

Einführung in die Elektrotechnik

» Hier geht's
direkt
zum Buch

DIE LESEPROBE

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*.

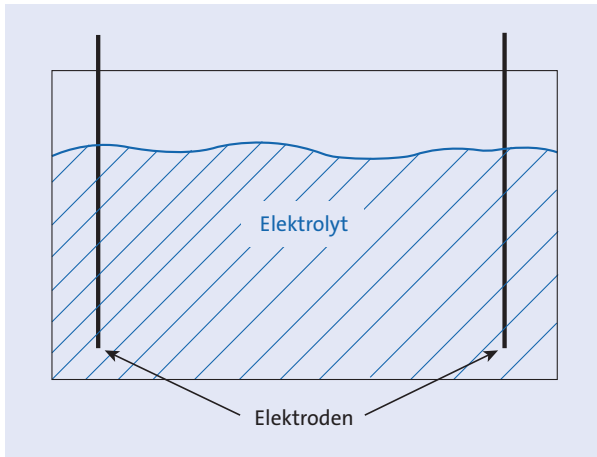


Abbildung 4.1 Schematische Darstellung eines galvanischen Elements

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.

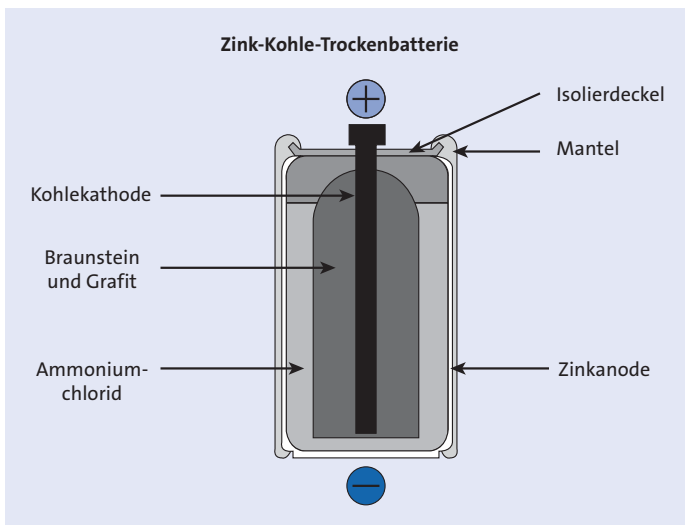


Abbildung 4.2 Schnitt durch eine Zink-Kohle-Batterie

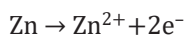
Der Elektrolyt, also der Stoff zwischen diesen Elektroden, ist bei Zn-C-Batterien Braunstein und Salmiak als extrem dickflüssige Lösung. Im Gegensatz zu einer Autobatterie, in der sich der Elektrolyt aus destilliertem Wasser und Schwefelsäure zusammensetzt und daher eine wässrige Konsistenz besitzt,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

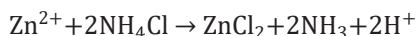


Zinkionen werden gelöst, die Elektrode wird negativ.

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.)

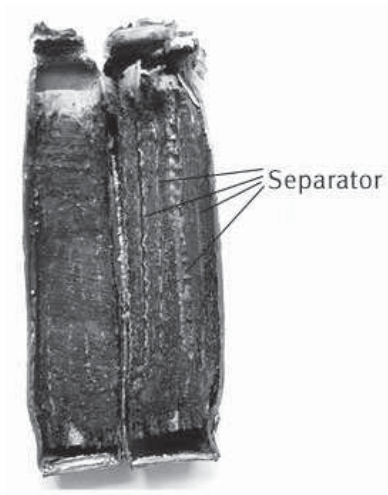


Abbildung 4.3 Schnitt durch eine leere galvanische Zelle

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:

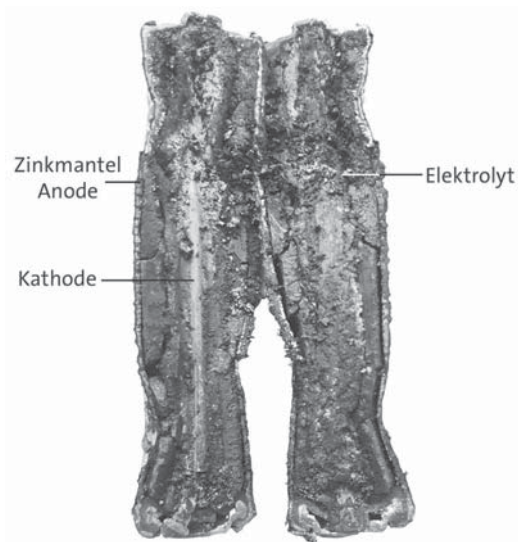
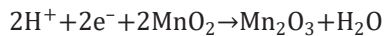


Abbildung 4.4 Das Innenleben einer leeren Batterie

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.

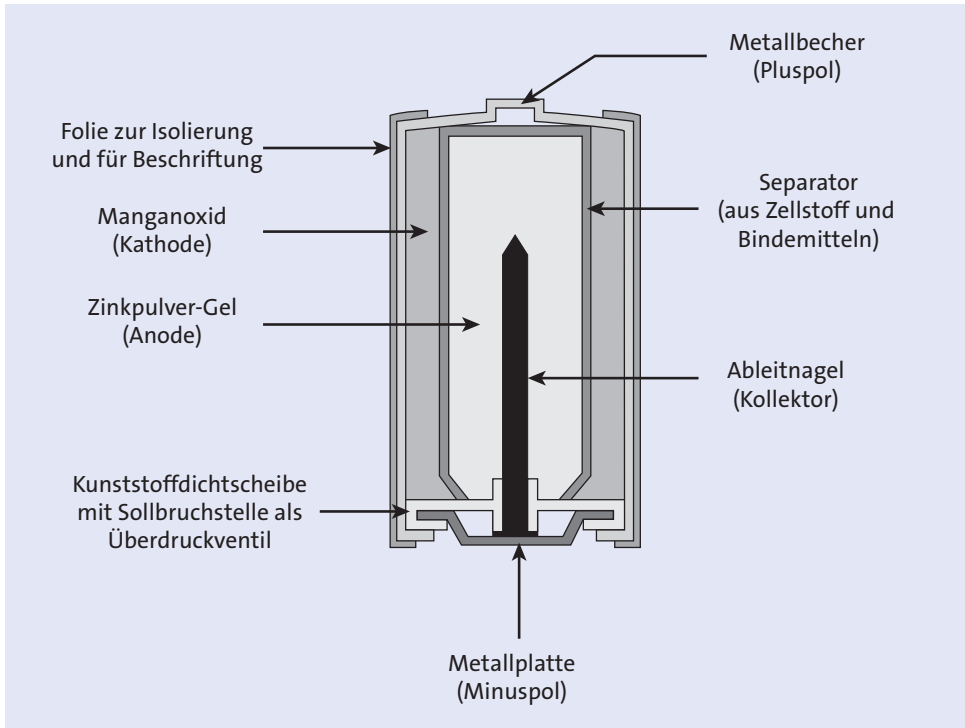


Abbildung 4.6 Schematische Darstellung eines Akkus

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.

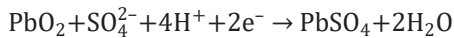
Die Schwefelsäure verbindet sich mit dem Blei, und bei dieser Reaktion werden Elektronen frei. Die Anodenreaktion wird mit



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).

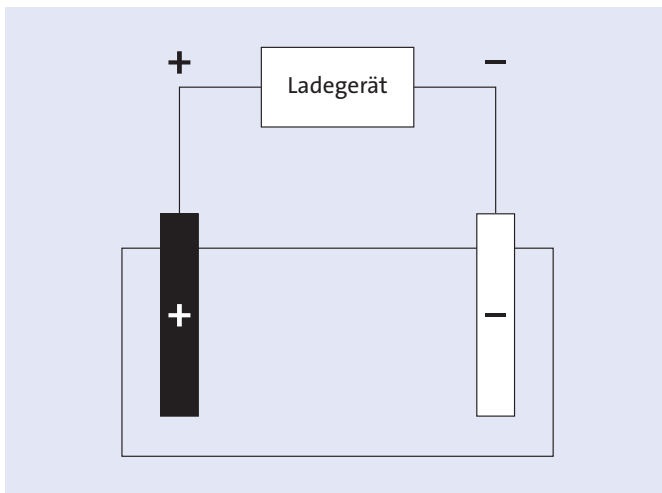
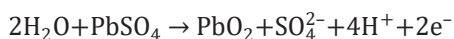


Abbildung 4.7 Aufbau bei der Ladung eines Akkus

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

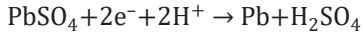
Durch die angelegte Spannung wird folgende Reaktion angeregt:



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.

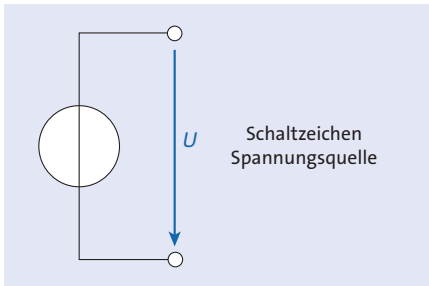


Abbildung 4.8 Schaltzeichen einer idealen Spannungsquelle

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

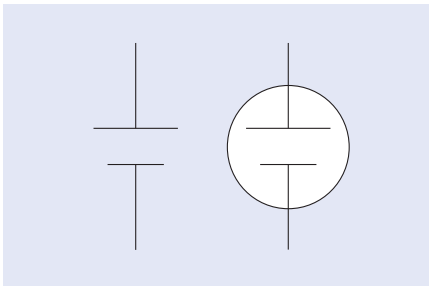


Abbildung 4.9 Schaltzeichen von Gleichspannungsquellen.
Der lange Pol stellt den Pluspol dar.

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.

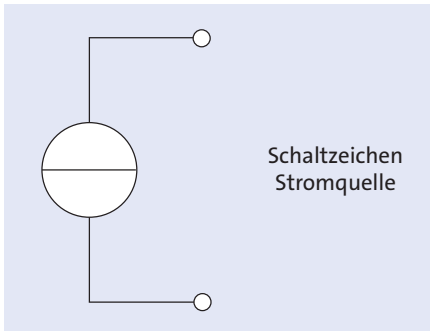


Abbildung 4.10 Schaltzeichen einer idealen Stromquelle

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 $A = 1 \text{ mm}^2$.

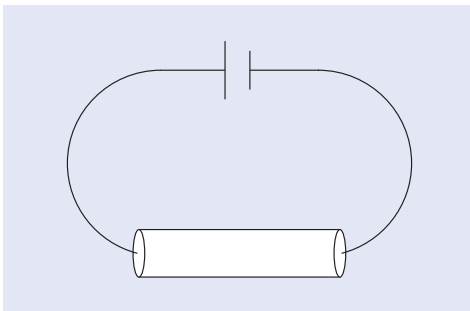


Abbildung 4.11 An einen Stab aus einem bestimmten Material mit der Länge 1 m und dem Querschnitt 1 mm^2 wird eine feste Spannung angeschlossen.

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.

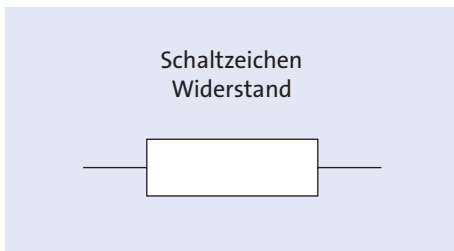


Abbildung 4.12 Schaltzeichen eines Widerstandes

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.

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

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

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

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

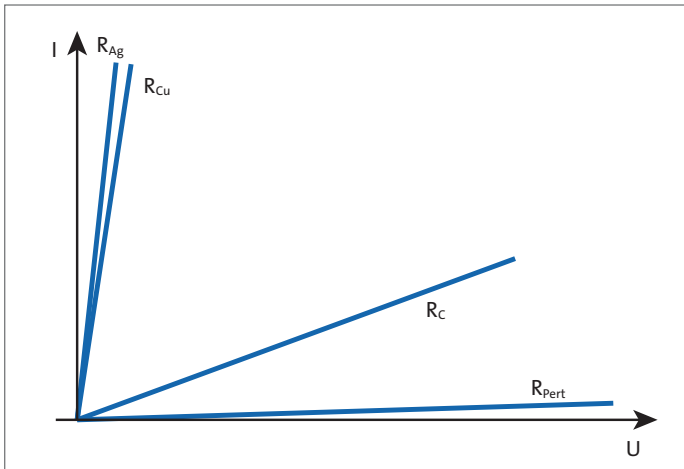


Abbildung 4.13 Widerstandsverhalten unterschiedlicher Materialien

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.

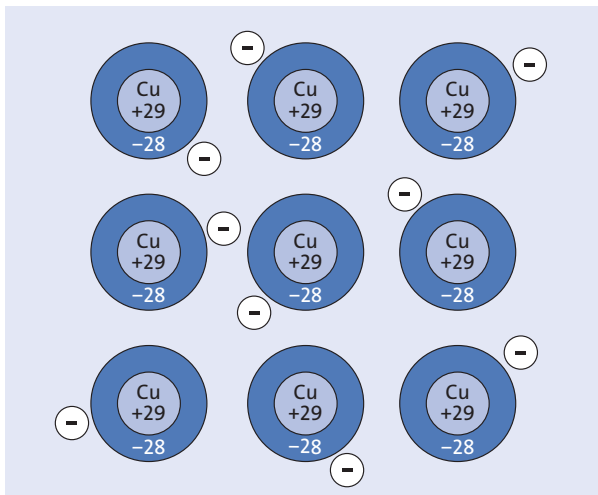


Abbildung 4.14 Aufbau eines Kupferblechs

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.

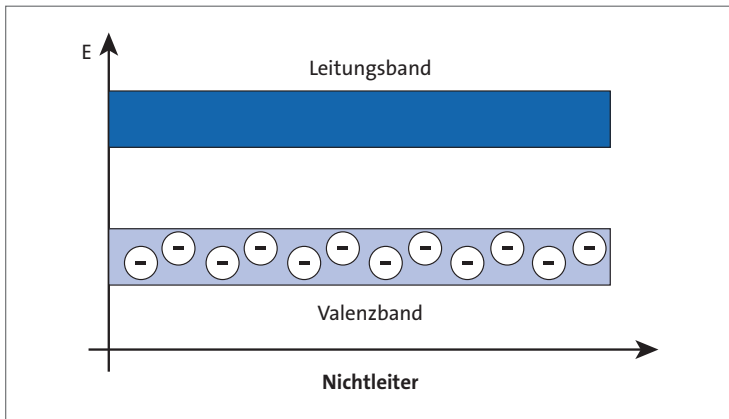


Abbildung 4.15 Bänderdarstellung eines Nichtleiters

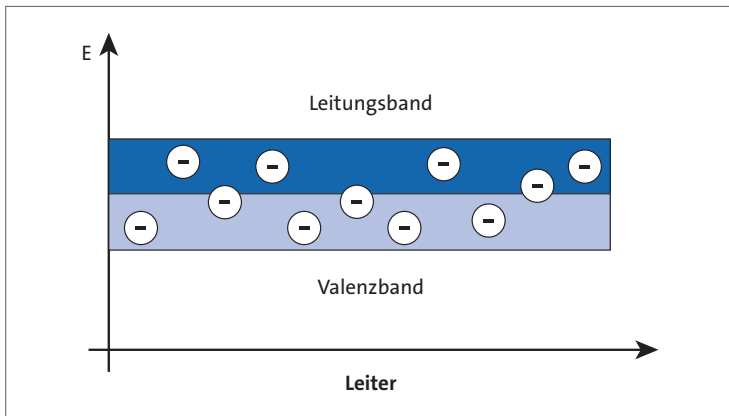


Abbildung 4.16 Bänderdarstellung eines Leiters. Befinden sich Elektronen im Leitungsband, so sind sie frei.

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.

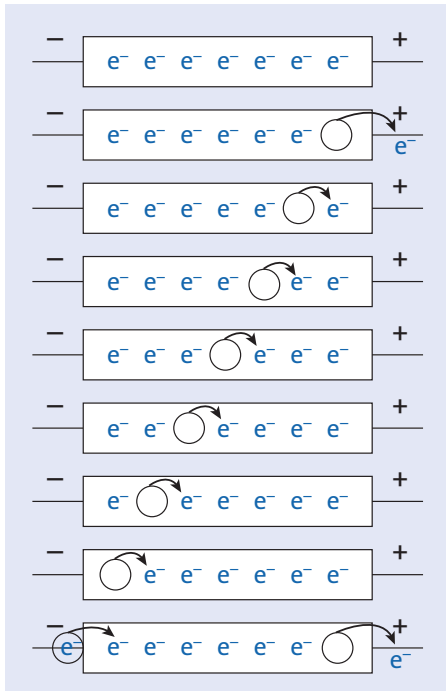


Abbildung 4.17 Bewegung von Elektronen in einem Leiter

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.

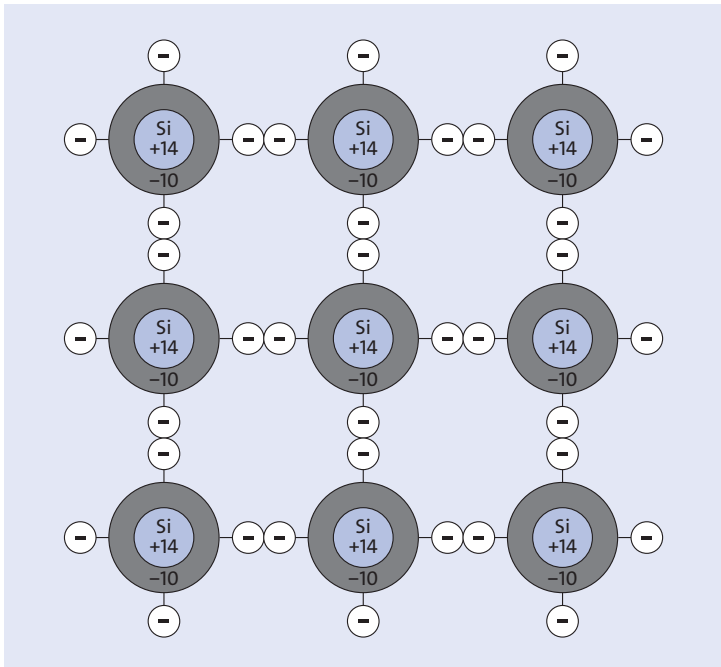


Abbildung 4.18 Bindung von Siliziumatomen

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*.

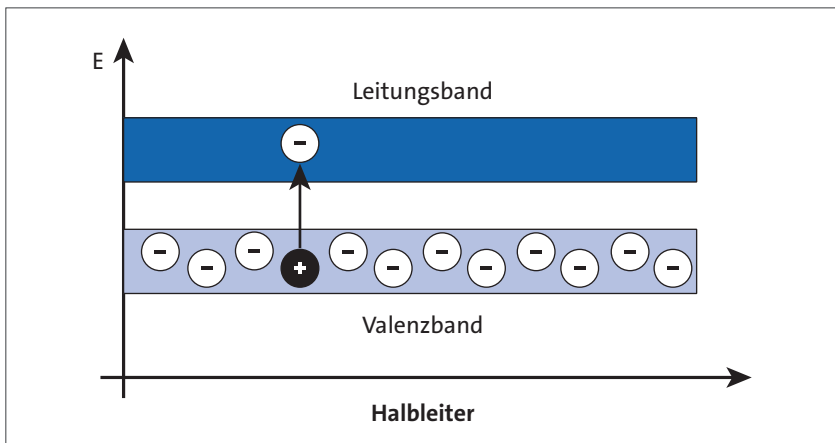


Abbildung 4.19 Bändermodell eines Halbleiters – Elektronen »hüpfen« durch Energiezufuhr, z. B. durch Erwärmung, ins Leitungsband.

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.

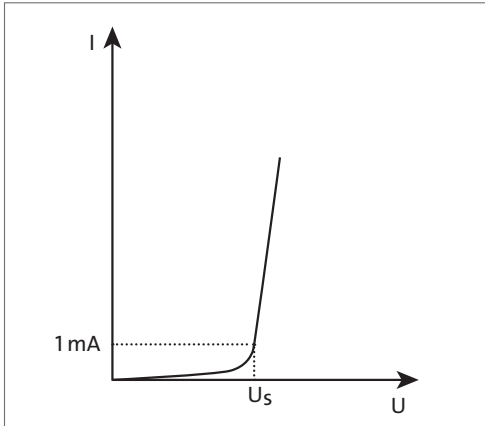


Abbildung 4.20 Kennlinie eines Varistors

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-