# Skript zur Vorlesung

# **Elektrotechnik und Nachrichtentechnik**

für Informatiker

## **Arbeitsgebiet Bordsysteme**

Prof. Dr.-Ing. Stephan Frei

(Das Skript beruht in wesentlichen Teilen auf dem Skript von Prof. Dr.-Ing. Holger Hirsch, jetzt Universität Duisburg-Essen)

# Inhalt

Inhalt		2
Vorwort		4
1 Grundl	agen der Elektrotechnik	6
1.1 Fe	lder, Spannung und Strom	6
1.1.1	Das elektrisches Feld	6
1.1.2	Spannung und Strom	9
1.1.3	Das magnetische Feld	12
1.2 Str	omkreise	13
1.2.1	Elektrischer Widerstand	13
1.2.2	Kapazität	15
1.2.3	Induktivität	18
1.2.4	Energie und Leistung	19
1.2.5	Kirchhoffsche Gesetze	22
1.2.6	Strom- und Spannungsquellen	24
1.2.7	Widerstandsnetzwerke	28
1.2.8	Überlagerungssatz	30
1.2.9	Gemischte Schaltungen	32
2 Grundl	agen der Elektronik	34
2.1 Ha	lbleiterbauelemente	34
2.1.1	Materialeigenschaften	34
2.1.2	Halbleiterdiode	36
2.1.3	Transistoren	40
2.2 Re	ealisierung von digitalen Grundschaltungen	48
2.2.1	Gatter	49
2.2.2	Flip-Flop, Zähler, Schieberegister	54
2.2.3	Halbleiterspeicher	61
2.2.4	Laufzeiteffekte	63
2.3 Lo	gikfamilien und Ausgangsstufen	65
2.3.1	Logikfamilien	65
2.3.2	Open-Kollektor- und Open-Drain-Ausgangsstufen	68

	2.3.3	Tristate-Ausgangsstufen	70
3	Grundla	agen der Nachrichtentechnik	73
3	3.1 Tra	nsportmedien	73
	3.1.1	Elektrische Leitungen	73
	3.1.2	Lichtwellenleiter	78
	3.1.3	Freie Wellenausbreitung	82
3	3.2 Na	chrichtenübertragung	86
	3.2.1	Basisband-Übertragung	88
	3.2.2	Modulation	90
	3.2.3	Bandspreiztechnik, Spread-Spectrum Technique	100
	3.2.4	Zugriffsverfahren	102
4	Literatu	ır	107

## **Vorwort**

Die Elektrotechnik lässt sich in eine Vielzahl verschiedener Bereiche aufgliedern:

## **Elektrische Energietechnik**

kümmert sich um die Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie. Zu diesem Zweig der Elektrotechnik gehören Kraftwerke, kleinere Energieerzeugungseinheiten (Windkraftanlagen, Brennstoffzelle), Transformatoren, Umspannanlagen, hochspannungstechnische Einrichtungen und elektrische Verteilnetze. Neben den rein elektrotechnischen Aspekten müssen in diesen Bereichen Werkstoffprobleme gelöst sowie wirtschaftliche Aspekte und ein Energiemanagement betrachtet werden.

#### **Nachrichtentechnik**

kümmert sich um die Übertragung und Verarbeitung von Nachrichten jedweder Art. In diese Rubrik gehören Verfahren zur drahtlosen Übermittlung ebenso wie Verfahren zur Datenaufbereitung wie Kompression und Kodierung (z.B. bei Mobilfunksystemen oder Kabelfernsehen).

#### Mikroelektronik und Mikrostrukturtechnik

kümmern sich um die Technologie und den Aufbau einzelner Halbleiterbausteine und Chips (z.B. RAM-Speicher oder Prozessoren für Computer) sowie von Schaltungsgruppen, die neben reinen Halbleitern noch weitere Strukturen wie Sensoren oder Lichtleiterstrukturen enthalten können.

## Automatisierungstechnik und Robotik

kümmern sich um die Technologie und den Aufbau der elektrischen Bestandteile von Automatisierungsanlagen, wie sie z.B. im Produktionsprozess eingesetzt werden (z.B. für Montagestrassen in der Fahrzeugfertigung). Neben den rein technischen Fragestellungen ist das Management der einzelnen Systemmodule zu lösen.

Die Nachrichtentechnik ist also ein spezieller Schwerpunkt der Elektrotechnik. Die dabei genutzten Grundlagen sind hier, wie auch für alle anderen Gebiete der Elektrotechnik, identisch. Neben diesen Hauptgebieten werden weitere spezielle Themenstellungen in der Elektrotechnik bearbeitet. Hierzu zählen z.B. Medizintechnik und Fahrzeugtechnik (PKW, Nutzfahrzeuge, Flugzeuge, Schiffe, Raumfahrt, elektrische Bahnen).

In allen Bereichen der Elektrotechnik werden heute Rechnersysteme eingesetzt. Je nach Komplexität des Prozesses, der mittels Elektronik gesteuert wird, reicht das Spektrum von kleineren in so genannte Mikrokontroller integrierte Prozessoren bis zum ausgewachsenen Mehrprozessorsystem. In einem modernen Oberklasse-PKW sind heute beispielsweise etwa 70 Elektromotoren, 100 Mikrocontroller oder Mikroprozessoren in 50 Steuergeräten verbaut. Die einzelnen Komponenten sind trotz Einsatz mehrerer Datenbussysteme über ca. 3 km Kabel miteinander vernetzt. Ein Ende des wachsenden Bedarfs an Rechen- und Übertragungsleistung ist nicht

abzusehen. Die Software, ohne die die Prozessoren nutzlos sind, hat bereits eine sehr große Bedeutung, die weiter zunehmen wird.

Letztlich ist bei solch komplexen Systemen immer mehr die Informatik gefragt. So wie der Elektrotechnik-Ingenieur zumindest Grundkenntnisse der Informatik für die Entwicklung von Rechnersystemen braucht, benötigt auch der Informatiker Grundwissen über den Aufbau der Hardware. Genau dieses Grundwissen soll durch diese Vorlesung vermittelt werden. Aufgrund der zeitlichen Begrenzung für diese Vorlesung können die meisten Inhalte nur angerissen oder übersichtsweise wiedergegeben werden. Auf die in sonstigen elektrotechnischen Grundlagenveranstaltungen übliche Wechselspannungslehre und eine fundierte Betrachtung im Frequenzbereich musste zum Beispiel komplett verzichtet werden.

Ausgehend von den elektrotechnischen Grundlagen des Gleichstromkreises werden die wichtigsten Halbleiterbauelemente und deren Verschaltung zu logischen Grundelementen behandelt. Für den Transport von Informationen innerhalb von Rechnersystemen oder in Netzwerken werden die Grundlagen für die schnelle Datenübertragung auf elektrischen Leitungen und Lichtwellenleitern sowie für die drahtlose Übertragung gelegt.

## 1 Grundlagen der Elektrotechnik

## 1.1 Felder, Spannung und Strom

#### 1.1.1 Das elektrisches Feld

Elektrische Phänomene sind eng mit dem Vorhandensein elektrischer Ladungen verknüpft. Sie sind Ursprung oder Quelle elektrischer Felder. Um den Eigenschaften von Ladungen näher zu kommen, soll die Betrachtung allgemein bei der Materie begonnen werden. Unsere Materie besteht zum großen Teil aus geladenen Teilchen. Entsprechend dem Bohrschen Atommodell umkreisen in jedem Atom ein oder mehrere negativ geladene Elektronen einen positiv geladenen Atomkern. Die Wahl des Vorzeichen ist dabei von den Entdeckern der elektrischen Ladung willkürlich festgelegt worden. Zwischen den Elektronen und dem Atomkern wirkt aufgrund der elektrischen Ladung eine Anziehungskraft, welche die Zentrifugalkraft auf die Elektronen bei ihrer Bahn um den Atomkern gerade kompensiert. Man kann sich ein Atom ähnlich wie unser Sonnensystem vorstellen. Hier umkreisen die Planeten (entsprechend den Elektronen) die Sonne (Atomkern). Nur die Anziehungskraft zwischen den Ladungen wird durch die Anziehungskraft zwischen den Planetenmassen ersetzt. Durch Austausch der physikalischer Größen kann die die Planetenbewegung bestimmende Newtonsche Mechanik in die Elektrostatische Potentialtheorie transformiert werden. Die vorhandenen Analogien lassen auf einen Zusammenhang zwischen Mechanik und Elektrostatik schließen, der aber durch die Physik nicht klar nachgewiesen werden konnte.

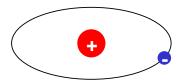


Abbildung 1: Einfaches Atommodel mit einem den Kern (Proton) umkreisenden Elektron

Die Kraft zwischen punktförmigen geladenen Körpern hängt vom Abstand zwischen den Körpern ab. Die Kraft wird umso größer, je näher sich die geladenen Körper kommen. Experimentell wurde eine quadratische Abhängigkeit der Kraft vom Kehrwert des Abstands gefunden. Experimente zeigen weiterhin, dass die Kraft proportional zur Menge der Ladung ist. Formelmäßig lässt sich dieses nach seinem Entdecker als Coulombsches Gesetz schreiben:

$$F = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot r^2} \tag{1}$$

Dabei ist r der Abstand zwischen den Ladungen,  $Q_1$  und  $Q_2$  sind die Ladungen der beiden Körper und  $\varepsilon$  ist eine Proportionalitätskonstante, die vom Material abhängt, das die Ladungen umgibt.

Die Ladung wird in der Einheit Coulomb C ausgedrückt:

$$[Q] = C$$

Ein Elektron hat die Ladung:

$$Q_{elektron} = e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$$

Die Ladung eines Atomkerns hängt von der Anzahl der dort vorhandenen Träger der positiven Ladung, den Protonen, ab. Bei einem Atomkern mit n Protonen ergibt sich eine Ladung von:

$$Q_{atom \text{ker}n} = n \cdot Q_{proton} = n \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$$

Die Gesamtladung in einem Raumvolumen kann sich nur verändern, wenn von außen Ladungen zugeführt oder Ladungen nach außen abgeführt werden (Ladungserhaltung). Auch wenn innerhalb des Volumens positive und negative Ladungsträger rekombinieren (Erzeugung von Energie), bleibt die Summe aller vorhandenen Ladungen stets konstant.

Im Gegensatz zur Gravitation aus dem Beispiel der Planetenbewegung, die nur eine anziehende Wirkung hat, ist die elektrostatische Kraft gerichtet, d.h. je nach Vorzeichen der Ladungen können sich die Ladungen anziehen oder aber auch abstoßen. Gleichartige Ladung stoßen einander ab und ungleichartige Ladungen ziehen einander an.

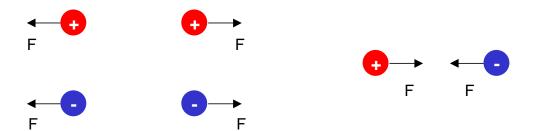


Abbildung 2: Abstoßung und Anziehung geladener Objekte

Die Kraft nach (1) ist demzufolge positiv für eine Abstoßung und negativ für eine Anziehung. Da diese Kraftwirkung ohne Berührung der Ladungen erfolgt, muss es einen Mechanismus geben, bei dem die angezogene oder abgestoßene Ladung bei Annäherung von der Existenz einer zweiten Ladung in Kenntnis gesetzt wird. Einen solchen Mechanismus nennen die Physiker ein Feld. Im Fall elektrischer Ladungen handelt es sich um ein elektrisches Feld. Für das Auftreten eines elektrischen Feldes sind nicht zwingend zwei Ladungen notwendig. Vielmehr besteht ein elektrisches Feld auch dann, wenn nur eine Ladung vorhanden ist. Die Wirkung dieses Feldes kann natürlich nur dadurch nachgewiesen werden, dass eine zweite Ladung, eine sog. Probeladung, in dieses Feld eingebracht wird. Proportional zur Ladungsmenge dieser Probeladung q und der Stärke des elektrischen Feldes E (elektrische Feldstärke) wird auf die Probeladung eine bestimmte Kraft ausgeübt. Es ergibt sich also:

$$F = q \cdot E$$

Zusammen mit dem Coulombschen Gesetz folgt für die elektrische Feldstärke in der Umgebung einer punktförmigen Ladung:

$$E = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot r^2} \tag{2}$$

Dabei ist Q die Ladung, die das elektrische Feld erzeugt. Die elektrische Feldstärke hat neben einem Betrag auch eine Richtung: Sie ist ein Vektor. In der grafischen Darstellung wird die elektrische Feldstärke als Pfeil, dessen Länge dem Betrag und dessen Richtung der Richtung des elektrischen Feldes entspricht. Diese Richtung ist die Richtung der Kraft, die auf eine positive Probeladung ausgeübt wird.

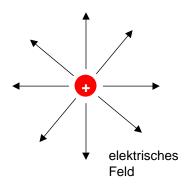
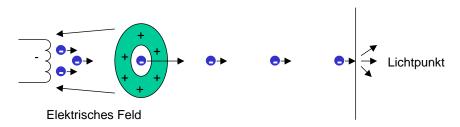


Abbildung 3: Elektrisches Feld von einer positiv geladenen Punktladung ausgehend

Die Kraftwirkung auf Elektronen durch ein elektrisches Feld wird in Bildröhren (Cathode Ray Tube), wie sie in Computermonitoren oder Fernsehempfängern eingesetzt werden, genutzt. Hier werden die Elektronen, die durch Heizung aus einem Metall (Kathode) austreten, mit einem elektrischen Feld beschleunigt. Ein Teil der so beschleunigten Elektronen tritt durch die Öffnung der Gegenelektrode und trifft nach Ablenkung auf den Schirm, wo ein Lichtpunkt erzeugt wird. Voraussetzung für die Funktion der Bildröhre ist ein Vakuum im Inneren der Röhre.



## Abbildung 4: Elektronenfluss in einer Bildröhre

Nicht nur im Vakuum, sondern auch in bestimmten Materialien können sich die Elektronen gut bewegen. In Metallen sind die Elektronen als Ladungsträger innerhalb des Molekülverbundes frei beweglich. Aufgrund der abstoßenden Wirkung der einzelnen Elektronen verteilen sich diese gleichmäßig auf der Metalloberfläche. Von außen betrachtet ist das komplette Metallstück bei einem Elektronenüberschuss negativ geladen. Werden dem Metall Elektronen entzogen, verbleibt ein Überschuss an ortsfesten positiv geladenen Atomkernen. Die verbleibenden Elektronen verteilen sich entsprechend der Anziehungskräfte ebenfalls gleichmäßig.

Die Gesamtladung kann immer nur ganzzahlige Vielfache der Ladung des Elektrons annehmen. Man spricht auch von Quantelung. Verglichen mit der Gesamtladung, die in der Elektrotechnik in der Regel für die Funktion von Bauteilen relevant ist, sind diese Ladungsquanten aber sehr klein, so dass die Stufigkeit der Gesamtladung bei den meisten technischen Anwendungen keine Rolle spielt.

Die Bestimmung des Feldes von komplexeren, nicht punktförmigen Anordnungen erfordert entweder die Superposition der Felder von sämtlichen im Metallverbund existierenden Ladungen oder bei Unterstellung einer kontinuierlichen Ladungsverteilung die Integration der Feldanteile. Diese Vorgehensweise bedeutet die Anwendung anspruchsvollerer mathematischer Methoden.

## 1.1.2 Spannung und Strom

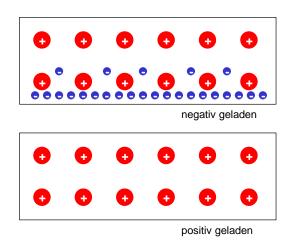


Abbildung 5: Positiv und negativ geladene Objekte

Werden zwei entgegengesetzt, also positiv und negativ, geladene Metallteile in die Nähe zueinander gebracht, so bildet sich zwischen den Teilen ein elektrisches Feld und es kommt aufgrund der Kraftwirkung des Feldes zu Ladungsverschiebungen in den einzelnen Metallteilen. Durch das Feld zwischen den geladenen Metallteilen kann eine so genannte elektrische Spannung definiert werden. Diese Spannung ist um so größer, je größer das elektrische Feld ist. Wesentlich für die Höhe der elektrischen Spannung ist die Feldverteilung entlang des Weges zwischen den Metallteilen. Die Spannung ist als das Streckenintegral über der elektrischen Feldstärke definiert:

$$U = \int_0^l E \cdot ds \tag{3}$$

Die Einheit der Spannung ist das Volt (V).

$$[U] = V$$

Aus (3) lässt sich auch die Einheit für die elektrische Feldstärke *E* ableiten: V/m. In elektrostatischen Feldern ist die Spannung unabhängig vom gewählten Integrationsweg. Bei beiden der im folgenden Bild durch die roten Linen dargestellten Integrationswege erhält man die gleiche Spannung.

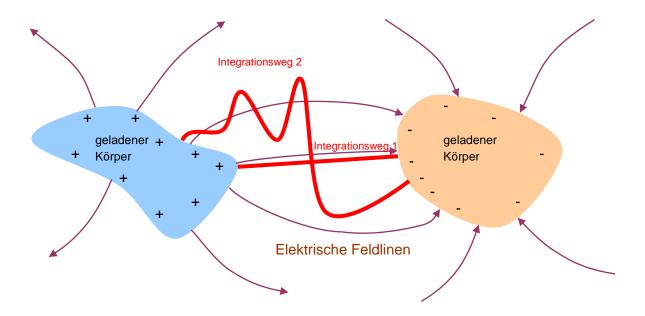


Abbildung 6: Elektrische Feldlinien zwischen zwei geladenen Körpern

Werden die beiden entgegengesetzt geladenen Metallteile miteinander verbunden, folgen die beweglichen Elektronen der durch das elektrische Feld auf sie einwirkenden Kraft und sie bewegen sich zum positiv geladenen Teil. Es fließt ein elektrischer Strom, der die Ladungsunterschiede ausgleicht. Die Verbindung kann direkt oder auch durch ein weiteres Metallteil, wie beispielsweise eine Kupferleitung erfolgen.

Die Elektronen können sich nicht unendlich schnell bewegen, vielmehr werden n Elektronen mit der Elementarladung e innerhalb einer Zeitdauer  $\Delta t$  zwischen den beiden Körpern fließen. Entsprechend ist der elektrische Strom I definiert als:

$$I = \frac{n \cdot e}{\Delta t} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \tag{4}$$

Aufgrund der negativen Ladung der Elektronen wird der Strom gemäß dieser Definition negativ. Dies begründet sich daraus, dass in der Anfangszeit der Elektrizitätslehre ein genaueres Verständnis für den Aufbau der Materie nicht vorhanden war und somit willkürlich der Strom in Bewegungsrichtung positiver Ladungsträger definiert wurde.

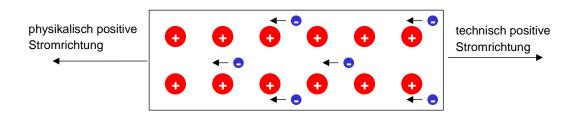


Abbildung 7: Elektronenbewegung in einem Leiter mit physikalischer und technischer Stromrichtung

Die Einheit des elektrischen Stroms ist Coulomb pro Sekunde (C/s) bzw. gebräuchlicher Ampere (A).

$$[I] = \frac{C}{s} = A$$

Ist der Ladungsausgleich abgeschlossen, existiert kein elektrisches Feld und damit keine Spannung mehr und der Strom ist folglich auf Null abgesunken. Um einen konstanten Stromfluss zu gewährleisten, muss die Spannung erhalten, oder anders gesprochen, ständig nachgeliefert werden.

Der Aufbau einer elektrischen Spannung oder der Erhalt einer Spannung bei Stromfluss erfordert die Trennung von Ladungen. Tragen die Elektroden, zwischen denen die Spannung aufgebaut wird, bereits eine Ladung, entsteht ein elektrisches Feld. Um dieses Feld weiter zu vergrößern müssen folglich Ladungen entgegen der Kraftrichtung bewegt werden. Dazu ist Energie erforderlich. Diese Energie kann von verschiedenen Prozessen stammen, von denen einige in der folgenden Tabelle aufgeführt sind:

Eingesetzte Energie	Ladungstrennungs- mechanismus	Technische Nutzung
Chemische Energie	Eintauchen von leitenden Werkstoffen in flüssige Elektrolyte	Batterien
Chemische Energie	Kaltverbrennung von Wasserstoff und Sauerstoff	Brennstoffzellen
Bewegungsenergie	Ladungsbewegung in magnetischen Feldern	Generatoren
Bewegungsenergie	Ladungsträgerverschiebung durch Verformung keramischer Materialien	Piezo-Anzünder Mikrofon
Licht	Generierung von Ladungsträgerpaaren in Halbleitern	Solarzellen
Wärme	Erwärmen von Kontaktstellen zwischen verschiedenen Metallen	Thermoelement

Eine Spannungsquelle stellt an den Klemmen Ladungsträger für den Strom bereit. Wird eine leitende Verbindung zwischen den Klemmen angeschlossen, fließen die Ladungen über die Verbindung ab. Es fließt ein elektrischer Strom. Wird der Spannungsquelle weiterhin Energie zugeführt, so stellt sich ein stationärer Strom ein.

## 1.1.3 Das magnetische Feld

Magnetische Erscheinungen sind schon seit dem Altertum bekannt. Thales von Milet (624-546 v. Chr.) beschreibt solche Erscheinungen, die von "Steinen" ausgehen, die bei dem Ort Magnesia in Kleinasien gefunden wurden. In China, wo die magnetischen Eigenschaften des Eisens möglicherweise schon im 2. Jh. v. Chr. bekannt waren, wurde auch die Richtwirkung der Magnetnadel -dort "Südweiser" genannt- entdeckt (erstmals im 12. Jh. n. Chr. erwähnt). Vermutlich durch Araber kam der Magnetkompass im 12./13. Jh. nach Europa. Seine heutige Form erhielt er im 13. Jh. von italienischen Seefahrern.

Neben diesen, den sogenannten "Dauermagneten" zuzuschreibenden Effekten, können auch bewegte elektrische Ladungen ein magnetisches Feld erzeugen. Während ruhende elektrische Ladungen lediglich ein elektrisches Feld erzeugen können, so wird durch die Bewegung eines oder mehrer Ladungsträger zusätzlich ein magnetisches Feld erzeugt. Dieses magnetische Feld vermag wie das elektrische Feld eine Kraftwirkung auszuüben.

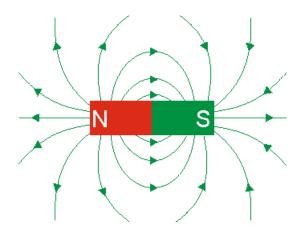


Abbildung 8: Permanentmagnet mit magnetischen Feldlinien

Betrachtet man einen stromdurchflossenen Leiter, so bildet sich in Form von konzentrischen Kreisen um den Leiter ein magnetisches Feld aus. Die magnetische Feldstärke *H* ist direkt proportional zu dem Strom *I* und indirekt proportional zum Abstand *r* von der Mittellinie des Leiters.

$$H = \frac{I}{2\pi r} \tag{5}$$

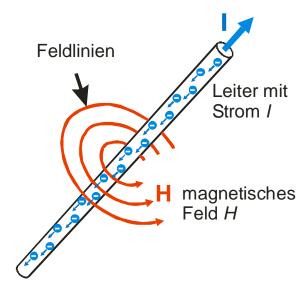


Abbildung 9: Stromdurchflossener Leiter mit magnetischen Feldlinien

## 1.2 Stromkreise

Mit den meisten Methoden, die in diesem Abschnitt betrachtet werden, sind nur solche Schaltungsstrukturen berechenbar, die sich statisch verhalten, d.h. zeitliche Änderungen von Strömen und Spannungen sind vernachlässigbar. Ein Beispiel für solch statische Schaltungen ist folgender Kreis bestehend aus einer Batterie und einer Glühlampe als angeschlossenem Verbraucher. Einmal aufgebaut wird die Glühlampe erst erlöschen, wenn die Batterie entladen ist oder ihr Glühfaden durchbrennt. Bis das passiert verhält sich die Schaltung statisch<sup>1</sup>. In den nachfolgenden Kapiteln werden wir aber sehen, dass in vielen Fällen auch bei zeitlich variierenden Vorgängen näherungsweise mit den hier abgeleiteten Gesetzen gerechnet werden kann.

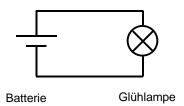


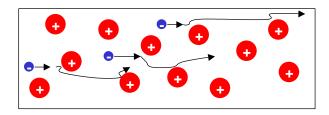
Abbildung 10: Einfacher Stromkreis

#### 1.2.1 Elektrischer Widerstand

Wird ein Strom durch ein Material geschickt, können die Ladungsträger nicht endlos beschleunigt werden, da sie früher oder später auf Atome oder Moleküle des

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Streng genommen ändert die Batterie ihre Spannung mit der Zeit, da sie sich entlädt, d.h. nach und nach ihre Energie an die Birne abgibt. Beschränkt sich die Betrachtung allerdings auf relativ zur Entladezeit kurze Zeiträume, wird die Veränderung der Spannung in dieser Zeit vernachlässigbar klein sein.

Metallverbands treffen. Ein Teil der Elektronenenergie wird bei dem Stoß als Wärmeenergie an das Metall abgegeben. Das Elektron selbst wird abgebremst. Als Folge dieser abwechselnden Beschleunigungs- und Stoßprozesse ergibt sich eine mittlere Geschwindigkeit oder Driftgeschwindigkeit der Elektronen.



#### Abbildung 11: Vereinfachte schematisierte Darstellung des Widerstands

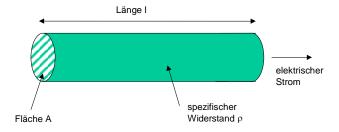
Die Atome des Materials stellen dem Strom- oder Elektronenfluss gewissermaßen einen Widerstand entgegen. D.h. wird eine bestimmte Spannung an ein Material angelegt, wird sich je nach Materialeigenschaften ein bestimmter Strom einstellen. Erhöht man die anliegende Spannung, erhöht sich in gleichem Maße der Strom. Die Proportionalitätsfaktor zwischen Spannung und Strom ist der elektrische Widerstand R. Er wird in der Einheit  $\Omega$  (Ohm) angegeben.

$$U = R \cdot I \tag{6}$$

Dieses Ohmsche Gesetz ist eines der wichtigsten formelmäßigen Zusammenhänge in der Elektrotechnik.

Nimmt man als stromführendes Element einen zylindrischen Draht an, so wird deutlich, dass der Widerstand sicherlich von der Geometrie und dem Drahtmaterial abhängt. Andererseits nimmt der Widerstand zu, wenn die Querschnittsfläche des Drahtes verkleinert wird. Er nimmt ebenfalls mit Verlängerung des Drahtes zu. Für homogene Zylinder ergibt sich für den Widerstand:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \tag{7}$$



## Abbildung 12: Zur Herleitung des spezifischen Widerstands

Dabei bezeichnet  $\rho$  den spezifischen Widerstand des Materials, I die Länge des Zylinders und A die Querschnittsfläche. Die folgende Tabelle enthält den spezifischen Widerstand für einige Materialien:

Material	Spez. Widerstand $ ho$ in $ ho$ mm²/m
Aluminium	0,027
Gold	0,022
Eisen	0,10,4
Kupfer	0,017
Messing	0,070,08
Silber	0,016

Tabelle 1: Spezifische Widerstände verschiedener Metalle

Der Gesamtwiderstand hängt nur von der Geometrie und dem spezifischen Widerstand ab. Der Widerstand ist ein in elektronischen Schaltungen häufig anzutreffendes Bauelement.

Ein Kupferdraht der Länge 10m mit der Querschnittsfläche von 1,5mm², wie er üblicherweise in der Haushaltinstallation verwendet wird, hat demnach einen Widerstand von:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} = 0.017 \cdot \frac{10}{1.5} \Omega = 0.113 \Omega = 113 \text{m}\Omega$$

Gemäß Ohmschen Gesetz fällt an diesem Draht bei einem Strom von 10A die folgende Spannung ab:

$$U = R \cdot I = 0.113\Omega \cdot 10A = 1.13V$$

In Schaltbildern wird in der Elektrotechnik folgendes Symbol verwendet:

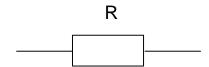


Abbildung 13: Symbol für den Ohmschen Widerstand

## 1.2.2 Kapazität

Wie in Abschnitt 1.1.2 schon dargestellt, baut sich zwischen zwei Metallkörpern (z.B. Platten) unterschiedlicher Ladung ein elektrisches Feld auf. Zwischen den Körpern entsteht eine Spannung. Wenn diese Körper voneinander isoliert sind, können die Ladungen nicht abfließen. Die Körper bleiben geladen.

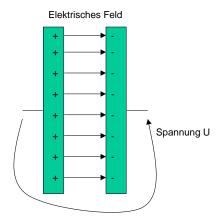


Abbildung 14: Einfacher Plattenkondensator mit idealisierten elektrischen Feldlinien

Da sämtliche Integrationswege die gleiche Spannung liefern, kann die anliegende Spannung an jeder beliebigen Stelle auf den Metallkörpern gemessen werden. Werden mehr Ladungen aufgebracht, erhöht sich proportional dazu die elektrische Feldstärke und in gleichem Maße die Spannung. Die Proportionalitätsfaktor zwischen der Ladung und der Spannung wird Kapazität C genannt.

$$Q = C \cdot U \tag{8}$$

Die Kapazität ist unabhängig von der Spannung oder der Ladung. Sie hängt nur von der Geometrie der Metallkörper, ihrem Abstand zueinander und dem dazwischen liegenden Isolierstoff (Dielektrikum) ab. Die Verkörperung der Kapazität als elektrisches Bauelement wird Kondensator genannt. Für einen Plattenkondensator (Abbildung 14) mit den Plattenflächen A und dem Plattenabstand d gilt, wenn das inhomogene elektrische Feld am Rand vernachlässigt wird:

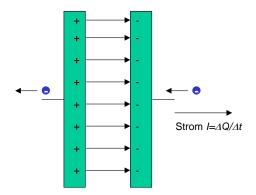
$$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{d} \tag{9}$$

Die Einheit der Kapazität ist F (Farad, 1F=1C/V).

Ein Plattenkondensator mit einer Plattenfläche von A=4cm<sup>2</sup>, dem Abstand von d=1mm und Luft als Dielektrikum ( $\epsilon$  ist hier eine Konstante und beträgt für Luft: 8,854\*10<sup>-12</sup>F/m) hat also die Kapazität:

$$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{d} = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}} \cdot \frac{4\text{cm}^2}{1\text{mm}} = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}} \cdot \frac{0,0004\text{m}^2}{0,001\text{m}}$$
$$= 3,54 \cdot 10^{-12} \text{F} = 3,54\text{pF}$$

Zur Aufladung des Kondensators müssen Ladungen zugeführt werden. Erfolgt die Aufladung mit einem konstanten Strom, so nimmt die Anzahl der Ladungen auf den Platten proportional zur Zeit zu.



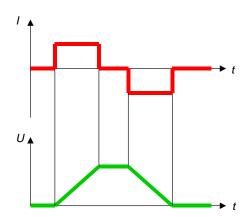
## Abbildung 15: Strom durch einen Kondensator

Nach  $Q = C \cdot U$  ist die Ladung proportional zur Spannung, so dass auch diese proportional zur Zeit ansteigt. Dieses Verhalten entspricht mathematisch einer Integration:

$$U(t) = \frac{1}{C} \cdot Q(t) = \frac{1}{C} \cdot \left( Q_0 + \int_{t_0}^t I(t') \cdot dt' \right)$$

$$\tag{10}$$

Dabei ist  $Q_0$  die Ladung, die der Kondensator zum Startzeitpunkt  $t_0$  hat. t ist der Zeitpunkt, für den die Spannung ermittelt werden soll. Den Verlauf der sich am Kondensator, der zu Beginn nicht geladen ist,  $Q_0$ =0, einstellenden Spannung bei einem sprungförmigen Strom ist in folgendem Diagramm dargestellt:



## Abbildung 16: Beispiel für Strom und Spannung

Andersherum ergibt sich der Strom aus der Spannung durch Differenzieren nach der Zeit:

$$I(t) = C \cdot \frac{dU(t)}{dt} \tag{11}$$

In Schaltbildern wird in der Elektrotechnik folgendes Symbol verwendet:

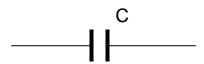


Abbildung 17: Symbol für den Kondensator

#### 1.2.3 Induktivität

Im vorangegangenen Kapitel haben wir den Kondensator als ein Bauelement kennen gelernt, in dem elektrische Energie gespeichert werden kann. Diese Fähigkeit wird als Kapazität bezeichnet. Es gibt auch Bauelemente, die magnetische Energie speichern können. Diese werden als Induktivitäten bezeichnet. Zu diesen Bauelementen gehören Spulen, Drosseln oder auch einfache Leitungen. Zur genaueren Klärung, was Induktivität ist, erinnern wir uns, dass ein fließender Strom ein magnetisches Feld erzeugen kann. Dies haben wir in Abschnitt 1.1.3 kennen gelernt. Betrachtet man nun eine Stromschleife wie in Abbildung 18 dargestellt, so bildet sich auch hier um den stromführenden Leiter herum ein magnetisches Feld aus.

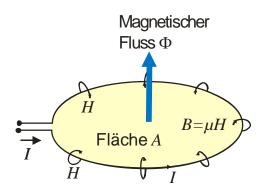


Abbildung 18: Stromschleife mit angedeutetem Verlauf des Magnetfeldes

In der Fläche *A*, welche die Schleife umschließt, ist die magnetische Feldstärke *H* immer gleichgerichtet. In den meisten Medien wie auch die Luft kann die magnetische Feldstärke direkt durch eine weitere physikalische Größe, die magnetische Induktion *B*, ausgedrückt werden. Es gilt:

$$B = \mu \cdot H \tag{12}$$

Die magnetische Induktion ist also direkt proportional zur magnetischen Feldstärke.  $\mu$  bezeichnet die magnetische Permeabilität und ist eine Materialkonstante. Für Luft gilt  $\mu=\mu_0=4\pi10^{-7}~Vs~/Am$ .

Integriert man die magnetische Induktion über der Fläche A erhält man den magnetischen Fluss  $\Phi$ :

$$\phi = \iint_A B \, dA \tag{13}$$

Da das magnetische Feld H bzw. die magnetische Induktion B direkt proportional zum Strom sind, muss auch der magnetische Fluss dieser Proportionalität folgen. Für diese Proportionalität hat man die physikalische Größe der Induktivität L eingeführt.

$$\phi = L \cdot I \tag{14}$$

Die Induktivität L ist wie die Kapazität nur von der Geometrie und den verwendeten Materialien abhängig. Sie gibt die Fähigkeit einer Konfiguration an, einen magnetischen Fluss zu erzeugen.

Der magnetische Fluss bzw. die Induktivität sind bei einem Transformator von Bedeutung. Ein Transformator kann eine sich verändernde Spannung herauf- oder herabsetzen.

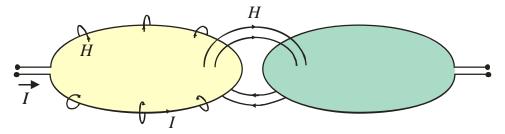


Abbildung 19: Überkopplung des magnetischen Feldes auf eine benachbarte Schleife

Grob vereinfacht findet man es in einem Transformator zwei Schleifen vor. In Abbildung 19 ist das grundsätzliche Wirkungsprinzip für einen Transformator dargestellt. Die Feldlinien, die aufgrund des Stroms in der linken Stromschleife entstehen, durchdringen die rechte Schleife, es entsteht eine Verkopplung. Die magnetischen Flüsse der beiden Schleifen sind miteinander verkoppelt. Bei Transformatoren wird genau diese magnetische Verkopplung zwischen zwei Stromkreisen genutzt. Durch Verwendung von Spulen mit vielen Windungen anstatt einer Schleife (nur eine Windung) kann die wirksame Koppelfläche vergrößert werden. Auch die Wahl von sogenannten Ferrit-Materialien im Transformator, die die magnetische Permeablität vergrößern, erhöht die Verkopplung deutlich und erlaubt kleinere Bauformen.

## 1.2.4 Energie und Leistung

Wird eine Ladung Q von einem Punkt a zu einem Punkte b in einem bestehenden elektrischen Feld E entgegen der auf die Ladung wirkenden Kraft F bewegt, muss die Energie W aufgebracht werden:

$$W = \int_{a}^{b} F \cdot ds = Q \cdot \int_{a}^{b} E \cdot ds = Q \cdot U$$
 (15)

Die Einheit für die Energie ist J (Joule).

Bei Kernforschungsexperimenten in der Physik werden oft Elektronen betrachtet. Da diese die Elementarladung e tragen, hat sich in diesem Sektor auch die Einheit eV (Elektronenvolt) für die Energie etabliert.

Als Leistung P wird der Differentialquotient

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{dQ}{dt} \cdot U = I \cdot U \tag{16}$$

bezeichnet, wobei die oben angegebene zeitlich konstanten Spannung<sup>2</sup> berücksichtigt wird. Die Leistung hat die Einheit W (Watt, 1W=1J/s). Wenn durch einen Widerstand R beim Anlegen einer Spannung U der Strom I fließt, wird der Widerstand an seinen Klemmen die elektrische Leistung

$$P = I \cdot U = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R} \tag{17}$$

aufnehmen. Diese Leistung wird vom Widerstand wegen der Stossprozesse bei der Ladungsträgerbewegung in Wärme umgewandelt und an die Umgebung abgegeben. Ein Widerstand stellt also einen Wandler dar, der elektrische Leistung in Wärmeleistung umsetzt. Die im Haushalt verwendeten elektrischen Heizsysteme, wie Heizdecken oder der Heizteil eines Haarföns sind typische Vertreter dieser Widerstände. In der Schaltungstechnik können jedoch auch andere Bauelemente als Widerstand dargestellt werden, wenn diese ebenfalls elektrische Leistung in andere Leistungsformen umwandeln. So kann eine Glühlampe, deren Aufgabe die Wandlung elektrischer Leistung in Lichtleistung ist, wie ein Widerstand betrachtet werden.

Sind z.B. auf einer Glühlampe die Angaben 21W / 12V aufgedruckt, so kann der Strom zu:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{21W}{12V} = 1,75A$$

bestimmt werden. Der Widerstand der Heizwendel im heißen Zustand errechnet sich zu:

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{(12\text{V})^2}{21\text{W}} = 6.86\Omega$$

Der Kondensator kann bekanntlich Ladungen speichern. Daher schließt sich konsequenterweise die Frage an, ob er auch in der Lage ist, elektrische Energie zu speichern. Dazu wird zunächst davon ausgegangen, dass ein Kondensator mit einer bestimmten Ladung  $Q_0$  aufgeladen sei. Entsprechend  $Q = C \cdot U$  führt dies dazu, dass eine Spannung  $U_0$  am Kondensator anliegt. Wird nun eine leitende Verbindung zwischen den Kondensatorplatten hergestellt, fließen Ladungen von der einen zur anderen Platte. Es fließt ein negativer Strom, denn der Kondensator wird entladen. Die Ladung jeder einzelnen Platte reduziert sich und mit ihr die Spannung am Kondensator. Dieser Vorgang hält so lange an, bis die Platten des Kondensators vollständig entladen sind. Entsprechend verschwindet auch die Spannung.

-

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Bei zeitlich variierenden elektrischen Feldern und damit variierenden Spannungen ergeben sich für die Energie und die Leistung deutlich komplexere Ableitungen. Die Leistung als Produkt von Strom und Spannung kann jedoch auch auf zeitveränderliche Größen angewendet werden.

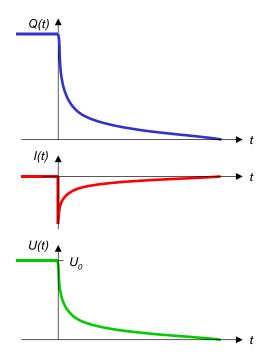


Abbildung 20: Verlauf der Ladung, Strom und Spannung über der Zeit

Die Leistung, die beim Entladevorgang vom Kondensator entnommen wird (negatives Vorzeichen) und der leitenden Verbindung (Widerstand) zugeführt wird, ist:

$$P(t) = U(t) \cdot I(t) \tag{18}$$

Für den Strom lässt sich mit  $Q = C \cdot U$  und  $I(t) = \frac{dQ(t)}{dt}$  schreiben:

$$I(t) = C \cdot \frac{dU(t)}{dt} \tag{19}$$

Daher folgt für die Leistung:

$$P(t) = C \cdot \frac{dU(t)}{dt} \cdot U(t)$$

Diese Differentialgleichung lässt sich durch die Methode "Trennung der Veränderlichen" umformen:

$$P(t) \cdot dt = C \cdot U \cdot dU$$

Nach Integration ergibt sich direkt die Energie, die dem Kondensator entnommen wurde, zu:

$$\int_{0}^{t_{1}} P(t) \cdot dt = W_{e} = \int_{U_{0}}^{0} C \cdot U \cdot dU = -\frac{1}{2} C \cdot U_{0}^{2}$$

Das negative Vorzeichen kennzeichnet die Entnahme von Energie. Ein auf die Spannung U<sub>0</sub> aufgeladener Kondensator speichert demnach die elektrische Energie:

$$W = \frac{1}{2}C \cdot U_0^2 \tag{20}$$

**Beispiel:** Berechnung der Überbrückungszeit mit einem Gold-Cap (spezieller Kondensator mit sehr hoher Kapazität).

Gold-Caps erfreuen sich zunehmender Beliebtheit zur Überbrückung von Stromunterbrechungen zur Pufferung von Speicherinhalten (Echtzeituhr, Einstelldaten). Ein solcher Gold-Cap mit der Kapazität 2 F soll bei bestehender Stromversorgung über das Netz auf eine Spannung von  $U_1=5$  V aufgeladen sein. Nach einem Stromausfall wird er mit einem Strom von 10  $\mu$ A entladen (Stromaufnahme des angeschlossenen Speichers). Der Speicher verliert seine Information, wenn die Spannung 2,8 V unterschreitet. Welche Energie wird am Anfang im Kondensator gespeichert?

$$W = \frac{1}{2}C \cdot U_0^2 = \frac{1}{2} \cdot 2F \cdot (5V)^2 = 25J$$

Wie lange kann die Stromversorgung unterbrochen bleiben, ehe Information verloren geht?

Eine konstante Stromentnahme führt zu einer linearen Spannungsabnahme.

$$I = C \cdot \frac{dU}{dt} = C \cdot \frac{\Delta U}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = C \cdot \frac{\Delta U}{I} = 2F \cdot \frac{5V - 2.8V}{10\mu A} = 440000s = 122,22h$$

#### 1.2.5 Kirchhoffsche Gesetze

Die Kirchhoffschen Gesetze sind die elementaren Sätze, auf denen die Berechnung elektronischer Schaltungen beruht.

#### 1.2.5.1 Knotensatz

Die Summe der Ströme, die in eine elektrische Schaltung hineinfließen, ist zu jedem Zeitpunkt gleich der Summe der Ströme, die aus der Schaltung herausfließen (Abbildung 22).

Dieser Satz hat sowohl für die Verhältnisse an den Klemmen von einfachen Bauelementen, wie Widerstand, Kondensator oder Quellen als auch für komplexe Zusammenschaltungen von Bauelementen Konsequenzen. Im Fall von Bauteilen mit zwei Klemmen wie Widerstand oder Kondensator sagt er aus, dass der in eine Klemme hineinfließende Strom gleich dem aus der anderen Klemme herausfließenden Strom sein muss. Der Strom kann nicht in einem Knoten oder Bauelement verschwinden.

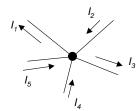
In einer Gleichung lässt sich der Knotensatz folgendermaßen formulieren. Für jeden Knoten gilt:

$$\sum_{i=1}^{N} I_{i} = 0 {(21)}$$

$$\begin{array}{c|c}
 & R & \downarrow \\
\hline
 & \downarrow & C & \downarrow \\
\hline
 & \downarrow & C & \downarrow \\
\end{array}$$

## Abbildung 21: Gleichheit der hinein- und herausfließenden Ströme

Werden mehrere Bauelemente in einem Punkt miteinander verbunden, so kann dieser Verbindungspunkt ebenfalls als eine Art elektrisches Bauelement aufgefasst werden, für den der Knotensatz gilt (alles, was in dieses Element hineinfließt, muss auch herausfließen). Für die dargestellte Verbindung gilt also:



## Abbildung 22: In einen Knoten hinein- und herausfließende Ströme

$$-I_1 + I_2 - I_3 + I_4 + I_5 = 0$$

Die Richtung der Pfeile kann willkürlich gewählt werden, ohne dass der Knotensatz seine Gültigkeit verliert. Wichtig dabei ist nur, dass die aufgestellte Gleichung sich an der Pfeilrichtung orientiert. Die Richtung des tatsächlich fließenden Stroms spiegelt sich dann im Vorzeichen wieder. Bei einem positiven Vorzeichen fließt der Strom in Pfeilrichtung, bei einem negativen Vorzeichen fließt er entgegen der Pfeilrichtung.

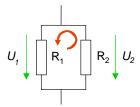
#### 1.2.5.2 Maschensatz

Die Summe der Spannungen in einer Masche einer elektrischen Schaltung ist zu jedem Zeitpunkt 0.

Eine Masche ist dabei eine geschlossene Kette von Bauelementen innerhalb einer Schaltung. Für jede Masche gilt:

$$\sum_{i=1}^{N} U_i = 0 \tag{22}$$

Die einfachste Masche besteht aus zwei Bauelementen. Hierbei besagt der Maschensatz, dass die Spannung an den parallelgeschalteten Bauelementen gleich sein muss.



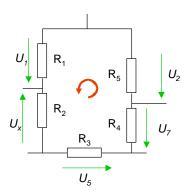
## Abbildung 23: Spannungen bei einer Parallelschaltung

Die Maschengleichung für diesen Fall lautet:

$$U_1 - U_2 = 0 \Rightarrow U_1 = U_2$$

Auch hier kann die Richtung der Pfeile willkürlich gewählt werden, ohne dass der Maschensatz seine Gültigkeit verliert. Wichtig dabei ist nur, dass die aufgestellte Gleichung sich an der Pfeilrichtung orientiert. Die Richtung der tatsächlich anliegenden Spannung spiegelt sich dann im Vorzeichen wieder. Bei einem positiven Vorzeichen liegt die Spannung in Pfeilrichtung an, bei einem negativen Vorzeichen liegt sie entgegen der Pfeilrichtung an.

Eine komplexere Masche ist in der folgenden Darstellung abgebildet. Dabei können an den einzelnen Verbindungspunkten weitere Bauelemente angeschlossen sein, die aber die Maschengleichung nicht beeinflussen.



#### Abbildung 24: Komplexere Masche

Für diese Masche lautet die Maschengleichung:

$$U_1 - U_x + U_5 - U_7 - U_2 = 0$$

## 1.2.6 Strom- und Spannungsquellen

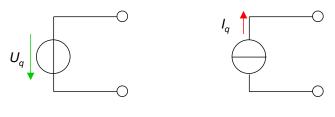
## 1.2.6.1 Ideale Quellen

Es werden zwei Arten von Quellen unterschieden:

Spannungsquelle: stellt eine eingeprägte Spannung an ihren Klemmen zur Verfügung. Der Strom durch die Quelle hängt dann von der angeschlossenen Last ab.

Stromquelle: stellt einen eingeprägten Strom an den Klemmen zur Verfügung. Die Spannung an den Klemmen hängt dann von der angeschlossenen Last ab.

Die Symbole der idealen Quellen sind:



Ideale Spannungsquelle

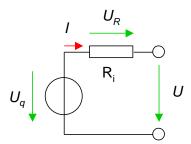
Ideale Stromquelle

Abbildung 25: Symbole für ideale Spannungs- und Stromquelle

#### 1.2.6.2 Reale Quellen

## 1.2.6.2.1 Reale Spannungsquelle

Bei einer realen Spannungsquelle ist die an den Klemmen zur Verfügung gestellte Spannung nicht unabhängig von der angeschlossenen Last und damit vom entnommenen Strom. Die Spannung sinkt unter den Sollwert, wenn die Stromentnahme erhöht wird. Dieses Verhalten kann durch das folgende Ersatznetzwerk nachgebildet werden.



#### Abbildung 26: Reale Spannungsquelle mit Innenwiderstand

An dem Innenwiderstand  $R_i$  fällt eine Spannung ab, die gemäß dem Ohmschen Gesetz dem Strom I proportional ist. An den Klemmen tritt folglich die Quellenspannung  $U_q$  vermindert um den Spannungsabfall am Widerstand auf. Dieses Ergebnis lässt sich mathematisch durch Anwenden des Maschensatzes gewinnen:

$$U_q - U - U_R = U_q - U - R_i \cdot I = 0 \Longrightarrow U = U_q - R_i \cdot I$$

Das Verhalten der realen Spannungsquelle kann als Kennlinie in einem U-l-Diagramm dargestellt werden:

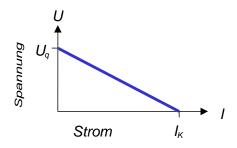


Abbildung 27: Kennlinie für eine reale Spannungsquelle

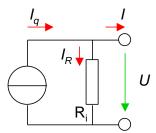
Der Spannungswert, der an den Klemmen ohne Entnahme eines Stromes (*I=0*) auftritt, wird als Leerlaufspannung oder Quellspannung bezeichnet. Der Wert des Stromes, für den die Spannung gerade Null wird, heißt Kurzschlussstrom. Der Widerstand in dem Ersatznetzwerk ist der Innenwiderstand der realen Spannungsquelle.

Nahezu alle Quellen, die in heutigen elektrischen Schaltungen zur Versorgung eingesetzt werden, lassen sich als reale Spannungsquellen modellieren. Besonders starke Quellen (z.B.: Starterbatterie im Automobil) haben einen kleinen Innenwiderstand, während schwächere Quellen (z. B. Knopfzellen in Uhren) einen vergleichsweise hohen Innenwiderstand haben.

Eine ideale Spannungsquelle entspricht einer realen Spannungsquelle mit dem Innenwiderstand von Null Ohm.

#### 1.2.6.2.2 Reale Stromquelle

Das Verhalten einer realen Quelle kann genauso durch eine reale Stromquelle nachgebildet werden, deren Ersatznetzwerk die folgende Darstellung zeigt:

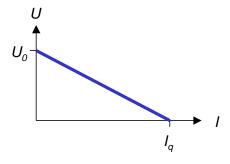


#### Abbildung 28: Reale Stromquelle mit Innenwiderstand

Nach dem Knotensatz gilt für den oberen Verbindungsknoten:

$$I_q = I_R + I = \frac{U}{R_i} + I \Longrightarrow I = I_q - \frac{U}{R_i}$$

Wird dieses wiederum in ein U-I-Diagramm eingetragen, ist erkennbar, dass die reale Spannungsquelle und die reale Stromquelle die gleiche Charakteristik haben.



## Abbildung 29: Kennlinie für eine reale Stromquelle

Eine ideale Stromquelle entspricht einer realen Stromquelle mit einem unendlich hohen Innenwiderstand.

Ist der Strom an den Klemmen Null, liegt die Leerlaufspannung  $U_0 = R_i \cdot I_q$  an. Ein Vergleich mit der realen Spannungsquelle zeigt eine Dualität der beiden Quellentypen.

	Reale Spannungsquelle	Reale Stromquelle
Innenwiderstand	R <sub>i</sub>	R <sub>i</sub>
Leerlaufspannung	U <sub>q</sub>	$R_i \cdot I_q$
Kurzschlussstrom	U <sub>q</sub> /R <sub>i</sub>	$I_{q}$

Eine reale Spannungsquelle kann also durch Gleichsetzen der Zeilen in der Tabelle in eine reale Stromquelle umgewandelt werden und umgekehrt.

Die Daten des Ersatznetzwerkes können beispielsweise aus Messungen gewonnen werden. Letzlich müssen zwei der drei Größen Leerlaufspannung, Kurzschlussstrom und Innenwiderstand bestimmt werden. Bei üblichen zur Versorgung verwendeten Spannungsquellen kann die Leerlaufspannung unproblematisch bestimmt werden, indem bei nicht angeschlossenem Verbraucher die Spannung an den Klemmen gemessen wird (1). In diesem Fall ist der Strom gleich Null, es fällt keine Spannung am Innenwiderstand ab.

Es empfiehlt sich aber nicht, direkt den Kurzschlussstrom zu messen, da dieser sehr hoch sein kann und somit eine Gefährdung für die Quelle und Messgerät darstellt. Auch der Innenwiderstand ist meist nicht direkt bestimmbar. Daher muss eine indirekte Messung erfolgen. An die Klemmen wird eine bekannte Last angeschlossen (2), deren Widerstand in etwa dem Innenwiderstand entsprechen sollte (unter diesen Voraussetzungen ist die Genauigkeit am höchsten). Mit angeschlossener Last wird die Spannung gemessen ( $U_l$ ).

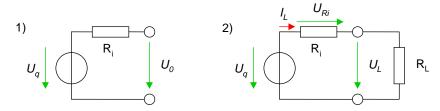


Abbildung 30: Bestimmung des Innenwiderstands

Der Strom durch Innenwiderstand und den Lastwiderstand kann mit dem Ohmschen Gesetz bestimmt werden:

$$I_L = \frac{U_L}{R_L}$$

Damit beträgt der Spannungsabfall am Innenwiderstand:

$$U_{Ri} = I_L \cdot R_i = U_L \cdot \frac{R_i}{R_I}$$

Aus dem Maschensatz ergibt sich:

$$U_{q} - U_{L} - U_{Ri} = U_{q} - U_{L} - U_{L} \cdot \frac{R_{i}}{R_{I}} = 0$$

Daraus bestimmt sich der Innenwiderstand zu:

$$R_i = R_L \cdot \left(\frac{U_q - U_L}{U_L}\right)$$

#### 1.2.7 Widerstandsnetzwerke

Eine Schaltung besteht meist aus mehreren Widerständen, die in bestimmter Weise miteinander verschaltet sind. Oft interessiert aber nur der Widerstand, der insgesamt zwischen zwei bestimmten Knoten der Schaltung besteht. Ziel einer möglichst einfachen Netzwerkberechnung ist es daher, diesen zu bestimmen und durch einen Ersatzwiderstand zwischen den betrachteten Knoten zu ersetzen.

Es kann zwischen den beiden grundlegenden Verschaltungstypen Serienschaltung und Parallelschaltung unterschieden werden.

#### 1.2.7.1 Serienschaltung

Bei der Serienschaltung ist der Strom durch alle Widerstände identisch. Voraussetzung dafür ist natürlich, dass an den einzelnen Verbindungspunkten zwischen den Widerständen keine weiteren Bauelemente angeschlossen sind.

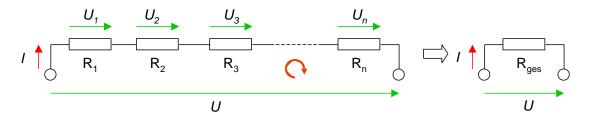


Abbildung 31: Serienschaltung aus Widerständen

Nach dem Maschensatz gilt:

$$\sum_{i=1}^{n} U_{i} - U = 0 \Longrightarrow U = \sum_{i=1}^{n} U_{i}$$

Mit dem Ohmschen Gesetz lässt sich schreiben:

$$U = \sum_{i=1}^{n} (R_i \cdot I) = \left(\sum_{i=1}^{n} R_i\right) \cdot I = R_{ges} \cdot I$$

Der Gesamtwiderstand, bzw. Widerstand des Ersatznetzwerkes entspricht also der Summe aller in Serie geschalteter Widerstände.

$$R_{ges} = \sum_{i=1}^{n} R_i$$

## 1.2.7.2 Parallelschaltung

Bei der Parallelschaltung wird durch sukzessive Anwendung des Maschensatzes deutlich, dass die Spannung an sämtlichen parallel geschalteten Widerständen gleich sein müssen.

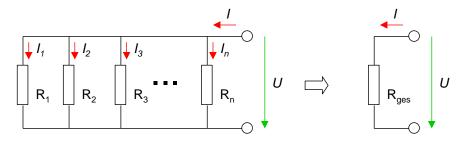


Abbildung 32: Parallelschaltung aus Widerständen

An dem oberen Verbindungsknoten sind alle Widerstände angeschlossen, so dass hierfür der Knotensatz anwendbar ist:

$$I = \sum_{i=1}^{n} I_{i}$$

Die Anwendung des Ohmschen Gesetzes liefert:

$$I = \sum_{i=1}^{n} \left( \frac{U}{R_i} \right) = \left( \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i} \right) \cdot U = \frac{1}{R_{qqq}} \cdot U$$

Für den Gesamtwiderstand folgt daraus:

$$\frac{1}{R_{ges}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i} \Rightarrow R_{ges} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i}}$$

Im Fall von zwei parallel geschalteten Widerständen lässt sich dies vereinfachen zu:

$$R_{ges} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \tag{23}$$

## 1.2.7.3 Komplexere Widerstandsnetzwerke

Durch sukzessive Anwendung der Substitution einer Serien- oder Parallelschaltung durch einen Ersatzwiderstand lassen sich auch sehr komplexe Netzwerke reduzieren. Ein Beispiel ist in folgender Darstellung verdeutlicht.

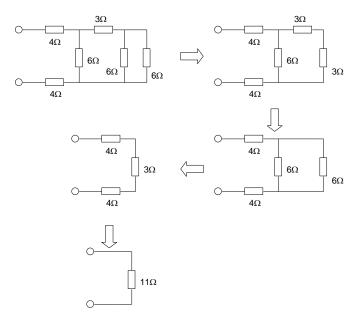
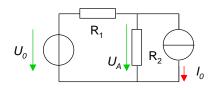


Abbildung 33: Komplexere Widerstandsnetzwerke

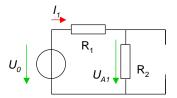
## 1.2.8 Überlagerungssatz

Der Überlagerungssatz beschreibt die schaltungstechnische Umsetzung des Superpositionsprinzips der Physik. Nach dem Superpositionsprinzip kann in linearen Systemen (Ursache und Wirkung stehen in einem linearen Zusammenhang) die Wirkung einer Ursache unabhängig von allen anderen Ursachen und Wirkungen berechnet werden. Die Gesamtwirkung kann durch Summieren der Einzelwirkungen bestimmt werden. In der Schaltungstechnik sind Strom- und Spannungsquellen die Ursachen, die Wirkungen sind Ströme oder Spannungen an bestimmten Punkten einer Schaltung. Der Überlagerungssatz soll exemplarisch an der folgenden Schaltung verdeutlicht werden:



## Abbildung 34: Schaltungsbeispiel mit Strom und Spannungsquelle

Diese Schaltung enthält eine Spannungsquelle  $U_0$  und eine Stromquelle  $I_0$ , deren Wirkungen auf die zu bestimmende Spannung  $U_A$  nun nacheinander untersucht werden. Zunächst soll die Wirkung der Spannungsquelle betrachtet werden. Dazu muss die "Ursache Stromquelle" zunächst deaktiviert werden. Entsprechend dem vorherigen Kapitel hat eine ideale Stromquelle, wie sie im Schaltbild abgedruckt ist, einen unendlich hohen Innenwiderstand. Ein Deaktivieren der Stromquelle bedeutet folglich, dass sie ersatzlos aus dem Schaltkreis herausfallen kann. Das Schaltbild reduziert sich also auf eine Spannungsquelle und zwei Widerstände:



#### Abbildung 35: Schaltungsbeispiel ohne Stromquelle

Der Strom  $I_1$  fließt durch die Spannungsquelle und beide Widerstände. Der Maschensatz liefert:

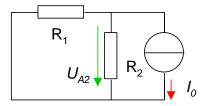
$$U_0 = R_1 \cdot I_1 + R_2 \cdot I_1 \Longrightarrow I_1 = \frac{U_0}{R_1 + R_2}$$

Die gesuchte Teilwirkung auf die zu bestimmende Spannung  $U_{A1}$  ist damit:

$$U_{A1} = R_2 \cdot I_1 = U_0 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Die Quellspannung  $U_0$  wird also durch einen Faktor, der nur von den Widerstandswerten abhängig ist, geteilt. Eine solche Schaltung wird in der Elektrotechnik Spannungsteiler genannt.

Nun muss die Wirkung der Stromquelle allein untersucht werden. Da die ideale Spannungsquelle einen Innenwiderstand von Null Ohm hat, wird sie durch einen Kurzschluss ersetzt.



#### Abbildung 36: Untersuchung der Stromquelle

 $R_1$  und  $R_2$  sind in der verbleibenden Schaltung parallel geschaltet und lassen sich gemäß Gleichung (23) zu einem Ersatzwiderstand zusammenfassen. Für die Spannung  $U_{A2}$  folgt dann:

$$U_{A2} = -R_{ersatz} \cdot I_0 = -\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot I_0$$

Die gesamte Ausgangsspannung der ursprünglichen Schaltung lässt sich nun durch Addition (Superposition) der Einzelwirkungen gewinnen:

$$U_{A} = U_{A1} + U_{A2} = \frac{R_{2}}{R_{1} + R_{2}} \cdot U_{0} - \frac{R_{1} \cdot R_{2}}{R_{1} + R_{2}} \cdot I_{0} = \frac{R_{2}}{R_{1} + R_{2}} \cdot (U_{0} - R_{1} \cdot I_{0})$$

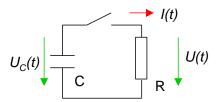
Das Prinzip der Überlagerung lässt sich in linearen Schaltungen bei beliebig vielen Strom- und Spannungsquellen anwenden. Die Teilwirkung wird betrachtet, indem nur eine Quelle aktiv bleibt. Alle anderen deaktivierten Spannungsquellen werden durch einen Kurzschluss ersetzt, die deaktivierten Stromguellen fallen heraus. Die

Teilwirkung wird für jede Quelle in der Schaltung bestimmt und anschließend zur Gesamtwirkung addiert.

Eine weitere Möglichkeit zur Lösung ist die Umwandlung der Strom- in eine Spannungsquelle bzw. die Umwandlung der Spannungs- in eine Stromquelle.

## 1.2.9 Gemischte zeitabhängige Schaltungen

Sämtliche oben abgeleitete Sätze gelten nicht nur für Widerstände, sondern auch für andere Bauelemente. Anstelle des Ohmschen Gesetzes ist entsprechend die für das Bauelement maßgebende Charakteristik einzusetzen. Dabei entstehen bei manchen Bauelementen Differentialgleichungen. Im Falle von nichtlinearen Bauelementen, die betrachtet nächsten Kapitel werden, können auch nichtlineare Differentialgleichungen entstehen. Das Vorgehen bei einer Berechnung mit Bauelemtenten mit einer Speichercharakteristik soll am Beispiel einer einfachen Schaltung aus Kondensator und Widerstand verdeutlicht werden. Der Kondensator kann Ladungen speichern und diese wieder abgeben. Die Aufnahme und Abgabe von Ladungen ist zeitabhängig.



#### Abbildung 37: Einfacher Stromkreis mit Schalter

Der Kondensator soll bei geöffnetem Schalter zunächst auf eine Spannung  $U_0$  aufgeladen sein. Im Zeitpunkt t=0 werde der Schalter geschlossen, wodurch ein Strom durch den Widerstand R fließt. Es interessiert der zeitliche Verlauf der Spannung U(t). Nach dem Knotensatz fließt bei geschlossenem Schalter durch den Kondensator und den Widerstand derselbe Strom I(t). Der Maschensatz besagt, dass bei geschlossenem Schalter die Spannung am Kondensator und am Widerstand gleich sind.

$$U_C(t) = U(t)$$

Also gilt für die Knotengleichung:

$$\frac{U(t)}{R} = -C \cdot \frac{dU(t)}{dt} \Leftrightarrow R \cdot C \cdot \frac{dU(t)}{dt} + U(t) = 0$$
(24)

Das negative Vorzeichen entsteht dadurch, dass der Strom durch den Kondensator entgegen der Spannung gerichtet ist. Es handelt sich um eine Differentialgleichung erster Ordnung, die durch einen Exponentialansatz (Standardverfahren zur Lösung von einfachen Differentialgleichungen) gelöst werden kann:

$$U(t) = A \cdot e^{\lambda \cdot t} \tag{25}$$

Die im Ansatz enthaltenen Konstanten A und  $\lambda$  müssen durch Einsetzen und Berücksichtigung der Randbedingungen bestimmt werden. Durch Einsetzen folgt:

$$R \cdot C \cdot A \cdot \lambda \cdot e^{\lambda \cdot t} + A \cdot e^{\lambda \cdot t} = 0 \Rightarrow \lambda = -\frac{1}{R \cdot C}$$
(26)

A wird durch die Randbedingung (Kondensator zum Zeitpunkt t=0 auf  $U_0$  aufgeladen) ermittelt:

$$U(0) = A \cdot 1 = U_0 \Longrightarrow A = U_0$$

Somit lautet die Lösung für *t*≥0:

$$U(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}} \tag{27}$$

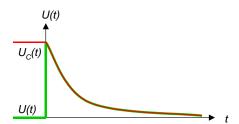


Abbildung 38: Spannung am Kondensator über der Zeit

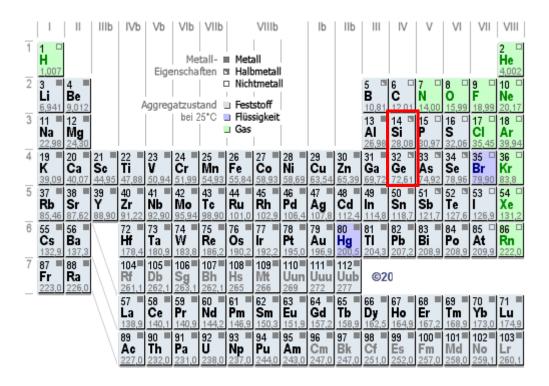
## 2 Grundlagen der Elektronik

## 2.1 Halbleiterbauelemente

Halbleiterbauelemente sind in heutigen elektronischen Schaltungen die wichtigsten Bauelemente. Sie haben nahezu vollständig die bis in die 60er Jahre verwendeten Elektronenröhren verdrängt. Die Bezeichnung Halbleiterbauelemente leitet sich aus dem Material ab, aus dem die Bauelemente hergestellt werden. Unter Halbleitern versteht man hochreine chemische Elemente oder Verbindungen, die erst durch gezielte Verunreinigungen Leitereigenschaften bekommen.

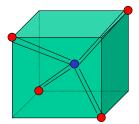
## 2.1.1 Materialeigenschaften

Das Halbleitermaterial, das am häufigsten Verwendung findet, ist das Silizium. In gebundener Form ist Silizium im Sand in nahezu unbegrenzter Menge auf der Erde vorhanden. Im Periodensystem der Elemente ist Silizium (Si) neben dem ebenfalls für Halbleiterbauelemente verwendeten Germanium (Ge) in der vierten Hauptgruppe zu finden.



#### Abbildung 39: Periodensystem der Elemente

Bei Elementen der vierten Hauptgruppe ist die äußere Elektronenschale mit jeweils vier Elektronen besetzt. In einem reinen Kristall aus Silizium bildet jeweils eins dieser Elektronen mit einem Elektron eines Nachbaratoms ein Elektronenpaar, wodurch eine Anziehungskraft zwischen den Atomen ausgeübt wird. Bei vier Elektronen auf der äußeren Schale ist dies gleichbedeutend mit vier Nachbaratomen, die sich räumlich um das betrachtete Si-Atom gruppieren.



#### Abbildung 40: Anordnung der Elektronen bei Elementen der vierten Hauptgruppe

Dieses dreidimensionale Schema wird zugunsten einer besseren Darstellung der Vorgänge zweidimensional projiziert. Die Zahlen neben der Atombezeichnung kennzeichnen die Anzahl der Elektronen, die das Atom zur Bindung beiträgt.

## Abbildung 41: Gittermodell für Silizium

Neben den Halbleitern aus einem einzigen Element (IV-Halbleiter) gibt es Halbleiter aus Verbindungen von zwei Elementen, die z.B. in der 3. und 5. Hauptgruppe des Periodensystems verzeichnet sind (III/V-Halbleiter).

Beispiele für solche Halbleitermaterialien sind InP (Indiumphosphid) und GaAs (Galliumarsenid). Letzteres ist das Ausgangsmaterial zur Herstellung von leuchtenden Halbleitern (Leuchtdiode, Halbleiterlaser). Im Gitterverbund sind die beiden Atomsorten abwechselnd angeordnet.

#### Abbildung 42: Gittermodell für Galliumarsenid

Diese Halbleitermaterialien sind in reiner Form nichtleitend. Alle Elektronen in den äußeren Schalen werden für die Elektronenpaarbindung benötigt, so dass keine frei beweglichen Elektronen für einen Stromfluss verfügbar sind. Dies ändert sich, wenn einige Atome des Halbleitergitters durch Fremdatome ersetzt werden. Ein solcher Vorgang wird Dotierung genannt. Wird in einem Siliziumgitter beispielsweise ein Si-Atom durch ein Phosphoratom (5. Hauptgruppe) ersetzt, so steht an diesem **Phosphoratom** ein freies Elektron zur Verfügung, das nicht für Elektronenpaarbindung benötigt wird. Dieses kann nun von Atom zu Atom springen

und dabei zu einem elektrischen Strom beitragen. Die Leitfähigkeit des Halbleiters erhöht sich mit zunehmender Anzahl der Fremdatome.

#### Abbildung 43: n-Dotierung

Da in diesem dotierten Halbleiter Elektronen, also negative Ladungsträger, frei beweglich sind, wird diese Art der Dotierung n-Dotierung genannt.

Wird anstelle eines Atoms aus der 5. Hauptgruppe ein Atom der 3. Hauptgruppe in Silizium eingebaut (z.B. In = Indium), so fehlt ein Elektron für die Bindung, es entsteht ein "Loch".

#### Abbildung 44: p-Dotierung

Dieses Loch kann mit einem Elektron gefüllt werden, das von einer anderen Elektronenpaarbindung stammt. Dabei entsteht wiederum ein Loch, das durch ein anderes Elektron aufgefüllt werden kann. Bei sukzessiver Anwendung dieses Prinzips wandert das Loch von Atom zu Atom des Halbleiterkristall. Da bei dieser "Löcherwanderung" Elektronen in die entgegengesetzte Richtung driften, entspricht die Löcherwanderung einem elektrischen Strom. Scheinbar werden positive Ladungsträger bewegt. Daher wird von einer p-Dotierung gesprochen. Auch bei der p-Dotierung kann die Leitfähigkeit des Halbleiters mit zunehmender Anzahl von Fremdatomen erhöht werden.

Mit dotierten Halbleitern alleine sind nur sehr wenige technische Anwendungen möglich. Durch die Kombination von verschieden dotierten Gebieten in einem Halbleiter können aber Halbleiterbauelemente mit den unterschiedlichsten Funktionen hergestellt werden. Das Spektrum reicht von einfachen Dioden, über Transistoren bis hin zu komplexen Mikroprozessor-Chips.

#### 2.1.2 Halbleiterdiode

Die Halbleiterdiode besteht aus einem Übergang zwischen einem n- und einem pdotierten Halbleiter. Der Anschluss des p-dotierten Gebietes wird Anode (A) genannt, der Anschluss des n-dotierten Gebietes heißt Katode (K). Ohne von außen anliegende Spannung bildet sich in der Übergangszone ein Bereich aus, in dem freie Elektronen aus dem n-Gebiet Löcher im p-Gebiet auffüllen. Dieser Vorgang wird Rekombination von Elektronen und Löchern genannt. Da das Material sowohl im n-dotierten Bereich als auch im p-dotierten Bereich vorher elektrisch neutral war, bedeutet die Verschiebung von Elektronen vom einen in den anderen Bereich den Aufbau einer elektrischen Ladung. Es entsteht eine Raumladungszone.

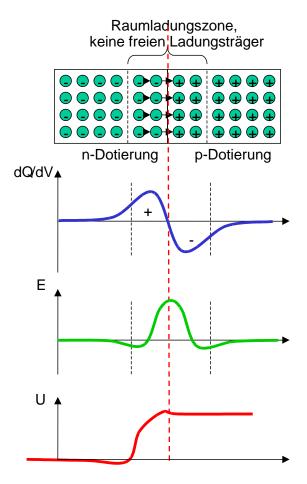


Abbildung 45: Raumladungszone in einer Diode

Diese Raumladung hat ein elektrisches Feld zufolge. Dieses wiederum führt zu einer Spannung an der Raumladungszone. In dieser Form kann kein Strom durch die Diode fließen, sie sperrt. Die Raumladungszone wird daher auch Sperrschicht genannt. Wird von außen eine Spannung so angelegt, dass Elektronen zusätzlich aus dem n-dotierten Bereich entnommen werden und in den p-dotierten Bereich eingespeist werden, vergrößert sich die Raumladungszone.

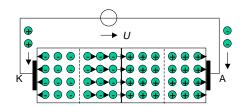
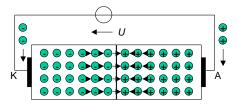


Abbildung 46: Diode im Sperrbetrieb

Bei Umpolung der außen angelegten Spannung verkleinert sich die Raumladungszone bis sie ab einer bestimmten Spannung verschwindet. Damit wird die Diode leitfähig. Die Elektronen überschwemmen den p-Bereich und Löcher sind im n-Bereich zu finden.

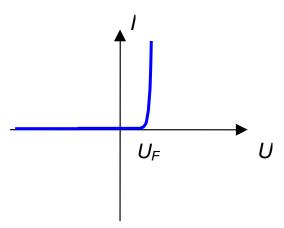


### Abbildung 47: Diode im Durchlassbetrieb

Eine genaue Betrachtung der physikalischen Vorgänge bei der Diode soll hier nicht durchgeführt werden. Die Kennliniengleichung der Diode, die den jetzt nichtlinearen Zusammenhang zwischen Spannung und Strom wiedergibt, lautet:

$$I = I_s \cdot \left( e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) \tag{28}$$

Dabei ist  $I_S$  der Sättigungsstrom und  $U_T$  die Temperaturspannung (für Silizium bei Raumtemperatur  $U_T$  =26mV).



# Abbildung 48: Kennlinie der Diode

Die Diode hat also eine Art Ventilwirkung. In Sperrrichtung gepolt fließt nur ein sehr geringer Strom, in Durchlassrichtung gepolt kann ein sehr großer Strom fließen.



Abbildung 49: Schaltbild für die Diode

Der Pfeil deutet die Stromflussrichtung der Diode im leitfähigen Zustand an. Reale Dioden werden bei genügend hohen Spannungen in Sperrrichtung ebenfalls leitfähig (Durchbruch). Dieser Effekt (Avalanche und Zenereffekt) wird in speziellen Dioden (Zenerdioden) verwendet, um definierte Spannungen zu erzeugen oder zu stabilisieren. In vielen geregelten Netzteilen, die meist Spannungsquellen sind, sind solche Zenerdioden als Stabilisierungselement zu finden.

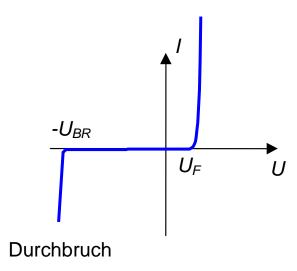


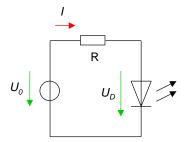
Abbildung 50: Kennlinie einer realen Diode mit Durchbruchbereich

Eine weitere wichtige Bauart einer Halbleiterdiode ist die Leuchtdiode. Sie ist eine Halbleiterdiode, die z.B. aus GaAs als Halbleitermaterial gefertigt wird. Das Licht entsteht in der Sperrschicht durch die Rekombination von Elektronen und Löchern. Die Farbe des Lichts lässt sich durch die Wahl des Halbleitermaterials einstellen. Leuchtdioden werden in vielen Geräten zur Signalisierung bestimmter Betriebszustände eingesetzt und ersetzen immer mehr kleine Glühlampen. Die meisten Großdisplays in Sportstadien nutzen ebenfalls Leuchtdioden, wobei ein Pixel aus drei oder vier Leuchtdioden besteht (grün, blau, rot, wegen der geringeren Lichtausbeute wird rot ggf. doppelt ausgeführt).

Durch spezielle Strukturierung und Zulegierung von Aluminium im Halbleitermaterial lässt sich die Raumladungszone in einen räumlich sehr kleinen Bereich begrenzen. Mit einer solchen Struktur lassen sich Halbleiterlaser herstellen, die heute in vielen Produkten als zentrale Elemente eingesetzt werden (CD-ROM-Laufwerk, CD-Brenner).

Die Kennlinien von Leuchtdiode und Laserdiode entsprechen der Kennlinie einer gewöhnlichen Diode. Der Durchbruchbereich in Sperrrichtung liegt bei Leuchtdioden sehr niedrig und ist beim Betrieb zu meiden, da dies zur Zerstörung der Diode führen kann.

Bei der Rechnung mit solchen Kennlinien besteht oft die Schwierigkeit, dass die aufgestellten Gleichungen analytisch nicht lösbar sind. So ergibt der Maschensatz einer einfachen Schaltung mit Leuchtdiode und Vorwiderstand:



### Abbildung 51: Stromkreis mit Leuchtdiode

$$U_D = U_0 - R \cdot I \tag{29}$$

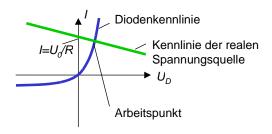
Die Diode hat die Kennlinie (28):

$$I = I_s \cdot \left( e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1 \right) \tag{30}$$

Wird (30) in (29) eingesetzt, ergibt sich:

$$U_D = U_0 - R \cdot I_s \cdot \left( e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1 \right) \tag{31}$$

Diese Gleichung lässt sich analytisch nicht nach  $U_D$  auflösen. Neben der Lösung der Gleichung durch numerische Verfahren bieten sich auch grafische Verfahren an, denn oft gibt der Hersteller im Datenblatt nicht die Kennlinie als Formel an, sondern als Grafik. Die Gleichungen (29) und (30) geben beide je eine Funktion  $U_D$ =f(I) an. Die gesuchte Lösung muss also der Schnittpunkt dieser beiden Funktionen sein. Dieser Punkt wird auch der Arbeitspunkt der Schaltung genannt.



### Abbildung 52: Grafische Bestimmung des Arbeitspunktes

Für die Analyse komplexer elektronischer Schaltungen mit Halbleiterbauelementen haben sich Netzwerkanalyseprogramme, wie z.B. PSpice, etabliert.

# 2.1.3 Transistoren

Bei Transistoren handelt es sich um Bauelemente, die wie die Dioden ebenfalls aus Halbleitermaterial bestehen. Gegenüber Dioden besitzen sie aber mindestens drei Anschlussklemmen. Erst mit Erfindung des Transistors konnten die bis dahin zur Verstärkung von Signalen eingesetzten Elektronenröhren abgelöst werden. Es kann

grob zwischen zwei grundsätzlichen Aufbauvarianten von Transistoren unterschieden werden:

- Bipolartransistoren
- Feldeffekttransistoren

Beide sollen im Folgenden näher betrachtet werden.

# 2.1.3.1 Bipolartransistor

Der Bipolartransistor erweitert die Diode um eine weitere dotierte Schicht. Je nach Schichtenabfolge wird der Transistor NPN- oder PNP-Transistor genannt.

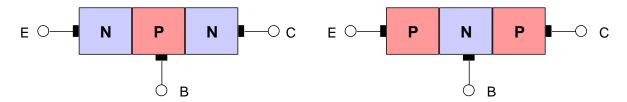


Abbildung 53: NPN- oder PNP-Transistor

Die mit den Schichten verbundenen Anschlüsse heißen Emitter (E), Basis (B) und Kollektor (C). Wird der Emitter oder der Kollektor unbeschaltet gelassen, so verhält sich der Transistor bezüglich der beiden verbleibenden Klemmen wie eine Halbleiterdiode. Die Dotierung der drei Bereiche ist unterschiedlich. Die Emitterzone ist am stärksten dotiert. Die Basis ist nur schwach dotiert und muss so dünn sein, dass sich die beiden Raumladungszonen der beiden pn-Übergänge teilweise überlappen. Die Bezeichnung Bipolartransistor berücksichtigt, dass an der Stromleitung sowohl Löcher als auch Elektronen beteiligt sind.

Zum Betrieb des Transistors wird die Basis-Emitter-Strecke in Flussrichtung (Basis positiv gegenüber Emitter beim NPN-Transistor, Basis negativ gegenüber Emitter beim PNP-Transistor) betrieben. Die Kollektor-Basis-Strecke wird in Sperrrichtung betrieben. Bei leitfähiger Basis-Emitter-Strecke gelangen Ladungsträger (Elektronen beim NPN-Transistor, Löcher beim PNP-Transistor) vom Emitter in die Basiszone. Wegen der schwachen Dotierung und der geringen Ausdehnung gelangen diese Ladungsträger an den Rand der Kollektorzone, wo sie durch die am Kollektor anliegende Spannung zum Kollektoranschluss angezogen werden. Im Basisanschluss fließt dabei nur ein geringer Strom. Für die Beträge der Ströme gilt:

$$I_B << I_C < I_E$$

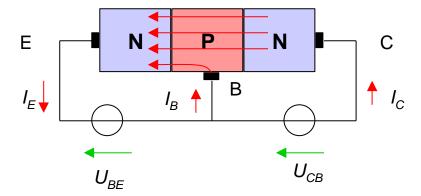


Abbildung 54: Ströme im Transistor

Wird der Basisstrom unterbrochen, indem die Spannung UBE verringert wird, sodass die Basis-Emitter-Diode sperrt, können die Ladungsträger die dann vorhandene Basis-Emitter-Sperrschicht nicht überwinden. Somit kann auch kein Kollektorstrom fließen. Beim Transistor kann also über einen kleinen Basisstrom ein großer Kollektorstrom gesteuert werden. Durch kleine Änderungen des Basisstroms wird eine große Änderung des Stroms zwischen Kollektor und Emitter bewirkt. Der Transistor hat also eine Stromverstärkung. Er kann somit in Verstärkerstufen eingesetzt werden. In der Digitaltechnik ist hingegen der Betrieb als "Schalter" wichtiger. Kommt es zu einem hinreichend großen Stromfluss zwischen Kollektor und Emitter, der durch einen Steuerstrom in die Basis hervorgerufen wird, kann die Emitter-Kollektor-Strecke wie ein geschlossener Schalter aufgefasst werden. Bei unterbrochenem Steuerstrom ist der Schalter geöffnet. Es handelt sich also um einen stromgesteuerten Schalter. Die Stromverstärkung des Schalters ist erforderlich, um die zwangsläufig in Schaltungen auftretenden Verluste zu kompensieren. Das Schaltsymbol des Bipolartransistors ist der folgenden Abbildung zu entnehmen, wobei der Pfeil am Emitteranschluss die Richtung des Stromes in Durchflussrichtung symbolisiert.

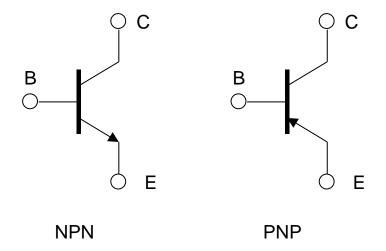
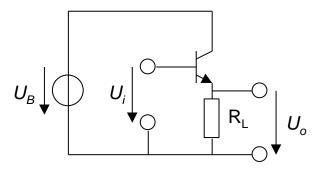


Abbildung 55: Symbole für Bipolartransistoren

In Digitalschaltungen wird der Transistor meist in zwei Grundschaltungen, der Emitterschaltung und der Kollektorschaltung betrieben. Bei der Emitterschaltung wird

der Emitter mit konstanter Spannung verbunden, bei der Kollektorschaltung liegt der Kollektor auf konstanter Spannung. Die beiden Grundschaltungen sollen anhand des NPN-Transistors untersucht werden. Beim PNP-Transistor haben die Spannungen und Ströme entgegengesetzte Richtung.



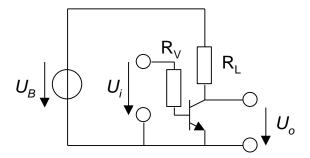
#### Abbildung 56: Kollektorschaltung

Da der Kollektor direkt mit der Versorgungsspannungsquelle  $U_B$  verbunden ist, handelt es sich bei obiger Schaltung um eine Kollektorschaltung. Eingangsspannung  $U_i$  wird direkt dem Basisanschluss zugeführt. Der Emitter ist mit einem Lastwiderstand  $R_L$  verbunden, an dem die Ausgangsspannung  $U_o$  abfällt. Da zwischen Basis und Emitter die Diodenstrecke wirksam ist, muss bei offener Diode die Ausgangsspannung nahezu der Eingangsspannung entsprechen. Es ergibt sich lediglich ein durch die Diffusionsspannung der Diode (vgl. Diodenkennlinie) niedrigerer Wert der Ausgangsspannung. Da aber der Basisstrom deutlich niedriger ist als der Emitter- und der Kollektorstrom, ergibt sich eine Stromverstärkung. Daraus folgt, dass am Ausgang mehr Leistung im Lastwiderstand umgesetzt werden kann, als eingangsseitig zugeführt wird. Die Leistungsdifferenz wird bereitgestellt. Eine Versorgungsspannung solche Kollektorschaltung Emitterfolger genannt) findet sich meist in Endstufen sowohl von Digitalschaltungen als auch von Analogschaltungen (z.B. Audioendstufen).

Die zweite häufig in elektronischen Schaltungen anzutreffende Grundschaltung ist die Emitterschaltung. Dabei ist der Emitter mit der festen Spannung verbunden. Die Eingangsspannung wird zwischen Basis und Emitter angelegt. Da hier die Diodenstrecke wirksam ist, muss ein Vorwiderstand zur Strombegrenzung eingefügt werden. Der Lastwiderstand ist hier zwischen der Versorgungsspannung und dem Kollektor angeschlossen.

Ist die Eingangsspannung Null, fließt auch kein Basisstrom. Damit sperrt der Transistor, womit der Lastwiderstand stromlos ist. Dies bedeutet, dass der Spannungsabfall an diesem Widerstand ebenfalls Null ist. Somit entspricht die Ausgangsspannung  $U_o$  der Versorgungsspannung  $U_B$ .

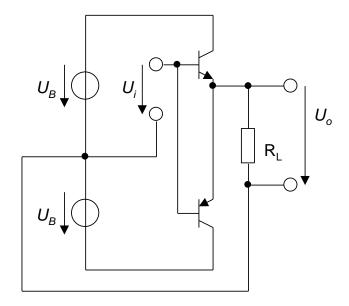
Wenn eine hinreichend hohe positive Eingangsspannung angelegt wird, fließt ein Basisstrom. Der Transistor wird leitfähig und führt zu einem Strom im Lastwiderstand. Ist die Leitfähigkeit des Transistors hoch genug, wird die Spannung am Ausgang Null.



#### Abbildung 57: Emitterschaltung

Dieses Verhalten wird invertierend genannt. Die Emitterschaltung kann also als Inverter verwendet werden. Auch hier führt ein kleiner Eingangsstrom zu einem größeren Ausgangsstrom, so dass auch hier ausgangsseitig eine höhere Ausgangsleistung vorliegt. Die Schaltung verhält sich ebenfalls wie ein Verstärker. Sie wird gerne als Treiberstufe für angeschlossene Lasten (Leuchten, Leuchtdioden, Relais, Kleinmotoren, etc.) verwendet.

Durch Kombination der Grundschaltungen sowie von Varianten mit NPN und PNP-Transistoren lassen sich Vorteile der einzelnen Schaltungen miteinander kombinieren. Die Kollektorschaltung oben kann zwar die Spannung am Ausgang durch entsprechendes Ansteuern des Transistors erhöhen. Zum Senken der Ausgangsspannung wird die Ansteuerung reduziert, woraufhin der Transistor sperrt. Liegt parallel zum Ausgang eine Kapazität, die z.B. durch benachbarte Leiterbahnen gebildet wird, muss diese Kapazität über den Lastwiderstand entladen werden. Dieser Vorgang kann für bestimmte Anwendungen zu lange dauern, so dass eine Modifikation der Schaltung zur Erhöhung der Geschwindigkeit erforderlich wird. Durch Ergänzung der Kollektorschaltung durch eine komplementäre Kollektorschaltung (gleichartige Schaltung jedoch mit dem jeweils anderen Transistortyp) lässt sich auch der Vorgang der Spannungsreduzierung über einen Transistor durchführen. Die beiden Basisschaltungen dürfen einfach zusammengeschaltet werden, da die Basis-Kollektor-Dioden jeweils in Sperrrichtung geschaltet sind.



#### Abbildung 58: Beispiel für eine Bus-Treiberendstufe

Bei einer positiven Eingangsspannung ist der obere Transistor (NPN) leitfähig, bei einer negativen Eingangsspannung leitet der untere Transistor (PNP). Eine möglicherweise am Ausgang parallel geschaltete Kapazität kann daher schnell aufgeladen und wieder entladen werden. Systeme, die an Busleitungen angeschlossen werden, beinhalten oft solche komplementären Treiberstufen.

#### 2.1.3.2 Feldeffekttransistor

Bipolartransistoren waren zwar als Ersatz für Elektronenröhren entwickelt worden, in einiger Hinsicht unterscheidet sich aber ihr Verhalten von dem der Elektronenröhren. Speziell erfolgt die Steuerung bei Bipolartransistoren durch einen Strom, während sie bei Elektronenröhren durch eine Spannung erfolgt. Auf der Suche nach einer Vereinfachung von Transistoren bzw. einem Systemverhalten ähnlich dem der Elektronenröhre wurde der Feldeffekttransistor entwickelt, der heute aufgrund der leistungsarmen Ansteuerung (Spannungssteuerung) häufig eingesetzt wird.

Beim Feldeffekttransistor wird die Leitfähigkeit eines halbleitenden Kanals durch ein elektrisches, auf den Kanal einwirkendes Feld gesteuert. Wie der Bipolartransistor hat der Feldeffekttransistor (FET) drei Anschlüsse, die Source S (Quelle), Drain D (Senke) und Gate G (Tor) genannt werden. Im normalen Betriebsfall besteht zwischen dem Gate und dem Kanal zwischen Source und Drain keine direkte leitfähige Verbindung. Beim Sperrschicht-Feldeffekttransistor (Junction-) JFET wird die Isolation zwischen Gate und Kanal durch eine in Sperrrichtung betriebene Diode gebildet. Beim Metall-Oxid-Feldeffekttransistor MOSFET wird eine sehr dünne Isolationsschicht aus Siliziumoxid gebildet.

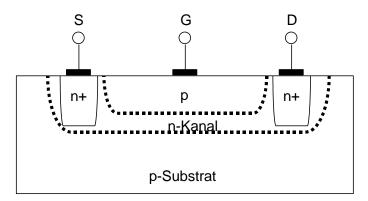


Abbildung 59: Aufbau eines n-Kanal-Sperrschicht-Feldeffekttransistors (JFET)

Bei dem dargestellten JFET-Feldeffekttransistor handelt es sich um einen n-Kanal-Sperrschicht-Feldeffekttransistor. Er ist auf einem schwach p-dotierten Ausgangsmaterial (Substrat) hergestellt, in das in mehreren Schritten weitere Strukturen eindiffundiert werden. Zunächst wird eine dünne, n-leitende Wanne (n-Kanal) eingebracht. An den Enden werden hochdotierte sogenannte Diffusionsinseln (n+) erzeugt. Zwischen diesen Inseln wird in einem weiteren Schritt eine weitere, diesmal p-dotierte Wanne eindiffundiert. Die Länge des entstandenen n-Kanals beträgt nur einige µm. Die Kanalbreite (in die Zeichnungsebene hereinweisend) ist etwa 100 bis 1000 mal größer als die Kanallänge. Die Diffusionsinseln und die p-

Wanne werden von außen mit Elektroden versehen und bilden die Anschlüsse S, G und D. Gelegentlich wird auch das Substrat mit einem Anschluss versehen, der mit B (Bulk) abgekürzt wird.

Beim p-Kanal-JFET liegt lediglich eine entgegengesetzte Dotierung der einzelnen Bereiche vor.

Zur Kanalsteuerung muss der pn-Übergang vom Gate zum Kanal in Sperrrichtung betrieben werden. Bei n-Kanaltypen bedeutet dies eine negative, bei p-Kanaltypen eine positive Steuerspannung. Aufgrund dieses Sperrrichtungsbetriebs haben Feldeffekttransistoren einen sehr hohen Eingangswiderstand, womit extrem geringe Steuerleistungen erforderlich werden. Wie bei der Halbleiterdiode entstehen in Sperrrichtung Raumladungszonen, deren Ausdehnung von der Höhe der Sperrspannung abhängt. Die im n-Kanal-Gebiet auftretende Raumladungszone führt zu einer Verarmung des n-Kanals an Ladungsträgern. Die Dicke des n-Kanals nimmt mit zunehmender Dicke der Raumladungszone ab. Der für die Leitfähigkeit zwischen Source und Drain verantwortliche Kanal wird also mit zunehmender Steuerspannung "abgeschnürt".

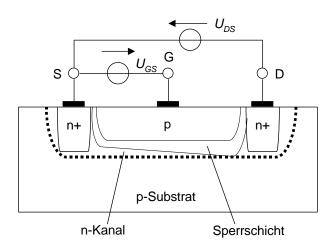
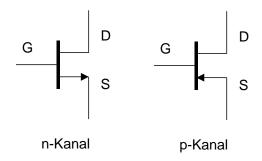


Abbildung 60: Steuerung der Leitfähigkeit durch die Sperrschicht

Durch die Steuerspannung kann also der Kanal kontinuierlich abgeschnürt werden, so dass die Leitfähigkeit zwischen Source und Drain verändert wird. Der keilförmige Verlauf der in die Skizze eingezeichneten Sperrschicht folgt aus der zwischen Drain und Source anliegenden Spannung.

Das Schaltsymbol für die beiden Varianten des JFET sind:



# Abbildung 61: Schaltsymbole für JFET

Der Isolierschicht-Feldeffekttransistoren (MOSFET) soll anhand des p-Kanal-MOSFET erläutert werden.

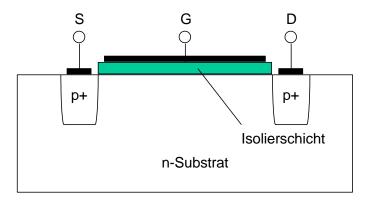


Abbildung 62: Aufbau eines p-Kanal-MOSFET

Beim p-Kanal-MOSFET werden in ein schwach dotiertes n-Substrat hochdotierte (p+) Diffusionsinseln eingebracht, die mit Source und Drain-Elektrode verbunden werden. Oberhalb des Bereiches zwischen den Inseln ist über einer Isolierschicht aus Siliziumoxid die Gateelektrode aus einem aufgedampften Metall (meist Aluminium) aufgebracht. Aus dieser Schichtenabfolge resultiert die Bezeichnung Metall-Oxide-Semiconductor des Transistors. Beim eingezeichneten Transistor wird unabhängig von der Polarität der Spannung zwischen S und D eine Grenzschicht zwischen p+ und n-Bereich ausgebildet, so dass keine leitende Verbindung zwischen S und D besteht.

Wird zwischen Gate und dem Substrat eine hinreichend hohe negative Spannung angelegt, so sammeln sich Löcher aus dem n-Substrat direkt unter der Isolierschicht an und bilden dort einen p-Kanal (Inversionsschicht). Damit wird die Source-Drain-Strecke leitfähig. Liegt gleichzeitig eine Spannung zwischen Drain und Source, ändert sich entlang der Isolierschicht die Dicke der Inversionsschicht in ähnlicher Weise, wie beim JFET die Kanaldicke.

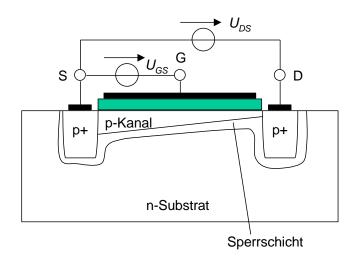


Abbildung 63: Steuerung der Leitfähigkeit durch die Sperrschicht

Beim Anlegen einer Steuerspannung wird die Source-Drain-Strecke dieses Transistors also leitfähig. Da sich die zum Aufbau des Kanals erforderlichen Ladungsträger erst unterhalb der Isolierung anlagern müssen, wird dieser Transistortyp "Anlagerungstyp" (engl. Enhancement) genannt. Dieser Transistor ist ohne Anlegen einer Steuerspannung sperrend; er ist selbstsperrend. Die Schaltsymbole für diesen Transistortyp sind:

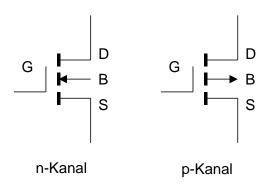


Abbildung 64: Schaltsymbole für Anlagerungstyp (engl. Enhancement)

Durch den Einbau lokalisierter Ladungsträger in die Isolierschicht lässt sich auch ohne Anlegen einer Spannung eine Inversionsschicht und damit eine leitende Verbindung zwischen Source und Drain erzeugen. Ein solcher Transistor wird "Verarmungstyp" (engl. Depletion) genannt. Wegen des Kanals ist er selbstleitend. Damit der Transistor sperrt, muss eine entgegengesetzte Steuerspannung (beim p-Kanal-Typ also eine positive Spannung) angelegt werden. Die Schaltsymbole sind ähnlich zu denen der Anlagerungstypen. Die durchgezogene Linie symbolisiert den Kanal, der ohne Steuerspannung bereits vorhanden ist.

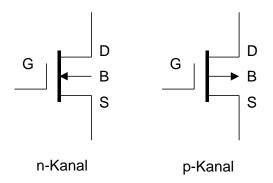


Abbildung 65: Schaltsymbole für Verarmungstyp (engl. Depletion)

Wie beim JFET wird die Verbindung zum Substrat Bulk genannt. Meistens ist dieser Anschluss intern mit Source verbunden.

# 2.2 Realisierung von digitalen Grundschaltungen

In der Digitaltechnik werden mit Transistoren einzelne Grundschaltungstypen aufgebaut. Dabei finden sich heute die einzelnen Transistoren nicht mehr als diskrete Bauelemente wieder, sondern je nach Komplexität der Schaltung sind mehrere

hundert bis mehrere millionen Transistoren auf einem gemeinsamen Siliziumsubstrat untergebracht. Allgemein werden solche integrierten Bauteileansammlungen "Integrierte Schaltungen" (englisch: Integrated Circuit oder IC) genannt. Bei den einzelnen Funktionsgruppen kann man zwischen vergleichsweise einfachen Gatter- und Treiberschaltungen, Flip-Flops, Zählern und Speichern unterschieden. In den folgenden Kapiteln können nicht alle unterschiedlichen Formen von Gattern erläutert werden. Vielmehr sollen die grundlegenden Prinzipien aufgezeigt werden.

### **2.2.1 Gatter**

Ein Gatter bezeichnet in der Digitaltechnik eine Schaltung, die eine bestimmte elementare Operation der Booleschen Algebra ausführt und damit der physikalischen Implementierung einer mathematischen Operation entspricht. Als Gatter werden beispielsweise digitale Grundschaltungen für UND, ODER und NICHT bezeichnet. Durch Verkettung dieser Grundelemente sind beliebige komplexe logische Verknüpfungen realisierbar. Ganz allgemein besteht ein Gatter aus drei Teilen: der Pegeldetektion, der logischen Verknüpfung und einer Treiberstufe. Die Aufgaben der einzelnen Stufen sind:

### Pegeldetektion

Digitalschaltungen bilden logische Verknüpfungen nach, bei denen die internen Zustandsgrößen und Ein-/Ausgangsgrößen die binären Werte "1" und "0" annehmen können. Diese beiden Zustände müssen durch eine elektrotechnische Größe nachgebildet werden. Dazu kommen prinzipiell Spannungen und Ströme in Frage. In den meisten Fällen werden Spannungen verwendet, wobei logisch "0" meist einer niedrigen Spannung entspricht (daher auch low, "L" genannt) und logisch "1" einer hohen Spannung entspricht (high, "H"). Die Zuordnung von Spannungswerten zu den Pegeln sind in einzelnen Logikfamilien definiert (siehe Sollen innerhalb einer logischen Schaltung Abschnitt 2.3). Gatter unterschiedlicher Logikfamilien eingesetzt werden, so erfordert dies meist zwischen ihnen eine Pegelwandlung.

# Logische Verknüpfung

In der logischen Verknüpfung wird die eigentliche logische Funktion abgebildet. Prinzip der Verknüpfung ist die Serien- und Parallelschaltung von Halbleiterschaltern.

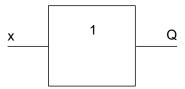
#### **Treiberstufe**

Aufgabe Treiberstufe die Bereitstellung hinreichenden der ist einer Ausgangsleistung, um an einen Gatterausgang mehrere Gattereingänge anschließen zu können, ohne dass es durch die Belastung Gattereingangsstufen zu Verfälschungen des logischen Pegels kommt. Je nach Einsatzgebiet gibt es unterschiedliche Formen dieser Treiberstufe, auf die in Abschnitt 2.3 näher eingegangen wird.

Das einfachste Gatter ist die Identität. Sie besitzt einen Ein- und einen Ausgang. Der Ausgang Q entspricht dem Wert des Eingangs x:

$$Q = x$$

Das Schaltsymbol des Gatters ist:



### Abbildung 66: Schaltungssymbol des Identitäts-Gatters

Eine einfache schaltungstechnische Realisierung kann beispielsweise eine Kollektorschaltung sein.

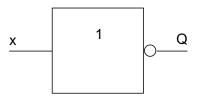
Wenn auch die Nutzbarkeit dieses Gatters auf den ersten Blick fraglich erscheinen mag, werden diese Gatter als sogenannte Treiber oder Buffer verwendet, um beispielsweise an einen Ausgang viele Eingänge nachgeschalteter Gatter anzuschließen.

Die Umkehrung der Identität ist der Inverter (NICHT-Element). Die logische Funktion ist:

$$Q = \bar{x}$$

Wobei der Strich über dem x allgemein für die Negierung steht.

Das Schaltsymbol entspricht dem der Identität. Die Negierung wird durch den Kreis am Ausgang angedeutet.



# Abbildung 67: Schaltungssymbol des Inverter-Gatters

Eine schaltungstechnische Realisierung erfolgt über Transistorschaltungen.

Die logische UND-Verknüpfung wird mit dem UND-Gatter (AND) realisiert:

$$Q = x \wedge y \tag{32}$$

Das Schaltsymbol ist:

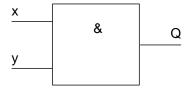


Abbildung 68: Schaltungssymbol des UND (AND)-Gatters

Die Wahrheits- oder Funktionstabelle lautet:

X	У	Q
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Entsprechend der Funktionstabelle des UND-Gatters ist der Ausgangs nur dann "1", wenn beide Ausgänge "1" sind. Der Ausgang ist "0", wenn entweder ein Eingang oder beide Eingänge "0" sind. Es gibt prinzipiell zwei schaltungstechnische Realisierungen, die zunächst schematisch mit Schaltern dargestellt werden sollen:

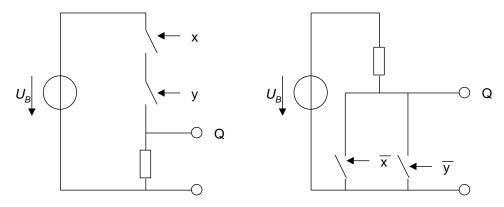
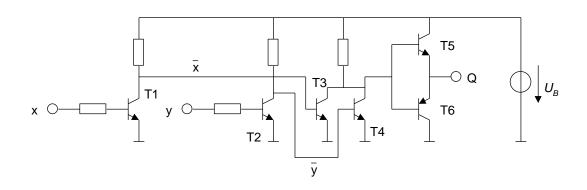


Abbildung 69: Realisierung des UND-Gatters mit Schaltern

Die Schalter in der linken Schaltung sind geschlossen, wenn x bzw. y "1" sind, in der rechten Schaltung sollen sie geschlossen sein, wenn x bzw. y "0" sind.

Werden in der rechten Schaltung die Schalter durch Transistoren ersetzt, so muss zunächst mit Invertern aus den Eingangssignalen die negierten Signale gewonnen werden. Dies kann z.B. mit Emitterschaltungen geschehen (T1, T2), die gleichzeitig die Funktion der Pegeldetektion übernehmen. Anschließend finden sich die beiden parallelen Schalter in den Transistoren T3 und T4. Die Komplementärstufe mit den Transistoren T5 und T6 bildet die Ausgangstreiberstufe.



#### Abbildung 70: Realisierung eines UND-Gatters mit Bipolartransistoren

Die kleinen waagerechten Linien am Emitter der Transistoren T1-T4 bedeuten "Masse". All diese Masseanschlüsse sind miteinander verbunden. Die Masse stellt den Bezugspunkt für die Spannungen innerhalb einer Schaltung dar.

Als letztes Grundelement wird die ODER-Verknüpfung (OR) betrachtet:

$$Q = x \vee y \tag{33}$$

Das Gatter hat das Schaltsymbol:

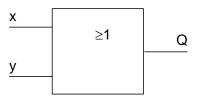


Abbildung 71: ODER (OR)-Gatter mit Schaltsymbol

Die Wahrheits- oder Funktionstabelle lautet:

х	У	Q
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Auch hier bestehen zwei Möglichkeiten zur Realisierung: Der Ausgang ist logisch "1", wenn einer der beiden Eingänge oder beide logisch "1" sind. Der Ausgang ist logisch "0" wenn sowohl x als auch y logisch "0" sind. Entsprechend können zwei schaltungstechnische Realisierungsformen mit Schaltern gefunden werden:

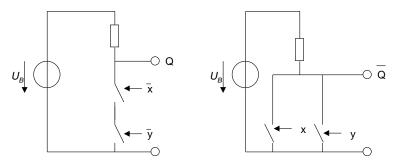


Abbildung 72: Realisierung eines ODER-Gatters mit Schaltern

Bei der rechten Schaltung ist zu beachten, dass diese nicht Q, sondern das negierte /Q liefert. Diese Schaltung lässt sich durch geringfügige Modifikation direkt aus der Transistorschaltung des UND-Gatters umsetzen:

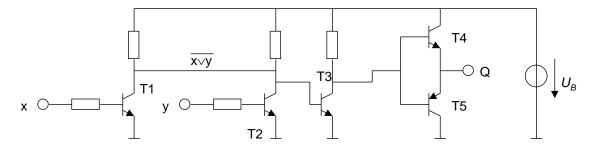


Abbildung 73: Realisierung eines ODER-Gatters mit Bipolartransistoren

Durch Verknüpfung dieser Grundschaltungen lassen sich beliebige logische Funktionen erzeugen. Einige von ihnen nutzen eigene Schaltsymbole, die in der folgenden Übersicht zusammengestellt sind:

Identity	Q = x	1 Q	NOT $Q = \bar{x}$	x 1 0 Q
AND	$Q = x \wedge y$	<u>x</u> & Q	$Q = x \vee y$	<u>x</u> ≥1 Q
NAND (NOT- AND)	$Q = \overline{x \wedge y}$	<u>x</u> & Q	NOR $Q = \overline{x \lor y}$	<u>x</u> ≥1 Q
Compa -rator	$Q = (x \equiv y)$ $= (x \land y)$ $\vee (\overline{x} \land \overline{y})$	<u>x</u> = Q	EXOR $Q = (x \neq y)$ $= (x \land \overline{y})$ $\lor (\overline{x} \land y)$	x =1 Q

Tabelle 2: Übersicht logischer Grundschaltungen

Das Kreis-Symbol für die Negation ist nicht nur am Ausgang üblich, sondern kann auch bei Eingängen eingesetzt werden. Ebenso sind Gatter mit mehr als zwei Eingängen möglich.

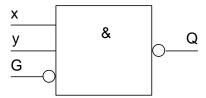


Abbildung 74: Schaltungssymbol eines UND (AND)-Gatters mit mehr als zwei Eingängen

Das Gatter in Abbildung 74 realisiert also die logische Verknüpfung:

$$Q = \overline{\left(x \wedge y \wedge \overline{G}\right)} \tag{34}$$

Die Wahrheitstabelle lautet:

х	у	$\overline{G}$	G	Q	$\bar{Q}$
0	0	0	1	0	1
0	0	1	0	0	1
0	1	0	1	0	1
0	1	1	0	0	1
1	0	0	1	0	1
1	0	1	0	0	1
1	1	0	1	0	1
1	1	1	0	1	0

Solche Gatter, wie auch die später vorgestellten Flipflops und Speicher sind in Form integrierter Schaltkreise erhältlich, die meist mehrere gleichartige Gatter enthalten. Die ersten Computer waren aus solchen Bausteinen aufgebaut, wobei ein sehr großer Platzbedarf resultierte. Moderne Schaltungen nutzen entweder Arrays von logischen Gattern, die universell einsetzbar sind und deren logische Funktion programmiert werden kann (Programmable Array Logic PAL) oder hochintegrierte Bausteine, bei denen die logischen Verknüpfungen bei der Herstellung fest "verdrahtet" werden.

# 2.2.2 Flipflop, Zähler, Schieberegister

Mit Gattern allein lassen sich logische Funktionen realisieren, die ohne Änderungen der Verdrahtung nicht mehr geändert werden können. Meist ist es aber notwendig bestimmte Zustände zwischenzuspeichern. Nur so lassen sich sequentielle Schaltungen aufbauen. Die Struktur unserer heutigen Computer und Mikrocontroller, bei denen die Funktionalität sich gemeinsam aus Hardware und Software zusammensetzt, wäre ohne Flipflops und Zähler nicht denkbar.

Unter einem Flipflop wird eine Grundschaltung verstanden, die zwei verschiedene Zustände einnehmen kann. Dies soll an folgender Transistorschaltung verdeutlich werden

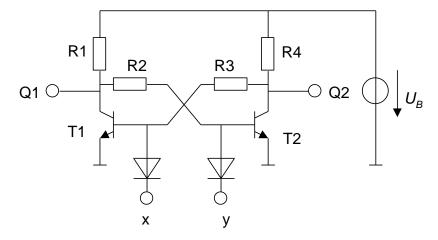


Abbildung 75: Einfache Flipflop Schaltung aus Bipolartransistoren

Zunächst soll davon ausgegangen werden, dass die Eingänge x und y jeweils "1" führen. Beide Dioden sind dann gesperrt, so dass die Eingänge in diesem Zustand keinen Einfluss auf die Schaltung haben. Wenn zunächst davon ausgegangen wird, dass Transistor T1 sperrt, wird die Spannung am Ausgang Q1 über R1 auf Versorgungsspannung U<sub>B</sub> gezogen. Über R2 bekommt T2 an der Basis dieses positive Potenzial, woraufhin er durchschaltet. Damit ist der Ausgang Q2 logisch "0". Infolgedessen kann kein Basisstrom über R3 in die Basis von T1 fliessen. T1 bleibt also im gesperrten Zustand. Der beschriebene Zustand ist also stabil. Wenn die gleiche Herleitung mit T2 begonnen wird, ist Q2 logisch "1" und Q1 logisch "0". Die Schaltung hat folglich zwei stabile Zustände. Welcher der Zustände vorliegt, hängt von der Vorgeschichte ab. Wird vom Zustand 1 (Q1 logisch "1", Q2 logisch "0") ausgegangen, so kann über eine logische "0" am Eingang y der Zustand gekippt werden, denn damit wird verhindert, dass T2 schaltet. Die Konsequenz ist eine "1" an Q2. Über R3 fließt ein Basisstrom in T1, wodurch dieser leitet und Q1 auf "0" zieht. Auch wenn y wieder auf "1" geht, bleibt dieser Zustand erhalten. Die Funktion kann anhand der Arbeitsmatrix schematisiert werden:

X	У	Q1_alt	Q2_alt	Q1_neu	Q2_neu	Bemerkung	
1	1	0	1	0	1	Alter Zustand bleibt	
1	1	1	0	1	0	gespeichert	
1	0	0	1	0	1	Setzen von Q2	
1	0	1	0	0	1	(Rücksetzen von Q1)	
0	1	0	1	1	0	Setzen von Q1	
0	1	1	0	1	0	(Rücksetzen von Q2)	
0	0	0	1	1*	1*	Instabiler Zustand	
0	0	1	0	1*	1*		

Tabelle 3: Arbeitsmatrix für ein einfaches Flipflop

Beim instabilen Zustand sind beide Ausgänge logisch "1" solange die Eingänge "0" sind. Sobald einer der Eingänge "1" wird, klappt die Schaltung in einen der stabilen Zustände. Ein gleichzeitiger Wechsel der Eingänge von "0" auf "1" führt in jedem Fall zu einem der beiden stabilen Ausgangszustände, denn einer der Eingänge wird geringfügig früher seinen Zustand ändern.

Bei der präsentierten Schaltung handelt es sich um ein Flipflop mit einem Setz- und einem Rücksetzeingang (RS-Flipflop).

Etwas abstrakter lässt sich ein solches RS-Flipflop aus Gatter-Funktionsblöcken zusammensetzen. Beim Design von integrierten Schaltkreisen hat dies den Vorteil, dass das Layout der Transistorschaltungen zu Makros zusammengefasst werden kann und aus diesen Makros sehr komplexe Schaltungen generiert werden können. In Fortführung dieses Prinzips kann der Entwickler einer komplexen Schaltung mehr und mehr in höhere Abstraktionsebenen eindringen und so umfangreiche Schaltungen wie Mikroprozessoren entwickeln.

Eine Realisierung des RS-Flipflops kann z.B. mit NAND-Gattern erfolgen.

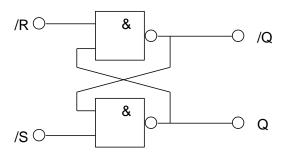


Abbildung 76: Realisierung eines RS-Flipflops mit NAND-Gattern

Die Funktion entspricht weitestgehend der Funktion der oben angegebenen Transistorschaltung. Solange die Eingänge /R und /S logisch 1 sind, bleibt der Zustand des Flipflops gespeichert. Wenn der Setzeingang auf logisch 0 geht, wird das Flipflop gesetzt (Q=1, /Q=0), bei einer logischen 0 am Rücksetzeingang wird es gelöscht (Q=0, /Q=1).

Oft wird ein Flipflop benötigt, das seinen Zustand nur zu einer bestimmten Zeit abhängig von einem weiteren Eingangszustand ändern kann. Dies kann ausgehend vom einfachen RS-Flipflop durch Zufügen von zwei weiteren NAND-Gattern geschehen. Ein solches Flipflop heißt "Statisch getaktetes RS-Flipflop".

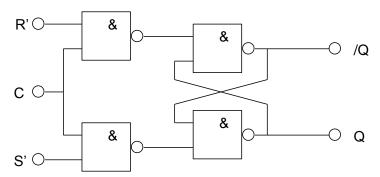
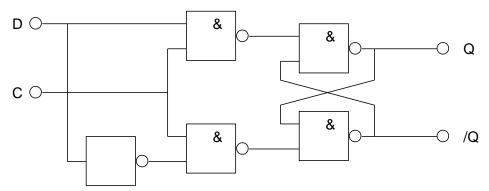


Abbildung 77: Statisch getaktetes RS-Flipflop

Solange der Clockeingang C logisch 0 ist, sind die Ausgänge der "Eingangsgatter" immer 1. Das nachgeschaltete RS-Flipflop speichert also die Information unabhängig von den an R' und S' anliegenden Pegel. Erst bei einer 1 an C gelangt der Zustand der Eingänge R' und S' in negierter Form an das RS-Flipflop, wodurch dieses seinen Zustand ändern kann. Werden auch noch die beiden Eingänge über einen Inverter zusammengefasst, kommt man zu einem D-Flipflop, das bei der Ausgabe von Mikroprozessoren häufig eingesetzt wird.



# Abbildung 78: D-Flipflop

Solange der Clockeingang C 0 ist wird die im Flipflop befindliche Information gespeichert. Erst bei einer 1 an C wird das Signal am D-Eingang auf den Q-Ausgang durchgeschaltet. Bei einer Pegeländerung von 1 auf 0 an C wird der unmittelbar beim Schaltvorgang an D anliegende Pegel vom Flipflop gespeichert. Solche D-Flipflops sind in statischen Speichern, die z.B. als Cache-Speicher eingesetzt werden, oder in Ein-/Ausgabebausteine (z.B. parallele Schnittstellen) enthalten. Die D-Leitung wird mit dem Datenbus des Mikroprozessors verbunden, der abwechselnd Daten auf den Bus legt, die für unterschiedliche Speicherzellen oder Ein-/Ausgabebausteine bestimmt sind. Erst wenn ein bestimmter Baustein adressiert wird, aktiviert eine Logik die Clockleitung, sodass gültige Daten in das Flipflop übernommen werden. Aufgrund der Datenbusbreite üblicher Prozessoren (8bit, 16bit, 32bit) werden solche Schaltungen oft parallel betrieben. Ein typisches Timing ist in folgendem Diagramm dargestellt.

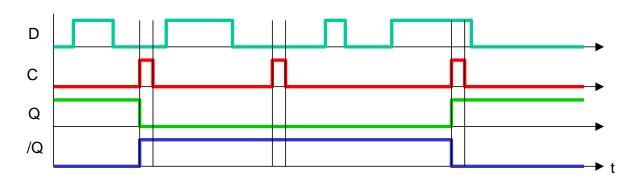


Abbildung 79: Typisches Timing-Diagram für ein D-Flipflop

Für viele Anwendungen, wie Zähler und Schieberegister, sind die bisher vorgestellten zustandgesteuerten Flipflops ungeeignet. Beim Aktivieren der Clockleitung wird der Inhalt des D-Eingangs transparent auf den Ausgang Q übertragen. Die genannten

Anwendungen erfordern Flipflops, die den Eingangszustand zwischenspeichern und ihn erst an den Ausgang übertragen, wenn die Eingänge bereits wieder verriegelt sind. Sie sind aus zwei hintereinander angeordneten Flipflops aufgebaut. Das Flipflop am Eingang wird "Master", das Flipflop am Ausgang wird "Slave" genannt.

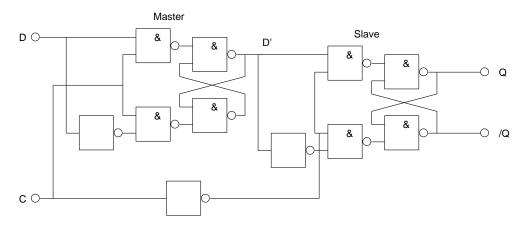


Abbildung 80: Flankengesteuertes D-Master-Slave-Flipflop

Aus dem Timingdiagramm wird deutlich, dass der am D-Eingang anliegende Pegel erst bei der fallenden Flanke am Ausgang Q erscheint. Daher wird ein solches Flipflop auch flankengetriggertes D-Master-Slave-Flipflop genannt.

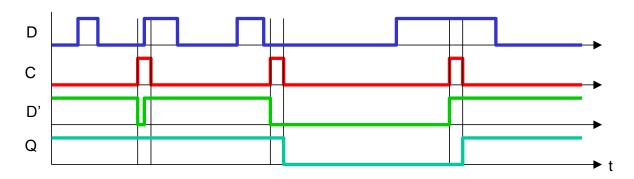


Abbildung 81: Typisches Timing-Diagram für flankengesteuertes D-Master-Slave-Flipflop

S	Einfaches RS-Flipflop mit Q und /Q- Ausgängen	S	Einfaches RS-Flipflop mit negierten Setz- und Rücksetzeingängen mit Q und /Q- Ausgängen
D	Einfaches pegelgesteuertes D- Flipflop	D	Pegelgesteuertes D- Flipflop mit inversen Clockeingang

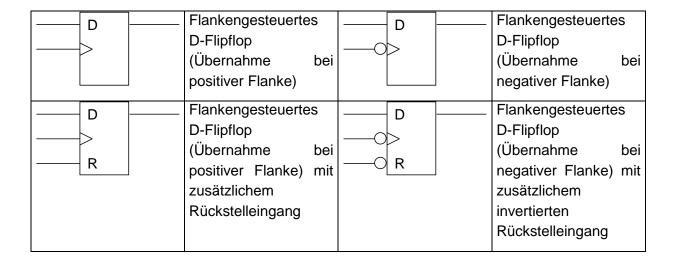


Tabelle 4: Symbole und Bedeutung verschiedener Flipflop-Typen

Wie auch bei den Gattern werden bei Flipflops besondere Schaltsymbole verwendet, um Schaltungen auf einem höheren Abstraktionsniveau zu realisieren. Die Ausgänge werden meist auf der rechten Seite gezeichnet, die Eingänge auf der linken Seite. Die Eingänge werden zusätzlich mit den Buchstaben "R" für einen Rücksetzeingang, "S" für einen Setzeingang, "D" für einen Dateneingang und "C" für einen Clockeingang gekennzeichnet. Eine weitere Form eines Flipflops, das hier nicht betrachtet werden soll, besitzt zwei weitere mit "J" und "K" bezeichnete Eingänge (JK-Flipflop). Bei Flipflops, die einen flankengesteuerten Clockeingang haben, wird dieser durch ein kleines Dreieck anstelle des Buchstabens "C" gekennzeichnet. Eine Invertierung eines Eingangs wird wie bei den Gattern durch einen kleinen Kreis bezeichnet. Die

Tabelle 4 enthält die Symbole einiger solcher Flipflops und deren Bedeutung.

Aus Master-Slave-Flipflops lassen sich u.a. Schieberegister aufbauen, mit denen sich beispielsweise eine Wandlung eines 8bit-breiten Datenbytes in einen seriellen Datenstrom oder umgekehrt durchführen lässt. Eine solche Struktur ist in den Controller-Schaltkreisen einer seriellen Schnittstelle, einer Ethernet-Schnittstelle aber auch von Disketten-, CDROM- oder Festplattenlaufwerken enthalten.

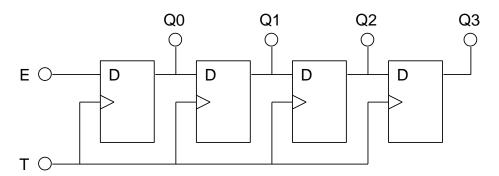


Abbildung 82: Einfaches Schieberegister

Bei dem abgebildeten einfachen Schieberegister wird der am Eingang E anliegende Datenstrom bei jedem Takt am Takteingang T (genauer: steigende Flanke) um eine Position weiter nach rechts geschoben. Nach vier Takten ist das Schieberegister

gefüllt und die Daten können in paralleler Form an der Ausgängen Q0 bis Q3 ausgelesen werden. Das Timing-Diagramm verdeutlicht diese Funktion

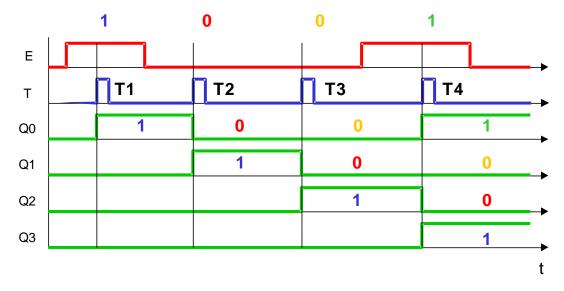


Abbildung 83: Typisches Timing-Diagram für ein Schieberegister

Eine andere häufige Anwendung von flankengetriggerten Master-Slave-Flipflops sind Zähler, die z.B. innerhalb von Mikroprozessoren als Programmzähler verwendet werden. Beim asynchronen Zähler sind mehrere flankengetriggerte D-Flipflops in folgender Grundschaltung hintereinandergeschaltet.

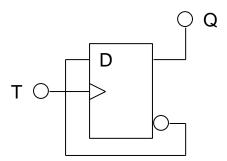
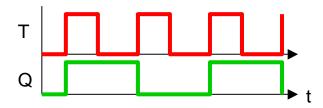


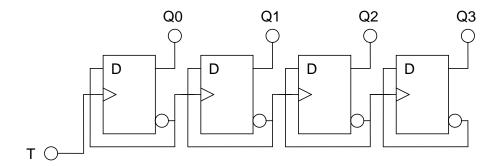
Abbildung 84: Flankengetriggertes D-Flipflop als Zähler

Bei dieser Schaltung wird bei jedem Takt der Inhalt des Flipflops invertiert.



# **Abbildung 85: Eingang und Ausgang**

Die Frequenz des Eingangstaktes wird also halbiert. Eine solche Schaltung wird daher auch Frequenzteiler genannt. Für einen 4-bit-Zähler werden vier solcher Stufen benötigt:



### Abbildung 86: 4-bit Zähler

Im Timing-Diagramm sind die sich aus den Ausgängen Q0..Q3 ergebenden Zählerstände mit eingezeichnet.

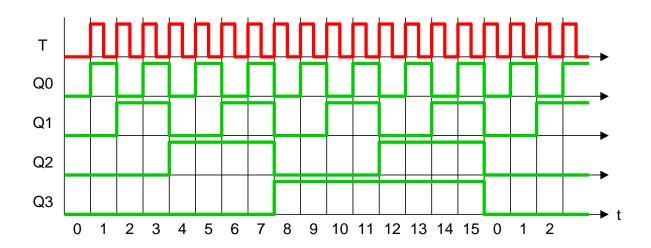


Abbildung 87: Typisches Timing-Diagram für einen 4-bit Zähler

# 2.2.3 Halbleiterspeicher

Halbleiterspeicher lassen sich in unterschiedliche Kategorien einteilen:

# 2.2.3.1 ROM (Read Only Memory):

Bei diesen Festwertspeichern bleibt der Speicherinhalt auch ohne Versorgungsspannung erhalten. Die Information wird entweder bei der Herstellung des integrierten Schaltkreises direkt im Layout geschrieben (maskenprogrammierter ROM) oder nach Herstellung des Schaltkreises mit speziellen Programmiergeräten oder Programmierschritten geschrieben. Zu diesen Vertretern gehören der Sicherungs-PROM (programmable ROM), bei dem bei der Programmierung die Information durch irreversible Zerstörung von Sicherungen in der Speichermatrix eingetragen wird, der EPROM (Erasable PROM), bei dem Ladungen beim Schreiben in Isolierschichten eingebracht werden und die durch Bestrahlen mit ultraviolettem Licht wieder gelöscht werden können und der EEPROM, bei dem ähnlich wie beim EPROM Ladungen eingebracht werden und auch auf elektrischem Weg wieder

gelöscht werden können. Beim EEPROM wird zum Beschreiben vergleichsweise viel Zeit benötigt, so dass sie nur zum Speichern weniger Bytes verwendet werden. Sie kommen beispielsweise zum Speichern der wichtigsten Einstellungen im BIOS eines PC zum Einsatz.

# 2.2.3.2 RAM (Random Access Memory)

Aufgrund der Schreib- und Lesegeschwindigkeit und der hohen Packungsdichte werden RAMs als Arbeitsspeicher und Cache-Speicher eingesetzt. Nach ihrem inneren Aufbau können zwei Arten von RAMs unterschieden werden: statische RAM und dynamische RAM.

#### 2.2.3.2.1 Statisches RAM

Bei statischen RAMs wird die Information in Flipflops gespeichert. Pro Bit zu speichernde Information muss ein Flip-Flop vorhanden sein. Die Vielzahl von Flipflops sind i.d.R. in einer matrixähnlichen Anordnung auf dem Chip untergebracht. Die einzelnen Flipflops werden durch das gleichzeitige Aktivieren einer Spalten- und einer Zeilenleitung aktiviert. Den prinzipiellen Aufbau zeigt das folgende Schaltbild (Quelle: Tietze, Schenk: Halbleiterschaltungstechnik):

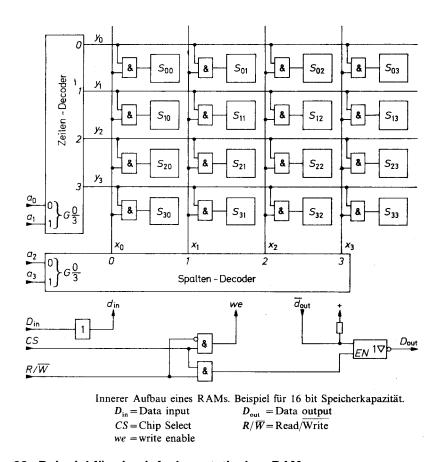


Abbildung 88: Beispiel für ein einfaches statisches RAM

Jede einzelne Speicherzelle wird durch die in Abbildung 89 gezeigte Schaltung realisiert.

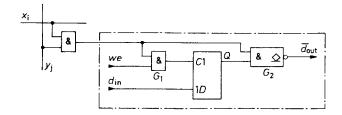


Abbildung 89: Realisierung einer einzelnen Speicherzelle

Auch wenn die Schaltung der einzelnen Flipflops sehr komplex zu sein scheint, kann sie in CMOS-Technologie mit nur 6 Transistoren realisiert werden. Statische Speicher können mit sehr kleinen Zugriffzeiten hergestellt werden, weshalb sie sich besonders als Cache-Speicher eignen.

# 2.2.3.2.2 Dynamische RAM

Bei dynamischen RAMs wird die Information nicht in Flipflops, sondern als Ladung in einem Kondensator gespeichert. Zum Schreiben und Auslesen ist ein einziger Transistor erforderlich, wie die folgende Prinzipskizze zeigt:

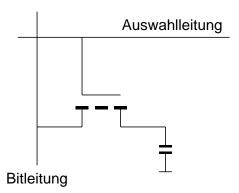


Abbildung 90: Realisierung einer dynamischen RAM-Speicherzelle

Die gegenüber statischen RAMs niedrigere Anzahl an Bauelementen pro Speicherzelle ermöglicht eine sehr viel höhere Packungsdichte von dynamischen RAMs. Dynamische Speicher werden daher in modernen Computern als Arbeitsspeicher eingesetzt. Die Informationsspeicherung als Ladung eines Kondensators bedingt allerdings einen zusätzlichen Aufwand bei der Ansteuerung der Speicher. Aufgrund unvermeidlicher Isolationsverluste entlädt sich der Kondensator im Laufe der Zeit. Der Speicher würde also trotz anliegender Versorgungsspannung innerhalb einiger ms bis s die gespeicherte Information verlieren. Aus diesem Grund muss jede einzelne Speicherzelle eines dynamischen Speichers regelmäßig ausgelesen und unmittelbar darauf wieder beschrieben werden (Refresh). Damit wird die anfängliche Ladung wieder hergestellt.

# 2.2.4 Laufzeiteffekte

Die bisherigen Überlegungen gingen von einer unendlich schnellen Verarbeitungsgeschwindigkeit in den Schaltungen aus. Tatsächlich bedeutet das Einoder Abschalten eines Transistors aber eine Bewegung von Ladungsträgern, die nur

in endlicher Zeit erfolgen kann. Jedes Gatter und jedes Flipflop benötigt daher eine Zeit (Laufzeit), die von einer Änderung eines Eingangszustands zur Änderung eines Ausgangszustands verstreicht. Bei der Dimensionierung digitaler Schaltungen muss dieser Effekt berücksichtigt werden, um ungewollte Zwischenzustände zu vermeiden. Dies soll am Beispiel eines Zählers mit angeschlossener Vergleichsstufe verdeutlicht werden. Die 4 Ausgänge des dargestellten asynchronen Zählers sollen dazu einem logischen Gatter zugeführt werden, das nur bei dem Zählerstand 0 eine logische 1 am Ausgang liefern soll. Diese Funktion wird durch ein NOR-Gatter erfüllt.

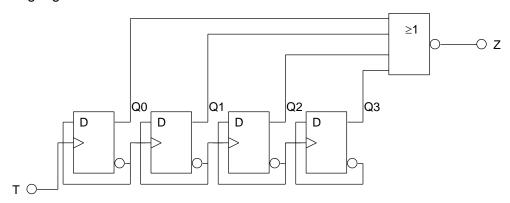


Abbildung 91: Zähler mit angeschlossener Vergleichsstufe

Da die Zähler hintereinander angeordnet sind, kann eine Zählerstufe nur um die Laufzeit verzögert auf eine Zustandsänderung der vorgeschalteten Zählerstufe reagieren. Es entstehen kurzzeitig andauernde Zwischenzustände. Beim Übergang des Zählers vom Zählerstand "7" zum Zählerstand "8" werden nacheinander die Zählerstände "7", "6", "4", "0" und schließlich "8" durchlaufen. Das NOR-Gatter erkennt die "0" und aktiviert kurzzeitig seinen Ausgang. Ein solcher Vorgang wird Glitch, Hazard oder Wischer genannt.

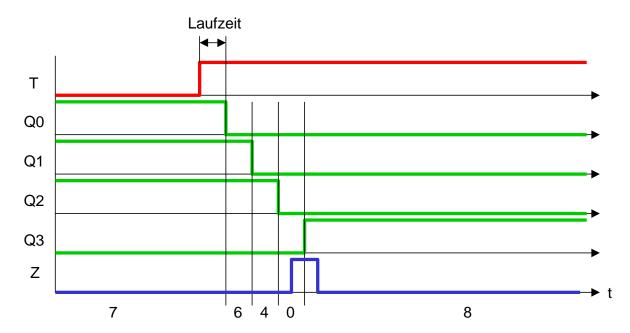


Abbildung 92: Timing-Diagram des Zählers mit angeschlossener Vergleichsstufe

Diese Zwischenzustände, die zu schwer zu erkennenden Fehlern führen können, müssen beim Design einer Schaltung von vornherein vermieden werden. Dies gelingt durch Ausgleich von Laufzeiten durch zwischengeschaltete Gatter (z.B. Identität) oder im Fall von Zählern, indem anstelle eines asynchronen Zählers ein synchroner Zähler verwendet wird, bei dem sämtliche Flipflops vom gleichen Taktsignal gesteuert werden. Der D-Eingang muss bei diesem Zählertyp durch logische Verknüpfung (Gatter) aus den vorgeschalteten Zählerstufenausgängen abgeleitet werden.

Solche Glitches können durchaus auch nutzbringend eingesetzt werden. Eine Schaltung, deren Aufgabe darin besteht, eine positive Flanke zu erkennen ist nachfolgend mit dem zugehörigen Timingdiagramm dargestellt:

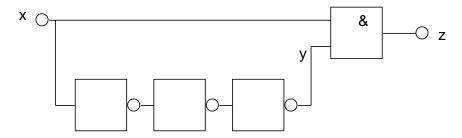


Abbildung 93: Flankendetektor



Abbildung 94: Timing-Diagram des Flankendetektors

# 2.3 Logikfamilien und Ausgangsstufen

### 2.3.1 Logikfamilien

Zur Realisierung von Logikbausteinen können verschiedene Transistortechnologien verwendet werden. Eine logische Schaltung kann aus Bipolartransistoren oder aus MOSFET-Transistoren hergestellt sein. Die Art der Verschaltung der einzelnen Transistoren legt letztlich fest, welche Spannungspegel einer logischen 0 und einer 1 entsprechen, wie hoch die Versorgungsspannung und wie Leistungsaufnahme der Schaltung ist. Auf dem Markt haben sich zwar einige Logikfamilien etabliert, deren Bausteine beliebig miteinander verschaltet werden können. In den meisten Fällen erfordert eine Mischung von Bausteinen unterschiedlicher Logikfamilien aber eine dazwischengeschaltete Pegelanpassung. Nur bei entsprechender Auslegung der Bausteine ist also eine direkte Mischung möglich. Ob dies möglich ist kann nur anhand der Angaben im Datenblatt der entsprechenden Bausteine bewertet werden. Dabei ist die Definition der Logikpegel wichtig. Für die Logikfamilie der Bipolartransistoren, die TTL (Transistor-Transistor-Logik) sind z.B. folgende Pegel definiert:

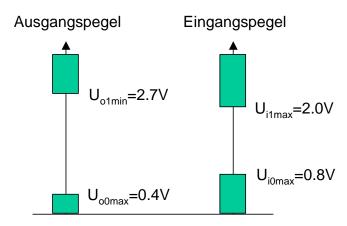
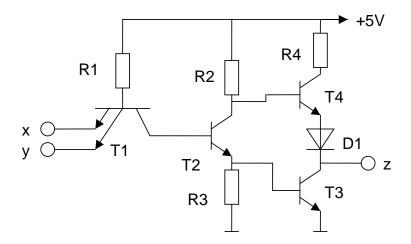


Abbildung 95: Ein- und Ausgangspegelbereiche der TTL-Logik

Damit ein Ausgang mit einem Eingang verbunden werden kann, müssen die am Ausgang bereitgestellten Pegel zweifelsfrei von der Eingangsstufe identifiziert werden. Daher darf beispielsweise bei einer logischen 0 der Ausgang eine Spannung von maximal 0.4V liefern. Hingegen muss der Eingang einer Logikstufe aus der gleichen Familie eine Spannung bis zu 0.8V als logische 0 erkennen. Diesen Abstand von 0.4V für den 0-Pegel nennt man den statischen Störabstand. Für den 1-Pegel beträgt er in diesem Fall 0.7V.

Eine typische TTL-Schaltung ist das NAND-Gatter aus Abbildung 96, bei dem die Eingangsstufe aus einem Transistor mit zwei Emittern besteht. Die Funktion entspricht der von zwei Transistoren, bei denen Basis und Kollektor zusammengeschaltet sind. Sobald einer der beiden Eingänge einen 0-Pegel führt, geht auch der Kollektor auf eine niedrige Spannung. Dadurch sperrt der Transistor T2. Über den Widerstand R2 führt Transistor T4 Basisstrom und wird leitfähig. Der Ausgang liefert also 1-Pegel. Nur wenn beide Eingänge 1-Pegel führen, ist der Kollektor von T1 auf hoher Spannung, sodass T2 leitfähig wird. Damit schaltet auch T3 durch und T4 sperrt. Der Ausgang liefert also 0-Pegel.



#### Abbildung 96: NAND-Gatter-Realisierung mit Bipolartransistoren

Je nach Zustand der Eingänge fließt durch R2 bzw. R3 auch im stationären Zustand ein Strom. Daher haben Bausteine der TTL-Familie eine vergleichsweise hohe Stromaufnahme. Durch spezielle Bauart der Transistoren (Schottky-Transistoren) gelingt es, bei nahezu gleichbleibender Verarbeitungsgeschwindigkeit die Stromaufnahme zu senken (Low-Power-Schottky-TTL-Familie: LS-TTL), in batterieversorgten Geräten werden aber auch diese nur ungern eingesetzt.

Eine deutlich kleinere Stromaufnahme haben Bausteine der CMOS-Familie, aus deren Reihe ebenfalls ein NAND-Gatter dargestellt ist.

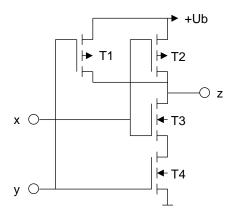


Abbildung 97: NAND-Gatter-Realisierung mit CMOS-Transistoren

Basiselemente sind die Komplementärinverterstufen T1/T4 und T2/T3. Wenn Eingang x 0-Pegel führt, wird T2 leitend und T3 sperrt. Damit liefert der Ausgang z 1-Pegel. Ähnliches ergibt sich für Eingang y. Nur wenn beide Eingänge 1-Pegel führen, sind T3 und T4 beide leitend, T1 und T2 sperren, sodass der Ausgang 0-Pegel liefert. Gegenüber der TTL-Schaltung wird deutlich, dass im Ruhezustand kein Strom durch die Schaltung fließt. In der Praxis tritt nur ein sehr kleiner Leckstrom auf. Nur während des Ein- oder Ausschaltens der Transistoren fließt ein Strom. CMOS-Schaltungen sind gegenüber TTL-Schaltungen langsamer, aber eignen sich aufgrund der niedrigen Stromaufnahme hervorragend für batteriebetriebene Geräte. Auch ist der Betriebsspannungsbereich von CMOS-Schaltungen sehr groß. Während bei TTL-Schaltungen eine Spannung von 5V in engen Grenzen eingehalten werden muss, kann die Versorgungsspannung bei CMOS-Schaltungen zwischen 3V und 15V variieren.

Bei hochintegrierten Schaltkreisen wird aufgrund deren Einfachheit oft die NMOS-Logik gewählt. Bei diesen erfolgt der Aufbau sämtlicher Bauelemente durch N-Kanal-MOS-Transistoren. Selbst Lastwiderstände werden bei dieser Technologie durch Transistoren ersetzt. Die folgende Schaltung zeigt ein NOR-Gatter in NMOS-Logik.

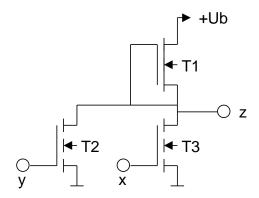


Abbildung 98: NOR-Gatter-Realisierung mit NMOS-Transistoren

Es ist zu beachten, dass T2 und T3 Anreicherungstypen sind, während T1 ein Verarmungstyp ist. Wenn beide Eingänge 0-Pegel führen, sperren die Transistoren T2 und T3. Der selbstleitende Transistor T1 zieht dann den Ausgang auf 1-Pegel. Wenn einer der Eingänge auf 1-Pegel liegt, leitet der zugehörige Transistor T2 oder T3. Dadurch wird die Spannung am Ausgang reduziert. Die Spannung am Gate von T1 wird ebenfalls niedrig, so dass T1 sperrt. Damit ist auch hier die Ruhestromaufnahme niedriger als bei TTL-Schaltungen.

# 2.3.2 Open-Kollektor- und Open-Drain-Ausgangsstufen

In der Schaltungstechnik besteht oft das Problem, sehr viele Ausgänge miteinander verknüpfen zu müssen. Wenn z.B. 40 Ausgänge miteinander verknüpft werden sollen, würde ein Gatter mit 40 Eingängen oder eine Kaskadeschaltung benötigt werden. Der Aufwand lässt sich reduzieren, indem Bausteine verwendet werden, die anstelle einer vollständigen Ausgangsstufe nur einen einzigen Transistor haben. Eine solche Endstufe nennt man Open-Kollektor bei Bipolartransistoren und Open-Drain bei Feldeffekttransistoren. Diese Ausgangsstufen lassen sich beliebig parallel schalten.

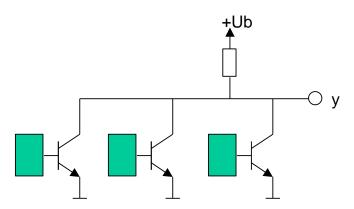
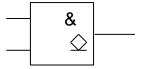


Abbildung 99: Open-Kollektor-Endstufe

Damit ein ausreichender 1-Pegel erzeugt werden kann, muss eine Verbindung zur positiven Versorgungsspannung eingebaut sein, diese erfolgt über einen so genannten pullup-Widerstand. Sobald einer der Ausgangstransistoren durchgeschaltet wird, d.h. der entsprechende Ausgang 0-Pegel liefert, führt auch der gesamte Verknüpfungspunkt 0-Pegel. Die Verknüpfung entspricht also einer UND-Funktion. Diese Art der Verschaltung wird daher auch wired-AND genannt. Um Gatter

kenntlich zu machen, die eine Open-Kollektor oder Open-Drain Ausgangsstufe besitzen, wird ein Symbol im Schaltzeichen ergänzt:



# Abbildung 100: Kennzeichnung einer Open-Kollektor- oder Open-Drain-Ausgangsstufe

Eine solche Verdrahtung findet sich auch, wenn verschiedene Bausteine auf eine gemeinsame Leitung zugreifen. Dies ist bei Mikroprozessoren beispielsweise bei Interrupt-Leitungen der Fall. Im Automobilbereich wird zur Vernetzung der einzelnen im Fahrzeug befindlichen Steuerelektroniken oft der CAN-Bus (Controller Area Network) eingesetzt. Dieser Bus verwendet zwei Leitungen (CAN-High, CAN-Low), an die sämtliche Busteilnehmer parallel angeschlossen sind.

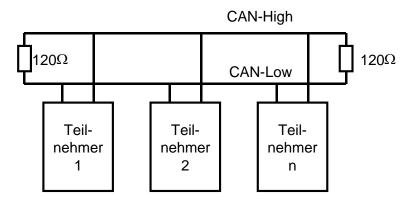


Abbildung 101: Beispiel für CAN-Bus-Topologie

Innerhalb der einzelnen Teilnehmer wird eine integrierte Schaltung (Bus-Transceiver) mit Open-Kollektor-Ausgängen verwendet, dessen Blockschaltbild in der folgenden Zeichnung angegeben ist.

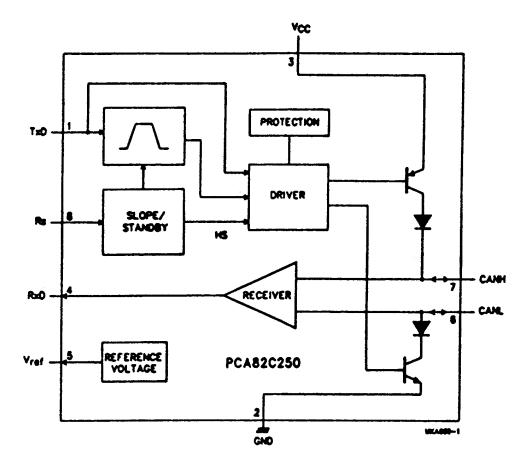


Abbildung 102: Aufbau eines CAN-Bus-Transceivers

Wenn dieser Transceiver Daten überträgt, schaltet er beide Ausgangstransistoren durch. Die Spannung an der CAN-High-Leitung wird daraufhin erhöht, die Spannung an der CAN-Low-Leitung erniedrigt. Diese "dominant" genannten Spannungsänderungen können von jedem am Bus angeschlossenen Teilnehmer erkannt und gelesen werden. Im inaktiven Zustand sperren die Transistoren, so dass entweder beide Leitungen bedingt durch die 120Ohm-Widerstände gleiche Spannung haben (Bus ist "rezessiv") oder ein anderer Busteilnehmer aktiviert den Bus.

Der CAN-Bus läuft im Automobil mit Übertragungsraten von bis zu 1Mbit/s. In Zukunft werden verstärkt auch schnellere Technologien wie FlexRay oder E-MOST im Automobil eingesetzt werden.

### 2.3.3 Tristate-Ausgangsstufen

In Rechnerschaltungen werden oft parallele Busleitungen verwendet, an denen eine Vielzahl von Bausteinen, wie CPU oder Speicher angeschlossen sind. Diese Bausteine können keine Standard-Ausgangsstufen haben, denn diese würden bei der Parallelschaltung im Falle einer logischen 1 am Ausgang des einen Bausteins und einer logischen 0 am Ausgang eines anderen Bausteins zu Kurzschlüssen und damit möglicherweise zu Zerstörungen führen. Prinzipiell wäre auch hier der Einsatz von Open-Kollektor- oder Open-Drain-Ausgangsstufen möglich, beim Deaktivieren des Ausgangstransistors kann aber nur der pullup-Widerstand den Pegel wieder auf logisch 1 bringen. Wegen der unvermeidlichen Kapazitäten von Busleitungen und der angeschlossenen Bausteine wird dieser Vorgang umso langsamer, je höher der Wert

des Widerstands ist. Andersherum bedeutet aber ein kleiner Widerstand eine hohe Stromaufnahme bei aktivierter Busleitung.

Daher ist es wünschenswert, Ausgangsstufen zu haben, die sich wie eine Standard-Ausgangsschaltung verhalten, wenn der Baustein aktiviert ist und im inaktiven Zustand den Baustein vom Bus trennen. Solche Ausgangsstufen werden Tristate-Ausgangsstufen gennant. Neben den logischen Pegeln 1 und 0 können sie einen dritten Zustand, nämlich hochohmig (Trennung vom Bus) annehmen. Somit können beliebig viele solcher Stufen ähnlich wie bei Open-Kollektor-Stufen parallel geschalten werden. Durch eine Steuerlogik und einen zusätzlichen Steuereingang muss aber sichergestellt werden, dass gleichzeitig nur ein einziger an einer Busleitung angeschlossener Baustein aktiviert wird. Alle anderen angeschlossenen Bausteine müssen in den hochohmigen Zustand gehen.

Eine solche Tristate-Ausgangsstufe in TTL-Technologie ist in Abbildung 103 gezeigt.

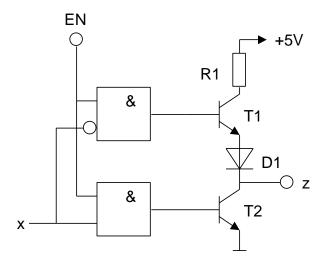
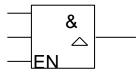


Abbildung 103: Aufbau einer Tristate-Ausgangsstufe

Wenn die Enable-Leitung (EN) 0 ist, sind die Ausgänge beider UND-Gatter 0 und beide Ausgangstransistoren sperren. Der Ausgang z ist also hochohmig. Erst wenn EN 1 ist, leitet abhängig vom Zustand des Eingangs x entweder T1 oder T2 und liefert am Ausgang eine logische 1 oder 0.

Solche Tristate-Ausgangsstufen sind im Schaltbild durch ein kleines Dreieck und das Vorhandensein eines Steuereingangs gekennzeichnet.



# Abbildung 104: Kennzeichnung einer Tristate-Ausgangsstufe

Ein etwas umfangreicherer Ausschnitt aus einem Schaltplan eines Mikroprozessorsystems zeigt die Parallelschaltung von zwei Speicherbausteinen und dem Mikroprozessor, die alle über einen Tristate-Ausgang verfügen.

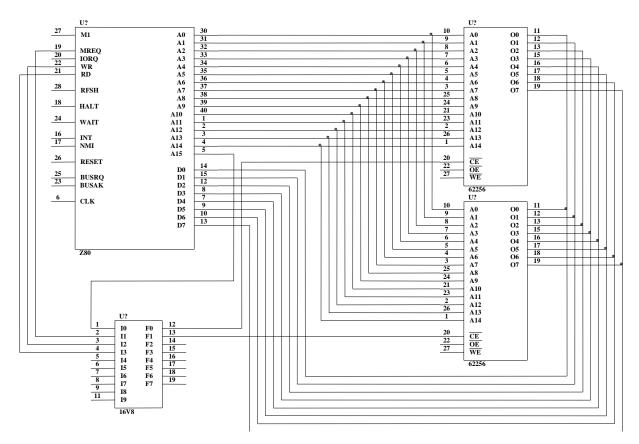


Abbildung 105: Schaltplan eines einfachen Mikroprozessorsystems

Die Datenbusleitung sind beim Prozessor Z80 D0..D7 nummeriert, bei den Speichern 62256 heißen sie O0..O7. Der Enable-Eingang der Speicher /CE (Chip-Enable) ist mit einer Steuerlogik (16V8) verbunden, die dafür sorgt, dass nur ein Speicher zur selben Zeit aktiviert wird und dieses nur dann, wenn nicht gerade der Prozessor auf den Datenbus zugreift.

# 3 Grundlagen der Nachrichtentechnik

# 3.1 Transportmedien

Neben der Verarbeitung und Aufbereitung von Informationen müssen diese zwischen den einzelnen informationsverarbeitenden Einheiten transportiert werden. Bei der elektrischen Informationstechnik liegt dabei die Information in Form elektrischer Größen (Strom oder Spannung) vor. In den einfachsten Fällen findet der Transport in elektrischen Leitungen statt. Bei großen Übertragungsentfernungen oder bei hohen kommen Lichtwellenleiter zum Einsatz. Soll Bandbreitebedarf eine Informationsübermittlung zu oder von einer mobilen Station erfolgen, muss der Transport drahtlos vor sich gehen. Diese drei unterschiedlichen Arten des Transports sollen Folgenden behandelt werden. Da Leitungstheorie, im Übertragungstechnik und die freie Wellenausbreitung sehr komplexe Themen sind, denen sich in der Elektrotechnik jeweils eigenständige Fachvorlesungen widmen, kann hier nur ein kurzer Einblick in das Verhalten der Übertragungsmedien gegeben werden.

## 3.1.1 Elektrische Leitungen

Leitungen sind die ältesten und einfachsten Transportmedien für Daten in elektrischer Form. Bis auf entsprechende Leitungstreiber sind keine speziellen Sende- oder Empfangsbausteine notwendig. Die Leitung kann direkt elektrisch mit der Schaltung verbunden werden.

Die speziellen Eigenschaften von Leitungen wirken sich bei hohen Signalfrequenzen aus, so dass Leitungen einen wesentlichen Einfluss auf Systeme zur schnellen Datenübertragung ausüben.



#### Abbildung 106: Zweidrahtleitung

Es werden verschiedene Arten von Leitungen zur Informationsübertragung genutzt:

- Zweidrahtleitungen (Abbildung)
  - **erweiterte Form:** Flachbandleitungen = zusammengefasste Zweidrahtleitungen (z. B. in PC's)
- verdrillte Zweidrahtleitungen (twisted pair, z.B. 100-Mbit-LAN)
- Koaxialleitungen (drahtförmiger Innenleiter von Außenleiter flächig umschlossen; z.B. Antennenleitungen)

Bei der Informationsübertragung befindet sich die Information zumeist im Spannungspegel. Wird ein Spannungsimpuls u1 am Eingang in die Leitung zum Zeitpunkt t1 eingespeist, erscheint ein Impuls u2 mit niedrigere Amplitude erst nach einer gewissen Verzögerung  $\tau$  (sprich: tau) am Ausgang :

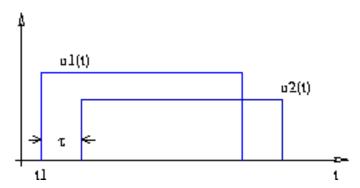


Abbildung 107: Laufzeitverzögerung und Amplitudendämpfung

Die Leitung bewirkt bei der Übertragung des Signals also zweierlei:

- Das Signal wird um die *Laufzeit τ* des Signals verzögert.
- Die Amplitude des Signals verringert sich, das Signal erfährt eine *Dämpfung* a.

Dieser Sachverhalt führt zu folgendem Ausdruck für  $u_2(t)$ :

$$u_2(t)=a\cdot u_1(t-\tau)$$
 mit  $a<1$ 

Die Laufzeit  $\tau$  ist abhängig vom Leitungsmaterial zwischen den Leitern und liegt oberhalb er Laufzeit von Licht. Als Größenordnung gilt für übliche Kabel eine Laufzeit pro Kabellänge l:

$$\frac{\tau}{l} \approx 5 \frac{ns}{m}$$

Die stets vorhandene Verzögerung der Signale durch die Laufzeit bringt es mit sich, dass Datenübertragungsprotokolle, die auf Handshake-Verfahren beruhen, nicht mit beliebig langen Leitungen genutzt werden können.

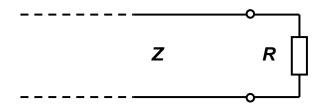
#### 3.1.1.1 Wellenwiderstand und Leitungsabschluss

Die Leitung kann mathematisch mit einer partiellen Differentialgleichung beschrieben werden, die als Lösung eine Welle hat, die sich vom Leitungsanfang zum Leitungsende fortbewegt und eine Welle, die sich in umgekehrte Richtung ausbreitet. Damit ist prinzipiell ein bidirektionaler Betrieb (gleichzeitig) jeder Leitung möglich. In der Technik wird davon jedoch kaum Gebrauch gemacht. Die zwei Lösungen sind aber dann von Interesse, wenn die Leitung eine Störung aufweist. An dieser Störstelle wird ein Teil der sich ausbreitenden Welle reflektiert und läuft als rücklaufende Welle zum Ausgangspunkt zurück. Eine solche Störstelle kann eine Verbindungsstelle von zwei Leitungsstücken, eine Unterbrechung oder ein Kurzschluss sowie das Ende der Leitung sein.

Eine für diesen Reflexionsvorgang wichtige Kenngröße der Leitungen ist der Wellenwiderstand Z, auch als Leitungsimpedanz bekannt. Typische Werte für den Wellenwiderstand sind

- $Z=50\Omega$  oder  $75\Omega$ : Antennenleitung (Koaxialleitung)
- $Z=100\Omega$ : 100-Mbit-Twisted-Pair-LAN (verdrillte Zweidrahtleitung)

Die Bedeutung des Wellenwiderstandes kann an folgender Vorstellung verdeutlicht werden: Eine unendlich lange Leitung mit dem Wellenwiderstand Z sei am Ende mit einem Widerstand R verbunden. Dann wird an diesem Widerstand von dem über die Leitung ankommende Spannungssignal ein gewisser Teil reflektiert.



#### Abbildung 108: Lange Leitung mit Abschlusswiderstand

Das Maß dafür, wie groß der reflektierte Anteil von der Spannung ist, ist der Reflexionsfaktor r für die Spannung:

$$r = \frac{R - Z}{R + Z}$$

Spezialfälle der Reflexion:

R→∞ (Leerlauf): r=1

• *R*=0 (Kurzschluss): *r*=-1

• R=Z (keine Reflexion): r=0

Neben diesem Reflexionsfaktor für die Spannung lässt sich ein Reflexionsfaktor für den Strom definieren, auf den jedoch nicht weiter eingegangen werden kann.

Der letzte Fall ist der wichtige Fall der Anpassung (oder Terminierung), bei dem kein Teil des einfallenden Signals reflektiert wird. Der Vorgang der Reflexion am Ende der Leitung führt dazu, dass sich an jeder Stelle x der Leitung die Spannung  $u_X(t)$  aus der Überlagerung der hinlaufenden Spannung  $u_h$  und der reflektierten, rücklaufenden Spannung  $u_r$  am Orte x ergibt.

$$u_{\boldsymbol{X}}(t) = u_{h,\boldsymbol{X}}(t) + u_{r,\boldsymbol{X}}(t)$$

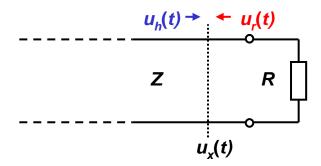


Abbildung 109: Hin- und rücklaufende Spannung

Nur wenn die Leitung am Ende angepasst abgeschlossen ist, werden Reflexionen vermieden. Dies ist wichtig für Datenübertragungen, da das reflektierte Signal das gesendete logische Signal überlagern würde und damit letzteres nicht detektierbar ist. Ein Beispiel hierfür ist das Thin-Ethernet-LAN (Datenübertragung über Koaxialleitung):

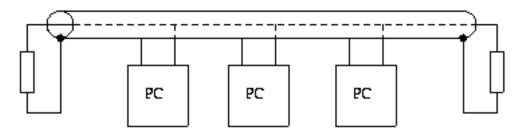


Abbildung 110: PC-Netzwerk mit Koaxialleitungen

Die von den Rechnern eingespeisten Impulse werden bei angepasst abgeschlossener Leitung nicht reflektiert: die Kommunikation ist möglich. Bei fehlerhaftem Abschluss werden die Signale reflektiert und die Überlagerung der reflektierten mit den eigentlichen Signalen ist für die PC's nicht dekodierbar: die Kommunikation ist gestört. Die in den PC's verwendeten Netzwerkkarten sind so ausgelegt, dass sie an den Anschlussstellen nicht als Störstelle in Erscheinung treten, d.h. ihr Innenwiderstand ist deutlich höher als der Wellenwiderstand des Kabels.

Ein weiteres Beispiel ist das SCSI-Bussystem im PC, bei dem die Terminierung im letzten der angeschlossen Geräte realisiert ist. Die Terminierung an einem anderen als dem Gerät am Ende des Busses würde eine Fehlanpassung bedeuten; das System würde nicht funktionieren.

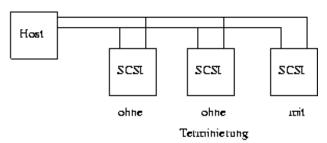
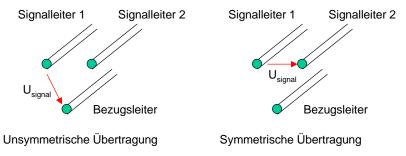


Abbildung 111: SCSI-Bussystem

## 3.1.1.2 Symmetrische und unsymmetrische Übertragung auf Leitungen

Bei mehradrigen Leitungen bestehen prinzipiell zwei Arten der Informationsübertragung. Die Übertragungsspannung kann entweder zwischen einem der Signaladern und einem Bezugsleiter oder aber zwischen zwei gleichwertigen Signaladern liegen, wobei hier der Bezugsleiter die halbe Spannung führt. Der Bezugsleiter ist entweder ein separater im Kabel enthaltener Leiter, die Kabelabschirmung bei abgeschirmten Leitungen oder bei Fahrzeugen die Karosserie.



#### Abbildung 112: Symmetrische und unsymmetrische Übertragung

Bei der unsymmetrischen Übertragung sind für n Signale n+1 Leiter erforderlich. Die Schnittstellen eines Computers (Centronics, RS-232) nutzen diese Art der Verschaltung. Bei der Centronics-Schnittstelle wird der Bezugsleiter meist durch mehrere parallel geschaltete Leiter gebildet. Die unsymmetrische Übertragung hat einige Nachteile speziell wenn der Bezugsleiter in größerem Abstand zu den Signalleitern liegt:

## Überkopplung

Es kann zwischen den einzelnen Signalleitern zu Überkopplungen kommen. Bei größeren Leitungslängen kann dieser Effekt so stark werden, dass die übertragenen Signale nicht mehr erkannt werden können.

#### **Abstrahlung**

Bedingt durch den Abstand von Bezugsleiter und Signalleiter und dadurch, dass die Signalleiter und Bezugsleiter nicht miteinander verdrillt werden können, lösen sich bei höheren Übertragungsraten elektromagnetische Wellen von der Leitung. Die Leitung wird zur Antenne, die Abstrahlung kann zu Beeinträchtigungen im Rundfunkempfang in der Umgebung der Leitung führen.

#### **Einstrahlung**

Da die Leitung ein passives lineares Bauelement darstellt, ist das Phänomen der Abstrahlung umkehrbar (Reziprozität). Äußere elektromagnetische Felder, z.B. durch ein in der Nähe betriebenes Mobiltelefon verursacht, führt zu einer eingekoppelten Spannung, die sich der Signalspannung überlagert. Überschreitet diese eine bestimmte Größenordnung, kann das übertragene Signal nicht mehr korrekt erkannt werden.

#### Variation der Leitungsparameter

Die Lage des Signalleiters zum Bezugsleiter variiert entlang der Leitung. Dadurch sind die Leitungsparameter, wie z.B. der Wellenwiderstand, nicht mehr konstant. Die

Leitung kann nicht mehr vollständig reflexionsfrei abgeschlossen werden und in der Leitung selbst können Reflexionen auftreten. Darunter leidet die Signalqualität.

Diese Nachteile kann man zum großen Teil durch eine symmetrische Übertragung umgehen. Der Aufwand für diese Übertragungsart ist sowohl bei Kabel als auch bei den Sende- und Empfangselementen deutlich höher. Da in vielen Fällen ebenfalls ein Bezugsleiter verwendet wird, müssen zur Übertragung von n Signalen 2n+1 Leiter verwendet werden. Eine besonders gute Symmetrie und damit hervorragende Übertragungseigenschaften kann durch die Verdrillung der beiden beteiligten Signalleiter erreicht werden. In den sogenannten "Twisted-pair"-Kabeln sind die entsprechenden Leiter paarweise miteinander verdrillt. Mit solchen Systemen können Signale über größere Entfernungen übertragen werden, z.B. RS-485 (Profibus in Industrieanlagen).

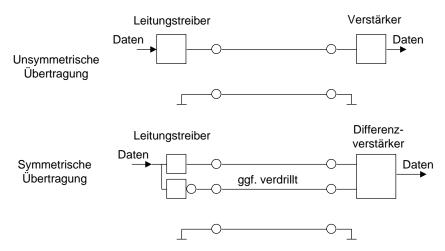


Abbildung 113: RS-485 Bussystem

#### 3.1.1.3 Parallele und serielle Übertragung

Steht nur eine einzige Leitung für die Datenübertragung zur Verfügung, so müssen die Daten nacheinander über die Leitung transportiert werden (serielle Übertragung). Beispiele für eine solche Übertragung ist die RS-232-, USB-, oder Firewire-Übertragung. Stehen eine genügend hohe Anzahl von Leitungen zur Verfügung, können diese parallel für die Übertragung genutzt werden (parallele Übertragung). Ein Beispiel dafür ist die Anbindung eines von Festplatten über die IDE-Schnittstelle.

Der Aufwand für eine parallele Übertragung ist bezüglich der n-fachen Ausführung von Leitung, Sende- und Empfangsstufe ungleich höher als bei der seriellen Übertragung. Jedoch kann bei gleicher Leitungsqualität auch ein n-facher Datendurchsatz realisiert werden.

# 3.1.2 Lichtwellenleiter

Daten lassen sich auch auf optischem Weg übertragen. Dies wird ohne spezielles Medium bei einer Infrarot-Fernbedienung oder der IrDA-Schnittstelle genutzt. Erforderlich werden Lichtquellen, die schnell elektrisch ein- und ausgeschalten werden können, sowie Fotoempfänger, die Lichtstärkeänderungen wieder in

elektrische Signale umwandeln können. Die überbrückbare Entfernung ist mit solch einfachen Anordnung mit einigen Metern recht gering. Mit entsprechenden Lichtquellen (gerichtete Laser) lässt sich diese auf einige 100m erweitern (optische Richtstrecken). Die optische Übertragungstechnik wurde aber erst durch die Entwicklung von Lichtwellenleitern technisch bedeutsam, denn damit sind Übertragungsstrecken im Bereich bis einige 10km problemlos möglich. Damit bestehen große Vorteile speziell für die Weitverkehrsübertragungstechnik.

Lichtwellenleiter bestehen aus Quarzglas, dessen Brechzahl durch Einbringen von Fremdstoffen variiert werden kann. Sie besitzen je nach Wellenlänge des Lichts ein außerordentlich geringe Dämpfung (bis zu 0,2dB/km, d.h. nach 50km ist noch ein zehntel der eingestrahlten Lichtleistung messbar). Im Prinzip wäre ein Glasstab zum gerichteten Transport von Licht ausreichend. Dazu muss der Einfallswinkel des Lichts genügend klein sein, damit es an der Grenze von Glas zu Luft zu einer Totalreflexion kommt. Diese Totalreflexionen wiederholen sich entlang des Stabes mehrmals.



Abbildung 114: Reflexion des Lichtstrahls im Lichtwellenleiter

Aufgrund der schlechten Eigenschaften der Luft im Vergleich zum Quarzglas würde aber bei jeder Totalreflexion ein Teil der Leistung verloren gehen, so dass bei einer solchen Anordnung die Dämpfung deutlich höher als die Dämpfung des reinen Quarzglases wäre. Daher werden technische Lichtwellenleiter so konstruiert, dass die Totalreflexion nicht an der Oberfläche zur Luft, sondern an einer Grenzschicht im Quarzglas selbst stattfindet. Voraussetzung dafür ist aber die Nutzung von Materialien mit unterschiedlichen Brechzahlen. Man unterscheidet den Kern des Lichtwellenleiters mit einer hohen Brechzahl und den Mantel mit einer niedrigeren Brechzahl. Das Grundmaterial ist bei beiden Quarzglas, dessen Brechzahl durch gezielte Verunreinigungen variiert wird. Neben einem sprungförmigen Übergang (Stufenprofil) zwischen Mantel und Kern kann dieser auch kontinuierlich erfolgen, so dass die "Lichtstrahlen" nicht mehr zickzackförmig, sondern in Form von Sinusbahnen durch den Lichtwellenleiter laufen. Ein solcher Lichtwellenleitertyp Gradientenfaser genannt.

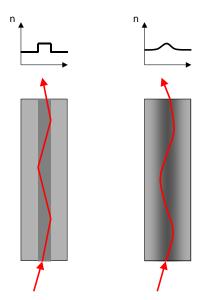


Abbildung 115: Reflexion in einer Gradientenfaser

Bei den gezeichneten Lichtwellenleitern kann das Licht auf mehreren Wegen vom einem Ende zum anderen Ende gelangen. Der Weg hängt maßgeblich von der Art der Einstrahlung ab (Einstrahlwinkel,...). Üblicherweise ist eine Lichtquelle nicht völlig gerichtet und scharf gebündelt, so dass in einem realen Lichtwellenleiter durch das Licht gleichzeitig mehrere Pfade genutzt werden. Insbesondere wenn die Weglänge oder genauer die Zeit zum Zurücklegen der Weglänge für diese Pfade unterschiedlich sind, erreicht ein Teil des Lichts das Ende des Lichtwellenleiters vor einem anderen Teil. Wird also ein Lichtimpuls eingestrahlt, der beim Einstrahlen eine rechteckförmige Kontur hat, so erscheint am Ausgang des Lichtwellenleiters der Impuls verschliffen und verbreitert. Dieser Effekt vermindert die Übertragungsbandbreite und/oder die nutzbare Länge der Leitung.

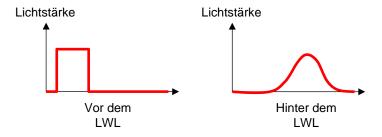


Abbildung 116: Verschleifung des Signals durch den LWL

Die möglichen unterschiedlichen Wege innerhalb der Leitung werden auch Moden genannt. Die skizzierten Lichtwellenleiter werden daher Multimode-Fasern genannt. Solche Multimode-Fasern sind mit Manteldurchmessern von 125µm-250µm und Kerndurchmessern von 50µm-80µm lieferbar. Als mechanischer Schutz ist um die eigentliche Glasfaser eine Hülle (Coating) gezogen.

Wenn nur ein Pfad durch den Lichtwellenleiter möglich ist, kann der Effekt der Impulsverbreitung minimiert werden. Ein solcher Lichtwellenleiter wird Monomode-Faser genannt. Dabei handelt es sich um eine Faser mit Stufenindexprofil, bei der der Kern aber extrem dünn (3µm..8µm) ausgeführt wird. In der Weitverkehrstechnik werden ausschließlich solche Fasern eingesetzt.

#### 3.1.2.1 Sende- und Empfangselemente

Als Sendeelemente (Lichtquellen) kommen heute nur Halbleiterdioden zum Einsatz. Je nach Einsatzgebiet werden spezielle Leuchtdioden (hohe Leuchtdichte, kleiner Leuchtfleck) für niedrige Ansprüche und Laserdioden für hohe Ansprüche eingesetzt. Die Verwendung von Monomode-Faser erzwingt praktisch die Verwendung von Laserdioden. Die optische Nachrichtentechnik nutzt fast ausschließlich Strahlung mit großer Wellenlänge im Infrarot-Bereich. Gebräuchlich sind die Wellenlängen 830nm, 1300nm und 1550nm. Die Strahlung ist also nicht sichtbar, was die Fehlersuche in optischen Systemen erschweren kann.

Empfangselemente sind Photodioden, d.h. Halbleiterdioden, deren p-n-Übergang vom Licht durch ein Fenster erreicht werden kann. Die Dioden werden in Sperrrichtung betrieben, so dass sich die Sperrschicht, also eine an Ladungsträgern verarmte Schicht, aufbaut. Durch ein Lichtquant kann in dieser Schicht spontan ein Elektron aus dem Gitterverbund gelöst werden, wobei ein freies Elektron und ein Loch entstehen die zu einem Strom führen. Der Strom in Sperrrichtung der Diode wird umso größer, je höher die Lichtstärke ist. Damit können Lichtstärkeänderungen wieder in elektrische Signale umgeformt werden.

Einen Vergleich von optischen Fasern mit elektrischen Leitungen zeigt die folgende Darstellung.

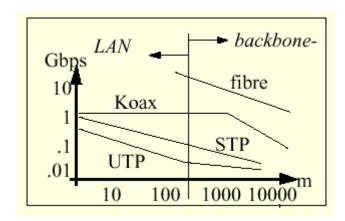


Abbildung 117: Vergleich von optischen Fasern mit elektrischen Leitungen

fibre: Lichtwellenleiter Koax: Koaxialkabel

STP: geschirmtes verdrilltes Kabel (shielded twisted pair) UTP: ungeschirmtes verdrilltes Kabel (unshielded twisted pair)

Auch wenn optische Systeme nahezu ideale Eigenschaften haben, gibt es dennoch einen recht gravierenden Nachteil zu beachten: Die Anbindung einer Leuchtdiode, Laserdiode oder Photodiode an eine optische Faser ist enorm aufwändig. Da der Kern von Lichtwellenleitern sehr dünn ist, müssen Steckverbindern extrem präzise gefertigt werden. Sie sind daher verglichen mit elektrischen Steckverbindern teuer.

#### 3.1.3 Freie Wellenausbreitung

Bei den oben vorgestellten Übertragungsmedien erfolgt die Übertragung entlang eines materiellen Mediums. Dies macht diese Art der Übertragung für mobile Systeme ungeeignet. Optische Systeme ohne Lichtwellenleiter eignen sich zwar prinzipiell für mobile Systeme, sind aber auf einige Meter Reichweite begrenzt.

Für mobile Systeme können daher nur Funksysteme verwendet werden. Bei diesen erfolgt die Signalausbreitung ohne die Erfordernis eines Übertragungsmediums, weshalb sie auch unter den Vakuumbedingungen des Weltraums funktionieren.

Die Information wird in Form eines elektromagnetischen Feldes übertragen. Dieses setzt sich aus einem zeitveränderlichen elektrischen und einem zeitveränderlichen magnetischen Feld zusammen. Ein zeitveränderliches elektrisches Feld erzeugt ein magnetisches Feld, das wiederum ein elektrisches Feld erzeugt. So breiten sich die Felder immer weiter in den Raum aus. Da dieser Mechanismus nur mit zeitveränderlichen Feldern funktioniert, können Gleichfelder nicht auf diese Art übertragen werden. Soll ein beliebiger Datenstrom übertragen werden, muss folglich dafür gesorgt werden, dass die bei der Übertragung entstehenden Felder sich mit der Zeit verändern. Es ist zweckmäßig, sinusförmige Felder zu erzeugen, die eine bestimmte Frequenz f haben. Die Zeitfunktion ist dann z.B.:

$$E(t) = E_0 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi)$$

Die zu übermittelnden Daten können dementsprechend in einer der Größen  $E_0$ , f oder  $\varphi$  verpackt sein. Dies bezeichnet man als Modulation, die in einem der folgenden Kapitel näher erläutert wird.

Die Theorie der freien Wellenausbreitung ist eins der anspruchvollsten Themen der Elektrotechnik. Im Rahmen dieser einsemestrigen Vorlesung kann nicht erschöpfend darauf eingegangen werden. Nichtsdestotrotz soll hier ein Blick auf die zur Anregung und zum Empfang elektromagnetischer Wellen notwendigen Antennen geworfen werden.

Eine Antenne ist im einfachsten Fall ein metallischer Stab, der in der Mitte unterbrochen und mit Anschlussklemmen versehen ist. Eine solche Antenne wird elektrischer Dipol oder nur kurz Dipol genannt.

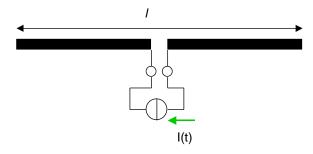


Abbildung 118: Elektrische Dipolantenne

Wird an die Klemmen eine Stromquelle angelegt, die einen sinusförmigen Strom:

$$I(t) = I_0 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi)$$

erzeugt, so werden bei der positiven Halbwelle Elektronen aus der linken Stabhälfte auf die rechte befördert. Die Information darüber, dass an der linken Klemme Elektronen entnommen (Elektronenverarmung) und an der rechten Klemme zugefügt werden (Elektronenverdichtung) kann nur in endlicher Zeit von den Klemmen zu den Stabenden gelangen. Dieser Elektronendichteimpuls (Stromwelle) wird am Ende des Stabes ähnlich wie eine Spannungswelle an einem offenen Leitungsende reflektiert und gelangt nach der Laufzeit  $\tau$  wieder zu den Klemmen. Hat in der Zwischenzeit die Stromquelle ihr Vorzeichen geändert, so wird die Stromwelle durch die Stromquelle noch verstärkt. In diesem Fall ist der Dipol in Resonanz.

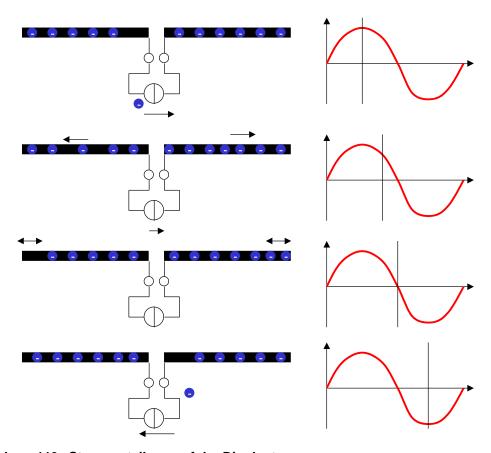


Abbildung 119: Stromverteilung auf der Dipolantenne

Als Resonanzbedingung kann dann abgeleitet werden:

$$2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau = \pi \implies f = \frac{1}{2 \cdot \tau}$$

Ist die Umgebung des Stabes Vakuum oder Luft, so breitet sich die Stromwelle mit Lichtgeschwindigkeit c aus. Für die Laufzeit  $\tau$  gilt dann:

$$\tau = \frac{2 \cdot \frac{l}{2}}{c} = \frac{l}{c}$$

und damit:

$$f = \frac{c}{2 \cdot l}$$

Mit der Definition der Wellenlänge

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{35}$$

lässt sich für die Resonanzbedingung schreiben:

$$l = \frac{\lambda}{2}$$

Der Dipol heißt daher auch  $\lambda/2$ -Dipol.

Herrscht auf der einen Stabhälfte ein Elektronenüberschuss und auf der anderen Hälfte Elektronenmangel, muss sich zwischen den beiden Stabhälften ein elektrisches Feld ausbilden. Der Stromfluss durch den Stab wiederum ruft ein magnetisches Feld um den Stab hervor. Insgesamt ergibt sich im Außenbereich der Antenne ein elektromagnetisches Feld, das sich von der Antenne löst und sich frei von der Antenne ausbreitet. Im Fernbereich der Antenne stehen die Vektoren von elektrischem und magnetischem Feld senkrecht aufeinander und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Diese Art elektromagnetischer Wellen wird TEM-Welle genannt.

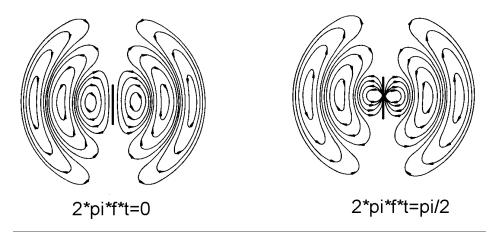


Abbildung 120: Elektrische Feldlinien der Dipolantenne

Ebenso wie die Erzeugung elektromagnetischer Wellen können mit Antennen elektromagnetische Felder empfangen werden. Ist ein solcher Dipol einem elektromagnetischen Feld ausgesetzt, das die oben genannte Resonanzbedingung erfüllt, so ist an den Dipolklemmen eine Spannung messbar. Je niedriger die Frequenz ist, desto größer ist nach (35) die Wellenlänge und desto größer muss eine angepasste Antenne sein.

In der Technik werden häufig komplexere Antennen eingesetzt, die Optimierungen bezüglich geometrischer Größe, Richtwirkung oder anderer Eigenschaften bieten. Für das grundsätzliche Verständnis der Anregung freier elektromagnetischer Wellen sind diese jedoch hier nicht von Interesse.

Da die Reichweite von elektromagnetischen Wellen sehr groß sein kann (im Kurzwellenbereich kann durch Nutzung von Reflexionen an den oberen Schichten der Erdatmosphäre der Erdball nahezu umrundet werden), muss eine weltweit tätige Organisation für Ordnung bei der Frequenznutzung sorgen. Von der Organisation ITU (International Telecommunications Union) ist der Frequenzraum in folgende wichtige Nutzungsbänder untergliedert.

Service	Frequenzbereich	Leistung	typ. Feldstärken	im Abstand
LF-Rundfunk und Seefunk	0,014-0,5 MHz	2500 kW	5,5 - 0,55 V/m	2-20 km
AM-Rundfunk	0,2-1,6 MHz	50-800 kW	12,5 - 0,78 V/m	0,5 - 2 km
Radioamateur	1,8 - 30 MHz	1 kW	22,1 - 2,21 V/m	10 - 100 m
HF-Nachrichten dienst und KW	1,6 - 30 MHz	10 kW	0,7 - 0,04 V/m	1 - 20 km
CB-Funk	27 - 28 MHz	12 W	2,4 - 0,24 V/m	10 - 100 m
Amateurfunk	50 - 52 MHz 144 - 146 MHz 432 - 438 MHz 1290 - 1300 MHz	1 - 8 kW 1 - 8 kW 1 - 8 kW 1 - 8 kW	63 - 0,44 V/m	10 - 500 m
Feste und mobile Kommunikation	29 - 40 MHz 68 - 87 MHz 146 - 174 MHz 422 - 432 MHz 438 - 470 MHz 860 - 990 MHz	50 - 130 W 50 - 130 W	40 - 0,25 V/m	2 - 200 m
Mobiltelefon	860 - 960 MHz 1880-1990MHz	5 W 1 W	15,6 - 1,56 V/m 14 - 0,7 V/m	1 - 100 m 0,5 - 10 m
VHF - TV	48 - 68 MHz 174 - 230 MHz	100 - 320 kW	8 - 1,11 V/m	0,5 - 2 km
FM-Rundfunk	88 - 108 MHz	100 kW	8,9 - 2,2 V/m	0,25 - 1 km
UHF- TV	470 - 853 MHz	500 kW	10 - 1,6 V/m	0,5 - 3 km
Radar	1 - 30 GHz	1 kW - 10 GW	350 - 1,6 V/m (peak)	2 - 20 km

Tabelle 5: Wichtige Funkfrequenzbänder und elektrische Feldstärken

Wie wertvoll aufgrund der intensiven Nutzung Frequenzen geworden sind, ist eindrucksvoll an den umgesetzten Beträgen bei der Versteigerung der UMTS-Lizenzen zu erkennen.

Dennoch sind einige Frequenzen für industrielle, wissenschaftliche und medizinische Hochfrequenzgeräte (ISM-Geräte) freigehalten, um deren Funktion zu ermöglichen. Diese Frequenzen werden heute durch eine Vielzahl technischer Funksysteme verwendet, womit die Lizenzierung umgangen werden kann. Die bekanntesten Vertreter sind die Bereiche um 433MHz (Fernbedienung für Schließsysteme im PKW und Garagen, Funkkopfhörer,...) sowie um 2,45GHz (Video-Übertragungssysteme, Bluetooth). Diese Frequenzen genießen allerdings keinen Schutz vor einer gegenseitigen Beeinflussung anderer im gleichen Bereich arbeitender Systeme.

# 3.2 Nachrichtenübertragung

Nachdem die wichtigsten Bauelemente betrachtet wurden, werden in den folgenden Kapiteln die Verfahren vorgestellt, die notwendig sind, um Nachrichten zu übertragen. Die Übertragung soll über eines der vorgestellten Medien erfolgen und es wird davon ausgegangen, dass nur ein Medium (nur ein Kabel oder Lichtwellenleiter oder ein Funkkanal) verwendet wird. Aufgrund der Eigenschaften des Medium steht für die Nachrichtenübertragung eine bestimmte Bandbreite zur Verfügung. Im Bereich des Funks ist dies ein Frequenzband, das durch Lizenzvergabe zugewiesen ist. Bei elektrischen Leitungen und Lichtwellenleitern begrenzen die physikalischen Eigenschaften der Leitungen die maximal mögliche Frequenz, die übertragen werden kann. Einer einfachen Telefonleitung inklusive Verteilklemmen und der Vermittlungsstellen lässt sich beispielsweise eine Bandbreite von etwa 3000 Hz zuordnen.

Wird die zur Verfügung stehende Bandbreite für eine analoge Übertragung verwendet, so lassen sich Signale (Spannungen oder Ströme) mit genau dieser Bandbreite übertragen. Ein Videokanal der heutigen Qualität (PAL-System) benötigt etwa 7-8 MHz inklusive Stereo-Ton. Ein solches Signal kann auch digitalisiert werden. Dazu wird es hinreichend oft zeitlich (Abtastrate mindestens zweifache maximale Signalfrequenz) abgetastet. Der in analoger Form vorliegende Spannungs- oder Stromwert wird dann noch in ein digitales Wort einer bestimmten Bitbreite kodiert. Die Bitbreite legt fest, wie viele diskrete Spannungswerte möglich sind. Bei einer Bitbreite von 8bit sind es beispielsweise 256 diskrete Spannungspegel. Für die Übertragung im Mobiltelefonstandard GSM lässt sich die erforderliche Datenrate aus der Abtastrate (2 x maximale Signalfrequenz = 8000 Hz), der Anzahl der Bits pro Wort (8bit) sowie einigen Bits overhead zu 64 kbit/s bestimmen.

Nach Nyquist ist die maximal mögliche Datenrate eines Kanals

$$DR = 2 \cdot B \cdot \text{ld } L$$

Dabei ist B die Bandbreite in Hz, L die Anzahl der diskreten Pegelwerte, Id ist die Logarithmusfunktion zur Basis 2. Für eine rein binäre Übertragung (L=2) bedeutet dies für die Übertragung über eine Telefonleitung (B=3000 Hz) eine Datenrate von DR=6000 bit/s. Die folgende Darstellung zeigt die Spannung am Ausgang einer Leitung, die eine eingeschränkte Bandbreite hat bei einem Eingangssignal mit 2000 bit/s (binäre Übertragung).

Ersichtlich ist die Signalqualität umso besser, je höher die Bandbreite des Kanals ist. Dies wird unmittelbar im Bereich des Rundfunks deutlich, wenn ein Mittelwellensender (Bandbreite 10 kHz) mit einem UKW-Sender (Bandbreite 120 kHz) verglichen wird.

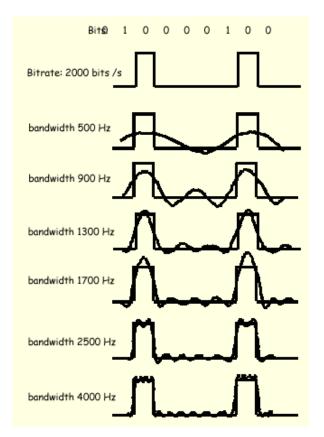


Abbildung 121: Nachbildung von Information in Abhängigkeit von der Bandbreite

Theoretisch könnte man auf die Idee kommen, beliebig viele diskrete Stufen  $(L \rightarrow \infty)$  zu nutzen, um dann zu einer unendlich hohen Übertragungsrate zu gelangen. Dies ist nicht möglich, da auf einem Kanal Störungen auftreten können, die verhindern, dass der Pegel am Ausgang wieder eindeutig einem der diskreten Werte zugeordnet werden kann.

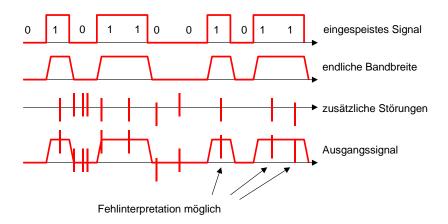


Abbildung 122: Einfluss von Störungen

Offensichtlich ist das Verhältnis von Signalstärke zur Stärke der Störungen interessant. Dieses Verhältnis wird Signal-zu-Störverhältnis S/N genannt. Oft wird dieser Wert in logarithmischer Form

$$SNR = 10 \cdot \lg(S/N)$$

als Signal-Störabstand in der Einheit dB (Dezibel) angegeben. Dabei wird der Logarithmus zur Basis 10 herangezogen. Für das Signal und Störsignal wird die Leistung angenommen.

Nach Shannon ist die über einen gestörten Kanal maximal übertragbare Datenrate unter Berücksichtigung von Störungen in einem Kanal, welche die Anzahl der nutzbaren diskreten Signalpegel herabsetzen:

$$DR = B \cdot \operatorname{ld}(1 + S/N)$$

Am Beispiel der Telefonleitung, die einen Signal-Störabstand von 30dB haben soll, ergibt sich eine maximale Datenrate von 30kbit/s.

Die Datenrate darf nicht mit der Baudrate einer Übertragung verwechselt werden. Die Baudrate ist die Anzahl der Wechsel des Signalpegels pro Sekunde. Werden mehr als zwei diskrete Signalpegel zugelassen, wird die Datenrate höher sein als die Baudrate. Andererseits kann durch einen Overhead bei einer binären Übertragung zur Synchronisation dazu führen, dass die Baudrate höher ist als die Datenrate. Dies ist beispielsweise bei der seriellen Übertragung nach RS-232 der Fall.

# 3.2.1 Basisband-Übertragung

Bei elektrischen Leitungen besteht die Möglichkeit, den Datenstrom direkt ohne weitere Maßnahmen über die Leitung zu übertragen. Eine solche Art der Übertragung wird Basisband-Übertragung genannt. Indirekt ist diese Übertragung auch mit Lichtwellenleitern möglich, wenn der Lichtwellenleiter mit den Sende- und Empfangselementen zu einem Übertragungssystem zusammengefasst wird. Streng genommen handelt es sich bei Licht aber auch um eine elektromagnetische Welle mit einer extrem hohen Frequenz. Auf dem Lichtwellenleiter findet die Übertragung also in einem sehr hohen Frequenzbereich statt.

Die einfachste Möglichkeit zur Übertragung eines Datenstroms ist die NRZ (non return to zero)-Kodierung, die beim PC in der seriellen Schnittstelle, aber auch bei der parallelen Schnittstelle verwendet wird. Bei der RS-232-Schnittstelle werden zwei diskrete Spannungspegel definiert, die einer "0" (Pegel<-3V..-15V) und einer "1" (Pegel>3V-15V) entsprechen. Der Datenstrom wird umgesetzt in diese Spannungspegel einfach auf die Übertragungsleitung geschaltet. Da bei dieser Kodierung je nach Inhalt der Daten über längere Zeit statische Pegel anliegen (z.B. Übertragung vieler "0"-Bits), hätte der Empfänger Schwierigkeiten, herauszufinden, wo die zeitlichen Grenzen der einzelnen Bits sind. Daher ist eine Synchronisation zwischen Sender und Empfänger notwendig. Bei einer synchronen seriellen Schnittstelle ist dies eine separate Übertragungsleitung, die ein Taktsignal führt. Bei der weitaus häufigeren asynchronen seriellen Schnittstelle wird pro übertragenem Wort ein Synchronisationscode mit übertragen, wodurch sich ein gewisser Overhead ergibt.

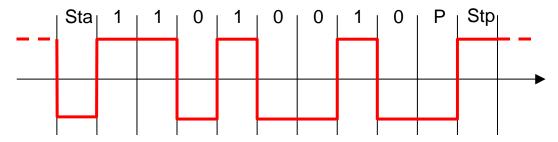


Abbildung 123: Synchronisation durch Stop- und Startbit, Prüfsummenbit

Der Pegelwechsel vom Stopbit (Stp) der vorangegangenen Datenworts zum Startbit (Sta) des aktuellen Datenworts wird im Empfängerbaustein zur Synchronisation genutzt. Der Empfänger kann dann die Pegel äquidistant nach der vereinbarten Baudrate abtasten (Bei modernen Empfängerbausteinen führt jede Pegeländerung zu einer Nachsynchronisation). Um auch bei gestörtem Kanal eine einigermaßen sichere Übertragung zu gewährleisten, ist ein Prüfsummenbit (Parity P) im Datenwort enthalten, so dass der Empfänger überprüfen kann, ob bei der Übertragung ein Bit verfälscht wurde. Werden mehrere solcher Prüf-Bits mitübertragen, bzw. werden mehrere Datenbits in eine höhere Anzahl von zu übertragenen Bits kodiert, so ist nicht nur eine Fehlererkennung, sondern auch eine Fehlerkorrektur möglich.

Neben Spannungspegeln sind bei der seriellen Übertragung auch Strompegel möglich. Gegenüber Spannungspegeln hat diese Übertragung eine höhere Störfestigkeit und eignet sich daher für größere Übertragungsentfernungen.

Mit seriellen Übertragungen lassen sich nicht nur Punkt-zu-Punkt-Verbindungen realisieren (wie bei der RS-232), sondern durch Nutzung von Open-Kollector (Open-Drain) oder Tristate-Ausgangsstufen auch Busverbindungen. An einer Übertragungsleitung können also mehrere Busteilnehmer angeschlossen sein. Ein Beispiel dafür ist der im Fahrzeugbereich eingesetzte CAN-Bus, der ebenfalls NRZ, aber Open-Kollektor-Ausgangsstufen nutzt (siehe 2.3.2). Ein hohes Maß an Störfestigkeit erzielt der CAN-Bus dadurch, dass er zwei Übertragungsleitungen (CAN-High und CAN-Low) nutzt, auf denen der Datenstrom mit unterschiedlichem Pegeln nutzt.

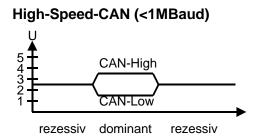


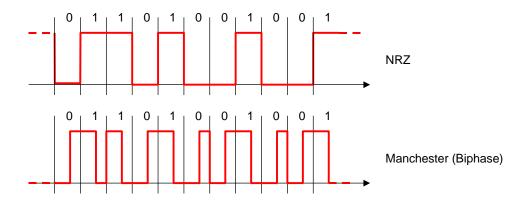
Abbildung 124: Erhöhung der Störfestigkeit beim CAN-Bus durch zwei Übertragungsleitungen

Bei der Übertragung eines Datenpakets werden "0" und "1" in die Zustände "dominant" und "rezessiv" kodiert. Dominant ist der Zustand, bei dem beide Ausgangstransistoren des Treiberbausteins durchschalten. Beim rezessiven Zustand

sperren beide Transistoren, was den anderen Teilnehmern entweder logisch "1" oder Bus inaktiv signalisiert. Welcher der beiden Fälle vorliegt, ergibt sich aus dem Kontext der Übertragung. Ein rezessiver Zustand, der längere Zeit andauert, können die Busteilnehmer entnehmen, dass gerade kein anderer Busteilnehmer sendet und ihrerseits mit dem Senden eines Datenpakets beginnen.

Aufgrund der notwendigen Synchronisation zu Beginn eines Datenpakets und der variierenden Zeitbasen von Sender und Empfänger ist die maximale Länge eines Datenpaketes mit NRZ begrenz. Daher werden bei Übertragungsstrecken mit hohen Störungen und bei besonderen Sicherheitsansprüchen Verfahren eingesetzt, die eine häufigere Synchronisation ermöglichen.

Ein solches Verfahren ist die Manchester-Kodierung, bei der die logischen Bits nicht in Form eines statischen Pegels, sondern als Übergang von "0" auf "1" (für logisch 0) bzw. von "1" auf "0" (für logisch 1). Dieser Pegelübergang wird in der zeitlichen Mitte des Übertragungsbits realisiert. Aus einem Datenstrom 0 1 1 0 1 0 0 1 0 0 1 werden also die "Symbole" 01 10 10 01 10 01 01 01 10 01 10.



#### Abbildung 125: Manchester- und NRZ-Kodierung

Wird Manchester-Kodierung mit NRZ verglichen, fällt auf, dass die Frequenz auf der Leitung höher ist. Für einen Manchester-kodierten Datenstrom ist also eine höhere Bandbreite notwendig. Die Manchester-Kodierung wird beispielsweise beim Ethernet verwendet. Bei einem 10Mbps-Ethernet führt ein Datenstrom 101010 zu einer Rechteckschwingung mit 5MHz, ein Datenstrom 00000 oder 11111 zu einer Rechteckschwingung mit 10MHz. Als elektrische Leitung sind heute bei Ethernet hauptsächlich verdrillte Leitungen mit oder ohne Schirm im Einsatz.

#### 3.2.2 Modulation

Im Bereich der drahtlosen Übertragung von Nachrichten werden Verfahren benötigt, um Signale in hochfrequente Sinusschwingungen zu verpacken. Basisbandsignale eignen sich nicht direkt für eine drahtlose Übertragung. Solche Verfahren werden Modulationsverfahren genannt. Auch bei der Übertragung auf elektrischen Leitungen werden mittlerweile solche Verfahren eingesetzt. Als wesentlicher Grund gilt die Mehrfachnutzung von Leitungen. Dies wird an folgenden Beispielen deutlich:

#### Breitbandkabelnetz:

Es werden verschiedene Rundfunk- und Fernsehprogramme übertragen. Jedes dieser Programme nutzt einen bestimmten Frequenzbereich (Kanal). Die Audio- und Videosignale werden dafür durch Modulation in den zu nutzenden Frequenzbereich gebracht.

#### Telefonkabel:

Klassische Nutzung ist sicherlich die Telefonie mit der entsprechenden Analogbandbreite von etwa 3kHz. Im Zuge der Einführung von schnellen Internetzugängen wird beim ADSL-System durch Modulation ein Datentransfer im Frequenzbereich oberhalb von 10kHz möglich, der den normalen Telefonbetrieb nicht stört.

#### Powerline:

Primäre Aufgabe von Stromversorgungsleitungen ist die Verteilung elektrischer Energie. Durch Aufprägen eines hochfrequenten Signals lässt sich auch hier ein schneller Zugang zum Internet realisieren.

Die Modulationsverfahren sind prinzipiell sowohl für drahtlose als auch drahtgebundene Dienste nutzbar. Meist entscheiden ökonomische Randbedingungen darüber, welches der Verfahren eingesetzt wird.

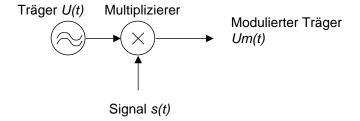
Wenn von einem sinusförmigen Spannungsverlauf (Trägersignal)

$$U(t) = U_0 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi) \tag{36}$$

ausgegangen wird, so wird erkennbar, dass sich ein Signal oder Datenstrom in einen der drei Parameter Amplitude  $U_0$ , Frequenz f und Phase  $\varphi$  verpacken lässt. Je nach Parameterwahl wird die Modulation Amplitudenmodulation, Frequenzmodulation oder Phasenmodulation genannt. Daneben sind auch Kombinationen üblich (z.B. Amplituden- und Phasenmodulation). Eine Besonderheit nimmt das Bandspreizverfahren ein, das nicht unmittelbar anhand von (36) ersichtlich ist, aber in der Technik eine wichtige Rolle spielt.

#### 3.2.2.1 Amplitudenmodulation, AM

Bei der Amplitudenmodulation wird die Amplitude des Trägers mit dem zu übertragenden Signal oder dem Datenstrom beeinflusst. Handelt es sich um einen binären Datenstrom spricht man auch von Amplitudentastung (Amplitude Shift Keying, ASK). Wenn Signal oder Datenstrom als zeitveränderliche Funktion s(t) dargestellt wird, so ergibt sich das modulierte Signal, indem der Träger mit dieser Funktion s(t) multipliziert wird. Der Modulator ist also ein Multiplizierer.



## Abbildung 126: Erzeugung eines amplitudenmodulierten Signals

Ist s(t) ein digitales Signal, das bei logischer "0" den Pegel 0V und bei logischer "1" den Pegel 1V einnimmt, ergibt sich folgendes Bild für das Ausgangssignal:

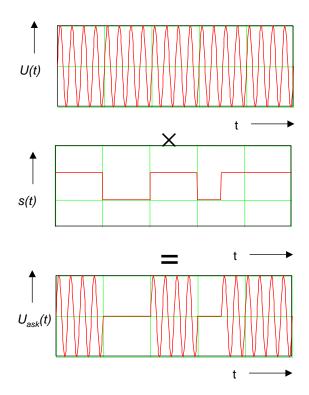


Abbildung 127: Amplitudenmodulation eines digitalen Signals

Soll ein sinusförmiges Signal übertragen werden, entspricht die Modulation einer Multiplikation des Trägers mit diesem Signal. Es ergibt sich folgendes Bild:

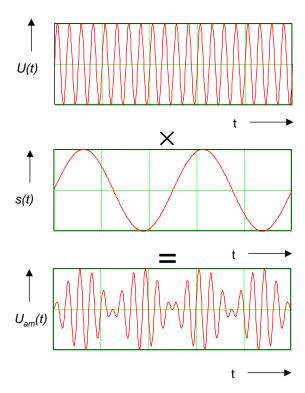


Abbildung 128: Amplitudenmodulation eines sinusförmigen Signals

Anhand dieser einfachen Funktionen kann die belegte Bandbreite recht einfach abgeschätzt werden. Mit einem Additionstheorem ergibt sich für das modulierte Signal:

$$U_{am}(t) = U_0 \cdot \sin(2\pi f_s t) \cdot \sin(2\pi f t) = \frac{U_0}{2} \left[ \cos(2\pi (f - f_s)t) - \cos(2\pi (f + f_s)t) \right]$$

Dabei ist f die Trägerfrequenz und  $f_s$  die Frequenz des zu übertragenden Sinussignals. Während der unmodulierte Träger nur eine einzige Frequenz f belegt, hat das amplitudenmodulierte Signal offensichtlich zwei belegte Frequenzen f-fs und f+f<sub>s</sub>. Diese rechts und links der Trägerfrequenz liegenden Frequenzen werden Seitenbänder genannt. Insgesamt ist also für dieses Signal die Bandbreite  $(f+f_s)$ - $(f-f_s)$  $f_s$ )=2 $f_s$  erforderlich. Dies gilt für die Amplitudenmodulation ganz allgemein. Ein Signal, das im Basisband eine bestimmte Bandbreite В besitzt. beleat amplitudenmoduliertes Signal die Bandbreite 2B.

Die Regenerierung des Signals geschieht dadurch, dass auf Empfängerseite das eintreffende modulierte Signal erneut mit der Trägerfrequenz multipliziert wird. Dabei ergibt sich:

$$U_{dem}(t) = \frac{U_0}{4} \cdot \left[ 2\sin(2\pi f_s t) + \sin(2\pi (2f - f_s)t) + \sin(2\pi (2f + f_s)t) \right]$$

Neben zwei Frequenzen im Abstand  $f_s$  um die zweifache Trägerfrequenz entsteht wieder ein Anteil im Basisband mit der Frequenz  $f_s$ . Da üblicherweise die Trägerfrequenz sehr viel größer ist als die zu übertragende Signalfrequenz, kann durch eine Filterung das Nutzsignal im Basisband von den höherfrequenten Anteilen

getrennt werden. Das gesamte Verfahren zur Rückgewinnung des übertragenen Signals wird Demodulation genannt, die technische Realisierung ist der Demodulator.

Die Nutzung der zweifachen Bandbreite ist nicht sehr effektiv, denn letztlich wird die Information redundant übertragen. Daher wird oft von der "gewöhnlichen Amplitudenmodulation" Gebrauch gemacht, bei der zusätzlich zu den beiden Seitenbändern der Träger selbst übertragen wird. Mathematisch wird also das Signal

$$U_{gam}(t) = U_0 \cdot m \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) + U_0 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$$

gebildet. Dabei ist m der Modulationsgrad (m≤1).

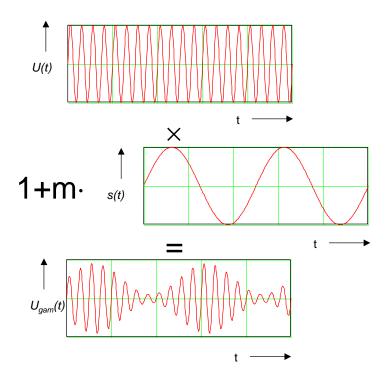


Abbildung 129: Einfluss des Modulationsgrads

Insgesamt werden bei diesem modulierten Signal die Frequenzen f, f-fs und f+fs belegt. Zum Regenerieren auf der Empfängerseite reicht aber eine Seite des belegten Bandes aus. Bei der Einseitenband-AM werden daher mit einem Filter die Frequenzanteile rechts oder links des Trägers abgeschnitten. Einzelne Kanäle können dann in einem Frequenzbereich dichter zusammengepackt werden. Das Demodulationsverfahren ist identisch mit dem Verfahren zur Demodulation des einfachen amplitudenmodulierten Signals. Die gewöhnliche Amplitudenmodulation wird für den Langwelle-, Kurzwelle- und Mittelwellerundfunk sowie für das Videosignal für die konventionellen terrestrischen Fernsehprogramme verwendet.

#### 3.2.2.2 Frequenzmodulation (FM)

Bei der Frequenzmodulation wird die Frequenz des Trägers durch das zu übertragende Signal variiert. Für ein zu übertragendes sinusförmiges Signal ergibt sich:

$$U_{fm}(t) = U_0 \cdot \sin(2\pi \cdot (f + f_{Hub} \cdot \sin(2\pi f_s t)) \cdot t)$$
 (7.2.5)

Die Größe  $f_{Hub}$  ist der Modulationshub, der angibt, wie stark sich die Trägerfrequenz ändert. Für einen binären Datenstrom spricht man von Frequency Shift Keying (FSK). Ein Beispiel für ein FSK-Signals zeigt das folgende Diagramm:

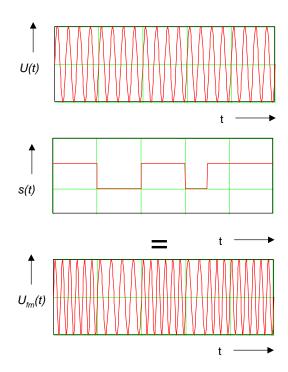


Abbildung 130: Frequenzmodulation eines digitalen Signals

Die sich ergebenden Frequenzanteile sind sehr komplex (Zylinderfunktionen). Die vom frequenzmodulierten Signal belegte Bandbreite geht ohne weitere Maßnahmen weit über die im Basisband erforderliche Bandbreite hinaus. So wird für ein analoges Sprach/Musik-Signal im UKW-Rundfunk eine Bandbreite von 120kHz verwendet, was letztlich auch zur hohen Störsicherheit und damit zur ausgezeichneten Übertragungsqualität beiträgt. Wird diese volle Bandbreite genutzt spricht man von der Breitband-FM. Die hohe Bandbreite bedeutet natürlich auch eine große Redundanz, die bei wirtschaftlicher Frequenznutzung z.B. im Sprechfunkbereich nicht zweckmäßig ist. Daher wird durch Filterung in diesen Bereichen die Bandbreite auf das notwendige Maß (im Sprachfunk 10kHz) herabgesetzt. Dies wird Schmalband-FM genannt. In der Digitaltechnik wurde FSK in der Vergangenheit für die Übertragung über Telefonleitung mit Analogmodems genutzt. Bedingt durch die zu diesem Zeitpunkt möglichen niedrigen Trägerfrequenzen (0→1200Hz, 1→2400Hz) konnten nur sehr niedrige Übertragungsraten realisiert werden, so dass für heutige Modems höherwertige Verfahren eingesetzt werden. Ein erweitertes FSK wird z.B. für das Bluetooth-System eingesetzt.

#### 3.2.2.3 Phasenmodulation (PM)

Die Phasenmodulation (für binäre Übertragung Phase Shift Keying PSK) ist mit der Frequenzmodulation verwandt, da in beiden Fällen das zu übertragende Signal im Argument der Sinusfunktion für den Träger untergebracht wird. Hinsichtlich des belegten Frequenzbandes zeigt sich entsprechend auch ein ganz ähnliches Verhalten. Bei der Phasenmodulation wird der Phasenwinkel durch das zu übertragende Signal variiert. Für ein analoges sinusförmiges Signal gilt:

$$U_{pm}(t) = U_0 \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + p_{Hub} \cdot \sin(2\pi f_s t)))$$
 (7.2.6)

Darin bezeichnet  $p_{Hub}$  den Phasenhub. Für einen binären Datenstrom ergibt sich das folgende Szenario:

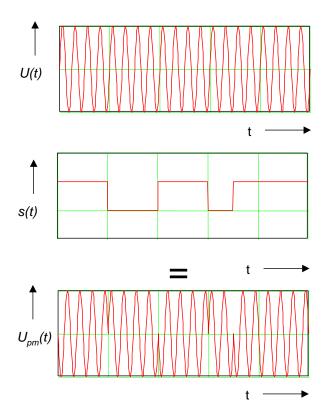


Abbildung 131: Phasenmodulation eines digitalen Signals

Für ein solches Signal spricht man auch von "Binary Phase Shift Keying" BPSK. In dem skizzierten Beispiel entspricht die logische "0" einer Phasenverschiebung 0° und die "1" einer Phasenverschiebung von 180°. Werden jeweils zwei zu übertragende Bits zusammengefasst, so ergeben sich insgesamt vier Möglichkeiten (Symbole), die in entsprechende diskrete Phasenwerte übersetzt werden können. Beispielsweise kann dies durch die Zuordnung:

erfolgen. In diesem Fall spricht man von Quaternary Phase Shift Keying (QPSK). Ein Beispiel für eine übertragene Bitfolge zeigt die folgende Darstellung:

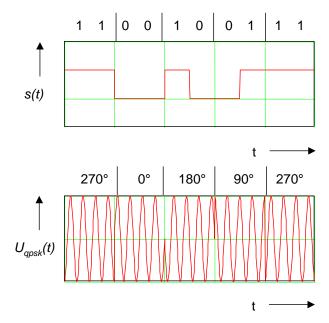


Abbildung 132: Beispiel für Quaternary Phase Shift Keying (QPSK)

Durch die gleichzeitige Übertragung von 2bit innerhalb eines Symbols unterscheiden sich bei dieser Art der Modulation die Datenrate und die sogenannte Symbolrate. Bei QPSK wäre folglich für eine Datenrate von 2Mbit/s eine Symbolrate von 1Mbaud erforderlich. Zur Verdeutlichung der Zuordnung von Bitfolgen zu Symbolen werden die Phasenwinkel oft in ein Koordinatensystem eingetragen:

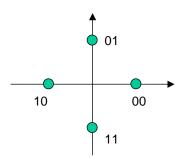


Abbildung 133: Zuordnung von Bitfolgen zu Phasenwinkel

Das Mobilfunksystem GSM ("D-Netz" und "E-Netz") nutzt ebenfalls diese Art der Modulation. Jedoch werden hier 3 Bits zu einem Symbol zusammengefasst, wodurch Phasenwinkel im 45°-Raster verwendet werden. Diese Modulation wird auch 8-PSK genannt, da insgesamt 8 mögliche Zustände im Phasenwinkel abgebildet werden.

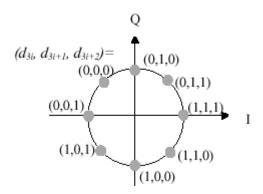


Abbildung 134: Zuordnung von Bitfolgen zu Phasenwinkel

#### 3.2.2.4 Quadrature Amplitude Modulation (QAM)

Die Fortsetzung dieses Prinzips der Zuordnung mehrerer Bits zu einem Symbol führt durch die QAM zu sehr effizienten Modulationsverfahren. Hierbei wird nicht nur die Phase moduliert, sondern zeitgleich auch die Amplitude. In der o.g. Darstellung in einem Koordinatensystem wird neben dem Winkel auch der Abstand der Symbole zum Koordinatenursprung relevant. Der Winkel führt zu einer Modulation des Phasenwinkel, der Abstand zum Koordinatenursprung führt zur Modulation der Amplitude. Insofern handelt es sich bei der QAM um eine Mischung aus Amplitudenund Phasenmodulation. Üblich sind die Modulationsarten 16-QAM und 64-QAM, bei denen 16 Zustände (4 bit) bzw. 64 Zustände (6 bit) zu einem Symbol zusammengefasst werden.

Die entsprechenden Symbolzuordnungen sind in den folgenden Diagrammen für 16-QAM und 64-QAM dargestellt.

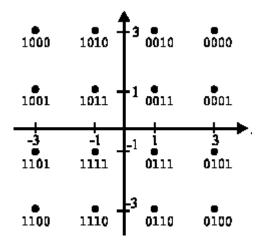


Abbildung 135: Beispiel für 16-QAM

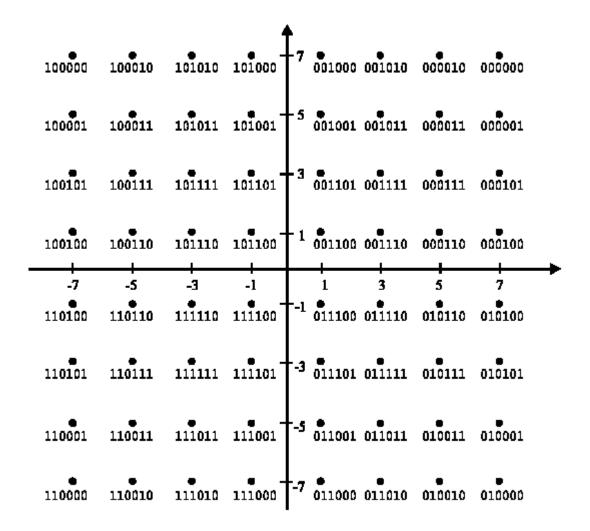


Abbildung 136: Beispiel für 64-QAM

Diese Art der Modulation wird in dem terrestrischen digitalen Fernsehsystem (Digital Video Broadcasting DVB) genutzt.

### 3.2.2.5 Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM

Die bisher vorgestellten Modulationsverfahren modulieren Amplitude, Frequenz oder Phase einer einzelnen Trägerschwingung. Wird eine höhere Datenrate benötigt, so muss bei diesen Verfahren eine entsprechende Bandbreite zur Verfügung gestellt werden. Die volle Bandbreite wird allerdings nur bei raschen Wechseln der Symbole benötigt, so dass statistisch betrachtet die weiter vom Träger entfernten Linien nur sehr wenig genutzt werden. Wird das Spektrum in viele Kanäle mit kleiner Bandbreite unterteilt, so lässt sich die Gesamtbandbreite erheblich effizienter nutzen. Dies ist die Idee des OFDM. Der Datenstrom wird in viele parallele Datenströme kleinerer Übertragungsrate zerlegt und auf eine Vielzahl von Trägern aufmoduliert. Dabei sind einige hundert bis zu einigen tausend Trägern üblich. Beim digitalen Fernsehen DVB-T werden beispielsweise bis zu 8192 Träger verwendet. Die einzelnen Datenströme werden mit einem der vorgenannten Modulationsverfahren moduliert. Der Frequenzunterschied der einzelnen Träger ist gerade so bemessen, dass sich die einzelnen Träger im Empfänger nicht gegenseitig beeinflussen können. Insgesamt entsteht dadurch ein Spektrum, das nahezu eine Rechteckkontur besitzt.

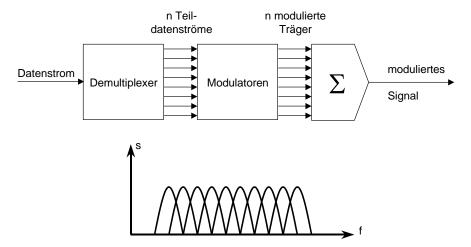


Abbildung 137: Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM

Ein Beispiel für ein realisiertes DVB-Spektrum zeigt das folgende Diagramm.

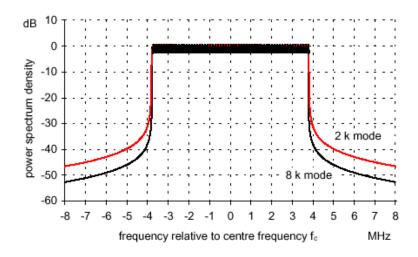


Abbildung 138: OFDM-Spektrum am Beispiel des digitalen Fernsehens DVB

Mit OFDM werden derzeit sehr viele Übertragungssysteme aufgebaut. Das ADSL-System (Asynchronous Digital Subscriber Line) ist ein typischer Vertreter der Technik. Wird die Redundanz durch Zufügen weiterer Bits in den Datenstrom erhöht (Forward Error Correction, FEC), so können sogar einzelne Träger durch Störungen auf dem Übertragungsweg ausfallen, ohne das damit die Gesamtübertragung gefährdet würde. Auch kann die Nutzung der einzelnen Träger dynamisch nach Zustand der Übertragungsstrecke angepasst werden. Im Fall einer lang andauernden Störung bei einzelnen Frequenzen kann der entsprechende Träger einfach ausgeblendet werden und der entsprechende Teildatenstrom auf die anderen Träger verteilt werden. Die Realisierung der einzelnen Funktionsblöcke Demultiplexer und n Modulatoren geschieht in Prozessoren, die speziell für Signalverarbeitungsaufgaben optimiert sind (Signalprozessoren).

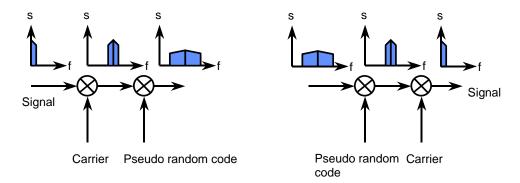
#### 3.2.3 Bandspreiztechnik, Spread-Spectrum Technique

Die Bandspreiztechnik wurde ursprünglich im militärischen Bereich genutzt, da sie sehr interessante Eigenschaften hat. Das im Basisband eine bestimmte Bandbreite belegende Spektrum des zu übertragenden Datenstroms wird auf einen wesentlich breiteren Frequenzbereich abgebildet. Bei dieser Verbreiterung der belegten Bandbreite wird anschaulich die zu übertragende Information auf ein sehr breites Frequenzband verteilt. Dadurch wird einerseits eine hohe Störresistenz gegen zufällige und absichtliche Störsignale erzielt, andererseits kann das modulierte Signal hinsichtlich Amplitude und Signalcharakter so gestaltet werden, dass es für einen Fremden nahezu "unsichtbar" ist.

Die Verbreiterung des Spektrums wird z.B. dadurch realisiert, dass nach der Modulation auf einen Träger (Carrier) in einer weiteren Modulationsstufe die Modulation mit einer binären Pseudozufallsfolge erfolgt. Man spricht vom Direct Sequencing Spread-Spectrum-Verfahren DSSS.

Auf der Empfängerseite muss zunächst eine Demodulation mit exakt dieser Pseudozufallsfolge und anschließender Demodulation ins Basisband durchgeführt werden, um das übertragene Signal zu regenerieren. Für die erfolgreiche Regenerierung muss diese Pseudozufallsfolge bekannt sein. Sie stellt daher einen Schlüssel oder Code dar, so dass die Attraktivität für militärische Anwendung schnell klar wird. Interessant ist, dass eine Signalregenerierung auch dann möglich ist, wenn die Übertragungsstrecke stark gestört ist. Bei einer drahtlosen Übertragung können im Extremfall im Übertragungsfrequenzbereich andere starke Sender arbeiten. Für die fremden (konventionellen) Übertragungssysteme erscheint ein Spread-Spektrum Signal als zusätzliches Rauschen, das nicht vom Hintergrundrauschen oder dem normalen Rauschen des Empfängers zu unterscheiden ist. Auf der anderen Seite ist es durch die hohe Redundanz der Übertragung tolerierbar, dass durch einen konventionellen Sender eine Störung der Spread-Spektrum-Übertragung auftritt.

Eine sehr prominente Anwendung stellt das System zur Satellitennavigation (Global Positioning System GPS) dar. Die einzelnen Satelliten strahlen ständig mittels Bandspreiztechnik modulierte Signale ab, die von einem Empfänger, dem die entsprechenden Codes bekannt sind, empfangen werden können. Durch Messen der Laufzeitunterschiede der von verschiedenen Satelliten stammenden Signale kann die genaue geographische Position des Empfängers bestimmt werden. Das GPS wurde vom amerikanischen Verteidigungsministerium entwickelt und steht zur Hälfte einer zivilen Nutzung zur Verfügung. Die entsprechenden Codes sind bekannt und ermöglichen Ortungen im Bereich bis herunter zu etwa 15 m. Die Satelliten strahlen auch ein verschlüsseltes Signal aus, dessen Code nur dem Militär bekannt ist, und das eine Ortung im Bereich unterhalb von 1 m ermöglicht.



#### Abbildung 139: Bandspreiztechnik

Die Bandspreiztechnik kommt auch im neuen Mobilfunkstandard UMTS zur Anwendung. Auch im Bereich der drahtgeführten Kommunikation wird die Bandspreiztechnik erprobt. Gerade wegen der durch andere Geräte recht stark gestörten Stromversorgungsleitungen wird sie im Bereich der Powerline Communication konkurrierend zur OFDM eingesetzt.

#### 3.2.4 Zugriffsverfahren

Oft erfolgt eine Kommunikation über eine Übertragungsstrecke (drahtgeführt oder drahtlos) bidirektional, d.h. es werden von jeder Station Daten gesendet und auch empfangen. Darüber hinaus werden oft mehr als zwei Stationen mit einer einzigen Übertragungsstrecke verbunden um einen wahlfreien Datentransfer von einer Station auf eine beliebige andere Station zu ermöglichen. Dieses Ziel kann nur erreicht werden, wenn trotz eines physikalischen Übertragungsmediums durch die Art der Übertragung dafür aesorat wird, dass sich die verschiedenen Datenübertragungsaufgaben nicht gegenseitig beeinflussen. Der Zugriff einer Station auf das physikalische Medium muss also eindeutig sein. Zwei Stationen dürfen nicht in gleicher Weise auf das selbe Medium zugreifen. Eine Unterscheidung kann im Zeitbereich (Time domain), Frequenzbereich (Frequency domain) oder Codebereich (Code domain) erfolgen.

#### 3.2.4.1 Time division multiple access, TDMA

Bei der Zeitbereichsunterteilung erfolgt der Zugriff auf das physikalische Medium zeitlich nacheinander. Eine Station bekommt z.B. durch eine Basisstation einen Zeitschlitz zugewiesen, in dem es senden darf. In den übrigen Zeiten ist kein Sendebetrieb möglich. Dies macht es erforderlich, den Datenstrom in kleinere Einheiten, den sogenannten Datenpaketen oder Datentelegrammen zu unterteilen. Die Länge dieser Datenpakete muss hoch genug sein, um eine gute Nettoübertragungsrate (ohne overhead zur Synchronisation und Steuerung) zu erzielen und niedrig genug, um anderen Stationen ebenfalls die Möglichkeit zur Übertragung zu geben. Für jeden Zeitschlitz wird normalerweise die komplette zur Verfügung stehende Bandbreite verwendet.

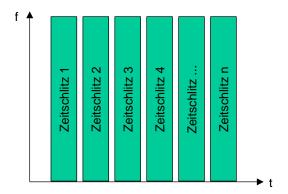


Abbildung 140: Unterteilung des Datenstroms in kleinere Einheiten

Ein Beispiel für eine Unterteilung der Übertragungskapazität in Zeitschlitze für den drahtlosen Fall ist das Bluetooth-System, bei dem eine Station die Funktion des "Masters" übernimmt, alle anderen Stationen sind "Slaves". Der Datenaustausch wird über den Master gesteuert, der nacheinander die Slave-Stationen zur Datenübertragung auffordert.

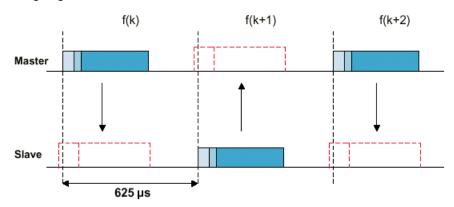


Abbildung 141: TDMA bei Bluetooth

Beim Mobilfunksystem GSM geschieht die Übertragung nicht abwechselnd, sondern innerhalb eines Rahmens (Frame), in dem acht Zeitschlitze für einzelne Stationen zur Verfügung stehen:

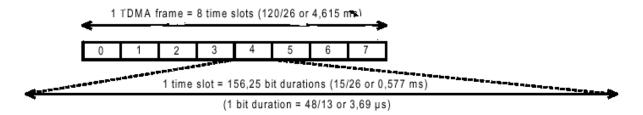
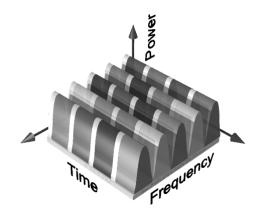


Abbildung 142: TDMA bei GSM

Zur Vermeidung von Übertragungsproblemen bei bestimmten Frequenzen wird bei GSM zusätzlich nach einem festgelegten Schema die Frequenz geändert (Frequency hopping). Insofern wird hier TDMA mit FDMA vermischt.



## **Abbildung 143: Frequency hopping**

Bei den beiden genannten Beispielen ist die Steuerung der Zeitschlitze durch einen Master oder eine Basisstation notwendig. Gerade im Bereich von Netzwerken, bei denen Computer über eine gemeinsame Leitung oder Leitungssystem Daten austauschen, ist es wichtig, dass eine Kommunikation auch ohne eine solche Steuerung möglich ist. Jede Station in einem solchen System muss also in der Lage sein, zu erkennen, ob das Übertragungsmedium gerade nicht belegt ist. In diesem Fall kann ein Senden eines Datenpaketes direkt erfolgen. Andernfalls muss gewartet werden, bis das Medium frei ist. Ein solches Verfahren heißt "Carrier sense multiple access" CSMA.



Abbildung 144: Carrier sense multiple access - CSMA

Je nach Gestaltung des Verfahrens kann das Medium ständig überprüft werden, bis es frei wird, um dann unmittelbar zu senden (1-persistent), oder es wird eine zufällige Zeit bis zur erneuten Überprüfung gewartet (non-persistent). Wenn zwei Stationen zeitgleich feststellen, dass das Medium frei ist, werden sie nahezu gleichzeitig senden. Es tritt eine Kollision auf dem Medium auf. Aufgrund der Laufzeit auf einer elektrischen Leitung wird der Zustand "Leitung belegt" erst verzögert erkannt, weshalb die Wahrscheinlichkeit solcher Kollisionen mit wachsender geometrischer Größe des Netzes steigt. Daher werden entsprechende Netzwerkkarten so ausgelegt, dass sie Kollisionen erkennen können (Collision Detect, CD). Man spricht von CSMA/CD. Die Strategie zum Zugriff auf das Medium im Falle von Kollisionen sieht beim Ethernet, das CSMA/CD verwendet, folgendermaßen aus:

- Wenn 1. Kollision erkannt wird: Warten (zufällige Zeit innerhalb eines vorgegebenen Zeitrasters) und erneuter Sendeversuch
- Jede wiederholte Kollision: Zufällige Wartezeit wird verdoppelt, erneuter Sendeversuch

• Wenn Übertragung erfolgreich ist, wird wieder altes Zeitraster verwendet.

#### 3.2.4.2 Frequency division multiple access, FDMA

Neben der Einteilung im Zeitbereich ist die Einteilung im Frequenzbereich möglich. Dabei werden verschiedene Frequenzbereiche für die Datenübertragung definiert und den Stationen zugewiesen. Der Übertragungskanal steht einer Station normalerweise beliebig lang zur Verfügung.

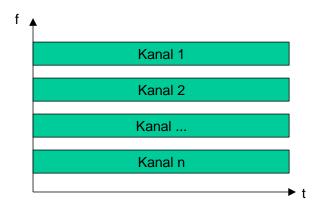


Abbildung 145: Frequency division multiple access - FDMA

Die Nutzung des Funkspektrums durch verschiedene Rundfunk- und Fernsehsender stellt letztlich ein solches FDMA-System dar, wenngleich hier die Aufteilung der einzelnen Kanäle eher historisch bedingt ist und statisch ist. Beim "Terrestrial Trunked Radio"-System TETRA, das für eine Neugestaltung von allgemeinen Funkaufgaben (Taxifunk, Flottenmanagement für Speditionen und andere Unternehmen, Betriebsfunk, TETRAPOL für Polizeifunk) definiert wurde, erfolgt die Zuweisung der einzelnen Kanäle dynamisch und variiert je nach Einsatzort. Allerdings ist TETRA eine Mischung aus FDMA und TDMA, denn jeder FDMA-Kanal wird noch zusätzlich in vier Zeitschlitze für ein TDMA-Verfahren unterteilt.

#### 3.2.4.3 Code division multiple access, CDMA

Bei der Bandspreiztechnik muss zur Regenerierung des übertragenen Signals der Bandspreizcode bekannt sein. Mit einem anderen Code liefert der Demodulator allenfalls ein Rauschen. Genau diese beiden Eigenschaften lassen es zu, dass auf einem physikalischen Medium mehrere mit der Bandspreiztechnik modulierte Signale gleichzeitig in einem einzigen (breiten) Frequenzbereich übertragen. Voraussetzung dafür ist, das jedes Signal einen anderen Code verwendet, der so gestaltet sein muss, dass Ähnlichkeiten zwischen den Codes ausgeschlossen sind (orthogonale Codes). Ein Empfänger kann durch Anwenden des richtigen Codes das an ihn gerichtete Datentelegramm aus dem "diffusen Signalnebel" herausfischen. Auf diese Art erscheinen Signale aus verschiedenen Quellen im Frequenz- und Zeitbereich verschmiert.

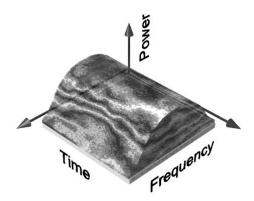


Abbildung 146: Code division multiple access - CDMA

Dies wird beispielsweise beim GPS angewandt. Sämtliche empfangbaren Satelliten (mindestens vier Satelliten sind zur dreidimensionalen Ortung notwendig) senden zur gleichen Zeit im selben Frequenzbereich. Der Empfänger kann durch Kenntnis der Codes die entsprechenden Signale extrahieren. Auch das Mobiltelefonsystem UMTS nutzt CDMA.

# 4 Literatur

Manfred Albach, Grundlagen der Elektrotechnik 1+2, Pearson Studium, 2005

Klaus Fricke, Digitaltechnik: Lehr- und Übungsbuch für Elektrotechniker und Informatiker, Vieweg-Verlag, 2005

Martin Meyer, Kommunikationstechnik, Konzepte der modernen Nachrichtenübertragung, Vieweg-Verlag, 2002

Wikipedia, http://de.wikipedia.org

# 5 Anhang

# 5.1 Wichtige griechische Buchstaben

Zeichen	Name	
Α, α	Alpha	
B, β, β Γ, γ Δ, δ Ε, ε Ζ, ζ Η, η	Beta	
Γ, γ	Gamma	
Δ, δ	Delta	
Ε, ε	Epsilon	
Ζ, ζ	Zeta	
Η, η	Eta	
Θ, θ, θ	Theta	
l, ı	lota	
К, к, х	Карра	
Λ, λ	Lambda	
M, µ	My	
N, v	Ny	
N, ν Ξ, ξ	Xi	
Π, π, ϖ	Pi	
Ρ, ρ, و	Rho	
Σ, σ	Sigma	
Φ, φ, φ	Phi	
Ψ, ψ	Psi	
Ω, ω	Omega	