 224
 eV 279

 Farad 80
 Faraday-Konstante 331
 Farbcode 268
 fast Fourier transform 230
 FC 340
 feed back 291
 Feld, elektrisches 68
 –, elektromagnetisches 144
 –, elektrostatisches 74
 –, homogenes 69, 86
 –, inhomogenes 71
 –, magnetisches 85
 –, parallelebenes 71
 Feldeffekttransistor 284
 Feldemission 343
 Feldkonstante, elektrische 75, 368
 –, magnetische 89, 368
 Feldlinien 68, 86
 Feldstärke, elektrische 28, 68
 –, magnetische 89
 Fernkugel 77
 Ferrit 277
 Ferromagnetismus 94
 FET 284
 FFT 230
 field effect transistor 284
 Filter 182
 –, aktive 328
 filter 182
 Fluss, magnetischer 88
 Flussdichte, elektrische 75
 –, magnetische 88
 Fokussierung 344
 form factor 111
 Formfaktor 111
 forward current 277
 Fourier-Koeffizienten 230
 Fourier-Reihe 229
 –, komplexe 240
 Fourier-Transformation 242
 Fourier-Transformation, schnelle 230
 Freilaufdiode 219
 Freminduktion 129
 frequency 107
 Frequenz 107
 –, normierte 180
 fuel cell 340
 fundamental frequency 229
 fundamental wave 229
 Funktion, alternierende 231
 –, gerade 231
 –, inverse 184
 –, ungerade 231

 gain-bandwidth-product 296
 gain margin 308
 Galvanoplastik 331
 Galvanostegie 331
 Galvanotechnik 331
 gas discharge 346
 Gasentladung 346
 Gate 284
 gate 284
 Gauß 365
 Gegeninduktivität 134
 Gegenkopplung 293
 Gegenkopplungsgrad 298
 Gegensystem 207
 Generation 279
 generation 279
 generator 21
 Gesetze, Faradaysche 331
 Gesetz, Paschensches 349
 Gesetz von Biot-Savart 92
 Gesetz von Bode 307
 Gleichanalyse 65
 Gleichanteil 229
 Gleichgewicht, thermisches 259
 Gleichrichtung 108
 Gleichrichtwert 109, 114
 Gleichspannung 21
 Gleichspannungsverstärker 318
 Gleichstrom 15
 Gleichung, charakteristische 303
 Gleichwert 108
 Glimmentladung 350
 Glühkathode 343
 Graph 62
 Grenzfall, aperiodischer 221
 Grenzfrequenz 179
 Grundeintor 118
 Grundeintor C 118, 150
 Grundeintor L 130, 148
 Grundeintor R 118, 146
 Grundschwingung 229
 Grundschwingungsgehalt 239
 Grundschwingungs-Leistungen 238
 Gruppenkompensation 202

 Halbelement 334
 Halbleiter 279
 Hall-Effekt 103
 Hall-Generator 103
 Hall-Spannung 103
 harmonic analysis 230
 harmonic factor 239
 harmonics 229
 Heißeleiter 278
 Henry 99
 Hertz 107
 high pass-filter 179
 high temperature superconductor 32
 Hochpass 179
 Hochspannung 193
 Hochtemperatur-Supraleiter 32
 Hochvakuum 343
 hole 279
 homogen 16, 86
 HTS 32
 hybrid 54
 Hybridform 54
 Hystereseschleife 95
 Hystereseverluste 140
 hysteresis loop 95

- IC 225, 317
 ideal transformer 135
 IGFET 285
 impedance 145
 Impedanz 145
 incremental capacitance 81
 incremental inductance 131
 incremental resistance 29
 independent source 34
 inductance 130
 induction 125
 Induktion 125
 – bei Drehbewegung 128
 –, gegenseitige 133
 Induktionsgesetz 125, 143
 induktiv gekoppelt 133
 induktiv wirken 155
 Induktivität 130
 –, äußere 132
 –, differenzielle 131
 –, gegenseitige 134
 –, innere 132, 138
 infinitesimal 72, 119
 Influenz 75
 initial condition 225
 Innenleitwert 35
 Innenwiderstand 35
 in Phase 146
 input 58, 175
 insulated gate FET 285
 insulator 279
 integrated circuit 317
 Integrierer 325
 integrierte Schaltung 317
 intrinsic carrier density 281
 intrinsic conductivity 278
 Inversion 53, 184
 inversion 53
 Ion 13, 330
 ion 13
 Ionisationskoeffizient 348
 ionisiert 13
 Ionisierungsspannung 347
 Isolator 279
 Isolierschicht-FET 286
- JFET 285
 Joule 22
 junction 260, 280
 junction diode 281
 junction FET 285
- Kästchenmethode 71
 Kaltleiter 31
 Kanal 284
 Kapazität, elektrische 80
 –, differenzielle 81
 kapazitiv wirken 158
 Kathode 277, 329
 Kation 330
 Keramikkondensator 276
 Kernkräfte 13
 Kettenform 54
 Kettenschaltung 57
 Kirchhoffsche Sätze 40, 44
 Kleinsignalaussteuerung 313
 Klirrfaktor 239
 Knopfzelle 335
 Knoten 40
 Knotenpotenzialverfahren 62
 Knotensatz 40, 72
 Knotenspannung 62
 Koaxialleitung 83, 105, 244
 Koeffizient, komplexer 145
 Koerzitivfeldstärke 95
 Kollektor 287
 Kollektorschaltung 315
 Kompass 86
 Kompensation 173, 201
 kompensiert 318
 Komponenten, symmetrische 207
 Kondensator 80
 Konvektionskoeffizient 262
 Kopplung, gegensinnige 135
 –, gleichsinnige 135
 –, kapazitive 313
 Korrosion 341
 Kreis, magnetischer 98
 Kreisfrequenz 112
 Kreisringspule 91, 132
 Kreuz 87
 Kryolith 331
 Kurzschluss 33
 –, virtueller 320
 Kurzschlussstrom 33
- Ladung 11
 Ladungsträger 12
 Ladungsträgerdichte 16
 Ladungstrennung 20
 Laplace-Transformation 302
- Lastminderungskurve 263
 Laufzeit 247
 Leerlauf 33
 Leerlaufspannung 33
 Leistung 22
 –, komplexe 155
 –, natürliche 256
 Leistungsanpassung 39, 178
 Leistungsfaktor 173, 237
 Leistungsschalter 351
 Leistungsverstärker 58
 Leiter 16
 Leiter, linearer 28, 261
 Leitfähigkeit 28
 Leitung 244
 –, verlustlose 257
 Leitungsband 279
 Leitungselektron 14
 Leitungsgleichung 246
 Leitwert 27
 –, komplexer 146
 –, magnetischer 98
 Leitwertform 53
 Leitwertparameter 53
 Lenzsches Gesetz 126
 Lichtbogen 350
 Lichtbogenesision 352
 Lichtbogenofen 352
 Lichtmaschine 23, 192
 linearer Leiter 28
 lines of force 68
 Linienspektrum 233
 Lithium-Iod-Batterie 335
 Lithium-Ionen-Akku 339
 load 21
 Loch 279
 locus diagram 183
 Lokalelement 342
 Lorentz-Kraft 103
 low pass-filter 181
 Luftspalt 99
 lumped element 117
- Magnet 85
 magnet 85
 magnetic field 85
 magnetic field strength 89
 magnetic flux 88

- magnetic flux density 88
 magnetisch hart 96
 magnetisch weich 96
 Magnetisierungskurve 96
 magnetomotive force 90
 Magnetostriktion 95
 Masche 43
 Maschengleichung 43, 72
 Maschensatz 44, 72
 Maß 180
 Masse 45
 –, molare 332
 maximum power hyperbola 264
 maximum power point 283
 Maxwell 365
 Maxwellsche Gleichungen 143, 144
 mesh 43
 metal-oxide semiconductor FET 285
 Methode, symbolische 115
 mho 27
 Micro-Cap 64
 Miller-Effekt 299
 Minimumphasensystem 306
 Mischspannung 108
 Mischstrom 108
 Missweisung 86
 Mitkopplung 293
 Mitsystem 207
 Mittelleiter 194
 Mittelspannung 193
 MK-Kondensator 273
 MMF 90
 Modell 12
 MOSFET 285
 MP-Kondensator 273
 MPP 283
 Mumetall 96
 mutual induction 133

 Nachbeschleunigung 344
 nachteilen 113
 Nachladeeffekt 274
 Nachrichten-System 175
 natural frequency 221
 negative feed back 293
 negative phase-sequence system 207

 negative temperature co-efficient 272
 Nennverlustleistung 262
 network 62
 network analysis 62
 Netz 62
 –, lineares 164
 Netzwerk 62
 Netzwerkanalyse 62
 Neukurve 94
 Neutralleiter 191, 194
 Neutronen 13
 Nickel-Cadmium-Akku 339
 Nickel-MH-Akku 339
 Niederspannungsnetz 193
 NIGFET 285
 n-Leiter 280
 node analysis 62
 non insulated gate FET 285
 Nordpol 85
 Normalbedingungen 346
 Normalleiter 32
 Norton-Theorem 48
 npn-Transistor 287
 NTC-Widerstand 272
 Nullphasenwinkel 112
 Nullspannung 210
 Nullstelle 303
 Nullstrom 210
 Nullsystem 210
 Nyquist-Kriterium 304

 Oberschwingung 229
 Öffner 212
 Oersted 365
 Ohm 26
 Ohmsches Gesetz 27
 Ohmscher Widerstand 27
 Ohm's law 27
 one-port 23
 op-amp 317
 open circuit 33
 open loop gain 296
 operational amplifier 317
 Operationsverstärker 317
 –, idealer 319
 Operator 145
 Ordnungszahl des Atoms 13

 Ordnungszahl der Fourier-Reihe 229
 Orientierungspolarisation 78
 Ortskurve 183
 oscillation 107
 Oszilloskop 344
 output 58, 175
 Oxidation 332

 PAFC 341
 parallel connection 41
 Paralleldrahtleitung 244
 parallel equivalent connection 165
 Parallel-Ersatzschaltung 165
 parallel oscillation circuit 162
 parallel resonance 162
 Parallelresonanz 162
 Parallelschaltung 41
 – von Kondensatoren 82
 Parallelschwingkreis 162
 PARAM 66
 paramagnetisch 93
 Parameter 52, 66, 183
 partielle Ableitung 245
 peak-to-peak value 108
 PEM-FC 340
 period 107
 Periodendauer 107
 periodisch 107
 permanent magnet 85
 Permeabilität 93
 Permeabilitätszahl 93
 permeability 93
 permeance 98
 Permittivität 79
 permittivity 79
 Permittivitätszahl 78
 P-Form 116
 Phase 146
 phase angle 112, 113
 phase margin 308
 Phasengang 180
 Phasengeschwindigkeit 247, 253
 Phasenkoeffizient 252
 Phasenrand 308
 Phasenspektrum 233
 phasenverschoben 113
 Phasenverschiebungswinkel 113, 145
 Phasenwinkel 112

- phase sequence 191
 phosphoric acid fuel cell 341
 Photoeffekt 343
 Pi-Schaltung 61
 piezoelektrischer Effekt 123
 pinch off voltage 285
 Plancksches Wirkungsquantum 343
 Plasma 350
 plasma 350
 Plasmatechnik 352
 plate capacitor 74
 Plattenkondensator 74, 80
 p-Leiter 280
 pn-Diode 281
 pnp-Transistor 287
 pn-Übergang 280
 Pol 23, 85, 303
 Polarisationsverluste 122
 pole 85
 Polrad 191
 Polstück 101
 port 23
 positive feed back 293
 positive phase-sequence system 207
 positive temperature co-efficient 271
 potential 45
 Potenziometer 52, 269
 potentiometer 52, 269
 Potenzial 45
 power 22
 power factor 173, 237
 power matching 39
 Poynting-Vektor 105
 Prellen 212
 Primärelement 334
 Probe 64
 probe 167
 Protonen 13
 PTC-Widerstand 271
 Punkt 87
 –, kritischer 304
 Punktladung 77
 Punkt maximaler Leistung 282

 quartz 123
 Quarz 123
 quasistationär 117

 Quelle 33
 –, abhängige 58
 –, gesteuerte 58
 –, lineare 34
 –, unabhängige 34, 58
 Quellenfeld 74
 Quellenspannung 33
 Quellenstrom 34

 Randeffect 74
 reactance 146
 reactive power 150
 Reaktanz 146
 Reaktanzleitung 257
 receiver 175
 recombination 14, 279
 Redoxreaktion 332
 Reduktion 332
 reflection 248
 Reflexion 248
 Reflexionsfaktor 249
 Reihen-Ersatzschaltung 165
 Reihenschaltung 46
 – von Kondensatoren 82
 Reihenresonanz 159
 Reihenschwingkreis 159
 Rekombination 14, 279
 relative permeability 93
 relative permittivity 78
 reluctance 98
 Remanenzflussdichte 94
 resistance 26, 146
 resistivity 28
 resistor 268
 resonance frequency 159
 Resonanz 168
 Resonanzfrequenz 159
 Resonanzüberhöhung 162
 Restwiderstand 32
 reverse current 277
 R-Form 116
 Richtungssinn der Spannung 21
 Richtungssinn des Stromes 15
 Riffelfaktor 111

 ripple factor 111
 RMS 109
 root-mean-square value 109
 rotating field 199
 Rückkopplung 291
 –, thermische 265
 Ruheinduktion 129

 Sättigung 94
 Sättigungsstrom 282
 saturation current 282
 Schale 13
 Schalter, idealer 212
 –, realer 212
 Schaltvorgang 212
 Scheinleistung 148, 237
 Scheinleitwert 146
 Scheinwiderstand 145
 Scheitelfaktor 111
 Scheitelwert 108
 Schematics 64
 Schlagweite 349
 Schließer 212
 Schottky-Diode 284
 Schrittweite 224
 Schwellenspannung 286
 Schwingung 107, 219
 –, gedämpfte 220
 –, nullphasige 112
 Schwingungsbreite 108
 Schwingungszustand 190
 Sekundärelektronenemission 343
 Sekundärelement 336
 Selbstinduktion 129
 Selbstinduktivität 130
 self induction 129
 semiconductor 279
 Sender 175
 series connection 46
 series equivalent connection 165
 series oscillation circuit 159
 series resonance 159
 SHE 334
 short-circuit 33
 SI-Einheit 15, 364
 Siemens 27
 Signal 175

- signal 175
 Silberoxid-Zink-Batterie 335
 Silizium 278
 Sinusanalyse 187
 Sinusquelle 170
 Sinusspannung 112
 Sinusstrom 112
 Skalar 18, 21
 Skalarprodukt 18
 skin effect 140
 Skineneffekt 140
 slew rate 319
 small-signal modeling 313
 SMD 262
 solar cell 282
 Solarmodul 283
 Solarzelle 282
 solenoid 91
 Source 284
 source 33, 284
 Spannung 20
 –, induktive 126
 –, induzierte 144
 –, magnetische 98
 Spannungsfall 27
 Spannungsfolger 316, 323
 Spannungsinverter 315
 Spannungsmessung 21
 Spannungsquelle
 –, ideale 33
 –, lineare 35
 –, spannungsgesteuerte 58
 –, stromgesteuerte 59
 Spannungsreihe, elektrochem. 334
 Spannungsstabilisierung 289
 Spannungsteiler 52
 Spannungsteilerregel 47, 166
 Spannungsüberhöhung 160
 Spannungs-Übertragungsfaktor 175, 317
 Spannungsverstärker 58
 Spannungsverstärkung 175
 Spektraldichte 241
 spectrum 230
 spectrum density 241
 Spektrum 230
 Sperrbereich 179, 182, 277
 Sperrschicht 260, 280
 Sperrschicht-FET 285
 Sperrstrom 277
 SPICE 64
 Spitze-Spitze-Wert 108
 Sprungtemperatur 32
 Spule 276
 SR 319
 Stabilisierung 291
 Stabilität 301
 –, thermische 266, 311
 Stabilitätskriterium, grundleg. 303
 stability 301
 standard hydrogenium electrode 334
 Standard-Wasserstoffelektrode 334
 star connection 191, 194
 state variable 213, 217
 stationärer Zustand 18
 steady state 18
 steady state regime 212
 Stellwiderstand 52
 Sternpunkt, künstlicher 228
 Sternpunktleiter 194
 Sternschaltung 191, 194
 Sternspannung 192
 Sternstrom 194
 Störstellen 280
 Stoffe, ferromagnetische 94
 –, polare 78
 –, unpolare 78
 Stoffmenge 331, 332
 Stoßionisation 347
 Strang 191
 Streufaktor 101
 Streufluss 100
 Strom 14
 –, konjugiert komplexer 156
 Strombedingung 52
 Stromdichte 17
 Stromfolger 316
 Stromkreis 14
 Strommesser 19
 Stromquelle
 –, ideale 34
 –, lineare 35
 –, spannungsgesteuerte 59
 –, stromgesteuerte 59
 Strom-Spannung-Wandler 321
 Stromstabilisierung 290
 Stromstärke 14
 Stromteilerregel 42, 166
 Stromüberhöhung 162
 Strom-Übertragungsfaktor 175
 Stromverdrängung 140
 Stromverstärker 58
 Stromverstärkung 175
 Subtrahierer 324
 Südpol 85
 Sulfatisierung 336
 superconductor 32
 Supraleiter 32
 surface mounted device 262
 surge resistance 178
 susceptance 146
 switching operation 212
 Symbol, komplexes 115
 symmetrical components 207
 symmetrisch 190
 symmetrische Komponenten 207
 Synchrondrehzahl 200
 Synchrongenerator 191
 Synthese 230
 synthesis 230
 Tastkopf 167
 Tastteiler 167
 TEM-Leitung 244
 temperature co-efficient 30
 Temperaturkoeffizient 30
 Temperaturspannung 281
 Tesla 88
 Textur 96
 thermal conductivity 260
 thermal equilibrium 259
 thermal equivalent circuit 261
 thermal feedback 265
 thermal power 259
 thermal resistance 260
 thermal stability 266
 Thermistor 271
 Thévenin-Theorem 48
 three phase system 190
 threshold voltage 286
 Tiefpass 181
 time constant 213, 217

- time domain 224
 Tonerde 331
 Tor 23
 toroidal coil 91
 Toroidspule 91
 transfer function 175, 317
 transformation ratio 136
 transient 212
 Transientanalyse 224
 transient analysis 224
 Transitfrequenz 296, 308, 318
 transmission line 244
 transmitter 175
 Trockenelement 334
 T-Schaltung 54
 two-port 52

 Über-alles-Gegenkopplung 300
 Übergangsvorgang 212
 Überlagerungssatz 51
 Übersetzungsverhältnis 136
 übersteuert 318
 Übertrager, idealer 135
 Übertragungsfaktor 175
 Übertragungsfunktion 302
 Ultra-Kondensator 276
 Umlaufsinn 44
 unity gain frequency 308, 318
 Unterschwingung 238

 Valenzband 279
 Valenzelektronen 13
 var 150
 Varistor 272
 VDR 272
 Vektor 17
 Vektorprodukt 88, 92
 Verarmungs-MOSFET 286
 Verbindungsweig 62
 Verbraucher 21
 Verbraucherpfleilsystem 23
 Verkettungsfluss 126
 Verlustfaktor 274, 277
 Verlustleistung 259
 –, maximal zulässige 262
 Verlustleistungshyperbel 264
 Verlustwinkel 274
 Verschiebung, virtuelle 122, 142
 Verschiebungsdichte 75
 Verschiebungsstrom 143

 Versorzeichen 115
 Verstärker 58
 –, invertierender 321
 –, nicht invertierender 322
 Verstärkung, offene 296
 Verstärkung-Bandbreite-Produkt 296
 Verzerrungen 253
 Verzerrungsleistung 238
 Verzweigungspunkt 39
 Vierleiternetz 195, 203
 Vierpol 52
 Volt 20
 voltage 20
 voltage dependent resistor 272
 voltage divider 52
 voltage drop 35
 voltage follower 316, 323
 voltage law 44
 Voltampere 148
 volt-ampere-reactive 150
 Voltmeter 21
 voreilen 112

 Wärmeenergie 25
 Wärmekapazität 25
 Wärmeleistung 259
 Wärmeleitfähigkeit 260
 Wärmestrom 261
 Wärmetod 259
 Wärmewiderstand 260, 262
 Watt 23
 wave 246
 wave length 258
 Weber 89
 Wechselgröße 108
 Wechselspannung 108
 Wechselstrom 108
 Weglänge, freie 346
 Weissche Bezirke 94
 Welle 246
 –, hinlaufende 252
 –, rücklaufende 252
 Wellengleichung 251
 Wellenlänge 258
 Wellenwiderstand 178, 247, 254
 Wertigkeit 331
 Wickelkondensator 273
 Widerstand 26, 268
 –, differenzieller 29
 –, einstellbarer 269
 –, komplexer 145
 –, magnetischer 98
 –, nichtlinearer 29
 –, ohmscher 29
 –, spannungsabhängiger 272
 –, spezifischer 28
 –, temperaturabhängiger 271
 –, thermischer 260, 262
 Widerstandsbelag 245
 Widerstandsform 52
 Widerstandsparameter 52
 Windungszahl 91
 Wirbelfeld 87
 Wirbelströme 138
 Wirbelstrombremse 139
 Wirbelstromverluste 139
 Wirkarbeit 148
 Wirkleistung 109
 Wirkleistungsschwingung 147
 Wirkleitwert 146
 Wirkungsgrad 25
 Wirkwiderstand 146

 Xenon-Scheinwerfer 352

 Y-Parameter 53

 Zahlenwert-Reihen 268
 Z-Diode 283
 Zeiger 115
 Zeitbereich 224
 Zeitkonstante 213, 217
 Zink-Braunstein-Batterie 334
 Zone, indifferente 85
 Z-Parameter 52
 Zustand, stationärer 18
 –, eingeschwungener 212
 Zustandsgröße 213, 217
 Zweidrahtleitung 244
 Zweig 41
 Zweipol 23
 Zweitor 52
 –, längssymmetrisches 61
 –, übertragungssymmetrisches 61
 –, widerstandssymmetrisches 61
 Zweitorgleichungen 52 ... 54
 Zweitor-Ersatzschaltung 66
 Zylinderspule 91, 132