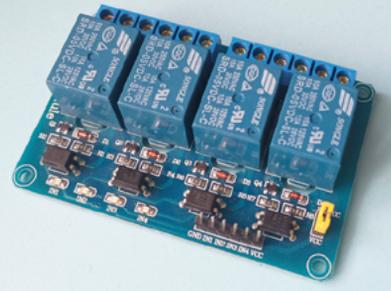
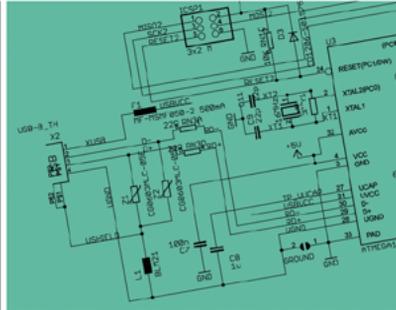
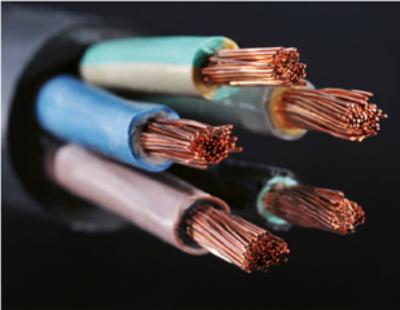
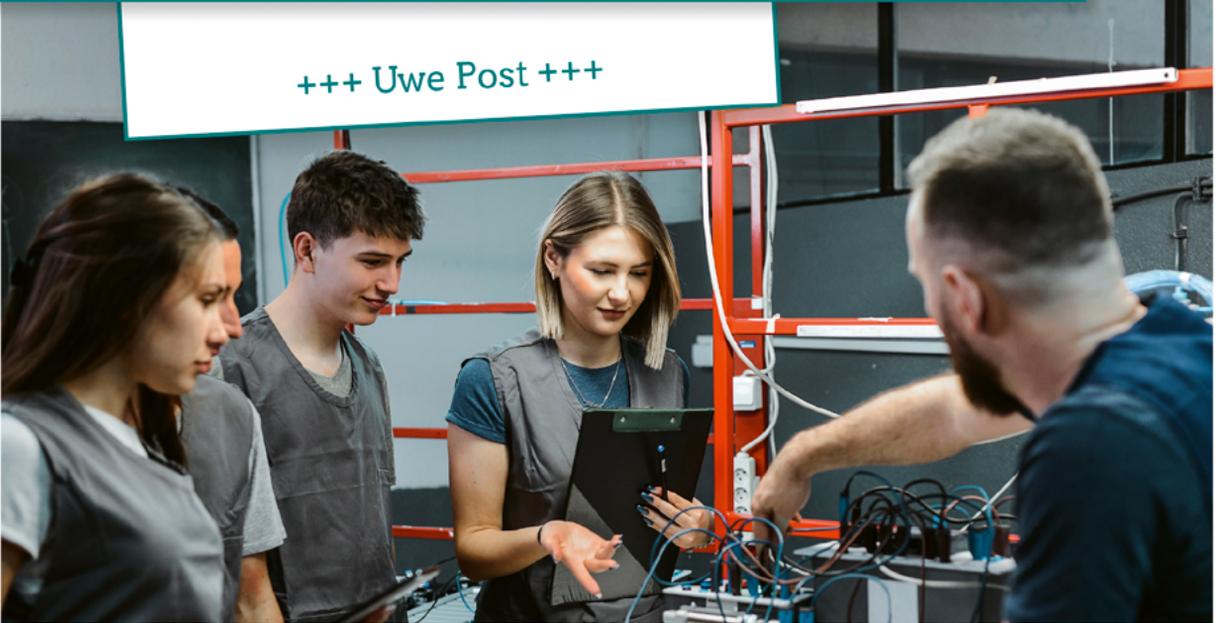




# Fit fürs Studium

# Elektrotechnik

+++ Uwe Post +++



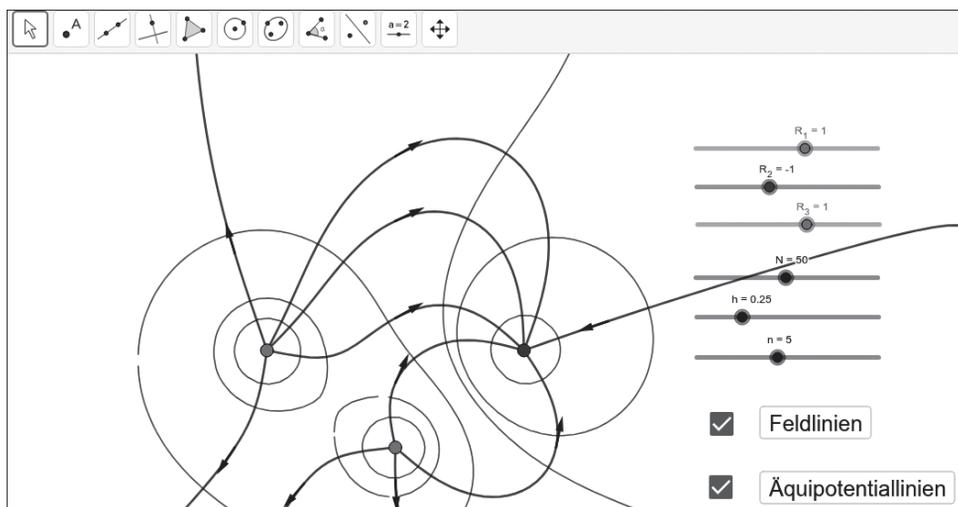
+++ Grundkonzepte verstehen und gut vorbereitet starten.  
Ideal zum Selbststudium. Mit vielen Beispielen, Aufgaben und  
ausführlichen Lösungen +++

## Kapitel 1

# Einführung

*Auf geht's in die Welt von Ladung, Spannung und Strom! Damit der Start in Ihr Studium möglichst widerstandsfrei gelingt, hilft eine kleine Auffrischung des benötigten Schulstoffs – aber dieses Buch geht darüber hinaus: Es vermittelt Ihnen auch Wissen, das nicht auf allen Lehrplänen steht oder in der Schule überhaupt nicht vorkommt, die ersten Semester Ihres Studiums aber erleichtern wird.*

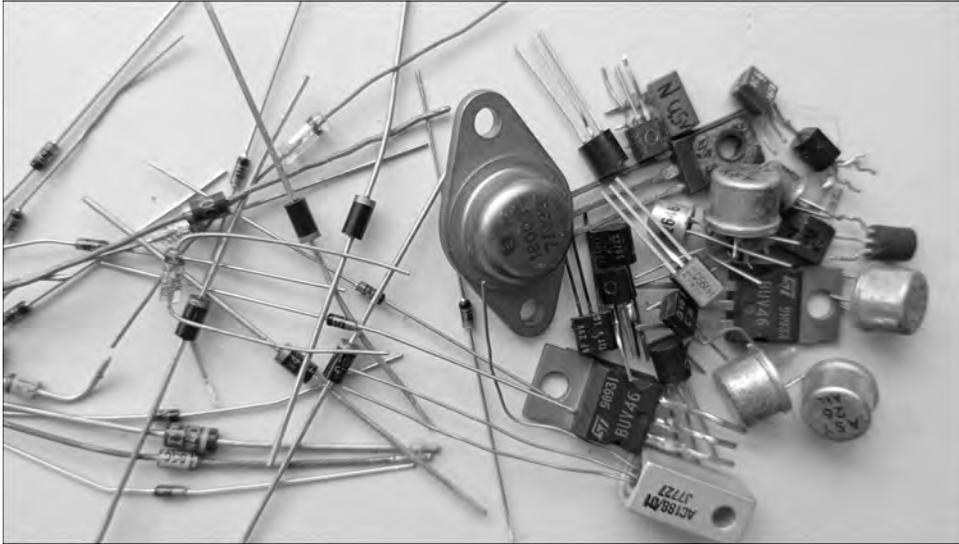
Dieses Buch möchte Ihnen den Einstieg in das durchaus anspruchsvolle Elektrotechnik-Studium erleichtern. Dazu gehört zunächst eine ordentliche Portion *Mathematik* – denn wie jedes MINT-Fach kommt auch die Elektrotechnik nicht ohne *Algebra* und *Analysis* aus. Dementsprechend wichtig ist es, dass Sie das Mathe-Handwerk sicher beherrschen. *Rechenetze, Einheiten, Gleichungen, Funktionen ...* all das frischen Sie auf, indem Sie sich mit ein paar Aufgaben selbst testen: Können Sie diese auf Anhieb lösen, dürfen Sie meine Erklärungen zu dem jeweiligen Thema überspringen und sich am nächsten versuchen. *Differenzialrechnung* (inklusive *partieller Ableitungen* und unterschiedlicher Schreibweisen) wird Ihnen ebenso aufgetischt wie *Integralrechnung* und *Differenzialgleichungen* – alles wichtig für viele Bereiche der Elektrotechnik, wie Sie sehen werden. Nach *Vektorrechnung* und *Trigonometrie* stelle ich Ihnen die *komplexen Zahlen* vor, die Ihnen in Ihrer Schulzeit vermutlich noch keiner erklärt hat, die aber vor allem bei Wechselstromberechnungen gern herangezogen werden. Heutzutage ist es selbstverständlich, mathematische Aufgabenstellungen auch mit Computerunterstützung bearbeiten zu können. Daher zeige ich Ihnen den Umgang mit dem bewährten *Online-CAS GeoGebra* (Abbildung 1.1). Zum Schluss folgen – wie am Ende fast aller Kapitel – lockere *Entspannungsübungen*, mit denen Sie Ihren Lernstand überprüfen können.



**Abbildung 1.1** Elektrische Feld- und Äquipotentiallinien lassen sich mit GeoGebra im Browser berechnen und darstellen. Keine Sorge: So verwirrende krumme Pfade sind in diesem Buch selten.

In Kapitel 3 geht es dann um *elektrische Ladung, Elektronen, Coulomb-Kraft* und das *elektrostatische Feld* – alles Naturerscheinungen, die Ihnen nicht nur im Physikunterricht, sondern auch im Alltag schon begegnet sind. Die zugehörigen elektronischen Bauteile sind *Kondensatoren*.

Um *Spannung* und *Strom* geht es in Kapitel 4. Sie lernen *Schaltpläne* kennen (und Software, mit der man sie zeichnen kann), *Widerstände* und natürlich das *ohmsche Gesetz*. Noch etwas spannender als elektrische Leiter sind *Halbleiter*. Folgen Sie also Elektronen (und Löchern) durch n- und p-Schichten, konstruieren Sie nützliche Schaltungen mit *Dioden* und *Transistoren* (Abbildung 1.2).



**Abbildung 1.2** Pfade durch Dickichte aus Dioden (links) und Transistoren (rechts) finden Sie in Kapitel 4.

### **Basteln Sie mit!**

Elektronische Bauteile haben den großen Vorteil, äußerst preiswert und leicht verfügbar zu sein (Versand, Bastelkiste, ausgeschlachteter kaputter Fernseher ...). Besorgen Sie sich eine Handvoll *Widerstände*, *Kondensatoren*, *Dioden*, *LEDs*, *Transistoren*, einen *Mikrocontroller* (z. B. *Arduino Nano*) sowie *Drähte* und eine *Steckplatine* und basteln Sie mit! Sie können Schaltungen nachbauen, ausprobieren und variieren. Das ist nicht nur lehrreich, sondern macht auch Spaß, und Sie bekommen Übung im Umgang mit den Bauteilen, die Ihnen so oder so im Studium irgendwann in die Hände fallen werden. Ferner sollte jeder Elektrotechnik-Haushalt über ein *Multimeter* und einen *Lötkolben* verfügen – nicht nur fürs Studium, sondern auch für etwaige Privatprojekte der Kategorie »Reparieren ist besser als neu kaufen«.

In Kapitel 5 geht es um *Magnetfelder* und die *Lorentzkraft* sowie einige praktische Anwendungen. In einer kleinen Sneak Preview stelle ich Ihnen die *Maxwell-Gleichungen* vor, die für die Elektrodynamik von entscheidender Bedeutung sind.

Praktische Anwendungen von Magnetfeldern in der Elektrotechnik sind unter anderem *Spule* und *Induktion*, um die sich Kapitel 6 dreht – im wahrsten Sinne des Wortes, denn nicht nur *Wirbelströme* bewegen sich kreisförmig.

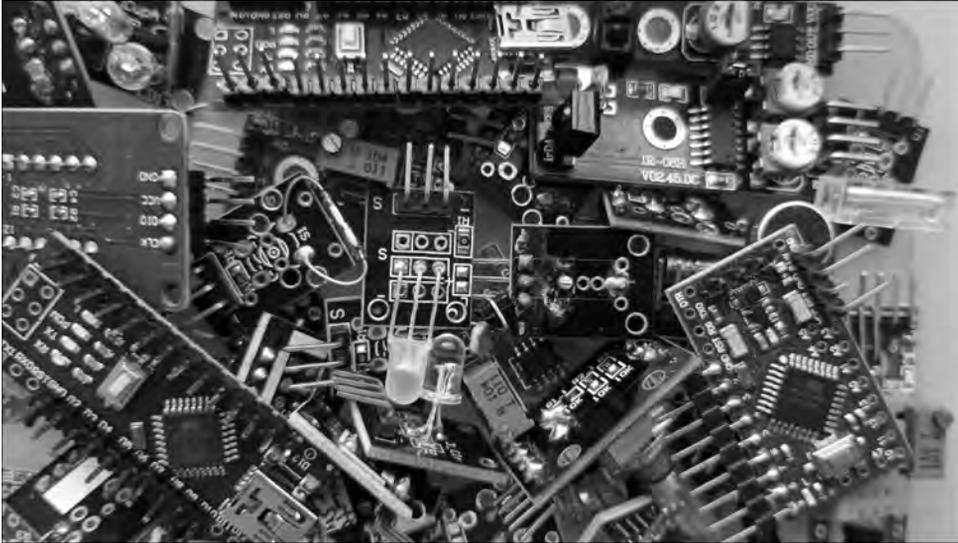
Kapitel 7 ist *Messgeräten* gewidmet sowie einem Phänomen, ohne das keine Messung auskommt: *Ungenauigkeit*. Wie sich diese auf Messungen und Messergebnisse auswirkt, ist auf den zweiten Blick nicht so trivial, wie es die zehnstellige Anzeige Ihres Taschenrechners nahelegt. Schließlich lernen Sie in Kapitel 7 *LTspice* kennen, eine frei verfügbare Simulationssoftware für elektronische Schaltungen.

Kapitel 8 behandelt das *Schwingkreis*-Thema, das für viele Analogelektronikschaltungen von großer Bedeutung ist.

Kapitel 9 beantwortet unter anderem die häufig gestellte Frage, wie der Strom eigentlich in die Steckdose gelangt und warum manche Gegenden mit *Hochspannungsleitungen* gepflastert sind, andere aber nicht. Wie aus *Gleichstrom Wechselstrom* wird (und umgekehrt), zeige ich Ihnen auch noch, bevor Kapitel 10 erklärt, wie aus Strom Bewegung wird und umgekehrt: Es geht dabei um *Motoren* (und wie man deren Drehzahl regeln kann) sowie um die Frage, wieso ein anfahrender ICE-Triebzug oder ein österreichischer Railjet wie ein elektronischer Synthesizer klingt. Zum Schluss geht es um *Generatoren* und deren Einsatz in *Windkraftanlagen* und *Energiespeichern*.

Mit Kapitel 11 beginnt die Tour durch die *Digitalelektronik*. Sie frischen *boolesche Logik* auf, die Sie möglicherweise aus dem Informatik-Unterricht kennen. Ich zeige Ihnen, wie digitale Schaltungen zu *Gates* werden und wie Sie sie ausprobieren können, ohne sich die Finger am LötKolben zu verbrennen: in *Onlinesimulatoren*. Wichtige Anwendungen von Gates sind die Grundlage für *Mikroprozessoren*, um die es in Kapitel 12 geht. Dort stelle ich Ihnen auch den nicht umsonst bei Bastlern und in der Maker-Szene beliebten *Einplatinencomputer Raspberry Pi* und seine Programmierung ausführlich vor.

In Kapitel 13 wird es richtig nerdig, denn Sie basteln mit Mikrocontrollern (z. B. *Arduino Nano*) coole Schaltungen mit OLED-Display, temperaturabhängigem Widerstand, Joystick und Ultraschallabstandsmesser (Abbildung 1.3), deren Einzelteile meist deutlich unter 5 € kosten – zusammengerechnet, wohlgemerkt.



**Abbildung 1.3** Lernen Sie Mikrocontroller und Sensoren kennen – Kapitel 13 unterstützt Sie dabei mit coolen, budgetfreundlichen Beispielen.

Das Bonuskapitel 14 zeigt Ihnen exemplarisch, wie Sie ein konkretes Projekt professionell anpacken und umsetzen. Ich bin gespannt, was Sie basteln werden!

Wie viele der Inhalte aus diesem Buch Sie im Studium wie dringend benötigen, hängt nicht zuletzt von Ihrer Schullaufbahn ab. Hatten Sie Technik-Unterricht? Leistungskurs Mathe oder Physik oder weder noch? Wahlpflichtfach Informatik? Oder haben Sie in einer Computer-AG bereits Programmieren gelernt? Was auch immer fehlt – dieses Buch füllt die Wissenslücken.

Wenn Sie gut vorbereitet ins Studium starten, können Sie sich auf die wirklich anspruchsvollen Themen konzentrieren – und die kommen garantiert. Streckenweise müssen Sie mit einem hohen Schwierigkeitsgrad rechnen. Aber lassen Sie sich davon nicht abschrecken – das Studium der Elektrotechnik ist spannend, cool und verschafft Ihnen höchstwahrscheinlich einen sicheren, gut bezahlten, abwechslungsreichen Job.

Alle Schalter auf *ON*, der Spaß beginnt!

## Kapitel 4

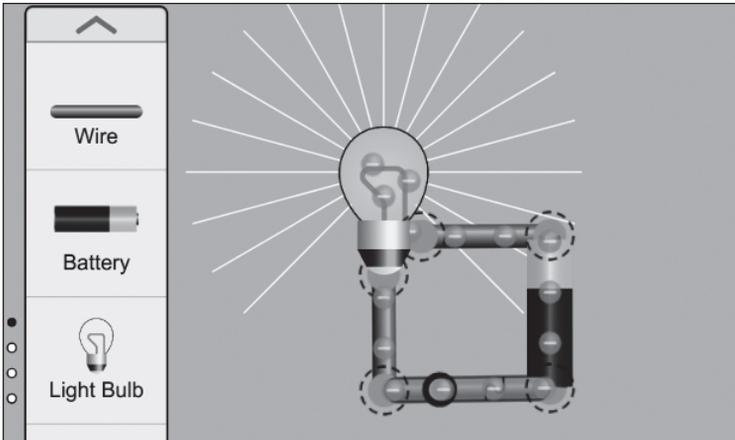
# Das Kribbeln beginnt: Von Spannung und Strom

*Ohne Strom funktioniert kaum etwas, das wichtig im Leben ist: Mikrowelle, Smartphone, E-Gitarre. Auch Ihr Körper arbeitet mit elektrischem Strom, den Sie sogar spüren können, wenn ein paar Elektronen von Ihren Fingerspitzen auf einen Türgriff übergehen ...*

Das letzte Kapitel hat Ihnen vermittelt, dass Ladungen Kräfte aufeinander ausüben. Sobald eine solche Kraft zu einer Bewegung führt, fließt ein Strom, der seinerseits viele Dinge bewirken kann. Dieses Kapitel verschafft Ihnen einen ersten Überblick.

## 4.1 Spannung verursacht Strom

Strom fließt durch leitfähiges Material, wenn die Ladungsträger eine Potenzialdifferenz (also eine Spannung) spüren und dieser in Richtung des elektrischen Felds folgen. *Spannung ist die Ursache für den Strom.* An einer Batterie sammeln sich am Minuspol freie Elektronen. Sobald Sie Ihnen eine Möglichkeit bieten, sich entsprechend dem elektrischen Feld zu bewegen, wandern sie zum Pluspol – es fließt ein *Strom*. Das passiert zum Beispiel, wenn Sie einen Verbraucher verdrahten und einen Schalter schließen (Abbildung 4.1). Von minus nach plus: Das ist die *physikalische Stromrichtung*.



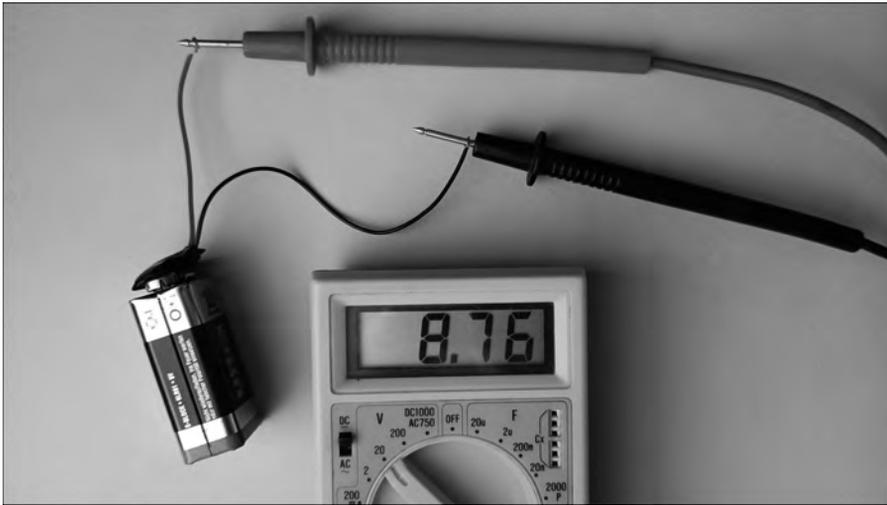
**Abbildung 4.1** Elektronen verlassen die Batterie, um die Lampe zu erleuchten – beim PhET-Experiment sogar hübsch animiert (<https://phet.colorado.edu>).

Ein einfaches Analogon ist ein Wasserfall: Oben (plus) ist die potenzielle Energie (bzw. das elektrostatische Potenzial) höher als unten, daher fällt das Wasser nach unten. Hingegen ist die *technische Stromrichtung* umgekehrt: Der Strom (nicht die Elektronen) fließt vom Pluspol zum Minuspol. Diesen kleinen Unterschied gilt es in einigen Fällen unbedingt zu berücksichtigen. Wenn Sie den Schalter öffnen, fließt jedenfalls kein Strom mehr, weil die Luft ein vergleichsweise mieser Leiter ist.

Auch wenn die Batterie leer ist, fließt kein Strom mehr, allerdings verringert sich schon deutlich vorher die Spannung. Auf diese Weise können Geräte den Ladezustand der Batterie ermitteln. Besonders schnell leert sich eine Batterie, wenn Sie Plus- und Minuspol direkt

miteinander verbinden. Einen solchen *Kurzschluss* sollten Sie immer vermeiden, da dabei unbeabsichtigt hohe Ströme fließen.

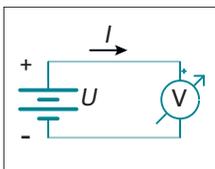
Spannungen und Ströme können Sie messen, beispielsweise um herauszufinden, ob eine Batterie noch frisch ist. Wohlgedenkt – ich empfehle Ihnen nicht die Methode mit der Zunge an einer 9-Volt-Batterie: Wenn es kribbelt, ist noch was drin. Für solche Messungen ist ein *Multimeter* vorzuziehen. Falls Sie noch keins besitzen, empfehle ich Ihnen die Anschaffung – es eignet sich beim Basteln und im Haushalt für alle möglichen Zwecke (Abbildung 4.2).



**Abbildung 4.2** Laut Multimeter ist die 9-Volt-Batterie nicht mehr ganz frisch, Messungsgenauigkeit hin oder her.

Die verwendeten Kabelfarben sind übrigens keine Frage der Ästhetik oder des persönlichen Geschmacks, sondern standardisiert: Der Plusanschluss ist rot und der Minusanschluss schwarz.

An dieser Stelle wird es Zeit, Ihnen die Bedeutung von elektrischen *Schaltplänen* nahezubringen, damit wir nicht dauernd Fotos abdrucken müssen. Schaltpläne verwenden standardisierte Symbole, die alle Elektrotechniker der Welt verstehen, ganz ähnlich wie Noten in der Musik – nur dass es unterschiedliche Standards gibt. Zu der obigen Schaltung gehört beispielsweise ein sehr einfacher Schaltplan (Abbildung 4.3).



**Abbildung 4.3** Der Schaltplan zeigt leicht verständliche Symbole für Batterie und Voltmeter.

Die Beschriftung zeigt die Spannung  $U$  und den Strom  $I$  in der üblichen Notation. Mit den gleichen Buchstaben tauchen diese physikalischen Größen in verschiedenen Formeln auf. Freilich fließt nur ein sehr kleiner Strom durch das Messgerät, wenn es auf Spannungsmessung eingestellt ist. Auf dieses Thema kommen wir in Kürze ausführlich zurück.

### Schaltplansoftware

Natürlich müssen Sie Schaltpläne nicht mit Papier und Bleistift oder gar mit Paint zeichnen. Es gibt eine ganze Reihe von Anwendungen, die professionelle Features mitbringen – und auch noch kostenlos sind:

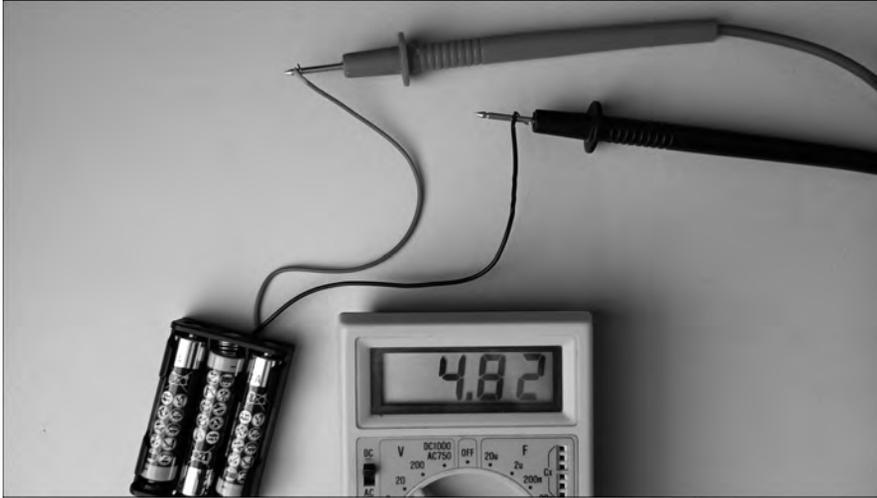
- ▶ *KiCad* ist eine unter freier GPL-Lizenz veröffentlichte Software für Windows, Mac und Linux, mit der Sie Schaltpläne aus Bauteilen einer umfangreichen Bibliothek zusammenbauen können. Außerdem können Sie auch gleich eine passende Platine layouten (PCB). (<https://www.kicad.org/>)
- ▶ *EasyEDA* bietet einen ähnlichen Funktionsumfang wie KiCad, läuft aber auch im Browser. Neben der kostenlosen Version gibt es eine Premium-Version im Abo. (<https://easyeda.com/>)
- ▶ *LibrePCB* ist eine weitere Open-Source-Software mit ähnlichem Funktionsumfang, die Libraries mit verschiedenen Bauteilen importieren kann. Die meisten Schaltpläne in diesem Buch sind mit dieser Software entstanden. (<https://librepcb.org/>)
- ▶ *Canva*, *Draw.io* und *Gnome Dia* sind kostenlose Grafikanwendungen, mit denen Sie alle möglichen Arten von Diagrammen zeichnen und exportieren können – Schaltpläne sind nur eine der vielen Möglichkeiten. Für professionelle Anwendungsfälle in der Elektrotechnik eignen sich diese Programme weniger.

## Reihen- und Parallelschaltung

Sicher wissen Sie genau, was passiert, wenn Sie Batterien hintereinanderschalten: Die Spannung der einzelnen Batterien addiert sich. Das ist vor allem dann wichtig, wenn Schaltungen höhere Spannungen erfordern als jene, die eine einzige Batterie bereitstellt. Das Analogon ist ein mehrstufiger Wasserfall, auch dort addieren sich (näherungsweise) die potenziellen Energien jeder Stufe, die das Wasser hinunterstürzt (Abbildung 4.4).

Die Hintereinander- oder *Reihenschaltung* entspricht einer logischen Und-Verknüpfung. Wenn Sie zwei oder mehr Schalter hintereinander installieren, müssen *alle* Schalter aktiviert werden, damit ein Strom fließt. Eine *Parallelschaltung* hingegen entspricht einem Oder: Es genügt *ein* geschlossener Schalter, und die Verbindung ist hergestellt. Auf solchen logischen Verknüpfungen basieren letztlich alle Schaltkreise der Digitalelektronik, wobei

statt mechanischer Schalter Transistoren zum Einsatz kommen. Diese spannenden Bauteile müssen allerdings bis zu einem späteren Kapitel warten.



**Abbildung 4.4** Drei 1,5-Volt-Batterien erzeugen hintereinandergeschaltet eine Spannung von ungefähr 4,5 V. Beachten Sie unbedingt alle aufgedruckten Verbotsszeichen, falls Sie sie verstehen.

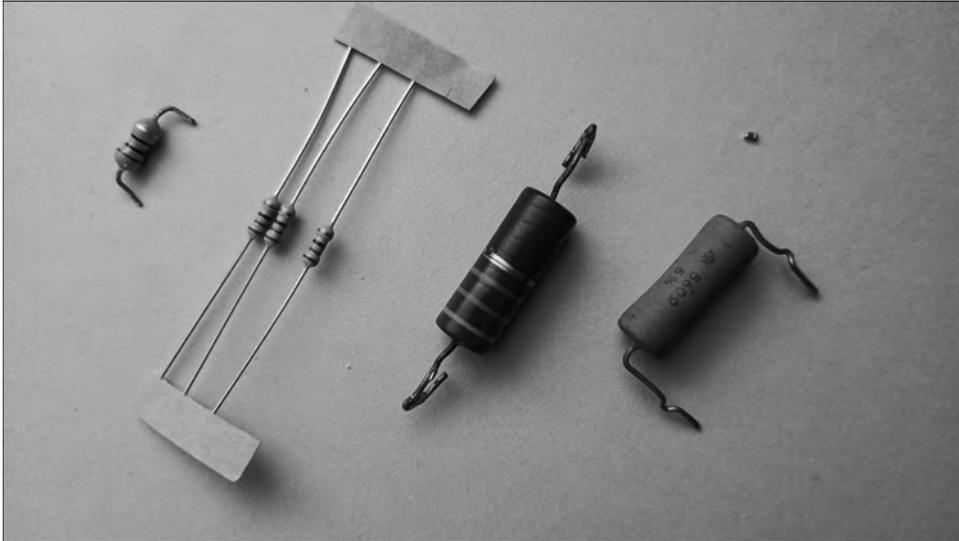
## 4.2 Widerstand und ohmsches Gesetz

Jedes Material setzt dem elektrischen Strom einen gewissen *Widerstand* entgegen. Das können Sie sich vorstellen wie Reibungsverluste bei einer Bewegung. Wenn Sie versuchen, einen Kinderwagen über einen Sandstrand zu schieben, ist die Reibung besonders hoch. Hingegen ist die Reibung eines Zuges auf Eisenbahnschienen sehr gering. Reibung oder Widerstand bedeutet gleichzeitig einen Verlust an Energie, die beispielsweise als Abwärme verloren geht. In den meisten Anwendungsfällen soll der Strom besonders wenig Widerstand erfahren, was zufälligerweise genau das ist, was er möchte: *Der Strom geht den Weg des geringsten Widerstands*. Deshalb fließt Strom lieber durch Kupferdraht und nicht direkt daneben durch die Luft.

Elektrisch leitfähige Materialien wie zum Beispiel ein Kupferdraht haben ebenfalls einen Widerstand, den Sie allerdings in vielen Schaltungen vernachlässigen können, jedenfalls im Vergleich zum Widerstand der Luft oder irgendwelcher Isolatoren drumherum. Wenn Sie an einen Leiter mit einem Widerstand  $R$  eine Spannung  $U$  anlegen, fließt ein Strom  $I$ . Das ist das *ohmsche Gesetz*: Je größer der Widerstand, umso kleiner der Strom.

$$I = \frac{U}{R}$$

Jeder Leiter besitzt einen Widerstand, der von Parametern wie Länge, Durchmesser, Temperatur und physikalischer Beschaffenheit abhängen kann. In der Elektrotechnik benötigen Sie meistens sehr genaue Widerstandswerte, die Sie in Form von billigen, meist länglich geformten Bauteilen in einer Schaltung verwenden (Abbildung 4.5).



**Abbildung 4.5** Je dicker ein Widerstand, umso mehr Verlustleistung hält er aus. Rechts oben sehen Sie kein Staubkorn, sondern einen SMD-Widerstand für eine besonders platzsparende Bauweise. Die dickeren Exemplare stammen aus einem alten Röhrenfernseher.

Gemessen wird die Größe des Widerstands in Ohm ( $1 \Omega = 1 \text{ V/A}$ ), genau wie das zugehörige von ihm entdeckte Gesetz benannt nach dem deutschen Physiker Georg Simon Ohm (1789–1854). Der *spezifische Widerstand* hängt vom verwendeten Material ab. Da es sich dabei um eine Materialkonstante handelt, lässt sich der spezifische Widerstand für verschiedene Stoffe angeben. Die üblicherweise verwendete Einheit für diese Angabe ist  $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$  (siehe Tabelle 4.1).

Material	Spezifischer Widerstand in $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ (ca.)
Bernstein	$10^{22}$
Gummi	$10^{19}$
Muskelgewebe	$10^6$

**Tabelle 4.1** Der spezifische Widerstand verschiedener Materialien unterscheidet sich um viele Größenordnungen.

Material	Spezifischer Widerstand in $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ (ca.)
Salzwasser	$10^5$
Gold	0,022
Kupfer	0,017
Silber	0,015

**Tabelle 4.1** Der spezifische Widerstand verschiedener Materialien unterscheidet sich um viele Größenordnungen. (Forts.)

Bevor Sie jetzt alle Kabel in Ihren Wänden austauschen und durch Silberdraht ersetzen: Es wird Ihre Stromrechnung leider nicht nennenswert senken.

### Farbcodierung von Widerständen

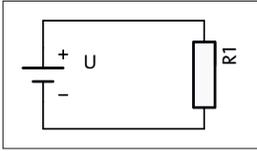
Klassische Drahtwiderstände sind durch fünf Farbringe gekennzeichnet. Vier Ringe stehen für den eigentlichen Widerstandswert (die ersten drei Ziffern und die Anzahl der Nullen), der letzte steht für die Toleranz. Meist finden Sie dort einen goldenen Ring, der für 5 % Toleranz steht. Da Gold bei den anderen vier Ringen nicht vorkommt, ist damit auch eindeutig geklärt, dass dieser Ring der letzte ist. Die vier anderen Ringe beispielsweise in Gelb-Lila-Schwarz-Orange bedeuten 4, 7, 0 und 3 Nullen, also  $470.000 \Omega$  bzw.  $470 \text{ k}\Omega$ . Die folgende Tabelle zeigt die numerische Bedeutung der Farben.

<b>Schwarz</b>	0	<b>Grün</b>	5
<b>Braun</b>	1	<b>Blau</b>	6
<b>Rot</b>	2	<b>Lila</b>	7
<b>Orange</b>	3	<b>Grau</b>	8
<b>Gelb</b>	4	<b>Weiß</b>	9

Alternativ können Sie ein Multimeter nutzen, um die genaue Größe eines Widerstands zu messen. Die meisten Geräte besitzen dafür einen eigenen Modus.

Wenn Sie zwei der drei Größen im ohmschen Gesetz kennen, können Sie die dritte ausrechnen. Im einfachsten Beispiel befindet sich in einem Stromkreis genau ein Widerstand

(Abbildung 4.6). Wenn Sie an eine 9-Volt-Batterie einen Widerstand mit  $1\text{ k}\Omega$  anschließen, fließt ein Strom von  $9 \cdot 0,001\text{ V}/\Omega = 9\text{ mA}$ .



**Abbildung 4.6** Im einfachen Stromkreis sind Spannung und Strom zueinander proportional.

Normalerweise ist die Spannung einer Quelle konstant. Bei Batterien oder Akkus müssen Sie freilich davon ausgehen, dass die Spannung abhängig vom Ladezustand etwas absinkt. Auch wenn Sie eine Spannungsquelle zu stark belasten, wird das passieren. Für eine höhere Genauigkeit sollten Sie ein geregeltes Netzgerät verwenden. Details zur Spannungsstabilität beispielsweise eines Labornetzteils finden Sie in dessen Spezifikation.

## Stromdichte

Die Luft oder Ihr Körper hat einen vergleichsweise großen Widerstand, ein Kupferdraht oder ein geschlossener Schalter einen kleinen. Trotzdem: Wenn Strom durch einen Draht fließt, erwärmt er diesen, und zwar abhängig von der *Stromdichte*  $J$ :

$$J = \frac{I}{A}$$

Dabei ist  $I$  der Strom, der senkrecht durch eine Querschnittsfläche  $A$  fließt. Falls die fragliche Fläche nicht senkrecht zum Strom steht, können Sie umgekehrt ein Skalarprodukt für den Strom formulieren:

$$I = \vec{j} \cdot \vec{A}$$

Hier ist auch die Fläche vektoriell notiert, wobei deren Richtung definitionsgemäß eine Senkrechte der Fläche ist.

Falls die Stromdichte nicht gleichmäßig über den Leiterquerschnitt verteilt ist, benötigen Sie ein Integral über infinitesimale Flächenstücke  $\vec{dA}$ :

$$I = \int \vec{j} \cdot \vec{dA}$$

Je höher der Strom und je dünner der Querschnitt eines Leiters, umso höher ist die Stromdichte und desto stärker die Erwärmung. Denn der Widerstand setzt Spannungsabfall und Stromfluss in Leistung um, letztlich also in Wärme (wie Sie das berechnen können, dazu in Kürze mehr). Stellen Sie sich einfach vor, dass sich eine große Menge an Personen durch

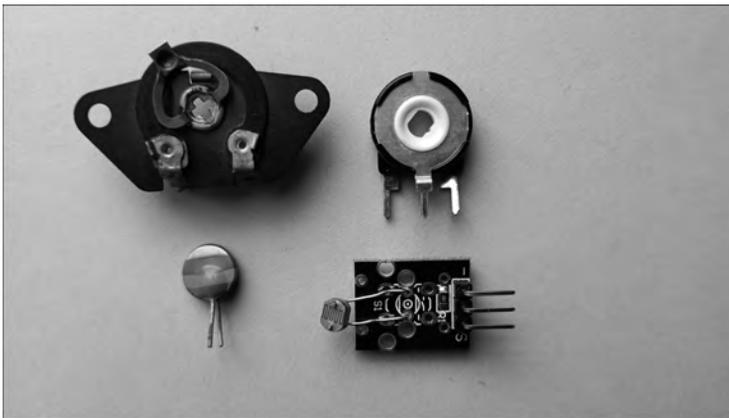
einen engen Gang zwingt – irgendwann wird es warm. Besonders gut sichtbar ist das bei Glühlampen, die nach genau diesem Prinzip funktionieren – die Leiterfäden darin sind für die durchfließende Strommenge eigentlich zu dünn und fangen deshalb an zu glühen. Das gleiche Funktionsprinzip kennen Sie von anderen Alltagsgeräten: Toaster und Föhn. Wir kommen in Kürze auf dieses Thema zurück.

Übersteigt die Stromdichte die *Schmelzstromdichte*, verflüssigt sich das Material, bei Kupfer beispielsweise bei etwa  $3 \text{ kA/mm}^2$ . Das ist normalerweise ganz und gar nicht das, was Sie möchten – außer in *Sicherungen*, die bei zu hohem Strom, speziell bei Kurzschlüssen, eine ganze Schaltung sicherheitshalber außer Betrieb setzen, indem sie durchschmelzen.

## Variable Widerstände

Normalerweise möchten Sie, dass Widerstände einen konstanten Wert haben. Es gibt aber Fälle, in denen ein veränderlicher Widerstand von großem Interesse ist. Denken Sie zum Beispiel an den Lautstärkereglern an Ihrem Audioverstärker: Dahinter verbirgt sich ein *Potenzio­meter*, also ein einstellbarer Widerstand, sofern es sich nicht um ein rein digitales Gerät handelt, das die Lautstärke nur in diskreten Schritten verstellen kann und zwischen »noch zu leise« und »schon zu laut« leider meistens keine ideale Option anbietet.

Andere variable Widerstände besitzen Abhängigkeiten von Temperatur oder Beleuchtung, die sehr nützlich sein können (Abbildung 4.7).

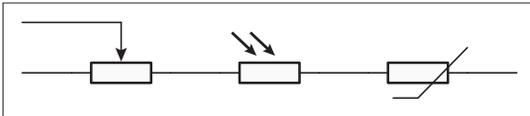


**Abbildung 4.7** Die obere Reihe zeigt zwei verschiedene ältere Potenziometer (Potis), darunter sehen Sie einen temperaturabhängigen Widerstand sowie einen lichtempfindlichen auf einer praktischen Anschlussplatine.

Lichtempfindliche Widerstände (*Fotowiderstand*, LDR, *Light Dependent Resistor*) können verwendet werden, um bei Dunkelheit eine Lampe anzuschalten. Auch Ihr Smartphone be-

sitzt aller Wahrscheinlichkeit nach einen Helligkeitssensor. Temperaturabhängige Widerstände (*Thermistoren*) können für Thermostate nützlich sein oder schlicht messen, ob es draußen warm genug ist, um die Jacke am Haken zu lassen. Bei den meisten Leitern steigt der Widerstand mit der Temperatur an (*Kaltleiter*), zum Beispiel bei Platin um 0,4 % pro °C. Manche Kaltleiter lassen sich einsetzen, um bei Erwärmung eines Geräts automatisch den Strom zu verringern und damit die Belastung. Dazu werden die Kaltleiter in unmittelbarer Nähe des fraglichen Geräts montiert und als Sensor benutzt.

*Heißleiter (NTC)* haben hingegen die Angewohnheit, ihren Widerstand bei höherer Temperatur zu verringern. Sie können beispielsweise dazu verwendet werden, den Strombedarf beim Anlaufen eines noch kalten Systems zu begrenzen. Da anders als bei Kaltleitern der Temperaturzusammenhang bei Heißleitern nicht linear ist, erfordert ihr Einsatz etwas mehr Aufwand. Variable Widerstände haben natürlich eigene Schaltsymbole, die Sie kennen sollten (Abbildung 4.8).



**Abbildung 4.8** Schaltsymbole variabler Widerstände, von links nach rechts Poti, Fotowiderstand, Thermistor

### 4.3 Kirchhoffsche Regeln und Spannungsteiler

Die meisten Schaltungen enthalten mehr als einen Widerstand. Damit sind nicht nur die gleichnamigen Bauteile gemeint, auch andere Schaltelemente können einen Widerstand aufweisen, beispielsweise eine Spule oder eine Glühlampe. Um Spannungen und Ströme in einer Anordnung von Widerständen zu berechnen, können Sie die *kirchhoffschen Regeln* anwenden. Diese besagen:

- *Knotenregel*: In jedem Leitungsknoten ist die Summe aller hineinfließenden Ströme gleich jener der abfließenden Ströme. Als Formel ausgedrückt:

$$\sum I_{\text{hinein}} = \sum I_{\text{ab}}$$

- *Maschenregel*: Die Summe aller hintereinander messbaren Teilspannungen in einer Masche (also einer ringförmigen Leitung an einer Spannungsquelle) ist gleich der Versorgungsspannung. Als Formel:

$$U_0 = \sum U_i$$

Die erste Regel ist nicht nur leicht einzusehen, wenn Sie sich statt Strom einen Wasserkreislauf mit Abzweigungen oder eine Straßenkreuzung voller Autos vorstellen. Sie können außerdem die Formel mit der Zeit  $t$  multiplizieren, sodass mit  $I \cdot t = Q$  eine Gleichung über die Ladungserhaltung entsteht.

Die Maschenregel entspricht nach Multiplikation mit  $Q$  einer Gleichung über die Energieerhaltung. Die Spannungsquelle  $U_0$  kann eine Gesamtarbeit  $W = U_0 \cdot Q$  leisten, was bei hintereinandergeschalteten Elementen deren Gesamtenergieverbrauch ergibt.

### Beispiel: Parallelschaltung von Widerständen

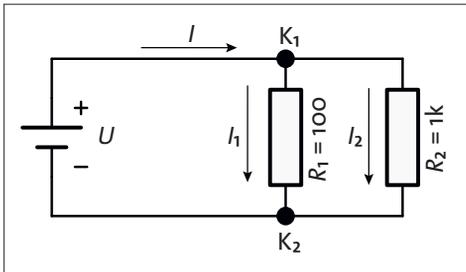


Abbildung 4.9 Beispiel einer Parallelschaltung

Gesucht wird der Gesamtwiderstand der Parallelschaltung von zwei Widerständen (Abbildung 4.9) mit den Werten  $100 \Omega$  bzw.  $1 k\Omega$  (in Schaltplänen lässt man gern das  $\Omega$  weg, da das Symbol bereits verrät, um was für ein Bauteil es sich handelt). Betrachten Sie in dieser Schaltung den Knotenpunkt  $K_1$ . Dort fließt der Gesamtstrom  $I$  hinein, und zwei Ströme  $I_1$  und  $I_2$  fließen über die jeweils zuständigen Widerstände ab. Aufgrund der Knotenregel ist  $I = I_1 + I_2$ . Die Spannung zwischen  $K_1$  und  $K_2$  ist  $U$ , weil es keine Hintereinanderschaltung gibt. Also können Sie für  $I_1$  und  $I_2$  jeweils das ohmsche Gesetz hinschreiben:

$$R_1 = \frac{U}{I_1}; R_2 = \frac{U}{I_2}$$

Stellen Sie beide Gleichungen nach dem Strom um:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; I_2 = \frac{U}{R_2}$$

Sie wissen, dass die Summe gleich  $I$  ist:

$$I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$$

Teilen Sie durch  $U$ , und auf der linken Seite steht das Reziproke des Gesamtwiderstands:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

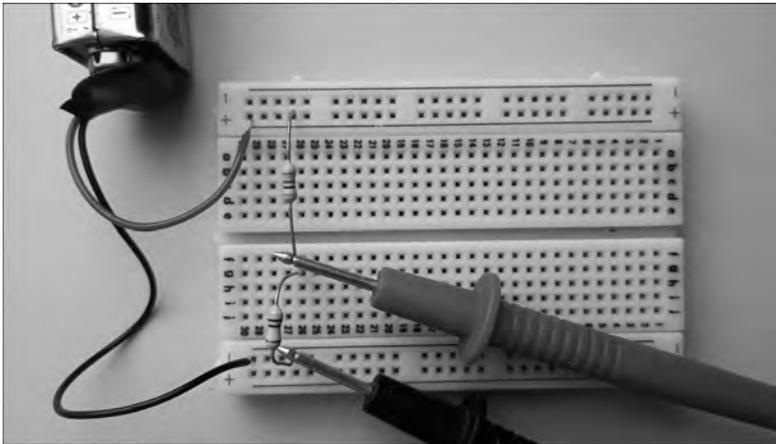
Der rechnerische Wert für  $R$  beträgt im Beispiel:

$$R = \frac{1}{\frac{1}{100} + \frac{1}{1000}} \approx 91 \Omega$$

Gewissermaßen verringert sich der Widerstand  $R_1$  durch die Parallelschaltung eines kleineren Widerstands etwas. Durch geschickte Schaltungen dieser Art können beliebige Widerstandswerte konstruiert werden, auch wenn nur bestimmte, diskrete Werte im Handel verfügbar sind.

### Beispiel: Spannungsteiler

Ein Beispiel für die Hintereinanderschaltung von Widerständen ist der *Spannungsteiler*. Sie greifen eine Spannung  $U_2$  am zweiten Widerstand ab (Abbildung 4.10).



**Abbildung 4.10** Der Spannungsteiler ist auf einer Steckplatine aufgebaut. Darin verlaufen je zwei Leitungen für die Versorgungsspannung oben und unten quer, während alle anderen Kontakte (a–e bzw. f–j) in der Vertikalen elektrisch verbunden sind.

Angeschlossen ist eine 9-Volt-Blockbatterie. Die Werte der Widerstände sind  $R_1 = 4,7 \text{ k}\Omega$  und  $R_2 = 470 \Omega$ . Da die Gesamtspannung  $U$  die Summe der beiden an den Widerständen feststellbaren Spannungen  $U_1$  und  $U_2$  ist und der Strom überall gleich ist (es gibt keine Knoten mit mehr als zwei Anschlüssen), können Sie schreiben:

$$R_1 = \frac{U_1}{I}; R_2 = \frac{U_2}{I}$$

Stellen Sie um nach der Spannung:

$$U_1 = IR_1; U_2 = IR_2$$

Dividieren Sie die zweite Gleichung durch die erste, damit sich der Strom wegekürzt. Sie erhalten:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{R_2}{R_1}$$

Das Verhältnis der Spannungen an den Widerständen ist also dasselbe wie das der Widerstandswerte. Ersetzen Sie noch  $U_1 = U - U_2$ , und Sie erhalten:

$$\frac{U_2}{U - U_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

Sie können diese Gleichung nach der gesuchten Spannung  $U_2$  umstellen. Die einzelnen Schritte erspare ich Ihnen. Das Resultat entspricht einer Verhältnisgleichung:

$$U_2 = U \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Rechnerisch ergibt sich für die verwendeten Widerstände an einer 9-Volt-Spannungsversorgung  $U_2 \approx 0,82$  V, und ziemlich genau diesen Wert zeigt auch das Messgerät an. Übrigens ist der Gesamtwiderstand von knapp über 5 k $\Omega$  groß genug, damit sich die Batterie nicht allzu schnell entlädt. Trotzdem ist es natürlich ratsam, sie nach erfolgter Messung zu entfernen.

Wohlgemerkt, diese simple Schaltung eignet sich nicht dazu, aus einer hohen Versorgungsspannung eine niedrige zu machen und dann einen Verbraucher daran zu betreiben. Denn sobald zu diesem ein Strom fließt, haben Sie sofort einen Knoten zwischen den beiden Widerständen im Spiel und die Rechnung sozusagen ohne Herrn Kirchhoff gemacht. Um eine zu hohe Eingangsspannung in eine niedrigere zu ändern, brauchen Sie kompliziertere Schaltungen oder entsprechende fertige Bauteile, genannt *Spannungsregler*.

Der Aufbau mit dem Spannungsabgriff zwischen zwei Widerständen entspricht übrigens genau einem *Potenzimeter*. In Fällen, in denen die Spannung  $U_2$  stufenlos einstellbar sein muss, kommen diese Bauteile oft zum Einsatz, beispielsweise als Lautstärkereglern an Audioverstärkern. Die eingestellte Spannung hat dann zur Eingangsspannung ein Verhältnis entsprechend der Stellung des Potenziometerabgriffs.

## 4.4 Halbleiter

In der Elektrotechnik ist es von großer Bedeutung, mit kleinen Strömen größere beeinflussen zu können. Das hängt damit zusammen, dass logische Schaltungen mit niedrigen Stromstärken kompakter und kostengünstiger gebaut werden können, weil die beteiligten Leitungen kleiner ausfallen können. Sie erinnern sich: Je höher die Stromdichte, desto höher ist die Erwärmung und damit die Verlustleistung.

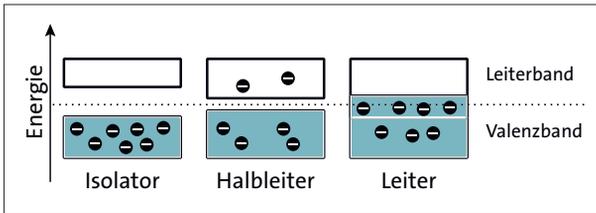
Noch vor 75 Jahren waren Relais oder Röhren für solche Einsatzzwecke erforderlich. Relais bestehen aus elektromagnetischen Spulen, die bei Anlegen einer Spannung einen Schalter auslösen, der deutlich größere Ströme bewältigen kann als die vorgeschaltete Elektronik. Der erste Digitalrechner der Welt, der Z3 von Konrad Zuse (erbaut 1938–1941), benötigte 2.000 Relais. Auch heute noch werden Relais in manchen Fällen bevorzugt, aber nicht für digitale Speicher. Beispielsweise hören Sie in Ihrem Treppenhaus möglicherweise ein Klicken aus dem Schaltschrank, wenn Sie einen Lichtschalter betätigen – auch das kommt von einem Relais (Abbildung 4.11).



**Abbildung 4.11** Diese Relais in verschiedenen Bauformen sind für unterschiedliche Schaltleistungen geeignet. Das 250-Volt-Exemplar rechts besitzt praktische Anschlüsse für Verbraucher und Schalteingänge und wird gern von Mikrocontrollern angesteuert.

Im vergangenen Jahrhundert wurde bei Experimenten mit bestimmten Stoffen entdeckt, dass sich deren Leitfähigkeit beeinflussen lässt. Während in Metallen viele freie Elektronen vorhanden sind, die eine hohe Leitfähigkeit bedeuten, fehlen diese bei Isolatoren. Bei *Halbleitern* hingegen sind einige wenige freie Ladungsträger vorhanden. Dieser Effekt ist temperaturabhängig: Je mehr Wärme, desto mehr Elektronen befinden sich im *Leitungsband* – also jenem energetisch angeregten Zustand, der es ihnen erlaubt, das heimische Atom zu

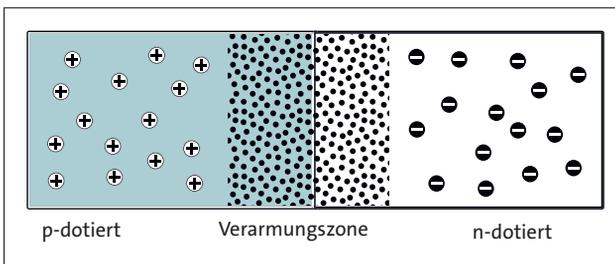
verlassen, wenn eine Spannung angelegt wird (Abbildung 4.12). Die restlichen Elektronen verbleiben im *Valenzband* und haben mit Stromleitung nichts am Hut. Beispiele für Halbleiter sind Silizium und Germanium. Die weitaus meisten Halbleiter bestehen aus Ersterem.



**Abbildung 4.12** Die Menge der freien Elektronen im Leiterband hängt vom Material ab (und außerdem von der Temperatur).

Wenn ein Elektron sein Valenzband verlässt, hinterlässt es ein *Defektelektron* (umgangssprachlich ein »Loch«). In der Kristallstruktur des Halbleiterfestkörpers kann dann ein Elektron von einem Nachbaratom in den Defekt springen und hinterlässt seinerseits eines. Da das Loch gewissermaßen eine positive Ladung darstellt, können auf diese Weise virtuelle Löcher in eine Richtung wandern und Elektronen in die Gegenrichtung, wenn sie die Kraftwirkung eines elektrischen Felds erfahren.

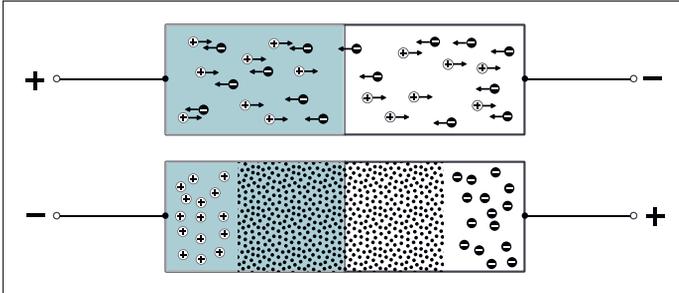
Der Trick besteht nun darin, den Halbleiter gezielt zu verunreinigen, um entweder zusätzliche Elektronen oder Defektelektronen zu erzeugen. Bei dieser *Dotierung* genügt ungefähr ein Fremdatom pro  $10^7$  Halbleiteratome, um einen hinreichenden Effekt zu erzeugen. Erhält ein Halbleiter dadurch zusätzliche Elektronen im Leitungsband, nennt man ihn *n-dotiert*, ansonsten *p-dotiert*. Dramatisches passiert beim Zusammenfügen von p- und n-dotiertem Halbleiter an der Grenze: Die überschüssigen Elektronen der n-Seite rekombinieren mit den Löchern der p-Seite. Es entsteht eine Verarmungszone, in der keine beweglichen Ladungsträger zur Verfügung stehen (Abbildung 4.13).



**Abbildung 4.13** An der Grenze zwischen n- und p-Schicht entsteht eine Zone mit sehr wenigen freien Ladungsträgern.

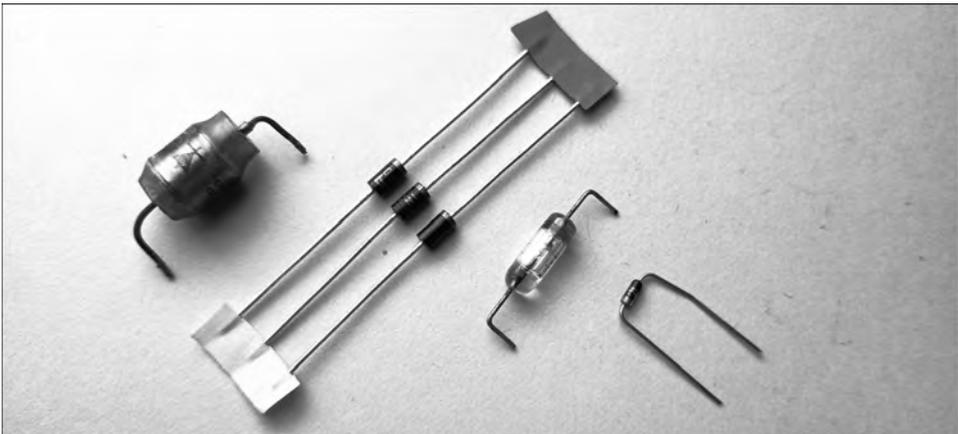
Richtig spannend wird dieser Aufbau, wenn eine externe Spannungsquelle hinzukommt. Was dann passiert, hängt nämlich von deren Polarität ab: Wenn Sie den Pluspol der Span-

nungsquelle an die n-dotierte Seite anlegen, wandern die Elektronen dorthin und die positiven Defektstellen in die Gegenrichtung. Das vergrößert die Verarmungszone. Im umgekehrten Fall gelangen Ladungsträger in diese Zone hinein und können sie überwinden – es fließt ein Strom (Abbildung 4.14).



**Abbildung 4.14** Das Verhalten des p-n-Übergangs hängt entscheidend von der Polarität ab.

Sie ahnen es schon: Was Sie hier sehen, ist eine *Diode*. Dieses elektronische Halbleiterbauelement lässt Strom nur in eine Richtung durch. Allerdings hat jeder coole Effekt seine Grenzen: Erstens braucht es eine minimale Spannung, um die Verarmungszone zu überwinden. Und zweitens führt eine zu hohe Spannung (*Durchbruchspannung*) in Sperrrichtung doch wieder zur Stromleitung und wegen der damit meist verbundenen hohen Stromstärke und Erwärmung auch zur Zerstörung. Dioden sind wie Widerstände preiswert herstellbare Bauelemente (Abbildung 4.15) und werden in vielen elektronischen Schaltungen genutzt, unter anderem als Schutz vor falsch gepolter Spannungsversorgung.



**Abbildung 4.15** Dioden gibt es in verschiedenen Bauformen und Spezifikationen.

Alle Dioden besitzen an einer Seite einen Ring als Markierung. Diese *Kathode* ist der Minuspol in Durchlassrichtung. Das wird auch am Schaltzeichen deutlich (Abbildung 4.16).

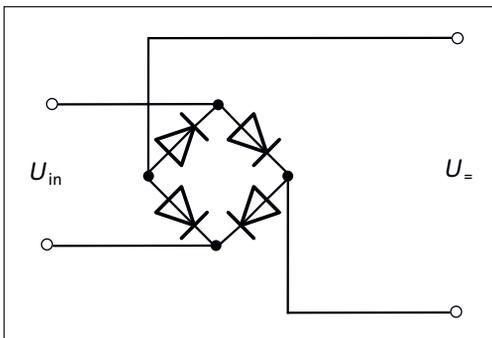


**Abbildung 4.16** Diodenschaltzeichen: D2 ist lichtempfindlich, D3 eine Z-Diode mit sehr hoher Dotierung, hinzu gesellt sich eine LED.

Bestehen Dioden aus bestimmten Halbleitern bzw. Dotierungen, leuchten sie in Durchlassrichtung. Die Rede ist natürlich von *Leuchtdioden (LEDs)*. Beachten Sie unbedingt, dass Leuchtdioden (in Durchlassrichtung) im Gegensatz zu Glühlampen keinen oder nur einen sehr kleinen Innenwiderstand haben. Bei üblichen Spannungen wie 5, 9 oder gar 230 V durchfließt sie daher ein zu hoher Strom und brutzelt sie umgehend. Leuchtdioden müssen daher immer mit einem in Reihe geschalteten *Vorwiderstand* versehen werden. Je nach Spannung, Leuchtdiode und gewünschter Helligkeit benötigen Sie Widerstände mit Werten im Bereich um oder unter  $1.000 \Omega$ . Am besten prüfen Sie die Spezifikation der zu verwendenden Leuchtdiode, in der üblicherweise ein maximal zulässiger Strom angegeben ist, und subtrahieren zur Sicherheit einen gewissen Anteil. Über das ohmsche Gesetz können Sie dann bei bekannter Versorgungsspannung den passenden Vorwiderstand errechnen.

### Beispiel Diodenschaltung: Brückengleichrichter

Da eine Diode nur in eine Richtung Strom passieren lässt, liegt die Idee nahe, ein Exemplar an eine Wechselspannungsquelle (AC, z. B. Steckdose) anzuschließen, um einen Verbraucher zu betreiben, der Gleichspannung benötigt (DC, z. B. Motor). Mit nur einer Diode bekommen Sie allerdings Versorgungslücken immer dann, wenn die Wechselspannung gerade falsch herum gepolt ist. Das ist meist nicht erwünscht. In dem Moment liegt aber am anderen Pol die richtige Spannung an. Das macht sich der *Brückengleichrichter* zunutze (Abbildung 4.17).



**Abbildung 4.17** Die Brückengleichrichterschaltung macht aus AC DC.

Sie sehen an der Schaltung, dass jeweils zwei Dioden Strom durchlassen, während die anderen beiden sperren. Das Resultat ist eine Spannung am Ausgang, die zwar immer noch sinusförmige Wechselstrompulse aufweist, aber immer richtig herum gepolt ist. Ein hinreichend dimensionierter *Glättungskondensator*, der parallel zum Ausgang geschaltet wird, kann für eine konstante Ausgangsspannung sorgen.

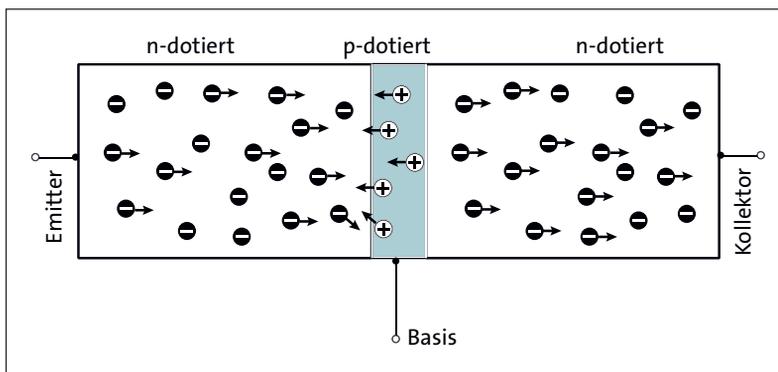
Brückengleichrichter werden häufig benötigt und sind der Einfachheit halber auch als integrierte Schaltung verfügbar, die alle vier Dioden in einem Gehäuse vereinigt. Beachten Sie die jeweilige Spezifikation: Gleichrichter, die direkt an der Netzspannung von 230 V betrieben werden sollen, müssen dafür auch zugelassen sein.

## Transistoren

Was ist auf der Welt eigentlich häufiger anzutreffen: Leuchtdioden oder Transistoren?

Keine Sorge, die Antwort ist nicht kompliziert: *Transistoren* sind häufiger. Denn Milliarden davon stecken in jedem Computer, inklusive Smartphones, insbesondere in den Speicherchips. Zum Glück lassen sich Halbleiterbauelemente unglaublich billig in großer Masse und auch in extrem kleiner Größe produzieren. Höchste Zeit, sich über die Funktionsweise von Transistoren zu unterhalten!

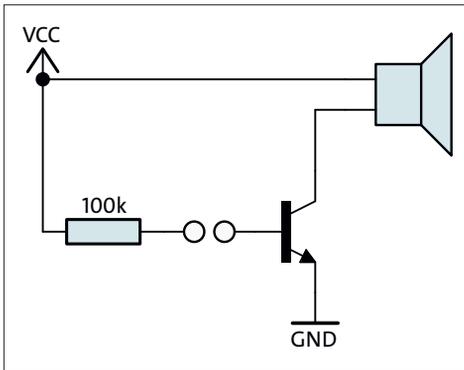
Im Gegensatz zu Dioden verfügen Transistoren über drei dotierte Halbleiterschichten, wobei die mittlere sehr dünn ausgeführt wird. Somit ergeben sich zwei verschiedene Bauformen, nämlich NPN und PNP. Beide funktionieren genau gleich, nur mit unterschiedlicher Polung. Die drei Anschlüsse heißen *Basis*, *Emitter* und *Kollektor* (Abbildung 4.18).



**Abbildung 4.18** Transistoren besitzen drei Halbleiterschichten mit je einem Anschluss, hier ein NPN-Exemplar.

Solange an der Basis keine Spannung liegt, ähnelt der Transistor letztlich zwei entgegengesetzt geschalteten Dioden und sperrt sich gegen jegliche Stromflüsse (bis zur *Durchbruch-*

spannung). Sobald aber ein kleiner Strom zwischen Emitter und Basis fließt, setzt der Transistoreffekt ein und schaltet einen großen Strom zwischen Emitter und Kollektor frei. Auf diese Weise dient ein Transistor als elektronischer Schalter, bei dem der Steuerstrom sehr viel kleiner sein kann als der Schaltstrom. Ein einfaches Beispiel ist eine *Berührungsschaltung*: Wenn Sie mit Ihrem Finger (der einen hohen Widerstand hat, aber kein Isolator ist) einen Strom zum sonst isolierten Basisanschluss leiten, bringen Sie eine über Kollektor und Emitter angeschlossene Lampe zum Leuchten oder einen Summer zum Krachmachen (Abbildung 4.19).



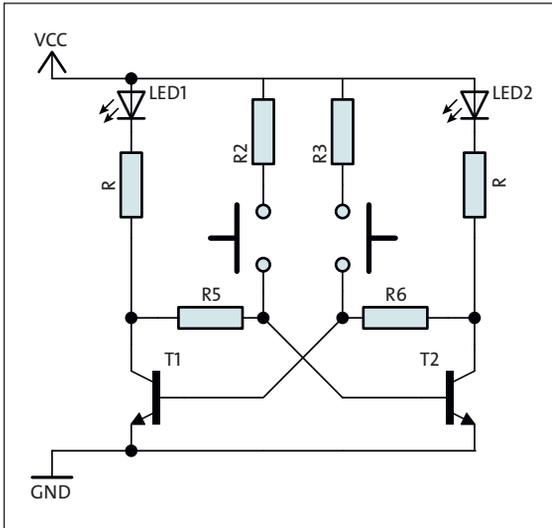
**Abbildung 4.19** Sobald Sie mit einem Finger den Kontakt an der Basis des Transistors schließen, aktiviert ein kleiner Strom über Basis und Emitter den NPN-Übergang und damit den Summer. Der Vorwiderstand begrenzt den Strom zur Sicherheit, um den Transistor nicht zu zerstören. Früher zeichnete man übrigens Kreise um Transistorsymbole, heute aber nicht mehr.

Die einfache Schaltung hat allerdings einen Nachteil: Der Kollektor-Emitter-Strom hängt von der genauen Größe des Basisstroms ab. Das bedeutet, dass der Summer unterschiedlich laut klingt, je nachdem, wie groß Ihr Hautwiderstand gerade ist. Üblicherweise verwendet man daher zwei Transistoren kaskadiert. Das ist die sogenannte *Darlington-Schaltung*. Das erhöht den Verstärkungseffekt so weit, dass auch bei kleinen Berührungen der maximale Basis-Emitter-Strom fließt.

Auf diese Weise als Schalter eingesetzt, ähnelt der Transistor zusammen mit dem in Reihe geschalteten Verbraucher einem Spannungsteiler. Im sperrenden Zustand entspricht der Transistor einem Widerstand mit sehr hohem Wert. Dann fällt fast die gesamte Spannung am Transistor zwischen Kollektor und Emitter ab, für den Verbraucher bleibt nichts mehr übrig. Sobald der Transistor leitet, hat er einen sehr kleinen Innenwiderstand, und die Spannung zwischen Kollektor und Emitter ist ebenfalls sehr klein, sodass fast die gesamte Spannung für den Verbraucher übrig bleibt, der daraufhin den Betrieb aufnimmt.

## Beispiel Transistorschaltung: ein einziges Bit

Computer und Smartphones sind ohne Speicher ziemlich nutzlos. Diese Speicher arbeiten ebenfalls mit Transistoren. Ich zeige Ihnen hier eine Schaltung, die genau ein Bit, also einen Ja/Nein-Zustand speichern kann, bis dieser durch eine Eingabe geändert wird. Werfen Sie einen Blick auf die Schaltung (Abbildung 4.20), die auf den schönen Namen *Flipflop* oder *bistabile Kippstufe* hört.



**Abbildung 4.20** Der Flipflop-Schaltplan benötigt zwei Transistoren. Die Abkürzung VCC steht für Voltage at the Common Collector (gemeint ist damit üblicherweise die Versorgungsspannung), GND für Ground (Masse).

Sie sehen in der Schaltung je zwei Leuchtdioden, Transistoren und Taster sowie drei Paar Widerstände. Die Schaltung ist symmetrisch aufgebaut, was bei zwei möglichen Zuständen naheliegend ist. Übrigens habe ich in dieser Schaltung die Standardschreibweisen für die Spannungsversorgung (VCC, V steht für *Voltage*), also den Pluspol, und die gemeinsame Masse (GND, Minuspol) verwendet. Nicht eingezeichnet ist die Batterie oder eine andere Spannungsquelle, die diese Versorgungsspannung bereitstellt, da es unerheblich ist, worum es sich genau handelt. Wegen der besseren Lesbarkeit werden Ziffern in Schaltplänen übrigens üblicherweise nicht tiefgestellt. Als Bauteilbezeichnungen schreibe ich daher R1 oder T2, als physikalische Größe für einen Widerstand aber weiterhin  $R_1$ .

Die Leuchtdioden stellen den Zustand dar: Leuchtet die eine, hat das Flipflop den Zustand A, leuchtet die andere, Zustand B. Die beiden Widerstände R sind kleine *Vorwiderstände*, die ein Durchbrennen der LEDs verhindern.

Stellen Sie sich vor, Sie schließen den linken Taster. Dann wird die Basis von T2 über den Widerstand R2 mit der Spannungsversorgung verbunden. Da sich der Strom immer den Weg des geringsten Widerstands sucht, wird er über LED2 und R und T2 fließen, aber nicht über R6 zur Basis von T1. Deshalb sperrt T1. Der Clou der Schaltung ist, dass jetzt Strom über LED1 und R5 zur Basis von T2 fließt, sodass Sie die Taste loslassen können, ohne dass sich etwas am Zustand ändert. R5 hat einen hohen Wert, sodass genug Strom fließt, um den Transistor zu schalten, aber nicht genug, um LED1 zum Leuchten zu bringen.

Sobald Sie die rechte Taste drücken, fließt Strom über R3 und schaltet Transistor 1 durch. Jetzt tritt der umgekehrte Zustand ein, T2 sperrt, und LED1 leuchtet auf.

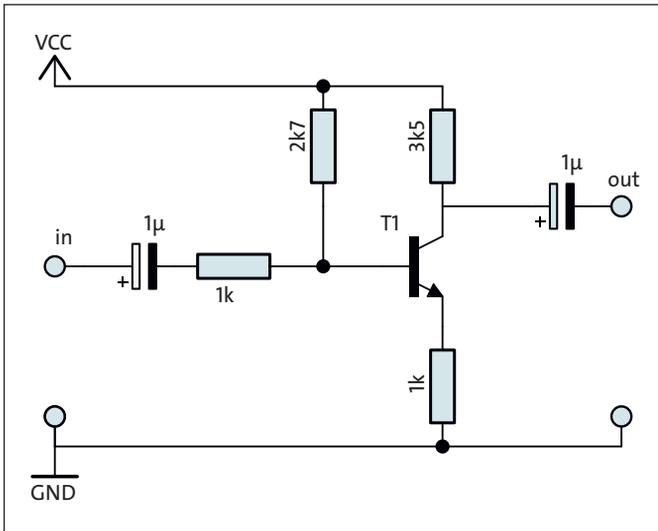
Es genügen also ein paar Widerstände und zwei Transistoren, um ein ganzes Bit zu speichern! Die coolste und mit Abstand wichtigste Anwendung für Transistoren ist aber eine andere: als Verstärker für elektrische Gitarren.

### **Beispiel Transistorschaltung: einfacher Audioverstärker**

Eine elektrische Gitarre enthält Stromabnehmer, die aus den Schwingungen der Saiten entsprechende Spannungssignale machen. Die Details sind für die grundsätzliche Betrachtung nicht wichtig – entscheidend ist: Die Spannung, die die E-Gitarre von sich gibt, ist sehr klein. So klein, dass Sie nicht einfach einen Lautsprecher anschließen können. Klarer Fall: Sie benötigen einen *Verstärker*.

Ich hatte Ihnen bereits verraten, dass die Leitfähigkeit des Transistors vom Basisstrom abhängt. Mit passend gewählten Widerständen ergibt sich daraus eine lineare *Verstärkung* eines Eingangssignals. Die einfachste dem entsprechende Schaltung besteht aus nur einem NPN-Transistor und einigen Widerständen (Abbildung 4.21). Außerdem sind zwei Kondensatoren erforderlich, um das Audiosignal ein- und auszukoppeln, weil es sich dabei um Wechselspannungen handelt. Mehr dazu erfahren Sie in Kapitel 9 über Hoch- und Wechselspannung in diesem Buch.

Die Schaltung versetzt den Transistor über den 2k7-Widerstand ( $2.700 \Omega$ ) grundsätzlich in den leitenden Arbeitszustand. Die beiden Widerstände an Kollektor und Emitter bilden gemeinsam mit dem Transistor einen Spannungsteiler, von dessen mittlerem Anschluss das verstärkte Ausgangssignal abgezapft werden kann. Ohne Eingangssignal ist die Ausgangsspannung konstant, was noch keinen Ton zu Gehör bringt. Sobald Sie die E-Gitarre zupfen, taucht über den Eingangskondensator und den Zwischenwiderstand eine zusätzliche sehr kleine Spannung an der Basis des Transistors auf. Dessen Innenwiderstand ändert sich, und der Spannungsteiler am Ausgang gibt eine entsprechend höhere Spannung auf den Kondensator. Das lässt sich alles im Detail berechnen, führt aber in diesem Buch zu weit.



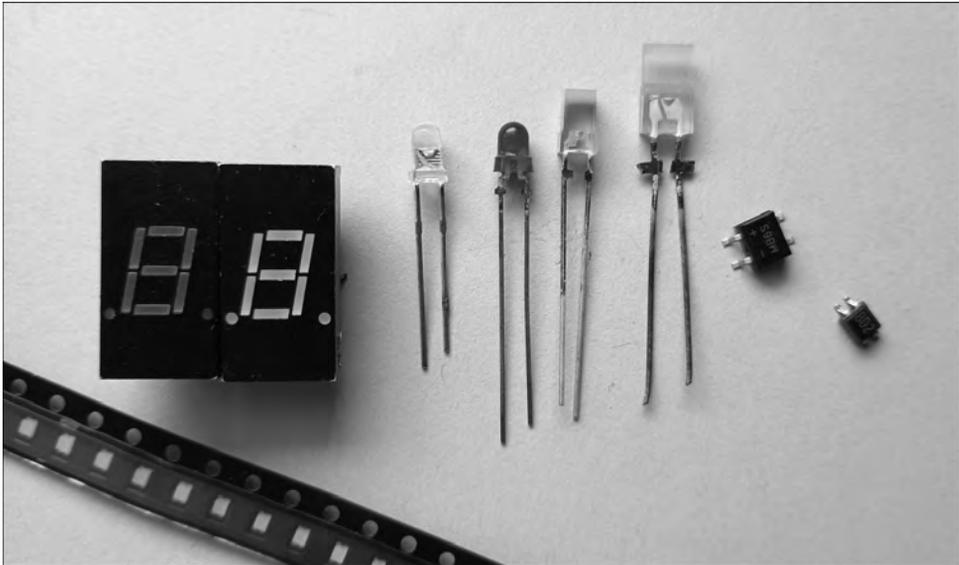
**Abbildung 4.21** Die eingezeichneten Werte in dieser Verstärkerschaltung sind nur Beispiele – für superbe Klangqualität kann ich nicht garantieren.

Mit anderen Widerstandswerten können Sie den Transistor außerhalb des linearen Bereichs betreiben und übersteuern – und schon haben Sie eine Metal-Gitarre. Viel Spaß beim Ausprobieren! Aber nach Ihrer Karriere als Rockgitarrist machen Sie bitte umgehend mit dem nächsten Abschnitt weiter.

## 4.5 Optoelektronik

Strom ist unsichtbar, was interaktive Anwendungen elektronischer Schaltungen etwas erschwert. Nicht nur deswegen sind Bauelemente wichtig, die auf Licht reagieren (*Detektoren*) oder welches abgeben (*Aktoren*). Für Letzteres sind *Laser-* oder *Leuchtdioden (LEDs)* zuständig. Die sind allgegenwärtig: als Hintergrundbeleuchtung von LCD-Panels, zum Betrieb von Glasfaserkabeln oder in einer TV-Fernbedienung. LEDs gibt es in unterschiedlichen Bauformen, und sie können verschiedene Farben erzeugen (Abbildung 4.22).

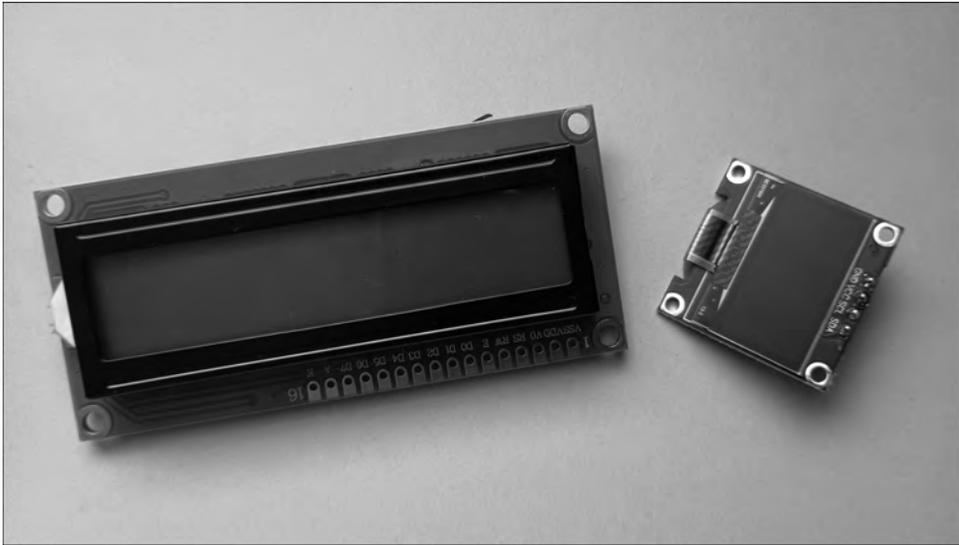
Die Farbe des von einer LED abgestrahlten Lichts hängt von den verwendeten Halbleitern und Dotierungen ab. Die ältesten LEDs leuchten rot. Seit 1968 werden diese produziert, und zwar auf Basis von Galliumarsenidphosphid. Sicher haben Sie Taschenrechner und Armbanduhren mit roten Ziffern schon mal in einem alten Film gesehen. Auch Betriebsleuchten von Fernsehern waren damals rot statt wie heutzutage grün. Verwirrend, oder?



**Abbildung 4.22** Leuchtdioden präsentieren sich in unterschiedlichsten Bauformen: unten Mikro-LEDs für die direkte Montage auf einer Platine (SMD), oben in Siebensegmentanzeigen und verschiedenfarbigen Gehäusen – die Kathode ist jeweils der kürzere Draht – ganz rechts zwei SMD-Optokoppler.

Die Lichtausbeute von LEDs wurde immer weiter verbessert. Mit anderen Materialien wurden zuerst grüne und gelbe und mit etwas Verspätung auch blaue LEDs entwickelt. Letztere sind erst seit den 1990er-Jahren in großen Stückzahlen und zu niedrigen Preisen verfügbar. Die blaue LED wurde sehnsüchtig erwartet. Dafür erhielten drei japanische Forscher 2014 sogar den Nobelpreis. Letztlich sind damit weiße LEDs möglich geworden, die dank hoher Lichtausbeute heutzutage fast alle Bereiche unseres Lebens erhellen – und zwar mit deutlich geringerem Energieverbrauch als Glühlampen oder Halogenlampen. Allerdings verfügen LEDs nicht über die gleiche Trägheit wie Glühlampen: Betreibt man eine LED an Wechselstrom (also mit hinreichend großem Widerstand und Gleichrichter direkt an der Steckdose), flackert sie mit einer Frequenz von 100 Hz. Ein Glättungskondensator oder eine Treiberschaltung ist erforderlich, um das zu unterbinden.

Im weiteren Sinne gehören auch Displays zur Optoelektronik. Zwar gibt es mittlerweile Displays, in denen jeder Lichtpunkt eine LED ist, viele funktionieren aber mit einer konstanten Hintergrundbeleuchtung und schnell ein- und ausschaltbaren Masken. Das Prinzip kennen Sie von *LCD*-Anzeigen, die schon in meiner Schulzeit in Taschenrechnern, Tamagotchis und Armbanduhren üblich waren, aber teils ohne Hintergrundbeleuchtung – im Dunkeln ließen sie sich nicht ablesen. Verbesserungen in den Herstellungsprozessen und bei den Materialien ermöglichen heute höhere Auflösungen und eine kaum noch wahrnehmbare Trägheit (Abbildung 4.23).



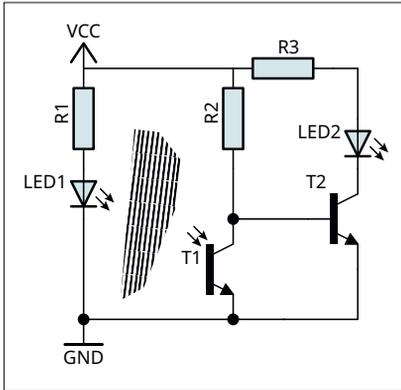
**Abbildung 4.23** Displays weisen so viele Einzelpunkte auf, dass sie eigene Controller besitzen (auf der Rückseite), die über ein serielles Protokoll angesteuert werden möchten.

Für die Ansteuerung von so vielen einzelnen Elementen gibt es eigene Prozessoren (*Controller*), die über eine Schnittstelle einfache Befehle verstehen. Selbst für die *Siebensegmentanzeigen* aus Abbildung 4.22 gibt es integrierte Schaltungen, die eine binäre Zahl über meist vier Eingangsleitungen als Eingabe akzeptieren und daraufhin die richtigen Segmente zum Leuchten bringen. Jede Leitung entspricht dabei einem Bit. Vier Bits können Zahlen von 0 bis 15 darstellen. Nur die Ziffern von 0 bis 9 sind hier relevant, die restlichen Bits sind verschwendet. Diese Darstellung nennt man auch *BCD (Binary Coded Decimal)*. Effizienter, aber weniger nutzerfreundlich sind *Hexadezimalzahlen*. Die Ziffern für die restlichen 4-Bit-Zahlen von 10 bis 15 sind dann die Buchstaben A bis F. Tatsächlich erzeugen die meisten Treiberchips für Siebensegmentanzeigen auch diese Buchstaben, wenn man binäre Eingangssignale größer als die Zahl 9 anlegt.

## Detektoren

Hinreichend starker Lichteinfall versorgt einen geeigneten p-n-Übergang mit zusätzlichen Elektron-Loch-Paaren, weil er Valenzelektronen in einen höheren Energiezustand bringt. Deshalb ist der Strom durch eine *Fotodiode* (in Durchlassrichtung), an die eine Spannung angelegt wird, abhängig von der Helligkeit der Umgebung. Während Fotodioden sehr empfindlich sind und schon kleinste Lichtmengen detektieren können, eignen sich *Fototransistoren* durch den Verstärkungseffekt besser, um einen Schaltvorgang auszulösen. Anwendungsbeispiele für beide Bauelemente sind natürlich die Datenübertragung über Licht

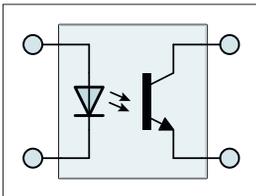
(z. B. Glasfaserinternet, aber auch optische Audiokabel), Bewegungsmelder, Infrarotempfänger für Fernbedienungen oder Lichtschranken. Als Beispiel für eine Schaltung zeige ich Ihnen eine Lichtschranke (Abbildung 4.24).



**Abbildung 4.24** Die Lichtschranke reagiert auf das Entfernen eines Hindernisses.

LED1 wird über Vorwiderstand R1 zum Leuchten gebracht. Zwischen der LED und dem Fototransistor T1 kann sich ein Hindernis befinden, das schraffiert eingezeichnet ist. LED2 (betrieben über Vorwiderstand R3) leuchtet lediglich dann, wenn Transistor T2 durchschaltet. Das passiert nur, wenn T1 sperrt, also kein Licht auf ihn fällt. Durch die Größe des Widerstands R2 lässt sich die Empfindlichkeit der Schaltung einstellen.

Eine Variante der Lichtschranke ist der *Optokoppler*. Dabei handelt es sich um eine Leuchtdiode und einen Fototransistor in einem gemeinsamen Gehäuse (Abbildung 4.25).

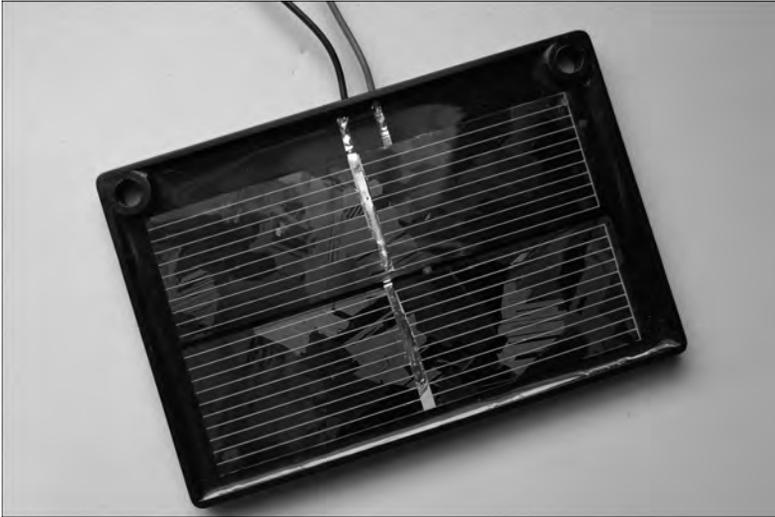


**Abbildung 4.25** Optokoppler trennen elektrisch und verbinden Signale.

Der Witz an der Sache ist, dass innerhalb des Optokopplers eine rein optische Signalübertragung erfolgt. Sende- und Empfangsseite sind elektrisch nicht miteinander verbunden. Man spricht auch von einer *galvanischen Trennung*. So können Signale zwischen verschiedenen Stromkreisen übertragen werden, ohne dass zwischen diesen ein Strom fließt. Glasfaserkabel sind also letztlich nichts anderes als stark in die Länge gezogene Optokoppler.

## Solarzellen

Eine besonders wichtige optoelektronische Komponente, die prinzipiell einer Fotodiode ähnelt, ist die *Solarzelle* (Abbildung 4.26).



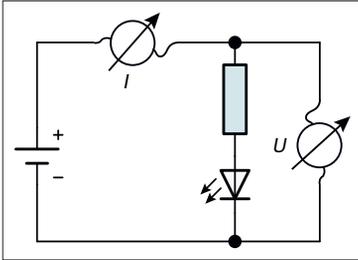
**Abbildung 4.26** Solarmodule bestehen aus in Reihe geschalteten Solarzellen.

Der *photovoltaische Effekt* produziert bei Lichteinstrahlung einen *Fotostrom*, weil Elektronen von der p-Schicht in die n-Schicht übergehen. Das erzeugt einen Strom entgegen der Durchlassrichtung. Als große Flächen wandeln Solarzellen Lichtenergie komfortabel in elektrische Energie um. Mehrere in Reihe geschaltete Solarzellen können ohne Weiteres genug Energie bereitstellen, um eine kleine Schaltung oder sogar einen Motor zu betreiben. Hinreichend große Solarmodule können einen ganzen Haushalt versorgen. Sie kennen sicher *Balkonkraftwerke*, die über einen *Wechselrichter* Strom ins Hausnetz einspeisen. Das ist nicht nur saubere Energie, sondern spart durch die dezentrale Versorgung auch Leitungskapazitäten ein. Mehr zu diesem Thema erfahren Sie in Abschnitt 10.2, »Drehstrommotoren«, in diesem Buch und natürlich in Ihrem Studium.

## 4.6 Messgeräte

Weiter oben hatte ich Ihnen bereits ein *Multimeter* gezeigt. Solche Geräte sind handlich und erlauben innerhalb ihrer jeweiligen Messgenauigkeit spezifische Aussagen über das Geschehen in einer elektronischen Schaltung.

Allerdings können *Messgeräte* ohne Weiteres nur eine Spannung zwischen zwei Punkten messen. Um einen Strom zu messen, müssten Sie eine Verbindung in Ihrer Schaltung auftrennen, um das Gerät dazwischenschalten (Abbildung 4.27). Das ist bei einer zusammengelöteten Schaltung so gut wie unmöglich.



**Abbildung 4.27** Das Messinstrument links misst einen Strom, das rechts eine Spannung. Statt der altmodischen Zeiger stehen manchmal auch nur die Einheiten (V bzw. A) in den Kreisen.

Die Naturgesetze sind aber auch gemein: Um den Zeiger eines Instruments zu bewegen, muss ja zwingend ein Strom fließen. Dieser Strom lenkt über einen Elektromagneten die Nadel des Zeigers aus. Was für analoge Instrumente gilt, gilt auch für digitale: Ohne Strom passiert in einer Schaltung eben rein gar nichts. Dieser Strom muss andererseits möglichst niedrig sein, um nicht die Funktion der Schaltung selbst zu beeinflussen. Deshalb müssen Messgeräte bei einer Spannungsmessung einen extrem hohen Innenwiderstand aufweisen (einige  $M\Omega$ ) und bei einer Strommessung einen extrem niedrigen.

## Leistungsmessung

Selbst wenn Sie kein Multimeter besitzen: In Ihrem Haus existiert mindestens ein Messgerät, nämlich im Keller – der *Stromzähler* (Abbildung 4.28).

Der Zähler zählt bzw. misst allerdings überhaupt nicht den Strom, sondern den *Verbrauch an elektrischer Energie*. Genau dafür bezahlen Sie auch über Ihre Stromrechnung. Der Verbrauch wird in kWh gemessen und abgerechnet. Dabei ist der Verbrauch das Produkt aus Leistung (in Kilowatt) und Zeit (in Stunden). Die Leistung wiederum berechnet sich aus Spannung und Strom:

$$P = U \cdot I$$

Wenn Sie bei einer Netzspannung von 230 V beispielsweise ein Elektroauto mit einem Ladestrom von 4 A drei Stunden lang laden, ergibt sich als Leistung:

$$P = 230 \cdot 4 \text{ W} = 920 \text{ W} = 0,92 \text{ kW}$$

Die verbrauchte elektrische Energie ist:

$$W = P \cdot t = 0,92 \cdot 3 \text{ kWh} = 2,76 \text{ kWh}$$



**Abbildung 4.28** Dieser Stromzähler verfügt links unten über ein Mobilfunkmodul zur Datenübertragung. Diese funktioniert dank externer Antenne sogar im tiefsten Keller. Smart, oder?

Verwechseln Sie nicht die Buchstaben *W* für die elektrische Energie (engl. *Work*) und den Buchstaben *W* für die Einheit Watt! Die Leistung ist nach *James Watt* (1736–1819) benannt, einem schottischen Erfinder, der unter anderem für entscheidende Verbesserungen an Dampfmaschinen bekannt wurde.

Jetzt können Sie auch ausrechnen, welche *Verlustleistung* an einem Widerstand in Wärme umgewandelt, also verschwendet wird. Setzen Sie das ohmsche Gesetz ein, um die Spannung zu eliminieren, und Sie erhalten:

$$P = U \cdot I = R \cdot I^2$$

Die Verlustleistung hängt also wie Sie sehen vom Quadrat des Stroms ab, der durch den Widerstand fließt.

## Wechselstromleistung

Ganz genau stimmt die obige Rechnung nur für Gleichspannung bzw. -strom, weil bei Wechselspannung  $U$  und  $I$  nicht die ganze Zeit konstant sind. Stattdessen gilt es in dem Fall *Scheinleistung*, *Blindleistung* und *Wirkleistung* zu berücksichtigen.

Nur die Wirkleistung kann wirklich genutzt werden, etwa zur Umwandlung in mechanische Leistung (z. B. durch einen Motor). Schwanken Strom und/oder Spannung periodisch, wie es bei einem 230-Volt-Netzanschluss üblich ist, müssen Sie ein Integral berechnen:

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u \cdot i \, dt$$

Dabei ist  $T$  die Periodenlänge, über die integriert wird. Bei sinusförmigem Verlauf des Stroms (also einem Idealfall) hängt es von den angeschlossenen Verbrauchern ab, wie weit der sinusförmige Verlauf von Spannung und Strom gegeneinander phasenverschoben ist (die genaue Herleitung lernen Sie demnächst in Ihrem Studium). Diese *Phasenverschiebung*  $\varphi$  taucht als Faktor in der Lösung des Integrals auf:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Der Stromzähler in Ihrem Keller misst gleichzeitig Strom und Spannung, mittelt dabei über eine Zeitspanne und misst somit die *Wirkleistung*.

In diese Messung geht natürlich das Vorzeichen des elektrischen Stroms ein. Falls Sie ein eigenes Solarkraftwerk betreiben, das über einen Wechselrichter Strom in Ihr Netz einspeist, könnte es passieren, dass Ihr Stromzähler rückwärts läuft, weil Sie mehr Strom produzieren, als Sie verbrauchen. Bei modernen, smarten Zählern wie jenem auf meinem Foto passiert das nicht. Je nach Vereinbarung mit Ihrem Stromanbieter bekommen Sie eine Strom-einspeisung vergütet, oder sie wird schlicht blockiert.

Moderne, smarte Zähler erlauben Ihnen sogar, den momentanen Verbrauch per App oder Browser abzulesen. Dazu werden Daten übers Internet an einen Server übermittelt, der sie aufbereitet und für Sie zugänglich macht. Inzwischen gibt es auch für Privathaushalte Tarife, bei denen der Preis vom über den Tag schwankenden Spotmarkt-Strompreis abhängt: Betreiben Sie Großverbraucher wie elektrische Heizung, E-Auto, Waschmaschine, Toaster und Föhn nur nachts, sparen Sie mit so einem Tarif eine Menge Geld, weil der Abgabepreis dann niedriger liegt.

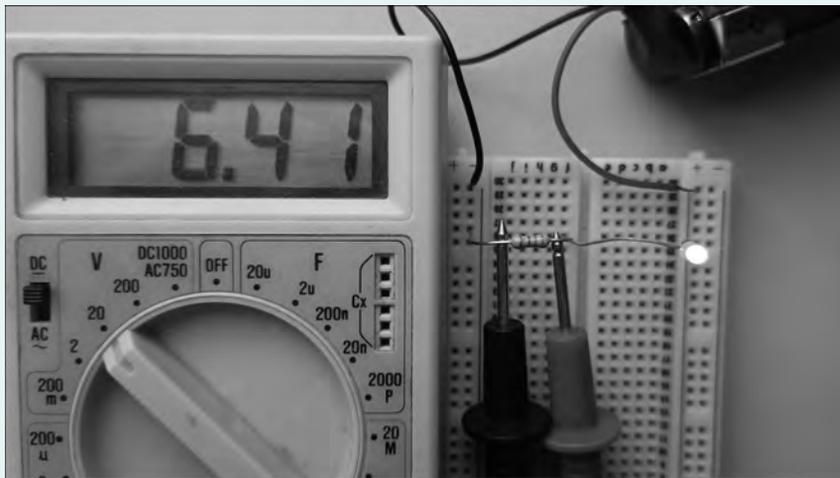
Übrigens kann es sich auch ohne smarten Zähler lohnen, mit einem als Zwischenstecker ausgeführten Leistungsmessgerät den Verbrauch bestimmter Geräte einmal zu messen. Möglicherweise haben Sie einen alten Kühlschrank oder entlarven auf diese Weise ein veraltetes Netzteil irgendeines Haushaltsgeräts, das permanent Strom verschwendet – und Sie wissen ja: Die billigste Energie ist die, die gar nicht erst verbraucht wird!

## 4.7 Entspannungsübungen



### Aufgabe 1

Sie schließen eine gelbe LED über einen Vorwiderstand ( $R = 330 \Omega$ ) an eine Blockbatterie an. An der angeschlossenen, nicht mehr ganz frischen Batterie messen Sie eine Spannung von  $U_0 = 8,5 \text{ V}$  und am Widerstand  $U_R = 6,41 \text{ V}$  (Abbildung 4.29).



**Abbildung 4.29** Das Multimeter zeigt die Spannung am Vorwiderstand.

Berechnen Sie den Strom  $I_{\text{LED}}$ , der durch die Leuchtdiode fließt, sowie deren Innenwiderstand in Durchlassrichtung  $R_{\text{LED}}$ .



### Aufgabe 2

In der Villa eines bekannten Milliardärs wird ausschließlich Silberdraht mit einem Durchmesser von 1 mm verwendet, um in jedem Zimmer 5-Volt-USB-Buchsen zu versorgen. Berechnen Sie anhand des spezifischen Widerstands von Silber (siehe Tabelle 4.1) den Widerstand bei einer Drahtlänge von 11 m zwischen Spannungsversorgung und USB-Buchse beim 9.000-Euro-Sofa. Wie hoch ist die Verlustleistung, wenn Sie ein Tablet einstecken, das einen Ladestrom von 0,5 A aus der Leitung zieht? Um wie viel erhöht sich die jährliche Stromrechnung, wenn das Tablet permanent eingesteckt ist und Strom verbraucht? Setzen Sie für die Kosten einen Preis von 35 ct/kWh an.



### Aufgabe 3

Schauen Sie sich den folgenden Schaltplan an (Abbildung 4.30). Auf welchen Widerstandswert müssen Sie das Potenziometer R2 stellen, damit über das Amperemeter kein Strom fließt?

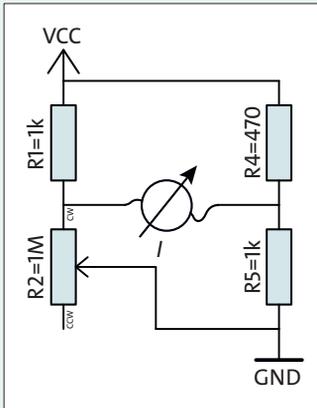


Abbildung 4.30 Drehen Sie das Poti in die richtige Position!



### Aufgabe 4

Werfen Sie einen Blick auf diesen etwas sonderbaren Schaltplan (Abbildung 4.31). Welche Schalter müssen Sie (mindestens) schließen, damit die Lampe leuchtet? Welche Schalter dürfen Sie keinesfalls schließen?

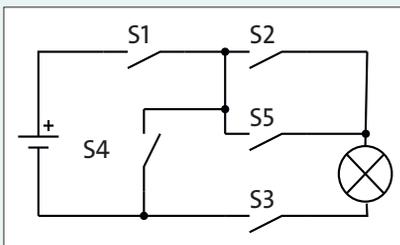
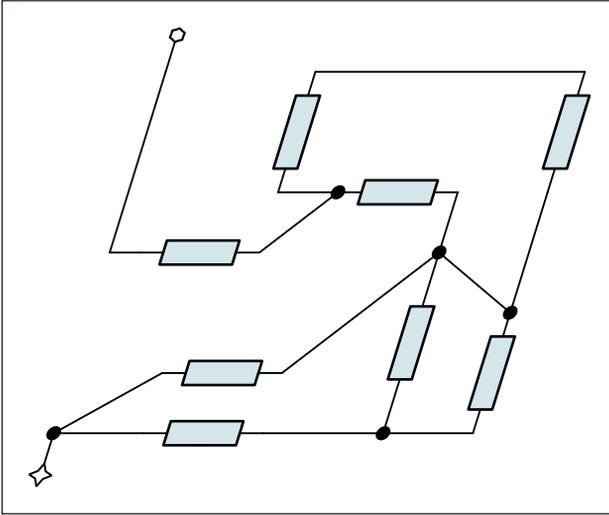


Abbildung 4.31 Dieser Schaltplan ist gleichzeitig ein Schalterplan.



### Aufgabe 5

In den Trümmern eines außerirdischen Raumschiffs finden Sie ein leeres Steckerpaar, die Aufschrift  $R_x = 1k$  und einen Schaltplan (Abbildung 4.32). Sie sind sich ganz sicher, dass es genügt, einen einzigen Widerstand mit einem ganz bestimmten Wert einzusetzen, um das Vehikel wieder in Bewegung zu setzen. Welchen?



**Abbildung 4.32** Außerirdische bevorzugen anscheinend schräge Schaltpläne ...

## 4.8 Lösungen

### Aufgabe 1

Da es sich um eine Hintereinanderschaltung handelt, fließt überall der gleiche Strom. So genügt es, die am Widerstand abfallende Spannung und dessen Nennwert ins umgestellte ohmsche Gesetz zu füttern:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{6,41 \text{ V}}{330 \Omega} \approx 0,019 \text{ A} = 19 \text{ mA}$$

Der über den Widerstand fließende Strom ist derselbe wie über die LED. Damit können Sie den Innenwiderstand der LED berechnen, indem Sie die an ihr abfallende Spannung  $U_{LED}$  ermitteln:

$$U_{LED} = U_0 - U_R = 8,5 \text{ V} - 6,41 \text{ V} = 2,09 \text{ V}$$

$$R_{LED} = \frac{U_{LED}}{I} = \frac{2,09 \text{ V}}{0,019 \text{ A}} \approx 110 \Omega$$

Der Innenwiderstand dieser (schon etwas älteren) LED ist also ziemlich genau ein Drittel des Vorschaltwiderstands.

## Aufgabe 2

Berechnen Sie zunächst den Gesamtwiderstand des 11 m langen Drahtstücks. Bei einem Durchmesser von 1 mm (also einem Radius von 0,5 mm) ist die Querschnittsfläche:

$$F = \pi r^2 = \pi \cdot 0,5^2 \text{ mm}^2 \approx 0,79 \text{ mm}^2$$

Der Gesamtwiderstand errechnet sich aus dem spezifischen Widerstand dividiert durch diese Fläche und multipliziert mit der Länge. Beachten Sie die verwendeten Einheiten bzw. Vorsilben:

$$R = \rho \cdot l / F = 0,015 \text{ } \Omega\text{mm}^2/\text{m} \cdot 11 \text{ m} / 0,78 \text{ mm}^2 \approx 0,21 \text{ } \Omega$$

Die Verlustleistung ist bei einem Strom von 0,5 A:

$$P = R \cdot I^2 = 0,21 \cdot 0,5^2 \text{ W} \approx 0,05 \text{ W} = 50 \text{ mW}$$

Bei 24·365 h im Jahr beträgt der Energieverbrauch:

$$W = P \cdot T = 0,05 \cdot 24 \cdot 365 \text{ Wh} = 438 \text{ Wh} \approx 0,44 \text{ kWh}$$

Die Kosten sind:

$$0,46 \text{ kWh} \cdot 35 \text{ ct/kWh} = 15,4 \text{ ct}$$

Das klingt alles wenig, aber wenn Sie sich mal kurz vorstellen, wie viele Menschen nicht allzu genau darauf achten, was alles an der Steckdose saugt, sieht die Sache ganz anders aus. Kleinvieh macht eben auch Mist.

## Aufgabe 3

Da in der gewünschten Situation kein Strom über die mittlere Verbindung fließen soll, fällt dort dann auch keine Spannung ab. Das bedeutet, dass Sie den Aufbau wie zwei unabhängige Spannungsteiler betrachten können. Der Innenwiderstand des Messgeräts ist irrelevant. In dem Fall entsprechen die Spannungen den Verhältnissen der Widerstandswerte. Es gilt also:

$$\frac{R_4}{R_5} = \frac{U_4}{U_5} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

Der gesuchte und am Potenziometer einzustellende Wert  $R_2$  ist also:

$$R_2 = \frac{R_1}{R_4} \cdot R_5 = \frac{1000}{470} \cdot 1000 \text{ } \Omega \approx 2,13 \text{ k}\Omega$$

## Aufgabe 4

Die Schaltung kombiniert Reihen- und Parallelschaltung. Zwingend schließen müssen Sie Schalter S1 und S3 sowie mindestens einen der beiden Schalter S2 und S5. Keinesfalls schließen dürfen Sie S4, sobald S1 geschlossen ist, weil er einen Kurzschluss verursachen würde. Dabei würde die Lampe nicht leuchten, weil der Strom lieber über den Schalter fließt als durch die Lampe.

### Aufgabe 5

Wenn Sie den außerirdischen Schaltplan genauer anschauen, können Sie ihn etwas ordentlicher zeichnen, sodass offensichtlich wird, welche Widerstände parallel geschaltet sind und welche in Reihe (Abbildung 4.33).

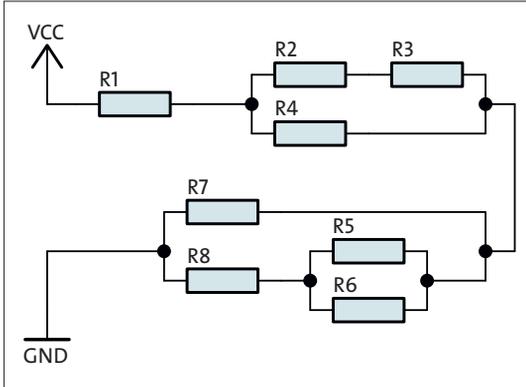


Abbildung 4.33 Raumschiff-Schaltung, übersetzt.

Analysieren Sie Widerstandsnetzwerke stets von außen nach innen und betrachten Sie die Knoten. In diesem Fall haben Sie oben eine Reihenschaltung, eine Parallelschaltung und noch eine Hintereinanderschaltung:

$$R_{\text{oben}} = R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2 + R_3} + \frac{1}{R_4}}$$

Die untere Hälfte ist eine Parallelschaltung von R7 mit einer Hintereinander- und einer weiteren Parallelschaltung:

$$R_{\text{unten}} = \frac{1}{\frac{1}{R_7} + \frac{1}{R_8 + \frac{1}{\frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6}}}}$$

Der Gesamtwiderstand ist dann die Summe von  $R_{\text{oben}}$  und  $R_{\text{unten}}$ , da beide hintereinandergeschaltet sind. Wenn Sie als Zahlenwerte für alle Widerstände  $1.000 \, \Omega$  (1k) in die grässliche Monsterformel einsetzen, erhalten Sie:

$$R_{\text{ges}} \approx 1666,7 \, \Omega + 600 \, \Omega = 2266,7 \, \Omega$$

Guten Flug!

## Kapitel 9

# Aus der Steckdose: Hoch- und Wechselspannung

*Es gibt ja den schönen Spruch: Bei uns kommt der Strom aus der Steckdose. Aber ist dieser Strom eigentlich grün oder blau? Wie sieht er denn nun aus, und was hat das mit dem Brummen in manchen Lautsprechern zu tun?*

## 9.1 Wechselstrom

Dieses Kapitel beschäftigt sich unter anderem mit der Frage, warum *Hochspannungsleitungen* öfter *Wechselstrom* ( $\approx$ , AC) statt *Gleichstrom* ( $=$ , DC) transportieren (Abbildung 9.1).



**Abbildung 9.1** Zwei parallele Leitungen in der Nähe der Autobahn A1 bei Kamen: links Höchstspannung, rechts Hochspannung. Die Höchstspannungsleitung führt unter anderem von einem Gaskraftwerk zu einem Stahlwerk.

Die Wahl fällt auf Wechselstrom, weil er sich leichter über größere Entfernungen übertragen lässt. Auch die Oberleitung von elektrischen Eisenbahnen besteht aus verdammt langen Strecken, die bevorzugt mit Wechselstrom versorgt werden. Lassen Sie uns etwas tiefer ins Detail gehen.

Wie Sie bereits wissen, ist die *Verlustleistung* in einem Stromleiter abhängig vom Widerstand  $R$ :

$$P = I \cdot U_{\text{Verlust}} = I^2 \cdot R$$

Mit anderen Worten: Der Verlust nimmt quadratisch zu mit der Stromstärke. Sie wollen aber möglichst geringe Ströme transportieren. Denn der Widerstand des Drahts ist wiederum von dessen Durchmesser abhängig (je höher, desto geringer). Um keine meterdicken Drähte aufhängen zu müssen, sollte der Strom daher reduziert werden. Das geht jedoch nur durch Erhöhung der Quellenspannung (nicht zu verwechseln mit der Verlustspannung).

Übliche Durchmesser von Höchstspannungsdrähten liegen im Bereich einiger Zentimeter. Oft wird als Material Aluminium verwendet, weil es im Vergleich zu Kupfer zwar eine etwas schlechtere Leitfähigkeit hat, aber auch eine geringere Dichte aufweist und billiger ist.

Da Sie inzwischen über die Funktionsweise des Transformators Bescheid wissen, genügt jetzt nur noch ein Hinweis, um die Nützlichkeit des Wechselstroms zu verstehen: Transformatoren erlauben es, Wechselstrom mit recht geringen Verlusten von einer Spannung in eine andere umzuwandeln. So kann eine Hochspannungsleitung (wie der Name schon sagt) Wechselspannung mit 110, 220 oder sogar 380 kV transportieren. Umspannungsanlagen machen daraus Niederspannung, die von Haushalten (400 V) oder Betrieben (10–20 kV) verarbeitet werden kann. Großindustrie (z. B. Hochöfen) erhalten freilich direkt Hochspannung geliefert, hingegen finden Sie zwischen Hochspannungsleitungen und Ansiedlungen häufig Trafohäuschen, die die angelieferte Hochspannung heruntertransformieren (Abbildung 9.2).



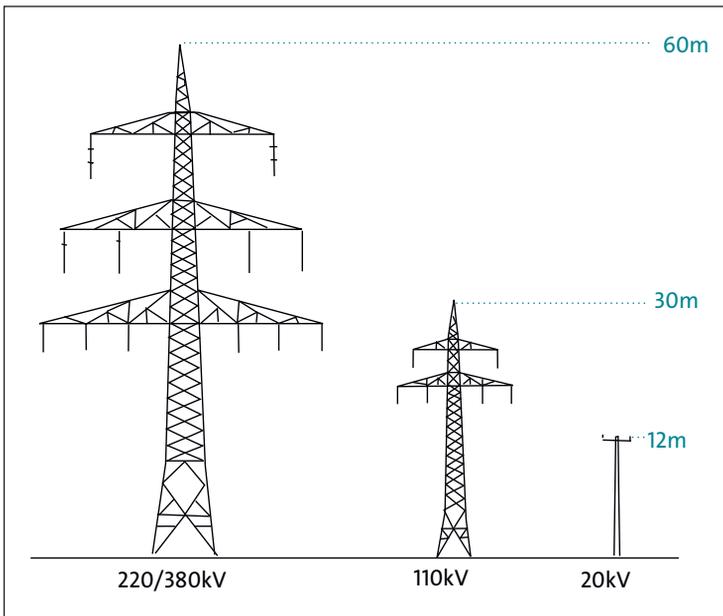
**Abbildung 9.2** Dieses Schalthaus aus den 1920er-Jahren steht unter Denkmalschutz. Aufgabe: Mittelspannung (10–20 kV) in Niederspannung (400 V) transformieren.

In der Elektrizitätswirtschaft gibt es eine Faustformel, laut der der wirtschaftlich sinnvolle Transportweg in km der Nennspannung der Leitung in kV entspricht. Eine 110-kV-Leitung sollte also nicht länger als 110 km sein. Übrigens können Sie die verwendete Spannung an der Höhe der verwendeten Masten ablesen (Abbildung 9.3).

Sie können unterscheiden zwischen vier Spannungsebenen, die es in Deutschland gibt:

- ▶ Höchstspannung (Freileitungen aus Aluminium mit 220 und 380 kV, maximale Stromstärke 645 A)

- ▶ Hochspannung (Freileitungen aus Aluminium mit 10 bis 110 kV, maximale Stromstärke 645 A)
- ▶ Mittelspannung (meist Erdkabel, Ringnetz, 10 bis 20 kV, maximale Stromstärke 375 A)
- ▶ Niederspannung (meist Erdkabel, 230/400 V)



**Abbildung 9.3** Schauen Sie sich in der Landschaft um, und Sie erkennen an der Größe der Masten die Spannung!

An den Übergabepunkten befinden sich Umspannwerke oder Transformatoren, die Sie in Form von unscheinbaren grauen Gebäuden sicher aus dem Stadtbild kennen.

Höchstspannung kann übrigens bei Spannungsspitzen zu *Koronaentladungen* führen, also zu einer Ionisierung der Luft, die man vor allem im Sommer leicht hören kann. Dabei treten erstens Entladungsverluste auf und zweitens ultraviolette Leuchterscheinungen. Manche Tiere können ultraviolettes Licht wahrnehmen, Menschen brauchen dafür technische Hilfsmittel.

Auch die Oberleitung der Deutschen Bahn führt Wechselspannung, und zwar 15 kV – aber mit einer Frequenz von  $16 \frac{2}{3}$  Hz, nicht 50 Hz wie im restlichen Netz. Die Schienen bilden den Rückleiter und sind geerdet, sodass Mensch und Tier sie gefahrlos berühren können, ganz im Gegensatz zur Fahrleitung. Um Kriechströme durch Feuchtigkeit zu vermeiden, ist die Oberleitung an Keramikisolatoren befestigt, die durch eine Rippenstruktur einen besonders langen Weg für Kriechströme garantieren. Trotzdem können Sie an regnerischen

Tagen oft das charakteristische Summen der unerwünschten Leistungsverluste hören. Dabei handelt es sich um kleine Entladungen ionisierter Luft.

Trotz des hohen Aufwands für Aufbau und Betrieb ist elektrische Traktion in vielerlei Hinsicht vorteilhafter als Diesel oder gar Dampf. Deshalb wurden in Deutschland nach und nach fast 21.000 von insgesamt über 33.000 km Strecke mit Oberleitungen ausgestattet (Abbildung 9.4).



**Abbildung 9.4** Oberleitungen in der Einfahrt zum Kölner Hbf.: ganz schön komplizierter Drahtverhau. Sie können übrigens in dieser Aufnahme in der Mitte gut erkennen, dass der Fahrdrabt im Zickzack verlegt ist, um die Schleifstücke der Stromabnehmer gleichmäßig abzunutzen.

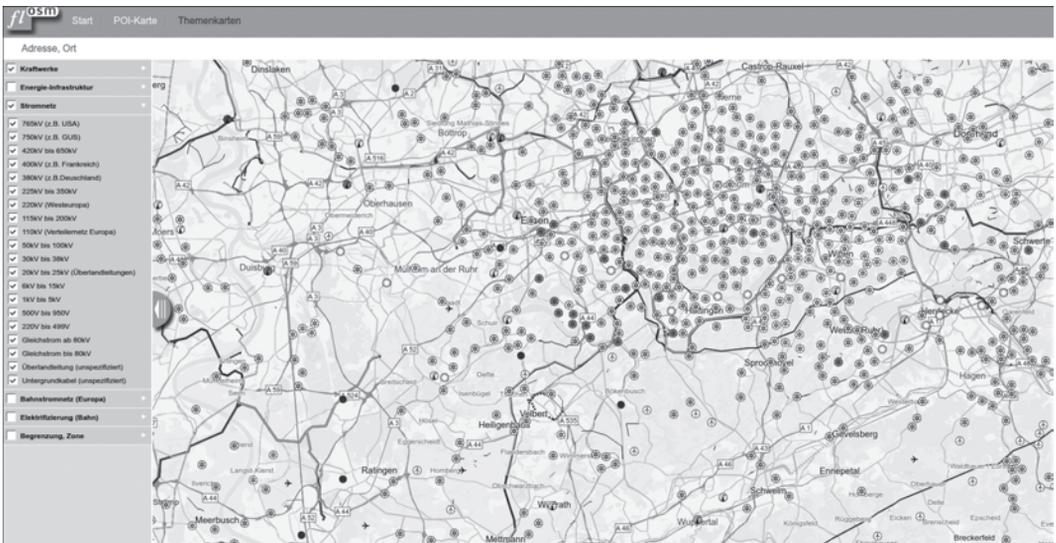
Straßenbahnen begnügen sich mit 500 bis 750 V Gleichspannung. Die Entfernungen sind kürzer, die geforderte Antriebsleistung niedriger – deshalb sind keine so hohen Leistungen zu übertragen.

Eine besondere Herausforderung für den elektrifizierten Eisenbahnbetrieb sind Berührungspunkte zwischen unterschiedlichen Stromsystemen. Während in früheren Zeiten vielerorts die Lok gewechselt werden musste (z. B. zwischen Deutschland und den Niederlanden, wo mit 1.500 V= gefahren wird), gab es ab den 1960er-Jahren Bemühungen, das zeitraubende Rangieren einzusparen und mit Mehrsystemloks die Grenzen zu überqueren. Solche Loks waren technisch aufwendig, weil sie den Motorstrom mit umschaltbaren Transformatoren oder Gleichrichtern selbst erzeugen mussten. Heutzutage fahren die

meisten E-Loks mit Drehstrom, den sie mit *Umrichtern* aus fast jedem Oberleitungsstrom generieren. Details zu dieser Stromart finden Sie im nächsten Abschnitt. Der Hauptaufwand bei Fahrzeugen, die grenzüberschreitend verkehren, kommt heute übrigens eher durch unterschiedliche Sicherheitssysteme zustande, die alle unterstützt werden müssen. Für welche Länder eine Lokomotive zugelassen ist, können Sie übrigens nachlesen: Die zugehörigen Länderkürzel stehen in einem kleinen Raster am Seitenrahmen.

### Beispiel: Vom Kraftwerk zur Steckdose

Sie können den Weg des Stroms vom nächstgelegenen Kraftwerk bis zu Ihrem Wohnort verfolgen. Zumindest *könnte* Ihr Strom diesen Weg nehmen, genau wissen können Sie es natürlich nicht. Sie finden unter <https://www.flosm.org/de/Stromnetz.html> eine interaktive Karte, die Energieinfrastruktur wie Kraftwerke (einschließlich Leistung), Umspannstationen, Hoch- und Höchstspannungsleitungen, ja sogar einzelne Masten zeigt (Abbildung 9.5).



**Abbildung 9.5** Stromnetze im Rhein-Ruhr-Gebiet: Deutlich können Sie sehen, dass es inzwischen mehr Solarkraftwerke (Sonnensymbole) gibt, als es je Steinkohlekraftwerke gab.

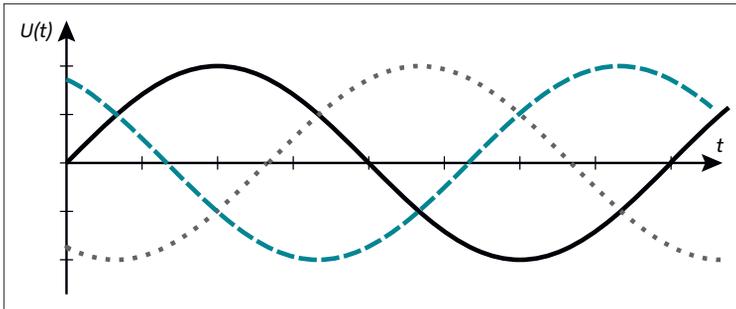
Auf der Karte sind Leitungen und andere Infrastruktur in unterschiedlichen Farben dargestellt. Versuchen Sie rückwärts, die Ihnen nächstgelegene Niederspannungsschaltstation zu identifizieren und von wo diese mit Hochspannung versorgt wird – und welche Kraftwerke damit verbunden sein könnten.

Übrigens: Wussten Sie, dass viele große Umspannwerke einen Bahnanschluss haben (und deshalb direkt neben Bahnstrecken erbaut wurden), weil die riesigen Transformatoren am besten über den Schienenweg geliefert werden können?

## 9.2 Drehstrom

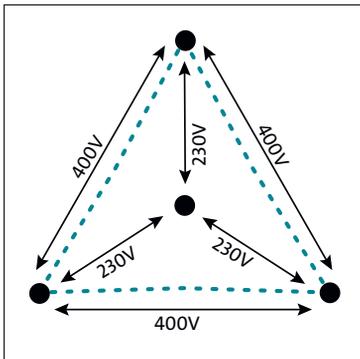
Ihr Wohnhaus wird höchstwahrscheinlich mit 400 V *Drehstrom* versorgt. Was hat es damit auf sich?

Drehstrom benötigt drei Leitungen, die jeweils eine um  $120^\circ$  verschobene *Phase* führen, die wegen der Phasenverschiebung zwischen je zwei Leitungen eine Amplitude von 400 V ergeben (Abbildung 9.6).



**Abbildung 9.6** Der Phasenverlauf beim Drehstrom ist um je  $120^\circ$  gegeneinander verschoben.

Wenn Sie diese drei Phasenleitungen und einen Nullleiter betrachten, ergibt sich eine *Sternschaltung* (Abbildung 9.7).



**Abbildung 9.7** Bei der Sternschaltung gibt es drei Phasenleiter und einen Nullleiter. Somit ergeben sich Spannungswerte von 230 bzw. 400 V.

Die Effektivwerte der phasenverschobenen Spannungen zwischen je einem Außenleiter und dem Nullleiter ergeben eine verkettete Spannung von 230 V. Diese berechnet sich durch den Verkettungsfaktor, der sich aus der zeitlichen Verschiebung gegeneinander ergibt wie folgt:

$$230 \text{ V} \cdot \sqrt{3} = 400 \text{ V}$$

Mit Drehstrom lassen sich übrigens besonders einfach Motoren betreiben; darauf komme ich in Kapitel 10, »In Bewegung: Motoren und Generatoren«, zurück. In Haushalten sind meist nur E-Herd und Durchlauferhitzer mit der Drehstromversorgung verbunden, im Volksmund oft »Starkstrom« genannt. Lampen und Wandsteckdosen sind mit einem Außenleiter und dem Nulleiter verbunden. Üblicherweise sind nicht alle Ihre Steckdosen mit dem gleichen Außenleiter verbunden, sondern mit verschiedenen. Das führt zu einer gleichmäßigen Belastung – und zu einem möglichst geringen Strom über den gemeinsamen Rückleiter.

### 9.3 Netzbrummen und andere Störungen

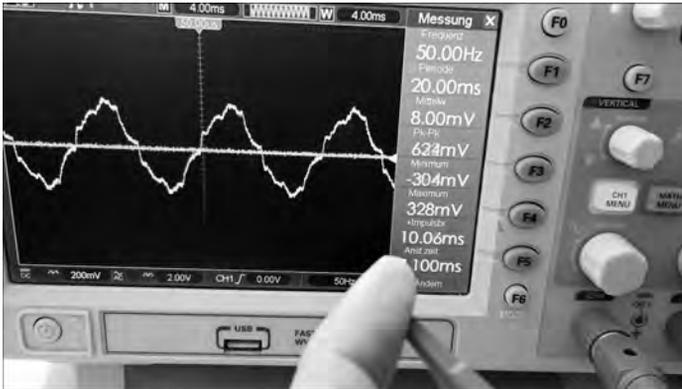
Wussten Sie, dass Sie in Ihrer Wohnung von einer unsichtbaren Note g beschwingt werden? Die Rede ist natürlich vom *Netzbrummen* mit einer Frequenz von 50 Hz (die Note g1 entspricht 49 Hz). Die Frequenz des Wechselstromnetzes gibt über Steckdosen oder andere Kontakte elektromagnetische Wellen ab, die die ganze Umgebung fluten. Sie können das leicht überprüfen.

Verbinden Sie ein Ende eines Voltmeters mit dem Erdanschluss einer Steckdose (die silberne Klemme, die herauschaut – stecken Sie den Messfühler *nicht* in eine der beiden Öffnungen!) und nehmen Sie den anderen Anschluss in die Hand. Je nach Stärke des elektromagnetischen Felds empfangen Sie als menschliche »Antenne« eine induzierte Spannung von ein bis zwei Volt (Abbildung 9.8).



**Abbildung 9.8** Diese menschliche Antenne ist von dermaßen vielen Elektrogeräten umgeben, dass man damit sicher schon die eine oder andere Schaltung betreiben könnte. Denken Sie bei der Messung daran, das Multimeter auf Wechselspannung (AC) zu stellen!

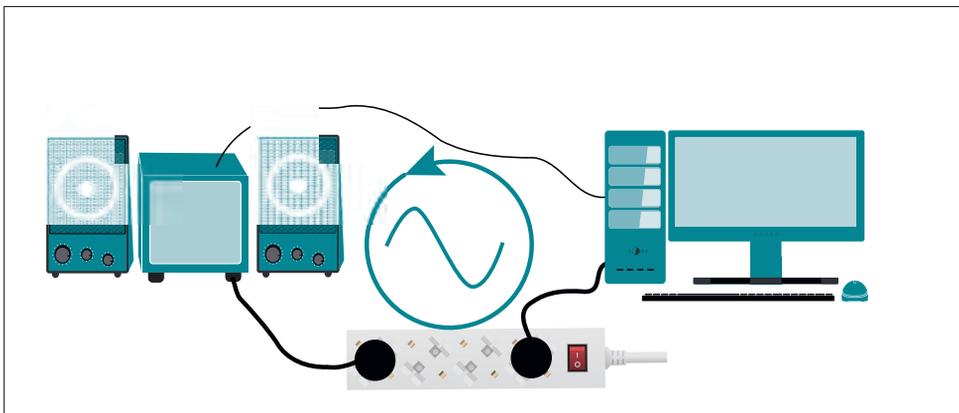
Wenn Sie ein Oszilloskop besitzen, können Sie die Netzspannung sogar sehen, die in Ihrem Körper induziert wird (Abbildung 9.9).



**Abbildung 9.9** Die menschliche Antenne und andere unbekannte Störungen verformen den induzierten Sinus zu einem schroffen Gebirge. Laut Oszilloskop beträgt die Spannungsdifferenz zwischen Minimum und Maximum etwa 0,6 V, die Frequenz wenig überraschend exakt 50 Hz.

Das akustische Netzbrummen kann nicht so schön abgedruckt werden, ist aber ebenso leicht reproduzierbar. Sie müssen nur einen Finger an den Eingang eines Audioverstärkers halten.

Besonders tückisch sind im Audibereich *Brummschleifen*. Diese kommen beispielsweise zustande, wenn zwei Geräte über einen Masseanschluss kreisförmig miteinander verbunden sind oder wenn bei nicht ordnungsgemäßer Erdung Spannungsunterschiede entstehen. Ein typischer Fall ist ein PC, der über ein Audiokabel an einen Audioverstärker angeschlossen ist (Abbildung 9.10).



**Abbildung 9.10** Stromkabel (unten) und Abschirmung des Audiokabels (oben) bilden eine Leiterschleife, über die wegen unterschiedlicher Erdung ein Ausgleichsstrom mit einer Frequenz von 50 Hz fließt.

Auch Induktionseffekte sind denkbar. Sie können in solchen Fällen versuchen, die Fläche der Schleife zu verkleinern. Nachhaltig Abhilfe schaffen Audiokabel mit galvanischer Trennung.

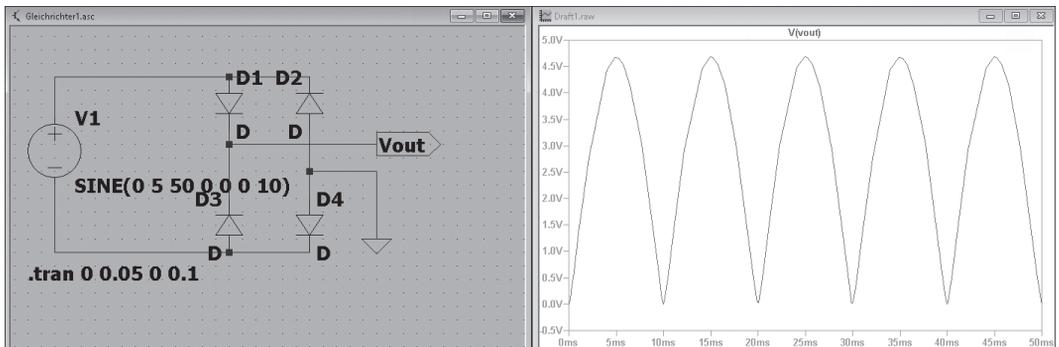
Nicht zu verwechseln ist das Netzbrummen übrigens mit den Geräuschen, die Leistungstransformatoren von sich geben, wie sie beispielsweise in älteren Haushaltsgeräten oder Modellbahntrafos verbaut sind. Diese werden verursacht durch Deformation des ferromagnetischen Kerns – und haben eine Frequenz von 100 Hz, weil jede Halbschwingung eine solche Deformation verursacht. Der Ton ist etwa eine Oktave höher, also  $g_2$  (98 Hz) – Sie wissen vielleicht aus der Musiktheorie, dass eine Oktave einer Verdopplung der Frequenz entspricht.

Wieder andere Geräusche geben Dimmer oder Treiberschaltungen von manchen mehrfarbigen LED-Lampen von sich. Das hat mit deren gepulster Ansteuerung zu tun: Um die gewünschte Helligkeit zu erreichen, schickt die Steuerung kürzere oder längere Pulse an die LED. Bei manchen verwendeten Bauteilen kann dabei ein scharfes Surren hörbar werden, dessen Frequenz im kHz-Bereich liegt. Ganz ähnlich wird übrigens auch die Drehzahl von Motoren gesteuert – aber das ist ein Thema für das nächste Kapitel.

## 9.4 AC/DC

Aus der Steckdose kommt also Wechselstrom, aber ein Smartphone (um nur ein Beispiel zu nennen) braucht zum Aufladen natürlich Gleichstrom. Bereits in Abschnitt 4.4 über die *Diode* hatte ich Ihnen die *Brückengleichrichterschaltung* vorgestellt.

Ohne weitere Maßnahmen erzeugt diese Schaltung aus Wechselspannung eine gepulste Gleichspannung. Bauen Sie die Schaltung mit LTspice einmal nach und schauen Sie sich das Ausgangssignal an (Abbildung 9.11).



**Abbildung 9.11** Die Brückengleichrichterschaltung erzeugt allein noch keine saubere Gleichspannung.

Um eine konstante Gleichspannung zu erzeugen, fehlt noch ein parallel geschalteter *Glättungskondensator*. Bei steigendem Sinus lädt er sich auf, bei fallendem gibt er seine Ladung ab, sodass er im Endeffekt die Spannung glättet. Lassen Sie uns ausrechnen, welche Kapazität der Kondensator haben muss.

Die Ausgangsspannung des Brückengleichrichters entspricht der Spitzenspannung des Eingangssinus abzüglich des Spannungsabfalls über den Dioden. Diesen Effekt können Sie in LTspice erkennen, wenn Sie sich die Spitzen der »umgeklappten« Sinusfunktion anschauen, der Abfall beträgt hier etwa 0,3 V.

Wichtig für eine möglichst konstante Gleichspannung am Ausgang ist, dass die Welligkeit (*Ripple*) möglichst gering ist. Dieser Wert wird angegeben als Prozentzahl bzw. Anteil der Ausgangsspannung. Für die Kapazität des Glättungskondensators können Sie nun folgende Formel zurate ziehen:

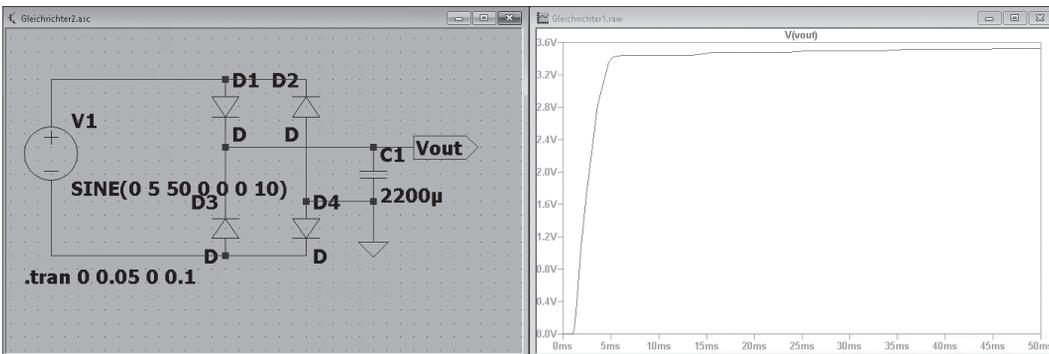
$$C = \frac{I_{\text{lade}} \cdot \Delta t}{V_{\text{ripple}}}$$

Dabei kommt der Ladestrom  $I_{\text{out}}$  ins Spiel, von dem es abhängt, wie schnell der Kondensator bei der steigenden Flanke aufgeladen wird. Außerdem finden Sie in der Gleichung die Zeit; das ist die halbe Periodendauer, bei Netzfrequenz 50 Hz also 0,01 s.

Für dieses Beispiel nehmen wir einfach mal einen 0,1-Ampere-Ladestrom an und eine zulässige Welligkeit von 10 %. Dann ergibt sich  $V_{\text{ripple}} = 0,1 \cdot 4,7 \text{ V} = 0,47 \text{ V}$ :

$$C = \frac{0,1 \text{ A} \cdot 0,01 \text{ s}}{0,47 \text{ V}} \approx 2100 \mu\text{F}$$

Im Handel leicht erhältlich sind Kondensatoren mit einer Kapazität von 2.200  $\mu\text{F}$ . Bauen Sie einen solchen Kondensator in die Schaltung ein und testen Sie anschließend das Ergebnis (Abbildung 9.12)!



**Abbildung 9.12** Nach wenigen Millisekunden erledigt der Kondensator seinen Job und sorgt für eine konstante Ausgangsspannung.

Wie Sie sehen, dauert es einen Moment, bis die volle Spannung erreicht ist, weil der Kondensator von den ersten Wellen noch nicht ganz aufgeladen wird.

Beachten Sie bei der Auswahl des Kondensators unbedingt dessen Spannungsfestigkeit. Da Kondensatoren zu den Bauteilen mit eher kürzerer Lebensdauer gehören, kann eine zu knappe Kalkulation hier von Nachteil sein. Nicht umsonst sind es oft die Kondensatoren, die für den Ausfall von Netzteilen oder anderen Geräten verantwortlich sind.

## 9.5 DC/AC

Es gibt einige Gelegenheiten, bei denen Wechselstrom aus Gleichstrom erzeugt werden muss. Im Folgenden einige Beispiele:

- ▶ *Notstromaggregate* und *unterbrechungsfreie Stromversorgungen* (USV) werden verwendet zum Betrieb von üblichen Wechselstromgeräten an einem Akku während eines Stromausfalls.
- ▶ *Über Solarzellen aufladbare Akkus* für den Betrieb von Wechselstromgeräten an Orten mit mehr Sonne als Steckdosen, z. B. beim Camping in der Wüste oder auf einer Yacht mitten auf dem Meer (Abbildung 9.13).



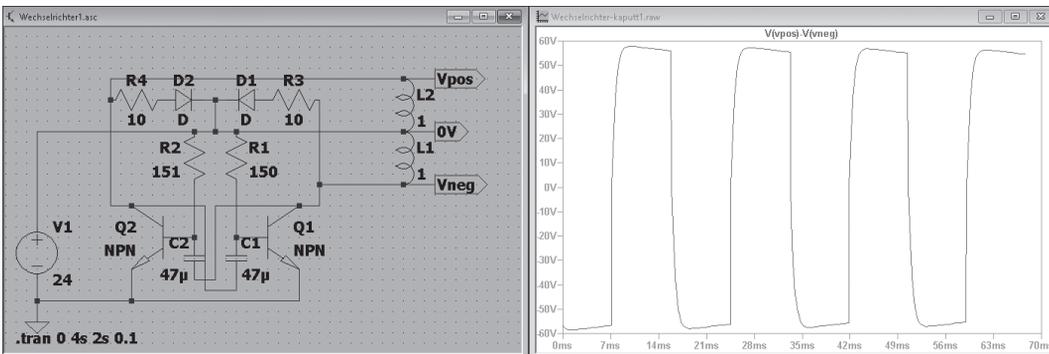
**Abbildung 9.13** Dieser von Solarzellen (außen am Fenster, daher nicht im Bild) versorgte Akku ist aktuell vollständig geladen. Neben diversen USB-Ladekabeln lässt sich ein handelsübliches Elektrogerät einstöpseln und per Wechselrichter mit 230 V versorgen.

- ▶ *Einspeisung von Solarstrom ins Hausnetz* (z. B. Balkonkraftwerke)
- ▶ *Mehrsystemlokomotiven* mit Wechselstrommotoren unter Gleichstromoberleitung

Notstromaggregate oder Solarakkus besitzen keine Verbindung zum sonstigen Stromnetz, es handelt sich um *Inselwechselrichter*, man nennt sie auch *selbstgeführt*.

Interessant ist dabei, dass einige dieser Geräte gar keinen sinusförmigen Spannungsverlauf erzeugen, weil das technisch vergleichsweise aufwendig ist. Häufig ist ein Rechtecksignal mit mehr oder weniger steilen Kanten anzutreffen. Da die meisten anzuschließenden Geräte dahin gehend unempfindlich sind, lohnt sich mehr Aufwand nur, wenn unbedingt notwendig.

Technisch basiert so ein selbstgeführter Wechselrichter auf *Multivibrator*-Schaltungen mit Transistoren, die Sie bereits kennen. Allerdings verwendet man heutzutage wegen der höheren Leistungsfähigkeit Bipolartransistoren mit isolierter Gate-Elektrode (*Insulated-Gate Bipolar Transistor*, IGBT). Außerdem muss die Schaltung abwechselnd positive und negative Pulse erzeugen, nicht Pulse und Pausen. Dazu kann die Spannung um einen Mittelanschluss herum symmetrisch erzeugt werden. In der hier vorgestellten LTspice-Schaltung (Abbildung 9.14) sind zwei Spulen stellvertretend für eine Transformatorwicklung eingezeichnet.



**Abbildung 9.14** Diese Abwandlung des astabilen Multivibrators erzeugt ein Wechselsignal, das freilich keine Sinusform hat. Lassen Sie LTspice Vpos-Vneg plotten (»Plot Settings • Add Trace«, dort »Vpos-Vneg« eintippen), um das Signal zu sehen. Beachten Sie, dass diese Simulation recht lange läuft.

Die Sekundärwicklung würde die Spannung dann auf die meist gewünschten 230 V herauftransformieren. Mit den verwendeten Bauteilen produziert unser einfacher Wechselrichter annähernd eine Frequenz von 50 Hz, allerdings nicht in Sinusform.

Etwas komplizierter (und daher hier nicht dargestellt) funktionieren *netzgeführte Wechselrichter*. Das sind Geräte, die beispielsweise eine Balkonsolaranlage mit dem heimischen Stromnetz verbinden. Sie müssen sich gewissermaßen mit der offiziellen Sinuskurve synchronisieren, um Strom einspeisen zu können, und sind dementsprechend aufwendiger. Wie diese Geräte genau funktionieren, erfahren Sie in Ihrem Studium unter dem Oberthema »Leistungselektronik« – den Rahmen dieses Buchs übersteigt das bei Weitem.

Bis dahin haben Sie genügend Zeit für die folgenden ...

## 9.6 Entspannungsübungen

### Aufgabe 1

Berechnen Sie die maximale Leistung, die Höchstspannungsleitungen, Hochspannungsleitungen und Mittelspannungsleitungen übertragen können.

### Aufgabe 2

Sie entdecken in einem abgestürzten außerirdischen Raumschiff eine geheimnisvolle Batterie mit der Aufschrift »perpetuum mobile xxl«, aber Ihr Handyakku ist leer, sodass Sie leider kein Beweisfoto schießen können. Laut einer zweiten Aufschrift erzeugt das sonderbare Ding 8,7 V Wechselspannung mit 42 Hz. Vier Dioden haben Sie selbstverständlich immer dabei, aber auch einen passenden Glättungskondensator, um Ihr Handy mit Gleichspannung zu laden? Was für einen Kondensator benötigen Sie, wenn der Ladestrom 0,5 A betragen sollte und die Welligkeit 20 % betragen darf?

## 9.7 Lösungen

### Aufgabe 1

Für Höchstspannungsleitungen, Hochspannungsleitungen und Mittelspannungsleitungen erfahren Sie aus dem Buchtext Nennspannungen und maximale Stromstärken. Daraus lässt sich die maximal übertragbare elektrische Leistung abschätzen:

Leitung	Höchstspannung	Maximaler Strom	Höchstleistung
<b>Höchstspannung</b>	380 kV	645 A	245 MW
<b>Hochspannung</b>	110 kV	645 A	71 MW
<b>Mittelspannung</b>	20 kV	375 A	7,5 MW

An den jeweils geringer werdenden Werten ist leicht erkennbar, warum Stromnetze tendenziell eine Baumstruktur haben: wenige Höchstspannungsleitungen, von denen einige Hochspannungsleitungen abzweigen – und so weiter.

## Aufgabe 2

Die Formel für den Glättungskondensator kennen Sie aus Abschnitt 9.4:

$$C = \frac{I_{\text{lade}} \cdot \Delta t}{V_{\text{ripple}}}$$

Die Zeit  $\Delta t$  ist die halbe Periodendauer, das ist bei 42 Hz ungefähr 0,012 s. Die Ripple-Spannung liegt bei 20 % von 8,7 V minus 0,5 V Diodendurchgangsspannung, also 1,64 V. Setzen Sie die Werte ein, erhalten Sie eine Kapazität von 3,7 mF oder 3.700  $\mu\text{F}$ . Hoffentlich haben Sie den passenden Kondensator griffbereit!

## Kapitel 14

# Smart Home: Ein Profi-Projekt

*Sie haben in diesem Buch so viele Basics aus der Welt der Elektrotechnik gelernt, dass Sie nicht nur bereit für ein spannendes Studium sind, sondern auch alle Voraussetzungen besitzen, um ein reales, nützliches Projekt auf die Beine zu stellen. Mein persönliches Beispiel heißt »Sesam öffne dich« – und Ihres?*

## 14.1 Anforderungen und Planung

Als Elektroingenieur gestalten Sie Ihr Handeln *lösungsorientiert*. Sie bekommen eine genau beschriebene Aufgabe, die Ihr *Auftraggeber* als gelöst betrachtet, sobald die vorher vereinbarten *Abnahmebedingungen* erfüllt sind. In diesem Kapitel sind Sie selbst der Auftraggeber oder die Auftraggeberin. Starten Sie Ihr eigenes Projekt! Schauen Sie sich in Ihrer Wohnung um: Was für eine elektrotechnische Lösung können Sie gebrauchen? Wie können Sie mit geeigneter Technik Ihr Leben verbessern? Ich zum Beispiel habe ständig Angst, dass ich meinen Haustürschlüssel vergesse. Mein Handy habe ich hingegen immer dabei. Wäre es nicht praktisch, wenn ich mit dem Smartphone meine Haustür öffnen könnte? Auch mit den Smartphones meiner Kinder sollte das funktionieren, aber natürlich sollte niemand sonst meine Tür öffnen können – das Projekt ist also eindeutig sicherheitskritisch.

Gut geplant ist halb gebaut, sagt der erfahrene Techniker. Lassen Sie uns also mit einer Planung beginnen, damit nichts schiefgeht.

### Ziele formulieren

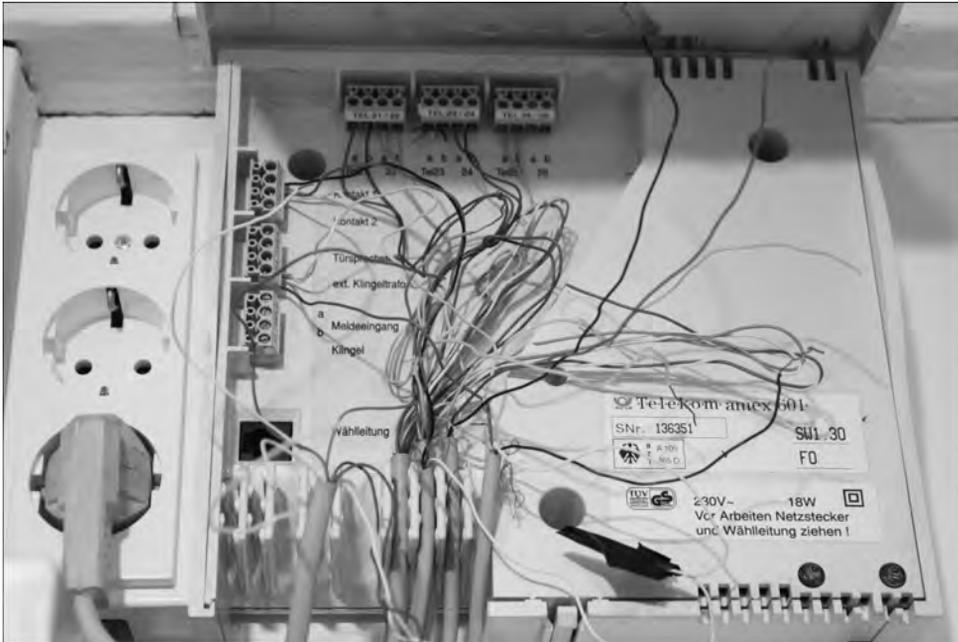
Anfangs müssen Sie sich über den Projektumfang Klarheit verschaffen: Was soll geschehen, was nicht? Wie lauten die Anforderungen? Je genauer diese definiert sind, umso eher vermeiden Sie Missverständnisse mit Ihrem Auftraggeber (auch wenn Sie das selbst sind).

Die Ziele meines Projekts habe ich grob in der Einführung skizziert. Natürlich geht das etwas genauer:

- ▶ Die Haustür verfügt über ein Schloss mit Elektromagnet, der es entriegeln kann.
- ▶ Mit einer App auf dem Smartphone soll dieser Elektromagnet von einer geeigneten Schaltung kurzzeitig aktiviert werden.
- ▶ Die App bzw. deren Funktionalität darf nur einem ausgewählten Personenkreis zur Verfügung stehen, d. h., es ist ein »Geheimnis« erforderlich, das Dritten unbekannt ist, sodass diese sich selbst dann keinen Zutritt verschaffen können, wenn ihnen die App in die Hände fällt oder wenn sie die Kommunikation zwischen Phone und Haus irgendwie abhören.

### Lösungswege ermitteln

Prüfen Sie zunächst, welche Infrastruktur bereits vorhanden ist. Vielleicht lässt sich etwas davon nutzen? In meinem Fall existiert bereits ein *Türmagnet*, der per Klingeldraht mit einer uralten, unbenutzten *Telefonanlage* verbunden ist (Abbildung 14.1).



**Abbildung 14.1** Die alte Telefonanlage ist weder ordentlich verkabelt, noch gibt es brauchbare Beschriftungen. Welche zwei Drähte zum Magneten führen, konnte ich anhand der Farben und mit einer Widerstandsmessung herausfinden (bevor Sie so etwas tun, trennen Sie die Verbindung und ziehen Sie den Netzstecker!)

Magnet und Kabel lassen sich grundsätzlich weiterverwenden, was eine Menge Arbeit spart. Aber alles andere ist völlig offen. Gesucht wird eine effiziente, optimale Lösung unter den gegebenen Umständen. Nicht alle Projekte sind so überschaubar wie dieses. Manchmal ist eine Aufgabenstellung so komplex, dass Sie gut beraten sind, eine Unterteilung vorzunehmen.

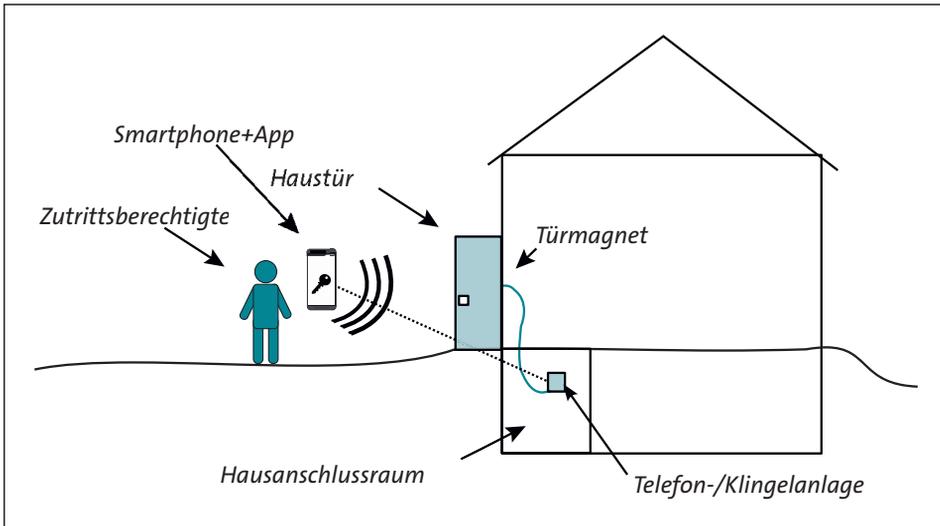
Bei Lösungsansätzen sind Kreativität und Know-how gefragt. Zum besseren Verständnis hilft immer eine Skizze, so simpel sie auch ausfallen mag (Abbildung 14.2).

Welche Geräte, Prozesse oder Methoden sind Ihnen bekannt, die die Anforderungen erfüllen? Wenn Sie im Team arbeiten, kann an dieser Stelle ein *Brainstorming* helfen – wohlge-merkt nur, um mögliche Lösungen aufzulisten. Die Bewertung anhand unterschiedlicher Kriterien ist nicht Teil des Brainstormings, weil das die Kreativität einschränkt. Erst Ideen sammeln! Hier sind meine:

- ▶ Der Elektromagnet des Schlosses wird von einem *Relais* oder einem *MOSFET* über die vorhandenen beiden Drähte geschaltet. Dafür genügt ein GPIO-Pin im Ausgangsmodus. Die Betriebsspannung von Klingel- und Schlossschaltungen ist fast immer 12 V=. Wenn

der später ausgewählte digitale Schaltkreis damit arbeiten kann, bietet sich ein MOSFET an. Wenn er mit 5 V versorgt werden muss, ist entweder ein Festspannungsregler oder ein separates 5-Volt-Netzteil erforderlich. Im letzteren Fall verwende ich zwei getrennte Stromkreise mit 5 bzw. 12 V und ein Relais.

- ▶ Berührungsloser Schlüssel: *RFID-Chips* vor ein Lesegerät halten. Die weltweit eindeutigen IDs, die die Tür öffnen dürfen, sind in einem kleinen Programm hinterlegt. Falls ein Chip verloren geht, wird er aus der Liste genommen und ein neuer eingetragen.
- ▶ So gut wie alle Smartphones beherrschen heutzutage *NFC (Near Field Communication)*. Eine Mini-App könnte beim Kontakt mit einem Lesegerät außerdem Biometrie einsetzen (Fingerabdruckscan).
- ▶ Die Schlüssel-App sendet ein Infrarotsignal oder eine geheime Tonfolge an einen geeigneten Empfänger, der daraufhin den Magneten betätigt.
- ▶ Eine App (kann auch der Browser sein) ruft im WLAN (das sicher bis zur Haustür reicht) eine *Webanwendung* auf. Diese schaltet nach Eingabe eines Passworts den Türmagneten.
- ▶ Das Smartphone verbindet sich per App oder Browser mit einem *Bluetooth*-Gerät im Haus. Die App sendet einen geheimen Code, die Schaltung empfängt ihn und schaltet den Türmagneten, wenn er stimmt.



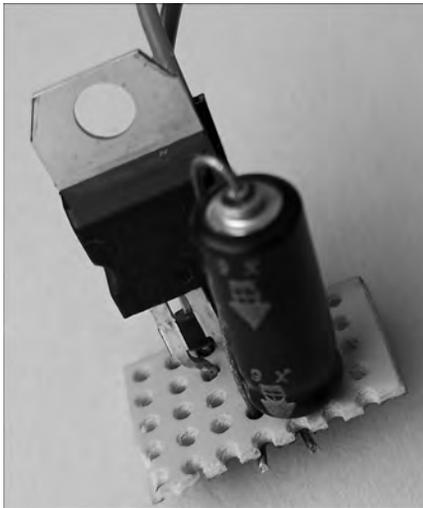
**Abbildung 14.2** Meine Skizze enthält alle wichtigen Elemente.

## Lösungswege bewerten und entscheiden

Vorweg: Dieser Schritt erfordert manchmal ein paar Tests, um bestimmte Optionen endgültig bewerten zu können. Außerdem ist es möglich, dass eine Kombination der Ideen die

beste Lösung ergibt. Zunächst fallen Ihnen sicher sofort ein paar Vor- und Nachteile der Vorschläge ins Auge:

- ▶ Zwei Stromkreise bzw. Netzteile für die relativ einfache Schaltung zu verwenden, klingt nicht sehr verlockend. Gern verwenden wir einen MOSFET an einem GPIO-Ausgang (plus Freilaufdiode wegen der induktiven Last) und kommen mit einer 12-Volt-Versorgung aus, die hinreichend Strom liefert, um den Magneten sicher zu schalten. Mangels technischer Dokumentation des Magneten messen wir den Innenwiderstand und schätzen mit dem ohmschen Gesetz den Strombedarf. Falls die letztlich gewählte digitale Schaltung nicht mit 12 V klarkommt (wie z. B. ein *Arduino Nano*), muss ein passender Spannungsregler (z. B. 7805) eingeplant werden.



**Abbildung 14.3** Dieser 7805-Spannungsregler ist bereits mitsamt Glättungskondensator auf eine Lochrasterplatine gepflanzt worden

- ▶ RFID und NFC erfordern einen sehr geringen Abstand zwischen Lesegerät und Schlüssel. Das Lesegerät müsste fast zwingend außen neben der Haustür angebracht werden, was erstens möglicherweise zusätzliche Leitungen erfordert und es zweitens der Gefahr von Vandalismus aussetzt.
- ▶ Eine Übertragung über Infrarot scheidert daran, dass die meisten Smartphones keine Infrarot-LED besitzen – die gehört einfach nicht zur Standardausstattung. Das ist schade, denn dann könnte ein Phone auch die TV-Fernbedienung ersetzen. Hinzu kommt bei diesem Vorschlag (auch beim Audiosignal und bei Bluetooth), dass das einseitige Senden eines Schlüsselcodes abgehört werden kann. Ein Angreifer müsste den Code lediglich aufzeichnen und mit einem geeigneten Gerät abspielen, um sich Zugang zu verschaffen.

- ▶ Die Lösung mit dem WLAN klingt verlockend: Sie installieren einfach einen lokalen Webserver im heimischen Netz, der vom Phone aus vor der Haustür erreichbar ist. Die Verbindung ist erstens per se hinreichend stark verschlüsselt, und zweitens haben nur Personen mit WLAN-Schlüssel überhaupt Zugang. Es würde also eine einfache Webseite mit Passwort- oder PIN-Eingabe und einem Öffnen-Button genügen. Alternativ könnten Sie eine Positivliste mit *Mac-Adressen* mit Zutrittsgenehmigung hinterlegen und die Passwordeingabe einsparen (jedes WLAN-Modul in einem Endgerät hat eine eindeutige Adresse). Diese Liste müsste natürlich immer aktualisiert werden, wenn eine zutrittsberechtigten Person ein neues Handy hat. Für den Betrieb wäre ein Einplatinencomputer wie der *Raspberry Pi* eine naheliegende Option, da er ohnehin WLAN mitbringt und ein Standardwebserver schnell installiert ist. So ein Pi verbraucht aber im Dauerbetrieb ein bisschen viel Strom. Daher bietet sich eher ein Mikrocontroller mit WLAN-Modul an, z. B. ein *Raspberry Pi Pico 2W* oder ein *ESP32 Wroom*. Beide kosten etwas über 10 €. Auch einige Arduinos gibt es mit WLAN (oder Erweiterungsmodule für solche ohne). Machbar wäre diese Lösung auf jeden Fall. Eine kurze Suche im Netz findet auch schnell ein Tutorial für einen Arduino-Webserver mit WLAN: <https://docs.arduino.cc/tutorials/uno-wifi-rev2/uno-wifi-r2-hosting-a-webserver/>.
- ▶ Eine *Bluetooth*-Lösung verbraucht deutlich weniger Strom, stellt aber höhere Anforderungen an die Programmierung als jene mit WLAN. Das liegt daran, dass sich grundsätzlich alle Personen innerhalb der BT-Reichweite mit dem Gerät verbinden können. Eine Bluetooth-Übermittlung lässt sich mitschneiden und kopieren, sodass es nicht genügt, wenn das Endgerät nur den immer gleichen Passcode an die Schlossschaltung schickt. Ganz so einfach geht das also nicht. Es ist ein »Geheimnis« (*Shared Secret*) erforderlich, das nur Endgerät und Schlossprogramm kennen. Dann kann das *Challenge-Response-Protokoll* zum Einsatz kommen: Das Schloss sendet einen zufälligen, immer neu generierten Code an das Endgerät, dieses verschlüsselt diesen Code mit dem Geheimnis und sendet das Resultat zurück. Nur der richtig verschlüsselte Antwortcode öffnet das Schloss. Knifflig an dieser Lösung ist, dass Sie eine native App auf den Endgeräten installieren müssen, um das Protokoll zu implementieren. Zwar kann auch eine Webseite im Chrome-Browser Bluetooth verwenden (*Web Bluetooth API*), aber wo hinterlegen Sie diese Webseite? Auf einem lokalen Webserver in Ihrem WLAN? Dann können Sie auch gleich die zuvor besprochene Lösung umsetzen. Auf Ihrem privaten Webspace im Internet? Sie sehen: Diese Lösung ist etwas kompliziert – *unnötig* kompliziert. Sicher kennen Sie den *KISS*-Merkpruch: *Keep it simple, stupid!* Je unkomplizierter, desto weniger kann schiefgehen.

Ich denke, die effizienteste Lösung steht nach diesen Überlegungen fest: Es wird ein *Raspberry Pi Pico* mit Webserver im heimischen *WLAN*. Der Türmagnet wird zusätzlich per *Relais* geschaltet.

Wenn bei Ihrem eigenen Projekt die Entscheidung nicht so leichtfällt, können Sie kleine Experimente, Mockups oder Machbarkeitsstudien einschieben, vorausgesetzt, Sie haben das nötige Material griffbereit. Wenn Sie nicht auf Anhieb die beste unter den vorgeschlagenen Lösungen identifizieren können, denken Sie sich ein Punktesystem aus oder fragen erfahrene Personen im Kollegen- oder Freundeskreis – womöglich haben Sie einen kleinen, nicht unwichtigen Aspekt übersehen. Sobald Sie sich für einen Lösungsweg entschieden haben, können Sie mit der konkreten Planung fortfahren.

## **Ressourcenplanung**

Die für Ihr Projekt benötigten *Ressourcen* lassen sich grob in drei Bereiche aufteilen: *Material, Werkzeug, Ausstattung*. Wenn Sie möchten, können Sie Know-how als menschliche Ressource betrachten – bei größeren, anspruchsvollen Projekten kommt es natürlich darauf an, passende Experten einzusetzen. Für mein Schloss-Projekt gestaltet sich die Planung relativ übersichtlich:

### **Material**

- ▶ 1 Mikrocontroller Raspberry Pi Pico W
- ▶ 1 Relaismodul 5 V/250 V mit eingebauter Freilaufdiode
- ▶ Kabel (aus der Bastelkiste)
- ▶ 1 Netzteil 7,5 V= 1,5 A (aus der Restekiste, am Türmagneten erfolgreich getestet)
- ▶ 1 Festspannungsregler 7805 (5 V/1,5 A)
- ▶ 1 Glättungskondensator 22  $\mu$ F/40 V (aus der Bastelkiste)
- ▶ 1 kleine Lochrasterplatine, um Spannungsregler und Kondensator aufzulöten (aus der Bastelkiste)

### **Werkzeug**

- ▶ Schraubendreher (Schlitz und Kreuzschlitz)
- ▶ LötKolben und Lötzinn
- ▶ Multimeter
- ▶ Seitenschneider

### **Infrastruktur**

- ▶ Kabelverbindungen/Kabelschächte
- ▶ Befestigungsmöglichkeit für Geräte

Prüfen Sie, was bereits vorhanden ist oder neu beschafft werden muss. Planen Sie die Beschaffung, d. h., prüfen Sie, in welchem Laden oder Versand Sie mit welchen Lieferzeiten rechnen müssen und ob das zu Ihrem Zeitplan passt.

Falls Sie eine eigene Platine für eine umfangreiche Schaltung entwerfen, berücksichtigen Sie die angegebenen Herstellungszeiten. Wenn Sie Platinen oder sonstige Bauteile besonders billig in China bestellen, kalkulieren Sie mehrere Wochen Lieferzeit ein.

### Lieber alles nachprüfen!

Insbesondere wenn Sie vorhandene Bauteile oder Infrastruktur nutzen möchten, überprüfen Sie immer erst alle Annahmen.

- ▶ Führt dieses Kabel wirklich zu dem Anschluss, an den es gehört?
- ▶ Liefert dieses alte Netzteil wirklich die aufgedruckte Spannung? (Und Gleichspannung, nicht etwa Wechselfspannung?)
- ▶ Genügt die Spannung, und liefert das Netzteil genug Strom, um das vorhandene Gerät sicher zu versorgen?

Vorsorge ist besser als spätere Fehlersuche!

## Kostenplanung

Schreiben Sie die Kosten für die benötigten Ressourcen in eine Tabelle (z. B. in *LibreOffice Calc* oder *Excel*), um sich einen Überblick zu verschaffen. Verwenden Sie dabei die automatischen Rechenformeln der Software. Berücksichtigen Sie auch Versandkosten, falls welche anfallen. Recherchieren Sie die Preise bei einem vertrauenswürdigen Händler und nehmen Sie nicht den billigsten Preis in China.

Anzahl	Artikel	Einzelpreis	Gesamtpreis
1	Raspberry Pi Pico W	11,99	11,99
1	Relaismodul 5 V/250 V	4,00	4,00
1	Festspannungsregler 7805 5 V/1,5 A	2,20	2,20
	Summe		18,19

**Tabelle 14.1** Stellen Sie eine komplette Liste des Materialbedarfs zusammen.

Vergleichen Sie die Summe mit dem verfügbaren Budget!

## Risikoanalyse/-management

In meinem Projekt gibt es keine großen Gefahrenquellen. Das kann natürlich auch ganz anders aussehen! Denken Sie an Starkstrom, denken Sie an Medizintechnik oder eine Ampelsteuerung, bei der keinesfalls alle Autos und Fußgänger gleichzeitig grünes Licht bekommen dürfen. Je nach Aufgabenstellung kann es sein, dass Sie sich an eine ganze Liste konkreter Sicherheitsrichtlinien halten müssen. Bei meinem Projekt beträgt die höchste vorkommende Spannung 12 V, das ist ungefährlich. Wahrscheinlicher als ein elektrischer Schlag ist eine Verbrennung beim Löteten.

Wann immer Sie löteten müssen, achten Sie auf gute Belüftung. Immer hilfreich ist eine *dritte Hand* (eine Halterung mit Sockel), denn mit LötKolben in der einen Hand und Lötzinn in der anderen ist Ihre Ausstattung an Gliedmaßen erschöpft.

Wichtig ist, dass Sie zunächst Risiken identifizieren und bewerten. Was an relevanten Risiken übrig bleibt, muss möglichst vermieden oder minimiert werden.

## Qualitätsstandards

Es gibt eine ganze Reihe von etablierten – und bei allen Arbeiten mit Netzspannung und darüber teils auch verpflichtenden – Standards, die Sie beachten müssen oder sollten. Letztlich dienen diese dazu, Risiken zu minimieren. Zu den wichtigsten Standards zählen:

- ▶ *DIN/VDE-Normen* (siehe <https://www.vde-verlag.de/normen.html>). Diese überaus umfangreiche Normenbibliothek hier auch nur annähernd darzustellen, ist leider nicht möglich. Spätestens wenn Sie mit 230-Volt-Schaltungen zu tun haben, kommen Sie aber an dem Thema nicht vorbei.
- ▶ Farben von Kabeln, Drähten und Litzen (z. B. bei Gleichstrom Rot = Pluspol, Schwarz = Minuspol).
- ▶ Sichere elektrische Verbindungen in einer der Stromstärke angemessenen Dimension (Lötverbindungen, Schraubklemmen).
- ▶ Ordentlich verlegte Kabel mit der richtigen Länge: Zu kurze Kabel sind Zugkräften ausgesetzt und können reißen, zu lange Kabel verschwenden Material und tendieren zu undurchschaubarer Spaghettistruktur. Verwenden Sie Kabelbinder, wenn mehrere Leitungen parallel zu verlegen sind.
- ▶ Bevorzugen Sie überall dort Steck- oder Schraubverbindungen gegenüber Lötverbindungen, wo Teile austauschbar sein sollten (z. B. zum Netzteil).
- ▶ Isolieren Sie blanke, stromführende Teile, die mit anderen in Berührung kommen könnten. Verwenden Sie Schrumpfschlauch oder Isolierband.

- ▶ Befestigen Sie Bauteile mit Schrauben oder, bei leichten Teilen, die sich garantiert nicht im Betrieb erwärmen, mit Heißkleber. Klebestreifen halten nicht lange! Nichts sollte wackeln.
- ▶ Beschriften Sie Anschlüsse standardkonform und gut erkennbar.

## Qualitätssicherung

- ▶ Prüfen Sie jede Verbindung, bevor Sie sie in Betrieb nehmen – mindestens mit einem prüfenden Blick (wenn nötig, durch ein Vergrößerungsglas), an wichtigen Stellen aber auch mit dem Multimeter, bevor Sie die Stromversorgung anschließen. Testen Sie mit dem Durchgangsprüfer, ob Verbindungen wirklich Strom leiten, und stellen Sie sicher, dass es keinen Kurzschluss gibt.
- ▶ Vier-Augen-Prinzip: Lassen Sie eine andere Person Ihre Schaltpläne und den Aufbau überprüfen. Keine falsche Scham: Jeder macht mal Fehler!
- ▶ Testen Sie nach Inbetriebnahme und auch in der Zeit danach.
- ▶ Testen Sie Fehlerszenarien, beispielsweise einen Stromausfall (also Netzteil abziehen und wieder einstecken).

## Abnahmekriterien

In einem Kundenprojekt sind die *Abnahmekriterien* üblicherweise vertraglich festgelegt. Der Kunde prüft dabei die Installation selbst und erteilt Ihnen die Abnahme, wenn er zufrieden ist.

Zur Abnahme gehören neben der Übergabe des Systems oft eine Schulung und eine ...

## Dokumentation

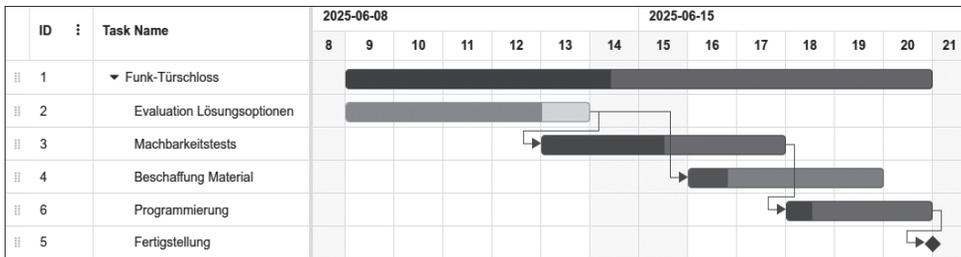
Schriftlich festzuhalten sind meist nicht nur die Benutzeranweisungen, sondern auch Schaltpläne und andere Unterlagen. Gerade an dieser Stelle ist Sorgfalt eine gute Idee – denn wann immer Ihre Auftraggeber Probleme mit Ihrer Schaltung haben, die sie wegen mangelhafter Dokumentation nicht selbst lösen können, wenden sie sich an *Sie*.

Ein beliebter Fehler an dieser Stelle ist die »Dokumentation mache ich später«-Aufschieberitis. Dabei geraten Sie oft selbst in die Situation, dass Sie rätselnd vor Ihrer Schaltung stehen, weil Ihnen ein wichtiges Detail entfallen ist. Stellen Sie sich vor, dass Sie nach einem langen Wochenende Ihre probeweise aufgebaute Schaltung halb zerlegt vorfinden, weil irgendjemand dringend eine der Komponenten zum Testen brauchte. Wissen Sie noch genau, wie alles wieder zusammengesteckt werden muss?

Dokumentieren Sie also lieber *sofort*. Das kann formlos geschehen und später ins Reine geschrieben werden. Aber verschieben Sie die Dokumentation nicht komplett auf »später« – ich garantiere Ihnen, Sie werden auch dann wenig Lust dazu haben. Also bringen Sie es hinter sich!

## 14.2 Schrittweise Entwicklung

Sobald Ihr Projekt eine gewisse Schwelle an Komplexität überschreitet, ist eine schrittweise Herangehensweise notwendig. Dabei dürfen Sie nicht den zweiten Schritt vor dem ersten gehen – es gibt Abhängigkeiten, die Sie berücksichtigen müssen. Falls mehrere Personen beteiligt sind und das Projekt sich über längere Zeit hinzieht, empfiehlt sich ein Gantt-Diagramm (Abbildung 14.4).



**Abbildung 14.4** Ein Gantt-Diagramm stellt übersichtlich dar, für wann welche Aufgabe eingeplant ist und welche Abhängigkeiten es gibt. Mein Projekt ist eigentlich klein genug, um darauf zu verzichten, aber Sie sollten mal so ein Diagramm gesehen haben, bevor Ihr Projektmanagement damit um die Ecke kommt.

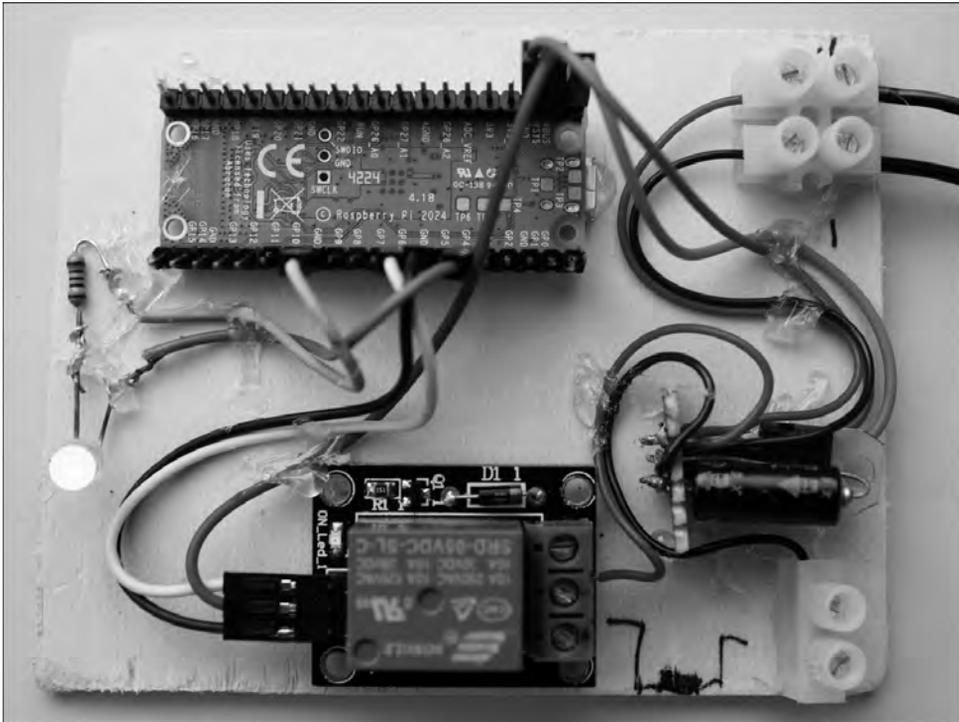
In meinem Fall war der eigentliche Aufbau der Schaltung bereits mit den Machbarkeitstests erledigt (und das nötige Material war zufälligerweise schon komplett vorhanden), sodass ich bereits den Aufbau vornehmen konnte, während ich den ersten Testcode schrieb.

Bei Verwendung von *Mikrocontrollern* ist die Programmierung ein entscheidender Schritt. Eine zusätzliche Schwierigkeit besteht oft darin, dass normalerweise beim Entwickeln die fertige Hardware und die Infrastruktur noch nicht zur Verfügung stehen, da sie parallel entwickelt und konstruiert werden. Sie müssen sich daher überlegen, wie Sie Ihre Software im Labor testen können. Außerdem sollten Sie die Software schrittweise entwickeln, wobei Sie jeden Zwischenschritt separat testen müssen. In meinem Beispiel etwa so:

1. Taste an Eingang schaltet Relaismodul
2. Anmeldung im WLAN
3. Erreichbarer Webserver

4. Webseite auf dem Server mit Button
5. Button auf Webseite schaltet Relaismodul
6. Ergänzung PIN-Eingabe auf Webseite (bei falscher PIN Fehlermeldung anzeigen)
7. Abfrage einer Whitelist mit zulässigen Mac-Adressen

Schon für die ersten Schritte muss natürlich mindestens eine Probeverdrahtung am Basteltisch erfolgen. Wenn das Relais schaltet, wird das später auch der Türmagnet tun, wenn die Versorgungsspannung genügt. Die Elektronik meines Projekts konnte ich tatsächlich zum großen Teil am Schreibtisch verkabeln und testen (Abbildung 14.5).



**Abbildung 14.5** Meine gesamte Schaltung habe ich mit Heißkleber auf ein kleines Holz Brettchen geklebt (natürlich könnte ich auch ein passendes Gehäuse 3-D-drucken). Rechts oben sehen Sie den Anschluss für das 7,5-Volt-Netzteil, unterhalb davon die kleine Platine mit dem Spannungsregler. Unten ist der Türmagnet anzuschließen.

### Beispiel: Raspberry Pi Pico und MicroPython

Ich hatte Ihnen schon angedeutet, dass Sie den Mikrocontroller *Raspberry Pi Pico* mit *MicroPython* programmieren können. Dazu müssen Sie einmalig ein *UF2-Image* auf das Board

spielen. Das geht sehr leicht: Wenn Sie den Pico über USB bei gehaltener BOOTSEL-Taste mit einem PC verbinden (im sogenannten *Bootloader-Modus*), meldet er sich als externes Laufwerk an. Beschaffen Sie sich die passende UF2-Datei (von <https://www.raspberrypi.com/documentation/microcontrollers/micropython.html#drag-and-drop-micropython>) und kopieren Sie sie auf das Laufwerk. Der Pico startet dann von allein neu.

Es gibt mehrere Möglichkeiten, um Programme in MicroPython mit dem Raspberry Pi Pico zu entwickeln:

- ▶ Mit einem einfachen Editor über die serielle Verbindung (unkomfortabel).
- ▶ Mit *Visual Studio Code* und Plug-ins namens *Raspberry Pi Pico* und *MicroPico*.
- ▶ Mit *Thonny*, einer einfachen Python-Entwicklungsumgebung.

Ich wähle für dieses Beispiel die dritte Option. Thonny können Sie für Windows, Mac und Linux bei <https://thonny.org/> herunterladen. Einmal installiert, klicken Sie bei angeschlossenem Pico (nicht im Bootloader-Modus!) unten rechts, um die aktive Python-Umgebung zu ändern. Wählen Sie bei den Optionen die Zeile **MicroPython (Raspberry Pi Pico)** aus (Abbildung 14.6).

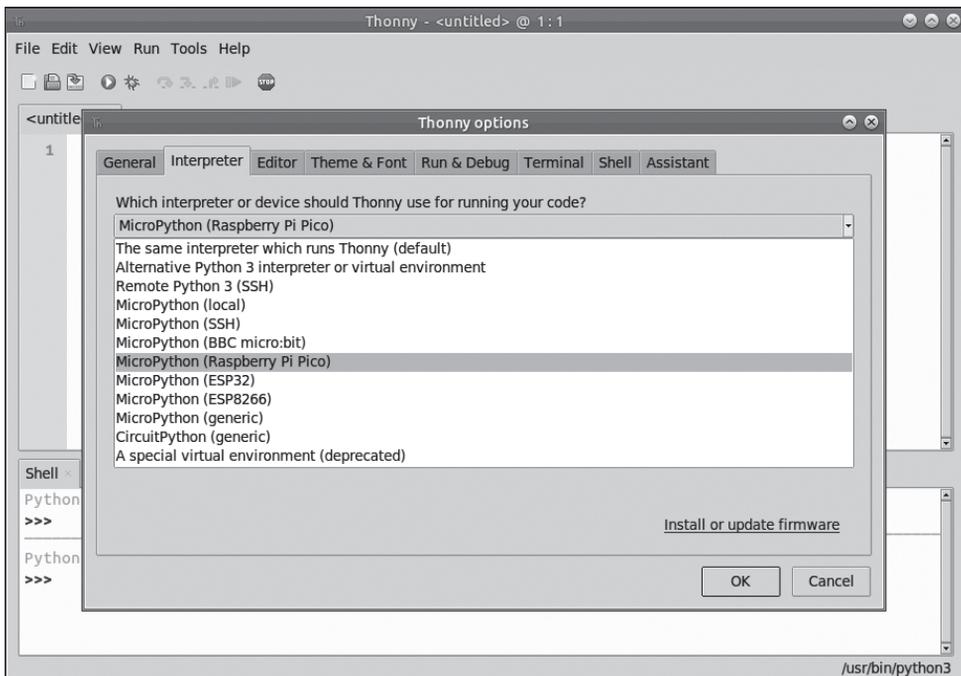
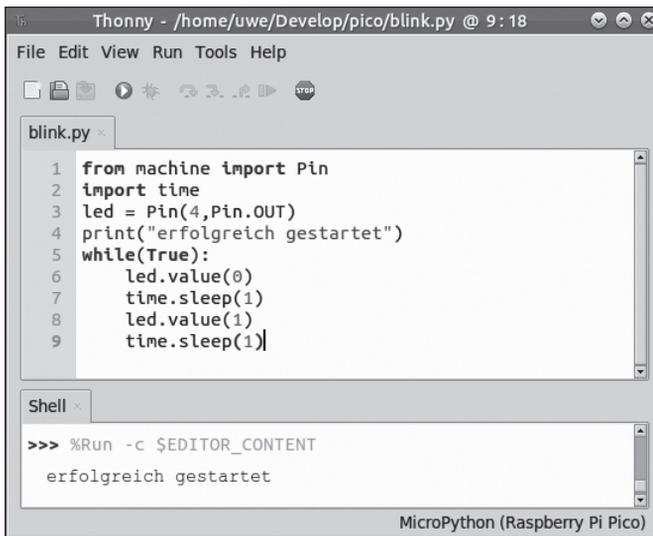


Abbildung 14.6 Konfigurieren Sie Thonny für Ihren Mikrocontroller.

Wenn alles geklappt hat, sehen Sie im unteren Bereich des Thonny-Fensters eine Versionsmeldung von MicroPython. Testen können Sie die Installation mit einem ganz kleinen MicroPython-Programm:

```
from machine import Pin
import time
led = Pin(4,Pin.OUT)
print(
while(True):
    led.value(0)
    time.sleep(1)
    led.value(1)
    time.sleep(1)
```

Natürlich ist es auch dieses Mal wieder ein Blink-Programm. Schließen Sie eine LED (mit Vorwiderstand) an Pin GP4 an. Ein Klick auf das grüne Start-Icon in Thonny genügt, um das Programm auf den Pico zu kopieren und zu starten. Im Shell-Bereich unten sehen Sie die Bestätigung. Falls Thonny einmal die Verbindung verliert (zum Beispiel wenn Sie den Pico aus- und wieder eingesteckt haben), klicken Sie auf das rote Stop-/Restart-Icon rechts in der Leiste (Abbildung 14.7).



**Abbildung 14.7** Das Blink-Programm für den Pico fordert Ihre Python-Kenntnisse nur minimal.

Einer der Vorteile der MicroPython-Umgebung ist, dass sie automatisch `print`-Ausgaben ins Shell-Fenster von Thonny umleitet. Sie können also sehr leicht hilfreiche Ausgaben einbauen, die Sie beim Entwickeln und Testen unterstützen. Wenn Sie später den Pico stand-

alone betreiben, verschwinden diese Ausgaben nebenwirkungsfrei im Nichts. Um im laufenden Betrieb Einblick ins Geschehen zu erhalten, schließen Sie ein Display an und sorgen darauf für Ausgaben. Ob sich der Aufwand lohnt oder ob es sogar obligatorisch ist, hängt von den Projektanforderungen ab. Zumindest eine Betriebs-LED sollten Sie einplanen.

Beachten Sie, dass Ihr Programm im Gegensatz zu anderen Mikrocontrollern bei Verwendung von MicroPython nicht die Alleinherrschaft über das System hat. Vielmehr ist es weiterhin die MicroPython-Runtime-Umgebung, die in Aktion tritt, sobald der Pico an eine Spannungsversorgung gesteckt wird. Dabei startet Ihr Programm nur dann automatisch, wenn es den Dateinamen *main.py* trägt! Das können Sie (bei verbundenem Pico) von Thonny aus mit **File • Save as** bewerkstelligen (ja, mit der MicroPython-Umgebung hat der Pico so etwas wie ein Dateisystem, von wo Sie übrigens dort abgelegte Daten nachladen können).

Um ein laufendes Programm abzubrechen, klicken Sie auf das Stop-Icon oder drücken im Shell-Fenster `[Strg] + [C]`.

## Beispiel: WLAN-Anmeldung mit MicroPython

In MicroPython ist es nicht kompliziert, sich mit einem WLAN-Netzwerk zu verbinden. Natürlich müssen Sie dazu SSID und Passwort hinterlegen. Da es eine Weile dauert, bis die Verbindung fertig aufgebaut ist – und weil das ebenso schiefgehen kann –, brauchen Sie etwas mehr Code (Listing 14.1).

```
import network
import socket

ssid = 'Name Ihres WLANs'
password = 'Passwort für Ihr WLAN'
wlan = network.WLAN(network.STA_IF)
wlan.active(True)
wlan.connect(ssid, password)

max_wait = 10
while max_wait > 0:
    if wlan.status() < 0 or wlan.status() >= 3:
        break
    max_wait -= 1
    print('warten...')
    time.sleep(1)
```

```
if wlan.status() != 3:
    raise RuntimeError('fehlgeschlagen')
print('verbunden')
```

**Listing 14.1** Dieser Code baut eine WLAN-Verbindung auf.

Der erste Teil des Codes startet den Verbindungsaufbau. Der mittlere Teil wartet bis zu 10 Sekunden lang auf einen Status  $<0$  oder  $\geq 3$ . Nur wenn der Status 3 ist, ist die Verbindung erfolgreich aufgebaut – im Fehlerfall wird mit `raise` ein Fehler erzeugt und der Programmablauf beendet.

Am besten packen Sie Code wie diesen in eine eigene Funktion, die nicht nur beim ersten Start, sondern auch nach einem überraschenden Ausfall des WLAN wiederholt aufgerufen wird. Sie möchten ja nicht nach einem Neustart Ihres Routers Ihre Schaltung manuell neu starten!

## Beispiel: Einfacher Webserver mit MicroPython

Ich kann an dieser Stelle nicht die gesamte Funktionsweise eines Webserver erklären. Grundsätzlich wartet der Code auf eine eingehende Verbindungsanfrage von einem Client (z. B. einem Browser) und reagiert darauf mit einer Antwort, die üblicherweise aus einer *HTML-Seite* besteht. Das Prinzip dahinter heißt auch *Request-Response*. Die HTML-Seite können Sie als eigene Datei auf dem Pico speichern. Dazu können Sie natürlich Thonny als Editor verwenden. Sie laden den HTML-Code wie folgt aus der Datei in eine Variable:

```
with open('sesam.html', 'r') as file:
    html = file.read()
```

Wie Sie sicher wissen, verfügt jedes bei einem Router angemeldete Gerät über eine (innerhalb des WLAN) eindeutige IP-Nummer und einen Namen (z. B. `pico2w`). Um auf eingehende Browseranfragen zu warten, bindet sich der Code über einen sogenannten *Socket* an eine IP-Nummer (wobei die Nummer `0.0.0.0` »alle verfügbaren« bedeutet) und einen Port (Standard für Webserver ist 80):

```
addr = socket.getaddrinfo('0.0.0.0', 80)[0][0][0]
s = socket.socket()
s.bind(addr)
s.listen(1)
```

Anschließend muss der Code nur noch endlos warten und einen Verbindungswunsch akzeptieren:

```
cl, addr = s.accept()
print('Anfrage von: ', addr)
request = cl.recv(1024).decode('utf-8')
```

Anschließend steht in der Variablen `request` die komplette Anfrage des Clients. Falls Sie mehr als eine Webseite unterstützen, müssen Sie den Request hier auswerten. Ansonsten können Sie einfach die Antwort senden, und zwar den zuvor geladenen HTML-Code in der Variablen `html`:

```
cl.send('HTTP/1.0 200 OK\r\nContent-type: text/html\r\n\r\n')
cl.send(html)
cl.close()
```

In meinem Projekt enthält die HTML-Seite ein Eingabefeld für die PIN und eine Schaltfläche zum Abschicken. Das erzeugt einen weiteren Request. Den auszuwerten, ist etwas komplizierter, aber letztlich ruft der Code nach erfolgreicher Prüfung der gesendeten PIN eine simple Funktion auf, die den GPIO-Pin mit dem angeschlossenen Relais für zwei Sekunden auf *high* schaltet. Falls Sie ein ähnliches Projekt planen, finden Sie den gesamten Code im Downloadpaket.

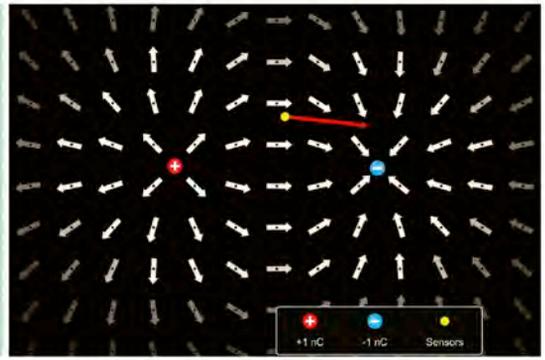
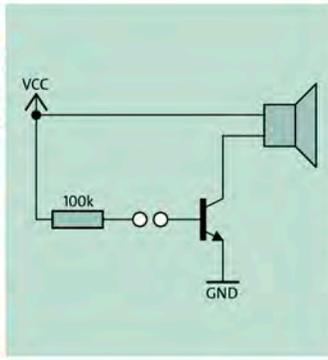
Ich habe meinen Auftraggeber (mich selbst) jetzt mit einem funktionierenden WLAN-Türöffner beglückt und mir die formelle Abnahme erteilt. Ich stehe vorm Haus, rufe auf dem Smartphone (im WLAN) ein zuvor hinterlegtes Bookmark auf, gebe die PIN ein – und schon lässt mein Haus mich rein.

Wie sieht es mit Ihrem Projekt aus? Was haben Sie zustande gebracht? Lassen Sie es mich wissen und schicken Sie mir eine E-Mail an [uwe.post@ludetis.de](mailto:uwe.post@ludetis.de) – ich bin gespannt!

Auf jeden Fall bin ich sicher, dass Sie an dieser Stelle bestens auf Ihr Studium vorbereitet sind. Ich wünsche Ihnen viel Erfolg auf Ihrem Weg – mit möglichst geringem Widerstand!

# Auf einen Blick

1	Einführung .....	12
2	Zahlen, bitte: Ein paar Mathe-Grundlagen .....	18
3	Voll geladen: Von Coulomb zum Kondensator .....	60
4	Das Kribbeln beginnt: Von Spannung und Strom .....	82
5	Echt anziehend: Magnetfeld und Lorentzkraft .....	116
6	Aufgerollt: Spule und Induktion .....	134
7	Messen – Steuern – Regeln .....	152
8	Harmonisch: Schwingkreis und Resonanz .....	176
9	Aus der Steckdose: Hoch- und Wechselspannung .....	192
10	In Bewegung: Motoren und Generatoren .....	208
11	An oder aus: Digitale Schaltkreise .....	230
12	Vom NAND zum Prozessor .....	256
13	Klein, billig, überall drin: Mikrocontroller .....	290
14	Smart Home: Ein Profi-Projekt .....	324



**Elektrotechnik** – ein spannendes Studienfach, das mit viel Praxisbezug auf einen abwechslungsreichen Beruf vorbereitet. Aber vor allem zu Beginn warten auch einige Herausforderungen. Mit diesem Buch gehen Sie gut vorbereitet an den Start!

### Ein gutes Fundament

Hier bekommen Sie alle physikalischen und mathematischen Grundlagen – genau auf den Studiengang zugeschnitten. Welche Wissenslücken sollten Sie noch schließen? Testen Sie sich selbst und frischen Sie Ihre Kenntnisse auf!

### Von der Theorie zur Praxis

Elektrizitätslehre, der Aufbau eines Transistors oder Mess- und Regelungstechnik: Uwe Post erklärt anschaulich und verständlich alle wichtigen Konzepte.

### Beispiele und Übungen

Mit Aufgaben und ausführlich erklärten Lösungen zu jedem Kapitel setzen Sie das Gelernte gleich in die Praxis um. Freuen Sie sich auch auf das große Praxisprojekt am Ende des Buches und viele hilfreiche Tipps.

## Gut vorbereitet ins Studium:

Mathematische Grundlagen

Spannung, Strom und Widerstand

Magnetfelder und Induktion

Kondensatoren und Spulen

Wechselstrom

Motoren und Generatoren

Digitale Schaltungen

Mikrocontroller

Mess- und Regelungstechnik

Praxisprojekt Smart Home



**Uwe Post** ist Diplom-Physiker, Autor von Fachbüchern und von preisgekrönter Science Fiction. Beruflich entwickelt er Smartphone-Apps und -Spiele. Außerdem unterrichtet er mit Begeisterung privat – vor allem, wenn es um den Übergang von der Schule zum Studium geht.

