

HANSER

Helmut Lindner, Harry Brauer, Constans Lehmann

Taschenbuch der Elektrotechnik und Elektronik

ISBN-10: 3-446-41458-4

ISBN-13: 978-3-446-41458-7

Leseprobe

Weitere Informationen oder Bestellungen unter
<http://www.hanser.de/978-3-446-41458-7>
sowie im Buchhandel.

1 Gleichstrom

1.1 Grundgrößen und Grundbegriffe

1.1.1 Elektrische Ladung

Alle elektrischen Erscheinungen beruhen auf der Anhäufung oder Bewegung *positiver* und *negativer elektrischer Ladungen*. Diese sind an die kleinsten stofflichen Teilchen (z. B. Elektronen oder Ionen) gebunden und üben auf andere, gleichfalls elektrisch geladene Körper Kraftwirkungen aus (\rightarrow 2.1.6):

| | | |
|---------------|-----------------|--------------------|
| Gleichartig | geladene Körper | stoßen einander ab |
| Ungleichartig | | ziehen einander an |

► *Hinweis:* SI-Einheit der elektrischen Ladung: $[Q] = \text{C}$ (Coulomb) = $\text{A} \cdot \text{s}$ (Amperesekunde).

Jede **elektrische Ladung** ist ein ganzzahliges Vielfaches der Elementarladung e .

$$e = \pm 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Elektronen enthalten die negative Elementarladung $-e$, während Protonen die positive Elementarladung $+e$ tragen. Elektronenüberschuss auf einem Körper verursacht seine negative, Elektronenmangel dagegen seine positive Ladung.

1.1.2 Elektrischer Strom

Augenblickswert der Stromstärke. Das Fließen eines elektrischen Stromes bedeutet die kontinuierliche oder schwingende Bewegung von Ladungsträgern in einem Leiter. Der den Leiterquerschnitt in einer kurzen Zeit dt durchfließende Ladungsanteil dQ ist der Augenblickswert der Stromstärke.

$$i = \frac{dQ}{dt} \quad (1.1)$$

Gleichstrom. Bleibt die Stromstärke über einen längeren Zeitraum t konstant, so handelt es sich um einen Gleichstrom.

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1.2)$$

► *Hinweis:* SI-Einheit der Stromstärke: $[I] = \text{A}$ (Ampere) (zur Definition \rightarrow 2.4.3).

Der Richtungssinn des Stromes entspricht der Bewegungsrichtung der positiven Ladungen vom Pluspol zum Minuspol außerhalb der Spannungsquelle (\rightarrow Bild 1.1).

Die Ladungsträger selbst können sich entweder in dieser Richtung¹⁾ (z. B. positive Ladungen, verursacht durch Elektronenmangel) oder auch entgegengesetzt (z. B. Elektronen) in einem Metalldraht bewegen (\rightarrow Bild 1.2).

In Elektrolyten und Gasen erfolgt die Stromausbreitung durch elektrisch geladene Ionen.

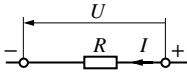


Bild 1.1 Richtungssinn des Stromes

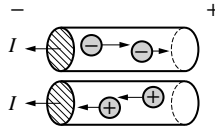


Bild 1.2 Bewegungsrichtung positiver und negativer Ladungsträger

1.1.3 Elektrische Spannung und Potenzial

Quellenspannung

Elektrische Ladungen Q mit unterschiedlichen Vorzeichen lassen sich durch äußere Energiezufuhr W_{zu} voneinander trennen.

Die Trennung elektrischer Ladungen ist die Ursache für das Auftreten einer elektrischen **Quellenspannung** U_q zwischen den Polen der entstehenden Spannungsquelle (\rightarrow Tabelle 1.1).

$$U_q = \frac{W_{\text{zu}}}{Q} \quad (1.3)$$

Die Quellenspannung ist vom Pluspol zum Minuspol der Spannungsquelle gerichtet und dem angetriebenen Strom entgegengerichtet.

Spannungsabfall

In umgekehrter Weise wird beim Fließen des Stromes im Leiter die Energie W_{ab} wieder frei, meist in Form von Wärme. Zwischen den betrachteten Leiterpunkten besteht dann der Spannungsabfall:

$$U = \frac{W_{\text{ab}}}{Q} \quad (1.4)$$

¹⁾ Aus der Ionenbewegung bei der Elektrolyse abgeleitet.

Tabelle 1.1 Erzeugen von Quellenspannungen

| Physikalische Ursache | Vorgang | Anwendung |
|---|---|--|
| Elektronenaustausch bei chemischen Reaktionen | chemische Veränderungen der Elektroden | Batterien, Akkumulatoren |
| Induktionsvorgänge in festen Leitern | Bewegung von Leitern im Magnetfeld | Dynamomaschine |
| Induktionsvorgänge in Plasmen | Bewegung von Flammgasen im Magnetfeld | magneto-hydrodynamischer (MHD-)Generator |
| Thermoelektrischer Seebeck-Effekt | Erwärmen der Kontaktstellen zwischen verschiedenen Metallen | Thermoelement |
| Piezoelektrischer Effekt | mechanischer Druck auf polare Kristalle | Dicken- und Dehnungsschwinger |
| Innerer Fotoeffekt | Lichteinstrahlung in Halbleiterkombinationen | Solarzelle |

Der Spannungsabfall hat den gleichen Richtungssinn wie der fließende Strom (\rightarrow Bild 1.1).

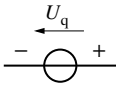


Bild 1.3 Ideale Spannungsquelle

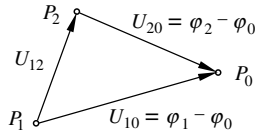


Bild 1.4 Potenzial und Spannung

Die **elektrische Spannung** U ist der Quotient aus der zur Verschiebung der Ladung Q erforderlichen Arbeit W_{zu} und dieser Ladung.

► *Hinweis:* SI-Einheit der elektrischen Spannung: $[U] = \text{V}$ (Volt).

Potenzial

Das **Potenzial** φ_1 kennzeichnet die zwischen einem Punkt P_1 des elektrischen Feldes oder Leitersystems und einem willkürlichen Bezugspunkt P_0 bestehende elektrische Spannung.

Das Potenzial ist positiv, wenn für den Transport positiver Ladung von einem Raumpunkt P_1 oder P_2 zum Bezugspunkt P_0 Arbeit aufzuwenden ist.

Haben zwei Punkte P_1 und P_2 unterschiedliches Potenzial (\rightarrow Bild 1.4), so besteht zwischen ihnen die Potenzialdifferenz bzw. die Spannung:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (1.5)$$

Die Spannung von P_1 gegen P_2 ist positiv, wenn für den Ladungstransport die zugeführte Arbeit überwiegt; d. h., $\varphi_1 > \varphi_2$.

Die elektrische Spannung ist eine Potenzialdifferenz. Ströme fließen außerhalb von Quellen von Stellen höheren Potenzials zu Stellen niedrigeren Potenzials.

1.1.4 Elektrischer Widerstand

Widerstand und Leitwert

In jedem Leiter wird die Bewegung der Ladungsträger durch seinen Widerstand R behindert:

$$R = \frac{U}{I} \quad (1.6)$$

Die Ursachen des elektrischen Widerstandes sind z. B. Störungen im exakten Aufbau des Kristallgitters in den Metallen und die unregelmäßigen Wärmeschwingungen der Atome.

► *Hinweis:* SI-Einheit des Widerstandes: $[R] = \Omega$ (Ohm).

In manchen Fällen ist es zweckmäßiger, mit dem Leitwert zu rechnen, d. i. der reziproke Wert des Widerstandes:

$$G = \frac{1}{R} \quad (1.7)$$

► *Hinweis:* SI-Einheit des Leitwertes: $[G] = \text{S}$ (Siemens) = $1/\Omega$.

Spezifischer Widerstand

Der Widerstand R ist der Länge l des Leiters direkt und seinem Querschnitt A umgekehrt proportional:

$$R = \frac{\varrho l}{A} \quad (1.8)$$

Der Proportionalitätsfaktor ϱ ist der spezifische Widerstand (\rightarrow Tabelle 1.2).

► *Hinweis:* SI-Einheit des spezifischen Widerstandes: $[\varrho] = \Omega \cdot \text{m} = 10^6 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$.

Der reziproke Wert des spezifischen Widerstandes wird als **elektrische Leitfähigkeit** \varkappa (\rightarrow Tabelle 1.2) bezeichnet.

Die *Messung* der elektrischen Leitfähigkeit \varkappa von Materialien lässt sich nach Gl. (1.8) auf eine Widerstandsmessung zurückführen. Diese erfolgt z. B. für

Tabelle 1.2 Werte des spezifischen Widerstandes, der Leitfähigkeit und von Temperaturkoeffizienten verschiedener Leiterwerkstoffe und 5%iger Elektrolyte bei $\vartheta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

| Material | Spezifischer elektrischer Widerstand $10^{-6} \frac{\rho}{\Omega \cdot \text{m}}$ | Elektrische Leitfähigkeit 10^6 S/m | Temperaturkoeffizienten | |
|------------------------------------|--|---|--------------------------------|---------------------------------|
| | | | α $10^{-4}/\text{K}$ | β $10^{-6}/\text{K}^2$ |
| Widerstandslegierungen | | | | |
| Chromnickel (80 Ni, 20 Cr) | 1,12 | 0,89 | 1,4 | – |
| Konstantan (54 Cu, 45 Ni, 1 Mn) | 0,50 | 2,0 | –0,03 | – |
| Manganin (86 Cu, 2 Ni, 12 Mn) | 0,42 | 2,38 | 0,1 ... 0,2 | 0,4 |
| Nickelin (54 Cu, 26 Ni, 20 Zn) | 0,43 | 2,27 | 1,1 | – |
| Leiter- und Kontaktmaterial | | | | |
| Leitungsaluminium | 0,0286 | 35,0 | 37 | 1,3 |
| Gold | 0,023 | 43,5 | 38 ... 40 | 0,5 |
| Leitungskupfer | 0,0178 | 56,2 | 39 | 0,6 |
| Silber | 0,0165 | 60,6 | 38 | 0,7 |
| Wolfram | 0,055 | 18,2 | 48,2 | 1 |
| Zinn | 0,12 | 8,3 | 42 ... 46 | 6 |
| Widerstandsschichtmaterial | | | | |
| Platin | 0,10 ... 0,11 | 9,1 ... 10,0 | 30 | 0,6 |
| Palladium | 0,102 | 9,8 | 37 | – |
| Kohle | 40 ... 100 | 0,01 ... 0,025 | –3,8 ... –4,0 | – |
| Sonstige Metalle | | | | |
| Eisen | 0,1 ... 0,15 | 6,67 ... 10,0 | 65,1 ... 65,7 | 6 |
| Quecksilber | 0,968 | 1,03 | 8 ... 9 | 1,2 |
| Zink | 0,061 | 16,4 | 41,9 | 2 |
| Elektrolyte | | | | |
| KOH | 0,208 | 4,80 | –200 | – |
| NaCl | 0,724 | 13,82 | –200 | – |
| CuSO ₄ | 0,020 | 50,40 | –200 | – |

Elektrolytflüssigkeiten in Messzellen, die mit einer Kochsalzlösung bekannter Leitfähigkeit kalibriert werden. Polarisierungseffekte der Elektroden lassen sich durch Nutzung von Wechselstrom mit Frequenzen bis zu mehreren kHz ausschalten.

$$\boxed{\kappa = \frac{1}{\rho}} \quad (1.9)$$

► *Hinweis:* SI-Einheit der Leitfähigkeit: $[\kappa] = \text{S/m}$ (Siemens/Meter) = $1/(\Omega \cdot \text{m})$.

Widerstand und Temperatur

Der spezifische Widerstand ist als Materialkonstante mehr oder weniger temperaturabhängig.

Als **Temperaturkoeffizient** α gilt die relative Widerstandsänderung $\Delta R/R_{20}$ gegenüber der auf 20°C bezogenen tatsächlichen Temperaturänderung $\Delta\vartheta$:

$$\boxed{\alpha = \frac{\Delta R}{\Delta\vartheta R_{20}}} \quad (1.10)$$

R_{20} Widerstand bei der Temperatur $\vartheta = 20^\circ\text{C}$

Demnach beträgt der Widerstand bei der beliebigen Temperatur ϑ :

$$R = R_{20}(1 + \alpha\Delta\vartheta) = R_{20}[1 + \alpha(\vartheta - 20^\circ\text{C})] \quad (1.11)$$

Diese einfache lineare Beziehung gilt jedoch nur näherungsweise für bestimmte Werkstoffe und ist bei höheren Temperaturen durch den Ausdruck

$$R = R_{20}(1 + \alpha\Delta\vartheta + \beta\Delta\vartheta^2) \quad (1.12)$$

zu ersetzen, der die Kenntnis eines zweiten Temperaturkoeffizienten β voraussetzt (\rightarrow Tabelle 1.2).

► *Beachte:* Verschiedene Elektrolyte (elektrisch leitende Flüssigkeiten) und Halbleiter haben im Gegensatz zu Metallen einen negativen Temperaturkoeffizienten, d. h., ihr Widerstand nimmt mit steigender Temperatur ab. Für Messwiderstände werden Legierungen mit möglichst kleinem Temperaturkoeffizienten, wie z. B. Konstantan, verwendet.

Supraleitung

Supraleitung definiert das sprunghafte Verschwinden des elektrischen Widerstandes unterhalb einer bestimmten Temperatur.

Verschiedene elektrische Leiter zeigen bei tiefen Temperaturen kein allmähliches, sondern ein sprunghaftes Verschwinden ihres Widerstandes. Die Sprungtemperatur T_s (\rightarrow Bild 1.5) ist materialabhängig (\rightarrow Tabelle 1.3). Bei

Supraleitung sind die verlustarme Übertragung großer Energiemengen und die Erzeugung von Dauerströmen möglich (Kryoelektronik).

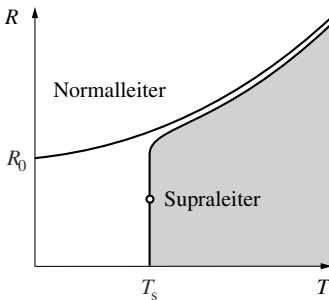


Bild 1.5 Temperaturabhängigkeit des Widerstandes von Leitern bei tiefen Temperaturen
 R_0 Restwiderstand
 T_s Sprungtemperatur

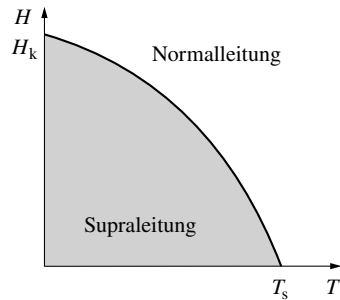


Bild 1.6 Einfluss der magnetischen Feldstärke H auf einen Supraleiter für $T < T_s$
 H_k kritische magnetische Feldstärke
 $H < H_k$ supraleitender Zustand
 $H > H_k$ normalleitender Zustand

Der supraleitende Zustand wird bei $T > T_s$ oder bei Einwirkung eines äußeren Magnetfeldes der Feldstärke $H > H_k$ wieder aufgegeben (\rightarrow Bild 1.6).

Verbindungen mit Sprungtemperaturen von mehr als 25 K werden als Hochtemperatursupraleiter bezeichnet. Diese werden z. Z. in der Technik eingeführt.

In der Praxis dominieren gegenwärtig Metalle.

Tabelle 1.3 Sprungtemperaturen verschiedener Materialien

| Metalle | T_s in K | Jahr | Keramiken | T_s in K | Jahr |
|--|------------|------|---|------------|------|
| Pb | 7,2 | 1911 | Ba _{0,6} K _{0,4} BiO ₃ | 28 | 1988 |
| Nb | 9,3 | 1930 | La-Ba-Cu-O | 35 | 1986 |
| Nb ₃ Ge, Nb ₃ Sn | 23,2 | 1957 | YBa ₂ Cu ₃ O ₇ | 92,1 | 1987 |
| MgB ₂ | 40 | 2001 | Hg-Ba-Ca-Cu-O | 130 | 2001 |

■ Anwendung:

- supraleitende Magneten in der Medizintechnik (\rightarrow 2.4.5.5)
- supraleitende Schalt- und Speicherelemente
- Neuentwicklungen in der Messtechnik (Bolometer, SQUID-Magnetometer)
- im GHz-Bereich arbeitende Miniaturantennen.

1.1.5 Ohm'sches Gesetz

Lineare Widerstände

In metallischen Leitern ist bei konstanter Temperatur der Spannungsabfall U dem fließenden Strom I proportional. Der Proportionalitätsfaktor ist der Widerstand R . Dies führt zum Ohm'schen Gesetz:

$$R = \frac{U}{I} = \text{const.} \quad (1.13)$$

Weitere Schreibweisen:

$$I = \frac{U}{R} \quad I = GU \quad U = RI \quad (1.14)$$

Die Kennlinie des ohmschen Widerstandes (Wirkwiderstand) ist eine Gerade durch den Koordinatenursprung, deren Anstieg $\Delta I/\Delta U$ den Leitwert G darstellt (\rightarrow Bild 1.7a).

Nichtlineare Widerstände

Viele Materialien und elektronische Bauelemente haben nichtlineare Kennlinien, d. h., der Spannungsabfall zeigt keine Proportionalität gegenüber dem fließenden Strom. Im Allgemeinen werden vier verschiedene Typen nichtlinearer Kennlinien unterschieden:

- Heißeiter (z. B. Thermistoren, \rightarrow Bild 1.7, 2)
- Kaltleiter (z. B. PTC-Widerstände, \rightarrow Bild 1.7, 3)
- Sättigungskennlinien (z. B. Gasdioden, \rightarrow Bild 1.7, 4)
- Halbleiter (z. B. Varistoren, \rightarrow Bild 1.7, 5)

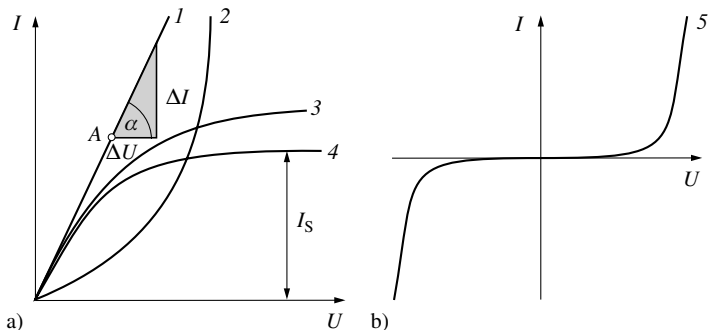


Bild 1.7 Strom- und Spannungs-Kennlinien von Widerständen; 1 ohmscher Widerstand, 2 Heißeiter, 3 Kaltleiter, 4 Sättigungskennlinie, 5 Halbleiter

Weitere Kennlinien sind an spezielle elektronische Bauelemente gebunden (\rightarrow 6.7 bis 6.12).

Im nichtlinearen Teil einer Kennlinie hat der Widerstand in jedem Punkt einen anderen Wert und wird daher als **differenzieller Widerstand** ausgedrückt:

$$r = \frac{dU}{dI} \approx \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (1.15)$$

Er ist gleich dem reziproken Wert des Anstieges der Kennlinie im Arbeitspunkt A , dargestellt durch $1/\tan \alpha$.

1.1.6 Elektrische Arbeit und Leistung

Die **elektrische Arbeit** (Energie) W wird zum Transport der Ladung Q unter der Spannung U benötigt (Gl. (1.3)).

$$W = UQ \quad (1.16)$$

► *Hinweis:* SI-Einheit der Energie (Arbeit):

$$[W] = \text{J (Joule)} = \text{W} \cdot \text{s (Wattsekunde)} = \text{V} \cdot \text{A} \cdot \text{s}.$$

$$1 \text{ kWh (Kilowattstunde)} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot \text{s} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

(elektrisches Wärmeäquivalent)

Die **elektrische Leistung** des Stromes ergibt sich aus dem Quotienten der umgesetzten Leistung und der dazu benötigten Zeit.

$$P = \frac{dW}{dt}$$

Wenn die Leistung über einen längeren Zeitraum t *konstant* bleibt, gilt:

$$P = \frac{W}{t} \quad (1.17)$$

Mit den Gln. (1.2) und (1.16) ergibt sich:

$$P = UI \quad (1.18)$$

Die in einem Leiter umgesetzte Leistung ist sowohl der Spannung als auch dem Strom proportional.

► *Hinweis:* SI-Einheit der Leistung: $[P] = \text{W (Watt)} = \text{J/s}$.

Wird nach Gl. (1.6) $I = U/R$ bzw. $U = IR$ eingesetzt, so ergibt sich:

$$P = \frac{U^2}{R} \quad P = I^2 R \quad (1.19)$$

Stromwärme. Je nach Leiteranordnung kann die Stromarbeit nach Gl. (1.16) auch in andere Energieformen umgewandelt werden, z. B. die Stromwärme Q_{el} (Gesetz von Joule).

$$Q_{\text{el}} = I^2 R t$$

Wirkungsgrad

Der **Wirkungsgrad** η eines Verbrauchers elektrischer Leistung wird als Verhältnis der von ihm abgegebenen Nutzleistung P_N und der zugeführten Leistung definiert.

Die zugeführte Leistung ist um den Leistungsverlust P_V (Stromwärme, mechanische Reibung usw.) größer als die Nutzleistung.

$$\eta = \frac{P_N}{P_N + P_V} \quad (1.20)$$

1.2 Zusammengesetzte Widerstände

1.2.1 Reihenschaltung von Widerständen und Spannungsteilung

Durchfließt der Strom I mehrere Widerstände nacheinander, so sind diese in Reihe geschaltet (\rightarrow Bild 1.8), und es gilt:

- Die Stromstärke ist in allen Widerständen gleich groß.
- Die Spannungsabfälle an den Widerständen addieren sich zur Gesamtspannung U :

$$\begin{aligned} U &= U_1 + U_2 + \dots + U_n \\ &= IR_1 + IR_2 + \dots + IR_n \end{aligned}$$

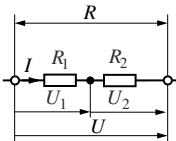


Bild 1.8 Reihenschaltung von zwei Widerständen (einfacher Spannungsteiler)

Daraus folgt:

Der Gesamtwiderstand R in Reihe liegender Widerstände ist gleich der Summe der Einzelwiderstände.

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$