

# Elektronische Bauelemente in Theorie und Praxis

In der 64'er finden Sie des öfteren, ebenso wie in diesem Heft, Bauanleitungen zum Aufbau von Zusatzgeräten für Ihren Computer. Der nachfolgende Artikel soll eine kleine Hilfestellung für all jene sein, die bisher wenig mit Elektronik zu tun hatten, aber gerne wissen möchten, wie die eine oder andere Schaltung funktioniert und was die einzelnen Bauteile bewirken.

Für die verschiedensten Anwendungen gibt es in der Elektronik die unterschiedlichsten Bauelemente. Das fängt bei den einfachen Bauteilen wie Widerständen, Kondensatoren etc. an und endet bei komplexen hochintegrierten Schaltungen wie Mikroprozessoren, Analog-Digital-Wandlern und anderen Spezialbausteinen. Auch wenn man selber keine Schaltungen entwickeln möchte, so ist für das Verständnis von Bauanleitungen, die in letzter Zeit häufiger in der 64'er erscheinen, und für den Nachbau dieser Schaltungen ein Wissen über Aufbau und Funktion der verwendeten Bauteile nahezu unerlässlich. Denn genau wie beim Abtippen eines Listings können sich auch beim Nachbau einer Schaltung Fehler einschleichen. Wenn Sie dann bei der Fehlersuche nicht wissen, wie zum Beispiel ein Transistor funktioniert, wird es für Sie praktisch unmöglich sein, Schaltungsfehler zu finden.

Das wohl am häufigsten verwendete Bauelement in der Elektronik, welches in nahezu jeder Schaltung zu finden ist, ist der Widerstand. Er gehört zur Gruppe der passiven Bauteile. Passiv heißt in diesem Fall: es findet keine Spannungs-, Strom- oder Leistungsverstärkung statt. Um zu erläutern, was überhaupt ein elektrischer Widerstand ist, kann als Beispiel

**Um eine elektronische Schaltung zu verstehen und gegebenenfalls zu reparieren, muß man wissen, wie die verwendeten Bauteile funktionieren und was sie machen. Deshalb vermitteln wir Ihnen an dieser Stelle das erforderliche Grundlagenwissen. Vom Widerstand bis hin zum Operationsverstärker wird alles beschrieben, was für den Aufbau beliebiger Schaltungen erforderlich ist.**

das Fließen von Wasser in einem Leitungsrohr herangezogen werden. Die Wassermenge pro Zeiteinheit entspricht hierbei der Größe des elektrischen Stroms, der Druck, mit dem das Wasser durch die Leitung befördert wird, entspricht der elektrischen Spannung. Bei einem gegebenen Wasserdruck fließt je nach Durchmesser

des Rohres eine bestimmte Menge Wasser. Vergrößert man den Durchmesser des Rohres, so wird auch mehr Wasser fließen, verkleinert man den Durchmesser dagegen, dann fließt entsprechend weniger Wasser durch das Rohr.

## Widerstände

Bei einem elektrischen Stromkreis ist das nicht anders. Hier entspricht der elektrische Widerstand dem Durchmesser des Rohres. Bei gegebener Spannung (analog dem Wasserdruck) fließt demnach, je nach Größe des Widerstandes, ein ganz bestimmter Strom (analog der Wassermenge). Wie beim Wasserrohr die Menge des Wassers durch Verändern des Wasserdrucks variiert werden kann, so ist beim Stromkreis mit gegebenem Widerstandswert die Stromgröße durch Verändern der Spannung beeinflussbar. Für die Beziehung zwischen Strom, Spannung und Widerstand gibt es in der Elektrotechnik ein einfaches, elementares Gesetz. Dieses lautet:

$$U = R \cdot I$$

(in Worten: Spannung ist gleich Strom mal Widerstand).

Diese Dreierbeziehung nennt man das Ohmsche Gesetz. Die Maßeinheit des elektrischen Widerstands ist Ohm.

Wir haben soeben den Widerstand rein definitionsmäßig betrachtet. Uns interessiert aber der Widerstand als Bauelement. Es gibt davon drei Arten und zwar die Festwiderstände, die veränderbaren und die veränderlichen Widerstände.

Festwiderstände sind Bauelemente, die einen festen definierten Widerstandswert besitzen. Sie werden benutzt, um in elektronischen Schaltungen Ströme einzustellen oder Spannungen in bestimmten Verhältnissen zu teilen. Ein Beispiel hierzu (Bild 1): Sie haben ein Bauteil, das für einen ganz bestimmten maximalen Strom ausgelegt ist. Nehmen wir an, das sind 15 Milliampere. Die Spannung, die dabei am Bauteil abfällt, kennen wir ebenfalls. In unserem Fall soll sie 1,5 Volt betragen. Zur Versorgung steht eine Spannungsquelle mit 5 Volt zur Verfügung. An unserem Widerstand muß also, bei einem Strom von 15 mA, eine Spannung von  $5 - 1,5 \text{ Volt} = 3,5 \text{ Volt}$  abfallen. Da wir den Widerstandswert errechnen wollen, wird das Ohmsche Gesetz in  $R = U/I$  umgestellt. Unsere Werte, in die Formel eingesetzt, ergeben  $R = 3,5 / (15 \cdot 10^{-3}) = 233,33 \text{ Ohm}$ . Wenn Sie jetzt in einen Elektronikladen gehen und einen Festwiderstand mit genau diesem Wert verlangen, dann wird der Verkäufer Ihnen sicher sagen, daß es einen Widerstand mit diesem Wert überhaupt nicht zu kaufen gibt. Man hat sich nämlich auf ganz bestimmte Werte beschränkt und diese Reihe von Widerstandswerten genormt. Die Werte dieser Reihe sind so aufgebaut, daß man durch Parallel- oder Serienschaltung jeden beliebigen Widerstandswert erreichen kann. Für Widerstände kleinerer Leistung gelten die IEC-Reihen E12 und E24 (Tabelle 1). Es gibt

auch noch die Reihe E6, diese wird aber kaum benutzt.

Damit Sie sich die Werte durch Parallel- oder Serienschaltung errechnen können, hier die erforderlichen Formeln (Bild 2).

**Serienschaltung:**

$$R_{\text{ges}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

**Parallelschaltung:**

$$1/R_{\text{ges}} = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_n$$

Bei zwei Widerständen vereinfacht sich die Formel für die Parallelschaltung auf:

$$R_{\text{ges}} = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$$

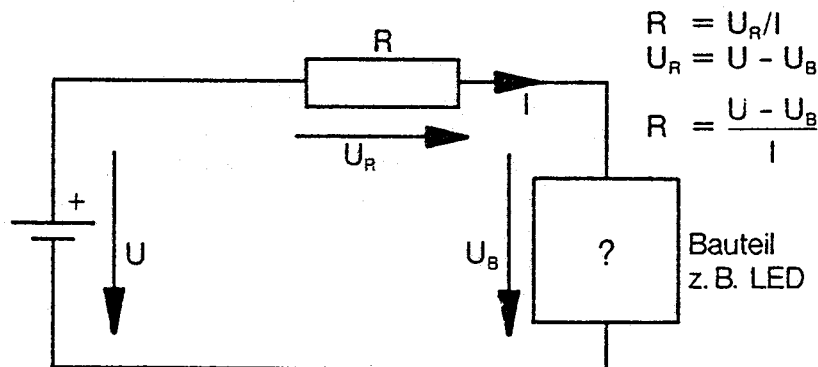
Der Wert eines Widerstandes wird durch Zahlen oder durch eine Farbkennzeichnung in Form von Ringen, Streifen oder Punkten auf dem Widerstandskörper angegeben. Die Farbkennzeichnung ist dabei folgendermaßen aufgeschlüsselt (Tabelle 2).

- |          |   |
|----------|---|
| 1. Ring: | 1. Ziffer des Widerstandswertes                                       |
| 2. Ring: | 2. Ziffer des Widerstandswertes                                       |
| 3. Ring: | Wert mit dem die aus Ziffer 1 und 2 gebildete Zahl multipliziert wird |
| 4. Ring: | Toleranz des Widerstandswertes in Prozent                             |

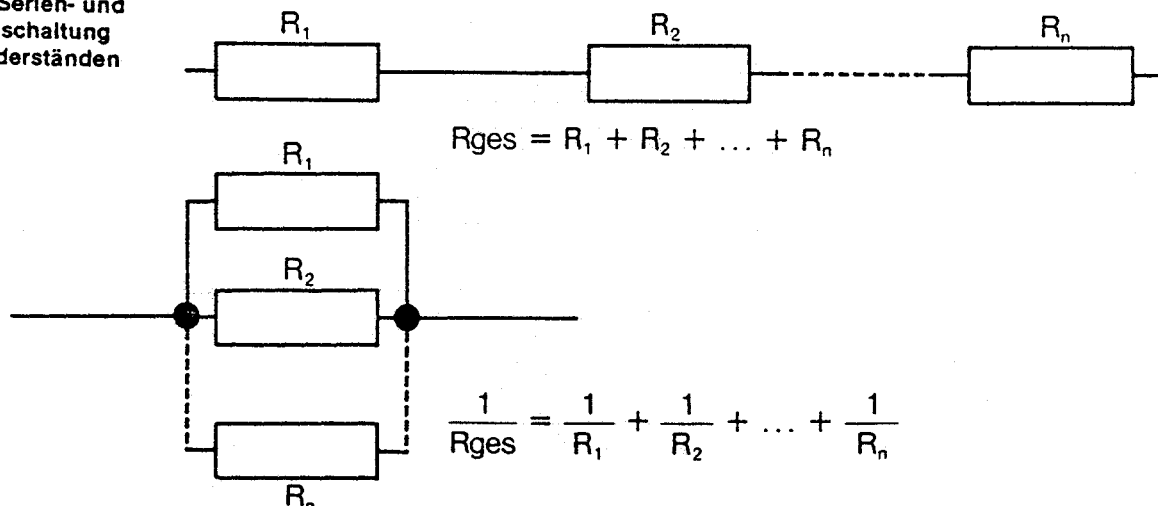
Ein Beispiel:

Ein Widerstand hat von links nach rechts (der Ring, der sich am dichtesten an einem der Anschlußdrähte befindet, ist immer der linke oder erste Ring) folgende Farbringe: Orange-Weiß-Rot-Silber.

**Bild 1. Beispiel zur Strombegrenzung**



**Bild 2. Serien- und Parallelschaltung von Widerständen**



Daraus ergibt sich der Wert des Widerstandes folgendermaßen:

|  |      |       |        |
|--|------|-------|--------|
| Orange   | Weiß | Rot   | Silber |
| 3  | 9    | • 100 | ± 10%  |
| = 39 Ohm                      • 100                      = 3,9 Kiloohm |      |       |        |

Der durch den Widerstand fließende Strom und die dabei an ihm abfallende Spannung erzeugen eine elektrische Leistung. Diese Leistung kann mit der Formel  $P=U \cdot I$  errechnet werden. Die am Widerstand entstehende Leistung wird voll in Wärme umgesetzt. Wie alle elektronischen Bauteile sind Widerstände auch nur bis zu einer bestimmten Grenze belastbar. Leider ist die Belastbarkeit nicht auf dem Widerstandskörper angegeben. Erfahren können Sie die Belastbarkeit nur aus der Größe des Widerstandes. Damit Sie eine Vorstellung über das Verhältnis Größe zur Belastbarkeit bekommen, sind im Bild auf Seite 25 rechts oben und links unter den roten Kondensatoren die gängigen Widerstandsgrößen dargestellt.

Die üblicherweise verwendeten Festwiderstände bestehen aus einer Kohleschicht. Für besondere Anforderungen gibt es auch noch Widerstände aus Metalloxid- oder Metallschicht. Für hohe Belastungen werden die Widerstände aus aufgewickelterm Widerstandsdraht hergestellt.

Kommen wir noch einmal auf eine Anwendung der Widerstände zurück und zwar zum Spannungsteiler (Bild 3). Er besteht aus der Serienschaltung zweier Widerstände. Diese sind an die Gesamtspannung  $U$  angeschlossen. Im unbelasteten Fall, das heißt, dem Spannungsteiler wird kein Strom entnommen, teilt sich die Gesamtspannung  $U$  proportional zum Verhältnis der beiden Widerstände in die beiden Teilspannungen  $U_1$  und  $U_2$  auf. Sobald man den Spannungsteiler belastet, stimmt dieses Verhältnis nicht mehr. Dies kann verhindert werden, indem bei der Berechnung des Teilers der Lastwiderstand miteingerechnet wird, oder man sorgt bei variablem Verbraucherstrom dafür, daß der Strom  $I$  etwa zehnmal so groß ist wie der maximale Laststrom  $I_L$ .

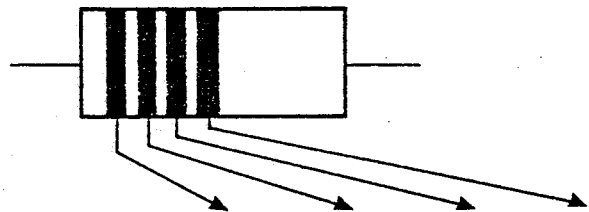
In vielen Fällen ist vorher nicht genau bekannt, in welchem Verhältnis die Spannung geteilt werden muß. Da es un bequem ist, in einer Schaltung probeweise immer einen Widerstand aus- und einzubauen, nimmt man in diesem Fall einen veränderbaren Widerstand. Das ist ein Trimmwiderstand oder ein Potentiometer (oben im Bild auf Seite 25). Trimmwiderstände sind für einmalige Einstellvorgänge bestimmt. Sie sind deshalb nur mit entsprechendem Werkzeug (Schraubendreher) zu verstellen. Potentiometer sind für immer wiederkehrende Einstellvorgänge (Lautstärke beim Radio) zu verwenden. Bei den Potentiometern gibt es Typen mit linearer und logarithmischer Einstellkennlinie. Das heißt, bei einem linearen Poti ändert sich der Widerstand linear mit dem Drehwinkel, beim logarithmischen dagegen, wie nicht anders zu erwarten, ändert sich der Widerstand in einer logarithmischen Kurve (Bild 4).

Die letzte Gruppe sind die veränderlichen Widerstände. Bei diesen Widerständen wird der Widerstandswert durch verschiedene äußere Einflüsse verändert.

Widerstände, die ihren Wert mit der Temperatur verändern, nennt man Kalt- oder Heißeiter. Ein Kaltleiter (PTC) hat bei niedrigen Temperaturen einen geringen Widerstandswert (Glühlampe). Dieser nimmt mit steigender Temperatur zu. Heißeiter (NTC) sind das Gegenstück zu den Kaltleitern. Ihr Widerstandswert sinkt mit steigender Temperatur. Dabei ist zu beachten, daß zwischen Temperatur und Widerstandswert kein linearer Zusammenhang besteht (Bild 5). Temperaturabhängige Widerstände werden vor allen Dingen für Meßzwecke oder zur Spannungstabilisation verwendet. Der auf den Widerstand aufgedruckte Wert stimmt mit dem Wert bei einer Temperatur von 25 Grad Celsius überein.

| E 6 | E 12 | E 24 |
|-----|------|------|
| 1,0 | 1,0  | 1,0  |
|     |      | 1,1  |
|     | 1,2  | 1,2  |
| 1,5 | 1,5  | 1,3  |
|     |      | 1,5  |
|     | 1,8  | 1,6  |
| 2,2 | 2,2  | 1,8  |
|     |      | 2,0  |
|     | 2,7  | 2,2  |
| 3,3 | 3,3  | 2,4  |
|     |      | 2,7  |
|     | 3,9  | 3,0  |
| 4,7 | 4,7  | 3,3  |
|     |      | 3,6  |
|     | 5,6  | 3,9  |
| 6,8 | 6,8  | 4,3  |
|     |      | 4,7  |
|     | 8,2  | 5,1  |
|     |      | 5,6  |
|     |      | 6,2  |
|     |      | 6,8  |
|     |      | 7,5  |
|     |      | 8,2  |
|     |      | 9,1  |

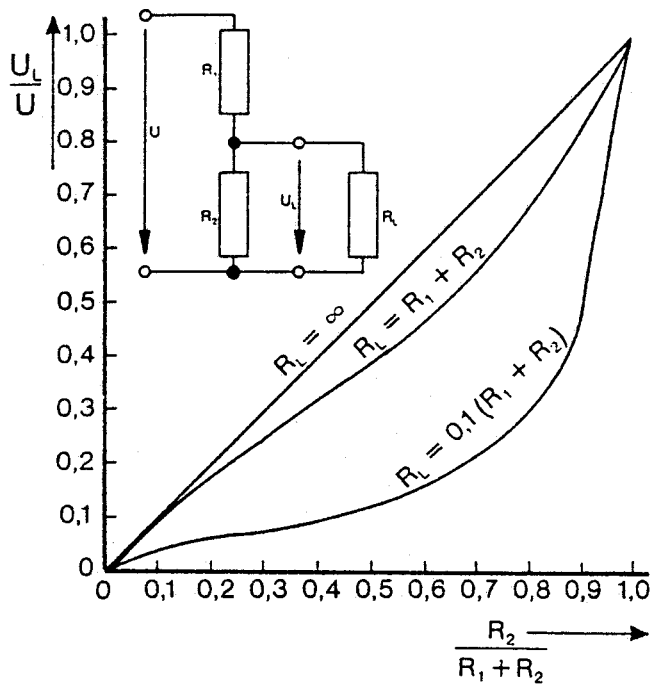
Tabelle 1. Widerstands-Normreihen E6, E12, E24



| Farbe   | 1. Ziffer | 2. Ziffer | Multiplikator | Toleranz |
|---------|-----------|-----------|---------------|----------|
| Schwarz | 0         | 0         | x 1 Ω         | -        |
| Braun   | 1         | 1         | x 10 Ω        | ± 1%     |
| Rot     | 2         | 2         | x 100 Ω       | ± 2%     |
| Orange  | 3         | 3         | x 1 kΩ        | -        |
| Gelb    | 4         | 4         | x 10 kΩ       | -        |
| Grün    | 5         | 5         | x 100 kΩ      | ± 0,5%   |
| Blau    | 6         | 6         | x 1 MΩ        | -        |
| Violett | 7         | 7         | x 10 MΩ       | -        |
| Grau    | 8         | 8         | -             | -        |
| Weiß    | 9         | 9         | -             | -        |
| Gold    | -         | -         | x 0,1 Ω       | ± 5%     |
| Silber  | -         | -         | x 0,01 Ω      | ± 10%    |
| keine   | -         | -         | -             | ± 20%    |

Tabelle 2. Farbschlüssel für Widerstände

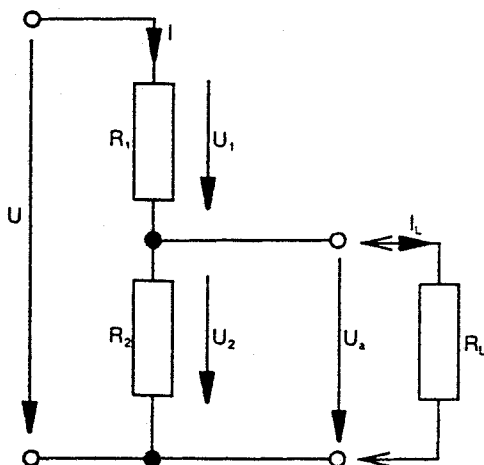
Lichtabhängige Widerstände nennt man auch kurz LDR (Light Dependent Resistor). Diese Widerstände ändern ihren Widerstandswert je nach Größe der Belichtung, der sie ausgesetzt sind. Dabei sind LDR, je nach Typ, für bestimmte Wei-



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

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

a) Spannungsteiler unbelastet

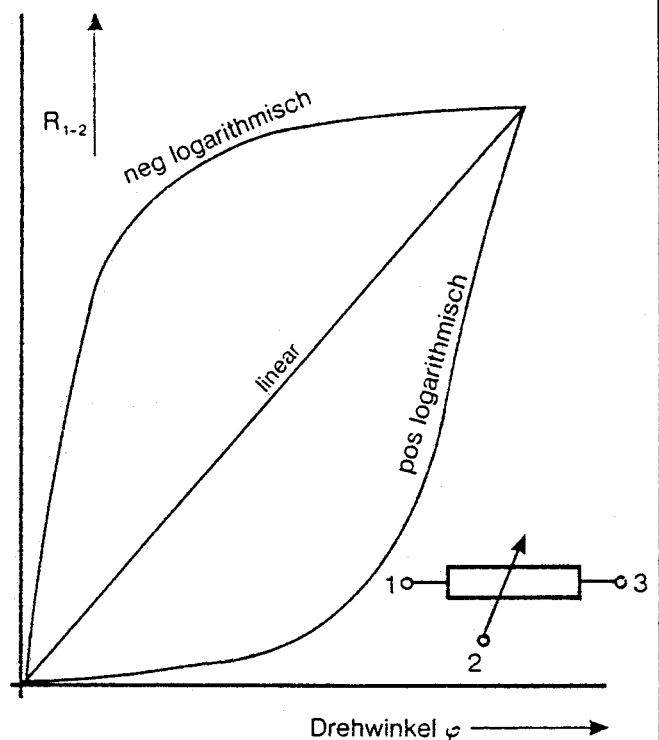


$$\frac{U_2}{U} = \frac{R_p}{R_1 + R_p} \quad R_p = \frac{R_2 \cdot R_L}{R_2 + R_L}$$

$$\frac{U_a}{U_1} = \frac{R_p}{R_1}$$

b) Spannungsteiler belastet

**Bild 3. Spannungsteiler und Kennlinie eines belasteten Spannungsteilers**



**Bild 4. Widerstandskurve von Potentiometern**

lenlängen des Lichtes besonders empfindlich. Sie werden im wesentlichen für Meßzwecke (Belichtungsmesser) eingesetzt. LDRs reagieren relativ träge auf Änderungen des Lichtes. Sie sind also nur dort einzusetzen, wo es nicht auf schnelle Reaktion ankommt.

Eine weitere Gruppe der veränderlichen Widerstände sind die spannungsabhängigen Widerstände (VDR oder Varistor). Der Widerstandswert nimmt bei steigender Spannung stark ab. Verwendet werden diese Widerstände zur Spannungsstabilisation und zum Schutz von Bauteilen gegen Überspannungen.

## Kondensatoren

Ein weiteres, sehr häufig verwendetes Bauelement ist der Kondensator. Er besteht im wesentlichen aus zwei sich gegenüberstehenden Metallplatten, zwischen denen sich Luft oder ein anderer isolierender Stoff befindet. Zum Verständnis der Funktionsweise schließen wir einen Kondensator in Reihe mit einem Widerstand und einem Schalter an eine Spannungsquelle an (Bild 6). Auf die Frage, was dabei passiert, wenn der Schalter geschlossen wird, werden Sie vielleicht antworten: Es passiert nichts, da zwischen den Kondensatorplatten keine leitende Verbindung besteht und der Stromkreis somit nicht geschlossen ist. Aber es passiert doch etwas. Um zu erkennen, was geschieht, bauen wir in die Schaltung ein Strommeßgerät ein. Beim Schließen des Schalters werden Sie sehen, daß der Zeiger des Meßgerätes ausschlägt und langsam in die Ausgangsstellung zurückfällt. Das beweist, daß für kurze Zeit, nach dem Betätigen des Schalters, ein Strom fließt. Um das Ganze etwas anschaulicher darzustellen, wollen wir einen analogen physikalischen Vorgang betrachten (Bild 7). Auf einer Balkenwaage stehen zwei halb mit Wasser gefüllte Eimer. Beide Eimer sind über einen Schlauch miteinander verbunden. In dem Schlauch ist eine Pumpe und ein Flügelrädchen integriert. Sobald die Pumpe eingeschaltet wird, pumpt sie Wasser von einem

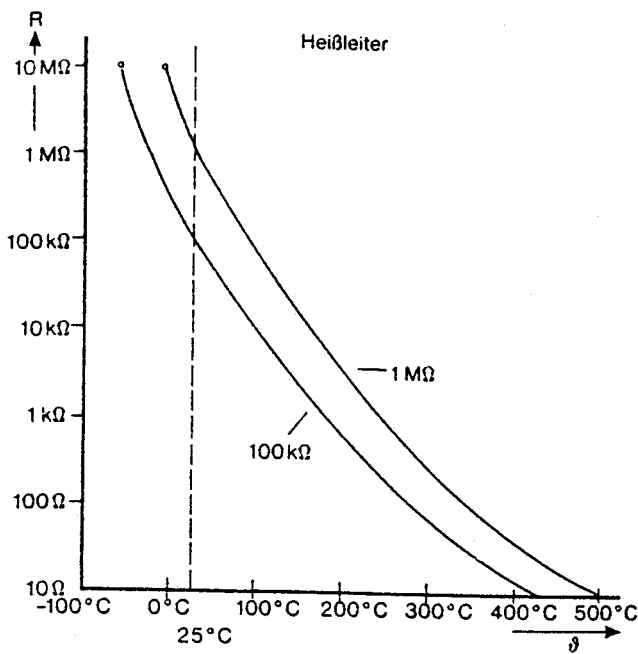


Bild 5. Kennlinie für Heiß- ( $R_{25}=100\text{k}\Omega$  und  $R_{25}=1\text{M}\Omega$ ) und Kaltleiter

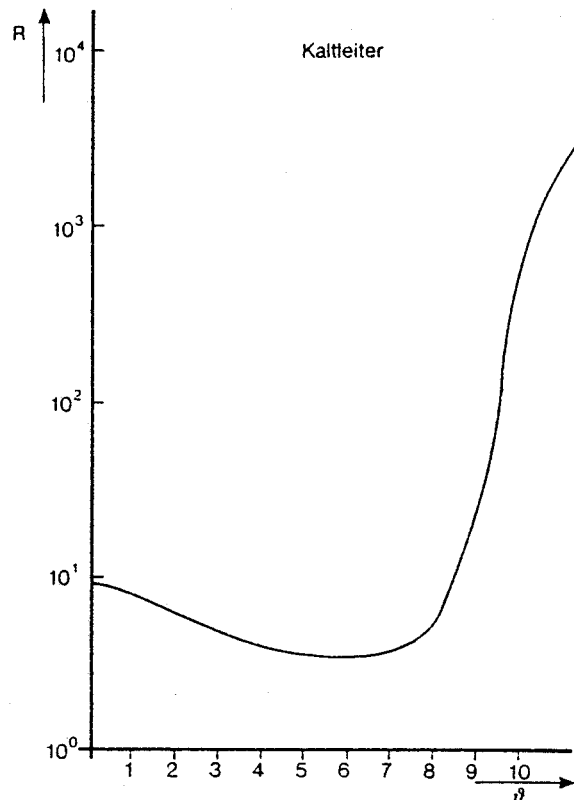
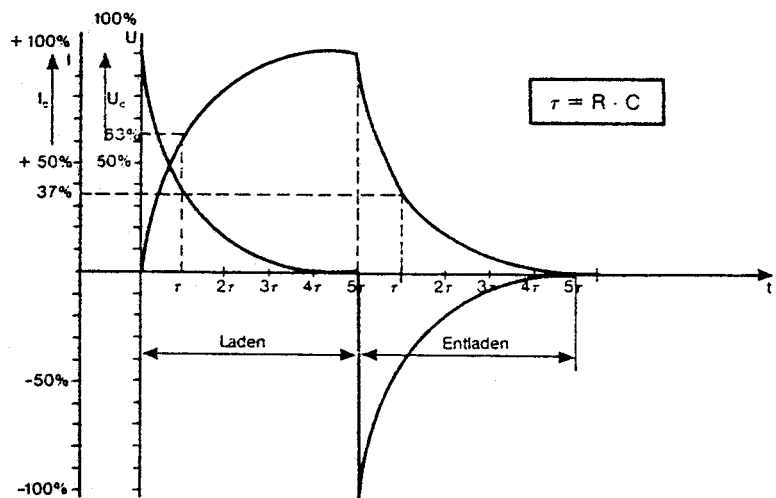
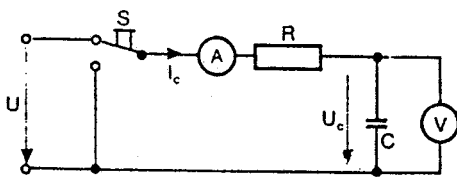


Bild 6. Versuchsschaltung mit Lade- und Entladekurve eines Kondensators



Eimer in den anderen. Das strömende Wasser treibt dabei das Flügelrädchen an. Dies passiert aber nur so lange, wie Wasser in beiden Eimern ist. Wenn der eine Eimer leer ist, fließt kein Wasser mehr und das Flügelrädchen steht wieder still. Unsere Schaltung funktioniert genauso. Die Eimer entsprechen den Platten des Kondensators, die Pumpe der Spannungsquelle und das Flügelrädchen dem Meßgerät. Der Widerstand in unserer Schaltung wird durch den Leitungsquerschnitt des Schlauches dargestellt. Die Rolle des Wassers wird von den Elektronen übernommen. Da unsere Kondensatorplatten aus Metall sind, sind auf ihnen genügend freie Elektronen als Ladungsträger vorhanden. Beim Einschalten des Stromkreises mit dem Schalter, was dem Einschalten der Pumpe gleichkommt, werden von der einen

Kondensatorplatte diese Elektronen abgesaugt und auf die andere Platte gebracht. Das Fließen von Elektronen ist aber gleichbedeutend mit dem Fließen eines Stroms. Genauso, wie der Eimer einmal leer wird, sind auch zu einem bestimmten Zeitpunkt auf der einen Kondensatorplatte keine freien Elektronen mehr vorhanden. Der Strom hört dann auf zu fließen.

Auch zur Balkenwaage können wir in unserem Schaltkreis eine Analogie finden. Dazu schließen wir parallel zum Kondensator ein Spannungsmessgerät an. Genauso, wie die Balkenwaage sich mit unterschiedlicher Füllung der Eimer immer mehr neigt, schlägt auch der Spannungsmesser mit zunehmender Ladung des Kondensators immer weiter aus. Dieser Meßgeräteauschlag bleibt auch dann erhalten, wenn

kein Strom mehr fließt und wir den Schalter wieder geöffnet haben. Eine Spannung zwischen zwei Leitern entsteht immer dann, wenn sich unterschiedliche Ladungen zwischen zwei Leitern befinden.

Beim Kondensator wird dieser Ladungsunterschied zwischen den Platten durch die negativ geladenen Elektronen, die auf der einen Platte konzentriert sind und auf der anderen Platte fehlen, verursacht. Der Stromfluß und damit die Ladung des Kondensators ändert sich mit einer e-Funktion (Bild 6).

Die Zeit, die verstreicht, bis der Kondensator mit 63% seines Endwertes geladen ist, wird mit  $t$  bezeichnet. Der Wert  $t$  kann durch Multiplikation von Widerstands- und Kondensatorwert ( $t = C \cdot R$ ) errechnet werden. Nach einer Zeit von  $5t$  hat der Kondensator 99% seines Ladungsendwertes erreicht. Dadurch, daß sich die Ladungen auf den Kondensatorplatten nicht verändern, ist der Kondensator ein elektrischer Energiespeicher. Dies wird ausgenutzt, um zum Beispiel in einem Netzgerät den noch welligen gleichgerichteten Strom zu glätten. Die Ladung kann von den Kondensatorplatten natürlich auch wieder entfernt werden. Dazu braucht man die Spannungsquelle nur durch einen Draht zu ersetzen. Beim Schließen des Schalters fließt solange Strom, bis auf beiden Kondensatorplatten wieder die gleiche Anzahl Elektronen vorhanden ist.

In unserem Beispiel mit den Eimern geschieht der Ausgleich durch eine direkte Verbindung zwischen den Eimern. Öffnet man das Ventil in dieser Verbindung, dann strömt solange Wasser durch die Leitung, bis sich in beiden Eimern wieder gleichviel Wasser befindet.

Der Effekt der Ladungsspeicherung und langsamen Ladung des Kondensators wird zum Aufbau von elektronischen Verzögerungsgliedern und zur Impulserzeugung ausgenutzt. Die Größe oder Kapazität eines Kondensators wird in Farad gemessen. Sie ist abhängig von der Größe der Platten, ihrem Abstand zueinander und von der Qualität des Isoliermaterials, auch Dielektrikum genannt, das sich zwischen den Platten befindet. Übliche Kapazitätswerte gehen bis etwa 10 Millifarad. Genau wie bei den Widerständen sind auch die Werte für die einzelnen Kondensatoren nach den E-Reihen genormt.

Das Verhalten des Kondensators bei Wechselspannung unterscheidet sich erheblich von dem soeben besprochenen Verhalten bei Gleichspannung. Eine Wechselspannung ändert mit einer bestimmten Frequenz »f« die Polarität. Bei der Netzspannung ändert sie sich zum Beispiel 50mal pro Sekunde, also mit einer Frequenz von 50 Hertz. Bei einem an eine Wechselspannung angeschlossenen Kondensator ändert sich die Polarität an den Platten mit der gleichen Frequenz. Bei jedem Polaritätswechsel der Spannung wird die Platte, die gerade noch geladen wurde, wieder entladen. Die andere Platte, die entladen wurde, wird jetzt wieder aufgeladen. Durch diese dauernden Lade- und Entladevorgänge fließt ein Wechselstrom. Sein Wert wird von der Größe und Frequenz der Spannung und der Kapazität des Kondensators bestimmt. Da eine Spannung am Kondensator anliegt und ein Strom durch ihn hindurchfließt, ist der Kondensator nach dem Ohmschen Gesetz für eine Wechselspannung nichts weiter als ein Widerstand. Bei einer bestimmten Frequenz hat ein Kondensator einen bestimmten Widerstand, der nur von der Größe des Kondensators abhängt. Die Bezeichnung für den Wechselstromwiderstand eines Kondensators ist  $X_c$ . Der Wert errechnet sich zu  $X_c = 1 / (2 \cdot \pi \cdot f \cdot C)$ . Wie aus der Formel ersichtlich ist, wird der Wechselstromwiderstand eines Kondensators mit zunehmender Frequenz immer kleiner. Das wird technisch dazu genutzt, um aus einem Signalgemisch bestimmte Frequenzen auszufiltern (Frequenzweiche in der Lautsprecherbox).

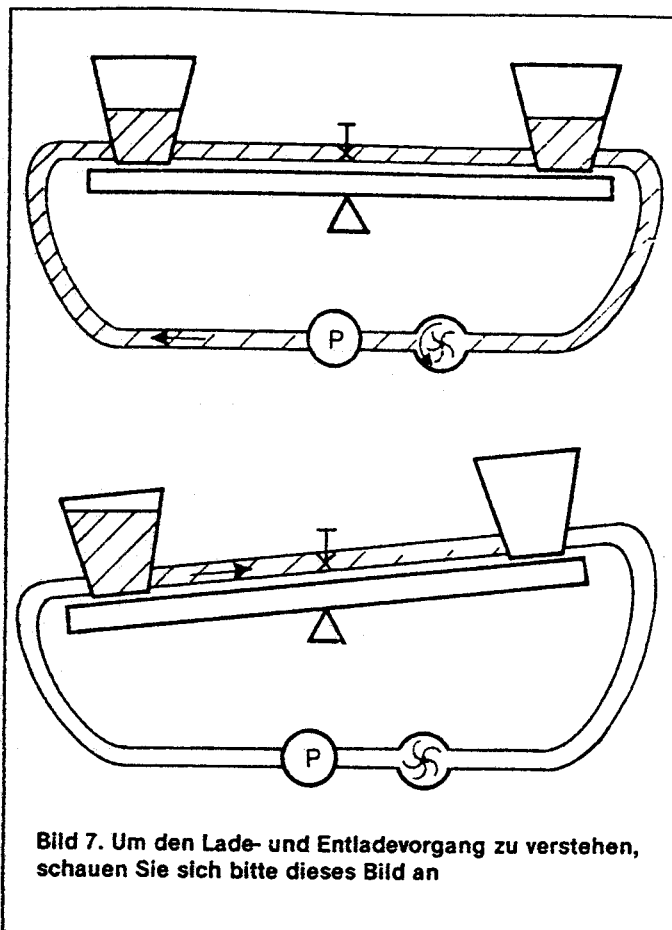


Bild 7. Um den Lade- und Entladevorgang zu verstehen, schauen Sie sich bitte dieses Bild an

## Bauformen von Kondensatoren

Kondensatoren im Picofarad-Bereich werden meist aus Keramik hergestellt. Ein Rohr oder ein Plättchen aus einer Keramikmasse wird dabei von beiden Seiten, beim Rohr innen und außen, mit einem Metallbelag versehen. Dies sind die beiden Platten des Kondensators. Die Keramikmasse übernimmt die Funktion des Dielektrikums.

Bei Papierkondensatoren besteht das Dielektrikum aus Zellulosepapier, während die Platten oder Beläge aus Aluminiumfolie gefertigt werden. Damit man kleine Baugrößen erreicht, werden Aluminiumfolie und Papier zusammen aufgewickelt.

Metall-Papier-Kondensatoren haben ebenfalls Papier als Dielektrikum. Die Beläge werden aber durch eine dünne, auf das Papier aufgedampfte, Metallschicht gebildet. Diese Kondensatoren haben den Vorteil der Selbstheilung. Schlägt ein Kondensator infolge zu hoher Spannung durch, so verdampft an dieser Stelle die dünne Metallschicht und es entsteht eine metallfreie Zone. Die Kapazität wird zwar etwas kleiner, aber ein Kurzschluß zwischen den Platten, der einer Zerstörung des Kondensators gleichkäme, wird hierdurch verhindert.

Kunststoffolien-Kondensatoren bestehen aus mehreren Schichten einer Kunststoffolie mit aufgedampftem Metall. Diese Kondensatoren sind ebenfalls selbstheilend. Kunststoffolien-Kondensatoren können sehr klein und kompakt aufgebaut werden. Sie eignen sich deshalb besonders zur Bestückung von Platinen.

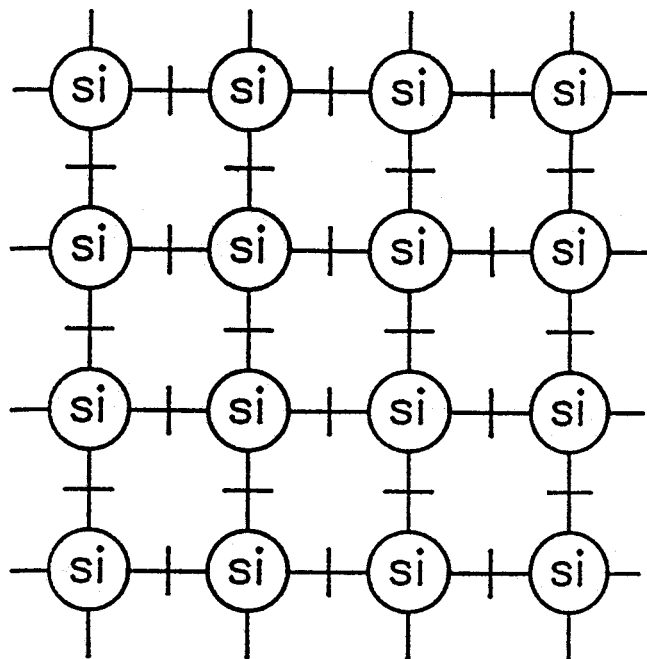
Elektrolytkondensatoren, auch kurz Elkos genannt, bestehen aus einem Wickel zweier Aluminiumbänder mit einer Zwischenlage aus Papier. Das Papier ist mit einem Elektrolyten, einer elektrisch leitenden Flüssigkeit, getränkt. Dieser Elektrolyt bildet einen der Beläge. Eines der Aluminiumbänder dient als elektrische Zuführung zum Elektrolyten. Das Dielektrikum wird gebildet, indem eine Gleichspannung an den Kondensator angelegt wird. Dabei bildet sich an einem der Alumi-

niumbänder eine dünne Oxidhaut, die als Dielektrikum wirkt. Elkos sind gepolte Bauelemente, das heißt, sie dürfen nur mit Gleichspannung betrieben und Plus- oder Minuspol dieser Spannung nur an die dafür vorgesehenen Anschlüsse gelegt werden. Wird ein solcher Elko falsch gepolt an eine Gleichspannung angeschlossen, dann kann es durchaus zu einer kleinen Explosion kommen.

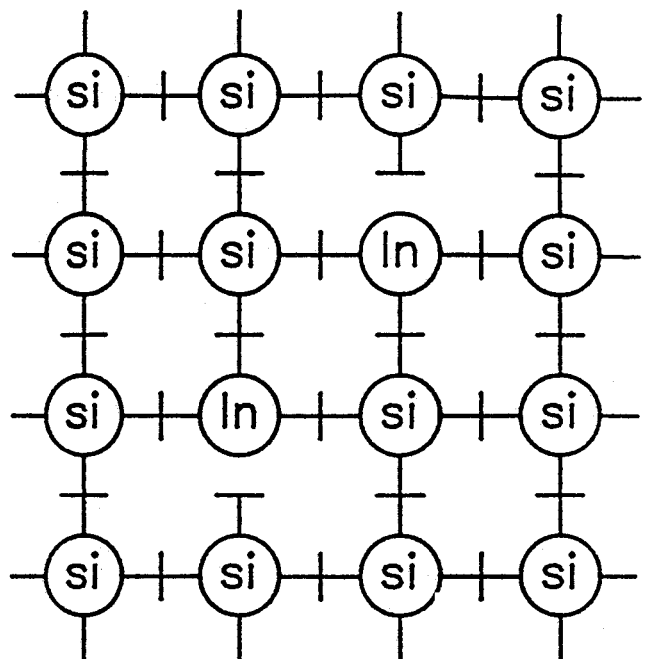
Die Kapazität eines Elkos liegt im Mikro- bis Millifarad-Bereich. Gekennzeichnet werden Kondensatoren durch einen Farbcode, wie bei den Widerständen oder durch den

direkt aufgedruckten Wert.

Besonders zu beachten ist bei Kondensatoren die jeweilige Spannungsfestigkeit. Liegt nämlich an einem Kondensator eine Spannung an, die höher ist als der aufgedruckte Wert, so wird das Dielektrikum durchschlagen und es entsteht ein Kurzschluß zwischen den Platten. Dadurch büßt der Kondensator alle seine Eigenschaften ein. Auch selbstheilende Kondensatoren dürfen nicht längere Zeit an einer zu hohen Spannung betrieben werden. Sie brennen sonst im wahrsten Sinne des Wortes aus.

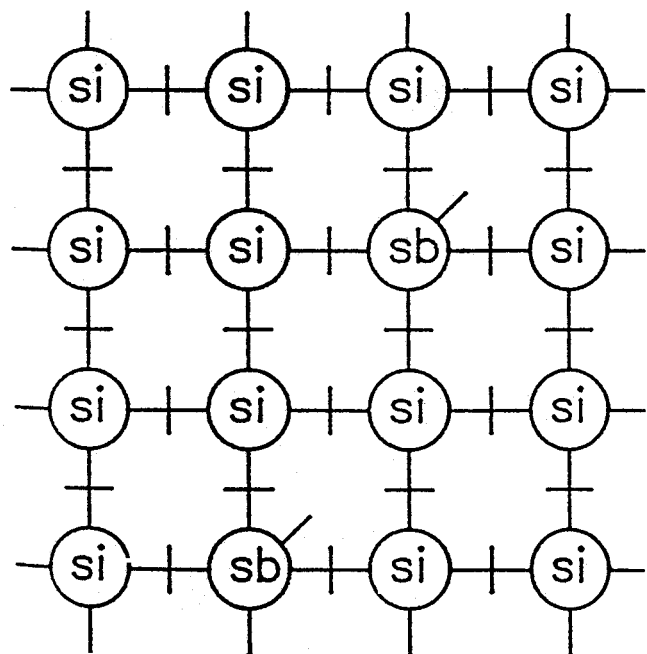


a) Vereinfachte Darstellung der Kristallstruktur eines Siliziumreinkristalls



c) Siliziumkristall mit Verunreinigung durch dreiwertige Indiumfremdatome. P-Leiter.

Bild 8. Kristallstruktur von Silizium rein und dotiert



b) Siliziumkristall mit Verunreinigung durch fünfwertige Antimonfremdatome. N-Leiter.

## Halbleiter-Bauelemente

Zum Verständnis von Transistoren, Dioden und anderen Halbleiter-Bauelementen ist es erforderlich, etwas über den grundsätzlichen Aufbau eines Halbleiterkristalls zu wissen.

Es gibt Leiter und Nichtleiter für den elektrischen Strom. In bezug auf das Periodensystem gibt es dazwischen noch die Halbleiter. Dies sind zum Beispiel die Metalle Silizium und Germanium. Halbleiter verhalten sich bei tiefen Temperaturen wie Nichtleiter. Sobald man einen Halbleiter aber erwärmt, wird er zu einem Leiter. Bei einer Temperatur von 20 Grad Celsius ist ein Halbleiter schwach leitend. Dies gilt nur für vollkommen reine Halbleiter mit einer internen Kristallstruktur. In diesem Halbleiterkristall sitzen die Atome regelmäßig geordnet nebeneinander, das heißt alle Atomkerne haben zueinander exakt den gleichen Abstand (Bild 8).

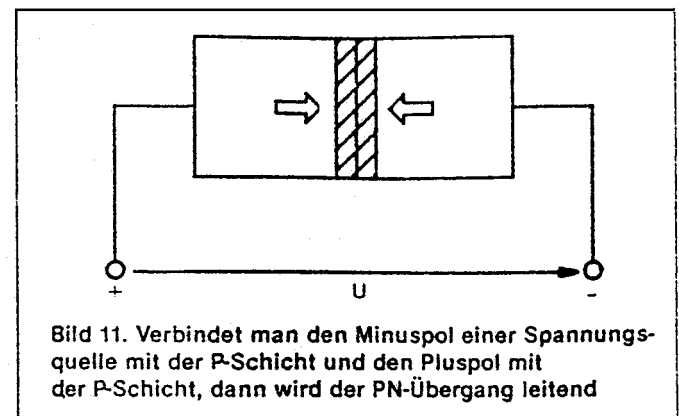
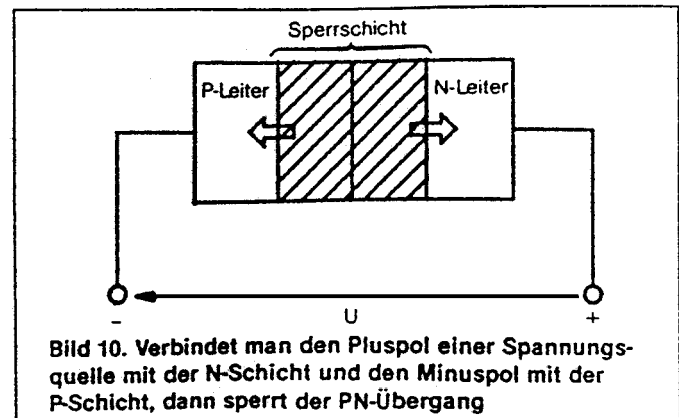
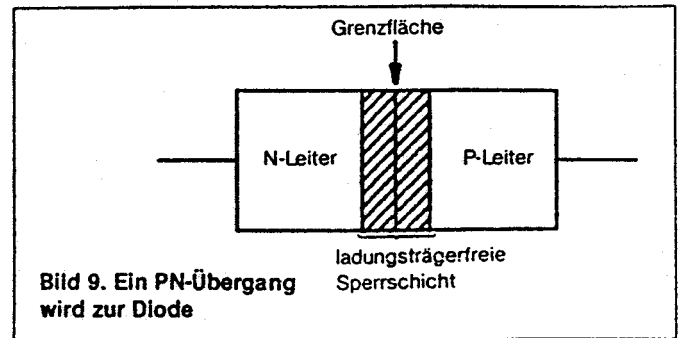
Um die Atomkerne kreisen Elektronen. Beim Silizium sind dies in der äußeren Schale genau vier. Jedes dieser vier Elektronen wird benötigt, um mit den vier Nachbaratomen eine Verbindung einzugehen. Dadurch sind keine Elektronen mehr als freie Ladungsträger übrig. Der Halbleiterkristall kann deshalb keinen Strom leiten.



Sobald jetzt Energie in Form von Wärme zugeführt wird, fangen die Elektronen an zu schwingen. Ist die zugeführte Energie groß genug, dann werden Elektronen aus ihrer Bindung herausgerissen und können sich jetzt frei im Kristall bewegen. Da nun freie Ladungsträger vorhanden sind, kann ein Strom durch den Halbleiter fließen. Diese Eigenleitfähigkeit des Halbleiters kann durch gezielte Verunreinigung des Kristalls vergrößert werden.

Fügt man zum Beispiel Fremdatome mit fünf Elektronen in der äußeren Schale zum Halbleiterkristall hinzu, so bleibt bei der Einbindung dieses Atoms ein Elektron übrig. Dieses wird zum Herstellen der Verbindung der einzelnen Halbleiteratome nicht benötigt. Dieses freie Elektron kann also als Ladungsträger verwendet werden. Auch bei Fremdatomen mit nur drei Elektronen in der äußeren Schale sind freie Ladungsträger vorhanden. Diese freien Ladungsträger sind die Fehlstellen, die jetzt bei der Bindung entstehen. Sie sind Träger einer positiven Ladung, im Gegensatz zu den Elektronen, die Träger negativer Ladung sind. Bei Halbleiterkristallen, die durch Fremdatome mit fünf Elektronen verunreinigt sind, spricht man aus diesem Grund von N-Leitern. Den durch Fremdatome mit drei Bindungselektronen verunreinigten Halbleiterkristall nennt man dagegen P-Leiter.

Je stärker ein Halbleiter mit bestimmten Atomen verunreinigt ist, desto unabhängiger ist die Leitfähigkeit von der Temperatur.



## Dioden

Verbindet man einen N-Halbleiter mit einem P-Halbleiter, dann entsteht ein PN-Halbleiter (Bild 9). An der Nahtstelle zwischen P- und N-Leiter bewegen sich die Elektronen von dem N-Leiter (Elektronenüberschuß) in den P-Leiter (Elektronenmangel) und füllen hier die Löcher. Innerhalb eines begrenzten Bereiches im PN-Verbund sind plötzlich keine freien Ladungsträger mehr vorhanden. Am PN-Übergang ist eine Sperrschicht für den elektrischen Strom entstanden. Legt man nun an den P-Leiter den Minuspol und an den N-Leiter den Pluspol einer Spannungsquelle (Bild 10), dann werden aus dem N-Leiter die Elektronen abgesaugt und im P-Leiter die Löcher gefüllt. Die Sperrschicht hat sich dadurch stark verbreitert. Weil nun keine freien Ladungsträger vorhanden sind, kann kein Strom durch den PN-Kristall fließen. Man sagt auch, der PN-Übergang sperrt. Polt man die Spannung um (Bild 11), werden Leitungselektronen in den N-Leiter hineingetrieben und aus dem P-Leiter abgesaugt. Die Sperrschicht wird jetzt kleiner. Ab einer bestimmten Spannung (bei Silizium 0,7 Volt, bei Germanium 0,3 Volt) ist die Sperrschicht vollkommen verschwunden. Aus dem PN-Halbleiter ist ein Leiter geworden.

Diese Diode, denn nichts anderes ist dieser PN-Übergang, wirkt wie ein Ventil. Strom wird nur in einer Richtung durchgelassen. Der Anschluß der Diode, an dem in Durchlaßrichtung der Pluspol der Spannung anliegt, wird als Anode bezeichnet, der andere Anschluß heißt Kathode.

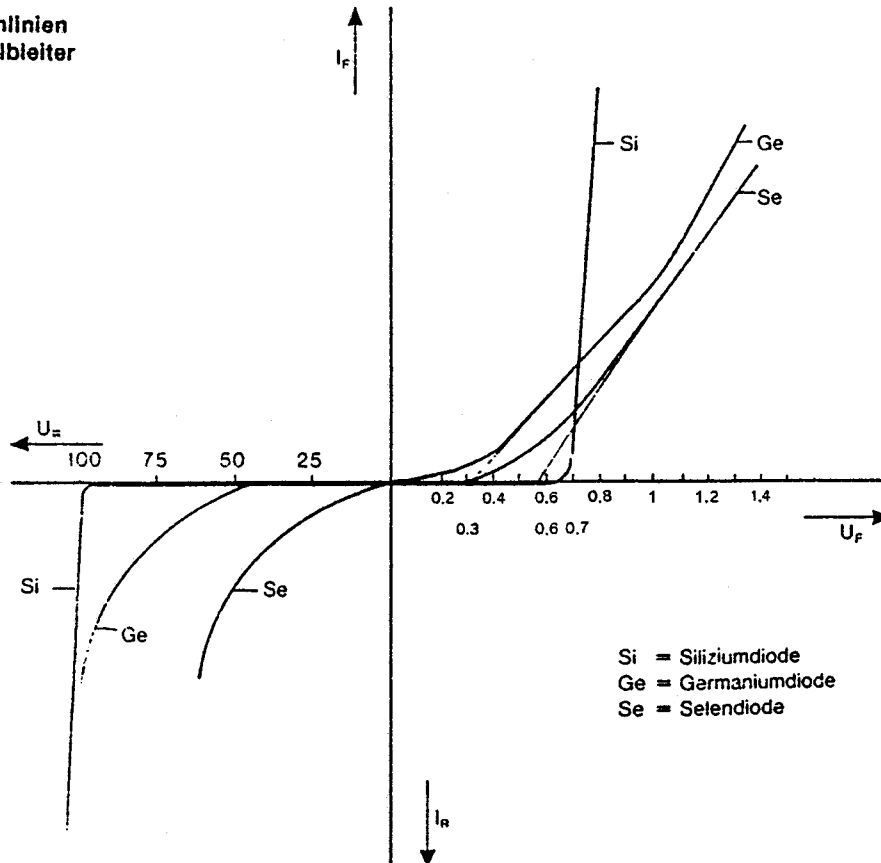
Das Verhalten einer Diode kann man am besten anhand der Kennlinie erkennen (Bild 12). Legt man an eine Diode eine Spannung an und erhöht diese langsam, dann ist folgendes zu beobachten: Solange die Spannung klein bleibt, erhöht sich der Strom durch die Diode nur unwesentlich. Ab einer bestimmten Spannung jedoch steigt der Strom plötzlich stark an. Diese Spannung wird als Schleusenspannung bezeichnet. Bei Siliziumdioden beträgt sie etwa 0,7 Volt und bei Germaniumdioden 0,3 Volt. Erhöht man die Spannung weiter, so wird sehr schnell ein Punkt erreicht, an dem die Diode durch

den stark angewachsenen Strom so aufgeheizt ist, daß sie zerstört wird. Aus diesem Grund darf eine Diode in einer Schaltung immer nur mit einem Widerstand zur Strombegrenzung betrieben werden. Polt man die Spannung um und erhöht sie wieder langsam, so wird bis zu einer bestimmten Spannung nur ein winzig kleiner Strom fließen. Ab einer bestimmten Spannung erfolgt dann ein steiler Stromanstieg. Es werden ab dieser hohen Spannung Bindungselektronen aus dem Atomverbund in der Sperrschicht herausgerissen (Zenereffekt). Da diese Elektronen durch die hohe Spannung sehr stark beschleunigt werden, sind sie in der Lage, wiederum andere Elektronen aus ihrer Bindung herauszureißen. Es entsteht ein lawinenartiger Effekt. Bei normalen Dioden darf diese Art von Durchbruch nicht passieren, da sie sonst zerstört werden. Bei anderen Dioden, zu denen wir später noch kommen, wird dieser Effekt technisch ausgenutzt. Die Spannung, bei der der Durchbruch erfolgt, ist die maximale Sperrspannung der Diode.

Normale Dioden werden zum größten Teil als Gleichrichter verwendet. Mit Gleichrichtern kann man aus einer Wechselspannung eine Gleichspannung machen. Andere Verwen-



Bild 12. Dioden-Kennlinien für verschiedene Halbleiter



ding finden Dioden auch in Schutzbeschaltungen für empfindliche Halbleiter. Hier wird ausgenutzt, daß an einer Diode in Durchlaßrichtung kaum mehr als etwa 1 Volt Spannung abfällt. Ein gutes Beispiel ist der Schutz eines Transistors beim Schalten eines Relais.

In Bild 13 sind einige Bauformen von Dioden aufgezeichnet. Die Kathode wird bei Dioden fast immer durch einen durchgehenden Ring gekennzeichnet. Der Diodentyp wird in den meisten Fällen direkt auf den Diodenkörper aufgedruckt. Es ist aber auch möglich, ihn durch einen Farbcode zu kennzeichnen. Als Beispiel dafür soll die Universalodiode 1N4148 dienen. Bei ihr ist die Kathode bei einigen Herstellern durch einen weißen Ring gekennzeichnet. Die Zahl 4148 folgt dann durch die Ringe gelb, braun, gelb und grau. Die Buchstabenkombination einiger Dioden gibt bestimmte Informationen über den Diodentyp wieder. Dies ist aus Tabelle 3 ersichtlich.

Um sich eine Vorstellung davon machen zu können, was einzelne Dioden leisten, schauen Sie sich Tabelle 4 an. Sie enthält verschiedene Daten einiger Dioden.

## Z-Dioden

Ein wichtiger Diodentyp ist die Z-Diode. Bei ihr wird ausgenutzt, daß sich die Durchbruchspannung, bei einer in Sperrrichtung gepolten Diode, stromunabhängig nur sehr wenig ändert (Kennlinie Bild 14). Die Spannung an der Diode ist in diesem Fall nahezu konstant. Dieser Effekt wird vor allem zur Stabilisierung von Spannungen genutzt. Da sich der Strom durch die Diode bei kleinen Spannungsänderungen stark ändert, darf eine Z-Diode nur mit Vorwiderstand betrieben werden. Z-Dioden werden immer in Sperrrichtung betrieben. In Durchlaßrichtung verhält sich eine Z-Diode wie eine normale Gleichrichterdiode. Die jeweilige Z-Spannung ist tempe-

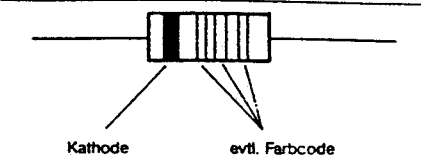
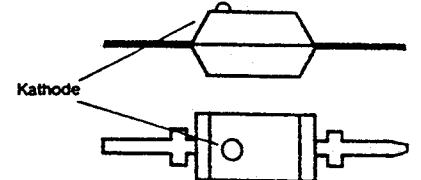
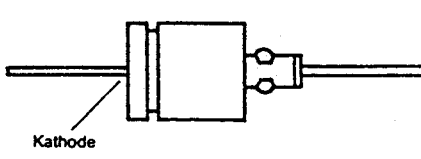
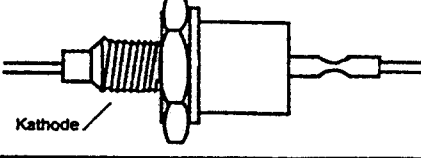
| Bauform  | Verwendung                                   |
|--|--|
| <br>Kathode evtl. Farbcode | Dioden und Z-Dioden geringer Leistung        |
| <br>Kathode                | Kapazitätsdioden, PIN-Dioden, Schottkydioden |
| <br>Kathode                | Dioden und Z-Dioden mittlerer Leistung       |
| <br>Kathode                | Dioden und Z-Dioden großer Leistung          |

Bild 13. Bauformen der verschiedenen Dioden

raturabhängig. Erhältlich sind Z-Dioden entsprechend den bei den Widerständen schon besprochenen Reihen E12 und E24.

| Erster Buchstabe<br>Halbleiterwerkstoff          | Zweiter Buchstabe<br>Art des Bauelements | Dritter Buchstabe<br>und Ziffern                                   |
|--|--|--|
| A Germanium                                      | A Diode                                  | Der dritte Buchstabe (X, Y oder Z) kennzeichnet Industrietypen     |
| B Silizium                                       | B Kapazitätsdiode                        |  |
| C z.B. Galliumarsenid                            | C NF-Transistor                          | Die Ziffern dienen nur der laufenden Kennzeichnung des Bauelements |
| D z.B. Indium-Antimonid                          | D NF-Leistungstransistor                 |  |
| R Halbleiter für Photoleiter und Hallgeneratoren | E Tunnel diode                           |  |
|  | F HF-Transistor                          |  |
|  | H Half-Feldsonde                         |  |
|  | L HF-Leistungstransistor                 |  |
|  | N Optokoppler                            |  |
|  | P,Q strahlungsempfindliches Element      |  |
|  | R steuerbarer Gleichrichter              |  |
|  | S Schalttransistor                       |  |
|  | U Leistungsschalttransistor              |  |
|  | Y Leistungsdiode                         |  |
|  | Z Z-Diode                                |  |

Tabelle 3. Bezeichnungen von Halbleiter-Bauelementen

| TYP      | Sperrspannung<br>in V | Durchlaßstrom<br>in mA | Spitzenstrom<br>in mA | Durchlaßspannung<br>in V bei mA | Halbleitermaterial |
|----------|-----------------------|------------------------|-----------------------|---------------------------------|--------------------|
| AA 116   | 20                    | 24                     | 200                   | 0,18 0,1                        | Germanium          |
| AA 119   | 30                    | 35                     | 200                   | 0,23 0,1                        | Germanium          |
| BA 127   | 60                    | 100                    | 200                   | 0,97 100                        | Silizium           |
| 1 N 914  | 100                   | 75                     | -                     | 1 10                            | Silizium           |
| 1 N 4148 | 75                    | 75                     | 500                   | 1 10                            | Silizium           |
| 1 N 4001 | 50                    | 1000                   | 50000                 | 1,3 1                           | Silizium           |
| 1 N 4002 | 100                   | 1000                   | 50000                 | 1,3 1                           | Silizium           |
| BY 127   | 1250                  | 1000                   | 40000                 | 1,2 1                           | Silizium           |

Tabelle 4. Daten einiger Dioden

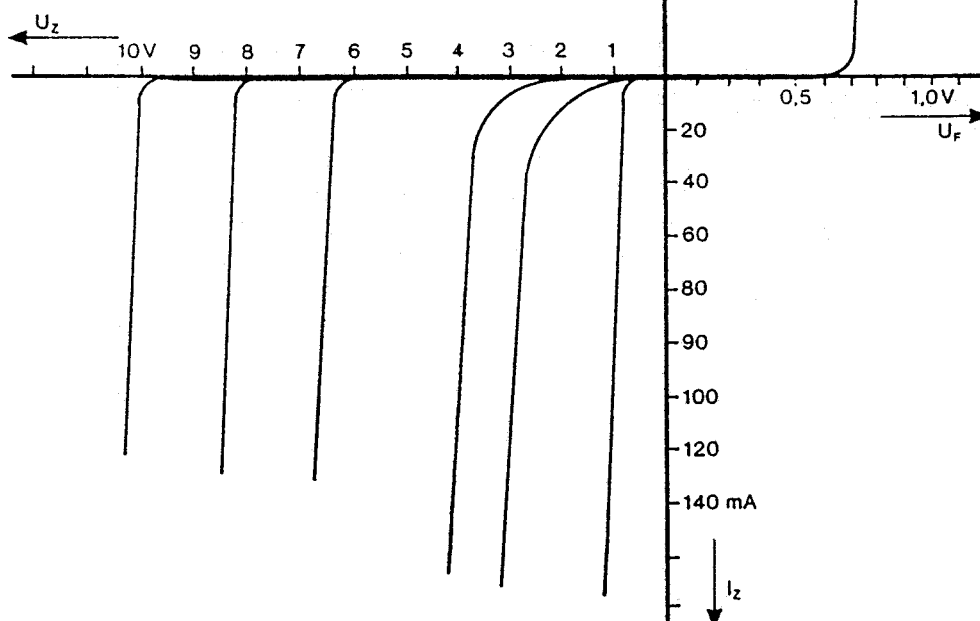
## Leuchtdioden

Weitere sehr oft verwendete Dioden sind die Leuchtdioden, auch kurz LED genannt. Sie werden als Anzeige und in Optokopplern verwendet. Leuchtdioden senden sichtbares Licht aus, wenn sie in Durchlaßrichtung betrieben werden. Das Licht ist je nach Halbleitermaterial rot, grün, orange, gelb oder blau. Es gibt außerdem LEDs, die infrarotes Licht oder sogar Laserlicht aussenden. Die Helligkeit, mit der die Diode leuchtet, hängt von der Stärke des durchfließenden Stroms ab. Der Strom darf auch hier eine bestimmte Stärke nicht überschreiten. Eingestellt wird der Strom, ebenso wie bei anderen Dioden, über Vorwiderstände. Die Durchlaßspannung einer Leuchtdiode liegt je nach Leuchtfarbe zwischen 1,5 Volt und 2,5 Volt. In Sperrichtung sollten Leuchtdioden nicht betrieben werden, da sie nur eine sehr kleine Sperrspannung zulassen (etwa 3 bis 5 Volt). Damit beim Betrieb an einer Wechselspannung die Sperrspannung nicht überschritten wird, muß eine normale Diode in Reihe oder eine andere Leuchtdiode antiparallel hinzugeschaltet werden.

## Fotodioden

Ein anderer Diodentyp, der mit Licht zu tun hat, ist die Fotodiode. Bei ihr steigt der Sperrstrom mit der Beleuchtung an. Eine Fotodiode wird daher immer in Sperrichtung betrieben. Je nach Typ sind Fotodioden nur für einen bestimmten Wellenlängenbereich des Lichts empfindlich. Der Bereich der Empfindlichkeit erstreckt sich vom ultravioletten bis zum infraroten Licht. Fotodioden verhalten sich ausgesprochen linear in bezug auf Beleuchtungsstärke/Stromstärke. Sie können deshalb sehr gut für Meßzwecke eingesetzt werden. Da Fotodioden auch sehr schnell reagieren, sollte man sie anstelle von Fotowiderständen einsetzen.

Bild 14. Kennlinien unterschiedlicher Zener-Dioden



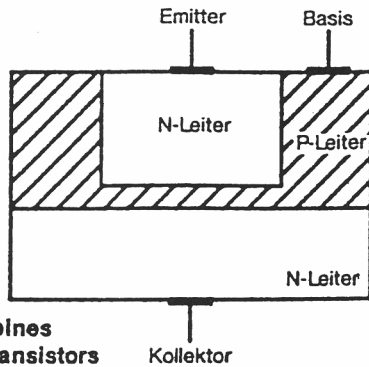


Bild 15. Aufbau eines bipolaren NPN-Transistors

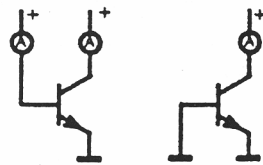


Bild 16. Testschaltung für Transistoren

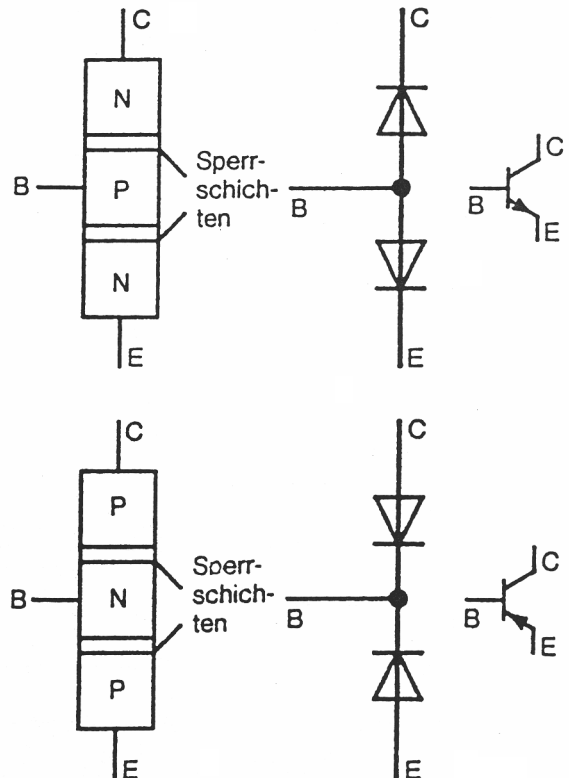


Bild 17. Aufbau und Ersatzschaltbild von PNP- und NPN-Transistoren

## Transistoren

Zum Aufbau eines Transistors werden drei verschieden dotierte Halbleiterschichten zusammengefügt und zwar in der Reihenfolge NPN oder PNP (Bild 15). Als Dotieren bezeichnet man das Verunreinigen des Halbleiterkristalls mit Fremdatomen. Da wir durch das Zusammenfügen zwei PN-Übergänge erhalten, bilden sich auch zwei Sperrschichten. Die drei Halbleiterschichten werden beim Transistor mit besonderen Namen gekennzeichnet. Die äußeren Schichten sind der Kollektor und der Emitter. Dabei ist die flächenmäßig größere Schicht der Kollektor. Die innere Schicht wird als Basis bezeichnet. Die Basis ist sehr dünn und besteht aus nur schwach dotiertem Halbleitermaterial.

Zum Verständnis der Wirkungsweise eines Transistors machen wir jetzt in Gedanken ein paar Experimente (Bild 16). Dazu legen wir an den Kollektor den Pluspol und an den Emitter den Minuspol einer Spannungsquelle. Wenn wir jetzt mit einem Meßgerät den Strom messen, dann werden wir feststellen, daß überhaupt kein Strom fließt. Errinnern wir uns an das Verhalten der Diode. Ein PN-Übergang sperrt, wenn an der P-Seite der Minuspol und an der N-Seite der Pluspol einer Spannungsquelle angeschlossen ist. Betrachten wir unseren Transistor genauer, so erkennen wir, daß er aus zwei PN-Übergängen, also im Prinzip aus zwei Dioden, aufgebaut ist. Diese beiden Dioden sind gegeneinander gepolt miteinander verbunden (Bild 17). Wie man die Spannung auch anschließt, eine der Dioden sperrt immer. In unserem Fall leitet die Basis-Emitter-Diode und die Kollektor-Basis-Diode sperrt. Die Basis des Transistors müssen wir jetzt auch noch anschließen. Zunächst verbinden wir sie mit dem Minuspol der Spannungsquelle, wir legen sie also auf das gleiche Potential wie den Emitteranschluß. Das Ergebnis ist: Der Transistor sperrt weiterhin. Wir haben lediglich die ohnehin leitende Basis-Emitter-Diode überbrückt. Legen wir dagegen die Basis auf positives Potential, dann muß durch die Basis-

Emitter-Diode Strom fließen. Ein Strommeßgerät zwischen Pluspol und Basis würde dies auch beweisen. Ein weiteres Meßgerät zwischen Pluspol und Kollektor wird jetzt aber auch einen Stromfluß anzeigen. Die Kollektor-Basis-Diode ist offenbar auch leitend geworden. Vergleicht man die Stärke der beiden Ströme, so erkennt man, daß der Kollektorstrom wesentlich stärker ist als der Basisstrom. Was ist in dem Halb-

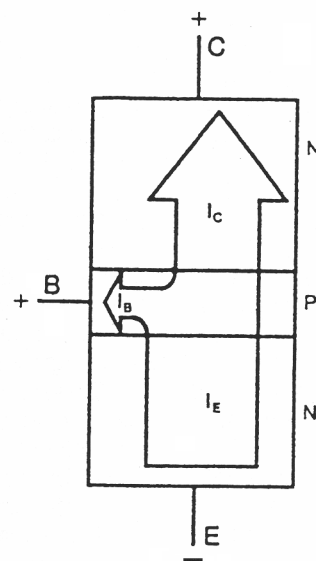
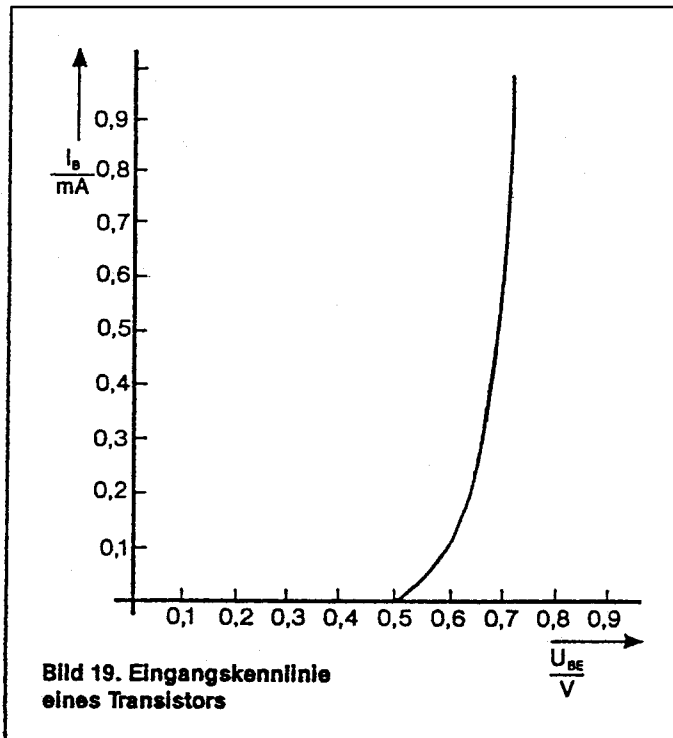
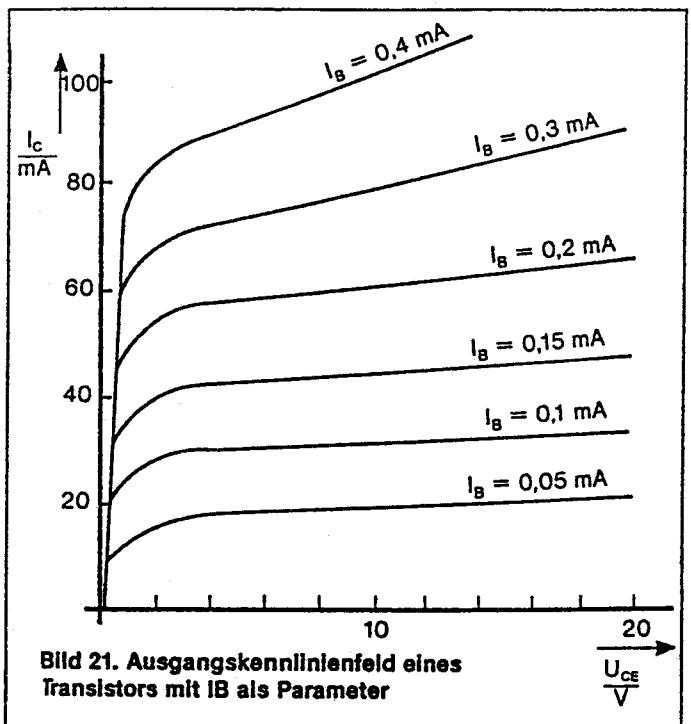
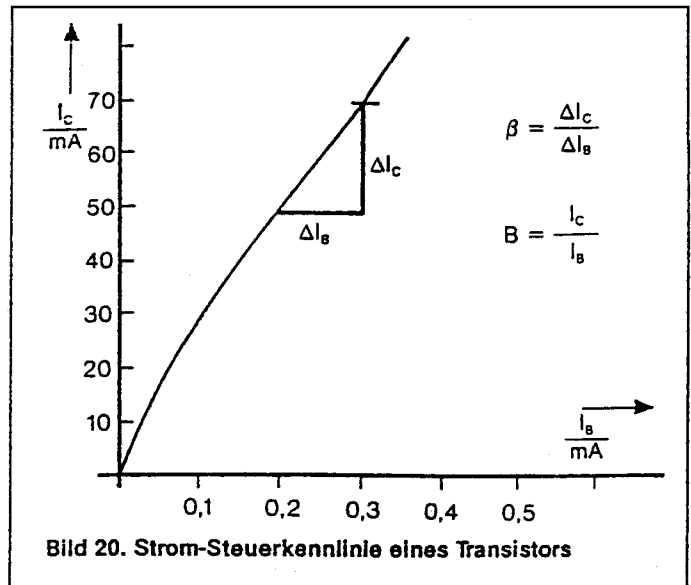


Bild 18. Stromverteilung im Transistor



leiterkristall geschehen? Um die Vorgänge im Kristall zu verstehen, müssen wir wissen, daß die Flußrichtung der Elektronen, als Träger einer negativen Ladung, vom Minuspol zum Pluspol einer Spannungsquelle ist. Durch die gleichen Vorgänge wie bei der Diode fließen die Elektronen in die Emitter-schicht hinein und von hier in die Basisschicht. Da die Basis-schicht nur sehr dünn ist und durch die niedrige Dotierung nur sehr wenige Störstellen im Kristallverbund vorhanden sind, wird die Basis von Elektronen regelrecht überflutet. Der Kollektor besitzt gegenüber der Basis ein etwas positives Potential und zieht dadurch die Elektronen sehr stark an. Durch diese Anziehungskraft stellt die Kollektor-Basis-Sperrschicht für die Elektronen kein Hindernis mehr dar. Da die Basiszone nur eine geringe Anzahl von Elektronenfehlstellen in der Kristallstruktur aufweist, werden auch nur wenige Elektronen benötigt, um diese Fehlstellen aufzufüllen. Der Basisstrom ist entsprechend gering. Die meisten Elektronen fließen durch den Kollektor zum positiven Pol der Spannungsquelle (Bild 18). Die Anzahl der Elektronen, die durch den Kollektor fließen, ist dabei proportional zu der Anzahl der Elektronen, die aus dem Basisanschluß herausfließen. Der Basisstrom steuert also den Kollektorstrom. Eine kleine Änderung des Basisstroms bewirkt eine große Änderung des Kollektorstroms. Der Transistor ist demnach ein Stromverstärker. Mit einem kleinen Strom kann ein großer Strom gesteuert werden.

So, wie in unserem Beispiel, darf die Basis nie direkt auf das Potential des Kollektors gelegt werden. Um das zu verstehen, betrachten wir die Eingangskennlinie des Transistors (Bild 19). Sie zeigt die gegenseitige Abhängigkeit von Basisstrom zur Basis-Emitter-Spannung. Die Eingangskennlinie ist die Kennlinie einer Diode und zwar der Basis-Emitter-Diode. Wie bei der Diode fließt erst ab einer bestimmten Spannung Strom. Bei weiterer Änderung der Basis-Emitter-Spannung steigt die Kennlinie jedoch sehr schnell steil an. In diesem Bereich der Kennlinie verursachen kleine Änderungen der Basis-Emitter-Spannung große Änderungen des Basisstroms. Sie können sich jetzt sicher vorstellen, was passiert, wenn die Basis-Emitter-Spannung zu groß wird. Ein sehr großer Strom durch die Basisschicht wäre die Folge. Da die Basisschicht, wie wir bereits wissen, sehr dünn ist, würde sie durch diesen Strom so stark aufgeheizt werden, daß sie zer-



stört würde. Zur Steuerung und zur Begrenzung des Basisstromes sind Vorwiderstände oder Basisspannungsteiler erforderlich.

Der Basisstrom des Transistors steuert den Kollektorstrom. Die Strom-Steuerkennlinie (Bild 20) zeigt den Zusammenhang zwischen diesen Strömen. Diese Steuerkennlinie ist fast geradlinig, da sich Kollektor- und Basisstrom etwa proportional zueinander verhalten. Das Verhältnis der beiden Ströme wird Gleichstromverhältnis  $B$  genannt. Dieses Verhältnis wird bei der Berechnung von Gleichspannungsgrößen angewendet. Bei Wechselstromgrößen nimmt man den Stromverstärkungsfaktor  $b$ . Dieser Stromverstärkungsfaktor ist gleich der Steigung der Strom-Steuerkennlinie. Da die Kennlinie fast linear verläuft, unterscheiden sich beide Größen nur unwesentlich voneinander. In Datenbüchern wird deshalb meist nur das Gleichstromverhältnis  $B$  angegeben. Dies reicht für Berechnungen in der Digitaltechnik für unsere Belange vollkommen aus.

Die gegenseitige Abhängigkeit von Kollektorstrom und Kollektor-Emitter-Spannung zeigt die Ausgangskennlinie (Bild 21). Da der Kollektorstrom vom Basisstrom abhängt,

werden mehrere Kennlinien bei unterschiedlichen Basisströmen zu einem Kennlinienfeld zusammengefaßt. Aus der Kennlinie kann man ersehen, daß ab einer bestimmten Größe der Kollektor-Emitter-Spannung, der Kollektorstrom im Vergleich zum Basisstrom nur noch sehr gering von der Kollektor-Emitter-Spannung beeinflusst wird. Das wird bei größeren Basisströmen allerdings stärker.

In den Datenbüchern (Tabelle 5) sind für Transistoren auch Grenzwerte angegeben. Diese dürfen unter keinen Umständen überschritten werden, da sonst die Kennwerte des Bauelements verändert werden, die Lebensdauer verringert oder der Transistor sogar zerstört wird. Ein wichtiger Grenzwert ist die maximale Verlustleistung von Transistors. Diese errechnet sich wie folgt:

$$P_{\text{tot}} = I_b \cdot U_{be} + I_c \cdot U_{ce}$$

Die Steuerleistung ist üblicherweise sehr klein gegenüber der Ausgangsleistung und kann bei der Berechnung der Verlustleistung in den meisten Fällen vernachlässigt werden. Eine Zusammenfassung der gängigen Transistorbauformen zeigt Tabelle 6.

| Typ     | Polung | $U_{ced_{\max}}$ | $I_{c_{\max}}$ | B         | $P_{xot}$ |
|---------|--------|------------------|----------------|-----------|-----------|
| BC 107  | NPN    | 45 V             | 200 mA         | 125...500 | 300 mW    |
| BC 108  | NPN    | 20 V             | 200 mA         | 125...900 | 300 mW    |
| BC 109B | NPN    | 20 V             | 200 mA         | 240...500 | 300 mW    |
| BC 140  | NPN    | 40 V             | 1 A            | 40...400  | 750 mW    |
| BC 160  | PNP    | 40 V             | 1 A            | 40...400  | 750 mW    |
| BC 177  | PNP    | 45 V             | 200 mA         | 75...500  | 300 mW    |
| BC 178  | PNP    | 25 V             | 200 mA         | 75...900  | 300 mW    |
| BC 179B | PNP    | 20 V             | 200 mA         | 240...500 | 300 mW    |
| BC 546  | NPN    | 65 V             | 200 mA         | 75...500  | 500 mW    |
| BC 556  | PNP    | 65 V             | 200 mA         | 75...500  | 500 mW    |
| BD 139  | NPN    | 80 V             | 1,5 A          | 40...160  | 7,5 W     |
| BD 140  | PNP    | 80 V             | 1,5 A          | 40...160  | 7,5 W     |
| 2N 3055 | NPN    | 60 V             | 15 A           | 20... 70  | 115 W     |

Tabelle 5. Daten einiger Transistoren

## Feldeffekt-Transistoren

Die soeben besprochenen Transistoren nennt man auch bipolare Transistoren, weil der Laststrom über unterschiedliche Halbleiterstrecken fließt. Bei Feldeffekt-Transistoren fließt der Laststrom nur über eine Halbleiterstrecke desselben Leitungstyps, also entweder ein P-Leiter oder ein N-Leiter. Sie werden aus diesem Grund auch als unipolare Transistoren bezeichnet.

Feldeffekt-Transistoren unterscheiden sich in ihrer Funktionsweise erheblich von bipolaren Transistoren. Bei bipolaren Transistoren wird die Leitfähigkeit einer Halbleiterstrecke durch Zufuhr von Ladungsträgern gesteuert. Dazu ist eine Steuerleistung notwendig. Diese Steuerleistung ist bei unipolaren Transistoren nicht notwendig, da hier die Leitfähigkeit der Halbleiterstrecke über ein elektrisches Feld gesteuert wird. Den prinzipiellen Aufbau eines Feldeffekt-Transistors, im folgenden kurz FET genannt, zeigt Bild 22.

Die Anschlüsse beim FET werden mit Source (Quelle), Drain (Abfluß) und Gate (Tor) bezeichnet. Der Laststrom fließt zwischen Source und Drain. Das Gate hat gegenüber der Source ein negatives Potential. Durch das dabei entstehende elektrische Feld wird der Widerstand des Kanals zwischen Source und Drain gesteuert. Da die Elektronen Ladungsträger mit negativer Ladung sind, setzt ihnen das elektrische Feld einen Widerstand entgegen. Um so negativer das Gate gegenüber Source ist, desto stärker ist das elektrische Feld und entsprechend weniger Elektronen können fließen.

Damit vom Gate kein Strom in den Kanal hineinfließt, muß es vom Kanal isoliert werden. Beim PN-FET befindet sich zwischen Gate und Kanal ein PN-Übergang (Bild 23). Dieser PN-Übergang bildet eine Sperrschicht. Wird das Gate nun so gepolt, daß diese Sperrschicht in Sperrrichtung betrieben wird, dann verbreitert sich je nach angelegter Gatespannung die Sperrschicht und reicht mehr oder weniger tief in den Kanal hinein. Der Kanal wird gewissermaßen wie bei einem Ventil zugezogen. Ab einer gewissen Spannung ist der Kanal vollständig abgeschnürt. Diese Spannung ist die Abschnürspannung. Beim PN-FET ist noch eine sehr kleine Steuerleistung notwendig, da über den PN-Übergang ein kleiner Sperrstrom fließt.

Beim Isolier-Gate-FET (IG-FET) ist zwischen Kanal und Gate eine Isolierschicht aus Siliziumdioxid angeordnet. Das Gate wird vom aufgedampften Metall gebildet. Die Steuerung

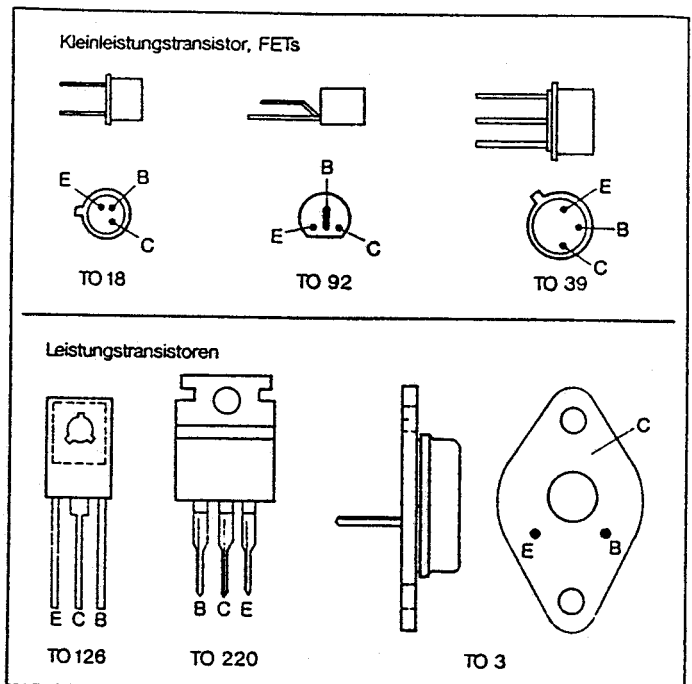


Tabelle 6. Gängige Transistorbauformen

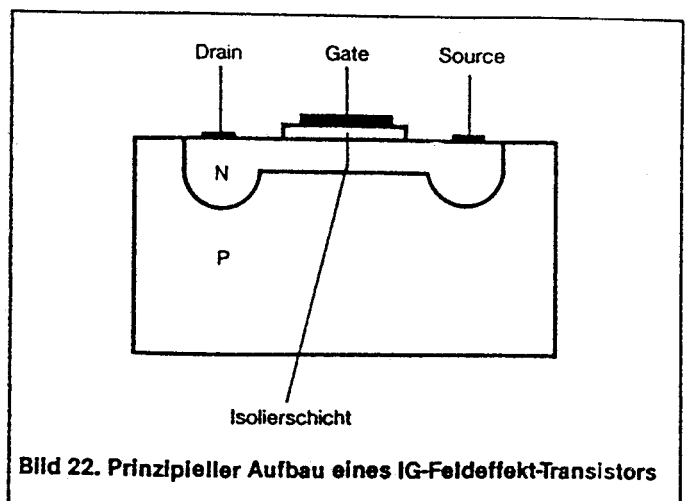


Bild 22. Prinzipieller Aufbau eines IG-Feldeffekt-Transistors

des Laststroms erfolgt beim IG-FET ausschließlich über das elektrische Feld.

Das Gate des IG-FET kann sich wegen der guten Isolierung stark elektrostatisch aufladen. Dadurch kann die Isolierschicht durchschlagen und der FET damit zerstört werden. Das ist auch der Grund, weshalb man die Beinchen von IG-FETs oder MOS-Bauelementen nicht berühren darf. Durch Reibung mit der Luft ist der menschliche Körper nämlich immer mehr oder weniger stark elektrostatisch aufgeladen. Diese Ladung verursacht eine sehr hohe Spannung, die einen IG-FET durchaus zerstören kann.

Feldeffekt-Transistoren (Bild 24) sind langsamer als bipolare Transistoren, so daß sie für schnelle Datenverarbeitungsanlagen nicht in Frage kommen.

## Fototransistoren

Beim Fototransistor gelangt über eine Linse Licht in die Kollektor-Basis-Sperrschicht. Dieses Licht löst dort einen Fotostrom aus, der mit einem Basisstrom gleichzusetzen ist. Der Fotostrom steigt linear mit der Beleuchtungsstärke. Wie beim normalen Transistor steuert der Basisstrom, in diesem Fall der Fotostrom, den Kollektorstrom. Letztendlich wird hier also über die Beleuchtungsstärke ein Strom gesteuert.

Weil Fototransistoren einen großen Stromverstärkungsfaktor besitzen, sind sie empfindlicher als Fotodioden, dafür sind sie aber etwas langsamer.

Normalerweise wird der Basisanschluß eines Fototransistors nicht benötigt, bei einigen Typen ist er aber aus dem Gehäuse herausgeführt. Man kann dann einen Arbeitspunkt für den Transistor einstellen und stabilisieren.

## Transistor als Schalter

In der Digitaltechnik wird der Transistor am häufigsten in seiner Funktion als elektronischer Schalter eingesetzt. Ich möchte Ihnen dies an einem kleinen Beispiel verdeutlichen.

Unsere Aufgabe ist es, mit dem User-Port des C64 ein Relais anzusteuern. Da der Strom und die Spannung des Relais für die User-Port-Ausgänge zu hoch ist, muß ein Transistor als Schalter dazwischengeschaltet werden. In Bild 25 sehen Sie die dazu erforderliche Schaltung.

Berechnen brauchen wir in unserem Fall nur den Basisvorwiderstand. Dazu teilen wir den Strom, der zum Einschalten des Relais erforderlich ist, durch den Stromverstärkungsfaktor  $\beta$  und erhalten den Basisstrom für unseren Transistor. Dieser Strom muß mit dem Basisvorwiderstand eingestellt werden. Zwischen Basis und Emitter des Transistors fallen etwa 0,7 Volt ab. Die Ausgangsspannung des User-Ports minus der 0,7 Volt ( $U_{be}$ ) muß demnach an unserem Widerstand abfallen. Nach dem Ohmschen Gesetz ergibt sich der Widerstandswert also zu

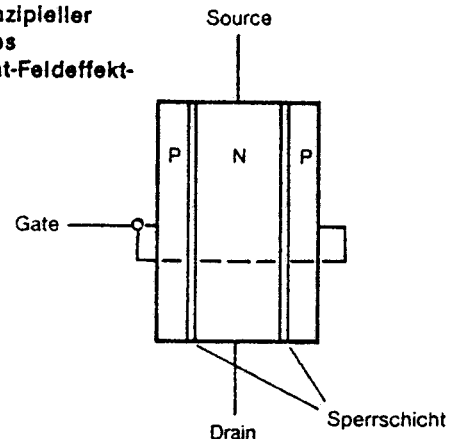
$$R = \frac{U_{\text{userport}} - 0,7 \text{ V}}{I_{\text{basis}}}$$

Sollte sich ein Widerstandswert außerhalb der Normreihe ergeben, dann muß der nächstniedrige in der Normreihe erhältliche Widerstand eingesetzt werden.

Die Funktionsweise ist ganz einfach. Liegt am User-Port eine logische 1 oder der Highpegel an, dann fließt der eingestellte Basisstrom durch den Transistor und damit auch ein genügend großer Kollektorstrom, um das Relais einzuschalten. Im anderen Fall liegt etwa 0 Volt am User-Port-Ausgang. Der Basisstrom kann nicht fließen und damit fließt auch kein Kollektorstrom. Das Relais zieht nicht an.

Eine wesentliche Verlustleistung fällt an unserem Transistor nicht ab. Wenn das Relais eingeschaltet ist, fließt zwar ein bestimmter Strom durch den Transistor, aber die Kollektor-Emitter-Spannung ist relativ klein. Im anderen Fall liegt die volle Relaisspannung zwischen Kollektor und Emit-

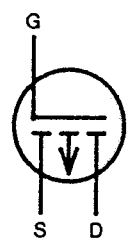
Bild 23. Prinzipieller Aufbau eines Sperrschicht-Feldeffekt-Transistors



Selbstsperrender Anreicherungs-Isolierschicht-FET P-Kanal



Sperrschicht-FET P-Kanal



Selbstleitender Verarmungs-Isolierschicht-FET N-Kanal



Sperrschicht-FET N-Kanal

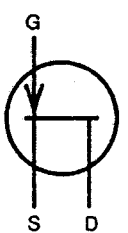


Bild 24. Schaltzeichen von Feldeffekt-Transistoren

Bild 25. Transistor als Schalter

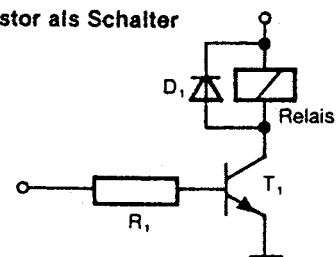
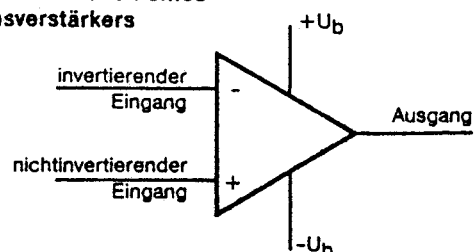


Bild 26. Schaltzeichen eines Operationsverstärkers



ter, aber der Strom ist fast null. In beiden Fällen ergibt das eine kleine Verlustleistung. Die größte Verlustleistung entsteht nur beim Wechsel des Transistors von einem Zustand in den anderen. Es ist also nur die Häufigkeit der Schaltvorgänge für die maximale Verlustleistung maßgeblich.

## Operationsverstärker

Ein universell einzusetzendes Bauelement ist der Operationsverstärker. Es können Gleichspannungen und Wechselspannungen verstärkt werden. Seine besonderen Eigenschaften sind die hohe Spannungsverstärkung, der große Eingangswiderstand und der kleine Ausgangswiderstand.

Das Schaltzeichen für den Operationsverstärker sehen Sie in Bild 26. Der Eingang mit dem Minuszeichen ist der invertierende Eingang, der mit dem Pluszeichen heißt nichtinvertierender Eingang. Der Operationsverstärker benötigt eine positive und eine negative Betriebsspannung in Bezug auf das Potential des Ausgangs. Diese Betriebsspannung liegt üblicherweise zwischen  $\pm 5$  Volt und  $\pm 15$  Volt.

Die Eingangsstufe des Operationsverstärkers ist eine Differenzverstärkerstufe (Bild 27). Die Emittoren der Transistoren T1 und T2 in dieser Eingangsstufe liegen an einem gemeinsamen Emittorwiderstand. Solange die Differenzeingangsspannung  $U_1$  0 Volt beträgt, fließen in beiden Transistoren gleichgroße Basisströme und bei gleichem Verstärkungsfaktor der Transistoren auch gleichgroße Kollektorströme. Die Spannungsabfälle an den gleichgroßen Widerständen R3 und R4 sind damit gleich und die Ausgangsspannung beträgt 0 Volt. Erhöht man den Basisstrom von T1, dann erhöht sich auch der Kollektorstrom von T1. Die Folge ist ein höherer Spannungsabfall an R3. Durch den erhöhten Kollektorstrom  $I_{c1}$  erhöht sich auch der Spannungsabfall am Widerstand R5. Dies bewirkt eine Abnahme des Kollektorstroms von T2 und somit auch einen geringeren Spannungsabfall an R4. Die beiden Spannungen, die über R3 und R4

abfallen, werden somit gegensinnig geändert und es entsteht eine Differenz Ausgangsspannung  $U_a$ . Solange  $U_{e1}$  und  $U_{e2}$  gegensinnig verändert werden, entsteht eine Differenz Ausgangsspannung. Bei gleichsinniger Änderung der beiden Eingangsspannungen entsteht keine Ausgangsspannungsänderung. Durch dieses Verhalten des Differenzverstärkers werden Störspannungen, die an beiden Eingängen in gleicher Höhe anliegen, nicht verstärkt. Dies wird allerdings nur erreicht, wenn die Widerstände R3 und R4 und die Transistoren T1 und T2 möglichst genau übereinstimmen.

Im Operationsverstärker folgt auf die Eingangsstufendifferenzstufe eine zweite Differenzverstärkerstufe und eine Endstufe.

### Invertierender Verstärker

Mit einem invertierenden Verstärker wird eine Eingangsspannung  $U_e$  verstärkt oder abgeschwächt und in ihrem Vorzeichen umgekehrt. Der Operationsverstärker braucht hierzu nur mit den Widerständen R1 und R2 beschaltet werden (Bild 28).

## Grundschaltungen des Operationsverstärkers

Zwischen invertierendem und nichtinvertierendem Eingang liegt eine Spannung  $U_d$ . Diese Spannung ist aufgrund der sehr hohen Leerlaufverstärkung (etwa  $10^5$ ) sehr klein. Weil der Operationsverstärker einen sehr hohen Eingangswiderstand hat, ist der Eingangsstrom  $I_d$  ebenfalls sehr klein. Dadurch liegt der Punkt S praktisch auf Masse. Aus diesem Grund wird der Punkt S auch als virtueller Massepunkt bezeichnet. Die Summe der beiden Ströme  $I_1$  und  $I_2$  ist wegen  $I_d=0$  ebenfalls 0. Damit wird

$$I_1 + I_2 = 0 ; I_1 = -I_2$$

Da die Ausgangsspannung wegen der virtuellen Masse gleich dem Spannungsabfall am Widerstand R2 ist, kann man

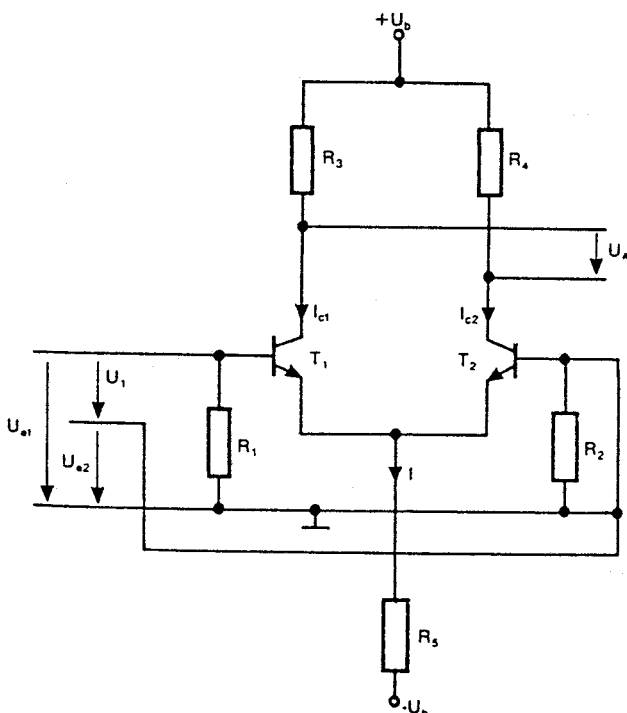


Bild 27. Differenzverstärker

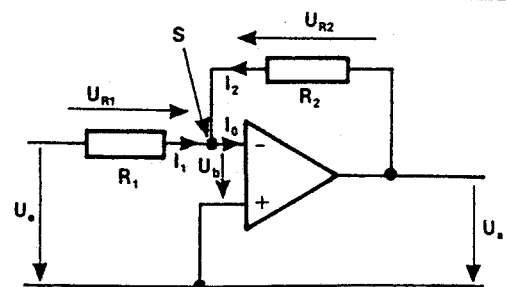


Bild 28. Invertierender Operationsverstärker

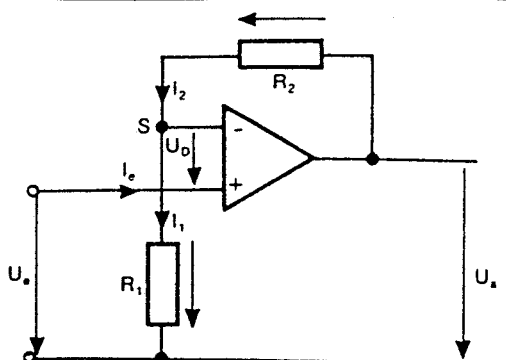


Bild 29. Nichtinvertierender Operationsverstärker



sie wie folgt errechnen:

$$U_a = R_2 \cdot I_2$$

Die Eingangsspannung ist aus demselben Grund gleich dem Spannungsabfall über  $R_1$ . Sie errechnet sich somit zu

$$U_e = R_1 \cdot I_1 = R_1 \cdot -I_2$$

Der Verstärkungsfaktor kann jetzt leicht errechnet werden, indem man die Eingangs- und Ausgangsspannung ins Verhältnis setzt:

$$v = U_a / U_e = R_2 \cdot I_2 / R_1 \cdot -I_2 = -R_2 / R_1$$

Der Verstärkungsfaktor ist damit gleich dem Widerstandsverhältnis  $-R_2 / R_1$

Das Minuszeichen in der Formel deutet dabei auf die Vorzeichenumkehr zwischen Ein- und Ausgangsspannung hin.

## Nichtinvertierender Verstärker

Beim nichtinvertierenden Verstärker haben Ein- und Ausgangsspannung das gleiche Vorzeichen. Die Beschaltung als nichtinvertierenden Verstärker zeigt Bild 29. Die Eingangsspannung wird hier direkt an den nichtinvertierenden Eingang angeschlossen. Wegen  $I_e = 0$  und  $U_d = 0$  gilt auch hier

$$U_e = R_1 \cdot I_1$$

$I_1$  ist aber auch gleich  $I_2$ . Für die Ausgangsspannung gilt  $U_a = I_2 \cdot (R_2 + R_1) = I_1 \cdot (R_2 + R_1)$

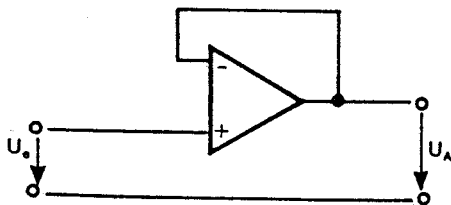
Um den Verstärkungsfaktor zu erhalten, muß  $U_a$  wieder ins Verhältnis mit  $U_e$  gesetzt werden

$$v = U_a / U_e = I_1 \cdot (R_1 + R_2) / R_1 \cdot I_1 = (R_1 + R_2) / R_1$$

$$v = 1 + (R_2 / R_1)$$

Die beiden Widerstände bestimmen auch hier wieder den Verstärkungsfaktor. Anders als beim invertierenden Verstärker kann die Verstärkung aber nicht kleiner als 1 werden. Ersetzt man  $R_2$  durch eine Drahtbrücke und läßt  $R_1$  ganz weg, dann erhält man die Verstärkung 1 (Bild 30). Diesen Sonderfall des nichtinvertierenden Verstärkers bezeichnet man als Spannungsfolger, weil seine Ausgangsspannung der Eingangsspannung folgt. Benötigt wird ein Spannungsfolger dort, wo eine Eingangsspannung nicht belastet werden darf und die Ausgangsspannung ohne Spannungseinbruch belastbar sein muß.

Bild 30. Spannungsfolger



## Summierverstärker

Bild 31 zeigt die Beschaltung eines Operationsverstärkers als Summier- oder Addierverstärker. Diese Schaltung dient zur Addition von Spannungen. Weil auch hier  $I_d$  und  $U_d$  annähernd 0 sind, gelten folgende Beziehungen

$$U_{e1} = I_{e1} \cdot R_1$$

$$U_{e2} = I_{e2} \cdot R_2$$

$$U_{e3} = I_{e3} \cdot R_3 \dots \text{etc.}$$

$$U_a = R_4 \cdot I_2$$

$$-I_2 = I_{e1} + I_{e2} + I_{e3} \dots$$

Aus diesen Beziehungen folgt

$$-U_a = R_4 / R_1 \cdot U_{e1} + R_4 / R_2 \cdot U_{e2} + R_4 / R_3 \cdot U_{e3}$$

Die einzelnen Eingangsspannungen werden also je nach Wahl der Widerstände verschieden verstärkt und summiert.

## Differenzverstärker

Der Differenzverstärker bildet die Differenz zwischen zwei Eingangsspannungen (Bild 32). Er dient außerdem zur Verstärkung einer Differenzspannung, die potentialfrei bleiben muß, zum Beispiel eine Meßsignalspannung.

Auch hier gilt mit  $U_d = 0$  und  $I_d = 0$

$$I_{e1} = (U_{e1} - U_{22}) / R_{e1} = -I_2$$

$$I_{e2} = (U_{e2} - U_{22}) / R_{e1}$$

$$I_2 = (U_a - U_{22}) / R_2$$

$$U_{22} = I_{e2} \cdot R_2$$

Eingesetzt ergibt sich daraus

$$U_a = I_2 \cdot R_2 + U_{22}$$

$$U_a = -(U_{e1} - U_{22}) \cdot R_2 / R_{e1} + U_{22}$$

$$U_a = -(U_{e1} - U_{22}) R_2 / R_{e1} + I_{e2} \cdot R_2$$

$$U_a = (-U_{e1} + U_{22} + U_{e2} - U_{22}) \cdot R_2 / R_{e1}$$

$$U_a = (U_{e2} - U_{e1}) \cdot R_2 / R_{e1}$$

Der Differenzverstärker wird normalerweise nicht zur Subtraktion von Spannungen eingesetzt. Hierzu nimmt man den Addierverstärker und vertauscht die Eingangsspannungen in der Polarität.

## Bauelemente der Digitaltechnik

Die drei digitalen Grundschaltschaltungen, aus denen ein Computer aufgebaut ist, sind UND-Gatter, ODER-Gatter und NICHT-Gatter oder Inverter.

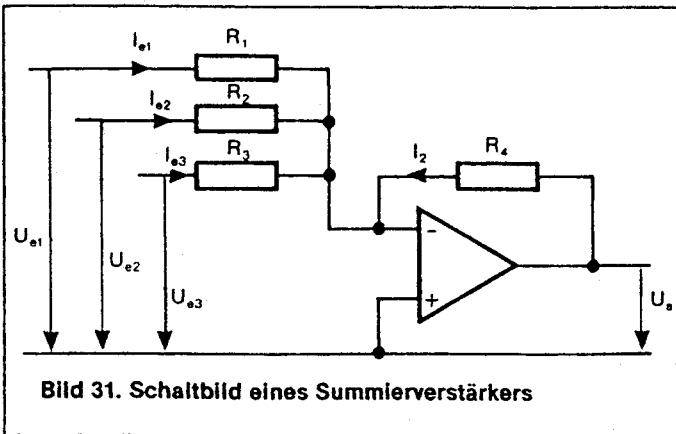
In der ersten Computergeneration wurden diese Gatter noch diskret aus Widerständen und Transistoren aufgebaut. Dies war die RTL-Technik. In der nächsten Computergeneration folgte die Realisation der Gatter mit der Dioden-Transistor-Logik (DTL). Danach wurde die integrierte Schaltungstechnik und damit die TTL oder Transistor-Transistor-Logik benutzt.

Diese TTL-Schaltschaltungen gibt es in bipolarer und in MOS-Technik. Bei der MOS-Technik werden dabei anstelle von bipolaren Transistoren FETs eingesetzt. Bipolare Gatter sind in der Schaltgeschwindigkeit schneller als MOS-Gatter, benötigen aber erheblich mehr Energie.

Für alle Gatterschaltungen, sei es nun ein UND, ein ODER oder ein Inverter, gelten technisch die gleichen Grundvoraussetzungen. Den logischen Größen 1 und 0 sind je nach Schaltungsart bestimmte Spannungspegel zugeordnet. So entspricht die logische 1 bei der bipolaren TTL-Technik einem Spannungswert von maximal 5 Volt. Der Bereich, in dem von den Gatterbausteinen noch eine 1 erkannt wird, liegt zwischen 2 und 5 Volt. Eine logische 0 wird im Bereich 0 bis 0,8 Volt erkannt. Alle Spannungen, die zwischen 0,8 und 2 Volt liegen, können nicht eindeutig einem logischen Pegel zugeordnet werden, das heißt, daß zum Beispiel infolge unterschiedlicher Toleranzen ein Spannungspegel in diesem Bereich von einem Baustein als 1, aber von einem anderen Bauteil dagegen als 0 erkannt wird.

Bei MOS-Bausteinen liegt der Betriebsspannungsbereich zwischen 3 und 15 Volt. Die logischen Pegel schwanken hier je nach angelegter Betriebsspannung.

Zum weiteren Verständnis der Wirkungsweise von Logik-Gattern ist es sinnvoll, zunächst einmal den inneren Aufbau eines Gatters zu betrachten (Bild 33). Wir wollen diese Betrachtungen an einem NAND-Gatter, zu Deutsch einem



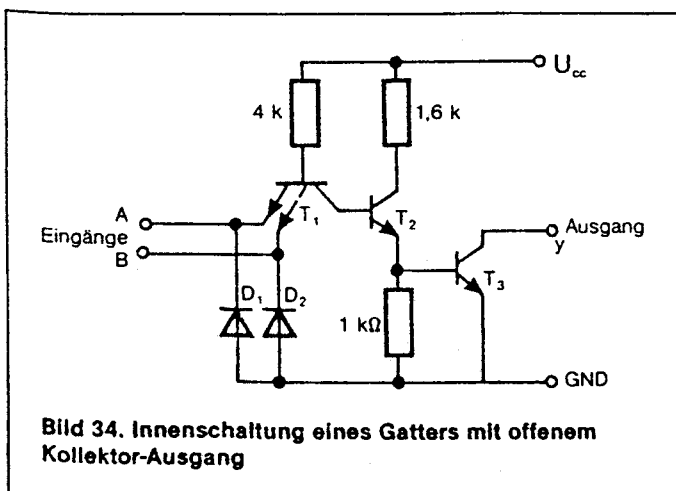
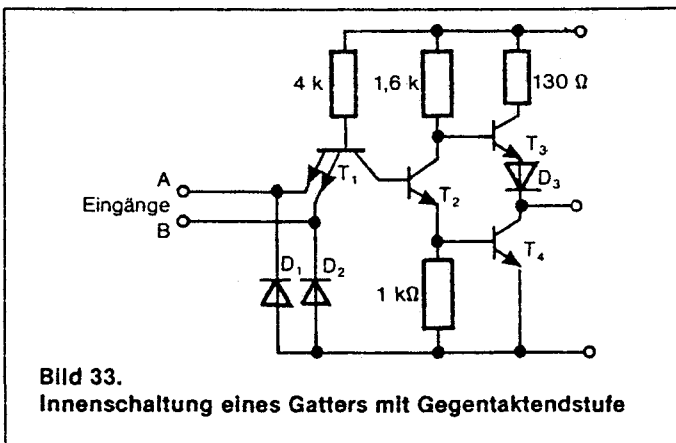
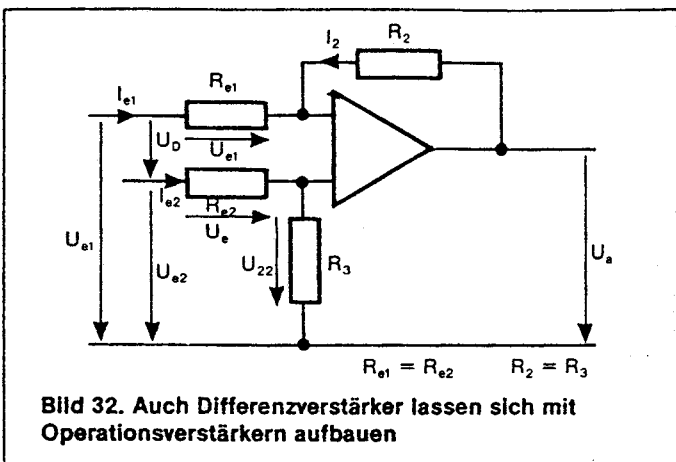
NICHT-UND-Gatter, vornehmen, da dieses Gatter der Grundaufbau für alle anderen Gatterarten ist.

Der Transistor mit den zwei Emittern wird dabei sicher jedem zuerst ins Auge fallen. Dies ist ein sogenannter Multi-Emitter-Transistor. Die beiden Emitter stellen die Eingänge des NAND dar. Ein NAND-Baustein hat nur dann an seinem Ausgang eine logische 0 anliegen, wenn beide Eingänge auf logisch 1 liegen. Liegt in dem Gatter einer der Emitter auf Masse oder logisch 0, dann liegt auch die Basis des Transistors T2 auf Masse. Dieser Transistor sperrt deshalb und legt dadurch die Basis von T3 auf positives und die Basis von T4 auf Massepotential. T3 leitet, T4 sperrt und der Ausgang liegt auf hohem Potential oder logisch 1. Dieser Zustand wird nur dann umgekehrt, wenn der Transistor T2 leitet. Dies geschieht nur dann, wenn beide Emitter auf logisch 1 liegen. Das besprochene Gatter hat einen Gegentakts- oder Totem-Pol-Ausgang. Totem-Pol deshalb, weil die Transistoren T3 und T4 wie die Gesichter eines Totempfhales übereinanderliegen. Des weiteren gibt es noch Gatter mit einem offenen Kollektorausgang (Bild 34). Um bei diesem Gatter eine Spannungsänderung am Ausgang zu erhalten, muß ein externer Widerstand von der Betriebsspannung zum Ausgang geschaltet werden. Dieses Gatter wird zum Beispiel verwendet, wenn eine nachfolgende Schaltung mit einem unterschiedlichen Spannungspegel angesteuert werden muß. Bei Gattern mit offenem Kollektorausgang dürfen außerdem mehrere Ausgänge zusammengeschaltet werden, was bei Gattern mit Gegentaktsausgang nicht erlaubt ist. Es gibt als dritte Gatterart noch die mit Tri-State-Ausgängen. Diese Ausgänge haben außer logisch 0 und 1 noch einen dritten Ausgangszustand. Dies ist der hochohmige Zustand. Das ist bei Computerbausteinen, die auf einen gemeinsamen Bus zugreifen, erforderlich. Das jeweilige Gatter wird dabei durch Umschalten in den Tri-State-Zustand praktisch vom Bus getrennt und stört andere Bauteile somit nicht bei der Arbeit.

Aus dem NAND-Grundgatter lassen sich durch Vor- oder Nachschalten von Invertern alle anderen Gatterarten aufbauen. Ein Inverter ist dabei nichts anderes als ein NAND mit nur einem Eingang.

Wichtige Daten bei den Gattern sind der Eingangslastfaktor (Fan-In) und der Ausgangslastfaktor (Fan-Out) (Tabelle 7). Das Fan-In gibt dabei an, wie stark ein Eingang eine vorhergehende Schaltung belastet, das Fan-Out gibt an, wie stark dieser Ausgang belastet werden darf. Die Lastfaktoren sind Rechnungseinheiten, bezogen auf die jeweilige Logikfamilie. So bedeutet ein Fan-In von 1 bei Standard-TTL, daß bei 0-Pegel 1,6 mA Strom fließen und bei 1-Pegel 40 µA. Bei L-Pegel fließt dieser Strom aus dem Eingang heraus. Dies ist besonders zu beachten, wenn das Gatter von diskreten Schaltungsaufbauten angesteuert wird. In Tabelle 7 sind die Absolutwerte für die Lastfaktoren bei verschiedenen Logikfamilien angegeben.

Ein Fan-Out 10 bedeutet, daß ein Gatter an seinem Ausgang 10 Gattereingänge mit einem Fan-In von 1 oder 5 Ein-



| Familie                | Beispiel  | Fan-Out | Ausgangsstrom<br>$I_{w}$ | $I_L$  | Eingangsstrom<br>$I_{w}$ | $I_L$   | Schaltzeit in ns |
|------------------------|-----------|---------|--------------------------|--------|--------------------------|---------|------------------|
| TTL-Standard           | SN 7400   | 10      | 400 µA                   | 16 mA  | 40 µA                    | 1,6 mA  | 10               |
| TTL-Low Power          | SN 74L00  | 20      | 200 µA                   | 3,6 mA | 10 µA                    | 0,18 mA | 33               |
| TTL-Schottky           | SN 74500  | 10      | 1 mA                     | 20 mA  | 50 µA                    | 2 mA    | 3                |
| TTL-Low Power Schottky | SN 74LS00 | 20      | 400 µA                   | 8 mA   | 20 µA                    | 0,36 mA | 9                |
| TTL-High-Speed         | SN 74H00  | 10      | 500 µA                   | 20 mA  | 50 µA                    | 2 mA    | 6                |
| C MOS                  | CD 4011   | 50      | 200 µA                   | 0,2 mA | <10 pA                   | <10 pA  | 40               |

**Tabelle 7. Technische Daten der verschiedenen Schaltkreisfamilien**

gänge mit einem Fan-In von 2 treiben kann.

Wenn man von einem Gatter einer Logikfamilie auf ein Gatter einer anderen Logikfamilie übergeht, darf man nicht mehr über die Lastfaktoren rechnen, sondern muß in diesem Fall zu den Absolutwerten übergehen. Ein Fan-Out von 20 bei einem LS-TTL-Gatter ist zum Beispiel bezogen auf ein Standard-TTL-Gatter nur noch ein Fan-Out 3.

Bei allen Logikfamilien ist ein offener Eingang mit einer logischen 1 gleichzusetzen. Damit Störungen vermieden werden, müssen offene Eingänge auf ein Potential gelegt werden, das die logische Funktion des Gatters sicherstellt. Bei AND-Funktionen ist das ein hohes und bei ODER-Funktionen ein niedriges Potential. An Masse oder logisch 0 können die Eingänge dabei ohne weiteres gelegt werden. Beim Anschließen an die Betriebsspannung empfiehlt sich jedoch, die unbenutzten Eingänge über einen Widerstand auf dieses Potential zu legen. Dadurch werden Störungen durch kurzzeitige Impulse vermieden. Der Widerstand sollte dabei 1 Kiloohm ( $k\Omega$ ) oder größer sein. Etwa 25 Eingänge können dabei über einen einzigen Widerstand angeschlossen werden.

Sind in einem Baustein einzelne Gatter unbenutzt, dann sollte man deren Eingänge auf Masse legen, um eine geringere Leistungsaufnahme des Bausteins zu erzielen.

## UND-Gatter

Für UND-Gatter wird vielfach auch die Bezeichnung AND-Gatter verwendet. Am Ausgang eines UND-Gatters liegt nur dann eine 1, wenn beide Eingänge auf dem logischen Pegel 1 liegen. Es gibt UND-Gatter nicht nur mit zwei Eingängen, sondern es sind auch solche mit bis zu acht Eingängen erhältlich. Ein Baustein mit vier UND-Gattern mit je zwei Eingängen ist der Baustein 7408.

## NAND-Gatter

UND-NICHT oder NAND-Gatter erhält man, wenn man an den Ausgang eines UND-Gatters einen Inverter schaltet. Es liegt nur dann eine 0 am Ausgang, wenn beide Eingänge auf

1 liegen. Der Baustein 7420 enthält zwei NAND-Gatter mit je vier Eingängen.

## ODER-Gatter

Am Ausgang eines ODER-Gatters liegt immer dann eine 1, wenn mindestens einer der Eingänge auf 1 liegt. Das ODER-Gatter trägt auch die englische Bezeichnung OR-Gatter. Vier von diesen Gattern mit je zwei Eingängen bekommen Sie im Baustein 7432.

## NOR-Gatter

Drei NOR-Gatter oder zu deutsch ODER-NICHT-Gatter sind im Baustein 7427 enthalten. Das NOR-Gatter hat immer dann eine 0 am Ausgang, wenn mindestens ein Eingang auf 1 liegt.

## Exklusiv-ODER-Gatter

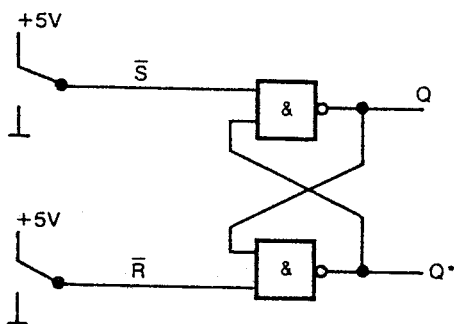
Das Exklusiv-ODER ist ein Sonderfall des ODER-Gatters. Bei ihm liegt nur dann eine 1 am Ausgang, wenn beide Eingänge unterschiedliche Pegel aufweisen. Bei gleichen Pegeln an den Eingängen hat der Ausgang einen logischen 0-Pegel.

## Inverter

Inverter kehren einen logischen Pegel um. Aus einer 1 wird 0 und aus einer 0 wird 1. Sechs dieser Gatter sind in der Regel in einem IC untergebracht. Die Bausteine 7404, 7405, 7406 enthalten diese Inverter. In Tabelle 8 finden Sie eine Zusammenfassung der verschiedenen Gatter-Typen.

In der Digitaltechnik ist es häufiger erforderlich, bestimmte logische Pegel für einige Zeit festzuhalten. Die dafür geeigneten Speicher sind Flip-Flops. Bild 35 zeigt ein solches Flip-Flop, aufgebaut aus zwei NAND-Gattern.

Wir gehen davon aus, daß beide Eingänge beim Einschalten auf 1 liegen. Als Folge davon muß einer der Ausgänge auf 0 und der andere auf 1 liegen. Welches Gatter nach dem Einschalten auf 0 und welches auf 1 liegt, ist rein zufällig. Daß aber beide Ausgänge einen zueinander invertierten Zustand haben müssen, können wir leicht nachprüfen. Nehmen wir



| $\bar{S}$ | $\bar{R}$ | Q  | Q*         |
|-----------|-----------|----|------------|
| 0         | 0         | 1  | 1          |
| 0         | 1         | 1  | 0          |
| 1         | 0         | 0  | 1          |
| 1         | 1         | Qn | $\bar{Q}n$ |

irregulärer Zustand

Speicherzustand

verbotener Übergang

Wertetabelle

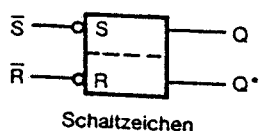
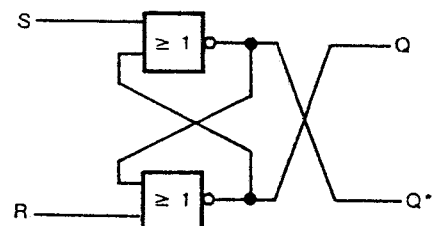


Bild 35. RS-Flip-Flop mit NAND-Gattern



| S | R | Q  | Q*         |
|---|---|----|------------|
| 0 | 0 | Qn | $\bar{Q}n$ |
| 0 | 1 | 0  | 1          |
| 1 | 0 | 1  | 0          |
| 1 | 1 | 0  | 0          |

Wertetabelle

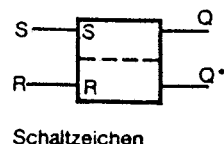
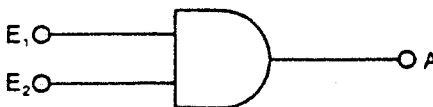


Bild 36. RS-Flip-Flop mit NOR-Gattern

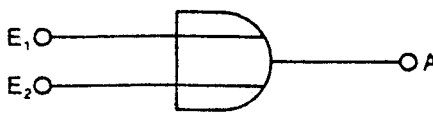


Schaltbild

| E <sub>1</sub> | E <sub>2</sub> | A |
|----------------|----------------|---|
| 0              | 0              | 0 |
| 0              | 1              | 0 |
| 1              | 0              | 0 |
| 1              | 1              | 1 |

Wahrheitstabelle

UND-Gatter

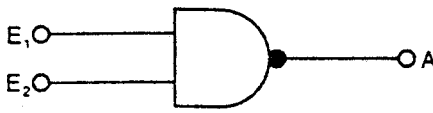


Schaltbild

| E <sub>1</sub> | E <sub>2</sub> | A |
|----------------|----------------|---|
| 0              | 0              | 0 |
| 0              | 1              | 1 |
| 1              | 0              | 1 |
| 1              | 1              | 1 |

Wahrheitstabelle

ODER-Gatter




Schaltbild

| E <sub>1</sub> | E <sub>2</sub> | A |
|----------------|----------------|---|
| 0              | 0              | 1 |
| 0              | 1              | 1 |
| 1              | 0              | 1 |
| 1              | 1              | 0 |

Wahrheitstabelle

NAND-Gatter

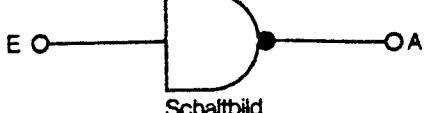


Schaltbild

| E <sub>1</sub> | E <sub>2</sub> | A |
|----------------|----------------|---|
| 0              | 0              | 1 |
| 0              | 1              | 0 |
| 1              | 0              | 0 |
| 1              | 1              | 0 |

Wahrheitstabelle

NOR-Gatter

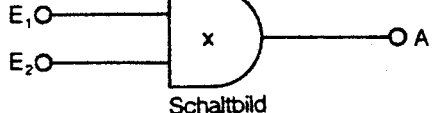


Schaltbild

| E | A |
|---|---|
| 0 | 1 |
| 1 | 0 |

Wahrheitstabelle

NOT-Gatter (Inverter)

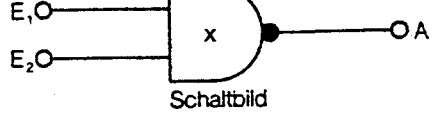


Schaltbild

| E <sub>1</sub> | E <sub>2</sub> | A |
|----------------|----------------|---|
| 0              | 0              | 0 |
| 0              | 1              | 1 |
| 1              | 0              | 1 |
| 1              | 1              | 0 |

Wahrheitstabelle

EXOR-Gatter (Exclusive-ODER)



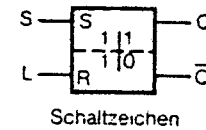
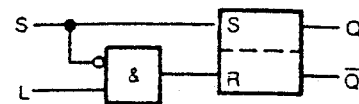
Schaltbild

| E <sub>1</sub> | E <sub>2</sub> | A |
|----------------|----------------|---|
| 0              | 0              | 1 |
| 0              | 1              | 0 |
| 1              | 0              | 0 |
| 1              | 1              | 1 |

Wahrheitstabelle

EXNOR-Gatter

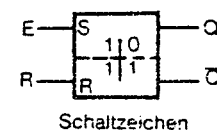
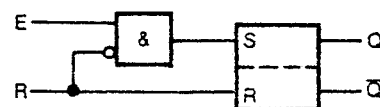
an, daß beide Ausgänge nach dem Einschalten den Zustand 0 aufweisen. Da die Ausgänge mit jeweils einem Eingang des anderen Gatters verbunden sind, müßten beide Gatter jetzt ihren Ausgangszustand auf 1 ändern. Wie wir bereits wissen, hat ein NAND-Gatter immer dann eine 1 am Ausgang, wenn ein Eingang auf 0 liegt. Die Schaltzeiten der Gatter unterscheiden sich durch Fertigungstoleranzen voneinander. Das schnellere Gatter hat als erstes eine 1 am Ausgang. Damit liegt aber an beiden Eingängen des anderen Gatters eine 1 an, und es beläßt seinen Ausgangszustand auf 0. Das Flip-Flop ist nun in einem stabilen Zustand. Betätigt man jetzt den Taster, der für das Gatter mit einer 0 am Ausgang zuständig ist, dann wechselt der Ausgangszustand an diesem Gatter von 0 auf 1. Das andere Gatter wechselt dadurch auch seinen Zustand und zwar von 1 auf 0. Jede weitere Betätigung des Tasters hat keine weitere Reaktion zur Folge. Erst eine Betätigung des anderen Tasters läßt das Flip-Flop wieder kippen.



| S | L | Q              | Q*             |
|---|---|----------------|----------------|
| 0 | 0 | Q <sub>n</sub> | Q <sub>n</sub> |
| 0 | 1 | 0              | 1              |
| 1 | 0 | 1              | 0              |
| 1 | 1 | 1              | 0              |

Wertetabelle

Bild 37. RS-Flip-Flop mit dominierendem S-Eingang



| E | R | Q              | Q*             |
|---|---|----------------|----------------|
| 0 | 0 | Q <sub>n</sub> | Q <sub>n</sub> |
| 0 | 1 | 0              | 1              |
| 1 | 0 | 1              | 0              |
| 1 | 1 | 0              | 1              |

Wertetabelle

Bild 38. RS-Flip-Flop mit dominierendem R-Eingang

Bezogen auf den Ausgang mit der Bezeichnung Q, werden die beiden Eingänge des Flip-Flops als S-(Set) und R-(Reset) Eingang bezeichnet. Der zweite Ausgang wird mit Q\* bezeichnet. Normalerweise liegt am Q\*-Ausgang immer der invertierte Logikpegel von Ausgang Q an. Wenn aber beide Eingänge des Flip-Flops 0-Pegel führen, dann liegen beide Ausgänge auf 1. Dieser Zustand wird als irregulärer Zustand bezeichnet. Werden jetzt nämlich beide Eingänge gleichzeitig wieder auf 1 gelegt, so kann am Q\*-Ausgang entweder eine 1 oder eine 0 erscheinen. Dies ist wie beim Einschalten nur abhängig von den Gatterschaltzeiten. Der Ausgangszustand ist nach dem soeben beschriebenen Übergang also nicht definiert.

Das beschriebene Flip-Flop aus zwei NAND-Gattern ist ein RS-Flip-Flop mit invertierten Eingängen. Das heißt, es wird mit einer logischen 0 am Eingang gesetzt oder zurückgesetzt. Es gibt natürlich auch ein RS-Flip-Flop, das durch eine logische 1 gesetzt oder zurückgesetzt wird. Dieses Flip-Flop

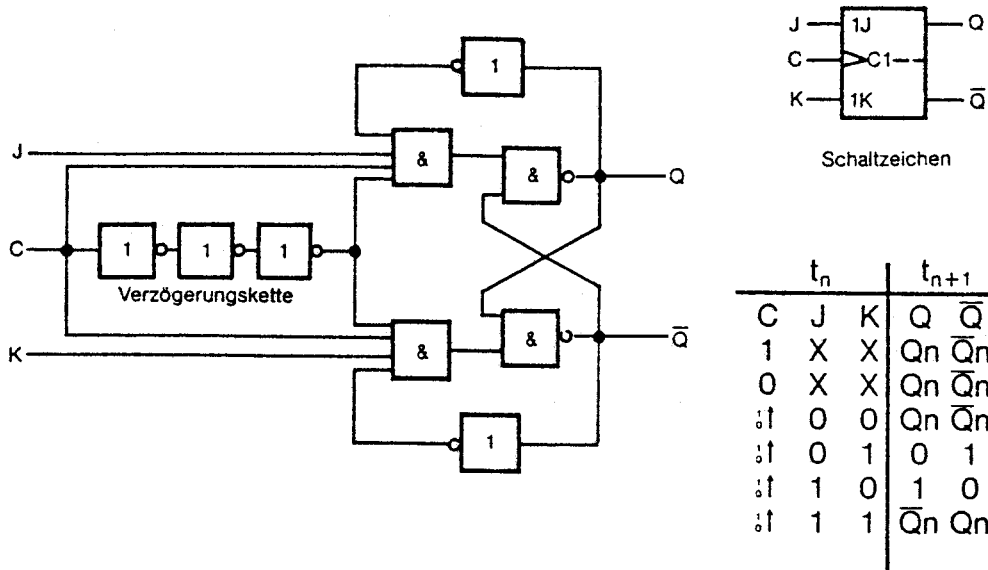


Bild 39. Taktflankengesteuertes JK-Flip-Flop

Wertetabelle (x = beliebig)

wird mit NOR-Gattern aufgebaut (Bild 36). Um den nichtdefinierten Zustand zu vermeiden, werden RS-Flip-Flops mit weiteren Gattern beschaltet. Je nachdem, an welchem Eingang dieses Gatter geschaltet wird, gibt es Flip-Flops mit dominierendem R- oder S-Eingang (Bild 37 und 38).

Die soeben besprochenen RS-Flip-Flops zählen zu den asynchronen Flip-Flops, da sie zu jeder Zeit gesetzt und zurückgesetzt werden können. Synchrone Flip-Flops können nur in Verbindung mit einem Taktsignal gesteuert werden. Taktgesteuerte Flip-Flops besitzen außer den Setz- und Rücksetzeingängen noch einen separaten Takteingang C, auch Clock-Eingang genannt. In Bild 39 wird die Realisierung des Takteinganges an einem JK-Flip-Flop gezeigt. Je zwei Eingänge der beiden Eingangsgatter liegen dabei am Eingang und am Ausgang einer Inverterkette. Infolge der Gatterdurchlaufzeiten liegen Eingang und Ausgang dieser Kette nur für eine kurze Zeit auf dem gleichen Pegel. Nur in diesem Fall kann die jeweilige Eingangsinformation durch das Eingangsgatter des Flip-Flops durchgeschaltet werden.

Das JK-Flip-Flop enthält außerdem noch eine Rückkopplung der Ausgänge auf die Eingänge. Dadurch wird der irreguläre Zustand vermieden. Liegen am J- und K-Eingang 1-Pegel an, dann kippen die Ausgänge bei jedem Taktimpuls.

Die Taktsteuerung kann so ausgelegt werden, daß ein Eingangssignal mit der positiven oder mit der negativen Flanke des Taktsignals übernommen wird. Ein Flip-Flop, das mit der positiven Flanke das Eingangssignal einliest und mit der negativen Flanke an den Ausgang durchschaltet, ist das Master-Slave-Flip-Flop (Bild 40). Es besteht aus zwei hintereinandergeschalteten Flip-Flops. Die Takteingänge sind dabei über einen Inverter miteinander verbunden.

Als letztes Flip-Flop möchte ich noch das D-Flip-Flop besprechen (Bild 41). Dieses Flip-Flop besitzt nur einen Stelleneingang D. Der Zustand des D-Eingangs wird bei jedem Taktimpuls an den Ausgang durchgeschaltet. Realisiert wird dieser Flip-Flop-Typ mit einem JK-Flip-Flop, bei dem der K-Eingang über einen Inverter mit dem J-Eingang verbunden wird. Der J-Eingang stellt dann den D-Eingang dar.

Damit wären wir am Ende unseres kleinen Kurses angelangt. Mehr als einen groben Überblick über einige Bauteile konnte ich Ihnen leider nicht geben. Über jedes der besprochenen Bauteile sind schon Bücher gefüllt worden. Eine tiefergehende Betrachtung der Bauelemente würde den Rahmen dieses Heftes sprengen. Sollten Sie allerdings Interesse an der Elektronik und damit der Hardware bekommen haben, dann empfiehlt es sich, durch viel Basterei und viel Lesen von Büchern und Fachzeitschriften tiefer in die Materie einzusteigen.

(H. Zwartschoten/ah)

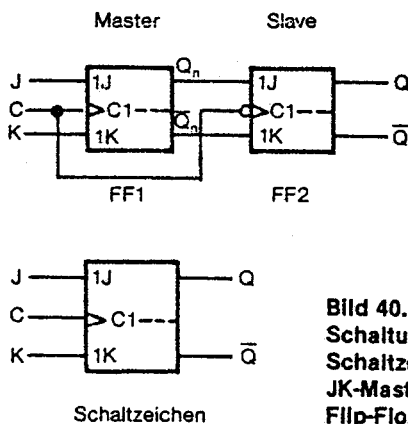
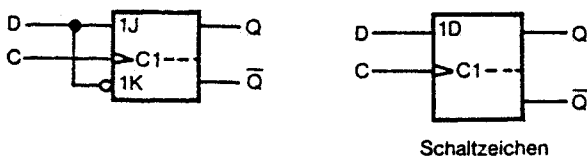


Bild 40. Schaltung und Schaltzeichen eines JK-Master-Slave-Flip-Flops



| C          | D | Q | $\bar{Q}$ |
|------------|---|---|-----------|
| $\uparrow$ | 0 | 0 | 1         |
| $\uparrow$ | 1 | 1 | 0         |

Wertetabelle

Bild 41. D-Flip-Flop