

# HANSER



## Leseprobe

zu

## „Grundlagen der Elektrotechnik“

von Wolfgang Nerreter

Print-ISBN: 978-3-446-46456-8

E-Book-ISBN: 978-3-446-46585-5

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-46456-8>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

## Vorwort zur 3. 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 3. Auflage wurden einige Änderungen durchgeführt und Ergänzungen eingebracht. Da das Programm PSpice seit Ende 2018 nicht mehr zur Verfügung steht, wurde auf Micro-Cap umgestellt.

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 werden auf der Website [grundlagen-elektrotechnik.de](http://grundlagen-elektrotechnik.de) angeboten. Auf dieser Website gibt es auch weitere Informationen.

Dem Carl Hanser Verlag 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.

Mai 2020

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:  $\Omega$  ist die normierte Frequenz und  $\Omega$  die Einheit des Widerstandes. Auch wenn der Zahlenwert einer physikalischen Größe festliegt, muss nach Norm das Formelzeichen kursiv stehen, z. B.  $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/(Am)}$ .

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](http://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

<b>1 Grundbegriffe</b>	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	
<b>2 Netze an Gleichspannung</b>	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	
<b>3 Zeitkonstante Felder</b>	68
3.1 Elektrisches Strömungsfeld	68
3.1.1 Homogenes Feld; 3.1.2 Inhomogenes Feld	
3.2 Elektrostatishes 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
<b>4</b>	<b>Zeitabhängige Größen</b> . . . . .	<b>107</b>
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	
<b>5</b>	<b>Zeitabhängige Felder</b> . . . . .	<b>117</b>
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	
<b>6</b>	<b>Netze an Sinusspannung</b> . . . . .	<b>145</b>
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 Ersatzentor; 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

<b>7 Drehstrom</b> . . . . .	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	
<b>8 Schaltvorgänge</b> . . . . .	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	
<b>9 Nichtsinusförmige Größen</b> . . . . .	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	
<b>10 Leitungen</b> . . . . .	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	
<b>11 Bauelemente</b> . . . . .	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	
<b>12</b>	<b>Analoge Schaltungen . . . . .</b>	<b>289</b>
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 Emittter- 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	
<b>13</b>	<b>Elektrochemie . . . . .</b>	<b>329</b>
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

---

<b>14 Ströme in Nichtleitern</b> . . . . .	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	
<b>Lösungen der Aufgaben</b> . . . . .	353
<b>Anhang</b>	
A1: Winkelfunktionen . . . . .	364
A2: SI-Einheiten . . . . .	365
A3: Rechenoperationen mit Matrizen . . . . .	367
A4: Komplexe Rechnung . . . . .	368
A5: Wichtige Konstanten . . . . .	369
M1: Berechnungen mit MATLAB . . . . .	369
M2: MATLAB-Einführung . . . . .	369
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 . . . . .	372
<b>Literaturverzeichnis</b> . . . . .	375
<b>Sachwortverzeichnis</b> . . . . .	377
<b>Bildquellen</b> . . . . .	385
<b>Namen</b> . . . . .	386
<b>Zeittafel</b> . . . . .	386
<b>Verwendete Formelzeichen</b> . . . . .	387



# 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 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)  $Q$** . 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.

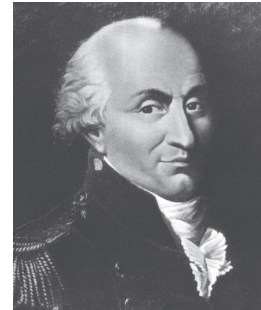
Die unterschiedlichen Arten der Ladung werden durch die Vorzeichen „+“ und „-“ gekennzeichnet.

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.

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

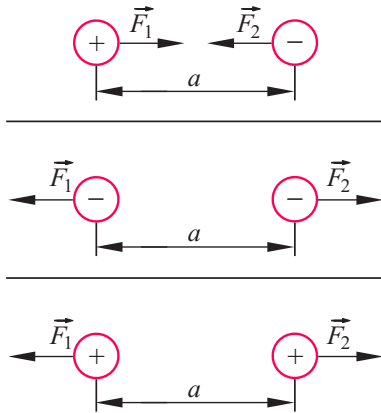


Bild 1.1 COULOMB-Kräfte auf Ladungen

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.

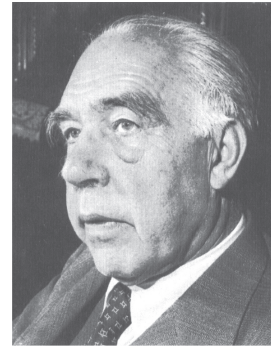
Man stellt sich vor, dass die Elektronen eines Atoms in *Schalen* angeordnet sind; das Bild 1.2 zeigt als Beispiel das Modell des Aluminiumatoms, bei dem sich drei Elektronen in der äußeren Schale befinden, die **Valenzelektronen** genannt werden. Wegen des höheren Abstandes vom Atomkern sind sie mit 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.

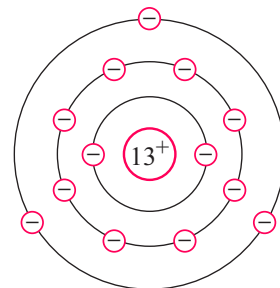


Bild 1.2 Modell des Aluminiumatoms

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.

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  $\text{m}^3/\text{s}$  an. Entsprechend geht man beim elektrischen Strom vor und ermittelt die Ladungsmenge  $\Delta Q$ , die sich in einer Zeitspanne  $\Delta t$  durch den Querschnitt z. B. eines Drahtes bewegt.

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

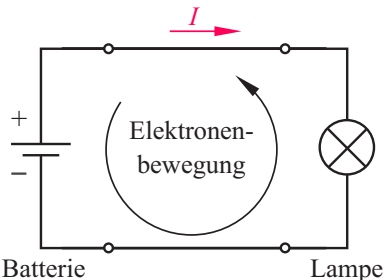


Bild 1.3 Einfacher Stromkreis

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

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

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  $\Delta Q_p$  als auch negative Ladungen  $\Delta Q_n$  in der Zeitspanne  $\Delta t$  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  $\Delta Q$  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*.

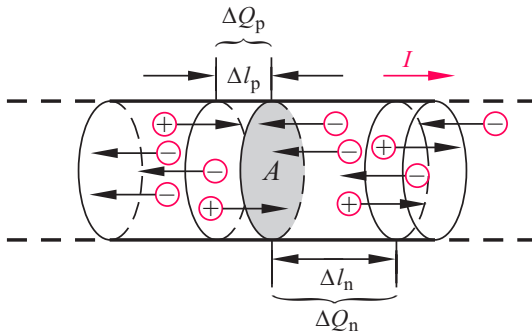


Bild 1.4 Bewegung positiver und negativer Ladungsträger durch den Querschnitt  $A$  eines Leiters und Richtungssinn des Stromes

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 Metalldraht 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)  $Q_n = -60 \text{ C}$ . 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  $M = 63,546 \text{ g/mol}$  (s. Tab. 13.2). Die Avogadro-Konstante<sup>1)</sup>  $6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  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:

<sup>1)</sup> 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  $1 \text{ mm}^2$  bewegen, in dem der Strom  $1 \text{ A}$  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  $1 \text{ g}$  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)  $J$ :

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

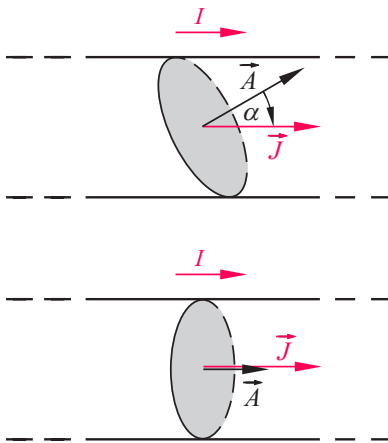
Wie die Geschwindigkeit ist auch die Stromdichte ein **Vektor**, also eine physikalische Größe, der eine Richtung zugeordnet wird.

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

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.



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  $\alpha$  definiert ist:

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

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  $I = JA$

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.

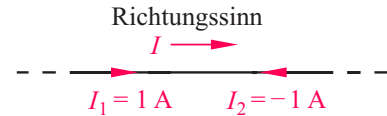


Bild 1.6 Zusammenhang zwischen den Bezugspfeilen und dem Richtungssinn eines Stromes

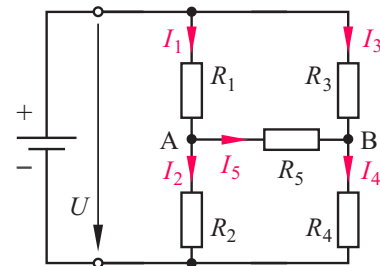


Bild 1.7 Brückenschaltung



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

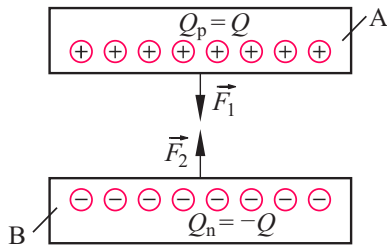
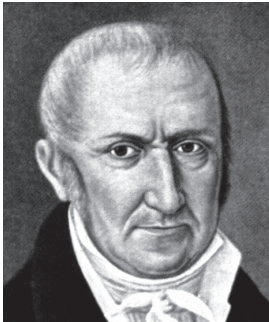


Bild 1.9 Elektronenmangel bewirkt die positive Ladung des Körpers A und Elektronenüberschuss die negative Ladung des Körpers B



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:

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

## 1.2.2 Richtungssinn und Bezugssinn

Die Spannung  $U$  ist 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.

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 1.10), so stimmt der Richtungssinn mit dem Bezugssinn überein; ist der Zahlenwert negativ, so sind Richtungssinn und Bezugssinn einander entgegengesetzt.

## 1.2.3 Spannungsmessung

Eine zeitlich konstante Spannung wird als **Gleichspannung (direct voltage)** bezeichnet. Bei ihrer Messung mit dem **Voltmeter** ist der Zusammenhang zwischen dem Bezugssinn und dem Richtungssinn von Bedeutung.

Der Bezugssinn der Spannung ist von der mit „+“ bezeichneten Klemme zu der mit „-“ bezeichneten Klemme festgelegt (Bild 1.11). 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.

## 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 (generator)** elektrischer Energie bezeichnet; der andere wandelt elektrische Energie in nichtelektrische Energie um, er wird daher als **Verbraucher (load)** elektrischer Energie bezeichnet.

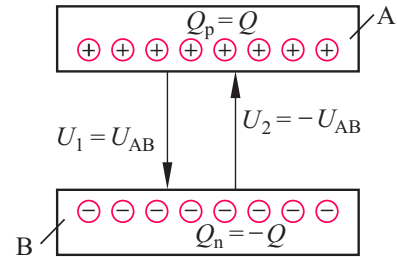


Bild 1.10 Zusammenhang zwischen dem Richtungssinn der Spannung  $U_{AB}$  und dem Bezugssinn  $U_1$  bzw.  $U_2$

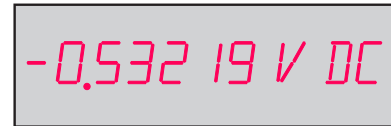
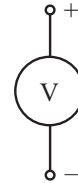


Bild 1.11 Voltmeter mit Klemmenbezeichnungen für Gleichspannung und Anzeige eines digitalen Multimeters in der Betriebsart Spannungsmessung; die Buchstaben **DC** bedeuten **direct component**, also Gleichgröße.

# 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, 365  
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 38, 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, 365, 369  
**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, 170, 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, 365, 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**  
**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  
 Dotierung 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 278  
 Durchflutung 90  
 Durchflutungsgesetz 89  
 Durchlassbereich 179, 182, 277  
 Durchlassstrom 277  
 Durchschlagsspannung 348  
  
 Eckfrequenz 180, 182  
 eddy current 138  
 Effektivwert 109, 115, 237  
 Effektivwertzeiger 115  
 efficiency 25  
 Eigenfrequenz 221  
 Eigenleitfähigkeit 278  
 Eigenleitungs-dichte 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, 366  
 Elektroschweißen 351  
 Elementarladung 12, 365, 369  
 elementary charge 12  
 Element, galvanisches 332, 334  
 Elko 275  
 Elmsfeuer 345  
 emission co-efficient 282  
 Emissionskoeffizient 282  
 Emission, thermische 343  
 Emittor 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  
 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 70  
 –, magnetisches 85  
 –, parallelebenes 71  
 Feldeffekttransistor 284  
 Feldemission 343  
 Feldkonstante, elektrische 75, 369  
 –, magnetische 89, 369  
 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 241  
 Fourier-Transformation, schnelle 230  
 Freilaufdiode 219  
 Fremdinduktion 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 366  
 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 117  
 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  
 Heißleiter 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 317  
 ideal transformer 135

- IGFET 285  
**impedance 145**  
 Impedanz 145  
**incremental capacitance 81**  
**incremental conductance 29**  
**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  
 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 63  
 Koaxialleitung 83, 105, 244  
 Koeffizient, komplexer 145  
 Koerzitivfeldstärke 95  
 Kollektor 287  
 Kollektorschaltung 315  
 Kompass 85  
 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 245  
 Leitwert 27  
 –, komplexer 146  
 –, magnetischer 98  
 Leitwertform 53  
 Leitwertparameter 53  
 Lenzsches Gesetz 126  
 Lichtbogen 350  
 Lichtbogenerosion 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  
 Maschensatz 44  
 Maß 180  
 Masse 45  
 –, molare 332  
 maximum power hyperbola 264  
 maximum power point 283  
 Maxwell 366  
 Maxwellsche Gleichungen 143  
 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  
 naheilen 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 366  
 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  
 paramagnetisch 93  
 Parameter 52, 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 283  
  
**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 200**  
 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, 365  
 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  
 Skineffekt 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  
 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  
 Synchronrehzahl 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  
 Verbraucherpfilsystem 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** 27  
**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  
 Wärmemethode 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 27  
 –, 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  
 Zweitor-Ersatzschaltung 60  
 Zylinderspule 91, 132