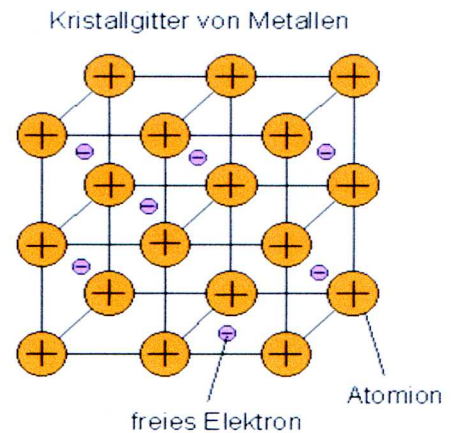


Elektrische Leiter und Nicht-Leiter

Leiter

Ein Leiter verdient seinen Namen, wenn er Strom „leiten“ kann. Das heisst, dass freie Elektronen einen Stromfluss erzeugen können, sobald eine Spannung angelegt wird. Es gibt gute und schlechte Leiter. Deshalb unterscheidet man zwischen Leiter 1.-Klasse und Leiter 2.-Klasse. Zu der 1.-Klasse gehören alle Metalle, da sie viele locker gebundene Elektronen besitzen. Die schlechteren Leiter sind in der 2.-Klasse zu finden. Es sind allgemein gelöste Ionen, wie das ist bei gelöstem Salz, Säure oder Base.



Das leitfähigste Metall ist nicht das, das am meisten Elektronen besitzt sondern die Leitfähigkeit eines Metalls hängt von der Gitterstruktur ab.

Mit einer leitfähigen Gitterstruktur sind Elektronen schwach gebunden und somit sehr leicht zu bewegen. Das leitfähigste Metall ist Silber doch man nimmt aus finanziellen Gründen als Leiter Kupfer, das aber fast so gut leitet wie Silber (siehe Tabelle). Zudem hat die Temperatur einen erheblichen Einfluss auf die Leitfähigkeit eines Metalls. Wird der Leiter erwärmt, steigt der elektrische Widerstand. Kühlt man den Leiter ab sinkt dem entsprechend der elektrische Widerstand. Ist eine gewisse tiefe Temperatur erreicht, springt der Widerstand auf null. Trifft dieser Fall ein, so spricht man von einem Supraleiter. Angewendet werden Supraleiter um sehr starke Magnetfelder zu erzeugen. Bei normalen Metallen ist die Springtemperatur aber nur ein paar Grad über 0°K.

Eine wichtige Eigenschaft besitzt Gold, das fast so gut leitet wie Silber. Gold gilt als sehr korrosionsbeständig. Diese Eigenschaft haben die meisten Metalle nicht weshalb man Leiterplatten manchmal vergoldet.

Material	ρ in ($\Omega \cdot \text{mm}^2$)/m [25°C]
Silber	$1,587 \cdot 10^{-2}$
Kupfer	$1,786 \cdot 10^{-2}$
Silizium	$2,3 \cdot 10^9$

Die Ionen-Leiter der 2. Klasse sind klassisch gesagt einfach Salzlösungen. Auch bei der 2. Klasse gilt, je wärmer umso schlechter Leitend. Ein wesentlicher Unterschied zu den Metallen ist, dass die Leitfähigkeit nicht sehr gut ist. Beim Stromdurchfluss kann zudem der Leiter 2.-Klasse durch chemische Reaktionen verändert werden.

Nichtleiter

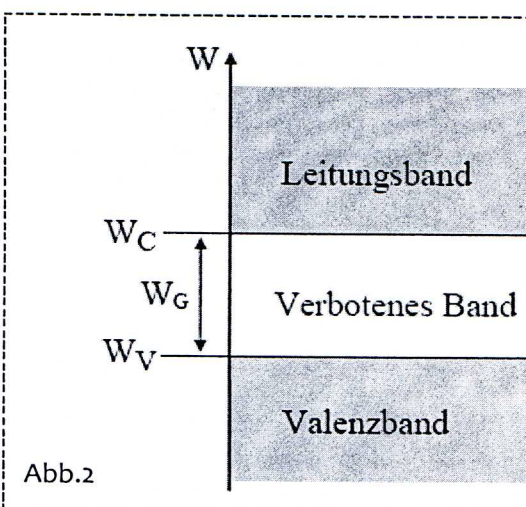
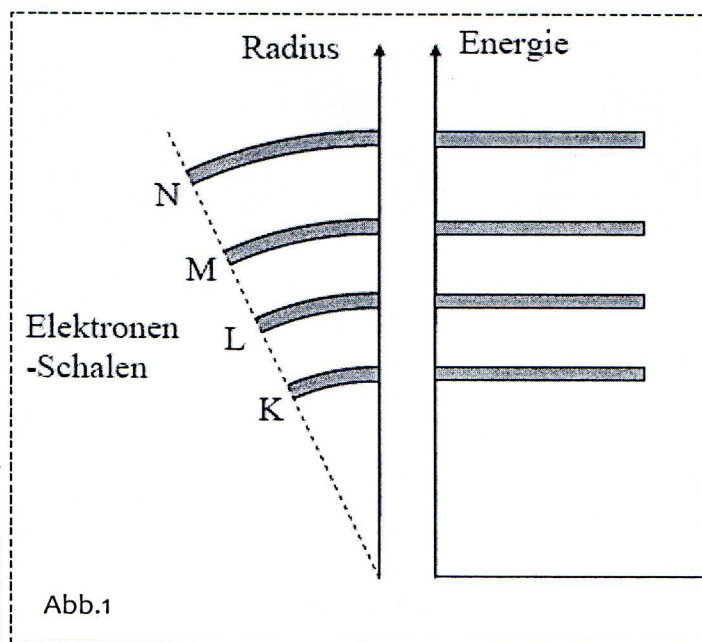
Man nennt Nichtleiter in der Fachsprache Isolator. Ein Isolator muss möglichst wenig, am besten gar keinen Stromfluss zulassen. Das wird erreicht, wenn der spezifische Widerstand des Leiters möglichst hoch ist und die Elektronen sehr stark an den Atomkern gebunden sind. Zum Beispiel hat Glas einen Widerstand von $\rho_{\text{Glas}} = 10^{10}$ bis $10^{14} \Omega \cdot \text{m}$. Der Isolator wird oft als Schutz angewendet, damit Personen, die ein Gerät bedienen nicht unter Strom gesetzt werden. Oder man braucht Isolatoren auch um den Stromfluss kontrolliert zu steuern. Andere Beispiele für Isolatoren sind: Keramik, Kunststoffe, destilliertes Wasser und Öle.

Die Halbleiter

Die Halbleiter sind von Leitern und Nichtleitern zu unterscheiden. Das Unterscheidungsmerkmal ist der spezifische Widerstand ρ . Nämlich liegt der spezifische Widerstand der Halbleiter zwischen dem des Leiters und des Nichtleiters. Silicium, Germanium, Galliumarsenid und Siliciumcarbid sind einige Beispiele von Halbleitern. Silicium kommt sehr reichlich in der Natur vor und wird deshalb häufig in der Elektronik benutzt. Sein spezifischer Widerstand beträgt $2,3 \cdot 10^7 \Omega \cdot m$, was sehr gross ist im Vergleich mit dem spezifischen Widerstand des Kupfers, der $1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ ist. Silicium ist jedoch im Naturzustand ein Nichtleiter. Siliciumatome, wie auch Galliumatomen, haben beide vier Valenzelektronen. Alle Valenzelektronen eines Siliciumatoms können sich mit Valenzelektronen eines anderen Siliciumatoms zu zwei paaren und dann eine sehr starke kovalente Bindung (Elektronenpaarbindung) bilden. Alle Elektronen werden also zur Paarungen genutzt und können keinen Strom fliessen lassen, vor allem bei tiefen Temperaturen.

Wenn jedoch die Temperatur steigt, treten Elektronen aus und ermöglichen die Leitung. Nur die Valenzelektronen, die Elektronenpaarbindungen bilden, können sich an der Leitung beteiligen. Um dieses Phänomen zu verstehen werfe man einen Blick auf das Energiebändermodell:

Einfach erklärt, kann man sich vorstellen, dass die Bahnradien der Elektronen ein Maß für die Energie der Elektronen sind. Aus dem Schalenmodell der Elektronenbahnen lässt sich damit eine grafische Darstellung der Elektronenenergie ableiten. Ersetzt man die Kreisbögen der Elektronenbahnen eines einzelnen Atoms durch gerade Linien, erhält man das sog. Energie-Term-Schema (Abb.1). Bei Festkörpern bzw. Kristallen aus vielen Atomen verschmieren/verschmelzen sich die vielen



W_C = Energie-Niveau der Unterkante des Leitungsbandes

W_V = Energie-Niveau der Oberkante des Valenzbandes

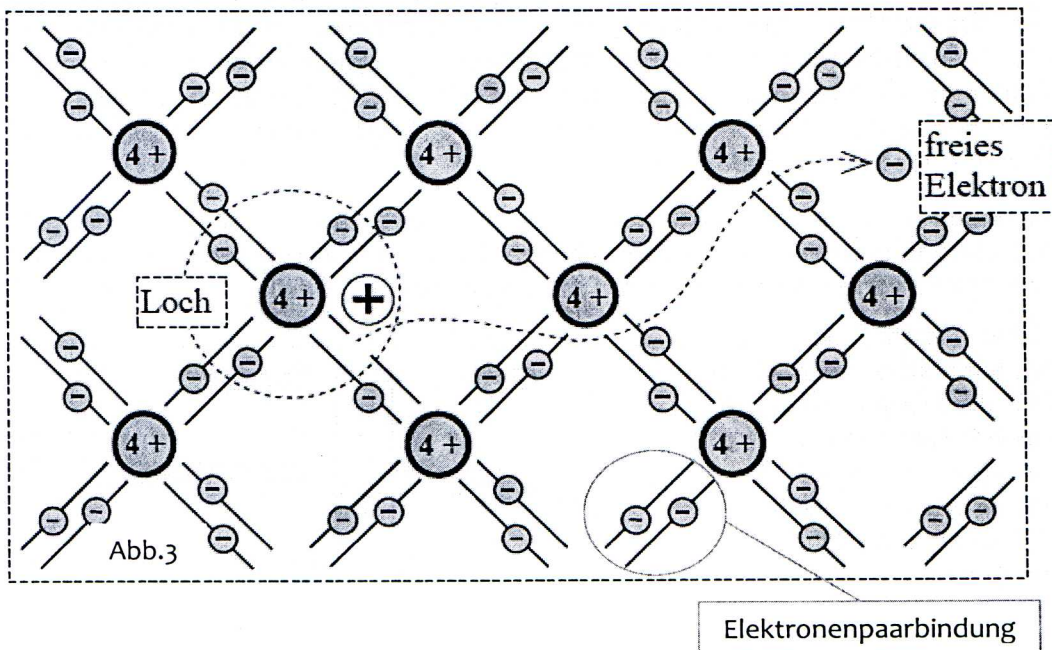
$W_G = W_C - W_V$ = Bandabstand

Energie-Bänder-Schema

zu denselben Elektronen-schalen gehörenden Einzellinien zu Bändern und man erhält das so genannte Energie-Bänder-Schema. Am oberen Ende des Energie-Bänder-Schemas folgt auf das Valenzband, wo sich die Valenzelektronen befinden, ein Energiebereich, bei dem sich ein Elektron vollständig von seinem Atom löst und dann frei beweglich wird. Man nennt dieses Energieband das Leitungsband des Halbleiters, wo die Elektronen leiten können. Zwischen dem Valenzband und dem Leitungsband gibt es ein

verbotenes Band, das von Elektronen nicht eingenommen werden kann. Um dieses verbotene Band zu überschreiten, brauchen eben die Elektronen mehr Energie (thermische Energie, Photonen,...). Für die Nichtleiter ist das verbotene Band fast unüberschreitbar. Für die Leiter existiert es nicht und für die Halbleiter ist es ziemlich eng.

Wenn ein Siliciumatom ein Elektron verliert, dann wird daraus ein Kation und das Elektron lässt ein Loch, das die Leitung ermöglicht (Abb.3). Ausserdem sind die freien Elektronen bei der Raumtemperatur sehr selten, nur etwa 3 für 10^{13} Atome. Ein Halbleiter, dem man keine Unreinheiten gegeben hat, ist *intrinsisch*.



Quellen:

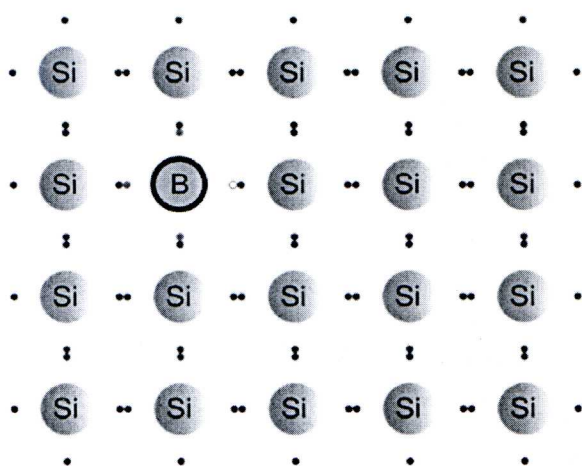
- <http://iwenzo.de/wiki/Halbleiter>
- <http://pagesperso-orange.fr/f5zv/RADIO/RM/RM23/RM23D/RM23Do5.html>
- Unterlage des Professors Yves Darbellay, Ecole Technique des Métiers de Lausanne (ETML), Physiques des semis-conducteurs

Dotation von Halbleitern

Bei einer Dotation werden Fremdatome in einen Halbleiter eingebracht. Die Fremdstoffkonzentration ist jeweils sehr gering (zwischen 10^{-9} und 10^{-4}). Die Fremdatome verändern gezielt die Leitfähigkeit des Halbleiters. Meistens wird Silicium als Basismaterial für Halbleiterbauelemente verwendet.

Man unterscheidet zwei Arten der Dotation:

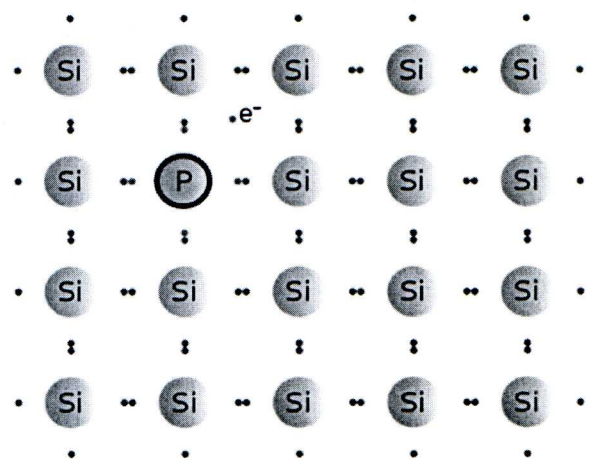
p-Dotierung



Für die p-Dotierung werden dreiwertige Atome (z.B.: Bor, Gallium oder Indium) in den Halbleiter eingebracht. Der Einbau in den Kristall braucht aber vier Valenzelektronen, weswegen das Fremdatom sich ein Elektron aus der Umgebung nimmt. Dadurch entsteht ein positives „Loch“, das sich, entgegen den Elektronen, in der technischen Stromrichtung bewegt.

n-Dotierung

Beim n-Dotieren werden fünfwertige Atome (z.B.: Phosphor, Arsen oder Antimon) in den Halbleiter eingepflanzt. Vier dieser Valenzelektronen werden zum Einbau in den Halbleiter benötigt, das fünfte Elektron ist nur noch schwach an den Atomrumpf gebunden und löst sich schon bei geringster Energiezufuhr von diesem. Zurück bleibt dann der positive Atomrumpf des Fremdatoms. Es kommt also zu mehr frei beweglichen Elektronen. Wegen der überwiegend negativen beweglichen Ladungsträger, nennt man es n-Dotation.



Dioden und ihre Kennlinie

Funktionsweise der Halbleiterdiode

Eine Halbleiterdiode besteht aus zwei Halbleitern, wobei der eine n- und der andere p-dotiert sein muss. Somit gibt es also eine Schicht, in der negative Ladungsträger frei beweglich sind und eine, die der die nicht besetzten Elektronenstellen verschoben werden können (Bild1). Die Grenze dazwischen bezeichnet man als Sperrschicht. Man lege nun eine Spannung mit dem Minuspol beim n-dotierten und dem Pluspol entsprechend beim p-dotierten Halbleiter an. Die Elektronen werden dann vom n-dotierten Halbleiter Richtung p-dotierten und von dort weiter in Richtung Pluspol geschoben. Der Strom fließt.

Nun pole man die Spannung um. In der p-dotierten Schicht werden die Elektronen in Richtung der Sperrschicht geschoben, solange es dort noch freie Elektronenstellen hat. Sind diese besetzt, können sie nicht weiter fließen, der Strom wird geblockt (Bild2).

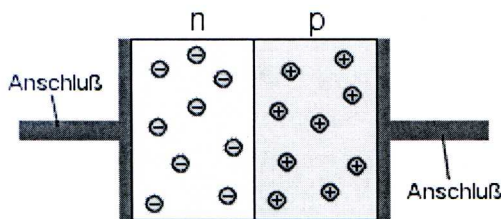


Bild1 Halbleiterdiode

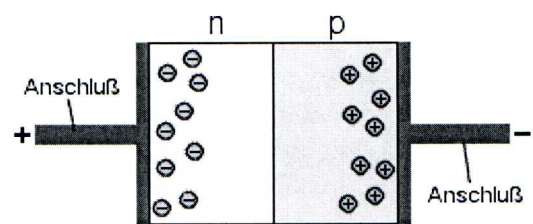
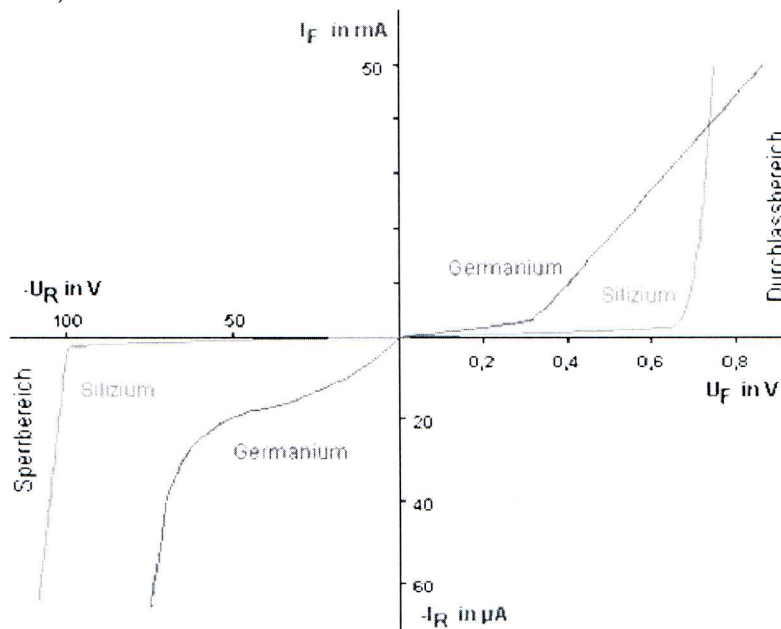


Bild2

Kennlinie

Eine Diode lässt also Strom nur von einer Seite durchfließen. Man kann nun den Stromfluss durch eine Diode für unterschiedliche Spannungen messen und das Ergebnis in einem Diagramm festhalten, was dann so aussieht:

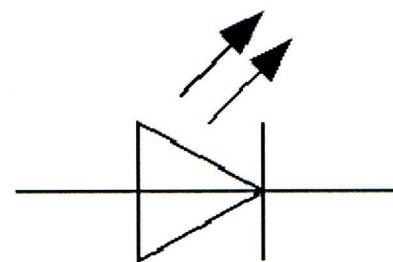


Positives U bedeutet plus bei p-dotiertem Halbleiter. I geht von plus nach minus. Man beachte, dass die U-Achse links und rechts nicht gleich skaliert ist. Nach rechts braucht es kleine Spannungswerte, und die Diode wird leitend. Nach links braucht es grosse Spannungen, bis die Elektronen durchbrechen können. *Daselbe gilt für die I-Achse!*

Leuchtdioden

Aufbau

Der wichtigste Teil einer Leuchtdiode besteht aus einem Halbleiterkristall, welcher in einer Reflektorwanne eingebettet ist. Die Reflektorwanne hat einen Durchmesser von ca. 3mm und ist mit dem Kathodenbein der Leuchtdiode verbunden, welches das kürzere der beiden Beine ist. Am Anodenanschluss ist innerhalb der Kunststoffummantelung ein Bonddraht (Golddraht mit Durchmesser von ca. 50 µm) angebracht, welcher die Anode mit dem Halbleiterkristall verbindet.



Halbleiterkristall

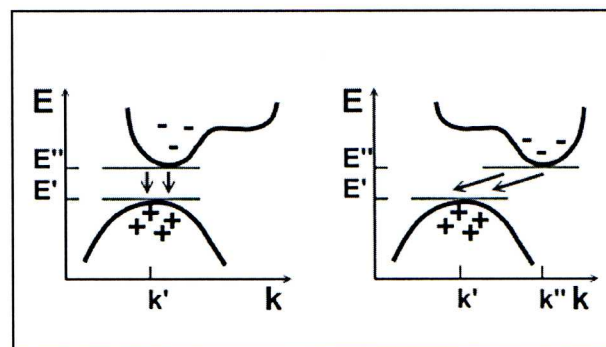
Der Halbleiterkristall besteht nicht, wie bei anderen Dioden aus Silizium, sondern meist aus so genannten III-V-Halbleitern, welche aus Elementen der chemischen Hauptgruppen III und V bestehen. Dies sind meist Galliumverbindungen, z.B. Galliumphosphid oder Galliumarsenid. Je grösser der Anteil Phosphor im Galliumarsenid ist, umso kleiner wird die Wellenlänge der ausgesendeten Magnetischen Strahlung. Mit dem Anteil des Phosphor im Kristall nimmt auch die Flussspannung zu. Diese zwischen 1,3V (infrarotes Licht) und 4V (ultraviolettes Licht).

Funktionsweise

Eine Leuchtdiode verhält sich grundsätzlich wie eine gewöhnliche Diode. Die Tatsache, dass bei Stromdurchfluss einer Leuchtdiode ausgesendet wird, ist auf die anderen Halbleiter zurückzuführen. Wenn die Elektronen vom n-dotierten Leitungsband auf das p-dotierte Valenzband wechseln, wechseln sie in eine energetisch günstigere Position. Die dadurch eigentlich überflüssige Energie, wird bei normalen Dioden jedoch noch zur Überschreitung des Bandüberganges benötigt. Dies ist bei den III-V-Halbleitern jedoch nicht nötig, da sich die Elektronen bei diesen Halbleitern nicht durch Gitterschwingungen über diesen Bandübergang bewegen müssen. Somit wird die überflüssige Energie in Form von kaltem Licht abgestrahlt.

Licht

metastabilen



Vorteile

Aufgrund ihres begrenzten Spektralbereiches sind Leuchtdioden wesentlich effizienter, da kein Lichtspektrum erzeugt wird, welches weder wahrgenommen, noch benötigt wird. Dazu geht nicht so viel Energie in Form von Wärme verloren, welche bei normalen Lampen einen nicht geringen Anteil der Gesamtenergie ausmacht. (80-95 %!)

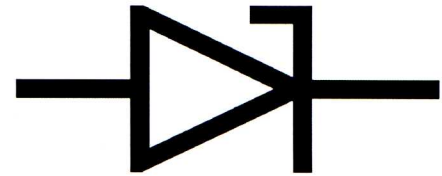
Frequenzberechnung

$$\lambda(W_D) = \frac{h \cdot c}{W_D} \quad \text{mit} \quad W_D = E'' - E'$$

h : Plancksches Wirkungsquantum = $6,626 \cdot 10^{-34}$ Js = $4,13567 \cdot 10^{-15}$ eVs

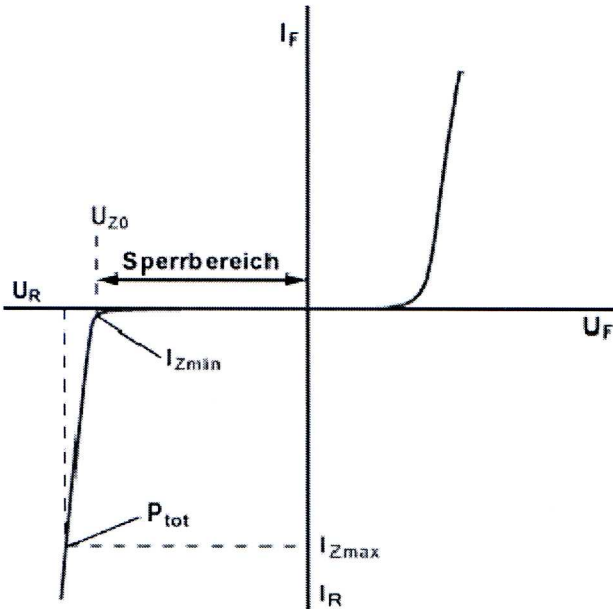
Die Zenerdiode

Die Zenerdiode ist prinzipiell gleich wie eine normale Diode aus Halbleitermaterial. Der Unterschied besteht darin, dass die Zenerdiode in Sperrrichtung betrieben wird.



Schaltzeichen der Zenerdiode 1

Zenereffekt



I/U-Diagramm 1

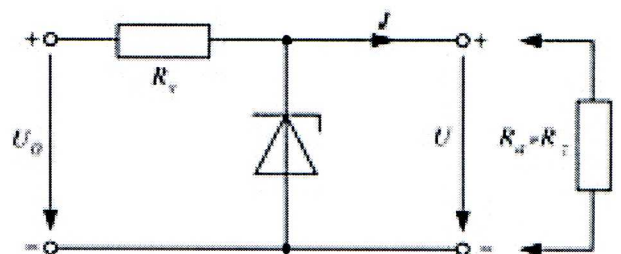
Bis zu einer materialabhängigen Spannung fließt bei der Zenerdiode nur ein Sperrstrom von einigen nA. Doch wählt man die Spannung grösser als die sogenannte Sperrspannung, werden Elektronen durch die starken elektrischen Kräfte aus den Gitterbindungen gerissen, wobei natürlich eine grosse Zahl von Löchern entsteht. Diese werden wieder aufgefüllt und es beginnt ziemlich schnell ein grosser Strom zu fließen (vergl. Diagramm). Durch den Zenereffekt wächst der Strom ab einer bestimmten Spannung in Sperrrichtung schlagartig.

Lawineneffekt

Die Elektronen, welche durch den Zenereffekt frei wurden, werden im elektrischen Feld stark beschleunigt. Dies führt dann dazu, dass weitere Ladungen aus ihrer Kristallbildung herausgestossen werden. Dieses Phänomen ist allgemein unter dem Lawineneffekt bekannt.

Anwendungen

Die Zenerdiode wird hauptsächlich zur Spannungsstabilisierung gebraucht. Wenn zum Beispiel ein beliebiger Verbraucher kaputt gehen würde, wenn er eine zu hohe Spannung bekommen würde, kann man diesen Verbraucher mit einer Zenerdiode schützen. Denn bis zu einer bestimmten Spannung hat die Zenerdiode keinen Einfluss. Jedoch wenn die Spannung höher wird als die Sperrspannung geht der Strom durch die Zenerdiode (da sein Widerstand kleiner wird als der des Verbrauchers) und kann so dem Verbraucher nicht schaden. Man kann also eine Zenerdiode mit einem Überdruckregulator vergleichen.

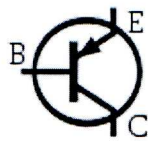


Spannungsstabilisierung 1

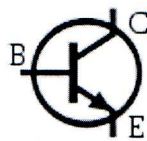
Transistoren NPN und PNP

Geschichte

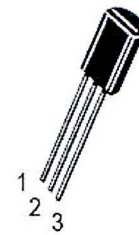
Die Erfindung der Transistoren hat die Elektronik und die Informatik revolutioniert. Heute ist ein Transistor das Basiselement eines integrierten Schaltkreises. Zum Beispiel zählen Mikroprozessoren bis eine Milliarde und zwei hundert Millionen von Transistoren. Die Amerikaner **John Bardeen**, **William Shockley** und **Walter Brattain** haben für diese Erfindung im Jahr 1956 ein Nobelpreis bekommen. Es gibt mehrere Sorten von Transistoren. Aber hier werde ich mich nur mit den NPN und PNP Transistoren beschäftigen.



PNP

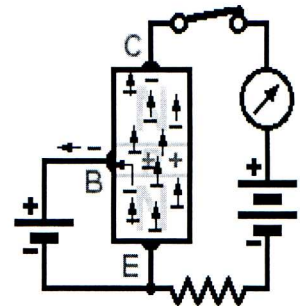


NPN



Funktionieren

Transistoren haben zwei Funktionen: sie können als Schalter oder als Verstärker von einem Strom nutzen werden. Mit einem kleinen Strom kann man ein viel grösseres verursachen. Die Namen kommen aus hier, P heisst p-dotierten Leiter und N n-dotierte Leiter. Diese Schichten sind wie ein „Sandwich“ gebaut: wir haben eine Schicht von p- oder n-dotierten Leiter zwischen zwei Schichten von n- oder p- dotierten Leiter. Der Bau eines Transistors ist wie, wenn man zwei Dioden nimmt. Strom kann von P nach N fließen aber nicht umgekehrt. Deswegen nutzt man einen anderen Strom. Dieser Strom kreierte einen kleinen Gang und den grösseren Strom kann weiter fließen. Nur muss man beachten, eine Spannung grösserer als 0.7 V für den kleinen Strom zu haben; der kleiner Strom muss die Widerstand einer PN Bindung meistern.



Das Ort wo der klein Strom geht an heisst die Basis (B) und die zwei andere Orte, wo der grösste Strom fliesst heissen Kollektor (C) und Emitter (E). Für die Symbolen zeigt immer, wo der Emitter ist.

Vorher waren die Transistoren in Germanium gebaut. Heute sind sie in Silizium, weil Silizium bessere Eigenschaften als Germanium hat (cf. Dioden).

Anwendung

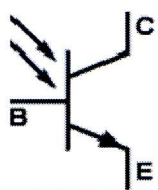
Die Spannung zwischen den Kollektor und der Emitter spielt fast keine Rolle auf den Strom, der im Transistor fließen kann. Im Gegenteil spielt den Strom an der Base eine grosse Rolle. Je grösser wird diesen Strom umso grösser wird den Gang und den Strom an Transistor. So spielt einen Transistor eine Rolle von Verstärker von Strom. Zum Beispiel nutzt man einen Transistor zwischen ein Mikro und ein Lautsprecher, um die Signalen zu vergrössern.

Fototransistor

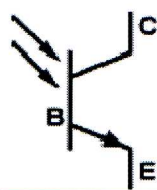
Ein Fototransistor ist ein Bipolartransistor mit pnp- oder npn-Schichtenfolge, dessen pn-Übergang der Basis-Kollektor-Sperrschicht einer externen Lichtquelle zugänglich ist. Er ähnelt somit einer Fotodiode mit angeschlossenem Verstärkertransistor und ist damit wesentlich empfindlicher auf Veränderungen der Lichtstärke. Die Ansteuerung des Transistors wird mittels des über den Lichteinfall erzeugten Sperrstromes durch diese Sperrschicht realisiert.

Bei einigen von ihnen ist der Basisanschluss trotzdem herausgeführt. Dadurch ist eine Arbeitspunktstabilisierung oder ein schnelleres Schaltverhalten möglich. Fototransistoren ohne Basisanschluss werden nur über Licht gesteuert. Wenn also Licht auf den Fototransistor fällt, dann erhöht sich der Strom, der zwischen Kollektor und Emitter fließt.

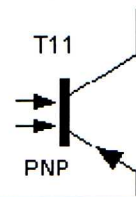
Anwendungen finden beim Detektieren von oder Übertragungen via Licht, zum Beispiel als Helligkeitssensoren, Empfänger für Lichtschranken oder Optokopplern.



NPN-Fototransistor
mit herausgeführtem
Basisanschluss



NPN-Fototransistor
ohne herausgeführtem
Basisanschluss

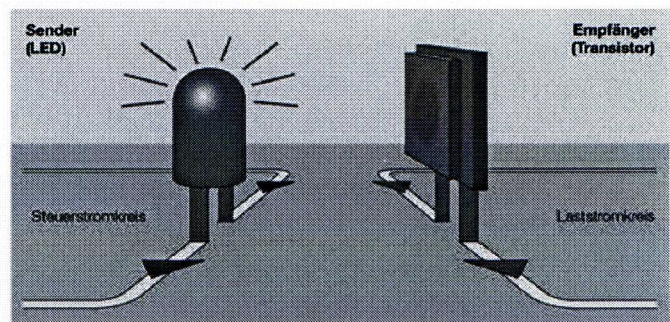
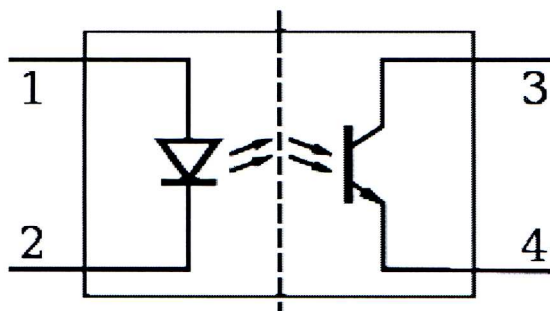


PNP-Fototransistor
ohne herausgeführtem
Basisanschluss

Optokoppler

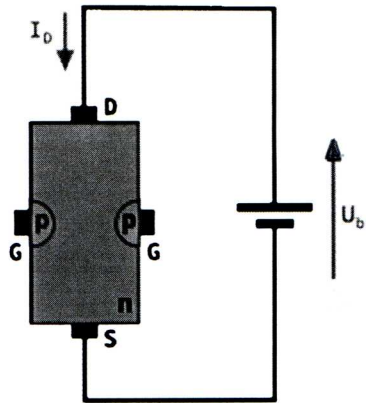
Optokoppler sind elektronische Bauteile, mit denen ein Laststromkreis über einen Steuerstromkreis geschaltet wird. Zum einen können dadurch mit relativ niedrigen Schaltströmen Anwendungen mit unterschiedlichen Leistungen betätigt werden. Zum anderen wird für eine galvanische (elektrische) Trennung von Schalt- und Lastebene gesorgt, um im Störfall Bauteile zu schützen.

Im Steuerstromkreis wird für den Schaltvorgang über eine LED ein Lichtsignal ausgelöst, das in einem lichtempfindlichen Halbleiter-Empfänger (Fotodioden, Fototransistoren, selten auch Fotothyristoren, Fototriacs) das Schliessen eines anliegenden Laststrom-Kreises bewirkt. Sender (LED) und Empfänger (z.B. Fototransistor) sind in einem Licht leitenden Kunststoff eingebettet und von einer Licht undurchlässigen Hülle umgeben, die vor äusseren Einflüssen schützt. Anwendung findet der Optokoppler vor allem in Bereichen, wo Stromkreise galvanisch getrennt sein müssen (so z.B. bei Netzwerkkarten in Computern, medizinische Geräte (Patient ist geschützt vor Fehlspannungen),

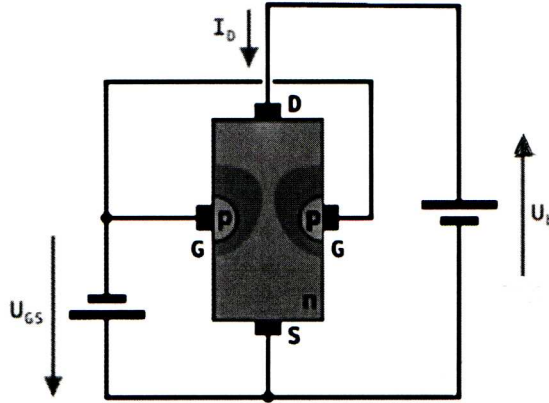


Der Feldeffekttransistor

Der JFET (*junction field effect transistor*):

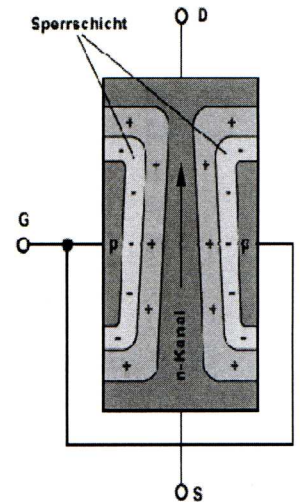


Source- und Drainanschluss sind mit der n-dotierten Schicht verbunden. Die Gateanschlüsse sind nicht verbunden. Die n-dotierte Schicht leitet den Strom.

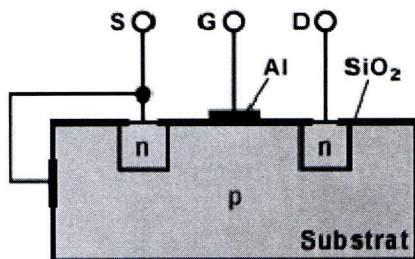


Legt man eine positive Spannung an G an, bewirkt dies eine Verstärkung des Stromes (siehe Bild rechts).
Legt man eine negative Spannung an, bewirkt man damit das Gegenteil.

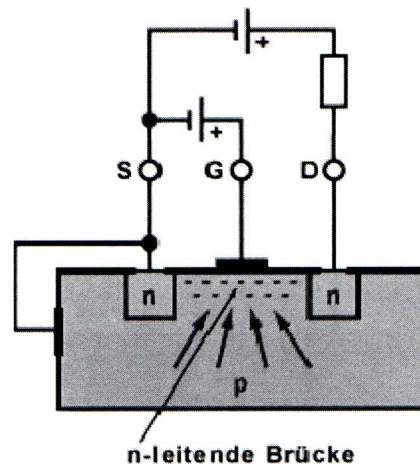
- Legende:**
- G : Gate (Tor)
 - D : Drain (Abfluss)
 - S : Source (Quelle)
 - B : Bulk (Substrat)



Der MOSFET (*metal-oxide-semiconductor field-effect transistor*)



Source- und Drainanschluss sind beide mit der n-dotierten Schicht verbunden. Es fließt allerdings kein Strom. Allerdings nur solange wie bei G keine Spannung angelegt ist. Man nennt diese Art Transistoren *selbstsperrend*.



Legt man eine Spannung an bei G bewegen sich die „Löcher“ des p-dotierten Substrats zum Gate und ermöglichen dadurch einen Stromfluss zwischen den beiden n-dotierten Bereichen.

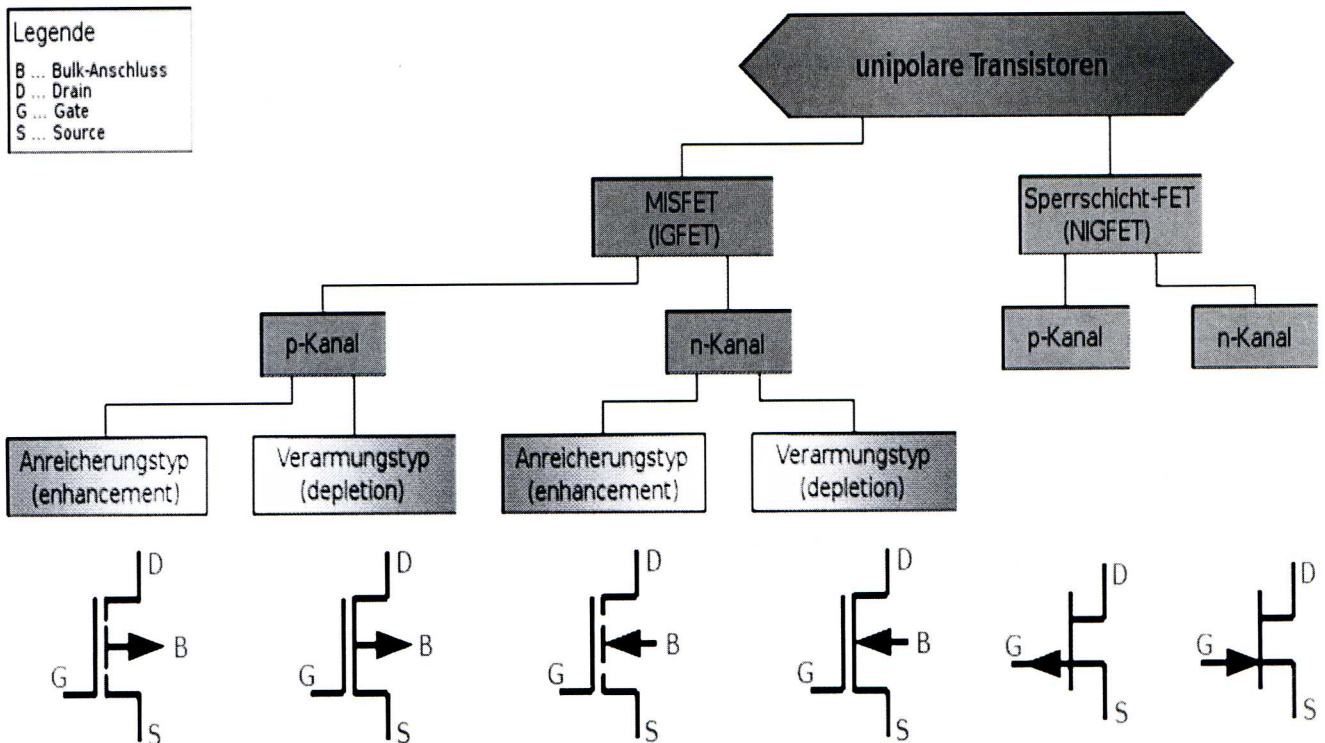
Vor- und Nachteile:

- Vorteile:
 - Kurze Schaltzeit
 - Geringer Spannungsabfall (beim Gebrauch als Schalter)
 - Geringe Herstellungskosten
- Nachteile:
 - Geringere Strombelastbarkeit
 - Empfindlich gegenüber statischen Aufladungen

Anwendungsbereiche:

- Analogschalter
- Konstantstromquelle
- Verstärker
- JFET in der Hochfrequenztechnik
- MOSFET in der Digitaltechnik

Grundtypen und Schaltungssymbole:

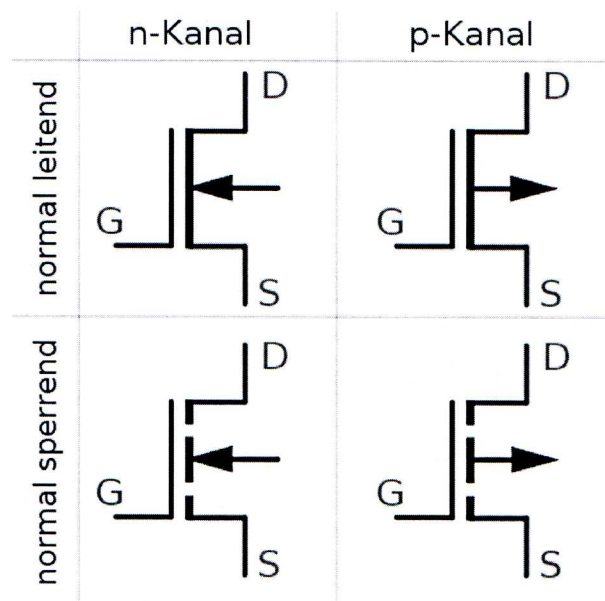


MOSFET - beinahe ideale spannungsgesteuerte Schalter

(MOSFET \approx Metal Oxyde Semiconductor Field Effect Transistor)

D (wie Drain) ist der Abzugsgraben für die Elektronen, hier ist also der positive Spannungspol
S (wie Source) ist die Quelle der Elektronen, hier ist also der negative Spannungspol
G (wie Gate) ist der Steuerungseingang, der nur eine Spannung liefern muss (gegenüber S resp. D)

Es gibt 4 Typen davon:



- oben links: normal leitend, wird sperrend durch eine positive Spannung von S nach G (à la NPN)
- oben rechts: normal leitend, wird sperrend durch eine negative Spannung von D nach G (à la PNP)
- unten links: normal sperrend, wird leitend durch eine positive Spannung von S nach G (à la NPN)
- unten rechts: normal sperrend, wird leitend durch eine negative Spannung von D nach G (à la PNP)

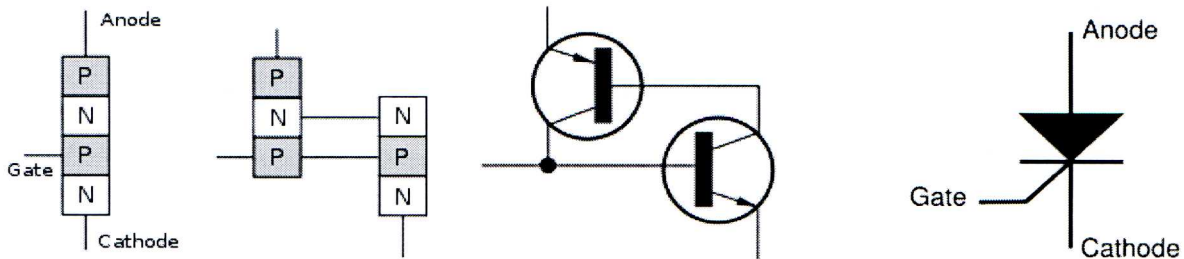
Die meisten CMOS-Schaltungen (Complementary Metal Oxyde Semiconductors) arbeiten mit den unteren beiden komplementären Typen.

Link zum Thema: http://tams-www.informatik.uni-hamburg.de/applets/cmos/cmos_dt.html

Thyristor

Aufbau

Ein Thyristor hat drei pn-Übergänge in der Folge pnpn. Er hat wie eine Diode eine Anode und Kathode, es kommt allerdings noch ein Gate-Anschluss hinzu, der mit der dritten Schicht verbunden ist.



Aufbau eines Thyristors

Schaltsymbol

Im Grundzustand ist der Thyristor in beiden Richtungen sperrend. Durch einen positiven Stromimpuls am Gate kann er in den leitenden Zustand geschaltet werden. In Sperrrichtung sperrt er den Strom wie eine normale Diode.

„Zünden“ des Thyristors

Es gibt mehrere Möglichkeiten der Zündung:

- Steuerstrom (ein positiver Strom oder Stromimpuls am Gate)
- Lichtzündung (Fotothyristor)
- Überschreiten der Nullkippspannung (Überkopfzündung bzw. Breakover)

Durch einen sehr kleinen Strom oder Stromimpuls am Gate kann der Thyristor gezündet werden. Voraussetzung dafür ist eine positive Spannung zwischen Anode und Kathode, sowie ein Mindeststrom durch die mittlere Sperrschicht. Die Lichtzündung erfolgt nach dem gleichen Prinzip wie beim Fototransistor. Er kann aber auch durch das überschreiten der sogenannten Nullkippspannung an der Anode gezündet werden.

Abschalten

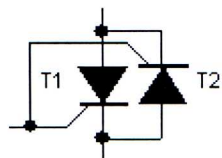
Um den Thyristor wieder in den sperrenden Zustand zu versetzen, muss entweder der Haltestrom zwischen der Anode und Kathode unterschritten werden, oder die Spannung des Lastschaltkreises abgeschaltet oder umgepolt werden. Es dauert jedoch eine gewisse Zeit, bis der Thyristor vollständig sperren kann (Elektronen müssen noch abfließen). Diese Freiwerdezeit t_q ist eine Bauteileigenschaft und beträgt 10 bis 400 μs .

Praktische Anwendungen

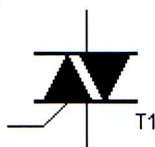
Praktisch wird der Thyristor als *schaltbare* steuerbare Diode eingesetzt. Bei einer Kombination aus zwei Thyristoren kann man damit auch hohe Lasten regeln (siehe Triac).

Triac

Ein Thyristor funktioniert immer nur in einer Richtung. Will man ein Bauteil haben, welches in beiden Stromrichtungen arbeitet, muss man nur einen zweiten Thyristor entgegengesetzt parallel schalten und die beiden Gates verbinden, so dass jeweils ein Thyristor die Funktion in eine Richtung übernimmt. Dieses Bauteil nennt sich dann Triac.



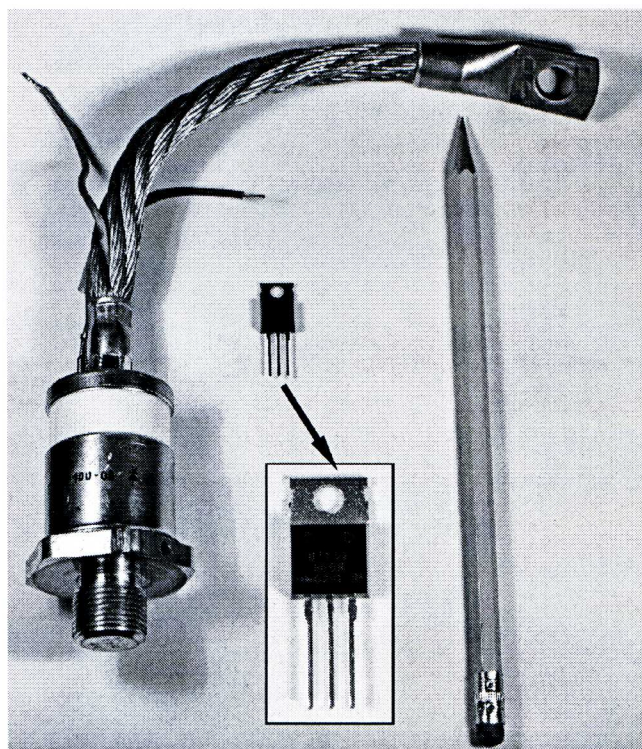
Innenbau eines Triacs



Schaltymbol

Anwendung

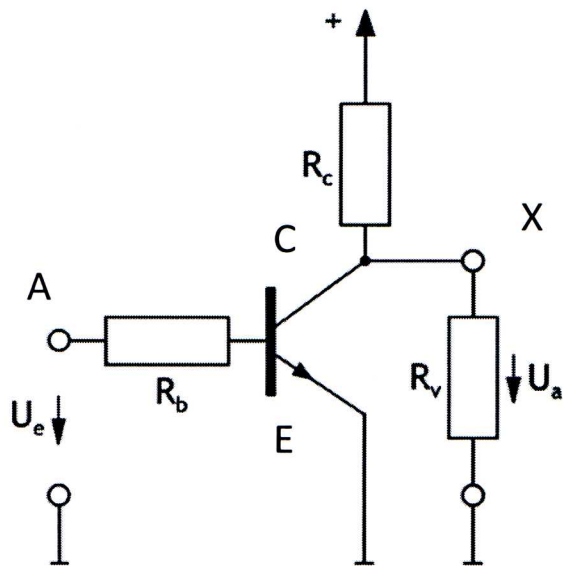
Da ein Triac in beide Richtungen leitet wird er hauptsächlich mit zum Schalten von Wechselströmen verwendet. Durch eine Phasenanschnittsteuerung kann man die Helligkeit von Glühlampen steuern (Dimmer) oder auch die Drehzahl von kleineren Motoren wie z.B. Bohrmaschinen regeln. Um grössere Lasten zu steuern verwendet man jedoch zwei Thyristoren in einer Triac-Schaltung. Damit lassen sich sehr hohe Ströme bis 6 kA und Spannungen bis 8 kV schalten.



*Thyristor 100 Ampere/800 Volt im Vergleich zu
Thyristor 13 Ampere/800 Volt in Standardgehäuse TO-220*

Inverter mit NPN Transistor und Widerständen

Einen Inverter kann man für verschiedene Sachen gebrauchen, als logisches Bauteil, als Verstärker, falls man zwei hintereinander schaltet, als Sicherung oder als Sollbruchstelle bei einer Überlastung. Inverter sind im Vergleich zu anderen Sicherungen preiswerter in der Herstellung und sind dadurch sehr gut geeignet, um Schaltungen vor Überlastung zu schützen.



Dieser Inverter besteht aus einem Transistor und zwei Widerständen. Der Widerstand R_v stellt nur einen angeschlossenen Verbraucher dar.

Das Funktionsprinzip ist, dass bei $A=High$ der Widerstand des Transistors über C und E gegen Null fällt und fast die ganze Spannung über R_c abfällt.

$C=X$ wird entsprechend Low.

Ist der Eingangspegel auf Low so hat der Transistor einen Widerstand im Megaohmbereich, was dazu führt, dass (fast) kein Strom durch den Ausgang abfließen kann.

$C=X$ ist High.

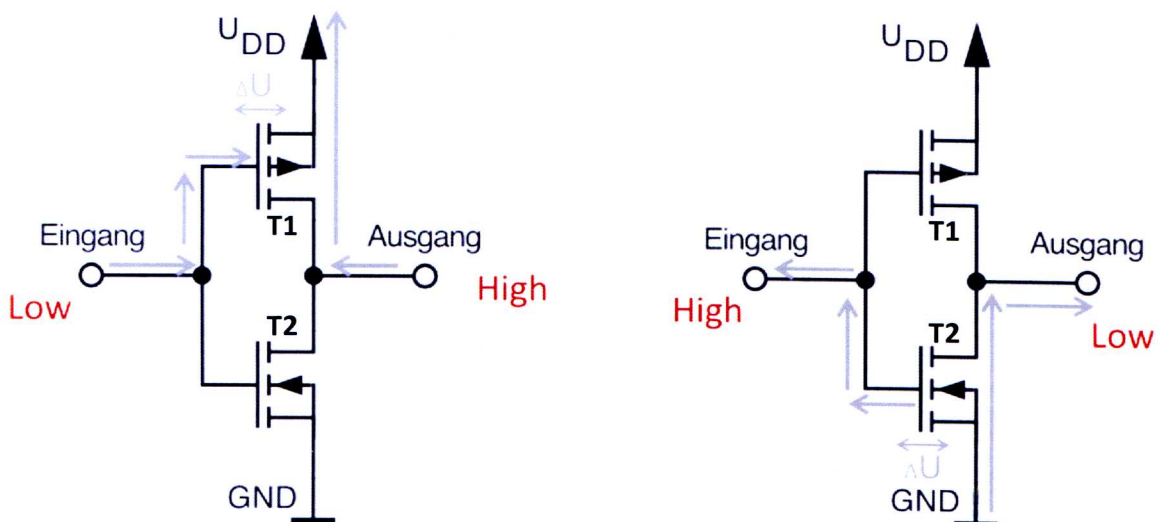
Der Widerstand R_b dient dazu, dass die vorgeschaltete Quelle keinen allzu hohen Spannungsverlust erleidet und dass der Stromverbrauch eingedämmt werden kann. Er hat ca. einen Widerstand von 10-100k Ω .

R_c hat etwa einen Widerstand von 10k Ω . R_c muss viel grösser sein als $R(\text{Transistor leitend})$ und viel kleiner als $R(\text{Transistor sperrend})$.

Die CMOS-Technik am Beispiel des Inverters

CMOS (ausgeschrieben *Complementary Metal Oxide Semiconductor*, deutsch *komplementärer Metall-Oxid-Halbleiter*) bezeichnet einen Typ von Halbleiterbauteilen. Er basiert auf n- und p-dotierten MOSFETs (Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor), die auf eine gemeinsame p-Schicht per Beschichtungsverfahren aufgetragen werden. Diese Technik bildet die Grundlage für beinahe alle heute verwendeten Integrierten Schaltungen (Gerätesteuerung, CPUs, Speicher, etc.), da sie es ermöglicht, mit geringem Stromdurchfluss und somit geringer Abwärme und geringem Energieverlust komplizierte Schaltungen auf kleinstem Raum unterzubringen.

Da auf die genaue Funktionsweise der MOSFET-Transistoren schon im letzten Vortrag eingegangen wurde, wird diese hier nicht nochmals erklärt. Stattdessen folgt das Beispiel des Inverters (Logisches NOT), um zu zeigen, wie genau ein CMOS-Baustein prinzipiell funktioniert, ohne jedoch auf die genaue technische Umsetzung einzugehen. Es ist zu beachten, dass in diesem Schema alle Flussrichtungen aus Sicht der Elektronen, also in Gegenrichtung des technischen Stroms, gezeichnet sind.



Ist der Eingang Low, so liegt keine Spannung am Gate von MOSFET T2 gegenüber Source (GND), und T2 sperrt daher. Durch den Spannungsunterschied von Gate und Drain wird jedoch der MOSFET T1 durch gesteuert. Damit liegen 5V am Ausgang, während dem T2 dafür sorgt, dass kein Kurzschluss entsteht.

Ist der Eingang High, wird T2 durchgeschaltet. Der Transistor T1 sperrt gleichzeitig, da zwischen U_{DD} und dem Gate kein Spannungsunterschied besteht. Der Ausgang ist somit mit GND verbunden, und T1 sorgt dafür, dass kein Kurzschluss entsteht.

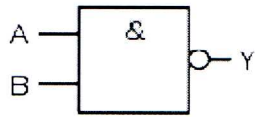
Der Vorteil der CMOS-Technik gegenüber der klassischen Bauweise: Der Transistoren werden durch eine Spannung und nicht durch einen Strom gesteuert. Dadurch braucht es beim Umschalten nur einen kleinen Lade- oder Entladestrom, aber zum Aufrechterhalten des Zustandes keinen kontinuierlichen Stromfluss. Ausserdem werden keine Widerstände gebraucht, wodurch sehr viel weniger Wärme entsteht.

Die NAND-Schaltung

Wie bereits bekannt, liefert die NAND-Schaltung im Ausgang das Gegenteil der AND-Schaltung. Somit liefert der Ausgang nur ein Low-Signal, wenn alle Eingänge high sind. Sobald nur schon ein Eingang low ist, wird der Ausgang ein High-Signal liefern. (Siehe Tabelle)

A	B	Y=A NAND B
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Das Schaltsymbol:



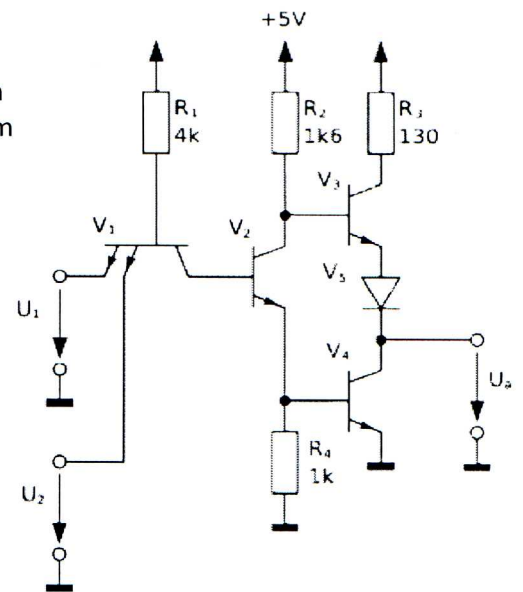
Der NAND-Baustein in Transistor-Transistor-Logik (TTL):

Ausgang low, nur wenn A=high und B=high

V1 leitet zu V2, somit bei V2 high, womit V2 und dann auch V4 leiten. Dabei wird V3 gesperrt und der Strom fließt vom Ausgang durch V4

Ausgang high, mind. einer von beiden muss low sein:

Strom fließt von R1 zum Eingang welcher low ist, somit bleibt V2 low und sperrt. V3 wird high und V5 leitet, wobei Ua high wird, da auch V4 sperrt.



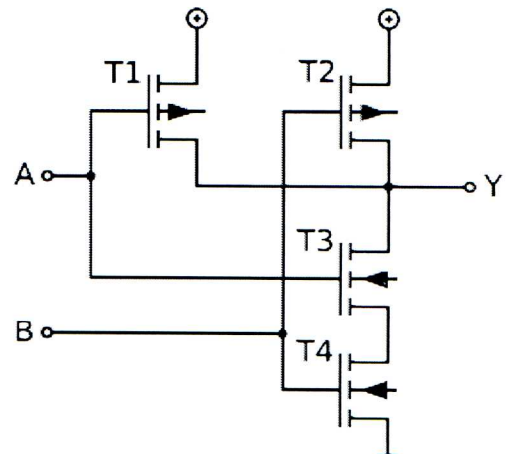
Und in CMOS-Logik:

Ausgang low, nur wenn A=high und B=high:

T1 und T2 sperren und T3 und T4 leiten
Strom fließt von Y durch T3 und T4 und weiter runter.

Ausgang high, mind. einer von beiden muss low sein:

Sobald T1 oder T2 leitet, liefert Y ein High-Signal, da der Strom von einem der Spannungseingängen direkt zu Y fließen kann.



Die AND-Schaltung

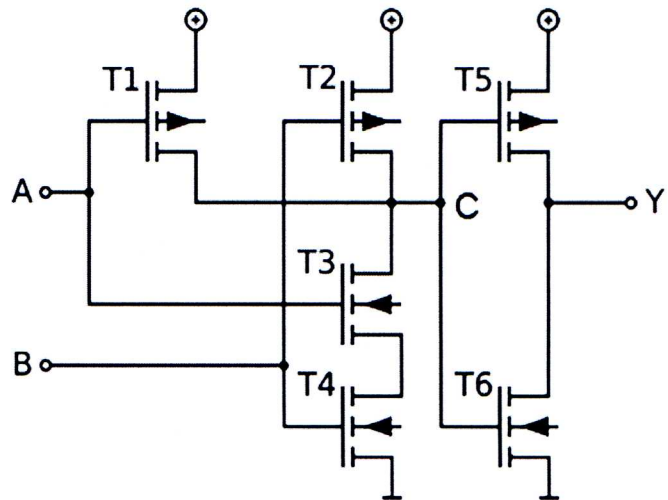
Eine AND-Schaltung liefert, wie bereits bekannt, am Ausgang nur dann ein High-Signal, wenn alle Eingänge high sind. Ist nur ein einziger der Eingänge low, so liefert die AND-Schaltung ebenfalls ein Low-Signal.

1) Mit CMOS-Transistoren ist dies relativ einfach zu bewerkstelligen:

Fall 1: A = low, B = low: In diesem Fall leiten T1 und T2 => C = high. Wenn C = high, dann leitet T6 und somit liegt beim Ausgang Y ein **Low**-Signal an.

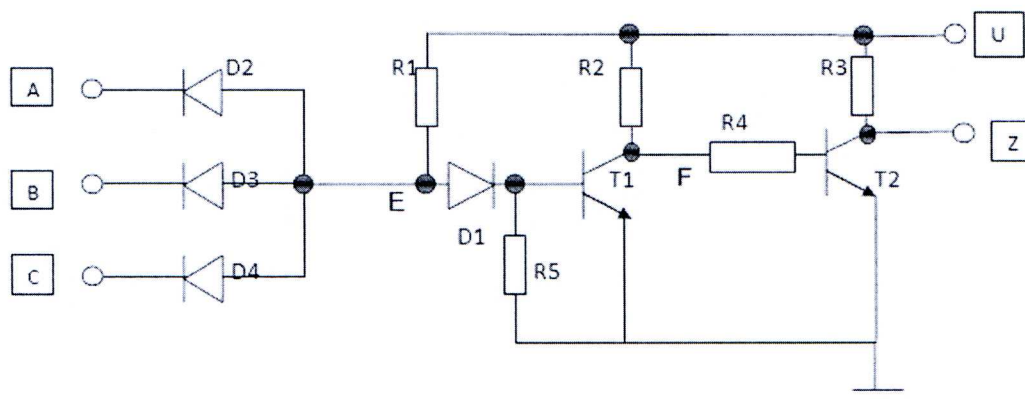
Fall 2: A = low, B = high: In diesem Fall ist C wiederum high, weil T1 leitet. T6 leitet also wieder => **Y = low**. (Der Eingang B kann ignoriert werden: T4 würde zwar leiten, T3 aber nicht!)

Fall 3: A = high, B = low: In diesem Fall leitet T2, C ist also erneut high. T6 leitet auch hier wieder => **Y = low**. (Der Eingang A kann ignoriert werden: T3 würde zwar leiten, T4 aber nicht!)



Fall 4: A = high, B = high: Dies ist der einzige Fall, in welchem weder T1 noch T2 leiten. T3 und T4 leiten allerdings beide, es liegt bei C also ein Low-Signal. Wenn C = low, leitet T5 und beim Ausgang Y liegt ein **High**-Signal.

2) Man kann dieselbe Schaltung allerdings auch mit Dioden, Widerständen und Transistoren auf die „herkömmliche“ Weise basteln:



Fall 1: Einer oder mehrere der **Eingänge** (A,B,C) sind **low**: In diesem Fall ist E ebenfalls low, der Transistor T1 sperrt dann. F ist somit high und der Transistor T2 ist durchlässig, Z ist also **low**.

Fall 2: Alle drei **Eingänge** (A,B,C) sind **high**: In diesem Fall ist E ebenfalls high, der Transistor T1 ist jetzt durchlässig. Damit ist F low und der Transistor T2 sperrt, Z ist dann also **high**.