



## Leseprobe

Georg Flegel, Karl Birnstiel, Wolfgang Nerreter

Elektrotechnik für Maschinenbau und Mechatronik

ISBN (Buch): 978-3-446-44496-6

ISBN (E-Book): 978-3-446-44773-8

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44496-6>

sowie im Buchhandel.

## Vorwort zur 10. Auflage

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

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

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

Zwischen der 1. und der 10. Auflage sind mehr als fünf Jahrzehnte vergangen, in denen sich vor allem in der Technik viele Neuentwicklungen ergeben haben. Konnte 1961 noch das gesamte Fachwissen der Elektrotechnik weitgehend in einem Band untergebracht werden, so ist dies nunmehr unmöglich. Die aktuelle Auflage ist daher lediglich als Einführung in die Elektrotechnik zu verstehen.

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

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

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

In der 10. Auflage haben wir Fehler korrigiert und mehrere Aktualisierungen eingebracht. In das Kap. 7 wurde ein Abschnitt über Leuchtdioden eingefügt.

Zum zweispaltigen Satz sind wir auf den Rat von Fachleuten übergegangen. Das Auge vermag die Spaltenbreite „mit einem Blick“ zu erfassen, wodurch das Lesen erleichtert wird. Zwar sind viele Leser an einspaltig gesetzte Lehrbücher gewöhnt, aber wir sind sicher, dass sich die meisten vom Vorteil des zweispaltigen Satzes überzeugen lassen.

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

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

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

Dem Carl Hanser Verlag danken wir für die gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit. Insbesondere danken wir Frau Franziska Jacob M.A. für die Betreuung des Werkes. Weiterhin sind wir Herrn Dr. Heinrich Kalvelage, Hildesheim, für die Beratung zum Thema Elektrochemie und Herrn Prof. Dr. Werner Frammelsberger, Degendorf, für Hinweise zur Thermospannung zu Dank verpflichtet.

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

im Mai 2016

die Verfasser.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Grundbegriffe</b>	11
1.1 Elektrische Ladung	11
1.1.1 Mit Bernstein fing alles an; 1.1.2 Ausgleich und Trennung von Ladungen	
1.1.3 Leiter und Nichtleiter; 1.1.4 Elektrische Spannung	
1.2 Elektrischer Strom	14
1.2.1 Stromstärke; 1.2.2 Stromkreis; 1.2.3 Richtungssinn und Bezugssinn	
1.3 Leistung und Energie	16
1.3.1 Erzeuger und Verbraucher; 1.3.2 Der Begriff Eintor; 1.3.3 Wirkungsgrad	
1.3.4 Elektrowärme	
1.4 Elektrischer Widerstand	19
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	23
1.5.1 Leerlauf und Kurzschluss; 1.5.2 Ideale Quellen; 1.5.3 Lineare Quellen	
<b>2 Gleichstrom-Schaltungen</b>	26
2.1 Bestimmung des Arbeitspunktes	26
2.2 Knotensatz	26
2.2.1 Der Begriff Knoten; 2.2.2 Knotengleichung; 2.2.3 Parallelschaltung von Widerständen	
2.3 Maschensatz	29
2.3.1 Maschengleichung; 2.3.2 Potenzial; 2.3.3 Reihenschaltung von Widerständen	
2.4 Ersatzschaltungen	32
2.4.1 Ersatzwiderstand; 2.4.2 Ersatzquelle	
2.5 Überlagerungssatz	34
2.6 Knotenpotenzialverfahren	35
<b>3 Zeitabhängige Größen</b>	37
3.1 Periodische Größen	37
3.1.1 Periodendauer und Frequenz; 3.1.2 Gleichwert und Gleichrichtwert	
3.1.3 Wirkleistung und Effektivwert	
3.2 Sinusgrößen	39
3.2.1 Kreisfrequenz und Phasenwinkel; 3.2.2 Kenngrößen; 3.2.3 Zeigerdarstellung	
3.2.4 Komplexe Symbole	
<b>4 Elektrisches Feld</b>	42
4.1 Feldlinien und Äquipotenzialflächen	42
4.2 Kondensatoren	43
4.3 Flussdichte und Feldstärke	43
4.4 Energie eines geladenen Kondensators	45
4.5 Kondensator an Sinusspannung	45
4.6 Polarisationsverluste	46
4.7 Schaltvorgang in einer Schaltung mit einem Kondensator	47
<b>5 Magnetisches Feld</b>	48
5.1 Feldlinien von Magneten	48
5.2 Magnetische Flussdichte	49
5.3 Durchflutungsgesetz	50
5.4 Spulen	51

5.5	Materie im Magnetfeld	52
5.6	Magnetische Werkstoffe	54
5.7	Magnetische Kreise	56
5.8	Induktion	58
	5.8.1 Induktionsgesetz; 5.8.2 Induktion bei Drehbewegung; 5.8.3 Induktion bei ruhender Spule	
5.9	Energie des magnetischen Feldes	62
	5.9.1 Energie einer Spule; 5.9.2 Ein- und Ausschalten einer Spule	
5.10	Verluste im magnetischen Feld	64
	5.10.1 Wirbelstromverluste; 5.10.2 Hystereseverluste; 5.10.3 Eisenverluste	
5.11	Kräfte im Magnetfeld	66
	5.11.1 Zugkraft eines Magneten; 5.11.2 Elektromagnete; 5.11.3 Nqtpgv  -Kraft und J cm -Effekt	
<b>6</b>	<b>Wechselstrom-Schaltungen</b>	<b>69</b>
6.1	Grundeintore	69
6.2	Widerstand und Leitwert	70
6.3	Leistung und Arbeit	71
	6.3.1 Wirk- und Blindleistung; 6.3.2 Leistungsschwingung; 6.3.3 Leistungsfaktor	
	6.3.4 Wirk- und Blindarbeit; 6.3.5 Leistungsberechnung	
6.4	Verbindung von Grundeintoren	75
	6.4.1 Reihenschaltung; 6.4.2 Reihenresonanz; 6.4.3 Parallelschaltung; 6.4.4 Parallelresonanz	
6.5	Wechselstromnetze	78
	6.5.1 Knoten- und Maschensatz; 6.5.2 Ersatzwiderstand; 6.5.3 Resonanz; 6.5.4 Ortskurve	
6.6	Drehstrom	80
	6.6.1 Ströme und Spannungen; 6.6.2 Symmetrische Belastung; 6.6.3 Unsymmetrische Belastung	
<b>7</b>	<b>Bauelemente</b>	<b>86</b>
7.1	Widerstände	86
	7.1.1 Konstante Widerstände; 7.1.2 Einstellbare Widerstände	
	7.1.3 Temperaturabhängige Widerstände; 7.1.4 Spannungsabhängige Widerstände	
7.2	Kondensatoren	88
	7.2.1 Wickelkondensator; 7.2.2 Spannungsabhängigkeit	
7.3	Thermoelektrische Bauelemente	90
7.4	Dioden	91
	7.4.1 Eigenschaften einer Halbleiterdiode; 7.4.2 Das Halbleiter-Grundmaterial Silizium	
	7.4.3 Dotierung; 7.4.4 pn-Übergang; 7.4.5 pn-Diode; 7.4.6 Uej qwnf -Diode	
	7.4.7 Z-Diode; 7.4.8 Solarzelle; 7.4.9 Lumineszenzdiode	
7.5	Transistoren	98
	7.5.1 Feldeffekttransistor ; 7.5.2 Bipolartransistor	
<b>8</b>	<b>Rechnergestützte Simulation</b>	<b>101</b>
8.1	Netzwerkanalyse	101
8.2	Start mit Schematics	101
8.3	Gleichanalyse	102
8.4	Variation von Bauelement-Werten	102
8.5	Transientanalyse	103
8.8	Sinusanalyse	104
8.7	Großsignalanalyse	104
<b>9</b>	<b>Analoge Schaltungen</b>	<b>105</b>
9.1	Stabilisierungsschaltungen	105
9.2	Transistorschaltungen	106
9.3	Operationsverstärker	107

9.4	Rückkopplungsschaltungen . . . . .	109
	9.4.1 Der Begriff Rückkopplung; 9.4.2 Invertierender Verstärker	
	9.4.3 Nicht invertierender Verstärker; 9.4.4 Summierer; 9.4.5 Integrierer	
9.5	Filter . . . . .	112
	9.5.1 Grenzfrequenz; 9.5.2 Tiefpass; 9.5.3 Hochpass; 9.5.4 Bandpass	
<b>10</b>	<b>Digitale Schaltungen</b> . . . . .	<b>115</b>
10.1	Gatter . . . . .	115
	10.1.1 Vorteile der Digitaltechnik; 10.1.2 Binärziffer; 10.1.3 Der Begriff Redundanz	
	10.1.4 Logische Verknüpfungen; 10.1.5 CMOS-Inverter; 10.1.6 Realisierung der Grundgatter	
	10.1.7 Schaltalgebra; 10.1.8 Entwurf logischer Schaltungen	
10.2	Schaltwerke . . . . .	120
	10.2.1 Der Begriff Schaltwerk; 10.2.2 RS-Flipflops; 10.2.3 Master-Slave-Flipflops	
	10.2.4 JK-Flipflops	
10.3	Kippschaltungen . . . . .	123
	10.3.1 Komparatoren; 10.3.2 Monostabile Kippschaltungen; 10.3.3 Digitale Oszillatoren	
10.4	Frequenzteiler und Zähler . . . . .	126
	10.4.1 Frequenzteiler; 10.4.2 Zähler	
10.5	Rechenoperationen mit Dualzahlen . . . . .	128
	10.5.1 Addition; 10.5.2 Subtraktion	
10.6	Verarbeitung von Bitmustern . . . . .	129
	10.6.1 D-Flipflop; 10.6.2 Register; 10.6.3 Datenübertragung	
	10.6.4 Speicher; 10.6.5 Codierschaltungen	
10.7	Integrierte Schaltungen . . . . .	133
	10.7.1 Logikfamilien; 10.7.2 TTL-Technik; 10.7.3 Aufbau integrierter Schaltungen	
	10.7.4 CMOS-Technik; 10.7.5 Programmierbare Logik-Bauelemente	
<b>11</b>	<b>Elektrochemie</b> . . . . .	<b>137</b>
11.1	Elektrischer Strom in Flüssigkeiten . . . . .	137
	11.1.1 Chemische Wirkung des Stromes; 11.1.2 Dissoziation	
11.2	FARADAYSche Gesetze . . . . .	138
11.3	Elektrochemische Spannungsreihe . . . . .	139
11.4	Batterien . . . . .	140
11.5	Akkumulatoren . . . . .	141
	11.5.1 Bleiakкумуляtor; 11.5.2 Nickel-Cadmium-Akkumulatör	
	11.5.3 Nickel-Metallhydrid-Akkumulatör; 11.5.4 Lithium-Ionen-Akkumulatör	
11.6	Brennstoffzellen . . . . .	144
11.7	Elektrolytische Korrosion . . . . .	145
<b>12</b>	<b>Elektrische Maschinen</b> . . . . .	<b>146</b>
12.1	Transformator . . . . .	146
	12.1.1 Idealisierter Transformator; 12.1.2 Realer Transformator; 12.1.3 Leerlauf und Kurzschluss	
	12.1.4 Spannungsänderung; 12.1.5 Wirkungsgrad; 12.1.6 Drehstrom-Transformatoren	
	12.1.7 Parallelbetrieb; 12.1.8 Mechanischer Aufbau; 12.1.9 Sonderbauarten	
12.2	Rotierende elektrische Maschinen . . . . .	160
	12.2.1 Aufbau und Erregung; 12.2.2 Drehfelddrehzahl; 12.2.3 Leistung	
	12.2.4 Drehmoment und Drehzahl	
12.3	Gleichstrommaschine . . . . .	163
	12.3.1 Aufbau und Funktionsweise; 12.3.2 Energiefluss und Leistungsbilanz	
	12.3.3 Ankerrückwirkung; 12.3.4 Verbesserung der Kommutierung; 12.3.5 Kompensationswicklung	
	12.3.6 Wicklungsarten; 12.3.7 Gleichstrommotoren; 12.3.8 Einschalten und Anlassen	
	12.3.9 Drehrichtungswechsel; 12.3.10 Bremsbetrieb	

12.4	Drehstrom-Asynchronmaschine . . . . .	174
	12.4.1 Prinzipielle Funktionsweise; 12.4.2 Ersatzschaltung; 12.4.3 Energiefluss und Leistungsbilanz	
	12.4.4 Drehmoment; 12.4.5 Stromortskurven; 12.4.6 Kennlinien; 12.4.7 Leerlauf- und Kurzschluss	
	12.4.8 Käfigläufer-Motor; 12.4.9 Schleifringläufer-Motor; 12.4.10 Weitere Betriebsarten	
12.5	Einphasen-Asynchronmotor . . . . .	191
12.6	Synchronmaschine . . . . .	193
	12.6.1 Aufbau und Anwendungsgebiete; 12.6.2 Vollpolgenerator im Inselbetrieb	
	12.6.3 Vollpolmaschine im Netzbetrieb; 12.6.4 Schenkelpolmaschine	
	12.6.5 Pendelungen der Synchronmaschine; 12.6.6 Synchronisierung	
12.7	Linearmotoren . . . . .	201
	12.7.1 Asynchron-Linearmotor; 12.7.2 Synchron-Linearmotor	
12.8	Kleinmotoren . . . . .	204
	12.8.1 Universalmotor; 12.8.2 Permanentmagnet-Motor; 12.8.3 Elektronikmotor	
	12.8.4 Spaltpolmotor; 12.8.5 Wechselstrom-Synchronmotor; 12.8.6 Schrittmotor	
12.9	Erwärmung und Kühlung . . . . .	210
	12.9.1 Übertemperatur; 12.9.2 Motorschutz	
12.10	Motorparameter . . . . .	213
	12.10.1 Bauform; 12.10.2 Schutzart; 12.10.3 Explosionsschutz; 12.10.4 Leistungsschild	
<b>13</b>	<b>Elektrische Antriebe</b> . . . . .	<b>215</b>
13.1	Stationärer Betrieb . . . . .	215
13.2	Betriebsarten . . . . .	216
13.3	Trägheitsmoment . . . . .	218
13.4	Dynamischer Betrieb . . . . .	219
13.5	Anlauf . . . . .	219
13.6	Statische Stabilität . . . . .	221
13.7	Direktantriebe . . . . .	221
<b>14</b>	<b>Elektrische Messtechnik</b> . . . . .	<b>223</b>
14.1	Grundbegriffe des Messens . . . . .	223
14.2	Elektromechanische Messgeräte . . . . .	225
	14.2.1 Drehpulsmessgerät; 14.2.2 Dreheisenmessgerät	
	14.2.3 Elektrodynamisches Messgerät; 14.2.4 Induktionsmesswerk	
14.3	Oszilloskop . . . . .	228
	14.3.1 Elektronenstrahlröhre; 14.3.2 Der x-y-Betrieb; 14.3.3 Zeitablenkung	
	14.3.4 Mehrkanal-Funktion; 14.3.5 Ankopplung des Eingangs	
	14.3.6 Abschwächer; 14.3.7 Tastteiler	
14.4	Digitale Messgeräte . . . . .	232
	14.4.1 Genauigkeit und Auflösung; 14.4.2 Analog-Digital-Wandler; 14.4.3 Digital-Multimeter	
	14.4.4 Digitale Speicher-Oszilloskope; 14.4.5 Digital-Analog-Wandler	
	14.4.6 Elektrizitätszähler; 14.4.7 IEC-Bus	
14.5	Messbrücken . . . . .	240
14.6	Sensoren . . . . .	241
	14.6.1 Längensensoren; 14.6.2 Winkelsensoren	
	14.6.3 Kraftsensoren; 14.6.4 Temperatursensoren	
14.7	Messung von Spannung und Strom . . . . .	244
	14.7.1 Widerstand des Messwerks; 14.7.2 Messung der Ersatzgrößen	
	14.7.3 Strommesszange; 14.7.4 Nicht sinusförmige Spannungen	
14.8	Leistungs- und Energiemessung . . . . .	247
	14.8.1 Leistungsmessung im Gleichstromnetz; 14.8.2 Leistungsmessung im Wechselstromnetz	
	14.8.3 Leistungsmessung im Drehstromnetz; 14.8.4 Energiemessung im Drehstromnetz	

14.9	Messung von $C$ und $L$ . . . . .	250
14.10	Zeitmessung . . . . .	251
	14.10.1 Tageszeit; 14.10.2 Zeitintervall	
14.11	Elektromagnetische Verträglichkeit . . . . .	252
	14.11.1 Der Begriff EMV; 14.11.2 Normung und Gesetze; 14.11.3 Prüfung und Nachweis	
<b>15</b>	<b>Steuer- und Regelungstechnik</b> . . . . .	<b>253</b>
15.1	Die Begriffe Steuern und Regeln . . . . .	253
15.2	Entwicklung der Steuerungstechnik . . . . .	254
15.3	Komponenten von Steuerungen . . . . .	255
15.4	Steuerung elektrischer Maschinen . . . . .	258
15.5	Regelungstechnik . . . . .	260
<b>16</b>	<b>Leistungselektronik</b> . . . . .	<b>269</b>
16.1	Entwicklung der Leistungselektronik . . . . .	269
16.2	Aufgaben der Leistungselektronik . . . . .	269
16.3	Leistungshalbleiter . . . . .	270
16.4	Ungesteuerte Gleichrichter . . . . .	274
16.5	Netzgeführte Stromrichter . . . . .	277
16.6	Selbstgeführte Stromrichter . . . . .	282
16.7	Frequenzumrichter . . . . .	286
16.8	Wechsel- und Drehstromsteller . . . . .	293
16.9	EMV von Stromrichtern . . . . .	294
<b>17</b>	<b>Informationsübertragung</b> . . . . .	<b>296</b>
17.1	Grundbegriffe . . . . .	296
17.2	Leitungen und Kabel . . . . .	298
17.3	Lichtwellenleiter . . . . .	303
17.4	Funkkanäle . . . . .	307
17.5	LAN, Ethernet . . . . .	312
17.6	TCP/IP, OSI-Modell . . . . .	314
17.7	Feldbusse . . . . .	316
17.8	USB . . . . .	317
<b>18</b>	<b>Energieübertragung</b> . . . . .	<b>319</b>
18.1	Energieumwandlung . . . . .	319
18.2	Betriebsmittel und -verfahren . . . . .	321
18.3	Überstromschutz . . . . .	327
18.4	Erder und Erdung . . . . .	328
18.5	Schutzmaßnahmen . . . . .	329
18.6	USV . . . . .	334
	Verwendete Formelzeichen . . . . .	335
	Einheiten . . . . .	336
	Komplexe Rechnung . . . . .	338
	Literatur . . . . .	339
	Wichtige Konstanten . . . . .	342
	Namenverzeichnis . . . . .	342
	Sachwortverzeichnis . . . . .	343
	Und zum Schluss: Bloß nicht ... . . . .	352

## 2 Gleichstrom-Schaltungen

### 2.1 Bestimmung des Arbeitspunktes

Beim einfachen Stromkreis (Bild 1.8) ist die Klemmenspannung  $U$  der Quelle gleich der Spannung des Verbrauchers. Ist diese Spannung bekannt, so kann der Strom  $I$  mit der  $I$ - $U$ -Kennlinie des Verbrauchers bestimmt werden.

Handelt es sich jedoch z. B. um eine lineare Quelle, so ist ihre Klemmenspannung  $U$  nicht von vornherein bekannt. Zur Bestimmung der Klemmenspannung  $U$  und des Stromes  $I$  müssen in diesem Fall *zwei* Gleichungen gelöst werden; dies kann entweder grafisch oder rechnerisch geschehen.

Das Bild 2.1 zeigt die grafische Lösung für den Fall, dass der Verbraucher ein OHMScher Widerstand ist; seine  $I$ - $U$ -Kennlinie ist eine Gerade (s. Abschnitt 1.4.2). Diese schneidet die  $I$ - $U$ -Kennlinie der linearen Spannungsquelle in einem Punkt, der **Arbeitspunkt** (*bias point*) genannt wird. In diesem Punkt stimmen die Spannungen der beiden Eintore überein und der Strom  $I$  der Quelle ist gleich dem Strom des OHMSchen Widerstandes.

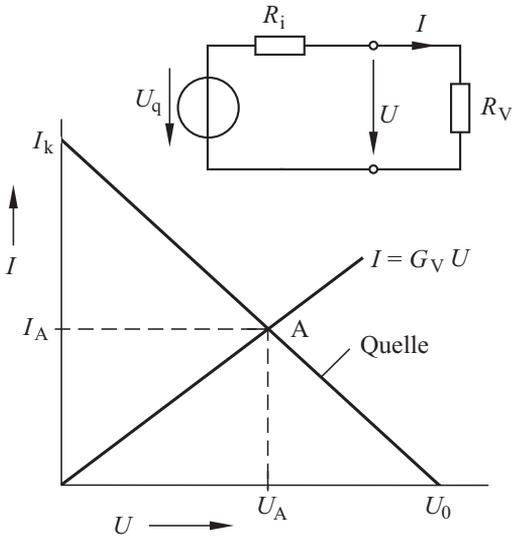


Bild 2.1 Einfacher Stromkreis und grafische Bestimmung des Arbeitspunktes A im  $I$ - $U$ -Kennlinienfeld

Zur *Berechnung* der Spannung  $U_A$  und des Stromes  $I_A$  für den Arbeitspunkt der Schaltung 2.1 setzen wir in die Gln. (1.21 und 1.33) die Bedingungen  $U = U_A$  und  $I = I_A$  für den Arbeitspunkt ein:

$$U_A = U_q - R_i I_A \tag{2.1}$$

$$U_A = R_V I_A \tag{2.2}$$

Wir lösen nach  $I_A$  auf und erhalten:

$$I_A = \frac{U_q}{R_i + R_V} \tag{2.3}$$

Ist der Strom  $I_A$  bekannt, so lässt sich die Spannung  $U_A$  entweder mit der Gl. (2.1) oder mit der Gl. (2.2) berechnen.

#### Beispiel 2.1

Die Quellenspannung eines Stromkreises nach Bild 2.1 ist  $U_q = 12$  V. Beim Strom  $I = 1,5$  A wird die Klemmenspannung  $U = 11,7$  V gemessen. Wie groß sind der Innenwiderstand  $R_i$  und der Verbraucherwiderstand  $R_V$ ?

$$I_A = 1,5 \text{ A}; \quad U_A = 11,7 \text{ V}; \quad R_V = \frac{U_A}{I_A} = 7,8 \ \Omega$$

$$R_i = \frac{U_q - U_A}{I_A} = 0,2 \ \Omega$$

## 2.2 Knotensatz

### 2.2.1 Der Begriff Knoten

Beim einfachen Stromkreis fließt an jeder Stelle derselbe Strom  $I$ ; in dieser Hinsicht handelt es sich dabei um einen Sonderfall. In einer beliebigen Schaltung kann sich der Strom *verzweigen*: In einem Teil der Leitungen strömen Ladungen zum **Verzweigungspunkt** (*branch point*) hin, in den übrigen Leitungen vom Verzweigungspunkt weg.

Da die Ladungen im Verzweigungspunkt nicht gespeichert werden können, ist die gesamte zuströmende Ladung gleich der gesamten wegströmenden Ladung. Wegen  $I = Q/t$  gilt entsprechend für die Ströme: Die Summe der zufließenden Ströme  $I_{zu}$  ist gleich der Summe der abfließenden Ströme  $I_{ab}$ :

$$\sum I_{ab} = \sum I_{zu} \quad (2.4)$$

Dieser Zusammenhang gilt auch dann, wenn sich die stromführenden Leiter nicht in einem Punkt treffen, sondern beliebig angeordnet sind; so gilt z. B. sowohl für das Bild 2.2a als auch für das Bild 2.2b:  $I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5$ .

Es ist also unerheblich, wie die stromführenden Leiter miteinander verbunden sind. Entscheidend ist lediglich, dass sämtliche Ströme erfasst werden, die eine (geschlossene) Hüllfläche um den Verzweigungspunkt „durchstoßen“.

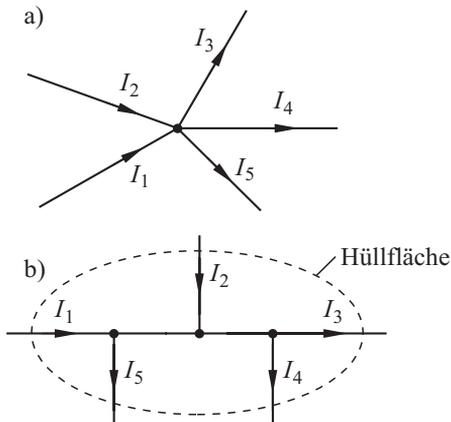


Bild 2.2 Verbindung der stromführenden Leiter in einem Punkt (a) und beliebig (b)

Da man das Gebiet, innerhalb dessen die Leiter miteinander verbunden sind, als **Knoten** (*node*) bezeichnet, wird der durch Gl. (2.4) beschriebene Zusammenhang **Knotensatz** genannt. Vielfach ist hierfür auch die Bezeichnung **1. KIRCHHOFFSCHER SATZ** gebräuchlich.

In der Mechanik gibt es zwei Bedingungen für den Gleichgewichtszustand eines Körpers: das Gleichgewicht der Kräfte und das der Drehmomente. Entsprechend besitzt auch die Elektrotechnik zwei Bedingungen für die stationäre elektrische Strömung. Der Knotensatz ist eine dieser Gleichgewichtsbedingungen; er verlangt, dass sich die Ströme an jedem Knoten »im Gleichgewicht« befinden.

## 2.2.2 Knotengleichung

Wir sortieren zunächst die Gl. (2.4) so, dass sämtliche Ströme auf *einer* Seite der Gleichung stehen:

$$\sum I_{zu} - \sum I_{ab} = 0 \quad (2.5)$$

Eine einfache mathematische Formulierung des Knotensatzes ergibt sich dann, wenn man z. B. sämtliche Bezugs Pfeile so einzeichnet, dass sie zum Knoten hinweisen. Wegen  $\sum I_{ab} = 0$  erhält man damit die Knotengleichung in der Form:

$$\sum I = 0 \quad (2.6)$$

In der Praxis ist die beschriebene einheitliche Zuordnung der Strombezugspfeile „zum Knoten hin“ im Allg. nicht gegeben. Die Gl. (2.6) kann jedoch stets angewendet werden, wenn man vereinbart, dass die *abfließenden* Ströme mit *geändertem* Vorzeichen in die Summe eingesetzt werden.

### Beispiel 2.2

Für die Schaltung 2.2 sind folgende Ströme gegeben:  $I_1 = 1,5 \text{ A}$ ;  $I_2 = 0,4 \text{ A}$ ;  $I_3 = 1,8 \text{ A}$ ;  $I_4 = 0,6 \text{ A}$ . Welcher Strom  $I_5$  fließt und welchen Richtungssinn hat dieser Strom?

Wir tragen in die Knotengleichung (2.6) die dem Knoten zufließenden Ströme positiv und die abfließenden Ströme mit geändertem Vorzeichen, also negativ, ein:

$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 - I_5 = 0$$

Der gesuchte Strom  $I_5$  ist:

$$I_5 = I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = -0,5 \text{ A}$$

Der Richtungssinn dieses Stromes ist entgegengesetzt zu dem im Bild 2.2 eingetragenen Bezugspfeil für  $I_5$ ; der Strom fließt also zum Knoten hin.

Wie schon beschrieben, ergibt der Bezugspfeil eines Stromes nur im Zusammenhang mit dem Vorzeichen des Zahlenwertes eine Aussage über den Richtungssinn (s. Abschnitt 1.2.3).

**2.2.3 Parallelschaltung von Widerständen**

Derjenige Teil einer Schaltung, in dem ein und derselbe Strom fließt, wird als **Zweig** (*branch*) bezeichnet. Der einfache Stromkreis besteht also aus einem einzigen Zweig. Sind dagegen in einer Schaltung Verzweigungspunkte vorhanden, so besteht die Schaltung aus mehreren Zweigen.

Eine **Parallelschaltung** (*parallel connection*) von Zweigen liegt dann vor, wenn die betreffenden Zweige an *derselben* Zweigspannung liegen. Das Bild 2.3a zeigt als Beispiel die Parallelschaltung der drei Widerstände  $R_1$ ,  $R_2$  und  $R_3$ . Für die Ströme in diesen Widerständen gilt:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; I_2 = \frac{U}{R_2}; I_3 = \frac{U}{R_3} \tag{2.7}$$

Die Summe dieser Ströme ist nach dem Knotensatz gleich dem Gesamtstrom  $I$ :

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = U \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \tag{2.8}$$

Die drei Widerstände lassen sich rein rechnerisch zu einem einzigen Widerstand  $R_e$  zusammenfassen, der an derselben Zweigspannung  $U$  liegt und den Gesamtstrom

$$I = \frac{U}{R_e} \tag{2.9}$$

aufnimmt; dieser Widerstand wird als **Ersatzwiderstand** (*equivalent resistance*) bezeichnet.

Durch einen Vergleich der Gln. (2.8 und 2.9) erhalten wir den Kehrwert des Ersatzwiderstandes:

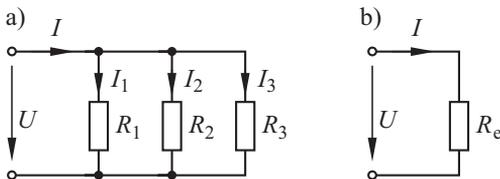


Bild 2.3 Parallelschaltung von drei Widerständen (a) und Ersatzwiderstand (b)

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \tag{2.10}$$

Der Kehrwert des Ersatzwiderstandes einer Parallelschaltung ist gleich der Summe der Kehrwerte sämtlicher Teilwiderstände.

Die Gl. (2.10) ergibt mit der Gl. (1.20) den **Ersatzleitwert**  $G_e$ :

$$G_e = G_1 + G_2 + G_3 \tag{2.11}$$

Der Ersatzleitwert einer Parallelschaltung ist gleich der Summe sämtlicher Teilleitwerte.

**Beispiel 2.3**

Drei Widerstände  $R_1 = 50 \Omega$ ,  $R_2 = 75 \Omega$  und  $R_3 = 150 \Omega$  liegen parallel an der Spannung  $U = 150 \text{ V}$ . Wie groß sind der Ersatzwiderstand  $R_e$  und der Gesamtstrom  $I$ ? Welche Teilströme  $I_1$ ,  $I_2$  und  $I_3$  fließen dabei?

Wir setzen die Leitwerte  $G_1 = 1/R_1 = 20 \text{ mS}$ ,  $G_2 = 13,33 \text{ mS}$  und  $G_3 = 6,67 \text{ mS}$  in die Gl. (2.11) ein und erhalten:

$$G_e = 40 \text{ mS}$$

Der Ersatzwiderstand ist:

$$R_e = \frac{1}{G_e} = 25 \Omega$$

Den Gesamtstrom  $I$  und die Teilströme berechnen wir mit der Gl. (1.20):

$$I = G_e U = 40 \text{ mS} \cdot 150 \text{ V} = 6 \text{ A}$$

$$I_1 = G_1 U = 3 \text{ A}; I_2 = 2 \text{ A}; I_3 = 1 \text{ A}$$

Wie das Beispiel zeigt, ist der Ersatzwiderstand einer Parallelschaltung stets kleiner als der kleinste Teilwiderstand.

Schreibt man eine der Gln. (2.7) oder die Gl. (2.9) mithilfe des Leitwerts und dividiert zwei dieser Gleichungen durcheinander, so erhält man den Quotienten zweier Ströme; so gilt zum Beispiel:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{G_1}{G_2} \quad (2.12)$$

Die Ströme einer Parallelschaltung verhalten sich wie die Leitwerte, durch die sie fließen. Diese Aussage, die als **Stromteilerregel** bezeichnet wird, gilt wegen  $I = G_e U$  auch für den Ersatzleitwert  $G_e$  einer Parallelschaltung:

$$\frac{I_1}{I} = \frac{G_1}{G_e} \quad (2.13)$$

Jeder Zweigstrom verhält sich zum Gesamtstrom einer Parallelschaltung wie der Zweigleitwert zum Ersatzleitwert.

#### Beispiel 2.4

Durch den Teilwiderstand  $R_1 = 100 \Omega$  einer Parallelschaltung von mehreren Widerständen, die den Gesamtstrom  $I = 1,2 \text{ A}$  aufnimmt, fließt der Teilstrom  $I_1 = 0,5 \text{ A}$ . Welchen Gesamtleitwert  $G_e$  hat die Schaltung?

Wir setzen  $G_1 = 10 \text{ mS}$  und die Ströme in die Gl. (2.13) ein und erhalten:  $G_e = 24 \text{ mS}$

#### Beispiel 2.5

Durch zwei parallel geschaltete Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  soll der Gesamtstrom  $I = 0,1 \text{ A}$  fließen. Dabei soll in  $R_1 = 100 \Omega$  die Leistung  $P_1 = 0,36 \text{ W}$  entstehen. Welchen Wert muss der Widerstand  $R_2$  erhalten?

Wir berechnen zunächst den Teilstrom  $I_1$ :

$$P_1 = R_1 I_1^2; \quad I_1 = 0,06 \text{ A} = 60 \text{ mA}$$

Den Teilstrom  $I_2$  berechnen wir mit der Knotengleichung:

$$I_2 = I - I_1 = 0,04 \text{ A}$$

Mit der Gl. (2.12) ergibt sich:

$$G_2 = \frac{I_2}{I_1} G_1 = \frac{I_2}{I_1 R_1} = 6,67 \text{ mS}$$

Der gesuchte Widerstand ist  $R_2 = 150 \Omega$ .

## 2.3 Maschensatz

### 2.3.1 Maschengleichung

Eine **Masche** (*mesh*) ist ein beliebiger, in sich geschlossener Weg, der sowohl über Leiter als auch über Spannungspfeile geführt sein kann. In einer elektrischen Schaltung lassen sich im Allgemeinen mehrere Maschen bilden; dies gilt auch für den einfachen Stromkreis (Bild 2.1).

Als **Maschengleichung** bezeichnet man die Summe aller Spannungen, die zu einer Masche gehören. So ist z. B. die Gl. (2.1) eine Maschengleichung des einfachen Stromkreises (Bild 2.1). Wir stellen sie so um, dass sämtliche Größen auf einer Seite stehen, und erhalten für  $U = U_A$  und  $I = I_A$ :

$$R_i I + U - U_q = 0 \quad (2.14)$$

Die stromabhängige Spannung (z. B.  $R_i I$ ) an einem Widerstand wird **Spannungsfall** genannt.

Für die Spannungen einer Masche setzt man an:

$$\sum U = 0 \quad (2.15)$$

Damit diese Gleichung mit der Gl. (2.14) übereinstimmt, ordnet man der Masche einen **Umlaufsinn** zu und vereinbart, dass diejenigen Spannungen, deren Bezugssinn *nicht* mit dem Umlaufsinn übereinstimmt, mit *geändertem* Vorzeichen in die Gl. (2.15) einzusetzen sind.

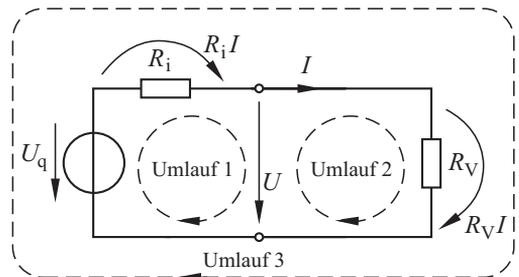


Bild 2.4 Schaltung 2.1 mit möglichen Maschen

#### Beispiel 2.6

Wir wollen sämtliche Maschengleichungen für die im Bild 2.4 dargestellte Schaltung ermitteln.

Beim Umlauf 1 werden der Spannungsfall  $R_1 I$  und die Klemmenspannung  $U$  im Bezugssinn durchlaufen, sie werden daher positiv in die Gl. (2.15) eingesetzt.

Die Quellenspannung  $U_q$  wird beim Umlauf 1 entgegen dem Bezugssinn durchlaufen, sie wird daher negativ in die Gl. (2.15) eingesetzt:

$$R_1 I + U - U_q = 0$$

Beim Umlauf 2 wird der Spannungsfall  $R_V I$  im Bezugssinn und die Klemmenspannung  $U$  entgegen dem Bezugssinn durchlaufen:

$$R_V I - U = 0$$

Beim Umlauf 3 werden die Spannungsfälle  $R_1 I$  und  $R_V I$  im Bezugssinn und die Quellenspannung  $U_q$  entgegen dem Bezugssinn durchlaufen:

$$R_1 I + R_V I - U_q = 0$$

Der durch die Gl. (2.15) beschriebene Zusammenhang wird **Maschensatz** genannt. Vielfach ist hierfür auch die Bezeichnung **2. KIRCHHOFFScher Satz** gebräuchlich. Dieser Satz ist die zweite Gleichgewichtsbedingung der Elektrotechnik; er verlangt, dass sämtliche Spannungen auf einem geschlossenen Weg »im Gleichgewicht« sind.

Der einfache, unverzweigte Stromkreis ist der Sonderfall einer Masche, weil dabei überall auf dem Umlaufweg derselbe Strom fließt. Im Allgemeinen trifft man jedoch auf einem Umlauf unterschiedliche Ströme an.

**Beispiel 2.7**

In den Zweigen der Masche (Bild 2.5), die Teil einer größeren Schaltung ist, fließen die Ströme  $I_1 = 0,14$  A und  $I_2 = 0,08$  A. Wir wollen die Spannung  $U_{AB}$  berechnen.

Zunächst setzen wir die Maschengleichung an:

$$R_1 I_1 + U_{AB} - R_2 I_2 - U_q = 0$$

Damit berechnen wir:  $U_{AB} = 17,4$  V

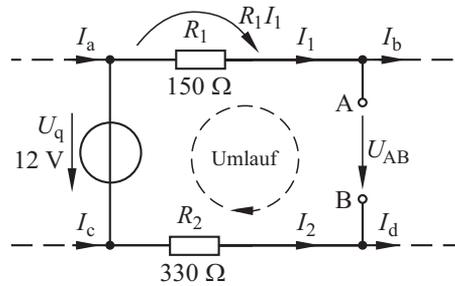


Bild 2.5 Schaltung zum Beispiel 2.7

**2.3.2 Potenzial**

Da eine Spannung  $U$  stets zwischen zwei Punkten wirkt, kann bei Kenntnis sämtlicher Spannungen in einer Schaltung bezüglich eines einzelnen Punktes dieser Schaltung nichts ausgesagt werden. Ein ähnliches Problem tritt z.B. bei der Höhenbestimmung im Gelände auf, bei der lediglich Höhendifferenzen gemessen werden. Um die absolute Höhe angeben zu können, muss ein Nullpunkt willkürlich festgelegt werden (z. B. NHN=0 am Pegel Amsterdam).

Jedem einzelnen Punkt einer Schaltung kann eine Größe zugeordnet werden, die als **Potenzial** (*potential*)  $\varphi$  (griech. Buchstabe phi) bezeichnet wird. Eine Spannung  $U$  ist eine Potenzialdifferenz. So gilt z. B. für die Spannung  $U_{AB}$  im Bild 2.5:

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B \tag{2.16}$$

In einer Schaltung bzw. einem Gerät kann *einem* beliebigen Punkt, der **Bezugspunkt** genannt wird,

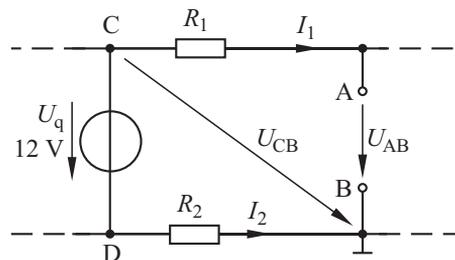


Bild 2.6 Schaltung vom Beispiel 2.7 mit Bezugspotenzial im Punkt B

das **Bezugspotenzial**  $\varphi = 0$  V zugeordnet werden. Dieser Punkt wird auch **Masse** genannt; er wird vielfach mit dem Gehäuse des Geräts leitend verbunden, welches mit Erde leitend verbunden („geerdet“) wird. Dadurch wird verhindert, dass zwischen Gehäuse und Umgebung eine gefährliche Spannung auftreten kann (s. Kap. 18).

Der Punkt mit dem Potenzial  $\varphi = 0$  wird in einer Schaltung durch das Zeichen  $\perp$  gekennzeichnet. Die Spannung zwischen einem Punkt der Schaltung und dem Bezugspunkt ist gleich dem Potenzial dieses Punktes.

### Beispiel 2.8

In der Schaltung 2.6 ist der Punkt B geerdet. Welche Potenziale haben die übrigen Punkte?

Zunächst setzen wir  $\varphi_B = 0$  in die Gl. (2.16) ein und erhalten:

$$\varphi_A = U_{AB} = 17,4 \text{ V}$$

Dann setzen wir an:

$$U_{DB} = \varphi_D - \varphi_B = R_2 I_2 = 26,4 \text{ V}$$

Mit  $\varphi_B = 0$  ergibt sich:  $\varphi_D = 26,4 \text{ V}$

Schließlich setzen wir an:

$$U_{CD} = U_q = \varphi_C - \varphi_D = 12 \text{ V}$$

Mit  $\varphi_D = 26,4 \text{ V}$  ergibt sich:  $\varphi_C = 38,4 \text{ V}$

### 2.3.3 Reihenschaltung von Widerständen

Bei einer **Reihenschaltung** (*series connection*) von Eintoren wird jedes Eintor vom gleichen Strom  $I$  durchflossen. Das Bild 2.7 zeigt als Beispiel die Reihenschaltung von drei Widerständen.

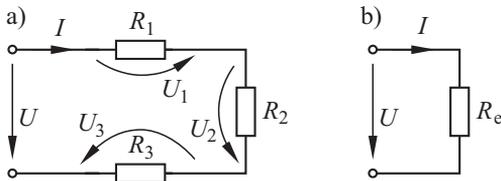


Bild 2.7 Reihenschaltung von drei Widerständen (a) und Ersatzwiderstand (b)

Die drei Widerstände lassen sich rein rechnerisch zu einem **Ersatzwiderstand**  $R_e$  zusammenfassen, der vom Strom  $I$  durchflossen wird und an der Spannung  $U$  liegt:

$$U = R_e I \quad (2.17)$$

Wir lösen die Maschengleichung

$$R_1 I + R_2 I + R_3 I - U = 0 \quad (2.18)$$

nach  $U$  auf und erhalten durch einen Koeffizientenvergleich mit der Gl. (2.17):

$$R_e = R_1 + R_2 + R_3 \quad (2.19)$$

Der Ersatzwiderstand einer Reihenschaltung von Widerständen ist gleich der Summe sämtlicher Teilwiderstände.

Die Teilspannungen der Schaltung 2.7 lassen sich als Produkte mit dem Faktor  $I$  angeben:

$$U_1 = R_1 I; \quad U_2 = R_2 I; \quad U_3 = R_3 I \quad (2.20)$$

Bei der Division von je zwei dieser Gleichungen kürzt sich der Strom heraus. Man erhält z. B. für die Teilspannungen  $U_1$  und  $U_2$ :

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (2.21)$$

Die Spannungen einer Reihenschaltung verhalten sich wie die Widerstände, an denen sie abfallen. Diese Aussage, die als **Spannungsteilerregel** bezeichnet wird, gilt auch für den Ersatzwiderstand  $R_e$  der Reihenschaltung:

$$\frac{U_1}{U} = \frac{R_1}{R_e} \quad (2.22)$$

### Beispiel 2.9

Zwei in Reihe geschaltete Widerstände  $R_1 = 130 \Omega$  und  $R_2$  liegen an der Gesamtspannung  $U = 35 \text{ V}$ . Welchen Wert muss  $R_2$  für  $U_1 = 12,3 \text{ V}$  erhalten?

Wir setzen  $U_2 = U - U_1 = 22,7 \text{ V}$  in die Gl. (2.21) ein und berechnen:  $R_2 = 239,9 \Omega$

## 2.4 Ersatzschaltungen

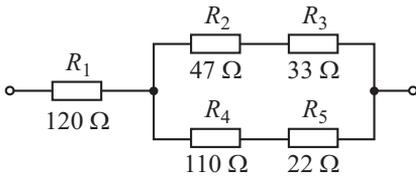
### 2.4.1 Ersatzwiderstand

Befinden sich in einer Schaltung zwischen zwei Klemmen ausschließlich Widerstände, so können sie durch ihren **Ersatzwiderstand** ersetzt werden.

Der Ersatzwiderstand lässt sich problemlos ermitteln, wenn sich die parallel geschalteten Widerstände einerseits und die in Reihe geschalteten Widerstände andererseits Schritt für Schritt zusammenfassen lassen.

#### Beispiel 2.10

Wir wollen den Ersatzwiderstand der Schaltung ermitteln.



Zunächst fassen wir die in Reihe geschalteten Widerstände  $R_2$  und  $R_3$  zum Ersatzwiderstand  $R_{e23} = 80 \text{ Ω}$  sowie  $R_4$  und  $R_5$  zum Ersatzwiderstand  $R_{e45} = 132 \text{ Ω}$  zusammen.

Dann addieren wir deren Leitwerte und erhalten den Leitwert  $G_{eP}$  der Parallelschaltung:

$$G_{eP} = G_{e23} + G_{e45} = 12,5 \text{ mS} + 7,58 \text{ mS} = 20,08 \text{ mS}$$

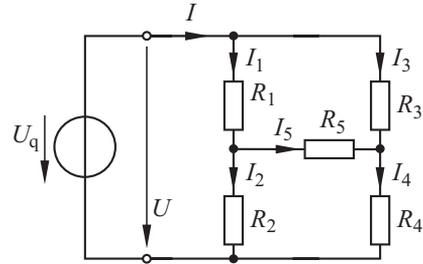
Der gesuchte Ersatzwiderstand ist die Summe von  $R_1$  und  $R_{eP} = 1/G_{eP}$ :

$$R_e = R_1 + R_{eP} = 120 \text{ Ω} + 49,81 \text{ Ω} = 169,81 \text{ Ω}$$

Wenn das beschriebene Vorgehen nicht zum Ziel führt, schaltet man zweckmäßig eine Quelle an die Schaltung und berechnet mit Maschen- und Knotengleichungen den Gesamtstrom  $I$  als Funktion der Gesamtspannung  $U$ , womit sich der Ersatzwiderstand  $R_e = U/I$  bestimmen lässt.

#### Beispiel 2.11

Wir wollen den Ersatzwiderstand  $R_e = U/I$  der Brückenschaltung berechnen.



Wir lösen die Knotengleichungen

$$I - I_1 - I_3 = 0; \quad I_1 - I_2 - I_5 = 0; \quad I_3 + I_5 - I_4 = 0$$

und die Maschengleichungen

$$R_1 I_1 + R_2 I_2 - U = 0$$

$$R_3 I_3 + R_4 I_4 - U = 0$$

$$R_1 I_1 + R_5 I_5 - R_3 I_3 = 0$$

nach dem Strom  $I$  auf und berechnen mit den Abkürzungen

$$R_{12} = R_1 + R_2; \quad R_{34} = R_3 + R_4$$

den Ersatzwiderstand  $R_e = U/I$ :

$$R_e = \frac{U}{I} = \frac{R_{12} \cdot (R_3 R_4 + R_{34} R_5) + R_1 R_2 R_{34}}{(R_{12} + R_{34}) R_5 + (R_1 + R_3) \cdot (R_2 + R_4)}$$

### 2.4.2 Ersatzquelle

Enthält eine Schaltung zwischen zwei Klemmen außer Widerständen auch eine oder mehrere Quellen, so kann diese Schaltung durch eine **Ersatzquelle** ersetzt werden. Dabei gibt es zwei Möglichkeiten:

- die Schaltung wird durch eine lineare Spannungsquelle mit der Quellenspannung  $U_{qe}$  und dem Innenwiderstand  $R_{ie}$  ersetzt (Bild 2.8a); man bezeichnet dies auch als **THÉVENIN-Theorem**.
- die Schaltung wird durch eine lineare Stromquelle mit dem Quellenstrom  $I_{qe}$  und dem Innenleitwert  $G_{ie}$  ersetzt (Bild 2.8b); man spricht dabei auch vom **NORTON-Theorem**.

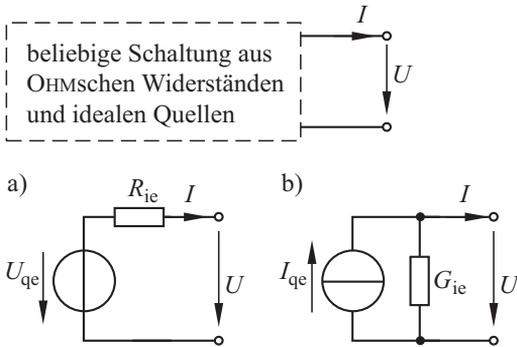


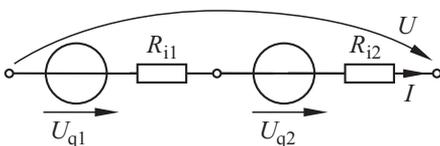
Bild 2.8 Teil einer linearen Schaltung zwischen zwei Knoten und Ersatzquellen:  
 (a) lineare Spannungsquelle, (b) lineare Stromquelle

Die Quellenspannung  $U_{qe}$  der Ersatzquelle ist die Leerlaufspannung  $U_0$  des zu ersetzenden Schaltungsteils. Entsprechend ist der Quellenstrom  $I_{qe}$  der Ersatzquelle gleich dem Kurzschlussstrom  $I_k$  des zu ersetzenden Schaltungsteils. Da nur *eine* der beiden Größen benötigt wird, bestimmt man zweckmäßig diejenige, die sich einfacher ermitteln lässt.

Der Innenwiderstand  $R_{ie}$  bzw. der Innenleitwert  $G_{ie}$  der Ersatzquelle kann dadurch bestimmt werden, dass man sich die zu ersetzende Schaltung *quellenfrei* denkt: Jede ideale Spannungsquelle wird durch einen Kurzschluss und jede ideale Stromquelle durch eine Unterbrechung des Leiterweges ersetzt. Der Widerstand zwischen den Klemmen der quellenfreien Schaltung ist der Innenwiderstand  $R_{ie}$ ; entsprechend ist der Leitwert zwischen den Klemmen der quellenfreien Schaltung gleich dem Innenleitwert  $G_{ie}$ .

**Beispiel 2.12**

Zwei Batterien  $U_{q1} = 1,5 \text{ V}$ ;  $R_{i1} = 0,02 \text{ } \Omega$  und  $U_{q2} = 1,2 \text{ V}$ ;  $R_{i2} = 0,03 \text{ } \Omega$  sind in Reihe geschaltet. Wir wollen die Kenngrößen der Ersatzquellen berechnen.



Für Leerlauf ( $I = 0$ ) ergibt die Maschengleichung  $U_{q1} + U_{q2} - U = 0$  die Leerlaufspannung  $U = U_0$  der Reihenschaltung. Diese Leerlaufspannung ist die Quellenspannung der Ersatzquelle:

$$U_{qe} = U_0 = U_{q1} + U_{q2} = 2,7 \text{ V}$$

Nun denken wir uns die Reihenschaltung quellenfrei und ersetzen jede ideale Spannungsquelle durch eine Kurzschlussverbindung. Dabei bleibt die Reihenschaltung der Innenwiderstände übrig:

$$R_{ie} = R_{i1} + R_{i2} = 0,05 \text{ } \Omega$$

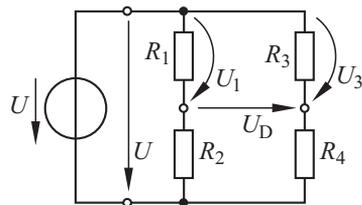
Der Innenleitwert ist  $G_{ie} = 1/R_{ie} = 20 \text{ S}$ . Der Quellenstrom der Ersatzquelle ist:

$$I_{qe} = G_{ie} U_{qe} = 54 \text{ A}$$

Wie schon im Abschnitt 1.5.3 erläutert, sind die Ersatzspannungsquelle und die Ersatzstromquelle gleichwertig. Deshalb ist es im Allgemeinen nicht erforderlich, beide Ersatzquellen zu bestimmen, und man begnügt sich mit derjenigen Quelle, deren Größen sich einfacher ermitteln lassen.

**Beispiel 2.13**

Wir wollen die Ersatzquelle der von einer idealen Spannungsquelle gespeisten Brückenschaltung ermitteln.



Zunächst berechnen wir die Spannungen  $U_1$  und  $U_3$  mit der Spannungsteilerregel:

$$U_1 = U \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}; \quad U_3 = U \cdot \frac{R_3}{R_3 + R_4}$$

Die Ersatzquellenspannung  $U_{qe}$  ist die Diagonalspannung  $U_D$  der unbelasteten Brücke.

# Sachwortverzeichnis

- Ableich 240
- Abhitzekegel 320
- Abschnürbereich 99
- Abschnürspannung 98
- Abschwächer 230
- Abspannmast 325
- Abtastrate 236
- Abtasttheorem 236
- Abweichung, relative 223
- , systematische 223
- AC 230
- AC-Servomotor 207
- ADC 232
- AD-Wandler, paralleler 234
- Addition von Dualzahlen 128
- Äquipotenzialfläche 42
- AGND 102
- Akkumulator 142
- Aktor 256
- Akzeptor 95
- Alkali-Mangan-Zelle 141
- ALT 230
- Ampere 14
- Amperemeter 16
- Amplitude 39
- Amplitudenspektrum 246
- Amplitudentastung 297
- Analog-Digital-Wandler 232
- Anfangsbedingung 47, 64
- Anfangswert 63
- Anionen 137
- Anker 66, 160, 193
- Ankerquerfeld 167
- Ankerrückwirkung 168, 195
- Ankerverluste 166
- Anlasser 17, 172
- Anlasstransformator 184
- Anlauf 219
- Anlaufbereich 99
- Anlaufkondensator 192
- Anlaufstrom 183
- Anode 91, 137
- Anreicherungs-MOSFET 99
- Anstiegsgeschwindigkeit 109
- Antenne, isotrope 309
- Antennengewinn 309
- Antrieb, elektrischer 215
- Anzeige 223
- Anzeigebereich 232
- APD 303
- aperiodischer Fall 262
- aperiodischer Grenzfall 262
- Approximation, sukzessive 234
- Arbeitspunkt 26, 215
- Arbeitstabelle 133
- Arbitrierungsverfahren 317
- Aron-Schaltung 248
- ASCII-Code 296
- ASI-Bus 256
- ASIC 135
- Asynchronmaschine 174, 191
- , synchronisierte 190
- ATN 2340
- Atomuhr 251
- Auflösung 224, 232
- Ausbreitungsgeschwindigkeit 303
- Ausbreitungswiderstand 324
- Ausgleich 263
- Außenleiterspannung 81
- Aussetzbetrieb 217
  
- B2C 278
- B2HZ 278
- Bändermodell 92
- Bandabstand 93
- Bandabstand-Referenz 234
- Bandbreite 114
- Bandmittenfrequenz 114
- Bandpass 114
- Bariumtitanat 87
- Barkhausen-Schaltung 205
- Basis 100
- Basiseinheit 223, 336
- Basisisolierung 331
- Batterie 140
- Baud 297
- Bauform 213
- BCD-Code 132
- Beharrungstemperatur 211
- Belastung, symmetrische 82
- Beleuchtungsstärke 96
- Bemessungsleistung 88
- Bemessungsspannung 88
- Bereich, verbotener 133
- Bernstein 11
- Berührungsspannung 328
- Beschleunigungsmoment 219
- Betrieb, dynamischer 219
- , stationärer 215
- Betriebserdung 328
- Betriebsfall, ungünstigster 133
- Betriebskondensator 192
  
- Bezugserde 328
- Bezugsknoten 35
- Bezugspfeil 13
- Bezugspotenzial 31
- Bezugspunkt 30
- Bezugssinn 13, 16
- Bezugstemperatur 22
- Binärteiler 126
- Binärzeichen 296
- Binärziffer 115
- bit 115, 293
- Bipolartransistor 100
- BITBUS 317
- Bitrate 297
- Bitraten-Längen-Produkt 298
- BJT 100
- Bleiakkumulator 142
- Blindarbeit 73
- Blindleistung 72
- Blindleitwert 70
- Blindstromkompensation 323
- Blindwiderstand 70
- Blocksteuerung 287
- Bode-Diagramm 113
- Boolesche Algebra 117
- Braunsche Röhre 228
- Bremsbetrieb 173, 179, 190
- Brems-Chopper 292
- Bremsversuch 162
- Bremswächter 190
- Brennstoffzelle 144
- Brückenschaltung 32, 34, 240, 275
- , halbgesteuerte 281
- , spannungsgespeiste 240
- , stromgespeiste 240
- , vollgesteuerte 280
- Buchholz-Relais 156
- Bündelleiter 326
- Bürde 157
- Bürstenfeuer 164
- Bürstenhalter 164
- Bürstenstern 165
- Bürstenverluste 166
- Bulk 99
- Bus 238, 298
- Bussystem 136
- Bus-Topologie 312
- Buszugriff 298
- Buszugriffsverfahren 257
- Byte 296

- CAN-Bus 257, 317  
 Candela 96, 336  
 CE-Konformitätserklärung 252  
 Celsius-Temperatur 22  
 CENELEC 252  
 chip 135  
 CHOP 230  
 CIS-Zelle 95  
 CMOS-Inverter 116  
 CMRR 109  
 Codierer 132  
 COM-Port 299  
 Controller 238  
 Coulomb 11  
 CPLD 135  
 CPU 254, 255  
 CRC-Verfahren 308  
 CRT 228  
 CSMA/CD 313  
 Curie-Temperatur 54  
  
 DAB 296  
 d-Achse 199  
 Dämpferkäfig 193  
 Dämpfung 297  
 Dämpfungsgrad 262  
 Dämpfungskoeffizient 298  
 Dahlander-Schaltung 186  
 Daniell-Element 140  
 Datenbus 237  
 Datenprotokoll 299  
 Datenrate 297  
 Datentelegramm 299  
 Dauerbetrieb 216  
 Dauerkurzschlussstrom 149, 196  
 Dauermagnet 48  
 dB 108  
 DC 230  
 Dehnung 243  
 Dehnungsmessstreifen 243  
 Dekodierer 132  
 De Morgan, Gesetz von 118  
 Dezibel 108  
 D-Flipflop 129  
 Diagonalspannung 240  
 diamagnetisch 53  
 Diaphragma 140  
 Dielektrikum 43  
 Differenz-Eingangsspannung 107  
 Diffusion 93  
 Diffusionsspannung 93  
 Digital-Analog-Wandler 237  
 Digital-Multimeter 235  
 Dimmer 293  
 Diode 91, 94, 268  
 Dipol 46, 308  
 Direkt-Methanol-FC 145  
 Disjunktion 115  
 Dissoziation 137  
 div 228  
 DMFC 145  
 DMS 243  
 Donator 93  
 don't-care-position 119  
 Doppelschlussmotor 172  
 Doppelstabläufer 185  
 Doppelwandler 334  
 Dotierung 13, 93  
 download 136  
 Drahtantenne 308  
 drahtlos 307  
 Drain 98  
 DRAM 131  
 D-Regler 263  
 Dreheisenmesswerk 226  
 Drehfeld, gegenläufiges 191  
 - , mitläufiges 191  
 Drehfelddrehzahl 161  
 Drehfeldmaschine 160  
 Drehmoment, inneres 167, 176  
 - , synchronisierendes 200  
 Drehrichtungswechsel 173  
 Drehspulmesswerk 225  
 Drehstrom 80  
 Drehstrombank 152  
 Drehstromsteller 289  
 Drehstrom-Transformator 146, 152  
 Drehtransformator 189  
 Drehzahlstellung 259  
 Dreieckschaltung 83  
 Dreiecksspannung 83  
 Dreieckstrom 83  
 Dreileiternetz 83, 248  
 Dreiphasensystem 80  
 Drift 241  
 Drossel 76  
 D-Strecke 261  
 Dualzahl 127  
 duplex 295  
 Durchbruchbereich 92  
 Durchflutung 51  
 Durchflutungsgesetz 51  
 Durchgangsleistung 156  
 Durchkontaktierung 134  
 Durchlassbereich 91, 112  
 Durchlassstrom 91  
 DVB 296  
  
 Echt-Effektivwert 235  
 Echtzeit-Ethernet 317  
 EEPROM 131  
 Effektivwert 38  
 Effektivwertzeiger 41  
 Eigenfrequenz 200, 262  
 Eigenkühlung 210  
 Eigenleitfähigkeit 93, 271  
 Eigenwelle 304  
 Eindrahtnachricht 240  
 Einflussgröße 224  
 Eingangs-Offsetspannung 109  
 Eingangs-Offsetstrom 109  
 Eingangs-Ruhestrom 109  
 Einheiten 223, 336  
 Einphasen-Asynchronmotor 191  
 Einphasen-Transformator 146  
 Einpuls-Schaltung 274  
 Einschaltverhältnis 283  
 Eintor 17  
 Eintorgleichung 25  
 Einzelkompensation 324  
 Eisenfüllfaktor 65  
 Eisenkern 154  
 Eisenlinie 179  
 Eisenverluste 66, 147, 148, 166  
 Eisenverlustwiderstand 147  
 elektrisch 11  
 Elektrizitätszähler 237  
 Elektrolech 54, 65  
 Elektrode 43, 137  
 Elektrolyse 139  
 Elektrolyt 137  
 Elektrolytkondensator 89  
 Elektrolytkupfer 139  
 Elektromagnet 48, 66  
 Elektrometer 236  
 Elektronengas 12  
 Elektronikmotor 206  
 Elementarladung 11, 342  
 embedded controller 255  
 EMC 252  
 Emitter 100

- Emitterschaltung 106  
 Empfänger 300  
 Empfindlichkeit 232, 243  
 EMV 252, 294  
 EMV-Gesetz 252  
 Endwert 47, 63  
 Energie des Kondensators 45  
 Energie, magnetische 62  
 - , thermische 19  
 Energie-Ausnutzungsfaktor 143  
 Energiemessung 249  
 Entladung, elektrostatische 135  
 EOI 240  
 EPROM 131  
 Erder 328  
 Erdseil 326  
 Erregerstrom 163  
 Erregung 160  
 Ersatzgrößen 245  
 Ersatzzeitwert 28, 79  
 Ersatzquelle 32, 33  
 Ersatz-Reihenwiderstand 89  
 Ersatzwiderstand 28, 31, 32, 79  
 Erwärmung 210  
 Erzeuger 16  
 ESD 135  
 ESR 89  
 Ethernet 312  
 - , drahtloses 314  
 eV 93  
 Exklusiv-ODER 128  
 Explosionsschutz 214  
  
 FAN 316  
 Farad 43  
 Faraday-Konstante 138  
 Faradaysche Gesetze 138  
 Farbcode 86  
 Fast Ethernet 311  
 FC 144  
 Fehler 224, 228  
 Fehlerstrom-Schutzschalter 331  
 Feld, elektrisches 42  
 - , homogenes 42, 49  
 - , inhomogenes 43  
 - , magnetisches 48  
 Feldbus 256, 316  
 Feldebene 256  
 Feldeffekttransistor 96  
 Feldkonstante, elektrische 44, 342  
 - , magnetische 50, 342  
  
 Feldlinien 42, 48  
 Feldstärke, elektrische 20, 42  
 - , magnetische 50  
 Feldverluste 166  
 Feldwicklung 163  
 Fenster, optisches 305  
 ferromagnetisch 53  
 Festwertregelung 260  
 FET 98  
 FFT 246  
 Filter 112  
 - , aktive 112  
 FI-Schutzschalter 331  
 Flash-Converter 234  
 Flipflop 120  
 - , getaktetes 121  
 - , taktflankengesteuertes 122  
 - , taktzustandgesteuertes 122  
 Flüssigkristallelement 132  
 Fluss, magnetischer 50  
 Flussdichte, elektrische 44  
 - , magnetische 50  
 Flussteuerung 259  
 Folgeregulierung 260  
 Formfaktor 40  
 Fourier-Reihe 246  
 FPGA 136  
 Freilaufdiode 271, 283  
 Freilaufzweig 281  
 Freileitung 325  
 Freiraumausbreitung 310  
 Fremdinduktion 61  
 Fremdkühlung 210  
 Frequenz 37  
 frequenzkompensiert 230  
 Frequenzteiler 126  
 - , asynchroner 127  
 - , synchroner 127  
 Frequenzumrichter 269, 270, 286  
 Frequenzumtastung 297  
 Frequenzwandler 190  
 FTP 316  
 Führungsgröße 260  
 fullcustom IC 135  
 Fundamenterder 328  
 Funkkanal 307  
 Funktion 258  
 Funktionsbaustein 258  
 Funkuhr 251  
  
 Gage-Faktor 243  
 Galvanisches Bad 138  
 Galvanisches Element 139, 140  
 Galvanoplastik 138  
 Galvanostegie 138  
 Galvanotechnik 138  
 GaN 269  
 Garantiefahrgrenze 224  
 Gate 98, 271  
 Gatter 115  
 Gegenkopplung 109  
 Gegenstrombremsung 173, 190  
 Genauigkeit 224  
 Genauigkeitsklasse 223  
 Generation 93  
 Generator 160  
 Generatorbetrieb 190  
 gesättigt 53  
 Gesetz, assoziatives 118  
 - , distributives 118  
 - , kommutatives 118  
 - von De Morgan 118  
 gesteuert 275  
 Getriebemotor 221  
 Gießharztransformator 156  
 Gigabit Ethernet 311  
 Glättung 276  
 Glättungsrossel 277  
 Gleichanalyse 102  
 Gleichfeldmaschine 160  
 Gleichpolmotor 209  
 Gleichrichten 270  
 Gleichrichtung 37  
 Gleichrichtwert 38  
 Gleichspannung 13  
 Gleichspannungsverstärker 108  
 Gleichspannungs-Zwischenkr. 282  
 Gleichstrom 14  
 Gleichstrombremsung 190  
 Gleichstrommagnet 66  
 Gleichstrommaschine 163  
 Gleichstromsteller 282  
 Gleichstromumrichten 270  
 Gleichtaktunterdrückung 109  
 Gleichwert 37  
 GND 230  
 GPIB 238  
 Gradientenprofil 304  
 Grenzfrequenz 112  
 Großsignalanalyse 104  
 Grundeintore 69

- Grundgatter 116  
 Grundlast 321  
 Grundschiwingung 246  
 Grundverknüpfung 115  
 Gruppenkompensation 324  
 GuD 320  
  
 Halbaddierer 128  
 Halbbrücke 241  
 Halbelement 140  
 Halbleiter 13, 92  
 Halbleiter-Temperatursensor 244  
 Halbschrittbetrieb 208  
 Hall-Effekt 68  
 Hall-Generator 68  
 Hall-Spannung 68  
 Halteglied 258  
 Handshakebus 239  
 Hauptfeld 167  
 Hauptfeldspannung 148  
 Hauptfluss 147  
 Hauptpol 163  
 Hauptpotenzialausgleich 331  
 Hauptreaktanztanz 147  
 HCS 305  
 Henry 56, 61  
 Hertz 37  
 Heterodiode 97  
 Heylandkreis 178  
 HGÜ 326  
 HIGH 133  
 Hochpass 113  
 Hochsetzsteller 282  
 Hochspannung 322  
 Hochstab 185  
 Hochtemperatur-Supraleiter 23  
 Hornstrahler 308  
 Host-Controller 314  
 HP-IB 238  
 HTS 23  
 HTTP 316  
 hub 313  
 Hysteresemotor 208  
 Hystereseschleife 54  
 Hystereseverluste 65  
  
 IC 47, 64, 103, 107, 132  
 IEC 238, 252  
 IEC-Bus 238  
 IEEE 238, 309  
 IFC 240  
  
 IGBT 269, 273  
 IGFET 98  
 Impedanz 70  
 Induktion 58  
 Induktion bei Drehbewegung 60  
 Induktion bei ruhender Spule 60  
 Induktionsgesetz 58  
 Induktionsmesswerk 227  
 Induktionsschleife 255  
 Induktivität 61  
 Induktor 160  
 Industrial-Ethernet 314  
 Industrie-PC 254  
 Innenleitwert 24  
 Innenwiderstand 24  
 Inselbetrieb 196  
 Integrierer 111  
 Intensitätsmodulation 306  
 INTERBUS 257, 317  
 Internet-Protokoll 314  
 Ion 12, 137  
 ionisiert 12  
 IP 214, 314  
 IPC 254  
 I-Regler 263  
 i-Schicht 271  
 ISDN-Anschluss 301  
 Isolator 12, 92  
 Isolierschicht-FET 99  
 Isolierstoffklasse 210  
 Isthmus 207  
 I-Strecke 261  
 Ist-Zustand 253  
  
 JFET 98  
 JK-Flipflop 122  
  
 Kabel 295, 326  
 Käfigläufer 183  
 Kalander 215  
 Kaltleiter 22  
 Kanal 98  
 Kanalcodierung 296  
 Kapazität 43, 143  
 Kappsches Dreieck 150  
 Kathode 93, 137  
 Kationen 137  
 Keilstab 185  
 Kern 304  
  
 Kernkräfte 11  
 Kerntyp 154  
 Kippmoment 178, 198  
 Kippschaltung, monostabile 124  
 Kippschlupf 178  
 Kirchhoffscher Satz 27, 30  
 Kleinmotor 204  
 Kleinsignalanalyse 104  
 Kleintransformator 146, 158  
 Klirrfaktor 246  
 Knopfzelle 141  
 Knoten 27  
 Knotenpotenzialverfahren 35  
 Knotensatz 27, 78  
 Knotenspannung 35  
 Körper 330  
 Körperschluss 330  
 Koerzitivfeldstärke 54  
 Kohlebürsten 164  
 Kollektor 100  
 Kollision 312  
 Kommutator 163  
 Kommutierung 166, 278  
 Kommutierungsdrossel 277  
 Kommutierungsspannung 278  
 Komparator 123  
 Kompensation 109, 323  
 Kompensationswicklung 169  
 Komplement 129  
 Kondensator 43  
 Konformitätserklärung 252  
 konjugiert komplexer Strom 75  
 Konjunktion 115  
 Korrosion 145  
 Kraft auf eine Ladung 68  
 Kraft auf Leiter 68  
 Kraftmessdose 243  
 Kraftsensor 243  
 Kraft-Wärme-Kopplung 321  
 Kraftwerk 319  
 Kreisfrequenz 39  
 Kreisring-spule 52  
 Kreiszahl 342  
 Kryolith 139  
 Kühler, thermoelektrischer 92  
 Kühlung 210  
 Kupferverluste 147, 150, 175, 175  
 Kurzschluss 23  
 Kurzschlussläufer-Motor 183  
 Kurzschlussreaktanztanz 149

- Kurzschlussspannung 149  
 Kurzschlussstrom 23  
 Kurzschlussverluste 150  
 Kurzschlussversuch 181  
 Kurzstatormotor 202  
 Kurzzeitbetrieb 217  
 Kusa-Schaltung 294
- Ladung 11  
 Läufer 160  
 Läufereschiene 202  
 Läuferstillstandspannung 175  
 Lagerschild 165  
 Lamelle 163  
 LAN 296, 304, 312  
 Langstabilisator 325  
 Langstatormotor 203  
 LASER-Betrieb 306  
 LASER-Diode 303  
 Last, symmetrische 248  
 Laufzeitverzögerung 126, 133  
 Lawinen-Photodiode 306  
 LCD 132  
 LED 96, 132, 303  
 Leerlaufspannung 23  
 Leerlaufstrom 148  
 Leerlaufverluste 148  
 Leerlaufversuch 180  
 Leistung, innere 166, 175  
 -, natürliche 326  
 -, mechanische 176  
 Leistungselektronik 269  
 Leistungsfaktor 73  
 Leistungshalbleiter 270  
 Leistungsmessung 247  
 Leistungsschild 214  
 Leistungsschwingung 72  
 Leistungstransformator 146  
 Leiter 12  
 -, linearer 20  
 Leiterbahnenflechtung 134  
 Leiterplatte 134  
 Leitfähigkeit 20  
 Leitung 295  
 Leitungsband 94  
 Leitungsschutzschalter 328  
 Leitungsschutzsicherung 327  
 Leitwert, elektrischer 20  
 -, komplexer 70  
 -, magnetischer 56  
 Lenzsches Gesetz 59
- Lesen 129  
 Leuchtdiode 96, 132, 303  
 Lichtausbeute 97  
 Lichtgeschwindigkeit 342  
 Lichtmaschine 18, 273  
 Lichtstärke 96  
 Lichtstrom 96  
 Lichtwellenleiter 303  
 Linearmotor 202  
 Linkslauf 163  
 Listener 238  
 Lithium-Iod-Batterie 141  
 Lithium-Ionen-Akku 144  
 Loch 93  
 Lötauge 134  
 Logikfamilie 133  
 Logikpegel 133  
 Lokalelement 145  
 Lorentzkraft 68  
 Losbrechmoment 215  
 LOW 133  
 Luftspalt 57, 160  
 Luftspaltleistung 175  
 Luftspaltlinie 178  
 Lumen 96  
 Lumineszenzdiode 96, 132  
 Lux 96
- M3C 278  
 MAC-Adresse 312  
 Magnet 48  
 magnetisch hart 54  
 magnetisch weich 54  
 Magnetisierungskurve 54  
 Magnetisierungsstrom 147  
 Magnetläufermotor 208  
 Magnetostriktion 54  
 Magnetventil 256  
 Mantel 304  
 Manteltyp 154  
 Masche 29  
 Maschengleichung 29  
 Maschensatz 30, 78  
 Maschinentransformator 152  
 Masse 31  
 -, molare 138  
 Master 257  
 Master-Slave-Flipflop 122  
 Master-Slave-Prinzip 317, 318  
 Maxwell-Wien-Brücke 250
- memory-Effekt 144  
 Messbrücke 240  
 Messgerät, elektrodynamisches 227  
 Messverfahren 223  
 Messwandler 157  
 Messwert 223  
 Methan 320  
 Mikanit 164  
 Mikroprozessor 254  
 Millmotor 169  
 Minterm 119  
 Mischspannung 37  
 Mischstrom 37  
 Mitkopplung 109  
 Mittellast 321  
 Mittelspannung 152, 321  
 Mittelpunktsschaltung 275, 280  
 MK-Kondensator 89  
 Modell 12  
 MODEM 130, 301  
 Monoflop 124, 125  
 Monomode-LWL 304  
 Monopol 308  
 MOSFET 98, 272  
 Motor 160  
 -, fremderregter 171  
 Motorvollschutz 213  
 MP-Kondensator 88  
 MPP 96  
 Multi-Master-System 257  
 Multimeter 226  
 Multimode-LWL 304  
 Multitasking 257  
 Multivibrator, astabiler 125
- naheilen 39  
 Näherungssensor 255  
 NAND-Gatter 117  
 Nebenschlusskennlinie 170  
 Nebenschlussmotor 169  
 Nebenwiderstand 225  
 Negation 115  
 Negativlogik 134  
 Nennleistung 150  
 Nennspannung 148  
 Nennwirkungsgrad 151  
 Netz 35  
 -, lokales 299, 307, 312  
 Netzdiode 271  
 Netzwerk 35  
 Netzwerkanalyse 35, 101

- Neukurve 53  
 Neutralleiter 81  
 Neutralleiterstrom 82  
 Nichtleiter 12  
 NICHT-Verknüpfung 115  
 Nickel-Cadmium-Akku 143  
 Nickel-MH-Akku 144  
 Niederspannung 152, 321  
 NIGFET 98  
 n-Leiter 93  
 NMOS-Transistor 99  
 Nordpol 48  
 Normalform, disjunktive 119  
 Normalzuordnung 134  
 Norton-Theorem 32  
 NTC-Widerstand 88  
 Nullphasenwinkel 39  
 Nullzustand 284, 287  
 Nur-Lese-Speicher 131  
 Nutzbremmung 173  
  
 Oberflächenerder 328  
 oberflächenmontiert 134  
 Oberschwingung 246  
 Oberspannungswicklung 146  
 ODER-Verknüpfung 113  
 Öffner 254  
 Offshore-Windpark 320  
 Ohm 19  
 Ohmscher Widerstand 20, 86  
 Ohmsches Gesetz 20  
 Operationsverstärker 107  
 -, kompensierter 109  
 -, realer 109  
 Optokoppler 256  
 Ortskurve 79  
 OSI-Modell 312  
 Oszillator, digitaler 125  
 Oszilloskop 228  
 Oxidation 139  
  
 PAFC 145  
 PAL 136  
 PAM 289  
 PAN 318  
 Parallelbetrieb 153  
 Parallelregister 129  
 Parallelresonanz 78  
 Parallelschaltung 28, 77  
 Parallel-Serien-Wandlung 130  
 Parallelwicklung 156  
 paramagnetisch 53  
  
 PARAM 103  
 Parameter 102  
 Paritätsbit 299  
 PCB 134  
 PCS 305  
 PE 332  
 Peltier-Effekt 90  
 PEM-FC 144  
 PEN-Leiter 332  
 Pendelmoment 208  
 Pendelungen 201  
 Periodendauer 37  
 periodisch 37  
 periodischer Fall 262  
 Permeabilität 52  
 Permeabilitätszahl 52  
 Permittivität 44  
 Permittivitätszahl 44  
 P-Form 41  
 Phasenanschnittsteuerung 277  
 Phasenspektrum 246  
 Phasenverschiebungswinkel 39  
 phasenverschoben 39  
 Phasenwinkel 39  
 Photodiode 303  
 PID-Regler 263, 267  
 piezoelektrischer Effekt 125  
 Piezowandler 256  
 pin-Diode 271  
 pin-Photodiode 306  
 Planartechnik 135  
 Plattenkondensator 43  
 PLD 135  
 p-Leiter 93  
 PM-DC-Motor 205  
 -, bürstenloser 206  
 PM-Motor 209  
 PMOS-Transistor 99  
 P-NET 256  
 pn-Übergang 93  
 POF 305  
 Pol 17, 48  
 Polarisierung 309  
 Polarisationsverluste 48  
 Polkern 165  
 Polpaarzahl 160  
 Polrad 193  
 Polradspannung 195  
 Polradwinkel 197  
 Polschuh 165  
 Positivlogik 134  
  
 Potenziometer 87  
 Potenzial 30  
 Präambel 311  
 P-Regler 263  
 Primärelement 140  
 Primärenergie 319  
 Primärspannung 146  
 Primärwicklung 146  
 Probe 101  
 PROFIBUS 256, 317  
 programmierbare Logik 135  
 PROM 131  
 Proportionalstrecke 261  
 Prozess 253  
 PSpice 101  
 P-Strecke 261  
 P-T<sub>1</sub>-Strecke 261  
 P-T<sub>2</sub>-Strecke 262  
 PTB 237, 251  
 PTC-Widerstand 87  
 Puls-Amplituden-Modulation 289  
 Pulsmuster 289  
 Pulsstromrichter 289  
 Pulsweite 283  
 Puls-Weiten-Modulation 282, 289  
 Pulszahl 275  
 Punkt maximaler Leistung 96  
 Punkt-zu-Punkt-Verbindung 298  
 PWM 282, 289  
  
 q-Achse 199  
 Quantisierungsfehler 232  
 Quarz 125  
 Quelle 15, 23  
 -, lineare 24  
 Quellenspannung 24  
 Quellenstrom 24  
  
 RAM 131  
 Raumwinkel 96  
 Raumzeiger 290  
 Raumzeiger-Modulation 289  
 Reaktionsmoment 193, 199  
 Reaktanz 70  
 -, synchrone 195  
 Rechtslauf 163  
 Redoxreaktion 139  
 Reduktion 139  
 Redundanz 115  
 Referenz-Spannungsquelle 234

- Reflektorantenne 308  
 Regeldifferenz 260  
 Regeleinrichtung 260  
 Regelgröße 260  
 Regelkreis 260  
 Regelstrecke 260  
 Regelung 253  
 Register 129  
 Regler 260  
 - , differenzierender 263  
 - , integrierender 263  
 - , proportional wirkender 263  
 - , stetiger 263  
 Reibungselektrizität 135  
 Reibungsverluste 166  
 Reihenresonanz 76  
 Reihenschaltung 31, 75  
 Reihenschlussmotor 171  
 Reihenschaltung 156  
 Rekombination 95  
 Relais 254  
 Reluktanzmotor 200, 208  
 Remanenzflussdichte 53  
 REN 240  
 Resolver 242  
 Resonanzfrequenz 76, 78  
 Resonanzüberhöhung 76, 78  
 R-Form 41  
 Richtdiagramm 308  
 Richtungssinn 13, 15  
 Ringzähler 130  
 RMS 38  
 ROM 131  
 - , programmierbares 131  
 Rost 145  
 Rotor 160  
 RS-232-Schnittstelle 131, 299  
 RS-422-Schnittstelle 301  
 RS-485-Schnittstelle 131, 302  
 RS-Flipflop 120  
 Rückkopplung 109  
 Rückstellmoment 200  
 Rundfeuer 168  
 Rundstab 185  
  
 Sättigung 53  
 Sattelmoment 219  
 Schaltalgebra 117  
 Schaltgruppe 152  
 Schalthysterese 124  
 Schaltnetz 120  
 Schaltperiode 283  
 Schaltung, analoge 105  
 - , integrierte 107, 132, 134  
 - , zweiwertige 115  
 Schaltwerk 120  
 Scheibenläufer-Motor 206  
 Scheinleistung 72  
 Scheinleitwert 70  
 Scheinwiderstand 70  
 Scheitelwert 37  
 Schematics 101  
 Schenkelpolmaschine 193  
 Schicht 315  
 Schieberegister 130  
 Schleifringläufer-Motor 187  
 Schließer 254  
 Schlupf 174  
 Schmitt-Trigger 124  
 Schnittstelle 295  
 Schottky-Diode 95  
 Schreiben 129  
 Schrittmotor 208  
 Schrittspannung 328  
 Schrittwinkel 208  
 Schütz 254  
 Schutz  
 - , bei indirektem Berühren 329  
 - , gegen direktes Berühren 329  
 Schutzart 214  
 Schutzisolierung 333  
 Schutzkleinspannung 330  
 Schutzleiter 332  
 Schutzschicht 304  
 Schutztrennung 333  
 Schweißtransformator 158  
 Schwellenspannung 99  
 Schwingung 37  
 - , nullphasige 39  
 Schwingungsbreite 37  
 Schwingungszustand 80  
 Schwungmoment 218  
 Seebeck-Effekt 90  
 Seebeck-Koeffizient 90  
 Sekundärelement 142  
 Sekundärspannung 146  
 Sekundärwicklung 146  
 Selbsthaltung 213  
 Selbstinduktion 61  
 Selbstinduktivität 61  
 Selbstkühlung 210  
 Selektivität 328  
 SE-Magnete 202  
 semicustom IC 135  
 Sender 300  
 Sensor 223, 241 ff.  
 - , induktiver 242  
 - , kapazitiver 242  
 - , potenziometrischer 241  
 Servomotor 207, 256  
 SHE 140  
 shunt 225  
 SI 223  
 SiC 269  
 Sicherung 327  
 Siemens 20  
 Signal 106, 297  
 Signalverzerrung 297  
 Silberoxid-Zink-Batterie 141  
 Silikatglas 305  
 Silizium 92  
 simplex 295  
 Simulation, rechnergestützte 101  
 Sinusanalyse 104  
 Sinusgröße 39  
 Sinusspannung 39  
 Sinusstrom 39  
 Six-Pack 274  
 Skalar 13  
 Slave 257  
 slew rate 109  
 SMD 134  
 SMTP 316  
 Solarmodul 95  
 Solarzelle 94  
 Soll-Zustand 253  
 Source 96  
 Spaltpolmotor 207  
 Spannung, elektrische 13  
 - , magnetische 56  
 - , wiederkehrende 89  
 Spannungsänderung 150  
 Spannungsebene 322  
 Spannungseisen 228  
 Spannungsfall 29  
 Spannungsfolger 111  
 Spannungs-Frequenz-Betrieb 288  
 Spannungspfad 227  
 Spannungsquelle 24  
 - , spannungsgesteuerte 266  
 Spannungsreihe, elektrochemische 140

- Spannungsstabilisierung 105  
 Spannungssteuerung 259  
 Spannungsteiler 87  
 Spannungsteilerregel 31  
 Spannungs-Übertragungsfaktor 108  
 Spannungswandler 157  
 Spannungszustand 284  
 Spartransformator 156  
 Speicher mit beliebig. Zugriff 131  
 speicherprogrammierbar 254  
 Spektrum 246  
 Spektrumanalysator 246  
 Sperrbereich 91, 112  
 Sperrschicht 93  
 Sperrschicht-FET 98  
 Sperrstrom 91  
 Sperrverzugszeit 271  
 SPICE 101  
 Spitzenlast 321  
 Spitze-Spitze-Wert 37  
 Sprungantwort 261  
 Sprungtemperatur 23  
 SPS 254  
 Spule 51  
 SR 109  
 SRAM 131  
 SRQ 240  
 Stabilisierungsschaltung 105  
 Stabilität 268  
 -, statische 221  
 Ständer 160  
 Ständeranlasser 184  
 Standard-Wasserstoffelektrode 140  
 Standby-USV 334  
 Startbit 299  
 Startwort 311  
 Stator 160  
 Stauchung 243  
 Steg 163  
 Stegspannung 168  
 Stellen 270  
 Stellgröße 260  
 Stelltransformator 157, 322  
 Step-lap-Schichtung 154  
 Steradian 96  
 Stern-Baum-Topologie 313  
 Stern-Dreieck-Schalter 184  
 Sternschaltung 81  
 Sternspannung 81  
 Sternstrom 82  
 Steuerbus 240  
 Steuerkennlinie 280, 293  
 Steuerung 253  
 Steuerwinkel 277  
 Störabstand 133  
 Störquelle 252  
 Störsenke 252  
 Stoffmenge 138  
 Stoppbit 299  
 Stoßkurzschlussstrom 149, 196  
 Strang 81  
 Strangspannung 81  
 Streufaktor 58  
 Streufluss 58, 147  
 Streureaktanz 147  
 Strom 14  
 Stromdichte 20  
 Stromeisen 228  
 Stromkreis 15  
 Strommesszange 245  
 Strompfad 227  
 Stromquelle 24  
 Stromrichter 269  
 -, maschinengeführter 268  
 -, netzgeführter 268, 275  
 -, selbstgeführter 268, 280  
 Stromrippel 284  
 Strom-Spannung-Wandler 110  
 Stromstabilisierung 106  
 Stromstärke 14  
 Stromteilerregel 29  
 Stromverdrängung 185  
 Stromwärmeverluste 147  
 Stromwandler 157  
 Stromwender 163  
 Stromwendung 165  
 Stufenprofil 304  
 Subtraktion von Dualzahlen 129  
 Südpol 48  
 Sulfatisierung 142  
 Summenrahmen 317  
 Summierer 111  
 Supraleiter 23  
 Supraleitung 23  
 Switch 313  
 Symbol 296  
 -, komplexes 41  
 symmetrisch 80  
 Synchrondrehzahl 161  
 Synchronisierung 201  
 Synchronmaschine 193  
 System-Multimeter 236  
 Tagesbelastungskurve 321  
 Takt 121  
 Talker 238  
 Task 257  
 Tastkopf 231  
 Tauchkernsensor 242  
 TCP/IP-Protokoll 314  
 TEC 92  
 Teile, aktive 330  
 TelNet 316  
 Temperaturkoeffizient 22  
 Temperatursensor 244  
 Tesla 50  
 Textur 56  
 T-Flipflop 126  
 Thermistor 87  
 Thermoelement 90  
 Thermospannung 90  
 Thévenin-Theorem 32  
 Thyristor 271  
 Tiefenerder 329  
 Tiefnutläufer 185  
 Tiefpass 112  
 Tiefsetzsteller 282  
 TN-Netz 332  
 Toggle 123  
 Tonerde 139  
 Tor 17  
 Totzeit 261  
 Trägheitsmoment 218  
 Trägheitsradius 218  
 Tragmast 325  
 Transformator 146  
 -, idealisierter 146  
 -, realer 147  
 Transientanalyse 103  
 Transistor 98  
 Transitfrequenz 108  
 Transrapid 203  
 Transversalflussmotor 222  
 Treiberstufe 132  
 triggern 122  
 TTL-Technik 134  
 TT-Netz 333  
 Trockenelement 141  
 Turbogenerator 194  
 Twisted-Pair-Kabel 301  
 Typenleistung 156

- UART 300  
 übererregt 199  
 Übergabebus 239  
 Übergangsvorgang 63  
 Überlagerungssatz 34  
 Überlastbarkeit 178, 198  
 Überlastrelais 212  
 Überschwingsweite 263  
 Übersetzungsverhältnis 146, 256  
 übersteuert 108  
 Übertemperatur 211  
 Übertrag 128  
 Übertragung, asynchrone 300  
 -, synchrone 301  
 Übertragungsfunktion 260  
 $U/f$ -Betrieb 288  
 Ultra-Kondensator 89  
 Umlaufsinn 29  
 Umrichter 270  
 UND-Verknüpfung 113  
 ungünstigster Betriebsfall 133  
 Universalmotor 204  
 Unsicherheit 224  
 untererregt 199  
 Unterspannungswicklung 146  
 USB 296, 317  
 USV 334
- V-24-Schnittstelle 131  
 Valenzband 92  
 Valenzelektronen 12  
 Variable, logische 115  
 Varistor 88  
 VDR 88  
 Vektor 13  
 Verarmungs-MOSFET 99  
 verbindungsprogrammiert 254  
 verbotener Bereich 133  
 Verbraucher 16  
 Verbundseil 325  
 Verkettungsfluss 59  
 Verknüpfung, logische 115  
 Verlustfaktor 77  
 Verlustlinie 178  
 Verschiebungsdichte 44  
 Versorzeichen 41  
 Verstärker 106  
 -, invertierender 110  
 -, nicht invertierender 110  
 Verträglichkeit, elektromagnet. 252  
 Verzögerungs-Flipflop 129  
 Verzögerungsstrecke 261
- Verzögerungszeit 124  
 Verzweigungspunkt 26  
 Vielfachmessgerät 226  
 Vier-Leitermessung 236  
 Vierleiternetz 85, 248  
 Vierquadrantenbetrieb 163, 279, 289  
 Vier-Quadranten-Steller 283  
 Viertelbrücke 241  
 Volladdierer 128  
 Vollaussteuerung 280  
 Vollbrücke 241  
 Vollpolmaschine 193  
 Vollschriftbetrieb 208  
 Volt 13  
 Voltmeter 14  
 voreilen 39  
 Vorwärtsspannung 272  
 Vorwiderstand 226  
 VR-Motor 208
- Wärmeenergie 19  
 Wärmekapazität 19  
 wafer 135  
 Wahrheitstabelle 115  
 Wanderfeld 202  
 Watt 17  
 Weber 50  
 Wechselfeldmaschine 160  
 Wechselgröße 37  
 Wechsellpol-Schrittmotor 209  
 Wechselrichten 270  
 Wechselrichter 280  
 Wechselspannung 37  
 Wechselstrom 37  
 Wechselstrommagnet 67  
 Wechselstromsteller 290  
 Wechselstromumrichten 270  
 Weißsche Bezirke 53  
 Wellenlänge 303  
 Wellenlängenmultiplex 307  
 Wellenwiderstand 302  
 Welligkeit 275  
 Wendepol 168  
 Wendeschutzschaltung 258  
 Wert, abgelesener 224  
 Wertigkeit 138  
 Wickelkondensator 89  
 Wicklung 155  
 Widerstand 19, 86  
 -, einstellbarer 86  
 -, komplexer 70
- , magnetischer 56  
 -, nichtlinearer 21  
 -, ohmscher 20  
 -, spannungsabhängiger 88  
 -, spezifischer 21  
 -, temperaturabhängiger 22  
 Widerstandsbremung 173  
 Widerstandsmoment 215  
 Widerstandsthermometer 244  
 Wien-Brücke 250  
 Wirbelströme 64  
 Wirbelstrombremse 65  
 Wirkarbeit 73  
 Wirkleistung 38  
 Wirkleitwert 70  
 Wirkwiderstand 70  
 Wirkungen des Stromes 14  
 Wirkungsgrad 18  
 worst case 133  
 Wort 130
- x-y-Betrieb 229
- Yagi-Antenne 309
- Z-Diode 95  
 Zähler 127  
 Zeiger 40  
 Zeitablenkung 229  
 Zeitbereich 103  
 zeitinvariant 260  
 Zeitkonstante 47, 63  
 Zeitmessung 251  
 Zeitzeichensender 251  
 Zickzackschaltung 152  
 Zink-Braunstein-Batterie 141  
 Zone, indifferente 48  
 -, neutrale 165  
 Zündimpuls 271  
 Zündschutzart 214  
 Zündzeitpunkt, natürlicher 277  
 Zustand 258  
 Zweig 28  
 Zwei-Leitermessung 236  
 Zweipol 17  
 Zweirampenumsetzer 232  
 Zweispeicherflipflop 122  
 Zweitor 87  
 Zylinderspule 51