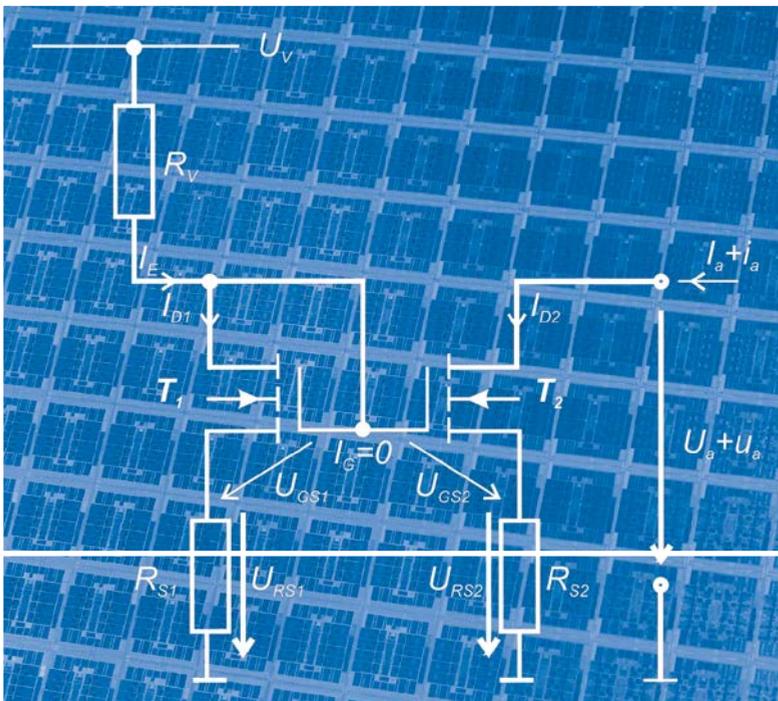


W. Friedrich Oehme
Mario Huemer
Markus Pfaff
Heinrich Milosiu

Elektronik und Schaltungstechnik

Ein verständlicher Einstieg



3., aktualisierte und erweiterte Auflage

HANSER

Oehme / Huemer / Pfaff / Milosiu
Elektronik und Schaltungstechnik



bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Über die Autoren:

Apl. Prof. Dr.-Ing. W. Friedrich Oehme hat viele Jahre als Professor am Lehrstuhl für Technische Elektronik an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg gelehrt.

Prof. Dr. Mario Huemer leitet das Institut für Signalverarbeitung der Johannes Kepler Universität Linz.

FH-Prof. Dr. Markus Pfaff ist Professor für Elektronik/Digitale Schaltungen an der FH Oberösterreich, Campus Hagenberg.

Prof. Dr.-Ing. Heinrich Milosiu ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen (IIS) in Erlangen. Zudem hält er Vorlesungen für Elektrotechnik- und Medizinelektronik-Studierende an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU).

W. Friedrich Oehme
Mario Huemer
Markus Pfaff
Heinrich Milosiu

Elektronik und Schaltungstechnik

Ein verständlicher Einstieg

3., aktualisierte und erweiterte Auflage

HANSER



Print-ISBN: 978-3-446-48014-8

E-Book-ISBN: 978-3-446-48107-7

Die allgemein verwendeten Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benützt werden dürften.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Werkes, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 UrhG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Wir behalten uns auch eine Nutzung des Werks für Zwecke des Text und Data Mining nach § 44b UrhG ausdrücklich vor.

© 2025 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München
Kolbergerstraße 22 | 81679 München | info@hanser.de
www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Frank Katzenmayer

Herstellung: Frauke Schafft

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Satz: le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Druck: CPI Books GmbH, Leck

Printed in Germany

Vorwort

Dieses Buch wurde auf der Grundlage langjähriger Vorlesungspraxis auf dem Gebiet der elektronischen Schaltungen geschrieben. Wir haben das Thema sowohl für Studierende der Elektrotechnik als auch für Studierende verschiedener anderer Fachgebiete wie zum Beispiel Informatik oder Kommunikationstechnik aufbereitet und dargeboten. Dabei hat sich deutlich gezeigt, dass man als Student der Elektronik im Nebenfach einen anderen Anspruch an die Vorlesung über Elektronik und Schaltungstechnik hat als ein Studierender der Elektrotechnik. Letzterer zielt auf die eigenständige Entwicklung von Schaltungen, während Ersterer das Verständnis sucht, um gut mit Schaltungsentwicklern zusammenarbeiten zu können.

Diesem Anspruch haben wir in zweierlei Hinsicht Rechnung getragen. Wir haben die häufig nicht vorhandenen physikalischen Grundlagen eingeflochten und anschaulich dargeboten und haben im Hinblick auf die Schaltungen ganz gezielt das Verständnis der Zusammenhänge in den Vordergrund gestellt. Selbstverständlich sind alle Ableitungen so angelegt, dass man bei Bedarf unmittelbar in die tiefere Fachliteratur über Schaltungsentwicklung einsteigen kann. Wir haben Beispiele entsprechender Bücher an vielen Stellen angegeben.

Für die vorliegende zweite Auflage haben wir eine große Anzahl praxisnaher Rechenbeispiele ausgearbeitet und eingefügt. Dies war auch der Wunsch vieler Nutzer des Buches. In diesem Zusammenhang danken wir allen Lesern, die uns auf Fehler hingewiesen haben, welche wir nunmehr beheben konnten. Damit hoffen wir, ein nützliches Buch für einen großen Kreis von wissbegierigen Lesern geschaffen zu haben. Mit kleinen Verständnisfragen an den Enden der Kapitel wollen wir auf wichtige Aspekte des Stoffes zurückblenden und dem Leser die Möglichkeit der Verifizierung des Gelernten geben.

Wir sind überzeugt, dass es aus der Leserschaft wiederum viele Kommentare und Verbesserungsvorschläge zu unserem Buch geben wird. Diese bitten wir per E-Mail zu senden an:

Friedrich.Oehme@t-online.de

Das Buch hätte ohne tatkräftige und kundige Hilfe nicht entstehen und weiterentwickelt werden können. Wir danken herzlich Frau Dipl.-Ing. Simone Ferlin Oliveira, welche schon als Studentin an der ersten Auflage mitgearbeitet hat, für die Graphikarbeiten und die Textverarbeitung bei der Vorbereitung dieser Auflage. Unser herzlicher Dank geht auch an den Lehrstuhl für Technische Elektronik der Universität Erlangen-Nürnberg (Prof. Dr.-Ing. R. Weigel), die Alpen Adria Universität Klagenfurt und die FH-OÖ/Hagenberg. Frau Mirja Werner M.A. beim Fachbuchverlag Leipzig im Hanser Verlag danken wir für die gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit.

Erlangen, Klagenfurt und Hagenberg im August 2011

Friedrich Oehme
Mario Huemer
Markus Pfaff

Vorwort zur dritten Auflage

Dieses Buch wurde auf der Grundlage langjähriger Vorlesungspraxis auf dem Gebiet der elektronischen Schaltungen geschrieben. Wir haben das Thema sowohl für Studierende der Elektrotechnik als auch für Studierende verschiedener anderer Fachgebiete wie zum Beispiel Informatik oder Kommunikationstechnik aufbereitet.

Wir haben die nicht immer vorhandenen physikalischen Grundlagen eingeflochten und anschaulich dargeboten und im Hinblick auf die Schaltungen ganz gezielt das Verständnis der Zusammenhänge in den Vordergrund gestellt. Selbstverständlich sind alle Ableitungen so angelegt, dass man bei Bedarf unmittelbar in die tiefere Fachliteratur über Schaltungsentwicklung einsteigen kann.

Für die dritte Auflage unseres Buches konnten wir als Koautor mit Prof. Dr.-Ing. Heinrich Milosiu einen erfahrenen Experten der IC-Schaltungsentwicklung gewinnen. Mit seinem „Einstandsbeitrag“, dem neuen Abschnitt 5.6 „Energie-effiziente CMOS-Schaltungstechnik“, hat das Buch eine sehr aktuelle Ergänzung bekommen. Anforderungen wie niedrige Betriebsspannung und sehr geringe Stromaufnahme von MOS-Schaltungen sind für viele Anwendungen essenziell. Die Abhandlung beruht auf Vorlesungen zur Schaltungsentwicklung und bietet nach einführenden Betrachtungen konkrete Beispiele.

Wir haben die Literaturangaben gegenüber der Voraufgabe aktualisiert, soweit es neue Versionen der Bücher gibt.

Das Buch hätte ohne tatkräftige und kundige Hilfe nicht entstehen und weiterentwickelt werden können. Wir danken herzlich Herrn Fabian Benschuh, M.Sc., für die Zeichnungen in Abschnitt 5.6. Wir danken Herrn Frank Katzenmayer beim Hanser Verlag für die gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit und vor allem für die Geduld im Umgang mit gestressten Schaltungsentwicklern.

Erlangen, Linz und Hagenberg im März 2025

Friedrich Oehme
Mario Huemer
Markus Pfaff
Heinrich Milosiu

Inhalt

1	Einführung	11
1.1	Elektronische Schaltungen	11
1.2	Die Welt der elektronischen Bauelemente	12
1.3	Mikroelektronik	15
1.4	Der Weg durch das Buch	17
2	Physikalische Grundlagen elektrischer Schaltungen	19
2.1	Spannung und Strom	19
2.2	Widerstand, Kapazität, Induktivität	24
2.2.1	Stromleitung und Widerstand	25
2.2.2	Kapazität	29
2.2.3	Induktivität	31
2.3	Stromkreis	37
2.3.1	Grundbeziehungen	37
2.3.2	Parallel- und Serienschaltung	48
2.4	Reale Bauelemente	55
2.4.1	Widerstand, Kondensator und Spule	56
2.4.2	Verlustleistung und die Speicherung von Energie	61
2.5	Verständnisfragen	68
3	Passive Netzwerke	70
3.1	Signale in Schaltungen	70
3.2	Übertragungseigenschaften linearer Schaltkreise	77
3.2.1	Methode der komplexen Zeiger	77
3.2.2	Übertragungsfunktion und Bode-Diagramm	83
3.2.3	Vierpolmodell	90
3.3	Von der Übertragungsfunktion zum Netzwerk	96
3.4	Verständnisfragen	102

4	Halbleiterbauelemente	104
4.1	Diode und Transistor	104
4.1.1	pn-Übergang und Diode	104
4.1.2	Bipolartransistor	108
4.1.3	Feldeffekttransistor	111
4.2	Der Transistor in der Schaltung	117
4.2.1	Arbeitspunkt	117
4.2.2	Bipolartransistor im Kleinsignalbetrieb	121
4.2.3	Feldeffekttransistor im Kleinsignalbetrieb	127
4.3	Dynamische Signale in Transistoren und Dioden	132
4.3.1	Parasitäre Kapazitäten	133
4.3.2	Diode und Bipolartransistor	135
4.3.3	MOS-Feldeffekttransistor	140
4.4	Verständnisfragen	143
5	Analoge Grundschaltungen	145
5.1	Einzeltransistor als Verstärkergrundschaltung	145
5.1.1	Signalquelle und Last	145
5.1.2	Grundschaltungen des Bipolartransistors	148
5.1.3	Grundschaltungen des MOS-Feldeffekttransistors	164
5.2	Funktionsschaltungen mit mehreren Transistoren	171
5.2.1	Koppelkondensator	171
5.2.2	Darlington-Schaltung	172
5.2.3	Differenzverstärker	176
5.2.4	Schaltungen für Gleichstromquellen	183
5.3	Operationsverstärker	189
5.3.1	Universelle Grundschaltungen mit dem Operationsverstärker	189
5.3.2	Summierer, Differenzierer und Integrierer	196
5.4	Funktionsbausteine der Signalverarbeitung	200
5.4.1	Aktive Filter	201
5.4.2	Das Prinzip von Abtastung und Quantisierung	206
5.4.3	Digital/Analog-Umsetzer	210
5.4.4	Analog/Digital-Umsetzer	213
5.5	Rechnergestützte Schaltungsanalyse	220
5.6	Energie-effiziente CMOS-Schaltungstechnik	226
5.6.1	Die zentrale Rolle der Transkonduktanz bei MOSFET-Schaltungen	226
5.6.1.1	Das Drain-Effizienz-Konzept: Eine Möglichkeit zum Strom sparen	227

5.6.1.2	Drain-Effizienz bei starker Inversion	230
5.6.1.3	Drain-Effizienz bei moderater und schwacher Inversion	231
5.6.1.4	Übergang von schwacher zu starker Inversion	231
5.6.1.5	Die Realisierung höherer Spannungsverstärkung mit dem Drain-Effizienz-Konzept	232
5.6.2	Optimierter Verstärker-Entwurf	233
5.6.2.1	Source-Schaltung (Common-Source-Amplifier)	234
5.6.2.1.1	Starke Inversion	235
5.6.2.1.2	Schwache Inversion	236
5.6.2.1.3	Sonderfall des niedrigen Ausgangswiderstands	237
5.6.2.2	Differenzverstärker mit resistiver Last	238
5.6.2.2.1	Arbeitspunkteinstellung	239
5.6.2.2.2	Spannungsverstärkung	241
5.6.2.2.3	Minimale Stromaufnahme	243
5.6.2.2.4	Ausführung des Differenzverstärkers mit p-Kanal-MOSFETs	245
5.6.2.3	Beispiele zur Dimensionierung	247
5.6.2.3.1	Beispiel: Source-Schaltung mit maximaler Spannungsverstärkung	247
5.6.2.3.2	Beispiel: Source-Schaltung mit minimaler Stromaufnahme	252
5.6.2.3.3	Beispiel: Differenzverstärker mit maximaler Spannungsverstärkung	254
5.6.2.3.4	Beispiel: Differenzverstärker mit minimaler Stromaufnahme	255
5.6.2.4	Signalverzerrung und Linearität	256
5.6.3	Methodik zur freien Wahl der Gleichspannung beim Eingangssignal	260
5.6.3.1	Einfache Source-Schaltung	260
5.6.3.2	Transkonduktanzverstärker	261
5.6.3.3	Drain-Schaltung	262
5.6.3.4	Differenzverstärker mit resistiver Last und Widerstandseinspeisung	264
5.6.3.5	Differenzverstärker mit resistiver Last und Stromquelleneinprägung	265
5.6.3.6	Stromspiegel	267
5.6.3.7	Spannungsfolger ohne Spannungsabfall	268
5.7	Verständnisfragen	270

6	Digitale Grundschaltungen und Speicher	272
6.1	Digitale Schaltungen und ihre Charakterisierung	272
6.1.1	Digitale Variable und ihre Verknüpfung	272
6.1.2	Last und Verzweigung im Logiknetz	275
6.2	Realisierung der digitalen Grundfunktionen	278
6.2.1	Diodengatter und Dioden-Transistorgatter	279
6.2.2	CMOS-Inverter	284
6.2.3	Gatter in CMOS-Technik	291
6.2.4	Realisierung von Zeitintervallen	293
6.3	Ausblick auf das Feld komplexer Digitalbausteine	295
6.3.1	Schaltsymbole	295
6.3.2	Latch und Flipflop	298
6.3.3	Komplexgatter	305
6.3.4	Taktgeneratoren	307
6.4	Speicherbausteine für Digitalrechner	313
6.4.1	Bausteine für den Arbeitsspeicher (SRAM, DRAM)	313
6.4.2	Nichtflüchtige Speicher (ROM, EPROM, EEPROM)	323
6.5	Verständnisfragen	331
7	Anhang	333
7.1	Umrechnungstabelle der Vierpolparameter	333
7.2	Formelzeichen und Abkürzungen	334
	Literatur	339
	Index	341

1

Einführung

■ 1.1 Elektronische Schaltungen

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

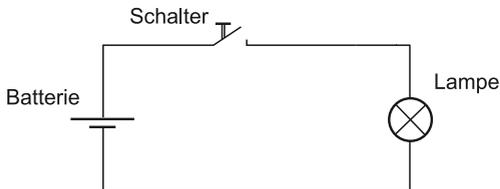


Bild 1.1 Stromkreis mit Lampe

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

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

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

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

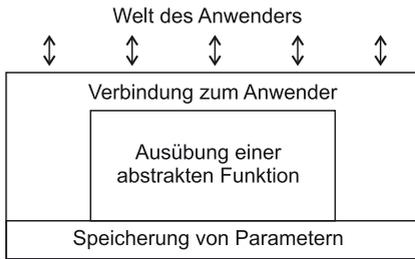


Bild 1.2 Die Schaltung im weiteren Sinne

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

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

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

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

■ 1.2 Die Welt der elektronischen Bauelemente

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

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

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

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

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

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

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

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

$$U_2 = f(U_1)$$

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

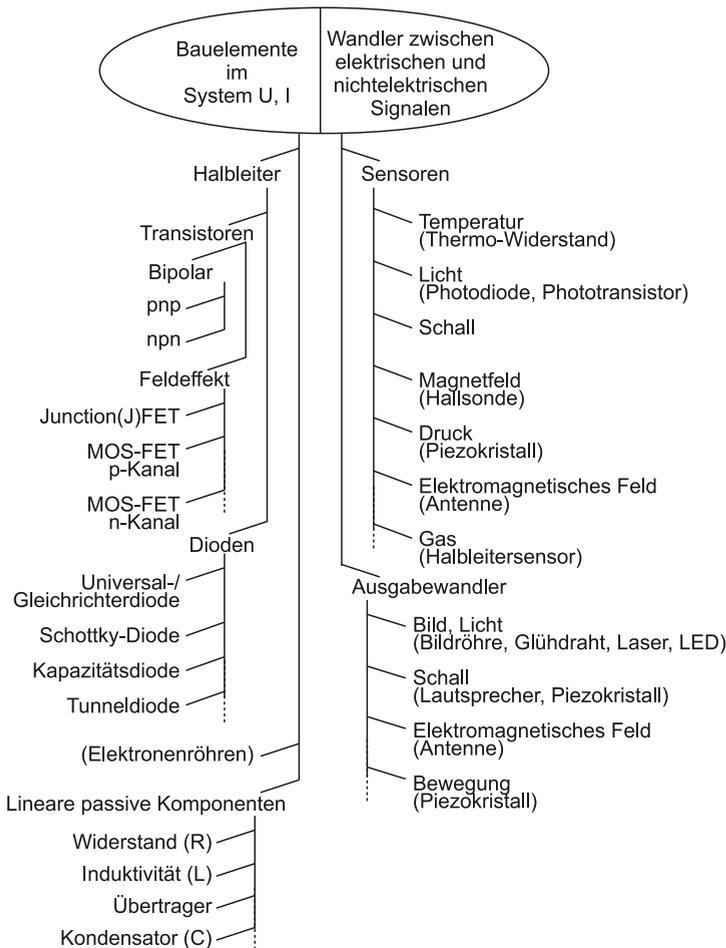


Bild 1.3 (Unvollständiger) Überblick über die elektronischen Bauelemente

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

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

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

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

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

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

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

■ 1.3 Mikroelektronik

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

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

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

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

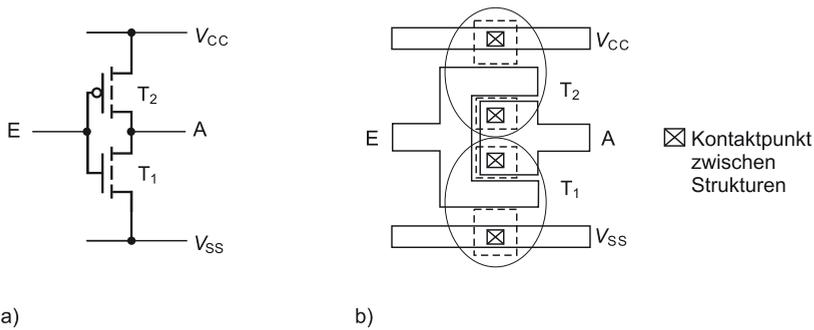


Bild 1.4 Integrierte Schaltung (CMOS-Inverter): a) Schaltplan, b) Layout

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

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

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

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

Schaltungen antreffen, liefert pro Mikrosekunde

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

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

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

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

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

■ 1.4 Der Weg durch das Buch

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

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

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

Kapitel 2: Physikalische Grundlagen elektrischer Schaltungen

Physikalische Grundlagen einfacher Bauelemente, Verhalten der Bauelemente in Stromkreisen.

Kapitel 3: Passive Netzwerke

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

Kapitel 4: Halbleiterbauelemente

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

Kapitel 5: Analoge Grundsaltungen

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

Kapitel 6: Digitale Grundsaltungen und Speicher

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

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

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

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

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

Kapitel 6 sollte kein Informatiker verpassen.

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

2

Physikalische Grundlagen elektrischer Schaltungen

■ 2.1 Spannung und Strom

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

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

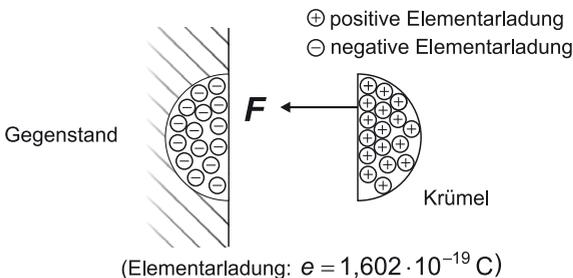


Bild 2.1 Haftung des Styroporkrümels

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

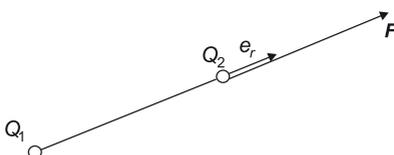


Bild 2.2 Zum Coulomb'schen Gesetz (zugeschnitten auf eine Anordnung mit Q_1 ortsfest, Q_2 beweglich)

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

Q_1 : Ladung des Körpers 1

Q_2 : Ladung des Körpers 2

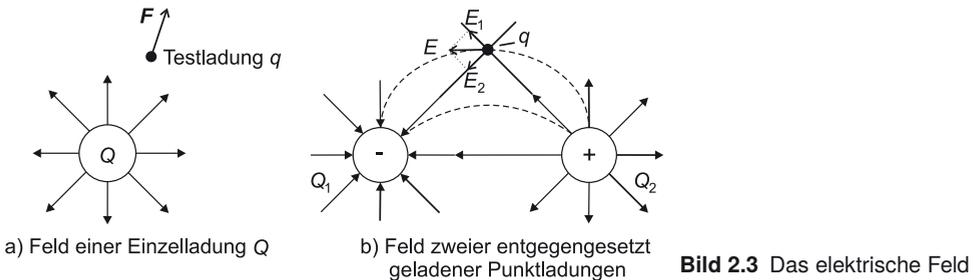
r : Abstand

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

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

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

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



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

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

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

Elektrische Feldstärke:

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

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

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

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

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

- \mathbf{F}^* : aufgewendete Kraft
- ΔW : geleistete Arbeit
- \mathbf{s} : Wegkoordinate

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

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

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

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

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

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

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

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

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

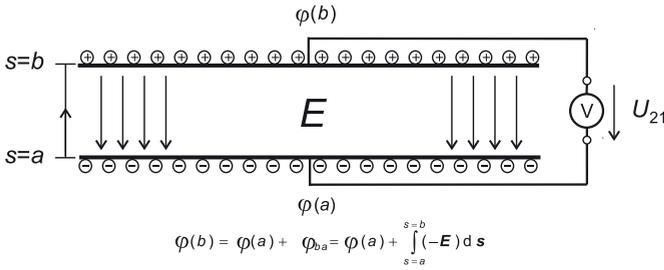


Bild 2.4 Potentiale, elektrisches Feld und Spannung am geladenen Kondensator

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

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

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

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

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

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

Die Einheit der Spannung ist das Volt (V).

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

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

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

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

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

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

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

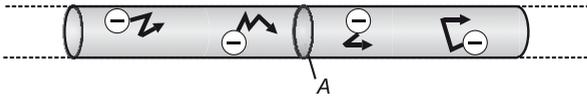


Bild 2.5 Der Strom in einem metallischen Leiter

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

$$I = \int_A J dA$$

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

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

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

Den Faktor μ nennen wir die Beweglichkeit der Elektronen. Er wird experimentell bestimmt.

Beispiel:

Metalldraht, 1 m Länge

Spannung zwischen den Enden: 0,1 V

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

Wir erhalten

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

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

Feldes in Luft beziehungsweise in einem Material. Die Geschwindigkeit beträgt

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

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

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

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

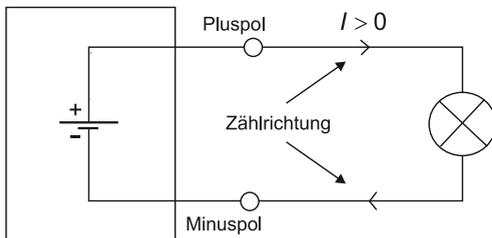


Bild 2.6 Stromfluss und Zählrichtung

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

Hinsichtlich der Elektronen folgt daraus gemäß [Bild 2.7](#): Die Elektronen bewegen sich entgegengesetzt zur positiven Stromrichtung.

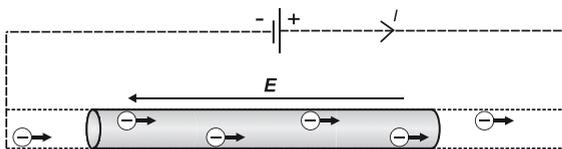


Bild 2.7 Elektronenbewegung und technische Stromrichtung

■ 2.2 Widerstand, Kapazität, Induktivität

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

2.2.1 Stromleitung und Widerstand

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

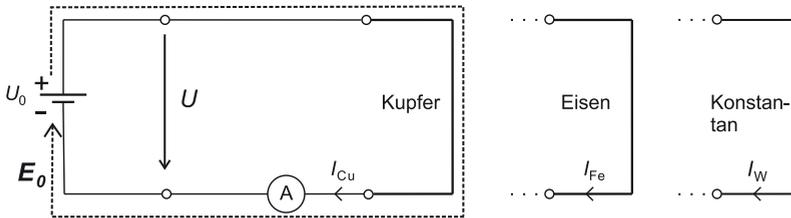


Bild 2.8 Experiment zur Messung der Stromstärken I_{Cu} , I_{Fe} , I_W

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

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

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

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

L : Länge des Drahtes
 A : Querschnittsfläche

Mit

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

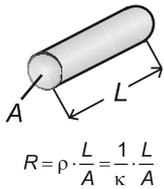
R : Widerstand
 G : Leitwert

erhalten wir:

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

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

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



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

Bild 2.9 Widerstand eines Drahtes

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

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

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

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

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

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

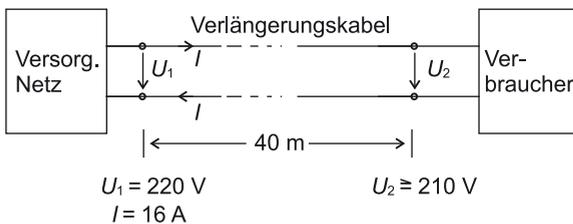


Bild 2.10 Spannungsversorgung über Verlängerungskabel

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

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

Aus Gleichung (2.14) mit Bild 2.9 folgt:

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

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

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

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

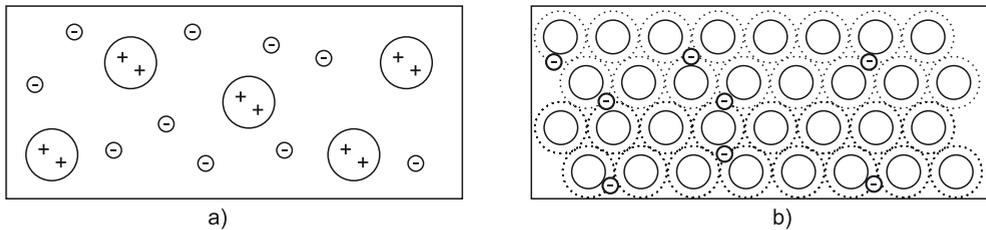


Bild 2.11 Atomgitter mit beweglichen Elektronen a) Metall: viele Elektronen, frei beweglich, b) Isolator: wenige Elektronen, kaum beweglich

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

Tabelle 2.1 Ladungsträger für Stromleitung

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

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

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

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

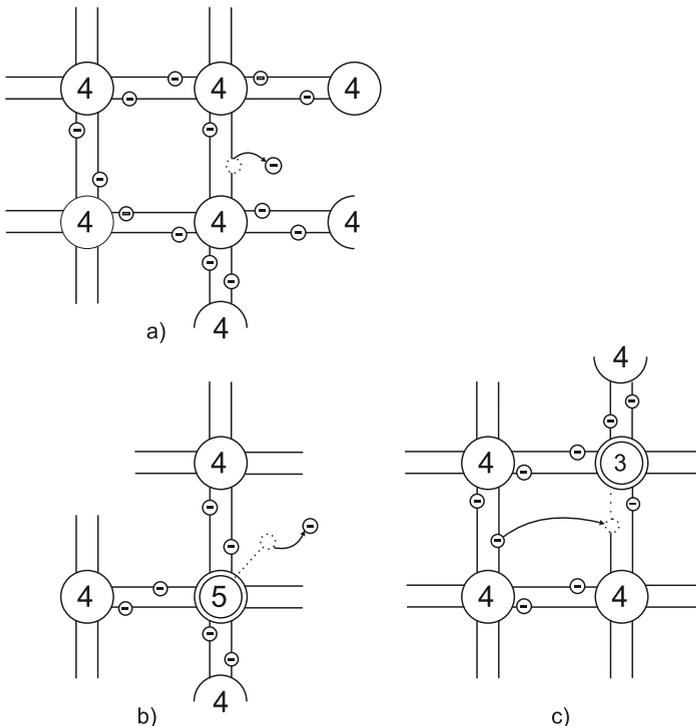


Bild 2.12 Halbleitergitter (4-wertig): a) reines Gitter, thermische Paarbildung, b) mit 5-wertigem Dotieratom, ein Elektron aktiviert, c) mit 3-wertigem Dotieratom, ein Elektron aus „aufgerissener“ Bindung

von Kupfer. Für Silizium ergibt sich der Faktor 10^{11} für den reinen Halbleiter und ein Bereich von $10^3 \dots 10^7$ bei unterschiedlich starker Dotierung für die Verwendung in der Bauelemente-Technologie.

2.2.2 Kapazität

Als Nächstes wollen wir uns dem physikalischen Effekt der *Kapazität* zuwenden. Umgangssprachlich drückt Kapazität eine Art Fassungsvermögen einer Einrichtung aus. Wir wollen uns in diesem Sinne für das Fassungsvermögen eines Kondensators für Ladungsträger interessieren. Unter Kondensatoren wollen wir die in [Bild 2.13](#) dargestellte Anordnung aus zwei Platten verstehen. Es ist vorgesehen, an den beiden Klemmen 1 und 2 die Spannungsquelle U_0 anzuschließen.

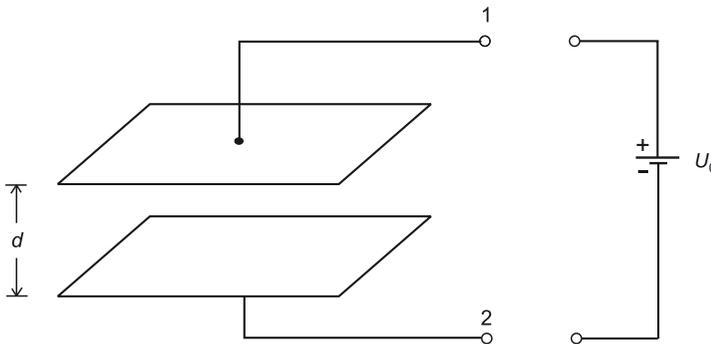


Bild 2.13 Kondensator

Ist der Anschluss erfolgt, so wird das durch U_0 bewirkte E-Feld einen Strom in den Drähten antreiben, welcher dann zu einer Ansammlung von Ladungsträgern auf den Platten führen wird, weil hier der Kreis unterbrochen ist ([Bild 2.14](#)).

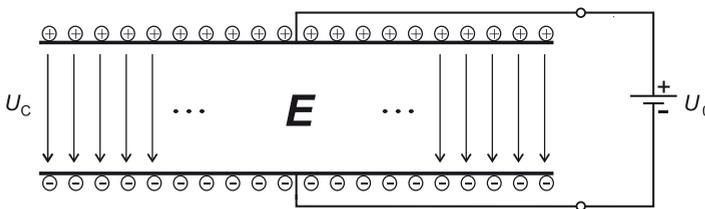


Bild 2.14 Ladung des Kondensators

Zwangsläufig wird sich das E-Feld zwischen den Platten ausbauen, wodurch sich eine Spannung U_C zwischen den Platten aufbaut, für welche nach Gleichung (2.7) gilt:

$$U_C = E \cdot d$$

Mit der Zunahme von E zwischen den Platten wird die Feldstärke entlang den Drähten kleiner und mithin auch der Strom. Das untersuchen wir später genauer. Es ist plausibel, dass der Vorgang endet, wenn gilt

$$U_C = U_0,$$

weil dann entlang den Drähten keine Spannung und somit kein E-Feld mehr vorhanden ist. Damit ist der Kondensator *voll* im Hinblick auf die Spannung U_0 . Würde man U_0 erhöhen, könnten wieder Ladungen fließen und die auf den Platten gespeicherte Menge würde größer. Man kann auch zeigen, dass die Beziehung zwischen Spannung U_0 und gespeicherter Ladung Q linear ist. Es gilt also:

$$Q = C \cdot U_C \quad (2.16)$$

Der Proportionalitätsfaktor in dieser Gleichung ist die **Kapazität** C . Ihre Dimension ergibt sich zu

$$\frac{1 \text{ C}}{1 \text{ V}} = \frac{1 \text{ As}}{1 \text{ V}} = 1 \text{ F (Farad)}$$

(Man beachte, dass die Dimension der Ladung, Coulomb, mit dem gleichen Buchstaben, C , abgekürzt wird, wie die Größe Kapazität.)

Um die Kapazität eines Kondensators in Abhängigkeit von geometrischer Größe und verwendetem Dielektrikum berechnen zu können, führen wir ohne Herleitung folgende Formel ein (siehe auch [Bild 2.15](#)):

$$Q = \varepsilon \cdot E \cdot A \quad (2.17)$$

ε : Permittivität des Dielektrikums

A : Fläche der Platten

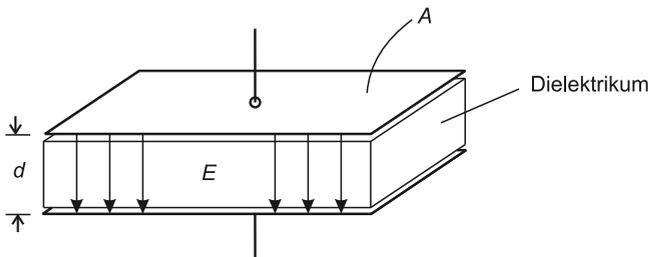


Bild 2.15 Aufbau des Kondensators

Mit den Gleichungen (2.16) und (2.17) erhalten wir:

$$\begin{aligned} \varepsilon \cdot E \cdot A &= C \cdot U = C \cdot E \cdot d \\ C &= \varepsilon \cdot \frac{A}{d} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{A}{d} \end{aligned} \quad (2.18)$$

mit $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$

$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$, elektrische Feldkonstante im Vakuum bzw. in Luft

ε_r : relative Permittivität des Materials

Werte für ε_r liegen z. B. im Bereich 2,5 für Papier bis ca. 6 für ein hochwertiges Dielektrikum. Gleichung (2.18) beschreibt den idealen Plattenkondensator. Das bedeutet zum Beispiel, dass die mehr oder weniger begrenzte Leitfähigkeit der Anschlussdrähte unbeachtet bleibt.

Aus dem Umstand, dass der Strom im Zuge der Aufladung des Kondensators immer kleiner wird, folgt, dass wir für das Endergebnis der Aufladung ein Integral ansetzen müssen:

$$Q = \int_{t=0}^{\infty} i(t) dt \quad (2.19)$$

Mit Gleichung (2.16) folgt auch

$$C \cdot U = \int_{t=0}^{\infty} i(t) dt$$

Durch Differenziation erhalten wir

$$C \cdot \frac{du}{dt} = i(t) \quad (2.20)$$

Gleichung (2.20) stellt den Zusammenhang zwischen der Änderung der Spannung am Kondensator und dem Strom her, wobei C sozusagen die Proportionalitätskonstante bildet. Dieser Zusammenhang wird ein wichtiger Grundbaustein bei der Berechnung des dynamischen Verhaltens von Strom und Spannung am Kondensator sein.

2.2.3 Induktivität

Als Nächstes wollen wir uns der *Induktivität* zuwenden. Dieser Begriff wird in der Schaltungstechnik, insbesondere bei theoretischen Überlegungen, immer dann angewendet, wenn sich die Betrachtung auf eine ideale oder zumindest näherungsweise ideale Spule bezieht. Eine ähnliche Bemerkung haben wir bei der Diskussion der Kapazität im Hinblick auf den Kondensator bereits gemacht, so dass sich beim Leser der berechnete Verdacht einstellen wird, dass diese *reinen* Bauelemente zumindest nicht der Regelfall sein werden. Damit werden wir uns später beschäftigen.

Zur Vorbereitung auf die Erklärung induktiven Verhaltens wollen wir drei wohlbekanntes Beobachtungen zusammenstellen. **Bild 2.16a** zeigt das Experiment mit stromdurchflossenem Draht und Kompassnadel. Die Kompassnadel richtet sich immer tangential zu einem virtuellen Kreis um den Draht aus. Wenn man sie gewaltsam aus der Richtung bringt, dann stellt sie sich anschließend zurück. Dafür ist Kraft erforderlich, woraus folgt, dass vom Fließen des Stromes I eine Kraft ausgeht, welche zur Ausrichtung der Kompassnadel führt. **Bild 2.16b** zeigt einen Transformator, bei dem die Primärwicklung an das Wechselstromnetz angeschlossen wird. An der Sekundärwicklung, welche keine leitende Verbindung zur Primärwicklung hat, kann eine Spannung von 12 V gemessen werden, und es kann auch ein Strom fließen, wenn der Sekundärstromkreis geschlossen ist. Der Transformator funktioniert nur mit Wechselstrom.

Schließlich zeigt **Bild 2.17** ein Experiment mit einer Batterie und einer großen Spule. Wird der Schalter geschlossen, so kann ein Strom gemessen werden. Sein Verlauf ist in **Bild 2.17b** gezeigt, wo man erkennt, dass der Strom erst allmählich seinen Endwert erreicht.

Dies ist im Hinblick auf die Ausführungen am Ende von Abschnitt 2.1, wonach der Strom an allen Stellen des Kreises praktisch gleichzeitig *gestartet* wird, unerwartet. Es muss ein Effekt beteiligt sein, welcher dem Feld \mathbf{E} , welches den Strom antreiben möchte, entgegenwirkt.

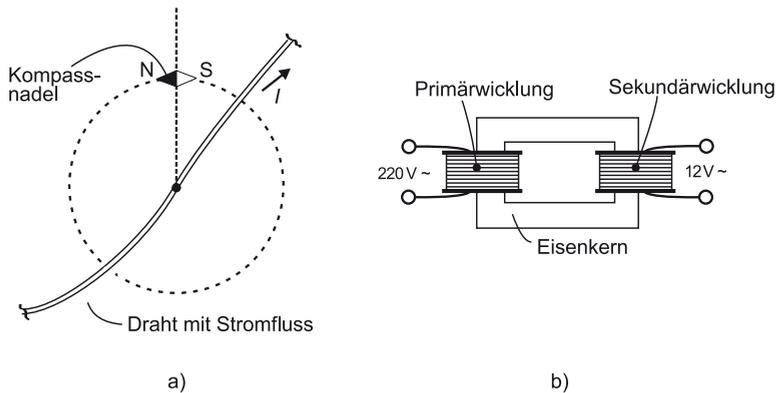


Bild 2.16 Beobachtungen: a) stromdurchflussener Draht und Kompassnadel, b) Transformator

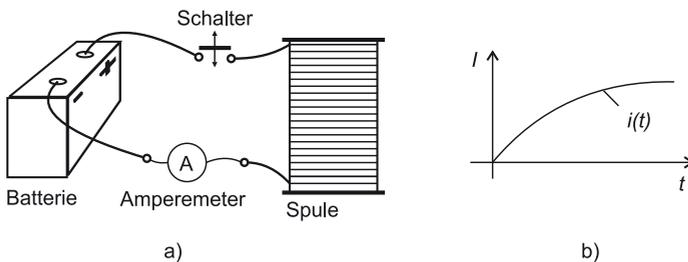


Bild 2.17 Batterie und Spule: a) Aufbau des Experiments, b) zeitlicher Verlauf des gemessenen Stromes

Wir wollen jetzt die Beobachtungen von [Bild 2.16](#) näher untersuchen, um schließlich das Ergebnis des Experiments von [Bild 2.17](#) zu verstehen. Das Verhalten der Kompassnadel weist darauf hin, dass es in der Umgebung eines stromdurchflossenen Drahtes eine Eigenschaft des Raumes gibt, durch welche die ausrichtende Kraft auf die Nadel bewirkt wird. Wird der Stromfluss im Draht abgeschaltet, so richtet sich die Kompassnadel wieder auf das Erdmagnetfeld aus und zeigt auf den Nordpol. Daraus wollen wir folgern, dass die Auswirkung des Stromflusses im Draht auch ein Magnetfeld ist, im Fall von [Bild 2.16a](#) nur stärker als das Erdmagnetfeld.

Weitere Beschäftigung mit dem Magnetfeld würde u. a. ergeben [1], dass man zur Beschreibung des Magnetfeldes entsprechend dem elektrischen Strom eine Flussdichte \mathbf{B} beziehungsweise einen Fluss ϕ heranziehen kann ([Bild 2.18](#)).

Es zeigt sich dabei, dass es auch ein Pendant zur elektrischen Leitfähigkeit κ gibt. Ohne dies näher auszuführen, wollen wir feststellen, dass z. B. Eisen für den magnetischen Fluss eine besonders hohe Leitfähigkeit aufweist. Damit haben wir bereits zum Transformator von [Bild 2.16b](#) übergeleitet, bei dem der magnetische Fluss der Primärwicklung über den Eisenkern durch die Sekundärwicklung geleitet wird. Nachdem das die einzige Verbindung zwischen den Wicklungen ist, leuchtet ein, dass es der magnetische Fluss ist, der die Energie von der Primärseite zur Sekundärseite des Transformators transportiert.

Weil der Transformator nur für Wechselstrom funktioniert, kommt noch dazu, dass es ein sich ständig ändernder Fluss sein muss. Dies spiegelt sich formell wider im so genannten **Indukti-**

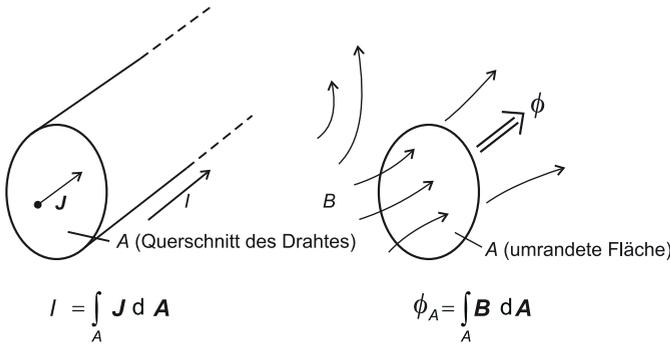


Bild 2.18 Stromfluss I und magnetischer Fluss ϕ

Induktionssatz (Gleichung 2.21). **Bild 2.19** zeigt den Zusammenhang.

$$U = - \frac{d\phi}{dt} \tag{2.21}$$

Für die Herleitung der – sehr wichtigen – Vorzeichen und Richtungsangaben in **Bild 2.19** sei auf die Grundlagenliteratur (z. B. [1]) verwiesen. Die angedeutete Stromrichtung zeigt, in welcher Richtung ein Strom infolge der Spannung U fließen würde, wenn die offene Leiterschleife zu einem Stromkreis ergänzt würde.

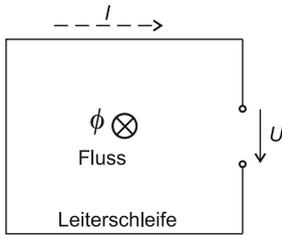


Bild 2.19 Induktion einer Spannung in einer Leiterschleife, \otimes : Symbol für Fluss in die Bildebene hinein

Damit können wir zumindest qualitativ die Erklärung des Verhaltens in **Bild 2.17** in Angriff nehmen.

In **Bild 2.20** ist der Stromkreis von **Bild 2.17** abstrakt dargestellt. Die Spule wird durch die Leiterschleife repräsentiert. Der durch die Batterie bewirkte Strom I_B erzeugt ein Magnetfeld, welches durch den magnetischen Fluss ϕ_B dargestellt wird. Für die Erzeugung von ϕ_B gilt die Regel

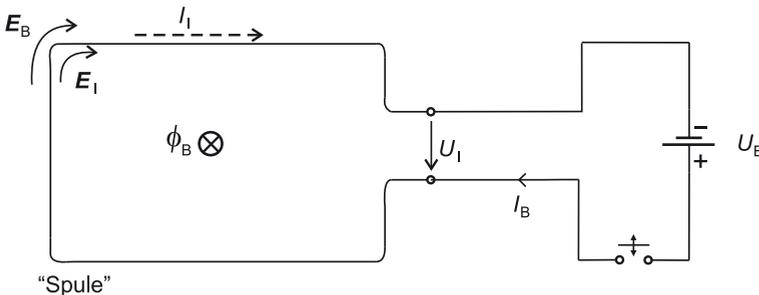


Bild 2.20 Selbstinduktion