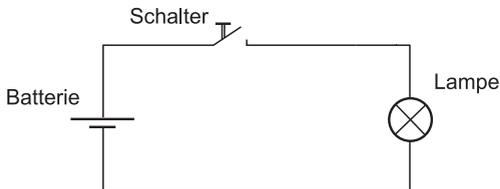


# 1

## Einführung

### ■ 1.1 Elektronische Schaltungen

Jeder kennt aus der Schule das einfache Experiment, bei dem man mit einem Schalter einen Stromkreis schließt, und eine Lampe leuchtet daraufhin (Bild 1.1). Das Schalten oder – anders ausgedrückt – der durch das Schließen des Schalters vervollständigte Stromkreis hat der Lampe zu Strom verholfen. Nun kann der Glühdraht in der Lampe glühen und die Lampe kann ihre lichtsendende Funktion ausüben.



**Bild 1.1** Stromkreis mit Lampe

Stromkreise werden uns in den folgenden Kapiteln stets beschäftigen, wobei glühende Drähte eher die Ausnahme darstellen werden. Der Schalter hat die Elemente Batterie und Lampe verbunden. Für dieses Verbinden sind auch die Begriffe *Zusammenschalten* oder *miteinander Verschalten* üblich. Das Ergebnis ist dann eine **Schaltung**. Und wenn von *elektronischen* Schaltungen die Rede ist, dann soll speziell darauf hingewiesen werden, dass sich hier nichts bewegen soll – außer den Elektronen. Mit Motoren werden wir uns also nicht befassen.

Ziel jeder Schaltung ist die Realisierung einer **Funktion**. Diese kann sehr einfach sein, wie bei unserer Lampe, nämlich Licht in Abhängigkeit von der Stärke eines Stromes zu liefern. Komplizierte Funktionen finden wir reichlich in unserer Umgebung. Der kleine Taschenrechner soll Zahlen addieren und zum Schluss vielleicht noch den Barzahlungsrabatt für eine Ware ausrechnen. Diese Funktion erinnert schon richtig an die Mathematik, mit Variablen und einem Ergebnis. Genaugenommen können wir auch alle Funktionen, welche durch Schaltungen ausgeübt werden sollen, durch mathematische Formeln darstellen. Davon werden wir Gebrauch machen, soweit das nötig ist.

Eine sehr umfassende und verzweigte Funktion ist der Fernsehapparat. Als Ergebnisgrößen erkennen wir sofort Bild und Ton. Als Eingabegrößen erkennen wir die Nummer des Kanals bzw. des Senders, die Lautstärke usw. Und wie bei einer richtigen Funktion finden wir eine Anzahl von Parametern, die Farbabstimmung, den Kontrast, die Helligkeit u. a. m. All das stellen wir ein, an kleinen Schaltern oder über den Bildschirm und die Fernbedienung.

Somit wird etwas klar, was eigentlich für jede Dienstleistung gilt. Die Aufgabe muss nicht nur ausgeführt werden, sondern die Details der Ausführung müssen beim Auftraggeber abgeholt werden und die Ergebnisse müssen zu ihm gebracht werden. Auf unsere Schaltung bezogen

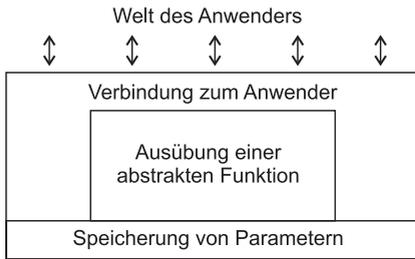


Bild 1.2 Die Schaltung im weiteren Sinne

heißt das, dass es Verbindungen zur Welt des Anwenders geben muss, denn er kann nicht direkt mit den Elektronen kommunizieren. Geeignete Wandlerelemente müssen seine Wünsche in die Schaltung übertragen bzw. die Ergebnisse sichtbar machen. So hat sich unser Horizont geweitet und wir können die Schaltung im Sinne der Darstellung von Bild 1.2 in Bereiche gliedern.

Die Zeit, als der Käufer eines Fernsehapparats mit seinen Unterlagen ein großes Blatt mit der kompletten Schaltung erhielt, ist Vergangenheit. Moderne Unterlagen zeigen ggf. ein Blockbild mit **modularen Komponenten**, welche über mehr oder weniger standardisierte Verbindungen kommunizieren. Für eine solche Anordnung ist der Begriff **System** in Gebrauch. Von Schaltung spricht man innerhalb der Komponenten. Bild 1.2 zeigt noch eine weitere wichtige Komponente, die Speicherung von Parametern. Schaltungen für diese spezielle Funktion werden wir uns ebenfalls ansehen.

Nach diesem Exkurs in die Anwendungen können wir ahnen, dass die Vielfalt der Funktionsschaltungen enorm sein wird. So erhebt sich die Frage, ob das Entwickeln von Schaltungen ein Handwerk ist, mit strengen Regeln, oder eine Kunst. In der Tat zeugt eine breite Fachliteratur für den Schaltungsentwickler von der Vielfalt der Möglichkeiten. Auch ist den Autoren ein Fachbuch mit dem vielsagenden Titel „*The Art of Electronics*“ bekannt. Andererseits gilt auch hier der Grundsatz, dass bei aller Kreativität eine solide handwerkliche Grundlage unverzichtbar ist.

In unserem Buch wollen wir uns im Wesentlichen auf der Ebene der handwerklichen Grundlage bewegen. Hinsichtlich der kreativen Höhepunkte wollen wir die Rolle des Kunstbetrachters einnehmen. Die Autoren versprechen, dass dabei (im Gegensatz zu so mancher Betrachtung schöner Kunst) alle Erklärungen eindeutig und nachvollziehbar sein werden.

## ■ 1.2 Die Welt der elektronischen Bauelemente

Elektronische Bauelemente sind physikalische Ideen in der Uniform der Technik. Und weil es immer wieder neue Ideen geben wird, wird es auch immer wieder neue Bauelemente geben. Schon auf dem heutigen Stand der Elektronik ist die Vielfalt der Bauelemente so groß, dass es unser Buch sprengen würde, wollten wir alle erklären. So ist es das Ziel dieses Abschnitts, einen Überblick zu geben und schließlich eine Auswahl für die Behandlung in den folgenden Kapiteln zu treffen.

Ganz anschaulich begegnen wir der Vielfalt der elektronischen Bauelemente in Spezialgeschäften für Elektronikbedarf. Hier warten die kleinen Komponenten mit zwei und mehr Anschlüssen in unzähligen Schublädchen oder Tüten an Ständern auf Käufer. Diese kommen mit Merktzetteln, auf denen kryptisch wirkende Bezeichnungen vermerkt sind, finden das eine oder andere und sind oft enttäuscht, weil trotz des großen Angebots nicht alles auf Lager ist. Die Vielfalt scheint fast unermesslich zu sein.

Um zunächst einen Überblick zu bekommen, wollen wir versuchen, das Feld zu gliedern. Dafür bieten sich verschiedene Merkmale und Eigenschaften an. Wir müssen also noch festlegen, in welchem Sinne diese Gliederung sein soll. Es gibt zum Beispiel die folgenden Möglichkeiten:

- nach Material: Halbleiter oder Nicht-Halbleiter
- nach Energiebilanz: aktiv oder passiv
- nach Signalart: Nachrichtenelektronik oder Leistungselektronik
- nach Funktion: rein elektrisches Bauelement oder Wandler zwischen verschiedenen physikalischen Größen.

Die Unterscheidung *Halbleiter* oder *Nicht-Halbleiter* hat historischen und fertigungstechnischen Charakter. Die technische Ära der Halbleiterbauelemente begann mit der Herstellung der Transistoren in den 50er-Jahren des 20. Jahrhunderts. Sie setzt voraus, dass man Halbleitermaterial (z. B. Silizium, Germanium) in genügender Reinheit herstellen kann. Insofern ist die Halbleiterfabrik als Platz besonderer Anforderungen (Reinraum) und besonderer Verfahren (Photolithographie, Ätztechnik, Diffusionsöfen u. a.) allgemein bekannt. Hier entwickelte sich die **Mikroelektronik**, auf die wir im [Abschnitt 1.3](#) näher eingehen. In der Halbleitersparte finden wir die Dioden und Transistoren, jeweils aufgegliedert in viele verschiedene Arten.

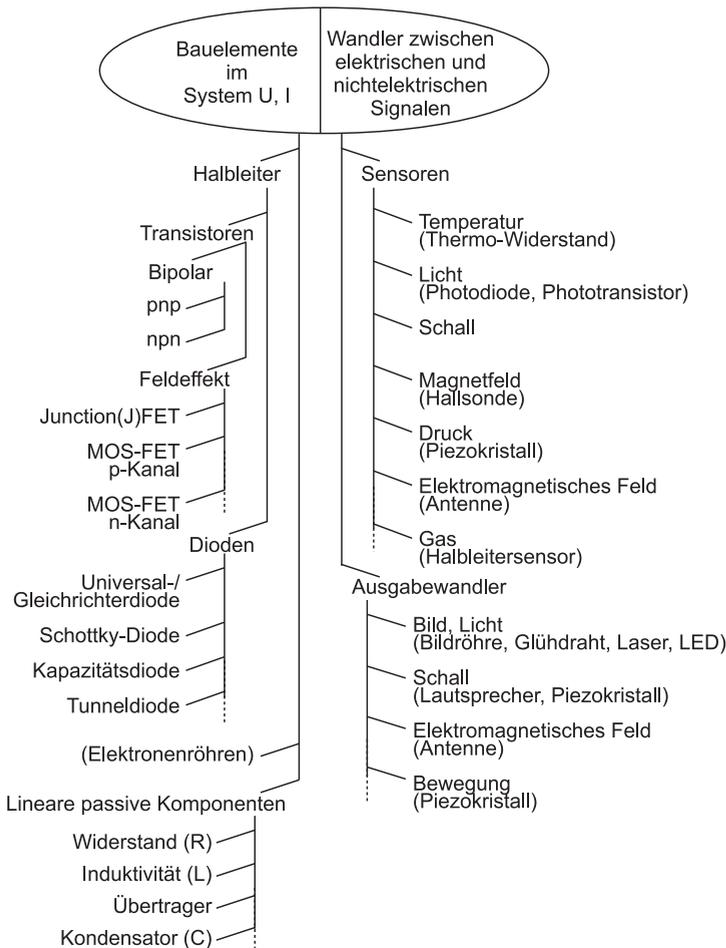
Die Unterscheidung nach der *Energiebilanz* ist theoretisch ausgerichtet. *Aktive Bauelemente* sind in der Lage, die Signalenergie in der Schaltung zu vermehren bzw. die Signale zu verstärken. Dies kann neben dem Transistor zum Beispiel auch die alte Elektronenröhre. Diese beiden wären also als aktiv einzustufen. Bei den Bauelementen, die dieses Kriterium nicht erfüllen, bilden die linearen *passiven Bauelemente* eine wichtige Gruppe. Diese Bezeichnungsweise ist sehr geläufig, so dass wir sie auch anwenden werden.

Die Gliederung nach *Signalart* entspricht der klassischen Unterscheidung zwischen Nachrichtentechnik und Energietechnik. Bei den Signalen würde das eine Unterscheidung zwischen Milliampere und Kiloampere bzw. Volt und Kilovolt bedeuten. Bei der Verlustleistung stellt sich heraus, dass diese bei den Schaltungen der Nachrichtenelektronik häufig die Signalleistung übertrifft. Bei den Schaltungen der Leistungselektronik ist jedoch das Gegenteil entscheidend. Für die Behandlung in unserem Buch wollen wir die Leistungselektronik ausklammern.

Die Gliederung nach *Funktion* berücksichtigt die *Anwendung* der Bauelemente. Zur Realisierung einer theoretisch gegebenen Funktion

$$U_2 = f(U_1)$$

bleiben wir zunächst im System von elektrischer Spannung ( $U$ ) und elektrischem Strom ( $I$ ). Um die Funktion nutzen zu können, muss eine Verbindung zur Außenwelt hergestellt werden. Dort benötigen wir Wandler, um physikalische Größen zu erfassen (Sensoren) und wir brauchen Wandler, um Ergebnisse auszugeben. Eine solche Gliederung zieht ihre Trennlinien quer durch die Gebiete der Halbleiter-/Nicht-Halbleiter- bzw. der aktiv-/passiv-Gliederung. Wir betrachten sie als bestgeeignete Gliederung für unsere Abhandlung, weil wir annehmen, dass sich der Leser aus der Sicht der Anwendung bzw. Funktion dem Thema Elektronik nähert.



**Bild 1.3** (Unvollständiger) Überblick über die elektronischen Bauelemente

In Bild 1.3 haben wir ein Gliederungsbild entwickelt, in dem wir die Welt der elektronischen Bauelemente darstellen. Unser Bild ist natürlich nicht vollständig. Und eingedenk der ersten Sätze dieses Abschnitts wird es ein vollständiges Bild in einem Buch kaum über längere Zeit geben.

Ganz eindeutig zu trennen sind die beiden Kategorien von Bauelementen in unserer Darstellung nicht. Wir müssten sonst Bauelemente, die Verlustleistung produzieren, als Ausgabelemente für Wärme einordnen oder die Halbleiterbauelemente als Temperatursensoren. Letzteres wurde besonders in der Anfangszeit der Halbleitertechnik gerne angemerkt – von Verfechtern der Elektronenröhren, versteht sich. In der Schaltungstechnik, insbesondere bei präzisen Analogschaltungen, muss die Temperaturabhängigkeit der Parameter von Halbleiterbauelementen sorgfältig berücksichtigt werden.

Mit Bild 1.3 wird die Weitläufigkeit des Gebiets der elektronischen Bauelemente, mit denen man Schaltungen aufbauen kann, deutlich. Wir müssen uns daher die Frage stellen, wie unvollständig eine (eingeschränkte) Darstellung von *Elektronik und Schaltungstechnik* wie die

unsere sein darf, um doch nützlich zu sein. Welche Bauelemente dürfen wir also weglassen? – Zunächst eigentlich keine, denn alle sind wichtig. Dies können wir ganz spontan nachvollziehen, wenn wir die rechte Seite des Diagramms, die Wandler, betrachten.

Zu jedem Eintrag fällt uns eine Situation ein, wo ein solcher Wandler für uns gearbeitet hat. Wenn wir unseren Tageslauf mit Radio, Fernsehen, Auto vergegenwärtigen, so dürfte kaum ein Tag vergehen, an dem nicht alle Typen beteiligt sind. Andererseits besteht der große Anspruch an die Elektronik darin, unser Leben durch Verarbeitung von Signalen zu unterstützen und zu bereichern. Insofern steigen die Elemente der linken Seite des Diagramms in unserer Gunst. Denn sie werden verwendet, um in Schaltungen die Funktionen zu realisieren, die wir uns als Anwender wünschen. Und auf der Realisierung der Funktion liegt das Schwergewicht dieses Buches. So entscheiden wir uns für die linke Seite, die *Bauelemente im System U, I*. Es hat sich dabei gezeigt, dass wir bei der Intensität, mit der wir den Stoff behandeln, nicht auf alle Elemente der Darstellung zurückgreifen. Die folgenden Elemente werden nicht vorkommen:

- Junction (J)FET (Junction Feldeffekttransistor)
- Schottky-Diode
- Kapazitätsdiode
- Tunnelodiode
- Übertrager.

Für die Anwendung dieser Bauelemente verweisen wir auf die Fachliteratur (z. B. [3, 8]).

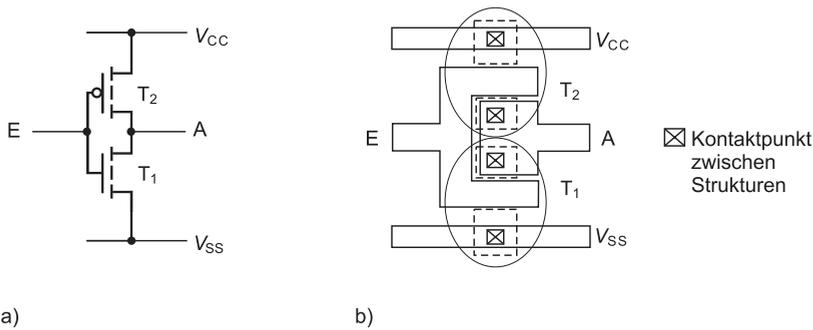
## ■ 1.3 Mikroelektronik

Mikroelektronik ist nüchtern physikalisch die Realisierung elektronischer Bauelemente und Schaltungen im mikroskopischen Maßstab. Andererseits ist Mikroelektronik der Inbegriff moderner Elektronik, verbunden mit der Vorstellung von Mitarbeitern in weißen Overalls, die in staubfreien Räumen geheimnisvolle Fertigungsvorgänge durchführen.

Das zentrale Objekt der Mikroelektronik ist die sogenannte **integrierte Schaltung**. Frei übersetzt ist damit ein Objekt gemeint, welches durch Verschmelzung der Bauelemente einer Schaltung entstanden ist. Als Bezeichnung für das dünne Halbleiterplättchen mit der integriert realisierten Schaltung hat sich der Begriff *Chip* eingebürgert. Was man sich dabei unter der Verschmelzung der Bauelemente vorzustellen hat, ist in Bild 1.4 veranschaulicht. Tatsächlich existiert in der integrierten Schaltung jedes Bauelement für sich. Die Verschmelzung bezieht sich auf die Verbindungen zwischen den Bauelementen, welche gleichzeitig Bestandteil zweier verbundener Bauelemente sind. In der Abbildung erkennt man die Flächen für E (Eingang) und A (Ausgang). Der Schaltplan zeigt, dass es sich um Verbindungen zwischen beiden Transistoren  $T_1$  und  $T_2$  handelt.

Die Transistoren sind in der Darstellung b) *Layout* einzeln ausgeführt und die Leitungsstrukturen E und A sind je aus einem Stück.

Das Layout-Bild ist gegenüber der technologischen Ausführung stark vereinfacht. Es lässt aber trotzdem eine wichtige Eigenschaft der integrierten Schaltung erkennen. Die Bauelemente sind in einer Ebene angeordnet und bestehen aus mehreren Schichten von Material, d. h. Metall, Isolator und Halbleiter. Im Kapitel 4 werden wir solche Strukturen anhand der Transistoren



**Bild 1.4** Integrierte Schaltung (CMOS-Inverter): a) Schaltplan, b) Layout

näher behandeln. Die gezeigten Kontaktpunkte stellen die Verbindung zwischen den Strukturen in voneinander isolierten Schichten her. Die Ausführung der Bauelemente in ebener Form nennt man *Planartechnik*. Der Grundriss dazu heißt *Layout* (Bild 1.4b).

Den zusammenhängenden Strukturen E bzw. A des Layouts entsprechen im Schaltplan je das Zusammenkommen von drei Verbindungen. Hier wäre zum Beispiel in einem diskreten Aufbau der Schaltung je eine Lötverbindung erforderlich. Würden wir versuchen, uns nach dieser Lötverbindungstechnik eine moderne Großschaltung, etwa in Gestalt einer Rechner-Zentraleinheit (CPU) mit Millionen von Transistoren, vorzustellen – es ginge nicht. Ganz abgesehen von Ausfall-Szenarien bei so hohen Anzahlen von Bauelementen, die integrierte Mikroschaltung ist hier der einzige Lösungsweg. Daher ist die Mikroelektronik tatsächlich die unverzichtbare Basis für die moderne elektronische Signal- und Informationsverarbeitung.

Die Technologie der Mikroelektronik hat im Zuge ihrer Entwicklung eine stetige Verfeinerung der geometrischen Strukturen hervorgebracht. Waren die kleinsten Abmessungen in den Anfangsjahren noch im Bereich mehrerer Mikrometer, so sind wir inzwischen im Bereich unter 100 nm. Dies stellt eine große Herausforderung an die optischen Methoden zur Übertragung der Strukturbilder auf die Siliziumscheibe dar. Es muss mit kurzwelligem Licht und besonderen Abbildungsverfahren gearbeitet werden.

Hinsichtlich des Betriebes der Schaltungen stellt sich die Frage, wie angesichts der maßstäblichen Verkleinerung der Bauelemente die elektronischen Größen auszulegen sind. Eine im wahrsten Sinne des Wortes heiße Frage ist dabei die Erzeugung von Wärme durch Verlustleistung, d. h. durch das Produkt  $U \cdot I$  (Spannung  $\cdot$  Strom). Wir werden das Thema Verlustleistung im [Kapitel 2](#) ausführlich behandeln. Hier wollen wir nur so viel erörtern wie wir brauchen, um zu verstehen, dass das Produkt  $U \cdot I$  beim Übergang auf Mikroelektronik kleiner werden muss. Die Erzeugung von Wärme können wir wie einen Fluss verstehen, und wo dieser gestaut wird, wird es heiß. Da der Abfluss von Wärme von einem Körper proportional zu seiner Oberfläche ist, kann bei kleinerer Oberfläche (Mikroschaltung) nur ein entsprechend kleinerer Wärmefluss verkraftet werden. Also muss das Produkt  $U \cdot I$  kleiner werden. Bei der Spannung  $U$  sind die Möglichkeiten gering, was u. a. aus der Funktion des pn-Überganges, den wir im [Kapitel 4](#) besprechen werden, resultiert. Beim Strom wissen wir, dass es sich um die Fortbewegung der Elektronen handelt. Trotzdem haben wir die Vorstellung und Erfahrung, dass es sich beim Strom um eine quasikontinuierliche Größe handelt. Was passiert jedoch, wenn im Zuge der Miniaturisierung eine maßstäbliche Verkleinerung der Stromstärke stattfindet? Dazu machen wir eine Beispielrechnung. Ein Strom von 50 mA, wie wir ihn in traditionell aufgebauten

Schaltungen antreffen, liefert pro Mikrosekunde

$$n = \frac{Q}{e} = \frac{I \cdot t}{e} = \frac{50 \text{ mA} \cdot 1 \text{ } \mu\text{s}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}} = \frac{50 \cdot 10^{-9}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 31,25 \cdot 10^{10}$$

( $e \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$  As, Ladung des Elektrons)

Elektronen. Würden wir diesen Strom um den Faktor 1000 verkleinern, so wären es immer noch  $31 \cdot 10^7$  Elektronen pro  $1 \text{ } \mu\text{s}$  und selbst pro  $1 \text{ ns}$  wären es noch  $31 \cdot 10^4$ . Hier ist also der Charakter eines näherungsweise kontinuierlichen Stromes auch bei starker Verkleinerung noch vorhanden. Unsere sehr einfache und pauschale Abschätzung zeigt, dass mit der Miniaturisierung der integrierten Schaltungen in erster Linie die Verkleinerung der Stromstärke in Betracht kommt. Die Verkleinerung der Spannung findet in einem gewissen Umfang auch statt.

Die Technik der integrierten Mikroschaltungen hat die Entwicklung von elektronischen Digitalbausteinen mit Millionen von Transistoren ermöglicht. Das entspricht Hunderttausenden von einzelnen Schaltungen, welche zur Verarbeitung der Signale angeordnet und verknüpft sind. Das Ablaufgeschehen in so einem riesigen Netzwerk können wir mit dem Betrieb eines großen Werkes vergleichen. Eine Stabsabteilung ordnet an, was zu tun ist, und Unterabteilungen vollbringen Leistungen und transferieren Werkstücke (Signale). Das Geschehen lässt sich umso besser steuern und überwachen, je klarer die Gliederung und je einheitlicher die Kommunikationsmechanismen sind. Für das elektronische Netzwerk folgt daraus die Forderung der Modularität der Teilnetze und die Einheitlichkeit der Schnittstellen zwischen ihnen. Dann gewinnt man einen weiteren Vorteil. Bereits vorhandene modulare Teilnetze können wiederholt zum Aufbau neuer Bausteine verwendet werden. Ein Bausteintyp, bei dem das besonders offensichtlich ist, ist der Speicherbaustein. Die Speicher haben sich in der Regel in Schritten der Vervierfachung der Speicherkapazität weiterentwickelt. Diese Entwicklungsschritte lassen sich bei der sehr regelmäßig angelegten Speichermatrix (siehe auch [Kapitel 6](#)) gut durch Kombination modularer Teilmatrizen realisieren.

Analoge Mikroschaltungen haben als Operationsverstärker in vielen Varianten große Bedeutung. Sie können von der Zahl der Bauelemente her nicht mit den Digitalschaltungen konkurrieren. Ein bedeutsamer Aspekt der Integration von Bauelementen ist hier die Möglichkeit, in enger Nachbarschaft auf dem Chip exakt gleiche Elemente herzustellen.

## ■ 1.4 Der Weg durch das Buch

Dieses Buch wurde geschrieben für Leser, welche wissen wollen, was sich hinter den Begriffen *Elektronik* und *Schaltungstechnik* verbirgt, auch wenn sie kein Grundlagenstudium in Elektrotechnik absolviert haben. Da es aber nicht ohne Elektrotechnik geht, haben wir die nötigen Grundlagen in den Text eingeflochten. Wir geben dabei nicht die Anleitung, wie man Schaltungen entwickelt. Aber es ist natürlich nicht ausgeschlossen, mit dem, was man hier lernt, eigene Experimente zu machen. Das macht bestimmt Spaß und vermittelt tiefere Einblicke. Im Übrigen verweisen wir an vielen Stellen auf weiterführende Fachbücher, sowohl für die Grundlagen als auch für die Anwendungen.

Ein ganzes Buch von Anfang bis Ende durchzuarbeiten, ist ein umfangreiches Projekt. Es kommt vielleicht für Studenten in Betracht, die dieses im Laufe eines Semesters tun. Wir ha-

ben uns daher Gedanken gemacht, welche Zielvorstellungen es geben könnte, und haben dazu Empfehlungen entwickelt. Es fällt auf an unserem Buch, dass die Abschnitte recht lang sind. Dies rührt daher, dass wir kein Nachschlagewerk schreiben wollten, wo man schnell mal etwas nachschaut. Jedes Kapitel stellt einen bestimmten Komplex dar, der im Zuge der Darstellung aufgebaut wird. Im Folgenden listen wir zunächst die Komplexe auf.

*Kapitel 2: Physikalische Grundlagen elektrischer Schaltungen*

Physikalische Grundlagen einfacher Bauelemente, Verhalten der Bauelemente in Stromkreisen.

*Kapitel 3: Passive Netzwerke*

Signale und Schaltungen aus theoretischer Sicht, komplexe Übertragungsfunktion, Spektrum, Ausblick auf Schaltungssynthese

*Kapitel 4: Halbleiterbauelemente*

Prinzip der Halbleiterdiode, Bipolartransistor, Feldeffekttransistor, Einbau der Transistoren in Schaltungen, Arbeitspunkt, Kleinsignalverhalten und Modelle, Ausblick auf das Verhalten bei höherer Frequenz

*Kapitel 5: Analoge Grundsaltungen*

Bipolartransistor in Emitter-/Kollektor-/Basisschaltung, Feldeffekttransistor in Source-/Drain-Schaltung, Differenzverstärker, Darlington-Schaltung, Stromspiegel, Operationsverstärker, aktive Filter, Analog-Digital-Umsetzer, Digital-Analog-Umsetzer, Ausblick auf Schaltungsanalyse mit PSPICE

*Kapitel 6: Digitale Grundsaltungen und Speicher*

Prinzip der binären Schaltung, Verknüpfungsschaltungen in Bipolartechnik und CMOS, komplexe Gatter, komplexe Bausteine, Abhängigkeitsnotation, Taktgenerator, Ausblick auf SRAM, DRAM, EPROM, Flash-EEPROM

Mit Ausnahme von *Kapitel 2*, das man bei Bedarf ganz durcharbeiten sollte, enden alle Kapitel mit einem Ausblick als kleine Dreingabe.

*Kapitel 3* hat Grundlagencharakter und der rein digital interessierte Leser möge es im Bereich der Signale nur anlesen.

*Kapitel 4* ist eine wichtige Voraussetzung für das Verständnis der Kapitel 5 und 6. Für die digitalen Schaltungen braucht man das Kleinsignalverhalten nicht.

*Kapitel 5* wird den digital orientierten Leser nicht so stark interessieren. Wer jedoch experimentieren will, wird hier reichlich Anregungen finden.

*Kapitel 6* sollte kein Informatiker verpassen.

Damit hoffen wir, ein paar nützliche Tipps gegeben zu haben. Wir hoffen, dass sich der Leser/die Leserin einfach in den Bann der Themen ziehen lässt. Zur Rekapitulation haben wir ein paar Seiten mit Verständnisfragen eingebaut.

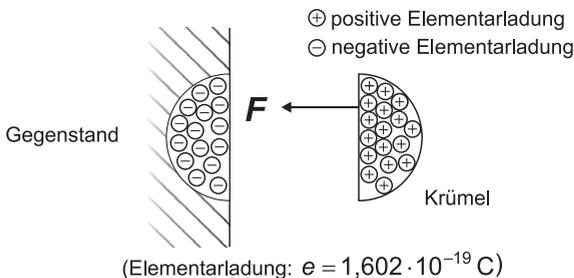
# 2

## Physikalische Grundlagen elektrischer Schaltungen

### ■ 2.1 Spannung und Strom

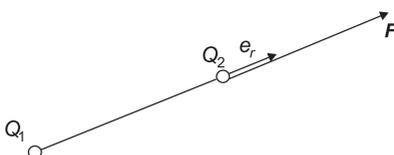
*Spannung* und *Strom* transportieren Information, sorgen für die Funktionsbereitschaft von elektronischen Bausteinen und Geräten und können mit diversen Messgeräten erfasst und dargestellt werden. Elektrische Spannung und elektrischer Strom sind also offenbar die **Grundgrößen** unserer Abhandlung, und wir wollen daher als erstes das physikalische Verständnis für diese Größen aufbauen.

Dass zwischen Spannung beziehungsweise Strom und mechanischen Kräften eine Beziehung besteht, ist im Hinblick auf den Elektromotor schon deutlich. Wir wollen den mechanischen Kräften zunächst im Kleinen nachspüren und die Verhältnisse auf der Ebene der elektrischen Ladungen betrachten. Dazu wählen wir ein Beispiel aus dem Alltag. Wer hat sich nicht schon einmal darüber geärgert, dass Styroporkrümeln beim Öffnen einer Verpackung an Händen und Gegenständen haften und sich nicht zusammenfegen lassen. – Die Ursache sind Ansammlungen elektrischer Ladungen, und das Haften ist ja auch eine kleine Kraftwirkung. Warum das gerade mit Styropor so deutlich wird, darauf kommen wir später. In [Bild 2.1](#) ist der Sachverhalt dargestellt.



**Bild 2.1** Haftung des Styroporkrümels

Die Kraft  $F$  zieht den Styroporkrümel zum Gegenstand. Genauer gesagt ziehen sich die positiven und die negativen Ladungen an. Das Coulomb'sche Gesetz beschreibt diesen Sachverhalt abstrakt ([Bild 2.2](#)).



**Bild 2.2** Zum Coulomb'schen Gesetz (zugeschnitten auf eine Anordnung mit  $Q_1$  ortsfest,  $Q_2$  beweglich)

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \mathbf{e}_r \tag{2.1}$$

$Q_1$ : Ladung des Körpers 1

$Q_2$ : Ladung des Körpers 2

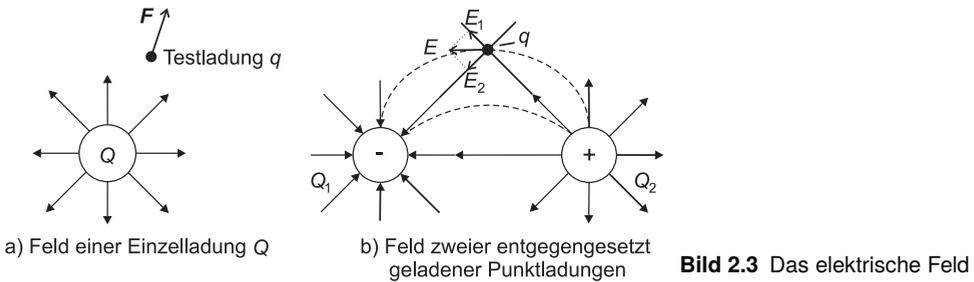
$r$ : Abstand

$\mathbf{e}_r$ : Einheitsvektor, der die Richtung der Kraft von  $Q_1$  nach  $Q_2$  angibt.

elektrische Feldkonstante:  $\epsilon_0 = 8,859 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m^2}$

Die Gleichung (2.1) zeigt, dass die Kraft  $F$  mit der Größe der Ladungen zusammenhängt und dass sie kleiner wird, wenn der Abstand  $r$  der Ladungen größer wird. Die Abbildung zeigt weiter, dass die Richtung der Kraft der Richtung der Verbindungslinie der Ladungen entspricht. Ist eine Ladung negativ und die andere positiv, dann wird  $F$  negativ und die Ladungen ziehen sich an. Auch die in der Abbildung gemachte Annahme  $Q_1$  ortsfest,  $Q_2$  beweglich könnte geändert werden.  $Q_1$  war als Bezugspunkt festgelegt, von dem aus  $r$  gemessen wird, dokumentiert durch den Einheitsvektor  $\mathbf{e}_r$ .  $Q_2$  könnte alternativ auch Bezugspunkt mit der Konsequenz sein, dass  $\mathbf{e}_r$  und  $F$  in umgekehrter Richtung an  $Q_1$  anzutragen wären.

Der Umstand, dass das System  $Q_1, Q_2$  räumlich nur durch den Abstand der beiden Punktladungen charakterisiert ist, zeigt, dass die Kraft  $F$  keiner weiteren räumlichen Randbedingung unterliegt. Sie könnte für beliebige Positionen von  $Q_2$  in der Umgebung von  $Q_1$  berechnet werden. Systematisch könnte man den Raum um  $Q_1$  mit einer Testladung  $q$  untersuchen und würde in jedem Raumpunkt eine Kraft  $F$  mit Betrag und Richtung erhalten. Diese Vorstellung veranschaulichen wir in Form eines Kraftfeldes. Wir nennen es das **elektrische Feld**  $E$ , weil es die Beziehung elektrischer Ladungen zueinander darstellt.



Eine wichtige Eigenschaft des elektrischen Feldes ist die lineare (additive) Überlagerung der Wirkungen mehrerer Ladungen. Dazu zeigt Bild 2.3b exemplarisch ein System aus zwei festen Ladungen  $Q_1$  und  $Q_2$  und der mobilen Testladung  $q$ . Die Kraft auf die Ladung  $q$  ergibt sich aus der Kombination der Wirkungen von  $Q_1$  und  $Q_2$ , wobei hier die Regeln der linearen Vektorüberlagerung anzuwenden sind. Somit haben wir auch hier für jeden Punkt des Raumes Richtung und Wert der Kraft. Gedachte Linien, die die Richtung der Kraft in jedem Raumpunkt widerspiegeln, nennen wir die Feldlinien (Bild 2.3b, unterbrochene Linien). Um die Betrachtung quantitativ sinnvoll abzurunden, wollen wir folgende Beziehungen ansetzen.

**Kraft** von einer feststehenden Ladung  $Q$  auf eine bewegliche Testladung  $q$  (z. B. eine positive Ladung mit dem Wert der elektrischen Elementarladung  $e$ ):

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q \cdot q}{r^2} \mathbf{e}_r \tag{2.2}$$

**Elektrische Feldstärke:**

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \mathbf{e}_r \quad (2.3)$$

Nachdem nun klar ist, dass in einem System mit gezielt positionierten Ladungspaketen (idealisiert als Punktladungen) Kräfte auftreten, können wir zeigen, wie hier Arbeit geleistet und Energie gespeichert werden kann. Entfernt man zwei Ladungen, welche sich anziehen, voneinander, so muss man die Anziehungskraft  $\mathbf{F}$  überwinden.

Für ein kleines Wegelement  $\Delta \mathbf{s}$ , welches Länge und Richtung hat, also ein Vektor ist, ergibt sich

$$\Delta W = \mathbf{F}^* \cdot \Delta \mathbf{s}$$

(Es handelt sich hier um das Skalarprodukt von zwei Vektoren.)

- $\mathbf{F}^*$ : aufgewendete Kraft
- $\Delta W$ : geleistete Arbeit
- $\mathbf{s}$ : Wegkoordinate

Da, wie wir in Gleichung (2.1) gesehen haben, die Kraft  $\mathbf{F}$  von der Raumposition abhängt, erhalten wir für die geleistete Arbeit  $W$  vom Ort  $a$  zum Ort  $b$ :

$$\begin{aligned} W &= \int_a^b dW = \int_a^b \mathbf{F}^* \cdot d\mathbf{s} \\ W &= \int_a^b -\mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} = -q \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} \end{aligned} \quad (2.4)$$

( $\mathbf{F}$  ist die Kraft des Feldes  $\mathbf{E}$  auf die Ladung  $q$ .  $\mathbf{F}^*$  ist  $\mathbf{F}$  entgegengerichtet und daher vorzeicheninvertiert.)

Die Fähigkeit, dass eine derart exponierte Ladung, sofern sie im Punkt  $b$  nicht festgehalten wird, unter Verrichtung von Arbeit wieder in den Punkt  $a$  zurückfallen kann, erlaubt die Definition einer Größe, die wir Potenzial nennen:

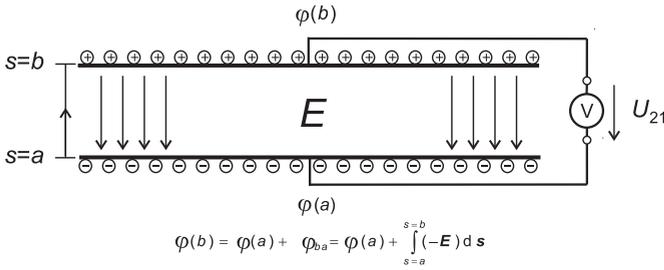
$$\varphi_{ba} = \frac{W}{q} = - \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} \quad (2.5)$$

Die Größe  $\varphi_{ba}$  bezieht sich nur auf die Verhältnisse zwischen den Punkten  $a$  und  $b$ . Diese wollen wir nun als Bestandteile eines umfassenden Systems, in dem es einen absoluten Potenzialnullpunkt gibt, begreifen. In diesem System hat jeder Punkt  $P$  ein Potenzial  $\varphi(P)$  bezüglich des Nullpunkts, das wir als das absolute Potenzial bezeichnen.  $\varphi_{ba}$  ist also eine *Potenzialdifferenz*.

Die folgende Definition führt uns zum ersten Ziel unserer Ableitung der Grundgrößen.

Die Potenzialdifferenz  $\varphi_{ba}$  zwischen zwei Punkten  $a$  und  $b$  wird als die Spannung  $U_{ba}$  zwischen diesen Punkten bezeichnet:

$$U_{ba} = \varphi_{ba} = \varphi(b) - \varphi(a) = - \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} \quad (2.6)$$



**Bild 2.4** Potenziale, elektrisches Feld und Spannung am geladenen Kondensator

Damit ist die Spannung  $U_{ba}$  ein Ausdruck dafür, dass elektrische Ladungen sich unter Verrichtung mechanischer Arbeit von Punkt  $b$  nach Punkt  $a$  bewegen können. Bild 2.4 veranschaulicht dies am Beispiel eines geladenen Kondensators. Zum einen versucht die Kraft zwischen den Ladungen den Kondensator zusammenzudrücken, was mechanisch leicht verhindert werden kann. Zum anderen wollen wir uns daran erinnern, dass das elektrische Feld den ganzen Raum ausfüllt (Bild 2.3) und somit auch entlang dem Draht existiert. Damit entsteht ein Anreiz, dass positive und negative Ladungen sich entlang dem Draht aufeinander zu bewegen, den physikalisch nur die negativen wahrnehmen können, indem sie sich zur oberen Platte bewegen. Dies führt zur Entladung, falls ein durchgehender Pfad existiert. Zur Berechnung der Feldstärke  $E$  in Bild 2.4 greifen wir auf die Gleichung (2.6) zurück. Es gilt:

$$U_{21} = - \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$$

Da  $\mathbf{E}$  und  $d\mathbf{s}$  zu einander parallele, aber entgegengerichtete Vektoren sind, wird das Minus beim Übergang zu den Beträgen aufgehoben. Mit der Beschränkung auf den Bereich im Zentrum der Anordnung, wo  $\mathbf{E}$  homogen ist, kann  $|\mathbf{E}| (= E)$  als Konstante vor das Integral gezogen werden.

$$U_{21} = E \int_a^b ds = E \cdot (b - a)$$

Damit haben wir die Formel für den Zusammenhang von Spannung  $U$ , Feldstärke  $E$  und Elektrodenabstand  $d$  gefunden:

$$E = \frac{U}{d} \tag{2.7}$$

Die Einheit der Spannung ist das Volt (V).

$$1 \text{ V} = 1 \frac{\text{Nm}}{\text{C}} \quad \left( 1 \text{ N} = 1 \frac{\text{kgm}}{\text{s}^2}; 1 \text{ C} = 1 \text{ As} \right)$$

Die Gleichung stellt die Beziehung zu den Größen (Kraft, Weg, Ladung) der Ableitung her.

In der Diskussion zu Bild 2.4 haben wir – quasi als Nebenprodukt – die Spannung als Ursache für fließende Ladungen identifiziert. Daraus wollen wir nun die zweite wichtige Grundgröße, den elektrischen Strom, definieren. Pauschal beziffern wir seine Stärke als die Menge  $dQ$  an Ladung, welche innerhalb der Zeit  $dt$  durch eine Bezugsfläche  $A$  tritt.

$$I = \frac{dQ}{dt} \tag{2.8}$$

Ein wichtiger Begriff im Hinblick auf den Stromleiter ist die Stromdichte  $J$ .

Bild 2.5 zeigt schematisch das Geschehen in einem Stück Draht. Es ist angedeutet, dass die Elektronen nicht geradlinig durch den Draht wandern, sondern eine kombinierte Bewegung aus einer regellosen Komponente und der feldbedingten Drift ausführen. Es ist dabei stillschweigend berücksichtigt, dass die Elektronen sich nur im Draht aufhalten und diesen nicht verlassen. Insofern gibt es eine feste Beziehung zwischen Stromstärke  $I$ , Stromdichte  $J$  und Querschnittsfläche  $A$ :

$$I = J \cdot A \quad (2.9)$$

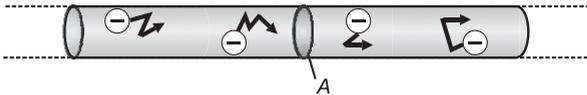


Bild 2.5 Der Strom in einem metallischen Leiter

Dabei ist angenommen, dass die Stromdichte  $J$  über der ganzen Fläche  $A$  gleich ist. Diese Annahme ist bei sehr hohen Frequenzen nicht mehr erfüllt, weswegen es dann notwendig ist, eine Integralbeziehung anzusetzen:

$$I = \int_A J dA$$

Dies sei hier nur zur Vollständigkeit vermerkt. Interessant ist die folgende Betrachtung zur Dynamik des Stromflusses. Wie funktioniert das Ein- und Ausschalten des Stromes beziehungsweise wie schnell ist die Driftbewegung?

Die mittlere Geschwindigkeit  $\bar{v}$  der Driftbewegung ist sicher proportional zur antreibenden Kraft für die Elektronen, der elektrischen Feldstärke  $E$ . Mit dem Proportionalitätsfaktor  $\mu$  wird daraus die folgende Gleichung.

$$\bar{v} = \mu \cdot E \quad (2.10)$$

Den Faktor  $\mu$  nennen wir die Beweglichkeit der Elektronen. Er wird experimentell bestimmt.

Beispiel:

Metalldraht, 1 m Länge

Spannung zwischen den Enden: 0,1 V

$$\mu = 50 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$$

Wir erhalten

$$\bar{v} = 50 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \cdot \frac{0,1 \text{ V}}{1 \text{ m}} = 0,05 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

Das Ergebnis überrascht durch die niedrige Geschwindigkeit, die wir beobachten könnten, wenn es möglich wäre, Elektronen zu kennzeichnen. Der entscheidende Effekt für die Dynamik des Stromflusses ist die Steuerung der Drift durch das elektrische Feld. Insofern interessiert also die Frage, wie schnell das elektrische Feld  $E$  entlang einem Draht beziehungsweise innerhalb eines Netzwerkes anliegen kann. Diese Frage richtet sich auf die Ausbreitung des

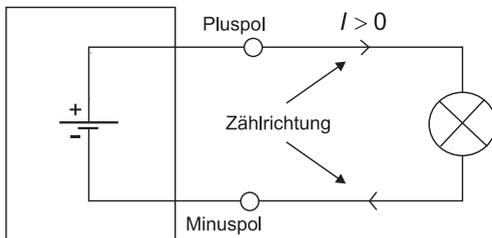
Feldes in Luft beziehungsweise in einem Material. Die Geschwindigkeit beträgt

$$v_E = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \epsilon}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}} \tag{2.11}$$

$c$ : Lichtgeschwindigkeit  
 In Luft gilt:  $\mu_r = \epsilon_r = 1$

Somit erhalten wir für die Ausbreitungsgeschwindigkeit des elektrischen Feldes in Luft die Lichtgeschwindigkeit  $c$ . Für die Dynamik des Stromflusses in einer Schaltung bedeutet dies, dass zwar die Elektronen langsam wandern, dass aber der Strom praktisch an allen Stellen gleichzeitig „gestartet“ wird.

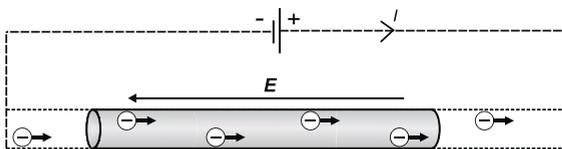
Anschließend noch eine Bemerkung zur Flussrichtung des Stromes: In Schaltungen verwenden wir **Zählpfeile**, um festzulegen, in welcher Flussrichtung wir den Strom als positiv werten wollen. Fließt der Strom tatsächlich in Richtung des Zählpfeils, dann hat die Stromstärke  $I$  also einen positiven Wert. Dies wird durch **Bild 2.6** dargestellt. Der Aussage liegt die Definition der **technischen Stromrichtung** zu Grunde.



**Bild 2.6** Stromfluss und Zählrichtung

**Definition:** Die Stromstärke ist positiv, wenn die Zählrichtung des Stromes vom Pluspol der Spannungsquelle über die Schaltung zum Minuspol zeigt.

Hinsichtlich der Elektronen folgt daraus gemäß **Bild 2.7**: Die Elektronen bewegen sich entgegengesetzt zur positiven Stromrichtung.



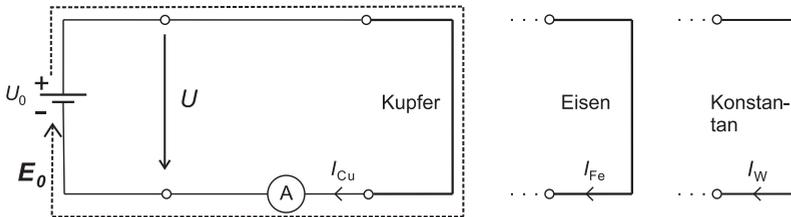
**Bild 2.7** Elektronenbewegung und technische Stromrichtung

## ■ 2.2 Widerstand, Kapazität, Induktivität

In diesem Abschnitt wollen wir die physikalischen Effekte betrachten, welche den drei wichtigsten passiven Bauelementen – Widerstand, Kondensator, Spule – zu Grunde liegen. Mit dem Begriff *passives* Bauelement wollen wir uns später genauer beschäftigen. An dieser Stelle wollen wir uns damit begnügen, festzustellen, dass es sich um Schaltkreiselemente handelt, welche dem Schaltkreis elektrische Energie auf Dauer oder vorübergehend entnehmen. Zum Beispiel wandeln sie diese in Wärme um oder sie speichern diese Energie und geben sie zu einem späteren Zeitpunkt zurück.

## 2.2.1 Stromleitung und Widerstand

Nehmen wir gleich geformte Drähte aus unterschiedlichen Metallen, z. B. Kupfer, Eisen, Konstantan, und schließen sie alternativ an eine Spannungsquelle an, so können wir unterschiedliche Stromstärken beobachten (Bild 2.8).



**Bild 2.8** Experiment zur Messung der Stromstärken  $I_{Cu}$ ,  $I_{Fe}$ ,  $I_W$

An allen drei Drahtvarianten liegt gemäß den Erkenntnissen aus Abschnitt 2.1 die gleiche Feldstärke  $E_0$  als Antrieb für die Drift der Elektronen an. Unterschiedliche Reaktion hinsichtlich der Stromstärke muss also auf unterschiedliche Bedingungen der Elektronenbewegung im Material zurückzuführen sein. Pauschal registrieren wir dies in Form einer unterschiedlichen spezifischen Leitfähigkeit  $\kappa$  des Materials. Mit der spezifischen Leitfähigkeit  $\kappa$  wird die Verbindung zwischen Feldstärke  $E$  und Stromdichte  $J$  hergestellt.

$$J = \kappa \cdot E \quad (2.12)$$

Unter Verwendung der Gleichungen (2.7) und (2.8) können wir daraus den Zusammenhang zwischen Spannung  $U$  und Strom  $I$  an einem Draht der Länge  $L$  berechnen:

$$\begin{aligned} I &= J \cdot A = \kappa \cdot E \cdot A = \kappa \cdot \frac{U}{L} \cdot A \\ I &= \kappa \cdot \frac{A}{L} \cdot U \end{aligned} \quad (2.13)$$

$L$ : Länge des Drahtes  
 $A$ : Querschnittsfläche

Mit

$$\kappa \cdot \frac{A}{L} = \frac{1}{R} (= G) \quad (2.14)$$

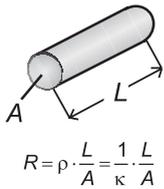
$R$ : Widerstand  
 $G$ : Leitwert

erhalten wir:

$$I = \frac{U}{R} (= U \cdot G) \quad (2.15)$$

Mit Gleichung (2.15) haben wir das **Ohmsche Gesetz** gefunden.  $R$  ist der Widerstand des Drahtes, wobei auch der Begriff *ohmscher Widerstand* gebräuchlich ist. Die Maßeinheit des Widerstandes folgt aus Gleichung (2.15) zu

$$1 \text{ Ohm} = \frac{1 \text{ Volt}}{1 \text{ Ampere}} \quad \text{bzw.} \quad 1 \Omega = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ A}}$$



Material	$\rho \left[ \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}} \right]$	$\kappa \left[ \frac{\text{m}}{\Omega \text{ mm}^2} \right]$
Cu	0,018	57
Ag	0,016	62
Fe	0,098	10
Konstantan	0,5	2

**Bild 2.9** Widerstand eines Drahtes

In Bild 2.9 sind die Verhältnisse zusammen mit einer Tabelle von Zahlenwerten nochmals dargestellt. Der Wert  $\rho$  ist der spezifische Widerstand des Materials.

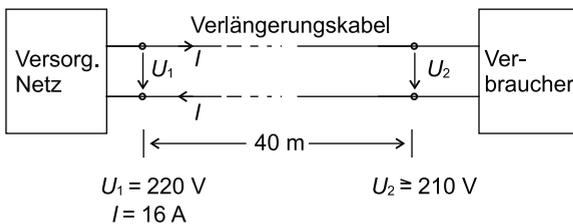
Offen ist immer noch die Frage, warum die Drähte unterschiedliche Werte  $\rho$  und  $\kappa$  haben. Dazu wollen wir die Darstellung von Bild 2.5 nochmals betrachten. Die Fortbewegung der Elektronen ist durch häufige Stöße an Atomen gekennzeichnet. Es erscheint plausibel, dass die Häufigkeit der Stöße einen Einfluss auf das Vorwärtskommen der Elektronen haben könnte. Außerdem geben die Elektronen durch die Stöße kinetische Energie, welche sie u. a. durch das Feld  $E$  gewonnen haben, an das Atomgitter ab. Diese Energie wirkt sich als vermehrte Gitterschwingung aus, was nach außen als Wärme in Erscheinung tritt. Daraus können wir qualitativ folgern:

- Bei gleichem Strom durch zwei Drähte unterschiedlichen Widerstands wird der Draht mit dem höheren Widerstand wärmer.

Damit haben wir den Mechanismus der Umwandlung elektrischer Energie in Wärme gefunden.

Zur Veranschaulichung betrachten wir ein Beispiel: Ein Verlängerungskabel für die Netzspannungszuführung von 220 V (Wechselstrom, Effektivwert) ist zu dimensionieren. Das Kabel soll eine Länge von 40 m aufweisen (z. B. Kabeltrommel). Der Spannungsverlust soll 10 V bei Belastung mit 16 A nicht übersteigen. Gesucht ist der notwendige Kupferquerschnitt der Adern des Kabels.

Zur Lösung skizzieren wir zunächst den zu betrachtenden Stromkreis (Bild 2.10).



**Bild 2.10** Spannungsversorgung über Verlängerungskabel

Er besteht zwischen Versorgungsnetz und Verbraucher aus hinleitender Ader und rückleitender Ader. Der zugelassene Spannungsverlust verteilt sich also auf eine Länge von 80 m. Die Ader besteht aufgrund der nötigen Flexibilität aus vielen dünnen Drähtchen, deren Querschnittsfläche in Summe uns interessiert. Wir machen einen Ansatz für einen virtuellen Draht der Länge 80 m bei einem Strom von 16 A und berechnen seine Querschnittsfläche  $A$  für die Gesamtspannung von 10 V. Aus dem Ohmschen Gesetz folgt:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{10 \text{ V}}{16 \text{ A}} = 0,625 \Omega$$

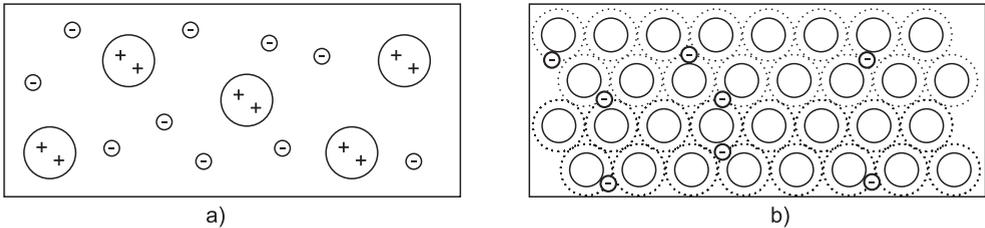
Aus Gleichung (2.14) mit Bild 2.9 folgt:

$$A = \frac{L}{\kappa \cdot R} = \frac{80 \text{ m}}{57 \frac{\text{m}}{\Omega \text{mm}^2} \cdot 0,625 \Omega} = 2,246 \text{ mm}^2$$

Mit einem Kupferadernquerschnitt von  $2,246 \text{ mm}^2$  würde das Kabel also die Anforderung erfüllen. Zur Realisierung wählen wir das kommerziell erhältliche Kabel mit dem nächstgrößeren Adernquerschnitt. Ein Kabel mit  $2,5 \text{ mm}^2$  Adernquerschnitt würde also die Aufgabe erfüllen.

In den bisher betrachteten Fällen haben wir den Mechanismus der Stromleitung durch das Verhalten der Elektronen, welche sich frei im Atomgitter bewegen, beschrieben. In Erweiterung der Betrachtung wollen wir nun nach dem Vorhandensein solcher Elektronen fragen und die Begriffe **Leiter**, **Halbleiter** und **Isolator** erklären. Abstrakt können wir für die Leitfähigkeit eines Materials zwei Voraussetzungen formulieren:

1. Vorhandensein beweglicher Ladungsträger
2. Bewegungsfreiheit der Ladungsträger (Beweglichkeit  $\mu > 0$ ).



**Bild 2.11** Atomgitter mit beweglichen Elektronen a) Metall: viele Elektronen, frei beweglich, b) Isolator: wenige Elektronen, kaum beweglich

Bild 2.11 veranschaulicht das an zwei Beispielen. Das Metallgitter in Bild 2.11a zeigt das bekannte Verhalten. Man spricht auch von einem *Elektronengas* zwischen den Atomen. In Bild 2.11b sind die Elektronen von den Atomen festgehalten. Eine örtlich konzentrierte Aufladung ist somit möglich, kann sich aber im Laufe der Zeit wegen der geringen Beweglichkeit der Elektronen nur wenig verändern. An dieser Stelle finden wir die Erklärung für das Haften der erwähnten Styroporkrömel. Sie zählen zur Gruppe der Materialien nach Bild 2.11b, bei denen sich eine örtlich konzentrierte Aufladung lange hält. Eine wichtige Einflussgröße auf das Vorhandensein beweglicher Ladungsträger ist die Temperatur. Je höher die Temperatur ist, desto mehr Elektronen werden im Gitter frei. In der folgenden Tabelle 2.1 sind die Bedingungen für die drei genannten Materialtypen dargestellt:

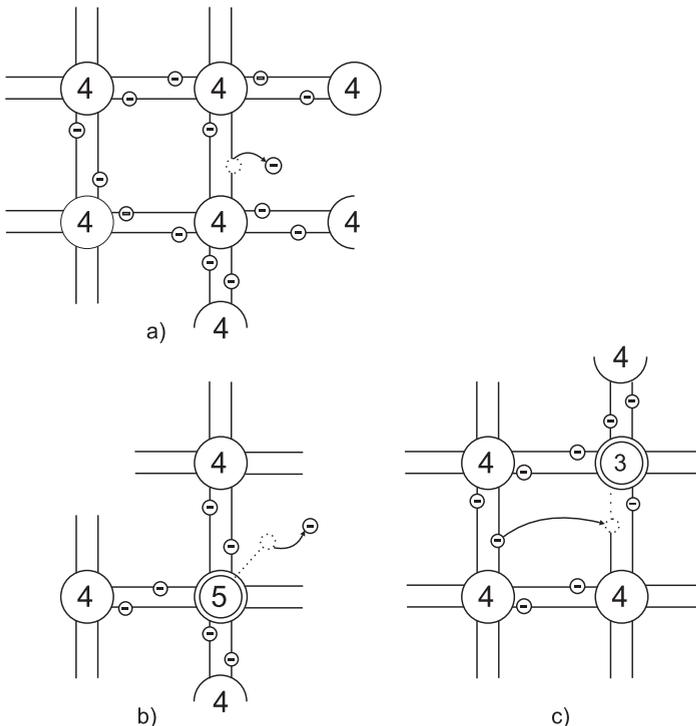
**Tabelle 2.1** Ladungsträger für Stromleitung

	Leiter (Metall)	Halbleiter	Isolator
Absoluter Nullpunkt $T = 0$	freie Elektronen vorhanden und beweglich	keine freien Elektronen vorhanden	keine freien Elektronen vorhanden
$T > 0$	viele freie Elektronen vorhanden und beweglich	wenige freie Elektronen vorhanden und beweglich	wenige freie Elektronen vorhanden, aber praktisch nicht beweglich

Die besondere Gruppe der Halbleiter wollen wir noch etwas näher betrachten. Insbesondere ist hier der Einfluss gezielt eingebrachter Fremdatome auf das Leitverhalten interessant. In **Bild 2.12** sind drei mögliche Konfigurationen aufgezeigt.

In **Bild 2.12a** ist ein reines Halbleitergitter, z. B. Silizium, dargestellt. Durch thermische Aktivierung reißt eine Bindung auf, es entsteht ein freies Elektron und eine Fehlposition oder *Lücke* (Defektelektron), welche eine positive Ladung repräsentiert. Diesen Vorgang nennt man *Paarbildung*. Die Lücke (das Defektelektron) kann durch das Aufbrechen einer benachbarten Bindung aufgefüllt werden. Dadurch ist die Lücke dort hin versetzt, was bei weiterer Wiederholung der Wanderung eines positiven Ladungsträgers entspricht. In **Bild 2.12b** ist ein 5-wertiges Atom, z. B. Phosphor, in das Gitter eingebaut, das Material ist mit Phosphor dotiert. Eines von den 5 Bindungselektronen (Valenzelektronen) des Phosphor-Atoms wird für die Bindung nicht gebraucht und kann durch Feldkräfte aktiviert werden. Zurück bleibt das Phosphor-Atom als positives Ion (ortsfest). Weil es ein Elektron abgegeben hat, wird es *Donator* genannt. Entsprechend zeigt **Bild 2.12c** die Konfiguration mit einem 3-wertigen *Akzeptor*-Atom, welches aus einer in der Nachbarschaft aufbrechenden Bindung ein Elektron aufnimmt. Es könnte sich um ein Bor-Atom handeln, das dann als ortsfestes negatives Ion erscheint, während sich eine Lücke wie im Fall von **Bild 2.12a** fortbewegen kann.

Die Halbleiter zeigen also einen Teil der Eigenschaften der Leiter und einen Teil der Eigenschaften der Isolatoren. Bei  $T = 0$  haben sie keine frei beweglichen Ladungsträger. Bei Raumtemperatur, ca. 300 K, ist ihr spezifischer Widerstand  $\rho$  immer noch ein Vielfaches des Wertes



**Bild 2.12** Halbleitergitter (4-wertig): a) reines Gitter, thermische Paarbildung, b) mit 5-wertigem Dotieratom, ein Elektron aktiviert, c) mit 3-wertigem Dotieratom, ein Elektron aus „aufgerissener“ Bindung