

# HANSER



## Leseprobe

zu

## „Elektrotechnik für Ingenieure“

von Rainer Ose

Print-ISBN: 978-3-446-46408-7  
E-Book-ISBN: 978-3-446-46535-0

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-46408-7>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

---

## Vorwort zur 6. Auflage

Das vorliegende Lehrbuch gliedert sich in die drei klassischen Grundlagenbereiche: Gleichstromlehre – Wechselstromtechnik – Elektrische und magnetische Felder.

Es ist als studienbegleitendes Material für Studierende aller technischen Studienrichtungen an Hochschulen/Fachhochschulen konzipiert. Im Vordergrund stehen Betrachtungen zu Vorgängen in elektrischen Stromkreisen aus der Sicht der Schaltungstechnik. Damit wird das Ziel verfolgt, das in den Vorlesungen „Grundlagen der Elektrotechnik“ vermittelte Grundlagenwissen in anwendungsbereiter Form für die nachfolgenden Lehrveranstaltungen bereitzustellen.

Die theoretischen Grundlagen werden zu jedem Kapitel so dargelegt, dass die Studierenden die Vorlesungsmitschrift und den eventuell versäumten Stoff in effektiver Form selbstständig aufarbeiten können. Dazu dienen u.a. Modelle und Analogien, die komplizierte Sachverhalte in möglichst einfacher und leicht verständlicher Form darlegen sollen. Zur Erhöhung der Anschaulichkeit wurden viele Aussagen zusätzlich aus Diagrammen, Prinzipskizzen und Ersatzschaltungen abgeleitet.

In jedem Kapitel befinden sich Lehrbeispiele zur Erklärung typischer Erscheinungen der Elektrotechnik sowie zur Demonstration von Berechnungsmethoden und -verfahren. Soweit sie nicht die Größenordnung eines dargelegten Sachverhalts verdeutlichen sollen, sind diese Lehrbeispiele in allgemeiner Form ausgeführt. Damit gelingt es den Anwendern, den Lösungsweg schrittweise nachzuvollziehen.

Die 6. Auflage entstand durch eine vollständige Überarbeitung und Erweiterung der 5. Auflage des Lehrbuchs. Alle Berechnungsbeispiele befinden sich jetzt in erweiterter Form in einem neu aufgelegten Übungsbuch. Die 6. Auflage enthält einen Anhang mit Übungsaufgaben und eine separate Formelsammlung. Alle Lösungen der Übungsaufgaben sind über das Internet zugänglich.

Wolfenbüttel, im August 2020

Rainer Ose  
e-mail: [r.ose@ostfalia.de](mailto:r.ose@ostfalia.de)

## Hinweise zur Arbeit mit diesem Buch

Das vorliegende Lehrbuch sollte in Kombination mit dem Übungsbuch bearbeitet werden. Aus diesem Grund wurden zahlreiche Lehrbeispiele in das Lehrbuch und zusätzliche Übungsanteile in das neue Übungsbuch eingearbeitet. Machen Sie sich zunächst mit den theoretischen Grundlagen vertraut. Parallel dazu können Sie die Lehrbeispiele (Lehrbuch) und die Berechnungsbeispiele (Übungsbuch) durcharbeiten. Diese Beispiele tragen zur Erhöhung des Verständnisses für die betrachteten Stoffgebiete bei. Das gilt auch für die selbstständige Bearbeitung der Übungsaufgaben im Anhang.

### • Lehrbeispiele:

Lehrbeispiele dienen dazu, das grundlegende Verständnis für den jeweils dargelegten Sachverhalt an einem einfachen und überschaubaren Beispiel zu entwickeln bzw. zu festigen. Sie werden im laufenden Text an den Stellen eingefügt, an denen es eventuell zusätzlichen Erklärungsbedarf gibt. Dazu zählen das Aufstellen allgemeiner Lösungsansätze und die Durchführung einfacher Berechnungen sowie die Vermittlung von Vorstellungen über ausgewählte Erscheinungen der Elektrotechnik.

### • Übungsaufgaben: (Lösungen: [https://www.ostfalia.de/cms/de/pws/ose/Buch\\_ET\\_6A/](https://www.ostfalia.de/cms/de/pws/ose/Buch_ET_6A/))

Im Anhang des Buches befinden sich Übungsaufgaben. Sie sollen von dem Studierenden möglichst selbstständig abgearbeitet werden. Übungsaufgaben werden im Sinne einer zielgerichteten Prüfungsvorbereitung mit der folgenden Kennzeichnung dem jeweiligen Grundlagenbereich zugeordnet:

ÜA\_1 = Gleichstromlehre, ÜA\_2 = Wechselstromtechnik und ÜA\_3 = Felder.

Die meisten Beispiele und Übungsaufgaben können mit Simulationsprogrammen nachvollzogen werden. Entsprechende Hinweise zur Arbeit mit PSpice findet man bei Bedarf in [11] – Kap. 1.

---

# Inhaltsverzeichnis

## I Gleichstromlehre

<b>1</b>	<b>Elektrische Grundgrößen</b>	<b>12</b>
1.1	Elektrische Ladung	12
1.2	Elektrische Stromstärke	13
1.3	Elektrische Spannung	16
1.4	Elektrischer Gleichstromkreis	17
1.5	Widerstände im elektrischen Stromkreis	20
1.5.1	Bemessungsgleichung	20
1.5.2	Temperaturabhängigkeit	21
1.5.3	Technische Ausführungsformen	22
<b>2</b>	<b>Gesetze zur Berechnung elektrischer Stromkreise</b>	<b>23</b>
2.1	Das OHMSche Gesetz	23
2.2	Die KIRCHHOFFSchen Sätze	26
2.2.1	Maschensatz	26
2.2.2	Knotenpunktsatz	27
2.3	Energiesatz	28
<b>3</b>	<b>Lineare elektrische Gleichstromkreise</b>	<b>31</b>
3.1	Eigenschaften elektrischer Stromkreise	31
3.2	Regeln zur Berechnung passiver Zweipole	33
3.2.1	Reihenschaltung und Spannungsteilerregel	33
3.2.2	Parallelschaltung und Stromteilerregel	35
3.3	Berechnung passiver Zweipole	38
3.4	Elektrische Quellen	40
3.5	Lastfälle im Grundstromkreis	44
3.5.1	Leistung und Wirkungsgrad	44
3.5.2	Anpassungsfall	45
3.5.3	Diskussion von Lastfällen	47
3.5.4	Belasteter Spannungsteiler	49
<b>4</b>	<b>Grundsaltungen der elektrischen Messtechnik</b>	<b>52</b>
4.1	Messbereichserweiterung	52
4.2	Aufnahme von Kennlinien	54
4.2.1	Stromrichtige Messung	54
4.2.2	Spannungsrichtige Messung	55
4.3	Messgeräte mit Nullindikator	56
4.4	Allgemeine Berechnung von Brückenschaltungen	59
4.4.1	Allgemeine Umrechnung in eine Sternschaltung	59

4.4.2	Dreieck-Stern-Transformation .....	61
4.4.3	Stern-Dreieck-Transformation .....	63
<b>5</b>	<b>Verfahren zur Berechnung linearer Netzwerke .....</b>	<b>65</b>
5.1	Netzwerkberechnung nach KIRCHHOFF .....	65
5.2	Der HELMHOLTZsche Überlagerungssatz .....	68
5.3	Zweipoltheorie .....	70
5.3.1	Spannungsquellen-Ersatzschaltung .....	71
5.3.2	Stromquellen-Ersatzschaltung .....	73
5.4	Analyseverfahren .....	76
5.4.1	Umlaufanalyse .....	76
5.4.2	Knotenanalyse .....	80
<b>6</b>	<b>Stromkreise mit nichtlinearen Bauelementen .....</b>	<b>84</b>
6.1	Strom-Spannungs-Kennlinie .....	84
6.2	Ausgewählte Kennlinien nichtlinearer Bauelemente .....	85
6.3	Konstruktion von Ersatz-Kennlinien .....	89
6.3.1	Ersatz-Kennlinien von Elementarschaltungen .....	89
6.3.2	Idealisierte Kennlinien und Ersatzschaltungen .....	90
6.4	Grafische Bestimmung des Arbeitspunktes .....	91
<b>II</b>	<b>Wechselstromtechnik</b>	
<b>7</b>	<b>Beschreibung von Wechselgrößen .....</b>	<b>94</b>
7.1	Periodische Zeitfunktionen .....	94
7.2	Sinusförmige Zeitfunktionen .....	95
7.3	Mittelwerte periodischer Zeitfunktionen .....	97
7.3.1	Arithmetischer Mittelwert .....	97
7.3.2	Gleichrichtwert .....	97
7.3.3	Effektivwert .....	99
7.4	Überlagerung sinusförmiger Zeitfunktionen .....	101
<b>8</b>	<b>Widerstände im Wechselstromkreis .....</b>	<b>106</b>
8.1	Elementare Zweipole .....	106
8.1.1	Ohmscher Widerstand .....	106
8.1.2	Induktiver Blindwiderstand .....	107
8.1.3	Kapazitiver Blindwiderstand .....	109
8.2	Reale Bauelemente .....	110
8.2.1	Reale Spule .....	110
8.2.2	Realer Kondensator .....	112
8.3	Elementarschaltungen .....	113

---

8.4	Zeigerbilder .....	115
8.4.1	Gemischte RLC-Kombinationen .....	115
8.4.2	Brückenschaltungen .....	118
<b>9</b>	<b>Berechnung von Stromkreisen bei sinusförmiger Einspeisung .....</b>	<b>120</b>
9.1	Berechnung im Zeitbereich .....	120
9.2	Berechnung im Bildbereich .....	122
9.2.1	Zeigerdarstellung .....	122
9.2.2	Rechenregeln .....	123
9.2.3	Transformationsregeln .....	126
9.2.4	Komplexer Widerstand .....	128
9.2.5	Komplexer Leitwert .....	130
9.3	Gemischte Schaltungen im Wechselstromkreis .....	131
9.3.1	Rechnerische Lösung im Bildbereich .....	131
9.3.2	Grafische Lösung im Bildbereich .....	135
9.3.3	Variation von Betriebsparametern .....	137
9.4	Spezielle Wechselstromschaltungen .....	141
9.5	Wechselstrom-Brücken .....	143
9.5.1	Induktivitätsmessbrücke .....	145
9.5.2	Kapazitätsmessbrücke .....	146
9.5.3	Phasendrehbrücke .....	147
9.6	Verfahren zur Netzwerkberechnung .....	149
9.6.1	Überlagerungsverfahren .....	149
9.6.2	Zweipoltheorie .....	151
9.6.3	Analyseverfahren .....	153
<b>10</b>	<b>Frequenzabhängigkeit der Wechselstromkreise .....</b>	<b>156</b>
10.1	Komplexer Frequenzgang .....	156
10.2	Tief- und Hochpässe .....	157
10.3	Schwingkreise .....	162
10.4	Übertragungsvierpole .....	174
<b>11</b>	<b>Leistungsbetrachtungen im Wechselstromkreis .....</b>	<b>179</b>
11.1	Zeitfunktion der Leistung .....	179
11.2	Wirk-, Blind- und Scheinleistung .....	181
11.3	Komplexe Leistung .....	182
11.4	Leistungsfaktor und seine Verbesserung .....	184
<b>12</b>	<b>Dreiphasensysteme .....</b>	<b>188</b>
12.1	Symmetrischer Drehstromgenerator .....	188
12.2	Spannungen und Ströme .....	189
12.3	Belastungsarten .....	193
12.4	Leistung im Dreiphasensystem .....	197

### III Elektrische und magnetische Felder

<b>13</b>	<b>Feldbegriff</b> .....	<b>202</b>
13.1	Begriffsbestimmung .....	202
13.1.1	Begriff „Feldpunkt“ .....	202
13.1.2	Begriff „Rechtssystem“ .....	203
13.2	Einteilung der Felder .....	204
13.3	Eigenschaften elektrischer und magnetischer Felder .....	206
<b>14</b>	<b>Stationäres elektrisches Strömungsfeld</b> .....	<b>209</b>
14.1	Eigenschaften des elektrischen Strömungsfeldes .....	209
14.2	Beschreibung des stationären elektrischen Strömungsfeldes .....	214
14.2.1	Integrale Größen .....	214
14.2.2	Ortsbezogene Größen .....	214
14.2.3	Maschen- und Knotenpunktsatz im Strömungsfeld .....	219
14.2.4	Überlagerung elektrischer Strömungsfelder .....	222
14.3	Berechnung elektrischer Strömungsfelder .....	222
14.3.1	Homogene und einfache inhomogene Strömungsfelder .....	222
14.3.2	Radialsymmetrische Strömungsfelder .....	224
14.4	Erderanordnungen .....	229
14.4.1	Halbkugelerder .....	229
14.4.2	Vollkugelerder .....	233
<b>15</b>	<b>Elektrostatisches Feld</b> .....	<b>238</b>
15.1	Eigenschaften des elektrostatischen Feldes .....	238
15.2	Erscheinungsformen der Ladung .....	239
15.3	Beschreibung des elektrostatischen Feldes .....	241
15.3.1	Integrale Größen .....	241
15.3.2	Ortsbezogene Größen .....	243
15.4	Berechnung elektrostatischer Felder .....	245
15.4.1	Homogene und einfache inhomogene elektrostatische Felder .....	245
15.4.2	Elektrostatische Felder im geschichteten Dielektrikum .....	246
15.4.3	Radialsymmetrische elektrostatische Felder .....	249
15.4.4	Überlagerung elektrostatischer Felder .....	252
15.5	Energie und Kräfte im elektrostatischen Feld .....	255
15.5.1	Elektrostatisches Feld als Energiespeicher .....	255
15.5.2	COULOMBSches Gesetz .....	256
15.5.3	Kraft auf Trennflächen .....	257
15.5.4	Influenz und Polarisierung .....	260

---

<b>16</b>	<b>Elektrisches Verhalten des Kondensators</b> .....	<b>262</b>
16.1	Regeln zur Berechnung von Kondensatorschaltungen .....	262
16.1.1	Reihenschaltung und kapazitiver Spannungsteiler .....	262
16.1.2	Parallelschaltung und Ladungsteiler .....	265
16.1.3	Gemischte Kondensatorschaltungen .....	268
16.2	Schaltvorgänge in RC-Kombinationen .....	269
16.2.1	Ladevorgang .....	269
16.2.2	Entladevorgang .....	271
16.2.3	Umschalten vorgeladener Kondensatoren .....	273
16.3	Ladungsausgleich .....	276
16.3.1	Ladungsbilanz .....	276
16.3.2	Ladungsausgleich in einer Reihenersatzschaltung .....	277
16.3.3	Ladungsausgleich in einer Parallelersatzschaltung .....	282
16.3.4	Kapazitive Netzwerke .....	283
<b>17</b>	<b>Stationäres magnetisches Feld</b> .....	<b>286</b>
17.1	Eigenschaften des magnetischen Feldes .....	286
17.2	Beschreibung des magnetischen Feldes .....	288
17.2.1	Integrale Größen .....	288
17.2.2	Ortsbezogene Größen .....	290
17.3	Magnetische Kreise .....	292
17.3.1	Magnetisierungskennlinie .....	292
17.3.2	Ersatzschaltungen für magnetische Kreise .....	295
17.3.3	Berechnung magnetischer Kreise .....	297
17.4	Magnetische Felder stromdurchflossener Leiter .....	301
17.5	Energie und Kräfte im magnetischen Feld .....	305
17.5.1	Magnetische Energie .....	305
17.5.2	LORENTZ-Kraft .....	308
17.5.3	Energiedichte und Induktivität einer Leitung .....	311
<b>18</b>	<b>Zeitlich veränderliches magnetisches Feld</b> .....	<b>314</b>
18.1	Elektromagnetische Induktion .....	314
18.1.1	Induktionsgesetz – Bewegungsinduktion .....	315
18.1.2	Induktionsgesetz – Ruheinduktion .....	319
18.2	Selbstinduktion und Induktivität .....	321
18.3	Gegeninduktion und Gegeninduktivität .....	322
18.4	Transformatorgleichungen .....	328
<b>19</b>	<b>Elektrisches Verhalten der Spule</b> .....	<b>331</b>
19.1	Zusammenschaltung von Induktivitäten .....	331
19.1.1	Unverkoppelte Induktivitäten .....	331
19.1.2	Verkoppelte Induktivitäten .....	332
19.1.3	Transformator-Ersatzschaltungen .....	333

---

19.2	Schaltvorgänge an Spulen .....	336
19.2.1	Einschaltvorgang .....	336
19.2.2	Ausschaltvorgang .....	338
19.2.3	Umschalten vormagnetisierter Spulen .....	340
19.3	Modelle zum Transformator .....	343
19.3.1	Idealer Transformator .....	343
19.3.2	Verlustloser und streuungsfreier Transformator .....	345
19.3.3	Realer Transformator .....	347
<b>20</b>	<b>Wechselwirkungen .....</b>	<b>350</b>
20.1	Ladungsbewegungen in leitfähigen und nichtleitfähigen Medien .....	350
20.1.1	Konvektionsstrom .....	350
20.1.2	Feldstrom .....	351
20.1.3	Diffusionsstrom .....	352
20.1.4	Verschiebungsstrom .....	354
20.2	MAXWELLSche Gleichungen .....	356
20.2.1	Durchflutungsgesetz .....	356
20.2.2	Induktionsgesetz .....	357
20.2.3	Wirbelfreies Quellenfeld .....	358
20.3	Grundlegende Zusammenhänge .....	359
<b>Übungsaufgaben .....</b>		<b>360</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>		<b>383</b>
<b>Sachwortverzeichnis .....</b>		<b>384</b>
<b>Formelzeichenverzeichnis</b>		



# 1 Elektrische Grundgrößen

## 1.1 Elektrische Ladung

Die elektrische Ladung ist eine grundlegende Eigenschaft der Materie. Alle physikalischen Zustände, Prozesse und Erscheinungen, die in der Elektrotechnik auftreten, werden durch ruhende oder bewegte elektrische Ladungen verursacht.

Elektrische Ladungen sind Bestandteil aller Atome. Um den positiv geladenen Atomkern (Protonen) existiert eine negativ geladene Atomhülle, die mit  $n$  Elektronen besetzt ist. Diese beiden Elementarteilchen tragen eine vorzeichenbehaftete Elementarladung  $e_0$ .

- Proton: positive Ladung  $+ e_0$
- Elektron: negative Ladung  $- e_0$

$$e_0 \approx 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ A}\cdot\text{s} \quad (1.1)$$

Ein Atom, dem aus seiner Umgebung keine Energie zugeführt wurde, erscheint für einen externen Beobachter elektrisch neutral. Die negative Ladung der Atomhülle hebt die positive Ladung des Atomkernes nach außen hin auf.

Bewegliche Ladungen entstehen in bestimmten Stoffen z.B. durch das Herauslösen von Elektronen aus der Atomhülle. Infolge der Zufuhr von Energie (z.B. Wärme) können Elektronen die Atomhülle verlassen und stehen dann als bewegliche Ladungsträger  $\ominus$  zur Verfügung. Das Atom besitzt in diesem Fall einen Überschuss an positiven Ladungen  $\oplus$  seines Kernes. Der Betrag jeder positiven oder negativen Ladung ist dann ein ganzzahliges Vielfaches  $n$  der Elementarladung  $e_0$  und wird als Ladungsmenge  $Q$  bezeichnet. Für die Einheit gilt:  $[Q] = 1 \text{ A}\cdot\text{s}$  (Amperesekunde).

$$|Q| = n \cdot e_0 \quad (1.2)$$

Jede Ladung versetzt den sie umgebenden Raum in einen besonderen Zustand. Sie bewirkt ein elektrisches Feld (Kap. 13 bis 15) und übt damit eine Kraft  $F \sim Q$  auf benachbarte Ladungen aus. Nach dem COULOMBSchen Gesetz (Abschn. 15.5.2) stoßen sich Ladungen gleicher Polarität voneinander ab, und Ladungen mit verschiedenen Vorzeichen ziehen sich gegenseitig an.

Ladungen können ruhen oder sich infolge der Kraftwirkung eines elektrischen Feldes bewegen. Ob sie sich bewegen können, und wie schnell sie sich bewegen, hängt von der sie umgebenden Materie ab.

Ruhende Ladungen erhält man z.B. durch Ladungstrennung auf den Oberflächen zweier durch einen Nichtleiter getrennter Metallplatten (vgl. Kap. 15).

Bewegliche Ladungen können gerichtet transportiert werden, wenn ein äußeres elektrisches Feld auf sie einwirkt (z.B. durch Anlegen einer Spannung an einen Leiter).

Die negativen Ladungen führen dann eine Bewegung relativ zu den positiven Ladungen aus.

Der jeweilige Zustand einer Ladung (Ruhe oder Bewegung) wird demzufolge neben der von außen zugeführten Energie durch das stoffliche Medium bestimmt, in dem sich die Ladung befindet bzw. das von den betrachteten Atomen gebildet wird. Solche stofflichen Medien können fest, flüssig oder gasförmig sein.

Die weiteren Ausführungen in diesem Lehrbuch beziehen sich auf Festkörper, die in der Regel bei Raumtemperatur betrachtet werden. Man unterscheidet zwischen folgenden Stoffen:

• **Elektrischer Leiter:**

Unter einem Leiter versteht man einen leitfähigen Stoff, der eine große Anzahl von beweglichen Elektronen enthält (z.B. Kupfer mit der Konzentration  $n_{\text{Cu}} \approx 9 \cdot 10^{22}$  Elektronen pro  $\text{cm}^3$ ). In metallischen Leitern sind die Elektronen nur sehr schwach im Atomverband gebunden, können sich leicht lösen und stehen somit in großer Anzahl als bewegliche Ladungsträger für einen Ladungstransport zur Verfügung.

In den weiteren Ausführungen der folgenden Kapitel zur Gleichstromlehre (außer in Kap. 6) werden ausschließlich metallische Leiter betrachtet.

• **Halbleiter:**

In einem Halbleiter ist die Anzahl der beweglichen Ladungen pro Volumeneinheit im Vergleich zum metallischen Leiter um Größenordnungen von bis zu  $10^{10}$  Elektronen /  $\text{cm}^3$  geringer. Durch den zielgerichteten Einbau von geeigneten Fremdatomen (Dotierung) kann diese Anzahl jedoch um Größenordnungen verändert werden.

Auf Leitungsmechanismen in Halbleitern kann in diesem Lehrbuch leider nicht eingegangen werden. Es wird auf die weiterführende Literatur (z.B. [11]) verwiesen.

• **Nichtleiter (Isolator):**

Ein idealer Nichtleiter besitzt keine frei beweglichen Ladungsträger. Somit ist ein Ladungstransport nicht möglich.

Bei realen Nichtleitern sind die Elektronen fest im Gitterverband verankert, solange sie nicht entsprechend hohen Temperaturen oder starken elektrischen Feldern ausgesetzt werden. Obwohl es demzufolge keine idealen Nichtleiter geben kann, geht man in ausgewählten Fällen von dieser idealen Eigenschaft aus (z.B. Kap. 15).

## 1.2 Elektrische Stromstärke

Die elektrische Stromstärke  $i$  beschreibt einen Ladungstransport pro Zeiteinheit.

$$i = \frac{dQ}{dt} \quad (1.3)$$

Wenn sich die Menge der transportierten Ladung über der Zeit ändert, so handelt es sich um einen zeitlich veränderlichen Strom  $i = f(t)$  mit der Einheit:  $[i] = 1 \text{ A}$ . Er wird im Weiteren,

wie auch alle anderen von der Zeit abhängigen Größen, mit einem Kleinbuchstaben  $i$  gekennzeichnet.

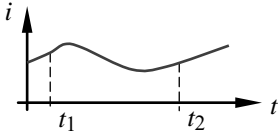


Bild 1.1: Zeitlich veränderlicher Strom



Bild 1.2: Gleichstrom

Betrachtet man einen veränderlichen Strom in einem zeitlichen Intervall (im Bild 1.1 von  $t_1$  bis  $t_2$ ), so ist die Fläche, die vom Funktionsverlauf  $i = f(t)$  gegen die Zeitachse eingeschlossen wird, ein Maß für die in diesem Zeitraum  $\Delta t$  transportierte Ladungsmenge  $\Delta Q$ :

$$\Delta Q = Q_2 - Q_1 = \int_{t_1}^{t_2} i \cdot dt \quad (1.4)$$

Wird über der Zeit eine konstante Ladungsmenge bewegt, so handelt es sich um einen zeitlich unabhängigen Strom  $i \neq f(t)$ . Dieser Gleichstrom wird mit einem großen Buchstaben  $I$  gekennzeichnet. Nach Gleich. (1.4) erhält man jetzt die transportierte Ladungsmenge  $\Delta Q$  folgende Aussage:

$$\Delta Q = Q_2 - Q_1 = \int_{t_1}^{t_2} I \cdot dt = I \cdot t_2 - I \cdot t_1 = I \cdot (t_2 - t_1) = I \cdot \Delta t$$

Der elektrische Strom ist an seinen drei Hauptwirkungen erkennbar:

- **Wärmewirkung:**

Beim Transport von Ladungsträgern durch den Querschnitt eines Leiters kommt es zu einer Erwärmung des Leiters. Mit zunehmender Dichte der Strömung (Stromdichte, vgl. Kap. 14) wird diese Erwärmung größer.

- **Magnetische Wirkung:**

Bewegte elektrische Ladungen erzeugen um sich herum ein magnetisches Feld (Kap. 17).

- **Chemische Wirkung:**

In flüssigen Leitern (Elektrolyte) fließt ein Ionenstrom. Dieser Ladungstransport ist zugleich ein Massetransport, der zu einer chemischen Beeinflussung des durchströmten Stoffes führt.

Der elektrische Strom ist mit Gleich. (1.3) noch nicht vollständig beschrieben. Die Angabe seines Wertes (Vorzeichen – Zahlenwert – Einheit) ist nur in Verbindung mit einer Richtungsangabe sinnvoll.

In metallischen Leitern können sich lediglich die Elektronen (negative Ladungsträger) bewegen. Im Falle einer Bewegung sind sie die „Träger“ des Stromes. Durch das Herauslösen aus dem Atomverband hinterlassen die Elektronen positive Metallionen. Diese positiven Ionisationszustände verlagern sich im Vergleich zur Bewegung der Elektronen in entgegengesetzter Richtung (Relativbewegung der positiven Ladungsträger – vgl. Bild 1.3).

Die Grundlage für eine einheitliche Richtungsangabe<sup>1)</sup> bildet der Richtungssinn des Stromes. Danach wird die Richtung des elektrischen Stromes mit  $I > 0$  A gegen die Bewegungsrichtung der Elektronen  $\ominus$  definiert und mit einem Richtungspfeil gekennzeichnet.

Nach dieser Festlegung fließt der Strom mit  $I > 0$  A außerhalb der Quelle vom höheren (+) zum niedrigeren (–) Energieniveau, also in Richtung der Relativbewegung  $\rightarrow$  der positiven Ladungen  $\oplus$ . Ein Richtungspfeil gibt demzufolge die Richtung des Stromes an, mit der er mit positiven Werten durch einen Stromkreis fließt.

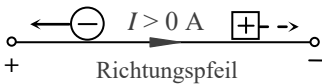


Bild 1.3: Richtungssinn des Stromes [<sup>1)</sup> Empfehlung nach DIN EN 60375]

In vielen Fällen kann diese Richtung aber nicht vorhergesagt werden. Das trifft insbesondere auf Brückenschaltungen (siehe Abschn. 4.3 und 4.4) und auf Stromkreise mit mehreren Quellen (vgl. Kap. 5) zu.

Falls die Potentialverhältnisse (vgl. Abschn. 1.3) in einem elektrischen Stromkreis (vgl. Abschn. 1.4) nicht bekannt sind, muss die Richtung eines Stromes vom Betrachter mit einem Bezugspfeil willkürlich festgelegt werden. Im Ergebnis einer Berechnung sagt das Vorzeichen des berechneten Stromes dann aus, ob er wirklich in die festgelegte Richtung fließt (positives Vorzeichen), oder ob er nicht in diese Richtung fließt (negatives Vorzeichen). Im Falle eines positiven Vorzeichens ist der Bezugspfeil zugleich der Richtungspfeil (Bild 1.3).

Obwohl Bezugspfeile beliebig festgelegt werden können, sollte man ihre Richtung während oder im Ergebnis einer Berechnung nicht mehr verändern. Da ein berechneter Strom (Vorzeichen – Zahlenwert – Einheit) nur in Verbindung mit dem festgelegten Bezugspfeil exakt interpretierbar ist, würde ein Richtungswechsel zu einer nicht nachvollziehbaren Lösung führen. Eine Aussage zum Richtungspfeil kann ja aus dem Vorzeichen des Rechenergebnisses im Zusammenhang mit dem Bezugspfeil abgeleitet werden.

In den weiteren Ausführungen dieses Lehrbuchs wird mit dem in der schaltungstechnischen Praxis üblichen Begriff „Zählpfeil“ gearbeitet. Darunter ist ein willkürlich festgelegter Bezugspfeil zu verstehen, der für die jeweils betrachtete Größe einen Bezugssinn vorgibt. Ein Strom wird nur dann als positiv angesehen, wenn der gewählte Bezugssinn (Zählpfeil) mit seinem Richtungssinn (siehe Richtungspfeil im Bild 1.3) übereinstimmt.

### Lehrbeispiel 1.1:

Wie viele Ladungsträger müssen bewegt werden, damit in einem Leiter eine Sekunde lang ein Strom von  $I = 1$  A fließt?

Da es sich um einen Gleichstrom handelt, gilt die Gleich. (1.3) wie folgt:

$$i = \frac{dQ}{dt} \quad \text{mit: } Q = \text{const.} \Rightarrow I = \frac{Q}{t}$$

$$\text{Durch Einsetzen von Gleich. (1.2) erhält man: } I = \frac{|Q|}{t} = \frac{n \cdot e_0}{t} \Rightarrow n = \frac{I \cdot t}{e_0} \approx 6,25 \cdot 10^{18}$$

Diese große Anzahl ist nicht mehr überschaubar. Um sich zumindest modellmäßig eine Vorstellung von der Menge der an diesem Ladungstransport beteiligten Ladungsträger zu verschaffen, werden folgende Überlegungen angestellt:

Welche Fläche könnte man überdecken, wenn jeder Ladungsträger die Größe eines Tennisballes mit einem Durchmesser  $\varnothing \approx 65$  mm) hätte?

Zum Bedecken eines Quadratmeters sind ca. 225 Tennisbälle erforderlich. Unsere Erde hat eine Oberfläche von rund 500 Millionen Quadratkilometern ( $A \approx 5 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$ ). Zum vollständigen Belegen der Erdoberfläche wären demzufolge ca.  $1,13 \cdot 10^{17}$  Tennisbälle nötig.

Für das Beispiel mit den  $n$  Ladungsträgern bedeutet dies, dass unsere Erde 55-mal mit einer solchen Schicht überzogen werden könnte oder dass diese 55 Schichten (übereinander angeordnet) einen Belag mit einer Höhe von ca. 4 m ergeben würden!

### 1.3 Elektrische Spannung

Einer Ladung kann an jedem Ort eines elektrischen Kreises (Abschn. 1.4) ein definiertes Energieniveau zugeordnet werden. Bezieht man das Energieniveau dieses Punktes auf die Ladung selbst, erhält man eine Aussage zum elektrischen Potential  $\varphi$ .

Das elektrische Potential  $\varphi$  ist ein Maß für das auf die Ladung bezogene Energieniveau eines Punktes in einem elektrischen Stromkreis.

Für einen Punkt a gilt:  $\varphi_a = \frac{W_a}{Q}$

Besitzt ein Punkt b ein von a verschiedenes Potential, so existiert zwischen den beiden Punkten eine Potentialdifferenz, die man als elektrische Spannung  $U$  bezeichnet. Für die Einheit gilt:  $[\varphi] = 1 \text{ V}$  und  $[U] = 1 \text{ V}$  (Volt).

Eine elektrische Spannung beschreibt die Differenz der Potentiale zweier Punkte in einem elektrischen Stromkreis.

Für eine Gleichspannung  $u \neq f(t)$  zwischen den Punkten a und b ( $U_{ab}$ ) gilt dann:

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b \quad (1.5)$$

Zur vollständigen Beschreibung der Spannung ist eine Richtungsangabe erforderlich. Die Spannung wird mit einem Spannungszählpfeil gekennzeichnet, der z.B. vom Punkt a zum Punkt b festgelegt wurde. Besitzt nun der Punkt b ein höheres Potential als der Punkt a, so wird die Spannung gemäß Gleich. (1.5) negativ. Dieses negative Vorzeichen signalisiert den Sachverhalt, dass die Spannung  $U_{ab}$  nicht vom Punkt a zum Punkt b (sondern von b nach a) mit einem positiven Wert  $U_{ba} = -U_{ab}$  abfällt.

## 1.4 Elektrischer Gleichstromkreis

In einem leitfähigen Medium fließt ein elektrischer Strom, wenn den beweglichen Ladungsträgern durch eine Quelle Energie zugeführt wird und die Anordnung in sich geschlossen ist (Stromkreis). Zur Verdeutlichung dieses Sachverhaltes soll zunächst ein unverzweigter elektrischer Stromkreis betrachtet werden. Er besteht im Elementarfall aus einer elektrischen Quelle und einem Verbraucher (Grundstromkreis).

Zwischen zwei Punkten a und b soll sich eine (vorerst als ideal angenommene) elektrische Quelle EQ befinden, die eine Quellenspannung  $U_q > 0 \text{ V}$  (siehe Zählpfeil im Bild 1.4) bereitstellt. Dann liegen die Punkte a und b auf den Potentialen  $\varphi_a$  und  $\varphi_b$  mit  $\varphi_a > \varphi_b$ .

Es gilt:  $U_q = U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$ .

In diesem Zusammenhang muss darauf verwiesen werden, dass der Wert des Potentials eines Punktes lediglich eine Aussage relativ zum Potential eines frei wählbaren Bezugspunktes liefert. Diesem Bezugspunkt PB ordnet man ein Bezugspotential (z.B.  $\varphi_{PB} = 0 \text{ V}$ ) zu.

Wenn nun die Lage des Bezugspunktes oder das Bezugspotential selbst verändert wird, ändern sich die Potentiale aller betrachteten Punkte. Die Potentialdifferenzen (Spannungen) zwischen jeweils zwei Punkten bleiben aber unverändert.

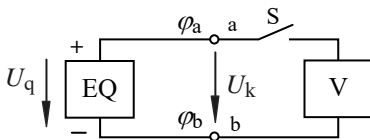


Bild 1.4: Offener elektrischer Kreis

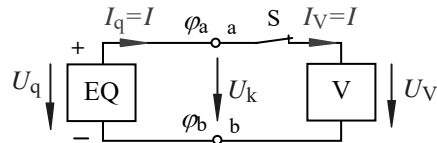


Bild 1.5: Geschlossener elektrischer Stromkreis

Bei geöffnetem Schalter S (Bild 1.4) fließt kein Strom durch den Kreis. Zwischen den Klemmen a und b liegt eine Klemmenspannung  $U_k$ , die im Bild 1.4 gleich der Quellenspannung  $U_q$  ist. Die Spannung über dem Verbraucher V ist null.

Nun wird der Kreis über den Schalter S geschlossen (Bild 1.5).

Die Quelle treibt jetzt einen Quellenstrom  $I_q = I$  vom höheren ( $\varphi_a$ ) zum niedrigeren Potential ( $\varphi_b$ ) durch den geschlossenen elektrischen Stromkreis. In einem unverzweigten elektrischen Stromkreis fließt nur ein Strom. Dieser Strom  $I_V = I$  verursacht einen Spannungsabfall  $U_V$  über dem Verbraucher, der in Richtung des fließenden Stromes weist.

Im Bild 1.6 ist ein einfaches Modell für den Ladungstransport in einem Gleichstromkreis dargestellt. Es soll zeigen, dass der elektrische Strom eine in sich geschlossene Erscheinung ist. Er wird zwar von einer elektrischen Quelle (EQ) verursacht – er selbst hat aber kein Anfang und kein Ende.

Eine bewegte Ladung verliert längs des Ladungstransportes durch einen geschlossenen Stromkreis einen Teil ihrer potentiellen Energie. Diese Energie wird der Ladung von der elektrischen Quelle wieder zugeführt. Der elektrische Strom fließt dabei in seinem geschlossenen Umlauf kontinuierlich weiter (Kontinuität des Stromes).

Zur Erläuterung dieses Sachverhaltes wird davon ausgegangen, dass eine positive Ladung im Punkt a des Bildes 1.6 ihr höchstes Energieniveau ( $W_a$ ) aufweist. Längs des Ladungstransportes (siehe Richtungspfeil des Stromes) sinkt das Energieniveau dieser Ladung in Richtung des Punktes b ab. Dieses Absinken ( $W \downarrow$ ) soll mit dem rechten Füllstandsanzeiger modellmäßig nachgebildet werden.

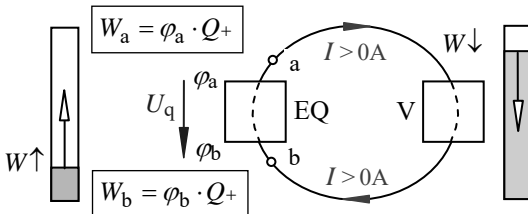


Bild 1.6: Modell zum Gleichstromkreis ( $U_q > 0\text{V}$ )

Im Punkt b besitzt die betrachtete Ladung ihr geringstes Energieniveau. Längs dieses Ladungstransportes hat sich demzufolge nicht die Ladungsmenge verringert, sondern ihr Energieniveau ist abgesunken. Der links im Bild 1.6 dargestellte Füllstandsanzeiger soll die Arbeitsweise der Quelle modellmäßig nachbilden. Sie hebt das Energieniveau der Ladung von  $W_b$  auf den ursprünglichen Wert  $W_a$  an ( $W \uparrow$ ). Dabei muss der Strom als in sich geschlossene Erscheinung auch durch die Quelle fließen.

Im Bild 1.7 ist noch einmal der geschlossene elektrische Stromkreis des Bildes 1.5 in vereinfachter Form dargestellt. Für den elektrischen Strom gilt:  $I_q = I_V = I$ .

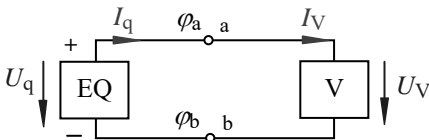


Bild 1.7: Zählpfeile im elektrischen Stromkreis

Bei der Interpretation der Richtungen der Zählpfeile stellt man folgendes fest:

Die Zählpfeile von Spannung und Strom weisen an der Quelle (Bild 1.7 – links) eine entgegengesetzte Richtung zueinander auf. Die Zählpfeile von Spannung und Strom zeigen dagegen am Verbraucher (Bild 1.7 – rechts) in die gleiche Richtung. Es muss demzufolge zwischen zwei verschiedenen Zählpfeilsystemen unterschieden werden.

### • Quellen-Zählpfeilsystem:

Wenn die Zuordnung der Zählpfeile von Spannung und Strom eine entgegengesetzte Richtung aufweisen (siehe Bild 1.8), so wird dieser schaltungstechnische Zustand nach Vorbild einer aktiven elektrischen Quelle im Quellen-Zählpfeilsystem dargestellt.

Im Bild 1.8 ist der Quellenstrom  $I_q$  gegen den Zählpfeil der Quellenspannung  $U_q$  gerichtet. Die Quelle gibt Leistung an den Verbraucher ab (und wirkt damit als Quelle), wenn der Strom mit  $I_q > 0\text{A}$  vom höheren Potential der Quelle durch einen außen angeschlossenen Verbraucher zum niedrigeren Potential der Quelle fließt. Wenn das nicht ( $I_q < 0\text{A}$ ) der Fall

ist, dann nimmt die Quelle Leistung auf und wirkt als Verbraucher. Das ist allerdings in der hier angenommenen Situation nicht möglich.

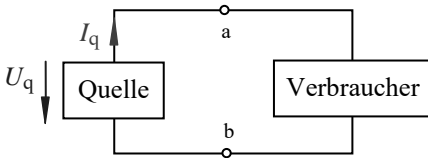


Bild 1.8: Quellen-Zählpfeilsystem

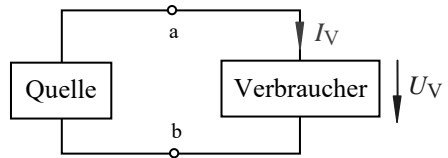


Bild 1.9: Verbraucher-Zählpfeilsystem

### • Verbraucher-Zählpfeilsystem:

Wenn die Zuordnung der Zählpfeile von Spannung und Strom die gleiche Richtung aufweisen (siehe Bild 1.9), so wird dieser schaltungstechnische Zustand im Verbraucher-Zählpfeilsystem dargestellt. Danach hat der Strom durch den Verbraucher  $I_V$  die gleiche Richtung wie der Zählpfeil der Verbraucherspannung  $U_V$  (siehe Bild 1.7 – rechts und Bild 1.9), da ein Strom durch einen Verbraucher einen Spannungsabfall in Flussrichtung verursacht. In diesem Fall nimmt das betrachtete Element Leistung auf und wirkt als Verbraucher.

Nun sollen die in den Bildern 1.4 bis 1.9 vorgestellten Modelle im Zusammenhang mit den getroffenen Festlegungen in eine einfache schaltungstechnische Situation umgesetzt werden. Die Anordnung besteht jetzt aus einer realen linearen Spannungsquelle und einem Lastwiderstand als Verbraucher. Beide Elemente werden an den Punkten a und b zu einem unverzweigten elektrischen Stromkreis (siehe Bild 1.10) verknüpft.

Die elektrische Quelle (EQ) ist der aktive Teil dieses elektrischen Stromkreises. Ladungstrennende Kräfte im Inneren dieses Schaltelementes erzeugen eine Quellenspannung  $U_q$  und versetzen elektrische Ladungen in diesem geschlossenen Stromkreis in eine Bewegung relativ zueinander. Solche inneren Vorgänge sind mit Verlusten behaftet, die bei einer linearen Quelle durch einen ohmschen Widerstand (Innenwiderstand  $R_i$  im Bild 1.10) nachgebildet werden.

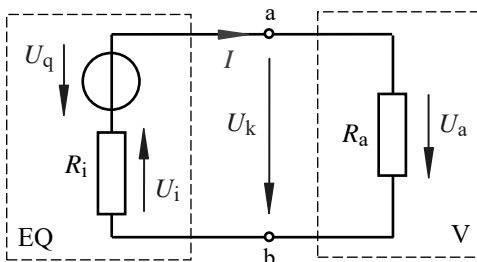


Bild 1.10: Unverzweigter elektrischer Stromkreis

Der Verbraucher (V) als der passive Teil eines elektrischen Stromkreises soll in den folgenden Betrachtungen ein linearer ohmscher Widerstand  $R_a$  sein (vgl. Abschn. 1.5 und 2.1). Er setzt die ihm zugeführte Energie in Wärme um. Die Verbindungsleitungen zwischen Quelle und Verbraucher werden als widerstandslos angenommen.



Bei einem offenen Kreis (Trennung der beiden Elemente an den Punkten a und/oder b) fließt kein Strom und der Spannungsabfall  $U_i$  über dem Innenwiderstand ist null. Über dem Lastwiderstand kann dann natürlich auch keine Spannung abfallen. Die Klemmenspannung  $U_k$  ist in diesem Fall gleich der Quellenspannung  $U_q$ .

Wird nun der Stromkreis geschlossen (Verbindung der beiden Elemente über die Punkte a und b), so fließt ein Strom  $I$  durch die Widerstände  $R_a$  und  $R_i$ .

In einem unverzweigten elektrischen Stromkreis kann nur ein Strom fließen.

Über beiden Widerständen fällt infolge dieses Stromflusses eine Spannung ( $U_a$  bzw.  $U_i$ ) ab. Die Klemmenspannung  $U_k$  ist jetzt gleich dem Spannungsabfall  $U_a$ .

Es gilt:  $U_k = U_a = U_q - U_i$ .

Für die Spannungsquelle gilt das Quellen-Zählpeilsystem, da die Zählpeile von  $U_q$  und  $I$  eine entgegengesetzte Richtung aufweisen. Die Quelle gibt Leistung an die angeschlossenen Elemente ab.

Für den Innenwiderstand der Spannungsquelle  $R_i$  und für den Lastwiderstand  $R_a$  gilt das Verbraucher-Zählpeilsystem, da die Zählpeile von  $U_i$  und  $I$  sowie von  $U_a$  und  $I$  jeweils die gleiche Richtung aufweisen. Beide Widerstände nehmen Leistung von der Quelle auf. Der in der Praxis in der Regel nicht vernachlässigbare Innenwiderstand  $R_i$  einer elektrischen Quelle wirkt demzufolge innerhalb dieser Quelle als Verbraucher.

## 1.5 Widerstände im elektrischen Stromkreis

### 1.5.1 Bemessungsgleichung

Der ohmsche Widerstand  $R$  (vgl. auch Abschn. 2.1) beschreibt die Fähigkeit eines stofflichen Gebildes zur Begrenzung des elektrischen Stromes  $I$ . Zur Diskussion von Einflussgrößen auf diese Begrenzereigenschaft soll eine Strömung durch ein Stück Manganindraht (homogener Widerstandswerkstoff) betrachtet werden (Bild 1.11).

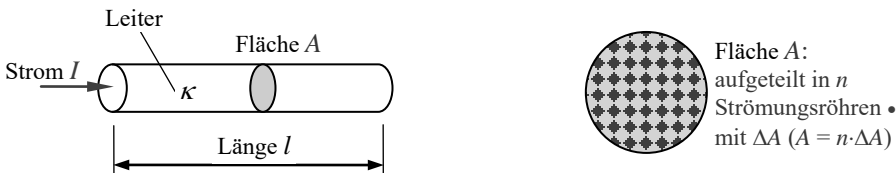


Bild 1.11: Einflussgrößen zur Begrenzung des elektrischen Stromes  $I$

Das stoffliche Gebilde besitzt eine spezifische elektrische Leitfähigkeit  $\kappa$  und ist durch seine konstruktiven Daten (Länge  $l$  und Querschnitt  $A$ ) gekennzeichnet. Die spezifische elektrische Leitfähigkeit  $\kappa$  ist eine Werkstoffkenngröße und wird durch die Dichte der frei beweglichen Ladungsträger und durch ihre Beweglichkeit im Werkstoff bestimmt. Der Kehrwert der elektrischen Leitfähigkeit ist der spezifische elektrische Widerstand  $\rho$ .

Es gilt:  $\kappa = \frac{1}{\rho}$  mit:  $[\kappa] = 1 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} = 1 \frac{\text{S}}{\text{m}}$

Der Strom durch den Leiter im Bild 1.11 wird durch folgende Maßnahmen begrenzt:

- Verringerung der Dichte der beweglichen Ladungsträger und ihrer Beweglichkeit:

Dazu muss ein Werkstoff mit einer kleineren spezifischen elektrischen Leitfähigkeit  $\kappa$  (also ein „schlechterer“ Leiter) verwendet werden:  $\kappa \downarrow \Rightarrow R \uparrow$ .

- Vergrößerung der Länge  $l$  des Leiters:

Eine größere Länge des Drahtes setzt dem Stromfluss einen größeren Widerstand entgegen. Die Ladungsträger müssen einen längeren Weg zurücklegen:  $l \uparrow \Rightarrow R \uparrow$ .

- Verringerung des Leiterquerschnittes:

Eine Reduzierung der Fläche  $A$  bewirkt eine Verringerung der Anzahl  $n$  der verfügbaren Strömungsröhren (Bild 1.11 – rechts) und damit eine Strombegrenzung. Der Widerstand des Leiters steigt in diesem Fall an:  $A \downarrow \Rightarrow R \uparrow$ .

Daraus ergibt sich die Bemessungsgleichung zur Bestimmung des Widerstandes einer homogenen leitfähigen Anordnung:

$$R = \frac{l}{\kappa \cdot A} = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (1.6)$$

Der ohmsche Widerstand  $R$  ist eine Bauelemente-Kenngröße, die von den konstruktiven Daten (Länge und Fläche) und von der Materialkenngröße ( $\kappa = 1/\rho$ ) abhängig ist.

Der elektrische Leitwert  $G$  wird über den Kehrwert des ohmschen Widerstandes  $R$  bestimmt.

$$G = \frac{1}{R} = \frac{\kappa \cdot A}{l} \quad (1.7)$$

Der Leitwert wird in der Praxis als reine Rechengröße verwendet. Die primären Informationen über die Einsetzbarkeit des Bauelementes „Widerstand“ leitet der Schaltungstechniker vorrangig aus der Angabe des Widerstandswertes ab. Aus diesem Grund wird in den folgenden Ausführungen weitgehend auf Leitwertbetrachtungen verzichtet.

Für die Einheiten gilt:  $[R] = 1 \Omega$  (Ohm) und:  $[G] = 1 \text{ S}$  (Siemens).

### 1.5.2 Temperaturabhängigkeit

Bei Leiterwerkstoffen äußert sich eine Temperaturänderung über eine nachweisbare Widerstandsänderung des Stoffes. Der Temperaturkoeffizient  $\alpha$  ist ein Maß dafür. Er beschreibt als Werkstoffkenngröße die auf den Widerstandswert des Stoffes bei Raumtemperatur bezogene Widerstandsänderung pro Temperaturänderung. Bei metallischen Werkstoffen ist der Temperaturkoeffizient größer als null (vgl. [11] – Lehrbeispiel 2.3).

$$\alpha = \frac{dR}{dT} \cdot \frac{1}{R} \quad (1.8)$$

Der Widerstandswert wird bei einer definierten Temperatur wie folgt berechnet:

$$R = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (1.9)$$

$R_{20}$  ist der Widerstandswert bei einer Bezugstemperatur von 20 °C.  $\alpha$  beschreibt den Temperaturkoeffizienten des für das Bauelement verwendeten Werkstoffes. Der Temperaturkoeffizient wird auch gelegentlich mit  $TK$  oder  $TC$  bezeichnet. Für  $\Delta T$  ist die Temperaturänderung (aktuelle Temperatur relativ zur Bezugstemperatur) einzusetzen. Diese Berechnungsvorschrift gilt nur für den in der Schaltungstechnik interessierenden Temperaturbereich und für relativ kleine Temperaturänderungen.

### 1.5.3 Technische Ausführungsformen

Aus der Sicht des verfügbaren Bauelementesortimentes unterscheidet man zwischen Festwiderständen und Einstellwiderständen (vgl. auch [11] – Abschn. 2.2.1).

Festwiderstände können ein lineares oder ein nichtlineares Verhalten aufweisen. Dieses Verhalten wird mit einer Strom-Spannungs-Kennlinie  $I = f(U)$  beschrieben.

Lineare Widerstände werden als Drahtwiderstand (z.B. Konstantendraht), Schichtwiderstand (z.B. Kohleschicht, Metallschicht) oder als Massewiderstand hergestellt.

Nichtlineare Widerstände (z.B. Heißeiter, Kaltleiter, Varistor, Fotowiderstand, usw.; siehe [11] – Abschn. 2.3) bestehen aus einem Halbleitermaterial. Ihr Widerstandswert wird durch eine physikalische Größe (z.B. Temperatur, Spannung, Beleuchtungsstärke) beeinflusst.

Einstellwiderstände ändern ihren Widerstandswert bei Veränderung der Position eines Schleifkontaktes längs einer geraden oder kreisförmigen Widerstandsbahn. Diese Widerstandsbahn kann aus Drahtwindungen (Drahtpotentiometer) oder aus einer Widerstandsschicht (Schichtpotentiometer) bestehen. Der gewünschte Widerstandswert wird mit einem geeigneten Schleifkontakt von der Widerstandsbahn linear oder logarithmisch abgegriffen.

Tabelle 1.1: Zusammenfassung (Formelzeichen und Einheiten)

Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit
Ladung	$Q$	A·s
Strom	$I$	A
Potential	$\varphi$	V
Spannung	$U$	V
Widerstand	$R$	$\Omega$
Leitwert	$G$	S

## Sachwortverzeichnis

Abfallflanke 322, 327, 340  
 Admittanz 130  
 Amplitude 102, 188  
 Amplitudenfrequenzgang 156, 170f  
 Amplitudenspektrum 104  
 Analogiemethode 207  
 Analyseverfahren 76, 153  
 Anpassungsfall 45  
 Anstiegsflanke 322, 327, 340  
 Äquipotentialfläche 210, 225, 253  
 Äquipotentiallinie 210, 229, 241  
 Äquivalenz, schaltungstechnische 60  
 Arbeitspunkt 23, 91, 298  
 ARON-Schaltung 200  
 Atom 12  
 Augenblickswert 95, 180  
 Ausgleichsstrom 280  
 Ausschaltvorgang 338  
  
**B**  
 Bandbreite 165  
 Bandpass 164  
 Bandsperre 164  
 Bauelement, nichtlineares 84  
 Bauelement, reales 110  
 Bauelemente-Kenngröße 23, 214, 241, 305, 321, 325  
 Baum, vollständiger 65  
 Baumzweig 77  
 Bemessungsgleichung 20f  
 Betriebsparameter 137  
 Beweglichkeit 21  
 Bewegungsinduktion 315  
 Bezugsknoten 81, 284  
 Bezugspfeil 15  
 Bezugsphase 200  
 Bezugspotential 17, 80  
 Bezugstemperatur 22  
 Bezugszeiger 116  
 Bezugszeitpunkt 95, 116, 189  
 Bildbereich 122, 149, 182  
 Blindleistung 181, 343  
 Blindleistungskompensation 186  
 Blindspannung 183  
 Blindstrom 184  
 Blindwiderstand, induktiver 107, 140, 168, 348  
 Blindwiderstand, kapazitiver 109, 132, 168  
 Brechungsgesetz 249  
 Brücke, abgleichbare 143

Brücke, nicht abgleichbare 143  
 Brückenschaltung 56, 118  
  
**C**  
 COULOMB-Kraft 256, 315  
 COULOMBSches Gesetz 256  
  
**D**  
 Darstellung, normierte 48  
 Deformationspolarisation 260  
 Dezibel 173  
 Dielektrikum 238, 256, 354  
 Dielektrikum, geschichtetes 245  
 Differenzierglied 275  
 Diffusionsstrom 352  
 Diffusionsstromdichte 353  
 Diode 85  
 Dipol 261  
 Drehstromgenerator 188  
 Dreieckschaltung 61, 193  
 Dreieck-Stern-Transformation 61  
 Dreiphasensystem 188  
 Dreipolschaltung 59  
 Driftgeschwindigkeit 350  
 Driftgeschwindigkeit, mittlere 217  
 Durchbruchspannung 86  
 Durchflutung 288, 292, 295, 357  
 Durchflutungsgesetz 290, 298, 356  
 Durchlassbereich 164  
 Durchlassspannung 85  
 Durchlassstrom 86  
  
**E**  
 Ebene, komplexe 122  
 Effektivwert 99, 104, 116, 127, 179  
 Effektivwertzeiger 127  
 Einschaltvorgang 336  
 Einstellwiderstand 22  
 Eisenkern 298  
 Eisenverluste 110, 348  
 Eisenweglänge 300  
 Elektrode 209, 221, 224  
 Elementarladung 12  
 Elementarmagnete 293  
 Elementarschaltung 32  
 Elementarvierpol 177  
 Energie 28  
 Energie, elektrische 256  
 Energie, gespeicherte 255, 258, 306  
 Energie, magnetische 305, 312  
 Energiedichte 256, 259, 311  
 Energieerhaltungssatz 29

- Energieniveau 16, 242  
Energiesatz 28  
Energiespeicher 255, 306  
Entladestrom 256, 269  
Entladevorgang 271  
Erder, virtueller 234  
Erderanordnung 229  
Erregerstrom 289, 324  
Erregerstrom, periodischer 321  
Erregerwicklung 314  
Ersatzinduktivität 334  
Ersatz-Kennlinie 89  
Ersatzschaltbild, reduziertes 349  
Ersatzschaltung 90, 316  
Ersatzschaltung, magnetische 289, 295  
Erzeuger-Zählpfeilsystem 319, 321  
Exponentialform 123, 128, 144, 183
- F**  
FARADAYScher Käfig 260  
Feld, elektrostatisches 238  
Feld, homogenes 204  
Feld, homogenes elektrostatisches 241, 245, 257  
Feld, homogenes magnetisches 297, 316  
Feld, inhomogenes 205  
Feld, inhomogenes elektrostatisches 245  
Feld, inhomogenes magnetisches 309  
Feld, kugelsymmetrisches 249  
Feld, radialsymmetrisches 205, 224  
Feld, radialsymmetrisches elektrostatisches 249  
Feld, stationäres magnetisches 286  
Feld, zeitlich veränderliches magnetisches 314  
Feld, zylindersymmetrisches 251  
Feldbegriff 202  
Feldbild 203  
Feldgröße, skalare 204, 214  
Feldgröße, vektorielle 214  
Feldkonstante, elektrische 238  
Feldkonstante, magnetische 287  
Feldpunkt 202, 216, 237, 259  
Feldraum, passiver 209  
Feldstärke, elektrische 215, 230, 243, 260, 352  
Feldstärke, magnetische 286, 293, 301, 356  
Feldstärkeberechnung 236  
Feldstärkevektor 222  
Feldstrom 351  
Festwiderstand 22  
Filter-Flankensteilheit 173  
Flächenladung 240  
Flächenladungsdichte 240, 243, 355  
Flächenverhältnis 300  
Fluss, elektrischer 241, 354  
Fluss, magnetischer 289, 295, 305, 311, 319, 324, 348  
Fluss, verketteter 305  
Fluss, zeitlich veränderlicher magnetischer 321  
Flussdichte, elektrische 243  
Flussdichte, magnetische 291, 299, 308, 315f, 357  
Flussdichtelinie 315  
Flussdichtelinie, elektrische 358  
Flussdichtevektor 308  
Flusslinie 301  
Flusslinie, elektrische 241, 354  
Flussröhre 256, 291  
Flussröhre, magnetische 286, 296  
Flussverbreiterung 299  
Form, kartesische 122  
Form, trigonometrische 123  
FOURIER -Reihe 103  
FOURIER-Koeffizient 103  
Frequenz 94, 188  
Frequenz, imaginäre 156  
Frequenz, normierte 171  
Frequenzabhängigkeit 156  
Frequenzdekade 170  
Frequenzgang 107  
Frequenzgang, komplexer 156
- G**  
Galvanometer 57  
Gamma-Vierpol 178  
GAUßscher Satz 358  
Gegenelektrode 225  
Gegeninduktion 322  
Gegeninduktionsspannung 323, 326, 329  
Gegeninduktivität 322, 345  
Gegenladung 238, 249  
Generatorstränge 188  
Generator-Strangspannung 189  
Gesamtfluss 323  
Geschwindigkeitsvektor 309  
Gleichanteil 97  
Gleichgröße 94  
Gleichrichtwert 97  
Gleichspannung 16  
Gleichstrom 14, 31  
Gleichstromkreis 17  
Gleichstromwiderstand 23, 85

- Gradient 215, 351  
 Graph 65  
 Grenzfrequenz 142, 157, 165  
 Größe, integrale 207, 214, 241, 288  
 Größe, ortsbezogene 207, 214, 243, 290  
 Grunddämpfung 157  
 Grundfrequenz 103  
 Grundschwingung 103  
 Grundstromkreis 31, 44  
 Grundwelle 103  
 Güte 111, 113, 163, 166
- H**albkugelerder 229  
 Halbleiter 13  
 HALL-Konstante 311  
 HALL-Sonde 293, 310  
 HALL-Spannung 311  
 Harmonische 103  
 Hauptfluss 323  
 Hauptinduktivität 349  
 Heißeleiter 87  
 HELMHOLTZscher Überlagerungssatz 68, 149, 151  
 Hochpass 160  
 Hohlleiter 302  
 HOPKINSONSches Gesetz 289, 299, 321  
 Hüllenintegral 221, 357
- I**maginärteil 122, 140, 144, 157  
 Impedanz 128  
 Indikatorzweig 144  
 Induktion, elektromagnetische 314  
 Induktionsgesetz 315, 337, 357  
 Induktivität 107, 129, 305, 311, 321, 323  
 Induktivität, äußere 313  
 Induktivität, innere 312  
 Induktivität, unverkoppelte 331  
 Induktivität, verkoppelte 332  
 Induktivitätsmessbrücke 145  
 Influenz 260  
 Innenwiderstand 19, 52, 71, 152  
 Integrierglied 275  
 Inversbetrieb 176  
 Inversion 135  
 Inversionskreis 135  
 Inversionsregeln 139  
 Ionenpolarisation 261
- K**altleiter 88  
 Kapazität 109, 250, 255  
 Kapazitätsmessbrücke 146
- Kennlinie 54  
 Kennlinie, idealisierte 90  
 Kennwiderstand 163  
 Kettenschaltung 175  
 Ketten-Zählpeilsystem 174, 347  
 KIRCHHOFFSche Sätze 26, 65, 120, 132, 149  
 Klemmenspannung 17, 40, 316  
 Klemmenverhalten 40  
 Klirrfaktor 105  
 Knoten 26  
 Knoten, echter 32  
 Knoten, virtueller 33, 284  
 Knotenanalyse 80, 154, 283  
 Knotenkapazität 284  
 Knotenleitwert 81  
 Knotenpotentialanalyse 80  
 Knotenpotentialverfahren 153  
 Knotenpunkt 27, 32  
 Knotenpunktsatz 27, 35, 65, 89, 132, 194, 265, 296, 331  
 Koaxialleitung 303  
 Koeffizientenschema 77, 81, 154, 284  
 Koerzitivfeldstärke 295  
 Kompensatorschaltung 56  
 Kondensator 130, 262, 354  
 Kondensator, realer 112  
 Kondensator, vorgeladener 273  
 Kondensatorschaltung 262  
 Kondensatorschaltung, gemischte 268  
 Konduktanz 131  
 Konstantendraht 22  
 Kontinuität 17, 221, 350  
 Kontinuitätsgleichung 350, 355, 356  
 Kontinuitätssatz 221  
 Konvektionsstrom 350, 353  
 Konvektionsstromdichte 351  
 Konzentrationsgefälle 351  
 Koppelkapazität 284  
 Koppelleitwert 81  
 Koppelwiderstand 78  
 Kopplungsfaktor 323, 332, 345  
 Kraft 257  
 Kreis, magnetischer 292  
 Kreis, unverzweigter magnetischer 295  
 Kreis, verkoppelter magnetischer 323  
 Kreis, verzweigter magnetischer 296  
 Kreisfrequenz 95, 116  
 Kugelkondensator 250  
 Kurzschlussfall 44  
 Kurzschlussstrom 73, 91, 152  
 Kurzschlussstromrückwirkung 176

- Kurzschlussübertragungswiderstand 175  
Kurzschlusszweig 32
- Ladestrom** 255, 269  
**Ladevorgang** 269  
**Ladezustand** 276  
**Ladung** 12f, 206, 238, 284, 308  
**Ladung, bewegte** 315  
**Ladung, verschobene** 277  
**Ladungsausgleich** 276  
**Ladungsbewegung** 350  
**Ladungsbilanz** 276  
**Ladungserhaltungssatz** 240  
**Ladungsgesetz** 241, 250, 262  
**Ladungsmenge** 14  
**Ladungsteilerregel** 267  
**Ladungsträgerbeweglichkeit** 217, 352  
**Ladungsträgerkonzentration** 352, 353  
**Ladungstransport** 17, 25, 350  
**Ladungstrennung** 315, 350  
**Ladungszufluss** 354  
**Längszweig** 177  
**Lastfälle** 44  
**Lastkennlinie** 91  
**Lastwiderstand** 31, 71, 344  
**Lastwiderstandsgerade** 47  
**Lastzweipol, komplexer** 179  
**Leerlauf** 44  
**Leerlaufspannung** 71, 91, 152  
**Leerlaufspannungsrückwirkung** 175  
**Leerlaufübertragungsleitwert** 175  
**Leistung** 44, 179  
**Leistung, elektrische** 29  
**Leistung, komplexe** 182, 197, 344  
**Leistungsaufnahme, maximale** 46  
**Leistungsbilanz** 29  
**Leistungsdichte** 218  
**Leistungsfaktor** 184  
**Leistungsfluss** 179, 189, 192  
**Leistungstransformator** 343  
**Leistungsumsatz** 44  
**Leiter** 13  
**Leiter, elektrischer** 13  
**Leiter, stromdurchflossener** 286, 301  
**Leiterlänge, wirksame** 309, 319  
**Leiterschleife** 287, 315, 318  
**Leiterspannung** 189  
**Leiterstab** 314  
**Leiterstrom** 191, 195  
**Leitfähigkeit, spezifische elektrische** 20, 209, 352
- Leitwert** 21  
**Leitwert, komplexer** 130, 138  
**Leitwert, magnetischer** 288  
**LENZsche Regel** 320  
**Linienendiagramm** 95  
**Linienintegral** 220  
**Linienladung** 240, 253  
**Linienladungsdichte** 240  
**LORENTZ-Kraft** 308, 315  
**Lösung, grafische** 135  
**Luftspalt** 298  
**Luftspaltgerade** 298  
**Luftspule** 288
- Magnetisierungskennlinie** 292, 298  
**Magnetisierungsstrom** 349  
**Masche, abhängige** 65  
**Masche, unabhängige** 65  
**Maschensatz** 26, 33, 65, 89, 113, 132, 148, 152, 190, 220, 262, 299, 330  
**Maschenstrom** 76, 153  
**Maschenstromanalyse** 76, 153  
**Maschenumlauf** 26  
**Maschenwiderstand** 78  
**Massivleiter** 301  
**Maximalwert** 95, 107, 116, 179  
**Maximalwertzeiger** 127  
**MAXWELLSche Gleichungen** 356, 359  
**MAXWELL-WIEN-Brücke** 145  
**Messtechnik** 52  
**Messung, spannungsrichtige** 55  
**Messung, stromrichtige** 54  
**Messwerk** 52  
**Metallfaden-Glühlampe** 85, 88  
**Mischgröße** 94  
**Mittelpunktleiter** 188  
**Mittelwert** 97  
**Mittelwert, arithmetischer** 97  
**Mittelwert, quadratischer** 99
- Nebenwiderstand** 53  
**Netzwerk, kapazitives** 283  
**Netzwerk, lineares** 65  
**Netzwerkberechnung** 65, 149  
**NF-Ersatzschaltbild** 110  
**Nichtleiter** 13  
**Nichtlinearitätskoeffizient** 86  
**Normalkomponente** 248  
**Normalwiderstand** 57  
**Nulldurchgang** 101  
**Nullindikator** 56

- Nullphasenwinkel 95
- Oberschwingung** 103
- OHMsches Gesetz 23, 218
- Oktavabstand 170
- Orientierungspolarisation 261
- Ortskurve 137, 140, 157, 173
- Parallelschaltung** 32, 35, 131, 184, 265, 331
- Parallelschaltung, gleichsinnige 333
- Parallelschwingkreis 114, 162
- Pegel 173
- Periodendauer 94
- Permeabilität 287, 299
- Permeabilität, relative 287
- Permittivität 238
- Permittivität, relative 238
- Phasendrehbrücke 147
- Phasenfrequenzgang 156, 172
- Phasenoperator 189
- Phasenrelationen 132
- Phasenspektrum 105
- Phasenwinkel 106, 123, 129, 145, 166
- Plattenkondensator 245
- Polarisation 260
- Polarisationsverluste 112
- Potential 16f, 144, 212, 214, 219
- Potential, elektrisches 80
- Potentialänderung 215
- Potentialberechnung 235
- Potentialbezugspunkt 215, 251
- Potentialdifferenz 16, 311
- Potentialfeld, elektrisches 206, 356
- Potentialgefälle 213, 233, 351
- Pressmassekern 307
- Primärspule 328
- Prinzipzeigerbild 116
- Punktladung 239, 250
- Quelle, elektrische** 40
- Quellen-Charakteristik 347
- Quellenfeld 205
- Quellenfeld, wirbelfreies 358f
- Quellenkennlinie 41, 47, 91
- Quellenleistung 30, 40
- Quellenspannung 17, 78
- Quellen-Zählpfeilsystem 18, 29, 40, 256, 289, 306
- Querstrom 50
- Querzweig 57, 118, 143, 177
- Raumladung** 239, 243, 350
- Raumladungsdichte 217, 239
- RC-Hochpass 161
- RC-Kombination 158, 269
- RC-Phasenschiebekette 142, 155
- RC-Tiefpass 158
- Reaktanz 128
- Realteil 122, 140, 144, 157
- Rechteck-Impulsfolge, periodische 105
- Rechteck-Impulsfolge, positive 342
- Rechtsschrauben-Regel 289, 308, 319, 325
- Rechtssystem 203
- Reihenschaltung 31, 33, 131, 183, 262, 277, 295, 331
- Reihenschaltung, gleichsinnige 332
- Reihenschwingkreis 113, 133, 162
- Remanenzflussdichte 294
- Resistanz 128
- Resonanzfall 140
- Resonanzfrequenz 114, 165
- Richtungspfeil 15
- Richtungssinn 15
- Ringspule 300, 307, 321, 326
- RLC-Kombination, gemischte 115
- RL-Kombination 336
- Rücktransformation 127
- Ruheinduktion 319
- Sättigungsstrom** 86
- Schaltvorgang 269, 336
- Scheinleistung 181
- Scheinleitwert 106
- Scheinwiderstand 106
- Scheinwiderstandsübersetzung 344
- SCHERING- Brücke 146
- Schleusenspannung 86
- Schrittspannung 230, 235
- Schrittspannung, maximale 232
- Schwingkreis 162
- Sekundärspule 328
- Selbstinduktion 321
- Selbstinduktionsspannung 321, 326, 329
- Selbstinduktivität 345
- SKIN-Effekt 107
- Spannung, elektrische 16f
- Spannung, induzierte 317, 320, 336
- Spannungsabfall 17
- Spannungsmessbereichserweiterung 52
- Spannungsquellen-Ersatzschaltbild 41, 71, 151
- Spannungsteiler, belasteter 49



- Spannungsteilerregel 33f, 89, 132  
Spannungsteilerregel, kapazitive 264  
Spannungsüberhöhung 167  
Spannungszählpfeil 26  
Spannungszeigerbild 118  
Spektralbereich 157  
Sperrbereich 164  
Sperrstrom 86  
Spiegelerder 234  
Spiegelladung 253, 254  
Spiegelungsprinzip 234  
Spule 288, 321, 331, 340  
Spule, reale 110  
Spule, vormagnetisierte 340  
Stabilisierungsfaktor 93  
Stellwiderstand 49  
Stern-Dreieck-Transformation 63  
Sternschaltung 59, 193  
Stetigkeit 248  
Stoff, diamagnetischer 288  
Stoff, ferromagnetischer 288  
Stoff, paramagnetischer 288  
Strangstrom 195  
Streufluss 323  
Streuinduktivität 349  
Strom, zeitlich veränderlicher 14  
Stromdichte 210  
Stromdichte, elektrische 216  
Stromdichtelinie 211  
Stromkreis, elektrischer 23  
Stromkreis, unverzweigter 17, 31  
Stromkreis, verzweigter 31  
Strommessbereichserweiterung 53  
Stromquellen-Ersatzschaltbild 41, 73, 151  
Stromröhre 210, 216, 350  
Stromröhre, differenzielle 216  
Strom-Spannungs-Kennlinie 23, 40, 54, 84  
Stromstärke 13  
Stromstärke, elektrische 13  
Stromteilerregel 35, 68, 132, 150  
Strömungsfeld 209  
Strömungsfeld, homogenes elektrisches 222  
Strömungsfeld, inhomogenes 217, 223  
Strömungsfeld, kugelsymmetrisches 224  
Strömungsfeld, zylindersymmetrisches 226  
Strömungslinie 211  
Stromzählpfeil 27  
Stromzeiger, konjugiert komplexer 183  
Superposition 68, 76, 149  
Suszeptanz 131  
Taktfrequenz 275  
Tangentialkomponente 248  
Tastverhältnis 342  
Teilstrom 37  
Temperaturabhängigkeit 21  
Temperaturkoeffizient 21, 87  
Temperaturspannung 86  
T-Ersatzschaltung 176, 334, 346  
Thermistor 87  
THOMSONSche Brückenschaltung 58  
THOMSONSche Schwingungsgleichung 114, 162  
Tiefpass 157  
Transformation 127  
Transformationsregel 62, 126  
Transformator 343  
Transformator, idealer 343  
Transformator, realer 347  
Transformator, verlustloser 329, 334  
Transformator, verlustloser und streuungsfreier 345  
Transformator-Ersatzschaltung 333  
Transformatorgleichungen 328  
Transformator-Verluste 348  
Trennfläche 245, 257  
Trennfläche, schräge 248  
Trennstelle 70, 151, 283  
Trenntransformator 343  
Übergangswiderstand 230, 235  
Überlagerung 101, 121, 222, 234, 252, 301, 328  
Übersetzungsverhältnis 343  
Übertrager 328, 343, 348  
Übertragungsvierpol 174  
Umlauf 26  
Umlaufanalyse 76, 153  
Umlaufintegral 220, 290, 356  
Umlaufsinn 66  
Umlaufspannung 319  
Ummagnetisierungsverluste 348  
Umschalten 273, 340  
Unabhängigkeitsbedingung 28, 77  
Ursache-Wirkungs-Modell 24, 208, 214, 241, 290, 292  
Varistor 86  
Vektor-Basisssystem 203  
Vektorfeld 204  
Verbindungszweig 77  
Verbraucher, symmetrischer 191

- 
- Verbraucherleistung 30
  - Verbraucherstrom 193
  - Verbraucher-Zählpfeilsystem 19, 30, 174, 255, 306, 321, 328, 337
  - Verkettungsfaktor 190
  - Verkopplung 323
  - Verlustfaktor 146
  - Verlustwiderstand 111, 163
  - Verlustwinkel 111, 112
  - Verschiebungsfluss 241, 261, 354
  - Verschiebungsflussröhre 241
  - Verschiebungspolarisation 260
  - Verschiebungsstrom 354, 355
  - Verschiebungsstrom, dielektrischer 356
  - Verschiebungsstromdichte 355
  - Vierpol 156, 174, 328, 333, 343
  - Vierpolparameter 174
  - Vollauschlagsspannung 52
  - Vollauschlagstrom 52
  - Vollkugelerder 233
  - Vorwärtsbetrieb 176
  - Vorwiderstand 52
  
  - W**andler 328
  - Wechselgröße 94, 156
  - Wechselspannung, sinusförmige 317
  - Wechselstrom-Brückenschaltung 143
  - Wechselstromkreis, gemischter 131
  - Wechselstromschaltung, spezielle 141
  - WEIßsche Bezirke 293
  - WHEATSTONEsche Brückenschaltung 57
  - Wicklung 286, 345
  - Wicklungsrichtung 324
  - Wicklungssinn 325, 328, 332
  - Wicklungssinn, gegensinniger 325
  - Wicklungssinn, gleichsinniger 325
  - Wicklungsverluste 110, 348
  - Widerstand 20f
  - Widerstand, differenzieller 23, 85
  - Widerstand, elektrischer 20
  - Widerstand, komplexer 128, 138, 144
  - Widerstand, magnetischer 288
  - Widerstand, ohmscher 106, 129
  - Widerstand, spezifischer elektrischer 20
  - Widerstands-Temperatur-Kennlinie 87
  - Windung 286, 305
  - Windungszahl 289, 293, 320, 345
  - Wirbelfeld 205, 209, 286, 301
  - Wirbelfeld, quellenfreies 359
  - Wirbelstrom 357
  - Wirbelstromverluste 348
  
  - Wirkleistung 180, 198, 343
  - Wirkleistungsmesser 199
  - Wirkspannung 183
  - Wirkstrom 184
  - Wirkungsgrad 44
  - Wirkwiderstand 106
  
  - Z**ählpfeil 15, 26, 32, 66, 116, 150, 278, 289, 316
  - Zählpfeilsystem, symmetrisches 343
  - Z-Diode 91
  - Zeiger 96
  - Zeiger, konjugiert komplexer 125, 135
  - Zeiger, rotierender 125
  - Zeiger, ruhender 125
  - Zeigerbild 107, 115, 120, 181, 190
  - Zeigerbild, qualitatives 116
  - Zeigerbild, quantitatives 116
  - Zeigerdarstellung 122
  - Zeigerdiagramm 96, 120
  - Zeitbereich 120
  - Zeitfunktion 272
  - Zeitfunktion, nichtsinusförmige 94
  - Zeitfunktion, periodische 94
  - Zeitfunktion, sinusförmige 95
  - Zeitkonstante 270, 337
  - Zweig 26, 32
  - Zweigspannung 82
  - Zweigstrom 26, 32, 68
  - Zweipol 31
  - Zweipol, aktiver 298
  - Zweipol, elementarer 106, 110
  - Zweipol, passiver 33, 38, 79, 298
  - Zweipoltheorie 70, 151, 174
  - Zweitor 174
  - Zylinderkondensator 252
  - Zylinderspule 287
  
  - II**-Ersatzschaltung 177, 335