

Marika Höwing

Einführung in die Elektrotechnik

3., durchgesehene Auflage

Ab dem 1. Semester

Nikola
Tesla

- ▶ Grundlagen verstehen, Wissen anwenden
- ▶ Physik und Mathematik des Grundstudiums
- ▶ Gleich- und Wechselstromkreise, Elektromagnetismus, Drehstrom, Netzwerk, Schaltungen

Mit Aufgaben und Musterlösungen zu jedem Gebiet

Kapitel 4

Gleichstrom

Dieses Kapitel handelt vom Aufbau einfacher Gleichstromkreise. In ihm werden folgende Fragen beantwortet: Wie funktioniert die Spannungsversorgung, woraus besteht ein Stromkreis, welche grundlegenden Schaltungen gibt es und wie werden sie berechnet?

In Kapitel 2 haben Sie grundlegende Begriffe wie *Ladung*, *Spannung*, *Strom* und *Leistung* kennengelernt. Sie haben gesehen, dass Ladungen ein Potenzial besitzen und dass eine Potenzialdifferenz, die wir Spannung nennen, einen Stromfluss bewirken kann.

4.1 Strom- und Spannungsquellen

Nun stellt sich die grundsätzliche Frage: »Wo kommt die Spannung her und wo kommen die Ladungen her, die sich bewegen, also den Stromfluss darstellen?« Dazu schauen Sie sich genauer eine elementare Spannungsquelle an, das galvanische Element.

4.1.1 Galvanisches Element

Der grundsätzliche Aufbau eines *galvanischen Elements* besteht aus zwei Elektroden, die durch ein Elektrolyt miteinander in Verbindung stehen. Abbildung 4.1 zeigt ein Beispiel.

Ein *Elektrolyt* ist ein Stoff, in dem sich Ionen bewegen können. Der Stoff muss aber nicht zwingend eine Flüssigkeit sein, auch wenn sie häufig zur Anschauung herangezogen wird.

Bei galvanischen Elementen unterscheidet man *Primärelemente*, *Sekundärelemente* und *Tertiärelemente*.

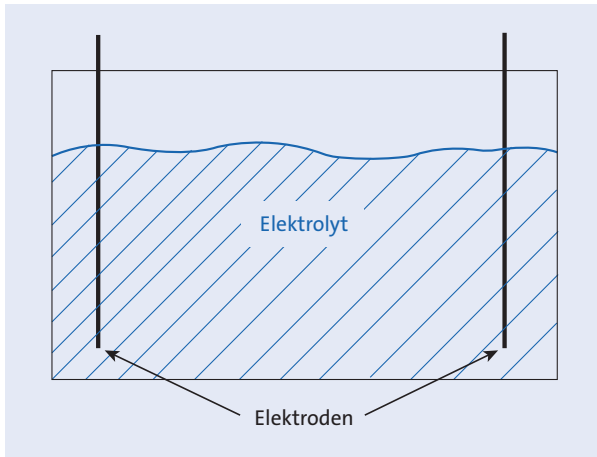


Abbildung 4.1 Schematische Darstellung eines galvanischen Elements

Batterie

Das gängigste Beispiel für ein Primärelement ist die *Batterie*. Sie besteht aus einem oder mehreren galvanischen Elementen.

Die klassische Batterie ist die Zink-Kohle-Batterie (Zn-C-Batterie). Am Namen können Sie ablesen, aus welchen Materialien die Elektroden bestehen: Eine besteht nämlich aus Zink und die andere aus Kohlenstoff.

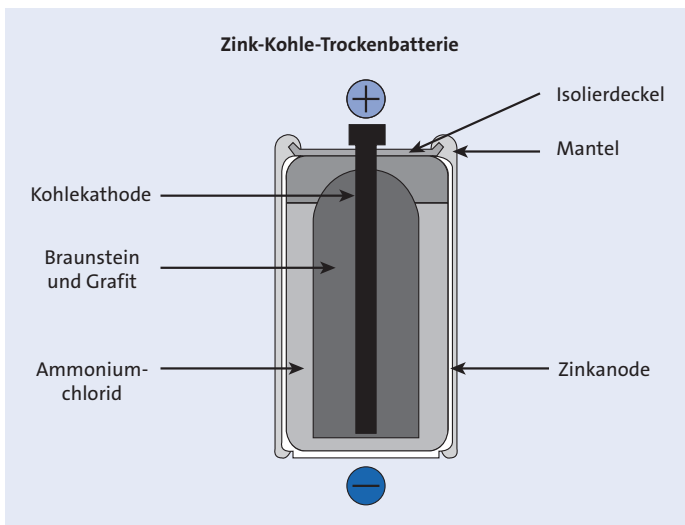


Abbildung 4.2 Schnitt durch eine Zink-Kohle-Batterie

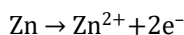
Der Elektrolyt, also der Stoff zwischen diesen Elektroden, ist bei Zn-C-Batterien Braunstein und Salmiak als extrem dickflüssige Lösung. Im Gegensatz zu einer Autobatterie, in der sich der Elektrolyt aus destilliertem Wasser und Schwefelsäure zusammensetzt und daher eine wässrige Konsistenz besitzt, werden diese Batterien auch als *Trockenbatterien* bezeichnet.

Abbildung 4.2 zeigt den genauen Aufbau einer Zink-Kohle-Batterie.

Spannungserzeugung in einer Batterie

Der Salmiak, NH_4Cl , chemisch Ammoniumchlorid genannt, greift die Oberfläche des Zinks an. Er ionisiert das Zink, d. h., er zerlegt ein Zinkatom in ein positives Zn^{2+} -Ion und in die beiden freien Elektronen des Zinks. Dann löst er einige positive Zink-Ionen aus der Oberfläche heraus. Somit ist die Zinkelektrode jetzt negativ geladen.

Chemisch gesehen, ist bisher Folgendes passiert:

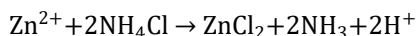


Zinkionen werden gelöst, die Elektrode wird negativ.

Bei dieser Reaktion spricht man von einer *Oxidation*. Eine Oxidation ist nicht zwingend eine Reaktion mit Sauerstoff, sondern die Abgabe von Elektronen – und das ist genau das, was mit dem Zink passiert.

Die Elektrode, an der die Oxidation stattfindet, wird als *Anode* bezeichnet.

Im weiteren Verlauf reagieren die Zinkionen mit dem Salmiak:



Zwischen der Zinkelektrode und der Kohlenstoffelektrode herrscht nun, da die Zinkelektrode durch das Aufspalten des Zinks negativ geladen ist, eine Spannung. Die Elektroden werden nun als Minus- und Pluspol bezeichnet. Damit innerhalb der Batterie kein Strom von Minus- zum Pluspol fließt und möglicherweise ein Kurzschluss entsteht, sind sogenannte *Separatoren* in der Batterie eingebaut. Ein Separator besteht aus isolierendem Material, ist aber für Ionen durchlässig.

Schließen Sie nun diese Batterie an einen Verbraucher an, z. B. an einen Kupferdraht, so bewegen sich die Elektronen durch den Draht von der Zinkelektrode zur Kohlenstoffelektrode. Es fließt also ein Strom. (Wieso Kupfer leitet, sehen Sie im nächsten Abschnitt.)

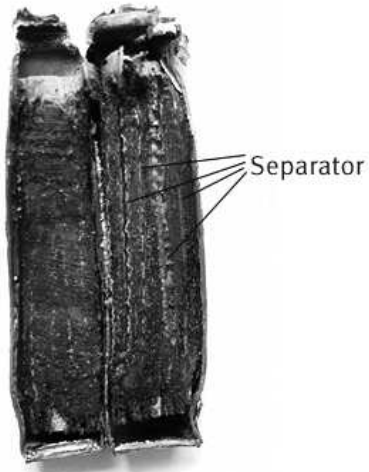


Abbildung 4.3 Schnitt durch eine leere galvanische Zelle

Sind die Elektronen nun am Pluspol angekommen, kommt das Mangandioxid (Mn_2O_2) ins Spiel. Es »fängt« die freien Elektronen und die aus der Reaktion mit dem Salmiak freigewordenen H^+ -Ionen ein und verbindet sich mit ihnen zu Braunstein (einem Manganoxid) und Wasser:

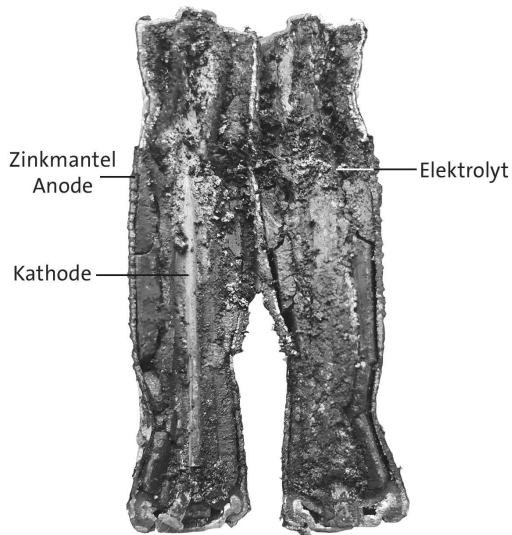
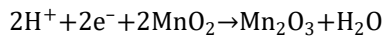


Abbildung 4.4 Das Innenleben einer leeren Batterie

An der Kohlelektrode werden also Elektronen vom Mangandioxid aufgenommen. Diese Reaktion heißt *Reduktion*, und die Elektrode, an der die Reduktion stattfindet, heißt *Kathode*.

Durch den Stromfluss sind nun die abschirmenden Elektronen an der Anode abgeflossen und der Salmiak ionisiert das verbleibende Zink weiter. Dadurch werden weitere Elektronen geliefert und die Spannung wird aufrechterhalten.

Dieses Verfahren hat aber zwei Nachteile:

- ▶ Irgendwann sind das Zink und der Braunstein verbraucht. Das heißt: Es werden an der Anode weniger Elektronen »erzeugt« und an der Kathode können weniger Elektronen und H^+ -Ionen durch die Reaktion mit Braunstein gefangen werden. Die Spannung sinkt also. Im allgemeinen Sprachgebrauch bezeichnet man so eine Batterie dann als »leer« (siehe Abbildung 4.4).
- ▶ Da die Zinkelektrode den Außenkörper der Batterie darstellt, kann er brüchig werden und der Elektrolyt kann austreten. Das bezeichnet man dann als *Auslaufen* (siehe Abbildung 4.5).



Abbildung 4.5 Ausgelaufene Batterie

Andere Batteriearten, z. B. Alkaline-Batterien, sind ausgereifter, da andere chemische Reaktionen ablaufen. Sie behalten dadurch eine annähernd konstante Spannung, bis die Zelle komplett verbraucht ist.

Die Spannung, die zwischen Anode und Kathode erzeugt wird, hängt von den verwendeten Materialien ab, z. B.:

- ▶ Alkali-Mangan-Batterie: 1,5 V
- ▶ Zink-Kohle-Batterie: 1,5 V
- ▶ Lithium-Batterien: je nach Kathodenmaterial unterschiedlich von 1,5–3,7 V.

Akkumulator (Akku)

Ein *Akkumulator*, kurz *Akku*, ist ein sogenanntes *Sekundärelement*. Charakteristisch für diese Zelle ist, dass sie wiederaufladbar ist.

Die Bestandteile und den Aufbau eines Akkus zeigt Ihnen Abbildung 4.6.

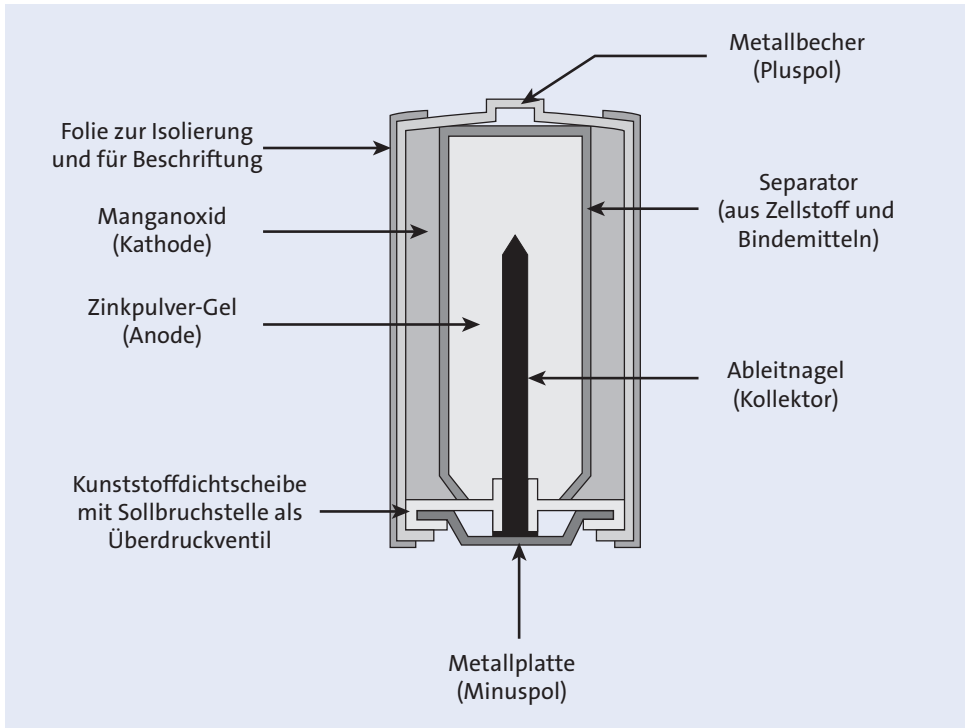


Abbildung 4.6 Schematische Darstellung eines Akkus

Akkus findet man heutzutage überall: im Handy, im Rasierapparat, in Werkzeugen etc. Eine Art von Akku wird fälschlicherweise als »Batterie« bezeichnet, nämlich die Autobatterie. Eine Autobatterie ist ein Bleiakkumulator: Die Elektroden bestehen aus Blei und als Elektrolyt wird Schwefelsäure H_2SO_4 (in wässriger Lösung) verwendet.

Entladung

Die chemische Reaktion, die an der Anode stattfindet, verläuft im Akkumulator genauso wie bei der Batterie, nur dass in ihm andere Stoffe eine Rolle spielen.

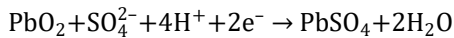
Die Schwefelsäure verbindet sich mit dem Blei, und bei dieser Reaktion werden Elektronen frei. Die Anodenreaktion wird mit



beschrieben.

Die Elektronen können sich nun auf den Weg durch einen geschlossenen Stromkreis machen.

An der Kathode werden wieder freie Elektronen und H^+ -Ionen gebunden:



Der Akku ist entladen, wenn das Blei keine freien Elektronen mehr liefert, also genauso wie bei der Batterie, bei der die gewünschte Spannung nicht mehr aufrechterhalten werden kann.

Aufladung

Um den Akku wieder aufzuladen, wird von außen eine Spannung angelegt (siehe Abbildung 4.7).

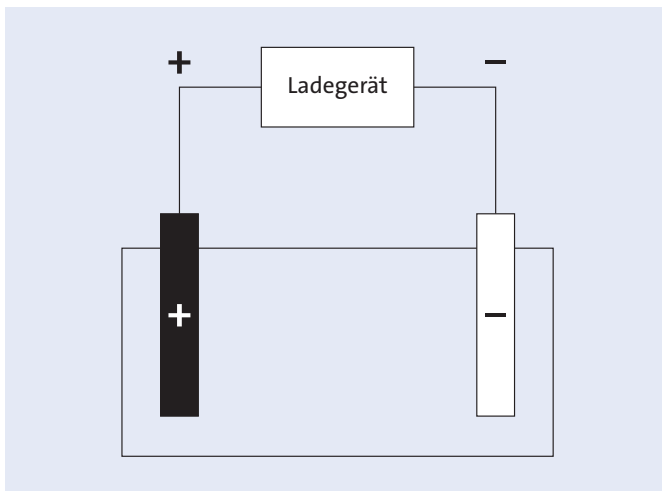
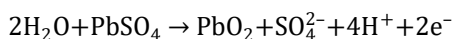


Abbildung 4.7 Aufbau bei der Ladung eines Akkus

Durch das Anlegen der Spannung laufen die Reaktionen der Entladung in entgegengesetzter Richtung ab.

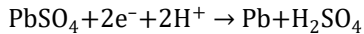
Durch die angelegte Spannung wird folgende Reaktion angeregt:



Da es sich hierbei um eine Oxidation handelt, ist der Pluspol nun die Anode.

Im allgemeinen Sprachgebrauch wird die Anode als »Pluspol« und die Kathode als »Minuspol« bezeichnet, das ist aber falsch: Ob eine Elektrode die Anode oder die Kathode ist, hängt nur von der dort stattfindenden chemischen Reaktion ab.

Die freien Elektronen werden an der anderen Elektrode vom Blei wieder aufgenommen, und durch $\text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+$ wird die Schwefelsäurekonzentration wiederhergestellt:



Die Anode der Entladung ist durch die Aufnahme von Elektronen nun zur Kathode geworden.

Im Vergleich zur Entladung haben Plus- und Minuspol also ihre Rollen vertauscht. Die Anode wird bei der Entladung zur Kathode und umgekehrt.

Auch beim Akku sind, um unerwünschte Verbindungen zwischen den Elektroden zu verhindern, Separatoren verbaut.

Aus Umweltschutzgründen werden Akkus, die Quecksilber, Cadmium oder auch Blei enthalten, nur bis auf einige Ausnahmen noch verwendet. Zu diesen Ausnahmen gehört z. B. die Autobatterie, da die Funktion dieses Akkus auch durch große Temperaturschwankungen nicht wesentlich eingeschränkt wird. Der meistverwendete Akku ist der technisch ausgereifere Lithium-Ionen-Akku.

4.1.2 Spannungsquelle

Das Charakteristikum einer Spannungsquelle ist, dass sie eine konstante Spannung liefert. Zu den Spannungsquellen zählt man Batterien, Akkus, stabilisierte Netzteile, Generatoren und Transformatoren, die unter anderem auch die Spannung an unseren Steckdosen liefern.

Der Strom, der bei Anschluss einer Spannungsquelle fließt, kann variieren, je nachdem, welcher Verbraucher angeschlossen wird. Bei einem Verbraucher mit einem kleinen Widerstand fließt ein großer Strom und umgekehrt, aber die Spannung bleibt konstant.

Eine Spannungsquelle wird als *ideale Spannungsquelle* bezeichnet, wenn sie zeitlich unbegrenzt eine konstante Spannung liefert. Das Wort »ideal« kommt in diesem Fall von »Idee«, denn es ist nur eine Idee: Solche Spannungsquellen gibt es nicht.

Das Schaltbild einer idealen Spannungsquelle sehen Sie in Abbildung 4.8.

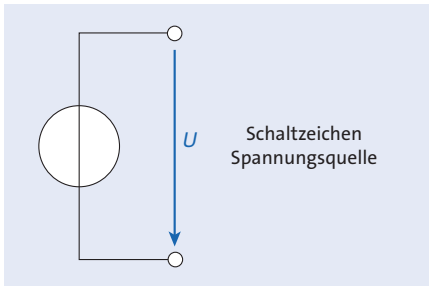


Abbildung 4.8 Schaltzeichen einer idealen Spannungsquelle

Möchte man kennzeichnen, dass es sich um eine Gleichspannungsquelle handelt, werden häufig auch die Schaltzeichen aus Abbildung 4.9 benutzt.

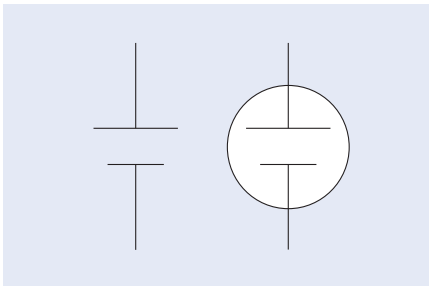


Abbildung 4.9 Schaltzeichen von Gleichspannungsquellen.
Der lange Pol stellt den Pluspol dar.

4.1.3 Stromquelle

Eine Stromquelle liefert laut Definition einen konstanten Strom. Natürlich muss auch eine Spannung vorhanden sein, denn ohne Spannung gibt es keinen Strom. Aber die Spannung kann ohne Weiteres variieren. Wesentlich ist, dass der Stromfluss konstant ist. Als Stromquelle dienen Schaltungen von elektronischen Bauelementen, z. B. von Transistoren, Fotodioden und vielen mehr. Sie liefern real natürlich keinen hundertprozentig konstanten Strom, aber annähernd.

Wie bei den Spannungsquellen gilt auch hier: Eine Stromquelle, die unbegrenzt einen konstanten Strom liefert, ist eine *ideale Stromquelle*. Auch solchen Quellen gibt es nicht.

Wie reale Strom- und Spannungsquellen zu behandeln sind, können Sie sich am Ende dieses Kapitels anschauen. Das Schaltzeichen sehen Sie bereits in Abbildung 4.10.

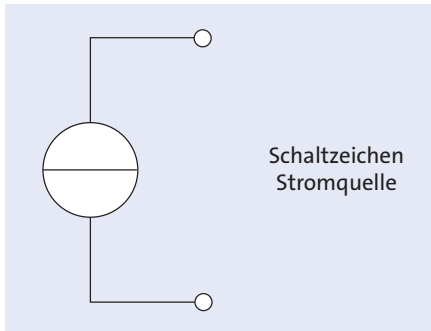


Abbildung 4.10 Schaltzeichen einer idealen Stromquelle

4.2 Widerstand und Leitwert

Zwischen den Polen einer Spannungsquelle liegt eine Spannung an. In Kapitel 2 haben Sie gesehen, dass die Spannung die Grundlage eines Stromflusses ist und dass Strom die gerichtete Bewegung von Ladungen ist.

Der Stromfluss erfolgt zwischen den Polen der Spannungsquelle, aber dazu müssen die Pole miteinander in Verbindung stehen und in dieser Verbindung müssen Ladungen vorhanden sein, die dann in Bewegung gesetzt werden.

Schauen Sie sich dazu den Versuchsaufbau aus Abbildung 4.11 an.

Sie legen nacheinander eine Spannung von 10 V an verschiedene Stäbe an. Die Stäbe haben eine Länge von $l = 1 \text{ m}$ und einen Querschnitt von $A = 1 \text{ mm}^2$.

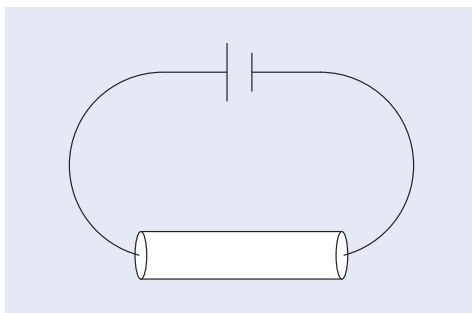


Abbildung 4.11 An einen Stab aus einem bestimmten Material mit der Länge 1 m und dem Querschnitt 1 mm^2 wird eine feste Spannung angeschlossen.

Die Materialien, aus denen die Stäbe bestehen, seien Kupfer, Kohlenstoff, Silber und Pertinax (ein spezieller Kunststoff).

Nach dem Anlegen der Spannung wird der Strom I gemessen, der in diesen Stäben fließt. Sie stellen fest, dass der Stromfluss sehr unterschiedlich ist:

$$I_{\text{Cu}} = 560 \text{ A}$$

$$I_{\text{C}} = 1 \text{ A}$$

$$I_{\text{Ag}} = 614 \text{ A}$$

$$I_{\text{Pert}} = 1 \cdot 10^{-12} \text{ A}$$

Das Verhältnis von angelegter Spannung zu fließendem Strom wird als *Widerstand* R bezeichnet. Die Einheit des Widerstands ist *Ohm*, nach Georg Simon Ohm, und wird mit Ω abgekürzt.

$$1 \Omega = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ A}}$$

Das Schaltzeichen für einen Widerstand sehen Sie in Abbildung 4.12.

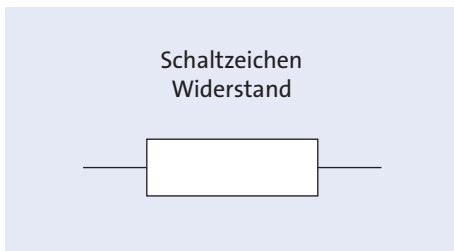


Abbildung 4.12 Schaltzeichen eines Widerstandes

4.2.1 Das Ohm'sche Gesetz

Wenn bei konstanter Spannung ein kleiner Strom fließt, ist der Widerstand groß, und wenn ein großer Strom fließt, ist der Widerstand klein. Dieser Sachverhalt ist als *Ohm'sche Gesetz* bekannt. Es lautet:

$$I = \frac{U}{R} \quad [4.1]$$

Besser bekannt ist diese Formel, wenn sie nach U umgestellt wird, als Merkwort URI:

$$U = R \cdot I \quad [4.2]$$

Das Ohm'sche Gesetz in dieser Form wird in der Praxis verwendet, wenn das Verhältnis zwischen Strom und Spannung konstant ist, wenn also der Strom proportional zur Spannung ansteigt oder fällt.

Wenn Sie nun den Widerstand der Stäbe aus dem Versuch berechnen möchten, wird das Ohm'sche Gesetz nach R umgestellt:

$$[4.3] \quad R = \frac{U}{I}$$

Dann setzen Sie die jeweiligen Werte ein. Abbildung 4.13 zeigt die Ergebnisse in einem Koordinatensystem.

$$R_{\text{Cu}} = \frac{10 \text{ V}}{560 \text{ A}} = 17,9 \text{ m}\Omega$$

$$R_{\text{C}} = \frac{10 \text{ V}}{1 \text{ A}} = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_{\text{Ag}} = \frac{10 \text{ V}}{614 \text{ A}} = 16,3 \text{ m}\Omega$$

$$R_{\text{Pert}} = \frac{10 \text{ V}}{1 \cdot 10^{-12} \text{ A}} = 10 \cdot 10^{12} \Omega$$

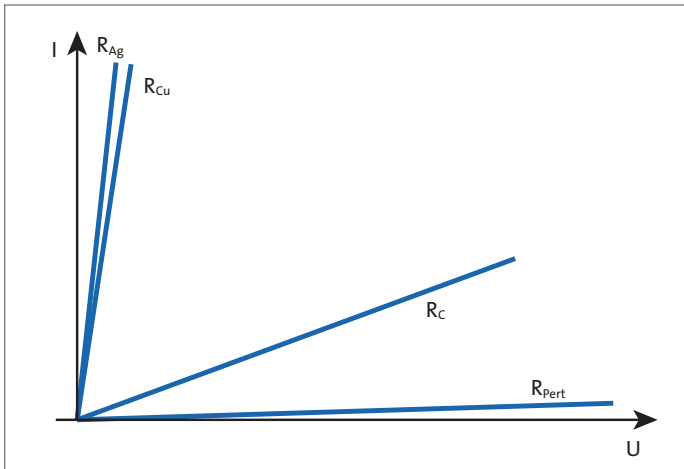


Abbildung 4.13 Widerstandsverhalten unterschiedlicher Materialien

Der Widerstand gibt an, wie sehr der Stromfluss »gebremst« wird. Schaut man sich den Sachverhalt von der anderen Seite an, möchte man also wissen, wie »gut« der Strom fließen kann, betrachtet man den *Leitwert* G . Der Leitwert ist nichts anderes als der Kehrwert des Widerstandes:

$$[4.4] \quad G = \frac{1}{R}$$

Die Einheit des Leitwertes ist *Siemens* S:

$$1 \text{ S} = \frac{1}{\Omega} = \frac{1 \text{ A}}{1 \text{ V}} \quad [4.5]$$

4.2.2 Spezifischer Leitwert und spezifischer Widerstand

Nun schauen Sie sich noch einmal die gemessenen Ströme an:

$$I_{\text{Cu}} = 560 \text{ A}$$

$$I_{\text{C}} = 1 \text{ A}$$

$$I_{\text{Ag}} = 614 \text{ A}$$

$$I_{\text{Pert}} = 1 \cdot 10^{-12} \text{ A}$$

Die Größe des Stromes ist je nach Material unterschiedlich. Bei Kupfer und Silber fließt ein großer Strom, bei Grafit ist der Strom relativ klein und bei Pertinax praktisch nicht vorhanden. Es gibt also Stoffe, die Strom gut weiterleiten, und Stoffe, die ihn schlecht oder gar nicht leiten.

Diese Eigenschaft wird als *spezifische Leitfähigkeit* κ bezeichnet. Sie ist eine Materialeigenschaft, deshalb heißt sie »spezifisch«.

Wenn Sie sich den allgemeinen Aufbau eines Metalls anschauen, wie den des Kupfers in Abbildung 4.14, wird auch deutlich, warum Metalle Strom besser leiten als Nichtmetalle.

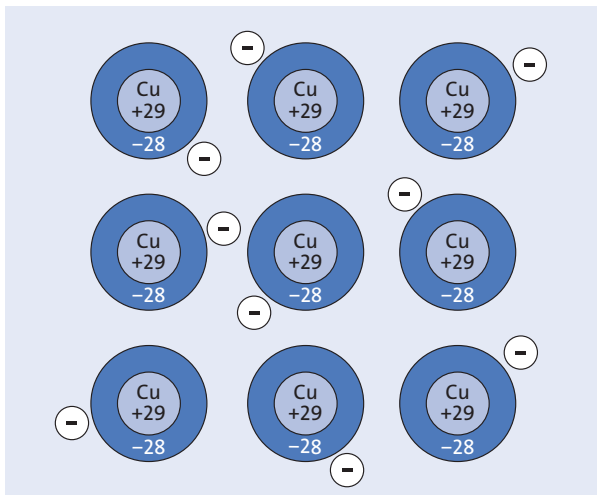


Abbildung 4.14 Aufbau eines Kupferblechs

Bei Metallen sind die Elektronen auf der äußersten Schale, auch *Leitungselektronen* genannt, frei beweglich. Sie sind praktisch nicht mehr an ihr Atom gebunden. Der Name *Valenzelektronen*, der häufig in diesem Zusammenhang verwendet wird, ist nicht ganz korrekt, denn Valenzelektronen sind die Elektronen auf der Außenschale. Jedes Atom besitzt Valenzelektronen, aber nur bei Metallen sind sie frei.

Schauen Sie sich das Bändermodell aus Abbildung 4.15 und Abbildung 4.16 an. Als *Bänder* werden verschiedene Energiebereiche innerhalb eines Atoms bezeichnet. Dort sehen Sie, dass die freien Elektronen im energetisch höher liegenden Leitungsband liegen. Sie werden auch als *Elektronengas* bezeichnet.

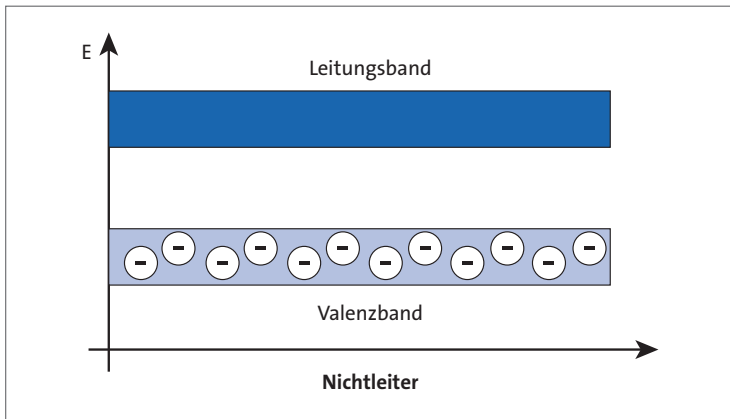


Abbildung 4.15 Bänderdarstellung eines Nichtleiters

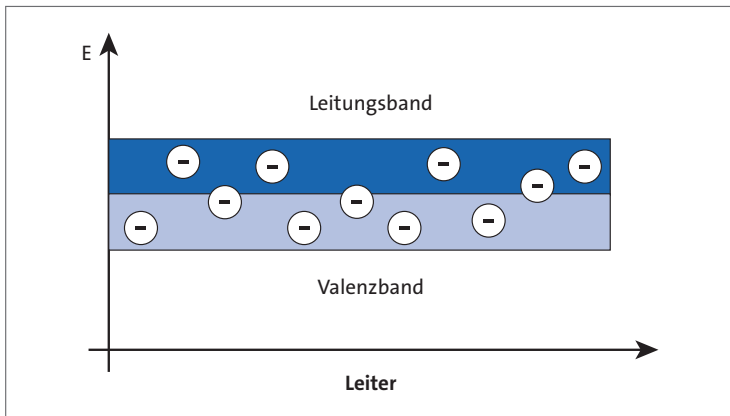


Abbildung 4.16 Bänderdarstellung eines Leiters. Befinden sich Elektronen im Leitungsband, so sind sie frei.

Liegt also an den Enden eines Metalldrahtes eine Spannung an, so können die Elektronen ohne große Probleme in Richtung Pluspol wandern. Diese Wanderung können Sie sich wie in Abbildung 4.17 vorstellen.

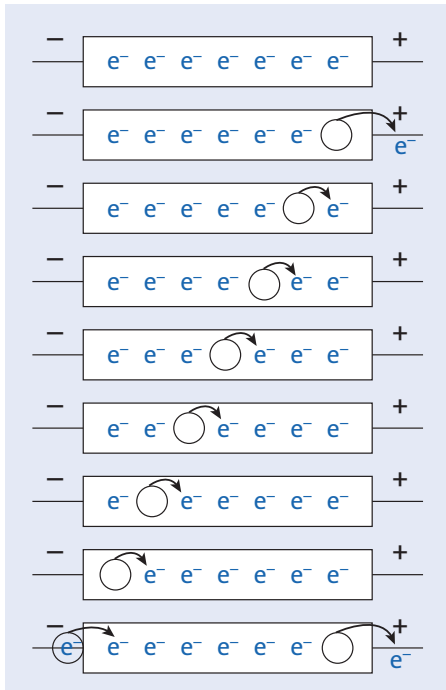


Abbildung 4.17 Bewegung von Elektronen in einem Leiter

Die freien Elektronen in der Nähe des Pluspols werden vom Pluspol angezogen und bewegen sich zu ihm hin. Die Elektronen hinterlassen sogenannte *Löcher*. An den Löchern herrscht dann ein positives Potenzial, das wiederum weitere Elektronen anzieht. Diese Wanderung setzt sich in dem gesamten Draht fort. Da der Minuspol der Spannungsquelle kontinuierlich Elektronen nachliefert, fließt kontinuierlich ein Strom durch den Draht.

Wenn Sie sich die Bewegung der Elektronen anschauen, bewegen sie sich vom Minuspol zum Pluspol. Die Löcher scheinen sich vom Pluspol zum Minuspol hin zu bewegen. Tatsächlich bewegen sie sich natürlich nicht, sondern sitzen fest und werden nur vom Minuspol aus mit Elektronen gefüllt.

Diese scheinbare Bewegung wird *Löcherstrom* genannt.

Vergleichen Sie den Aufbau eines guten Leiters, z. B. Kupfer, mit einem schlechter leitenden Material, z. B. Silizium, so können Sie erkennen, warum der Stromfluss in den

verschiedenen Materialien so unterschiedlich ist. Den Aufbau von Silizium-Atomen zeigt Ihnen Abbildung 4.18.

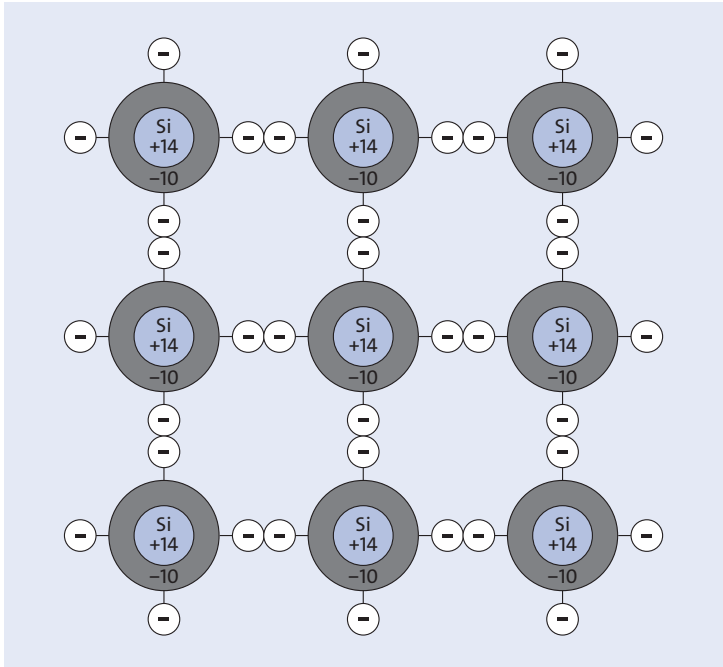


Abbildung 4.18 Bindung von Siliziumatomen

Im Silizium herrscht eine feste Kristallstruktur vor. Die Atome, inklusive aller Elektronen haben ihren festen Platz. Es sind keine freien Elektronen vorhanden. Was soll da fließen?

Um Elektronen aus ihrem festen Verband herauszulösen, gibt es zwei Möglichkeiten:

- ▶ **Sie erwärmen das Material** – Je mehr Wärme zugeführt wird, desto mehr Bewegung steckt in den Molekülen und dadurch wird natürlich auch die Energie größer, sodass nun einige Elektronen ins Leitungsband »hüpfen«. Je nach Material muss aber so viel Wärme zugeführt werden, dass der Stoff nicht mehr brauchbar ist, weil er sich z. B. verflüssigt, um genügend Stromfluss zu gewährleisten.
- ▶ **Sie erhöhen die Spannung** – Je höher die Spannung ist, desto stärker wird die elektrische Feldstärke und somit die Kraftwirkung auf die Elektronen. Die Feldstärke, bei der Elektronen aus ihrer Bindung herausgelöst werden können, wird *Durchschlagsfeldstärke* E_{DS} oder auch *Durchbruchfeldstärke* genannt. Die Durchschlagsfestigkeit verschiedener Materialien finden Sie in Tabelle 4.1.

Der Nachteil bei diesen Verfahren ist, dass das Material unter Umständen beschädigt werden kann. Beide Möglichkeiten sind also nicht besonders praktikabel.

Material	Durchschlagsfestigkeit in kV/mm	Aggregatzustand
Trockene Luft	3	gasförmig
Porzellan	30–35	fest
Glas	> 10	fest
Emaile	20–30	fest
Quarzglas	40	fest
Destilliertes Wasser	65–70	flüssig
Polymethylmethacrylat (Plexiglas)	35–40	fest
Polypropylen (PP)	bis 100	fest
Polyvinylchlorid	30–50	fest
Glimmer	20–42	fest

Tabelle 4.1 Durchschlagsfestigkeit ausgewählter Materialien (20 °C)

Wie groß die spezifische Leitfähigkeit ist, hängt vom inneren Aufbau des jeweiligen Materials ab. Diese Materialkonstante kann aus entsprechenden Tabellen entnommen werden. Tabelle 4.2 liefert Ihnen eine Auswahl.

Material	Spezifische Leitfähigkeit κ in $\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$
Silber (Ag)	61,4
Kupfer (Cu)	56
Gold (Au)	45,5
Aluminium (Al)	37
Platin (Pt)	10
Konstantan	2
Kohlenstoff (Grafit)	0,1
Germanium (Ge)	0,002
Selen (Se)	0,001

Material	Spezifische Leitfähigkeit κ in $\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$
Silizium (Si)	0,001
Pertinax	10^{-13}
Glas	10^{-17}
Porzellan	10^{-19}
Glimmer	10^{-20}
Polystyrol	10^{-22}

Tabelle 4.2 Materialkonstanten

Stoffe, deren spezifische Leitfähigkeit über $1 \cdot 10^{-2} \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$ liegt, werden als *Leiter* bezeichnet. Materialien mit Leitwerten zwischen 0,01 und $10^{-12} \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$ sind sogenannte *Halbleitermaterialien* (siehe Abbildung 4.19), und Stoffe, bei denen der Leitwert unter $10^{-12} \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$ liegt, bezeichnen wir als *Nichtleiter*.

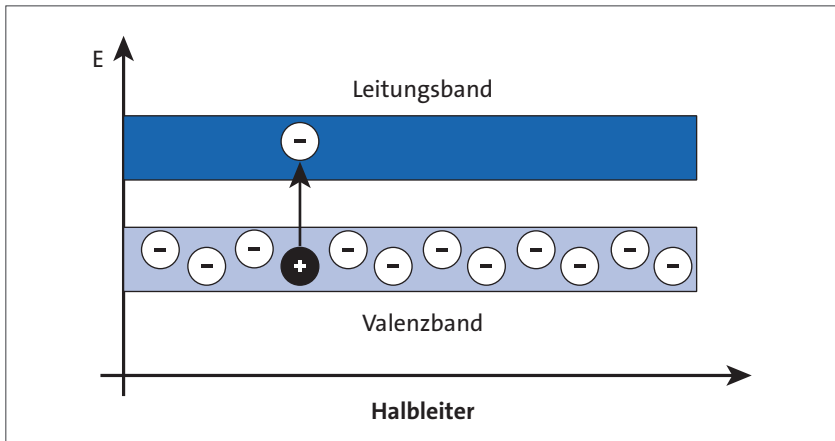


Abbildung 4.19 Bändermodell eines Halbleiters – Elektronen »hüpfen« durch Energiezufuhr, z. B. durch Erwärmung, ins Leitungsband.

Die Leitfähigkeit gibt an, wie »gut« ein Strom durch ein bestimmtes Material fließen kann. Betrachtet man das Gegenteil, so spricht man vom *spezifischen Widerstand* ρ , der dann angibt, wie »schlecht« das Material leitet.

Der spezifische Widerstand ist der Kehrwert des spezifischen Leitwerts:

$$\rho = \frac{1}{\kappa}$$

Tabelle 4.3 zeigt Ihnen die spezifischen Widerstandswerte verschiedener Materialien.

Spezifischer Widerstand	ρ in $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$
Silber (Ag)	0,016286645
Kupfer (Cu)	0,017857143
Gold (Au)	0,021978022
Aluminium (Al)	0,027027027
Platin (Pt)	0,1
Konstantan	0,5
Kohlenstoff (Grafit)	10
Kohlenstoff (C), elementar	33,33333333
Germanium (Ge)	500
Selen (Se)	1000
Silizium (Si)	1000
Pertinax	10^{13}
Glas	10^{17}
Weich-PVC	10^{17}
Porzellan	10^{19}
Glimmer	10^{20}
Kautschuk	10^{20}
Polystyrol	10^{22}

Tabelle 4.3 Die spezifischen Widerstandswerte verschiedener Materialien

Der Begriff »Leiter«

Der Begriff *Leiter* wird aber noch anderweitig verwendet. Da Verbindungsleitungen in elektrischen oder elektronischen Schaltungen ebenfalls aus leitfähigem Material bestehen, werden auch die Verbindungsleitungen als Leiter bezeichnet.

Verbindungsleitungen werden grob in zwei Kategorien eingeteilt: in Kabel und Leitungen.

Der Unterschied zwischen diesen beiden ist, dass *Kabel* fest verlegt sind, d. h., sie können nicht einfach ohne Hilfe von Werkzeug bewegt werden. Die Anschlussleitungen von elektrischen Geräten z. B. sind *Leitungen*. Im allgemeinen Sprachgebrauch werden diese Leitungen aber als »Netzkabel« bezeichnet, was nicht korrekt ist.

4.2.3 Widerstand eines stabförmigen Leiters

Nicht nur das Material spielt beim Leitwert und beim Widerstand eine Rolle. Auch die Maße eines Leiters beeinflussen den Strom.

Je dicker ein Leiter ist, desto mehr Strom kann fließen. Anschaulich gesprochen: Je dicker der Draht ist, desto mehr Möglichkeiten haben die Elektronen, um zum Pluspol zu kommen. Genauso wesentlich wie der Querschnitt ist die Länge: Je länger ein Draht ist, desto mehr Widerstand stellt sich den Elektronen entgegen, denn sie müssen die gesamte Länge hinter sich bringen.

Fassen Sie nun die Material- und die geometrischen Eigenschaften eines Leiters zusammen, so kommen Sie zur Formel [4.6].

$$[4.6] \quad R = \frac{\rho \cdot l}{A}$$

l = Länge des Drahtes

A = Querschnitt des Drahtes (in mm^2)

ρ = spezifischer Widerstand

R = Widerstand

Wird anstatt des spezifischen Widerstandes die spezifische Leitfähigkeit verwendet, gestaltet sich der Widerstand folgendermaßen:

$$[4.7] \quad R = \frac{l}{\kappa \cdot A}$$

Den Leitwert erhalten Sie durch Kehrwertbildung:

$$[4.8] \quad G = \frac{A}{\rho \cdot l}$$

und

$$[4.9] \quad G = \frac{\kappa \cdot A}{l}$$

Stellen Sie die jeweiligen Widerstand- oder Leitwertformeln nach den spezifischen Werten um, so wird auch die Einheit des spezifischen Widerstandes und des spezifischen Leitwerts klar:

$$[\rho] = \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

und

$$[\kappa] = \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$$

4.2.4 Einfluss der Temperatur auf den Widerstand

Wie schon erwähnt, kann ein Nichtleiter durch Erwärmen seine Leitfähigkeit erhöhen. Wenn Sie allerdings einen (Metall-)Draht erwärmen, stellen Sie fest, dass der Widerstand steigt. Vereinfacht gesagt liegt das daran, dass sich die Elektronen durch die starke Bewegung des Metallgitters im Inneren des Drahtes am Gitter stoßen. Der Fachbegriff hierfür lautet *Streuung*. Je höher die Temperatur ist, desto größer ist die Kollisionsgeschwindigkeit und desto größer ist die Ablenkung der Elektronen von ihrem Weg.

Die Veränderung des Widerstandes unter Einfluss der Temperatur wird durch den Temperaturkoeffizienten α angegeben. Eine Auswahl von Werten können Sie in Tabelle 4.4 sehen.

Material	Temperaturkoeffizient α in 1/K
Aluminium (99,5 %)	$4,0 \cdot 10^{-3}$
Blei	$4,2 \cdot 10^{-3}$
Eisen (rein)	$6,57 \cdot 10^{-3}$
Gold	$4 \cdot 10^{-3}$
Konstantan (CuNi44)	$\pm 0,01 \cdot 10^{-3}$
Kupfer (99,9 %)	$3,93 \cdot 10^{-3}$
Silber	$4,1 \cdot 10^{-3}$
Grafit	$-0,2 \cdot 10^{-3}$
Kohlenstoff	$-0,5 \cdot 10^{-3}$
Germanium	$-48 \cdot 10^{-3}$
Silizium	$-75 \cdot 10^{-3}$

Tabelle 4.4 Temperaturkoeffizienten

Ein *negativer* Temperaturkoeffizient bedeutet, dass der Widerstand bei steigender Temperatur sinkt. Es zeigt sich also das Verhalten von Nichtmetallen. Ist der Temperaturkoeffizient *positiv*, so steigt der Widerstand bei Temperaturerhöhung. Das ist das typische Verhalten von Metallen.

Es gibt Widerstände, die als Temperatursensoren verwendet werden. Hierbei wird die Widerstandsänderung pro Kelvin genutzt, um eine Temperaturmessung vorzunehmen. Widerstände, deren Widerstandswert mit der Temperatur steigt, die also einen positiven Temperaturkoeffizienten besitzen, werden *PTC* (*Positive Temperature Coefficient*) genannt. Die Gegenstücke dazu heißen *NTC* (*Negative Temperature Coefficient*). Bei NTCs sinkt der Widerstand mit steigender Temperatur.

Das berühmteste Beispiel der Temperatursensoren ist der PT100. Er besteht aus Platin und hat eine lineare Kennlinie, sodass eine Temperaturänderung von 1 °C immer die gleiche Widerstandsänderung hervorruft, egal in welchem Temperaturbereich man sich befindet. Bei einer Temperatur von 0 °C besitzt er einen Widerstand von 100 Ω.

Die Änderung des Widerstandes ΔR ergibt sich aus

$$\Delta R = \alpha R \Delta T,$$

wobei ΔT die Temperaturänderung darstellt.

Der durch die Temperatur veränderte Widerstand ist dann:

$$R_\vartheta = R + \Delta R$$

Diese Betrachtung der linearen Temperaturabhängigkeit reicht in den meisten Fällen in der Praxis aus. Sie gehen dabei von einer linearen Widerstandsänderung aus. Das ist aber in der Regel nicht der Fall.

Möchten Sie genauer über die Temperaturabhängigkeit Bescheid wissen, so können Sie mithilfe der Entwicklung einer Taylorreihe der Widerstandsfunktion genauere Ergebnisse erzielen:

$$R_\vartheta = R + \alpha R \Delta T + \beta R \Delta T^2 + \gamma R \Delta T^3 + \delta R \Delta T^4 + \varepsilon R \Delta T^5 + \dots$$

Die Koeffizienten $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon \dots$ heißen Temperaturkoeffizienten 1., 2., 3., 4., 5. ... Grades. Die Größenordnung von β entspricht ungefähr dem Quadrat von α , die von γ entspricht der Größenordnung von α^3 usw. Es handelt sich hier also um sehr kleine Änderungen.

Widerstand und Leitwert

Spezifischer Leiter κ	Einheit:	$\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$
Spezifischer Widerstand ρ	Einheit:	$\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$
Widerstand R	Einheit:	Ω (Ohm)
Leitwert G	Einheit:	S (Siemens)
Der (spezifische) Leitwert ist der Kehrwert des (spezifischen) Widerstandes.		
Stabförmiger Leiter	$R = \frac{\rho l}{A} = \frac{l}{\kappa A}$	
Widerstandsänderung bei Temperaturänderung	$\Delta R = \alpha R \Delta T$	

4.3 Allgemeine Form des Ohm'schen Gesetzes

In Abschnitt 4.2.1 wurde mithilfe des Ohm'schen Gesetzes

$$R = \frac{U}{I} \quad [4.10]$$

der Widerstand berechnet.

Dabei sind wir stillschweigend davon ausgegangen, dass der Widerstand konstant ist, dass also das Verhältnis von Spannung zu Strom immer gleich bleibt und die Strom-Spannungs-Kennlinie linear ist.

Es gibt jedoch Widerstände, deren Stromfluss von der angelegten Spannung abhängt. Zum Beispiel sinkt der Widerstand bei steigender Spannung bei *Varistoren*, die auch *spannungsabhängige Widerstände* genannt werden. Bei *Dioden* ist der Widerstand ebenfalls von der angelegten Spannung abhängig.

Schauen Sie sich bei diesen Bauteilen die Strom-Spannungs-Kennlinie an, so verläuft sie nicht linear, wie Abbildung 4.20 zeigt.

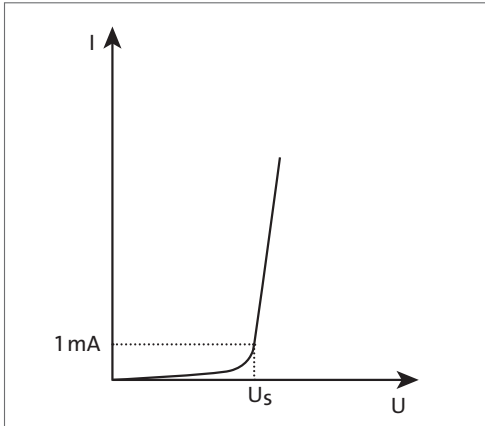


Abbildung 4.20 Kennlinie eines Varistors

Hier müssen Sie wieder zu den Momentanwerten übergehen und den Widerstand dann durch

$$[4.11] \quad R = \frac{dU}{dI}$$

berechnen.

Was passiert aber, wenn das elektrische Feld, aus dem die Spannung gewonnen wird, nicht konstant ist oder wenn die Stromdichte in einem Leiter variiert?

In diesen Fällen müssen Sie sich an die allgemeinen Formeln für den Strom und die Spannung aus Kapitel 2 und Kapitel 3 erinnern:

$$[4.12] \quad I = \int \vec{J} \cdot d\vec{A}$$

und

$$[4.13] \quad U = \int \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Zur Erinnerung: J ist die Stromdichte, E die elektrische Feldstärke, A die Querschnittsfläche, durch die der Strom fließt, und l ist der Abstand zwischen den betrachteten Potenzialen.

Für den Widerstand R erhalten Sie dann:

$$[4.14] \quad R = \frac{\int \vec{E} \cdot d\vec{l}}{\int \vec{J} \cdot d\vec{A}}$$

Auch diese Formel spiegelt das Ohm'sche Gesetz wider.

Wenn $\vec{E}$ konstant ist und die Feldlinien des elektrischen Feldes senkrecht auf der Oberfläche stehen, so wie es z. B. bei metallischen Leitern der Fall ist, der Leiter die Länge l hat und der Strom, bei konstanter Stromdichte, senkrecht durch den Querschnitt A eines Leiters tritt, dann vereinfacht sich diese Formel zu:

$$R = \frac{E \cdot l}{J \cdot A} \quad [4.15]$$

Stellen Sie diese Gleichung nach J um, so erhalten Sie:

$$J = \frac{l}{R \cdot A} E \quad [4.16]$$

$\frac{l}{R \cdot A}$ ist der spezifische Leitwert, also kann das Ohm'sche Gesetz auch als

$$J = \kappa \cdot E$$

geschrieben werden. Hierbei handelt es sich um den Betrag.

Unter Berücksichtigung der Richtung erhalten Sie:

$$\vec{J} = \kappa \cdot \vec{E} \quad [4.17]$$

Ohm'sches Gesetz

Lineare Widerstandsänderung	$R = \frac{U}{I}$
-----------------------------	-------------------

Nicht lineare Widerstandsänderung	$R = \frac{dU}{dI}$
-----------------------------------	---------------------

Allgemeine Form	$R = \frac{\int \vec{E} \cdot d\vec{l}}{\int \vec{J} \cdot d\vec{A}}$
-----------------	---

4.4 Gleichstrom und Wechselstrom

Bisher haben Sie den Stromfluss in einem Leiter immer unter dem Gesichtspunkt betrachtet, wie sich Elektronen in einem Leiter bewegen, nämlich vom Minuspol zum Pluspol hin. Sie haben also die *physikalische Stromrichtung* betrachtet. Hätten Sie den Löcherstrom betrachtet, wären Sie von der *technischen Stromrichtung* ausgegangen.

Eines haben aber beide Betrachtungsweisen gemeinsam: Weder die Löcher noch die Elektronen verändern ihre Bewegungsrichtung. Die Höhe der Stromstärke kann mög-

Inhalt

Materialien zum Buch	10
----------------------------	----

1 Einführung 11

1.1 Was Sie von diesem Buch erwarten können	11
1.2 Wichtige Erfindungen der Elektrotechnik	12
1.3 Physikalische Größen und Grundbegriffe, mathematische Grundlagen	14
1.3.1 Kleiner Ausflug in die Physik	14
1.3.2 Mathematische Grundregeln	24
1.4 Gefahren des elektrischen Stroms	36
1.4.1 Reaktionen des menschlichen Körpers auf den elektrischen Strom	39
1.4.2 Schutz- und Sicherheitsmaßnahmen: Die fünf Sicherheitsregeln	41
1.4.3 Sicherungselemente	44
1.5 Übungen	51
1.6 Lösungen	53

2 Elektrische Ladung und Potenzial 59

2.1 Das Bohrsche Atommodell	59
2.2 Ladung	62
2.3 Energie, Potenzial und Leistung	64
2.3.1 Potenzial	64
2.3.2 Energie	67
2.3.3 Leistung	68
2.3.4 Wirkungsgrad	69
2.4 Elektrische Spannung	69
2.5 Strom	72
2.6 Strom- und Ladungsdichte	76
2.6.1 Stromdichte	76
2.6.2 Ladungsdichte	81

2.7 Ionen- und Massenstrom	82
2.8 Übungen	85
2.9 Lösungen	87

3 Elektrostatik 93

3.1 Das elektrische Feld (E-Feld)	93
3.2 Kräfte zwischen Ladungen – die Coulombkraft	100
3.3 Ladungsverteilung	102
3.3.1 Berechnung eines Volumenintegrals in kartesischen Koordinaten	104
3.3.2 Berechnung eines Volumenintegrals in Zylinderkoordinaten	105
3.3.3 Berechnung eines Volumenintegrals in Kugelkoordinaten	109
3.4 Berechnung von E-Feldern	115
3.4.1 Elektrisches Feld einer Punktladung	115
3.4.2 Elektrisches Feld einer Linienladung	119
3.4.3 Elektrisches Feld einer Flächenladung	121
3.4.4 Elektrisches Feld einer Volumenladung	123
3.4.5 Der Gauß'sche Satz	124
3.5 Elektrische Flussdichte und Verschiebungsfeld	137
3.6 Potenzielle Energie, Potenziale und Spannung im elektrischen Feld	138
3.6.1 Äquipotenziallinien	142
3.7 Kapazität	144
3.7.1 Influenz und Polarisation	150
3.8 Übungen	156
3.9 Lösungen	158

4 Gleichstrom 171

4.1 Strom- und Spannungsquellen	171
4.1.1 Galvanisches Element	171
4.1.2 Spannungsquelle	178
4.1.3 Stromquelle	179
4.2 Widerstand und Leitwert	180
4.2.1 Das Ohm'sche Gesetz	181

4.2.2	Spezifischer Leitwert und spezifischer Widerstand	183
4.2.3	Widerstand eines stabförmigen Leiters	190
4.2.4	Einfluss der Temperatur auf den Widerstand	191
4.3	Allgemeine Form des Ohm'schen Gesetzes	193
4.4	Gleichstrom und Wechselstrom	195
4.5	Berechnung eines einfachen Stromkreises	197
4.6	Reihen- und Parallelschaltung	201
4.6.1	Reihenschaltung	201
4.6.2	Parallelschaltung	205
4.6.3	Kirchhoff'sche Regeln	209
4.6.4	Gemischte Widerstandsschaltungen	213
4.7	Ersatzquellen, reale Strom- und Spannungsquellen	217
4.7.1	Parallel- und Reihenschaltung von Spannungs- bzw. Stromquellen	223
4.7.2	Umwandlung von Spannungsquellen in Stromquellen und umgekehrt.....	226
4.8	Kondensatoren im Gleichstromkreis	228
4.8.1	Aufladung	229
4.8.2	Entladung	235
4.8.3	Reihenschaltung von Kondensatoren	237
4.8.4	Parallelschaltung von Kondensatoren	238
4.9	Übungen	239
4.10	Lösungen	244

5 Netzwerkberechnungen 253

5.1	Zweipole und die Zweipolmethode	255
5.2	Maschen- und Knotenregel in Netzwerken	259
5.3	Zweigstromverfahren	263
5.4	Maschenstromverfahren	268
5.5	Knotenpotenzialverfahren	272
5.6	Das Superpositionsprinzip	282
5.7	Stern-Dreieck-Umwandlung	287
5.7.1	Dreieck-Stern-Umwandlung	289
5.7.2	Stern-Dreieck-Umwandlung	290

5.8	Unendliche Kettennetzwerke	293
5.9	Übungen	296
5.10	Lösungen	300

6 Magnetische Felder 319

6.1	Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters	322
6.2	Magnetisches Feld von Leiterschleifen	325
6.3	Magnetische Grundgrößen	327
6.3.1	Das Vektorprodukt (Kreuzprodukt)	328
6.3.2	Durchflutung	329
6.3.3	Magnetische Feldstärke	330
6.3.4	Magnetischer Fluss, magnetische Flussdichte	339
6.4	Lorentzkraft	346
6.5	Induktivität und Induktion	352
6.5.1	Aufbau einer Spule	352
6.5.2	Induktivität	353
6.5.3	Spule im Gleichstromkreis	354
6.5.4	Induktion	358
6.5.5	Energie im Magnetfeld	368
6.6	Magnetischer Kreis	369
6.7	Maxwell-Gleichungen	371
6.7.1	Stationäre Maxwell-Gleichungen	372
6.7.2	Rotation eines Vektorfeldes	374
6.7.3	Materialbehaftete und nichtstationäre Maxwell-Gleichungen	380
6.8	Übungen	383
6.9	Lösungen	386

7 Wechselstromkreise 395

7.1	Charakteristische Größen einer Wechselspannung	395
7.2	Kondensator im Wechselspannungskreis	399
7.3	Spule im Wechselstromkreis	403
7.4	Zeigerdarstellung von Wechselgrößen	406

7.5 Schwingkreise	413
7.5.1 Parallelschwingkreis	413
7.5.2 Zeigerdiagramm für Parallelschwingkreise	418
7.5.3 Reihenschwingkreis	425
7.5.4 Zeigerdiagramm des Reihenschwingkreises	426
7.5.5 Güte eines Schwingkreises	429
7.6 Rechnen mit komplexen Zahlen	432
7.6.1 Rechenregeln	433
7.7 Übungen	438
7.8 Lösungen	443

8 Filter und Passschaltungen 459

8.1 RC-Reihenschaltung und Parallelschaltung	459
8.1.1 RC-Reihenschaltung	459
8.1.2 RC-Hochpass	468
8.1.3 RC-Tiefpass	471
8.1.4 RC-Parallelschaltung	472
8.2 RL-Reihen- und Parallelschaltung	476
8.2.1 RL-Reihenschaltung	476
8.2.2 RL-Hochpass	482
8.2.3 RL-Tiefpass	484
8.2.4 RL-Parallelschaltung	484
8.3 Allgemeine Eigenschaften von Hoch- und Tiefpassschaltungen	486
8.3.1 Bodediagramme	486
8.3.2 Ortskurven	491
8.3.3 Filter höherer Ordnung	495
8.4 Übungen	497
8.5 Lösungen	500

9 Drehstrom 519

9.1 Erzeugung von Wechselspannungen und Drehstrom	519
9.2 Symmetrisch belastete Drehstromsysteme	524
9.2.1 Dreieckschaltung, symmetrisch belastet	526

9.2.2	Sternschaltung, symmetrisch belastet	534
9.2.3	Allgemeine Eigenschaften von Strömen und Spannungen in Drehstromsystemen	537
9.3	Unsymmetrische Belastung	538
9.3.1	Dreieckschaltung, unsymmetrisch belastet	539
9.3.2	Sternschaltung, unsymmetrisch belastet	541
9.4	Übungen	545
9.5	Lösungen	547
	Index	557

Materialien zum Buch

Auf der Webseite zu diesem Buch stehen folgende Materialien für Sie zum Download bereit:

► Beispielgrafiken in Farbe

Gehen Sie auf www.rheinwerk-verlag.de/6293. Klicken Sie auf den Reiter **Materialien**. Sie sehen die herunterladbaren Dateien samt einer Kurzbeschreibung des Dateiinhalts. Klicken Sie auf den Button **Herunterladen**, um den Download zu starten.

Sie können die Grafiken aus dem Buch für eigene Lehrveranstaltungen nutzen und in Prüfungs- und Studienarbeiten verwenden. Eine kommerzielle Nutzung ist ausgeschlossen.

Index

A

Ableitung 25
Abstoßungskraft 62
Admittanz 419
Akkumulator 176
Ampèregesetz 380
Amplitude 397
Anode 173
Anziehungskraft 319
Äquipotenziallinien 142
Arbeit 142
Atom 59
Atommodell (Bohr) 59
 Elektronen 59
 Kern 59
 Neutronen 59
 Protonen 59
 Teilchen 59
Avogadrokonstante 23

B

Bandbreite 430
Basisisolierung 43
Batterie 172
Baum (Netzwerk) 254
Belastung
 symmetrische 526
 unsymmetrische 526
Biot-Savart-Gesetz 338
Blindleistung 460
Blindleitwerte 419
Blindwiderstand 403
Bodediagramm 489
Bohrsches Atommodell .. 59

C

Cgs 97
Chemie 23
Coulombkraft 62, 100

D

Dielektrikum 153
Dielektrizitätskonstante 97
Dielektrizitätszahl 154
Differenzialgleichung,
 gewöhnliche 230
Differenzialrechnung 25
DIN 1313 15
Dipol 151
Diskrete Ladungs-
 verteilung 117
Drehstrom 519
Dreieckschaltung 288
Dreieck-Stern-
 Umwandlung 277
Driftgeschwindigkeit 81
Durchbruchfeldstärke 186
Durchflutung 329
Durchschlags-
 feldstärke 186
Duspol 42
Dynamik 14

E

E-Feld
 Flächenladung 32
 Linienladung 30
 Punktladung 26
 Volumenladung 34
Effektivwert 396
Einheitenschreibweise ... 15
Einheitsvektor 9
Elektrische
 Feldkonstante 10
Elektrische Flussdichte ... 46
elektrische Spannung 70
Elektrische Spannung 68
Elektrisches Feld 63, 6
 Feldlinien 64
 Feldstärke 65
 Vektorfeld 64

Elektrolyt 171
Elektromagnetismus 321
Elektronen 59
Elektronengas 183
Elektronenvolt 51
Elektrostatik 93
Elementarladung 63
Elementarmagnete 339
Energie 18
Erhaltungsgröße 79
Ersatzquellen 215

F

Faradaygesetz 376
Fehlerschutz 44
Fehlerstromschalter 44
Fehlerstromschutz-
 schalter 50
Feldlinien 320, 335
Feldstärke 65, 6
Feuchträumen 50
Flächenintegral 75
Flächenladung 32
Flächenladungsdichte 15
Freie Elektronen 58
Freischalten 41
Frequenz 396
Frequenzweiche 471

G

Galvanisches Element ... 171
Gauß'scher Satz 34
Gaußkugel 35
Gaußvolumen 35
Gegeninduktion 364
Generator 519
Gleichstrom 171
Gradient 40
Graph (Netzwerk) 254

H

Hochpass	
<i>RC</i>	469
<i>RL</i>	482

I

Imaginäre Zahlen	432
<i>Grundeinheit</i>	432
Impedanz	419
Induktion	358
Induktionsgesetz	381
Induktionsspannung	365
Induktivität	353
Influenz	150
Innenwiderstand	219
Integralrechnung	29
Ionen	83
Ionenbindung	82
Ionenstrom	84

J

Jacobimatrix	79
--------------------	----

K

Kapazität	144
Kathode	175
Kettenglied	294
Kettennetzwerk, unendliches	293
Kinematik	14
Kirchhoff'sche Regeln	209
Knoten	211, 253
Knotenpotenziale	272
Knotenpunktregel	211
<i>Parallelschaltung</i>	213
<i>Reihenschaltung</i>	212
Komplexe Zahlen	432
<i>Addition</i>	434
<i>Betrag</i>	433
<i>Division</i>	436
<i>Imaginärteil</i>	433

<i>kartesische</i>	
<i>Darstellung</i>	433
<i>komplexe</i>	
<i>Konjugation</i>	433
<i>Multiplikation</i>	436
<i>Polardarstellung</i>	434
<i>Realteil</i>	433
<i>Subtraktion</i>	434
Kondensator 144, 228, 399	
Konservative Kraft	100
Körperwiderstand	36
Kraft	15
Kreuzprodukt	328
Kugelkoordinaten	109
Kurzschlusschutz	48
Kurzschlussstrom	221

L

Ladung	62
<i>negativ</i>	62
<i>positiv</i>	62
Ladungsdichte	76
Ladungserhaltung	82
Ladungsverteilung	94
Leckströme	231
Leerlaufspannung	220
Leistung	68
Leiter	188
Leiterschleife	325
Leiterströme	525
Leitfähigkeit	61
Leitungselektronen	184
Leitungsschutzschalter ...	44
Leitwert	182
Lenz'sche Regel	365
Linienladung	119
Linienladungsdichte	103
Löcherstrom	185
Lorentzkraft	346
Loslassgrenze	40

M

Magnet-Materialien	
<i>diamagnetisch</i>	342
<i>ferromagnetisch</i>	344

<i>neutral</i>	341
<i>paramagnetisch</i>	343
Magnetische	
Feldkonstante	340
Magnetische	
Feldstärke	330
Magnetische	
Flussdichte	340
Magnetische	
Spannung	329
Magnetischer	
Widerstand	369
Masche (Netzwerk)	254
Masche(nregel)	259
Maschenstrom	268
Massenstrom	82
Maxwellgleichung	131
<i>nichtstationär</i>	380
<i>stationär</i>	372
Mechanik	14
Molekül	82
Motor	522

N

Nabla-Operator	141
Nennwert	397
Netzspannung	398
Netzwerk	213, 254
Neutral-Leiter	522
Neutronen	59
NH-Sicherungen	47
Normalenvektor	126
Null-Leiter	522

O

Ohm'sches Gesetz	181
Optik	24
Ortskurve	491
Oxidation	173

P

Parallelschaltung	205
Parallelschwingkreis	413

Partielle Ableitungen 78
 Pegel 487
 Periodendauer 396
 Periodensystem 59
 Permeabilität 341
 Permeabilitäts-
 konstante 340
 Permittivität 154
 Phasen 520
 Plattenkondensator 145
 Pol 72
 Polarisierung 150, 153
 Polarkoordinaten 78
 Potenzial 67
 Potenzialdifferenz 71
 Protonen 59
 Punktladung 115

R

RC
 Hochpass 470
 Parallelschaltung 472
 Reihenschaltung 459
 Tiefpass 471
 Reaktanz 403
 Reduktion 175
 Reihenschaltung 201
 Reihenschwingkreis 425
 Rekursive Folge 295
 Relative Permittivität 154
 Residual Current Protec-
 tive Device (RCD) 50
 Resistanz 403
 Resonanzfrequenz 415
 RL
 Hochpass 482
 Parallelschaltung 484
 Reihenschaltung 476
 Tiefpass 484

S

Saugkreis 429
 Schalen 61

Scheinleistung 460
 Scheinleitwert 419
 Scheinwiderstand 419
 Schmelzsicherungen 44
 Schraubsicherungen 46
 Schwingkreise 413
 Parallelschwingkreis 413
 Sehne (Netzwerk) 254
 Selbstinduktion 366
 Sicherheitsregeln 41
 Skalare Größen 17
 Skalarprodukt 328
 Spannungsfreiheit 42
 Spannungsquelle 178
 Spannungsteiler 202
 Spitzenwert 397
 Spule 352
 Starkstrom 520
 Stern-Dreieck-
 Umwandlung 290
 Sternschaltung 288
 Stoffmenge 24
 Stokes'scher Satz 379
 Strangströme 525
 Streuung 191
 Strom 72
 Stromdichte 76
 Stromquelle 179
 Stromrichtung 74, 195
 physikalisch 74
 technisch 75
 Stromstärke 73
 Strömungsstärke 130
 Superposition 116
 Superpositions-
 prinzip 117, 281
 Suszeptanz 419

T

Thermodynamik 21
 Thermodynamische
 Temperaturskala 22
 Tiefpass
 RC 471
 RL 484
 Trippelpunkt 22

U

Überlagerungsprinzip... 281
 Überlastschutz 48

V

Valenzelektronen 184
 Vektorfeld 65, 93
 Wirbel 374
 Vektorielle Größen 16
 Vektorprodukt 327
 Verkettungsfluss 339
 Verschiebungs-
 flussdichte 137
 Volumenladung 123
 Volumenladungs-
 dichte 81, 102

W

Watt 68
 Wechselspannung 395
 Amplitude 396
 Effektivwert 396
 Frequenz 396
 Periodendauer 396
 Wechselstrom 196
 Widerstand 180
 Windungszahl 326
 Wirkleistung 460
 Wirkungsgrad 69
 Wirkwiderstand 403

Z

Zeitkonstante 231
 Zentralkraft 100
 Zusatzschutz 45
 Zweige (Netzwerk) 253
 Zweigströme 259
 Zweigstromverfahren ... 263
 Zweipol 255
 aktiv/passiv 255
 Zylinderkoordinaten 105

Einführung in die Elektrotechnik

Vom einfachen Stromkreis bis hin zum komplexen Netzwerk, von URI bis Maxwell: Dieses Praxisbuch bereitet die E-Technik-Inhalte des Studiums verständlich für Sie auf. Es deckt den gesamten **Stoff des Grundstudiums** ab und begleitet Sie durch die relevanten Veranstaltungen des Ingenieurstudiums.

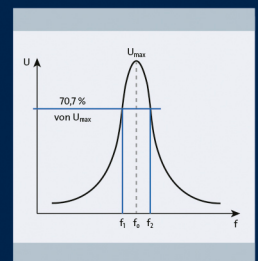
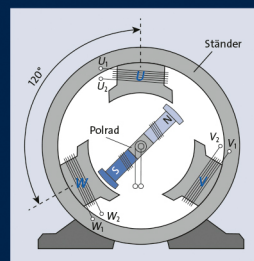
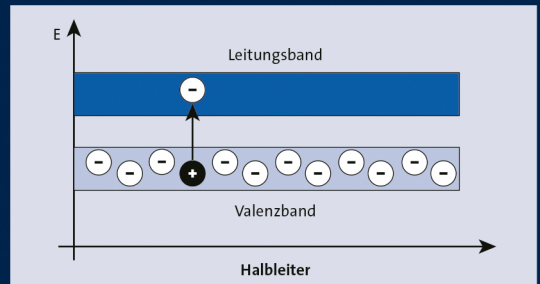
Sie lernen, wie Widerstände, Kapazitäten und Co. berechnet werden, und verstehen, was hinter den Kirchhoff'schen Regeln und dem Maschensatz steckt. Und da es ohne physikalisches und mathematisches Wissen nicht geht, finden Sie diese Grundlagen kurz zusammengefasst. **Aufgaben und Musterlösungen** unterstützen Sie beim Selbststudium – so überprüfen Sie Ihren Lernfortschritt und bereiten sich gezielt auf die Klausuren vor. **Der Leitfaden für angehende E-Technikerinnen und E-Techniker.**

Aus dem Inhalt

- ▶ Elektrotechnische Grundbegriffe
- ▶ Elektrostatik
- ▶ Gleichstromkreise
- ▶ Netzwerkberechnungen
- ▶ Magnetische Felder
- ▶ Komplexe Widerstände
- ▶ Wechselstromkreise
- ▶ Filter und Passschaltungen
- ▶ Drehstrom



Grafiken und Diagramme
aus dem Buch zum Download



Marika Höwing ist Dozentin für Elektrotechnik und Mathematik sowie Mitglied im IHK-Prüfungsausschuss Köln. Sie versteht es, anspruchsvolle Inhalte anschaulich aufzubereiten und hat viele Studierende der E-Technik auf dem Weg zum Abschluss begleitet.

