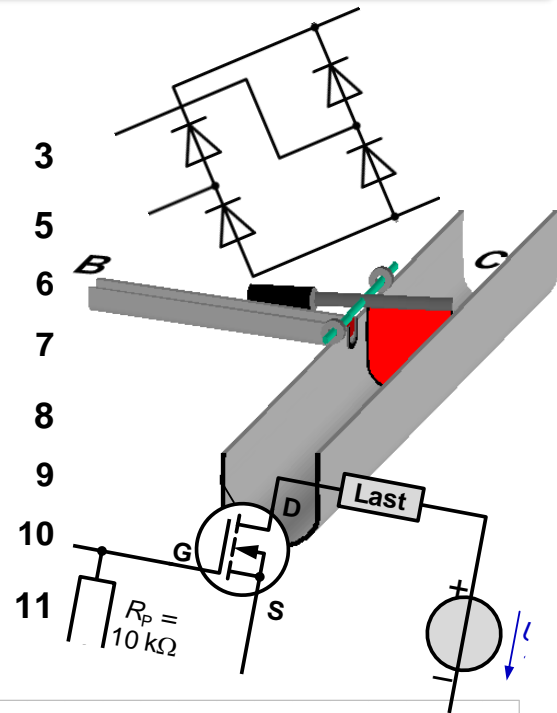


Elementare elektronische Bauelemente

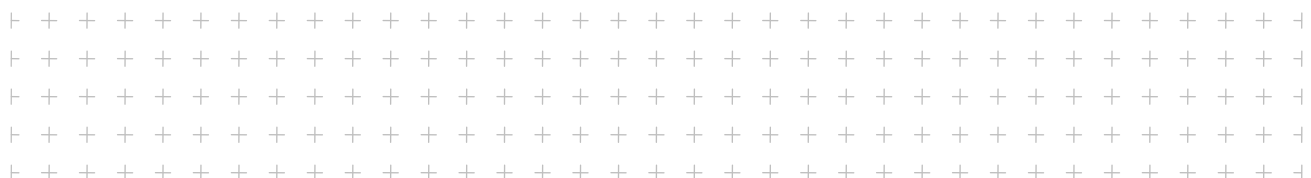
Inhalt dieses Kapitels:

- Halbleiter
- Diode
 - Anwendung der Diode in Gleichrichterschaltungen
 - Arten und Bauformen von Dioden
- Bipolartransistor
 - Grundsaltungen des Transistors
 - Arten und Bauformen von Transistoren
- Feldeffekttransistor (FET)



In den vorhergehenden Kapiteln wurden Stromkreise mit Spannungsquellen sowie passiven Widerständen und Lämpchen betrachtet. Um Signale und Daten zu verarbeiten und zu speichern, benötigt man aktive Bauelemente, die es erlauben, Ströme zu steuern, ohne mechanische Schalter oder Potentiometer zu verwenden. Sie dienen zur Verstärkung oder zum Schalten, sowie zur Erzeugung von Schwingungen. Die sog. *elektronischen* Bauelemente gibt es in zwei Hauptklassen:

1. **Vakuumelektronik:** Röhren, in denen ein glühender Pol (die *Kathode*) Elektronen ausstrahlt, die von einem weiteren Pol (die *Anode*) wieder aufgefangen werden. Durch Anlegen einer Spannung an ein Gitter zwischen diesen beiden Polen lässt sich der Elektronenstrom steuern. Elektronenröhren wurden 1906 erfunden, waren aber sperrig, und benötigten zum Beheizen der Kathode viel Leistung.
2. **Festkörperelektronik:** Anfang der 1930er Jahre wurde die Halbleiterdiode erfunden, 1947 der Bipolartransistor. Diese beiden elementaren Halbleiterbauelemente sowie ihre Nachfolgeentwicklungen revolutionierten die Elektronik – Digitaltechnik wurde durch sie überhaupt erst praktikabel!



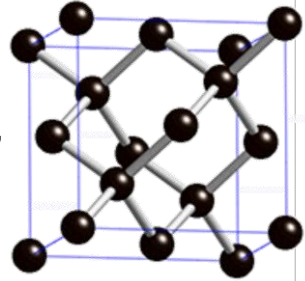
¹⁾ Elektronik = „Lehre von der Steuerung der Elektronen“

Leitungsmechanismen in Halbleitern

Halbleiterwerkstoffe

Halbleiterbauelemente bestehen aus Werkstoffen, die zwar ein Kristallgitter bilden, aber – anders als Metalle – nur sehr wenige freie Ladungsträger für die Stromleitung aufweisen:

Ein sehr häufig verwendetes Element ist *Si* (Silizium), welches im Periodensystem die Ordnungszahl 14 hat, mit einem Kern aus 14 Protonen und 14 Neutronen. Von den 14 Elektronen sind 10 auf der ersten und zweiten Schale fest gebunden, die restlichen vier sog. *Valenzelektronen* befinden sich auf der äußersten Schale, d.h. Silizium ist *vierwertig*. Silizium bildet eine Diamantgitterstruktur (s. **Bild** rechts), bei der sich jedes Atom an vier Nachbaratomen bindet. Jedes der vier *Valenzelektronen* umkreist den eigenen Kern und je einen der vier Nachbarkerne – damit „sieht“ jedes der Atome eine äußerste Elektronenschale, die mit 8 Elektronen voll-ständig gefüllt ist.



■ [commons.wikimedia.org]

Für die Leitung des elektrischen Stromes stehen in einem reinen Halbleiter kaum freie Ladungsträger zur Verfügung – der spezifische Widerstand dieser Materialien ist daher sehr groß:

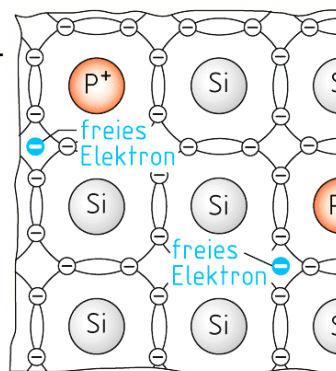
$$\rho_{\text{Si}} = 1 \cdot 10^9 \Omega \text{mm}^2 \text{m}^{-1}, \quad \text{zum Vergleich: } \rho_{\text{Cu}} = 1,78 \cdot 10^{-2} \Omega \text{mm}^2 \text{m}^{-1}$$

Elektronenleitung und Löcherleitung durch *Dotierung*

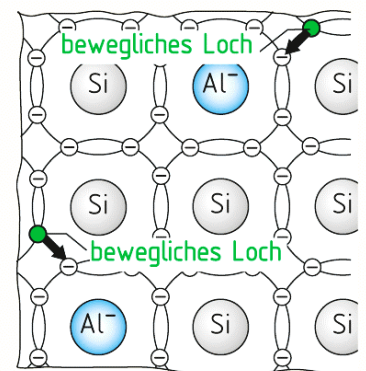
Wird der Halbleiter gezielt verunreinigt (*dotiert*), so kann das die Leitfähigkeit drastisch erhöhen. Dabei gibt es zwei Mechanismen, s. **Bild**:

a) Elektronenleitung

Wird Silizium mit *fünfwertigen* Fremdatomen dotiert, so fügen sich diese Atome (links im Bild z.B. **P** = *Phosphor*) in das Kristallgitter ein. Allerdings gibt es mit fünf Valenzelektronen eines mehr, als für die Bindung zu vier Nachbarn benötigt wird: Das überschüssige Elektron wird zu einem frei beweglichen *negativen* Ladungsträger, man spricht von einem **N-Leiter**.



a) N-Leiter



b) P-Leiter



■ aus [BumilFE], mit freundlicher Genehmigung

b) Löcherleitung

Wird das Silizium umgekehrt mit *dreiwertigen* Fremdatomen (auf der rechten Seite im Bild oben z.B. **Al** = *Aluminium*) dotiert, so fehlt zur vollständigen Bindung mit vier Nachbarn ein Valenzelektron: Das fehlende Elektron stellt eine *positiv* geladene Lücke dar, ein sog. Loch, das wie ein frei beweglicher *positiver* Ladungsträger wirkt. Diesen *p*-dotierten Halbleiter bezeichnet man auch als **P-Leiter**.

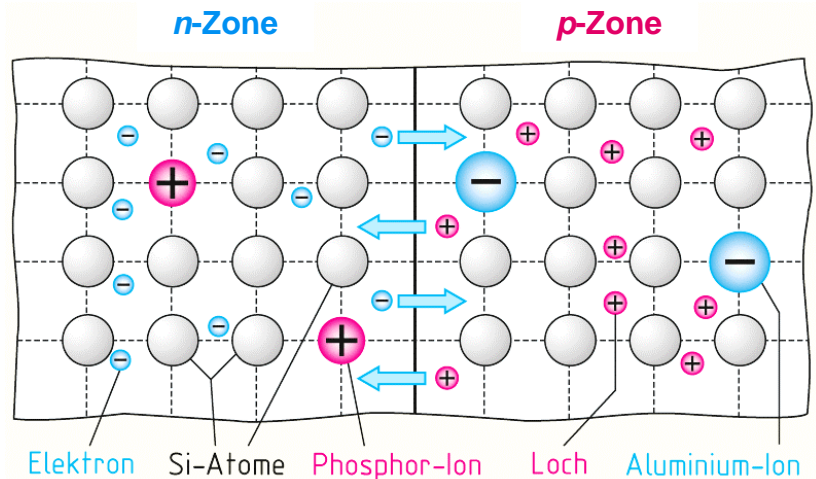
Der pn -Übergang

■ Aufbau eines pn -Überganges

Werden n - und p -dotierte Halbleiter in Kontakt miteinander gebracht, so entsteht ein sog. **pn -Übergang** (engl. *Junction*), der die Grundfunktionalität fast aller Halbleiterbauelemente bildet:

An der Kontaktstelle kommt es zu einem gegenseitigen Austausch der Ladungsträger, wie im **Bild** unten dargestellt:

- Elektronen diffundieren von der n -dotierten Seite zur p -dotierten, um dort mit den Löchern zu rekombinieren. Sie hinterlassen positiv geladene, ortsgebundene Ionen auf der n -Seite.
- Löcher diffundieren von der p - zur n -dotierten Seite, um dort mit freien Elektronen zu rekombinieren. Sie hinterlassen negativ geladene, ortsgebundene Ionen auf der p -Seite.

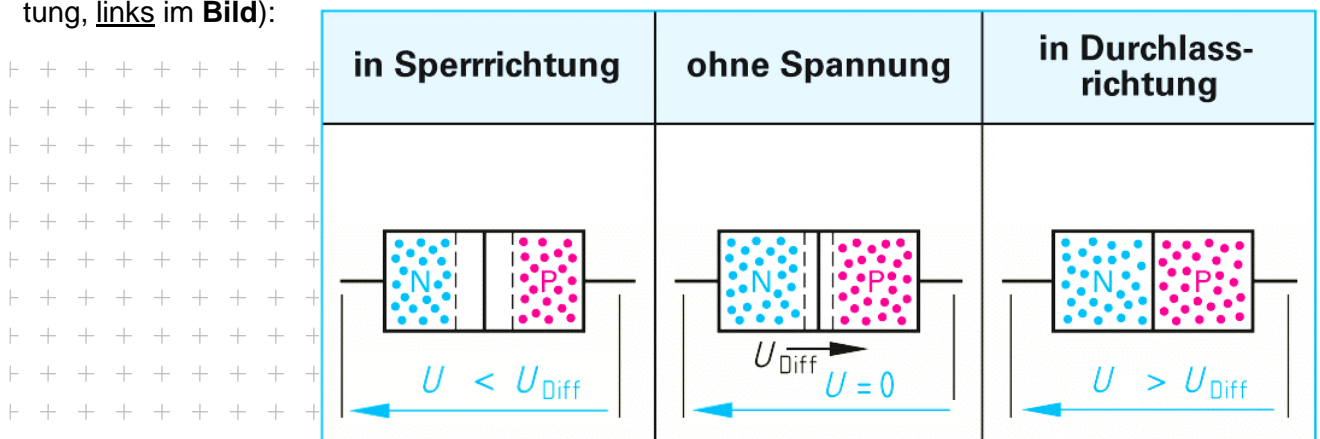


■ aus [BumilFE], mit freundlicher Genehmigung

Das Resultat ist eine sog. *Sperrschicht*, in der alle freien Ladungsträger durch *Rekombination* entfernt wurden.

Beispiel Verhalten des pn -Überganges

Aufgrund der ortsgebundenen Ionen (positiv in der n -Zone, negativ in der p -Zone) bildet sich in der Sperrschicht eine sog. *Raumladungszone*, die eine weitere Diffusion freier Ladungsträger verhindert (Gleichgewicht!). Ohne Anlegen einer äußeren Spannung baut sich an der Kontaktstelle eine **Diffusionsspannung** U_{Diff} auf, im **Bild** unten in der Mitte dargestellt. Um den pn -Übergang leitfähig zu machen, muss diese Spannung durch Anlegen einer äußeren Spannung $U > U_{\text{Diff}}$ überwunden werden (*Durchlassrichtung*, rechts im Bild). Das Anlegen einer negativen Spannung $U < 0$ hingegen bewirkt eine Vergrößerung der isolierenden Sperrschicht, es fließt kein Strom (*Sperrrichtung*, links im Bild):



■ nach [BumilFE], mit freundlicher Genehmigung

Die Diode

Der auf der vorhergehenden Seite beschriebene *pn*-Übergang implementiert eine **Diode**, ein elementares Halbleiterbauelement mit zwei Anschlüssen. Dioden bestehen meist aus Silizium.

Funktion und Betriebsbereiche

Eine Diode kann in den drei unten beschriebenen Bereichen betrieben werden. In der hydraulischen Analogie lässt sich das Verhalten der Diode als Rückschlagventil auffassen, s. Bild unten:

(1) Im **Durchlassbereich** (Wasser von hinten) öffnet die Klappe:

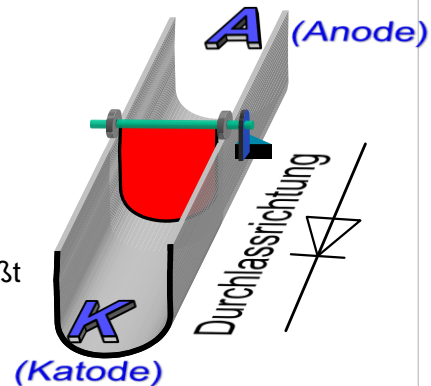
⇒ Der Strom kann fließen!

(2) Im **Sperrbereich** (Wasser von vorne) schließt die Klappe:

⇒ Der Widerstand der Diode ist extrem hoch und es fließt nur ein ganz geringer Leckstrom.

(3) Im **Durchbruchbereich** (sehr hoher Wasserdruck von vorne) fließt trotz geschlossener Klappe Wasser über die Klappe.

⇒ ‚Land-Unter‘ – trotz Sperrrichtung fließt jetzt ein Strom!

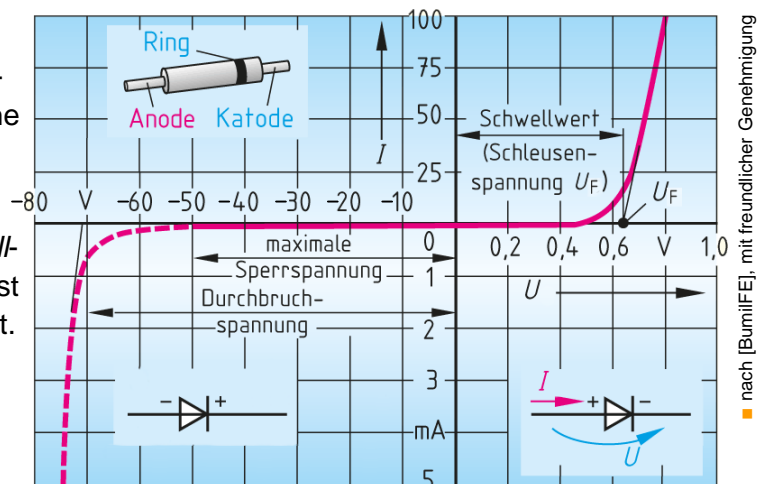


Das Schaltzeichen der Diode (rechts im Bild oben) gibt mit seinem Pfeil die Durchlassrichtung an.

Kennlinie

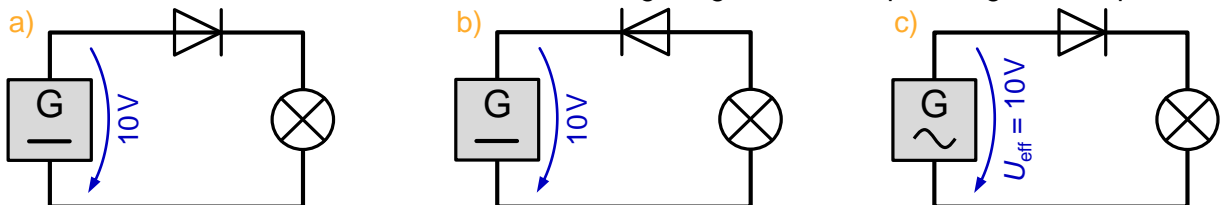
Die unten dargestellte sog. Spannungs-Strom-Kennlinie beschreibt das statische Verhalten einer Diode. Typische Kennwerte der Diode sind:

- Die **Flussspannung** U_F (auch **Schwell-** oder **Schleusenspannung** genannt) ist die Spannung, ab der die Diode leitet.
- Bei der **Durchbruchspannung** U_{BR} geht die Diode vom Sperr- in den Durchbruchbereich über.



Beispiel Die Diode im Stromkreis

Unten sind drei einfache Stromkreise mit Dioden gezeigt. Die Nennspannung der Lampen sei 10 V.



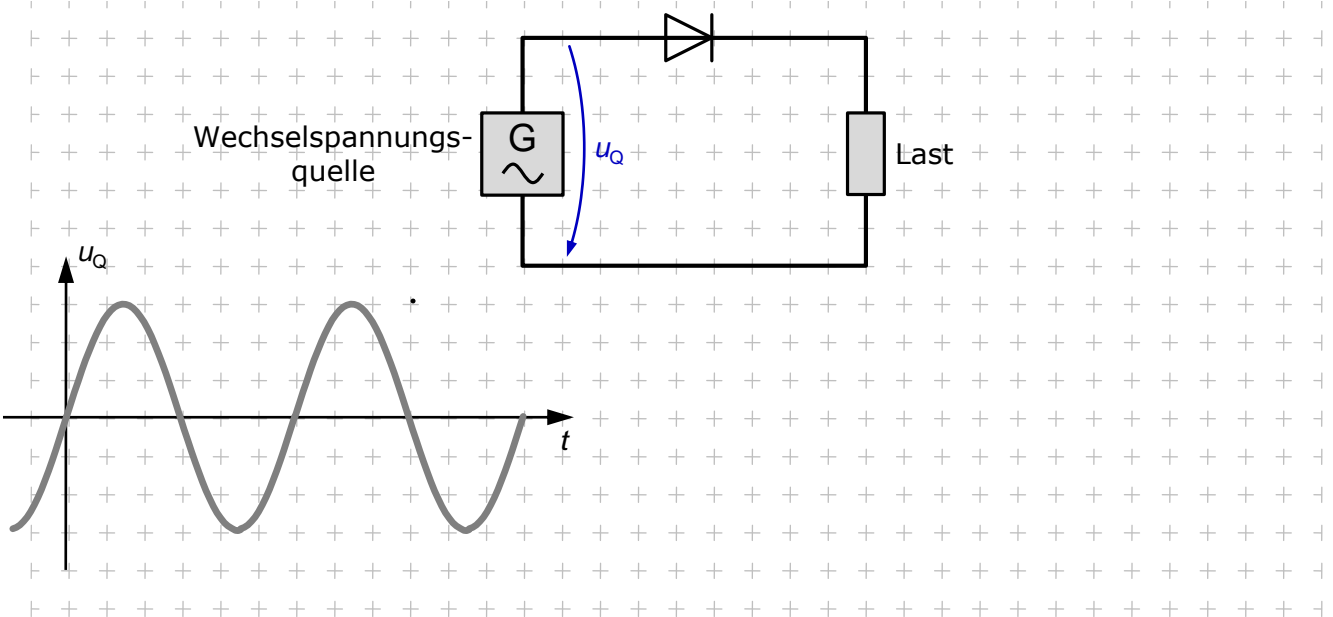
Schreiben Sie dazu, wie hell die Lampen leuchten: „**voll**“, „**fast voll**“, „**schwach**“ oder „**gar nicht**“.

Anwendung der Diode in Gleichrichterschaltungen

Gleichrichter dienen dazu, Wechselspannung in Gleichspannung umzuwandeln, mit der dann z.B. elektronische Geräte oder Motoren betrieben werden.

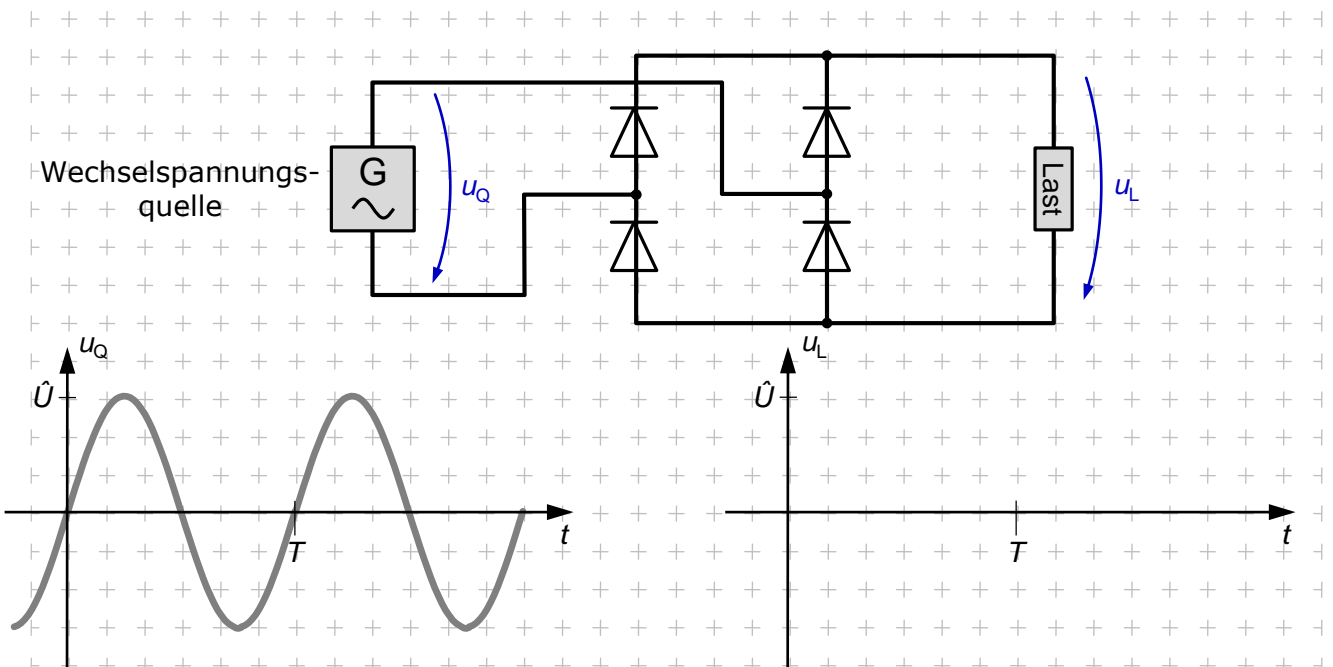
Einweggleichrichtung

Mit der Diode werden nur die positiven Halbwellen der Wechselspannung genutzt:



Brückengleichrichtung

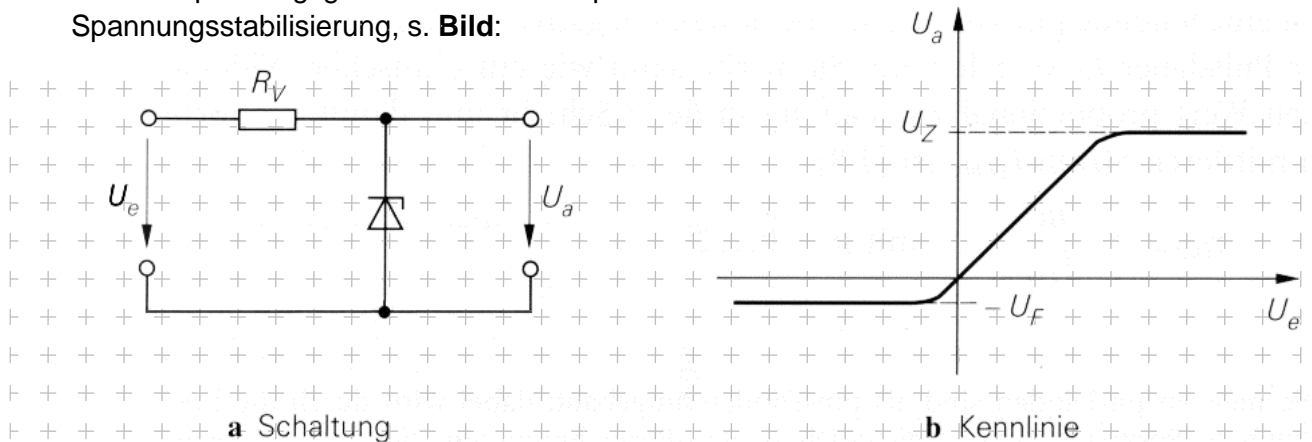
Von den vier Dioden der Brückenschaltung sind für jede Halbwelle immer zwei paarweise in Durchlassrichtung, so dass beide Halbwellen der Wechselspannung genutzt werden können:



Diodentypen

■ Funktion und Arten von Dioden

- a) **Gleichrichterdioden** dienen zur Spannungsversorgung elektronischer Geräte mit Wechselspannung, wie auf den vorhergehenden Seiten beschrieben. Folgende Varianten existieren:
- ⇒ Siliziumdiode: Diese kommt am häufigsten vor. Die Flussspannung beträgt $U_F = 0,6V - 0,7V$.
 - ⇒ Schottky-Diode: Statt p - und n -dotiertem Silizium besteht der pn -Übergang hier aus Silizium und Aluminium. Deutlich geringere Flussspannung als bei Silizium: $U_F = 150 - 450 \text{ mV}$, und schnelleres Umschalten (bis hinunter zu 100 ps) zwischen Durchlass- und Sperrbetrieb.
 - ⇒ Germaniumdiode: Ebenfalls eine relativ geringe Flussspannung von $U_F = 0,3V - 0,4V$; aber empfindlicher gegenüber hohen Temperaturen.
- b) **Kleinsignaldioden** dienen auch zur Gleichrichtung von Wechselspannungen, aber nicht zur Stromversorgung, sondern für elektrische Signale. Es gibt dieselben Typen wie unter a) beschrieben, die Bauformen sind aber deutlich kleiner.
- c) **Zenerdioden** sind Siliziumdioden, die im *Durchbruchbereich* betrieben werden. Bei einer definierten Spannung gehen diese vom Sperrbetrieb in den leitenden Zustand. Sie dienen zur Spannungsstabilisierung, s. Bild:



- d) **Leuchtdioden (LEDs)** emittieren Licht, wenn sie in Durchlassrichtung betrieben werden. Sie werden als Signalleuchten sowie zur Beleuchtung eingesetzt.
- e) **Fotodioden & Solarzellen** erzeugen Strom aus Licht! Erstere werden zur Messung der Lichtstärke genutzt, letztere als Generator. Im U/I -Diagramm (S. 5) arbeiten sie im 4. Quadranten.

■ Bauformen von Dioden

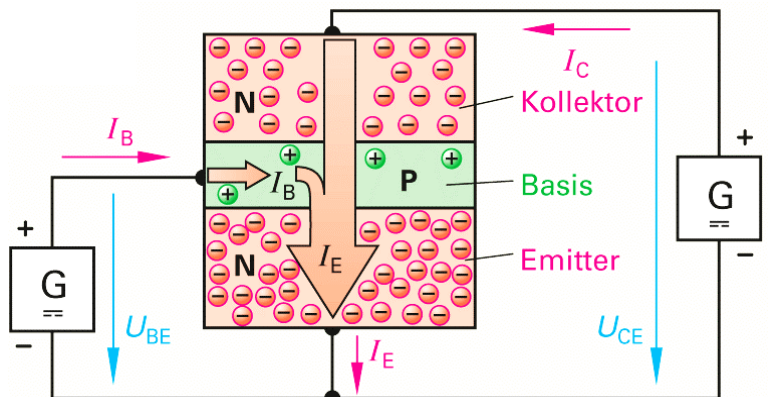


Funktion eines Bipolartransistors

■ Aufbau: Sandwich-Struktur

Der Bipolartransistor besteht aus drei unterschiedlich dotierten Halbleiterschichten, die als Anschlüsse nach außen geführt sind: Die *Basis* (**B** Base), der *Emitter* (**E** Emitter) und der *Kollektor* (**C** Collector). Auf den kommenden zwei Seiten wird zunächst der *npn*-Typ (= Abfolge der Dotierung der Schichten) besprochen – die Unterschiede zum *pnp*-Typ folgen dann auf der Seite **10**.

Der Kollektor-Basis-Übergang des Transistors im **Bild** bildet, ähnlich einer Diode, im Ruhezustand eine Sperrschicht. Diese verhindert, dass es einen Stromfluss zwischen Kollektor und Emitter gibt, trotz der Spannung U_{CE} . Wird nun die BE-Sperrschicht durch Anlegen der Spannung U_{BE} an die Basis ausgeräumt, so kann ein Kollektorstrom I_C fließen, der sehr viel größer ist als der Basisstrom I_B !



⇒ Erklärung:

Vom *Emitter* (= „Aussender“) fließen Elektronen in Richtung *Basis*, die dort jedoch nicht mit (positiven) Löchern rekombinieren, sondern durch die CB-Sperrschicht schießen und vom *Kollektor* (= „Sammler“) aufgefangen werden.

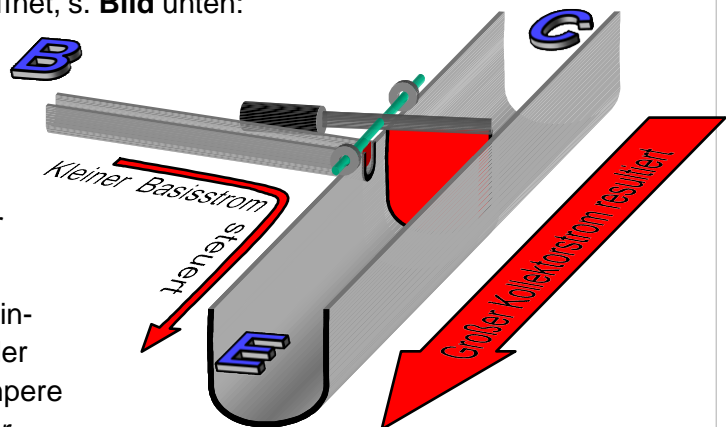
■ Funktion eines npn-Transistors: Erklärt als hydraulische Analogie („Wassermodell“)

Der Basisstrom drückt gegen die kleine Klappe, welche dann mit Hilfe des Gegengewichtes die auf der gleichen Achse befestigte große Klappe öffnet, s. **Bild** unten:

Im Ruhezustand hat die **CE**-Strecke einen sehr hohen Widerstand – sie sperrt die anliegende Spannung, so dass kein Strom fließt.

Fließt zwischen **B** und **E** ein Strom, so öffnet das Tor der CE-Strecke und bewirkt, dass hier ein sehr viel größerer Strom fließen kann!

Die Stromstärke am Basisanschluss eines Kleinsignaltransistors beträgt maximal einige mA; der Kollektor kann dann Ströme bis zu einigen Ampere leiten. Diesen Effekt nennt man auch *Stromverstärkung*, auf der nächsten Seite beschrieben.





Halbleiter

Diode

Bipolartransistor

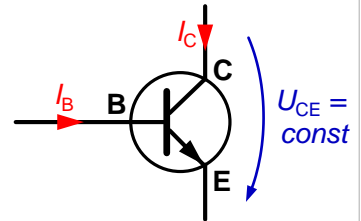
Feldeffekttransistor

Aufgabe des Transistors in einer Schaltung

■ Stromverstärkung

Für eine bestimmte *Kollektor-Emitter*-Spannung ist der Kollektorstrom nahezu proportional zum Basisstrom. Das Verhältnis der beiden Ströme ist somit nahezu konstant und wird **Stromverstärkung** β des Transistors genannt.

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$



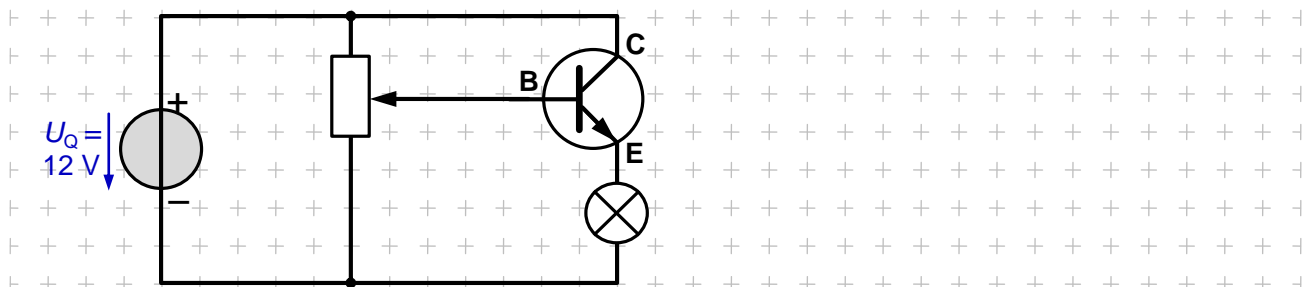
■ Grundsaltungen des Transistors

In einer Schaltung mit einem Transistor unterscheidet man den *Steuerstromkreis* (meist die Masche der Schaltung, in dem kleine Ströme fließen), und den *Laststromkreis* (die Masche der Schaltung mit größeren Strömen). Je nachdem, welcher der drei Anschlüsse des Transistors auf einem festen Bezugspotential liegt, unterscheidet man verschiedene Grundsaltungen:

- Bei der **Kollektorschaltung** ist die Last am *Emitter* angeschlossen. Ein Siliziumtransistor ist bestrebt, seine *Basis-Emitter*-Spannung konstant auf $U_{BE} \approx 0,7 \text{ V}$ zu halten. Damit „folgt“ die Lastspannung der Basisspannung, so dass die Schaltung auch „Emitterfolger“ genannt wird.

Beispiel Dimmen eines Lämpchens mittels Emitterfolger

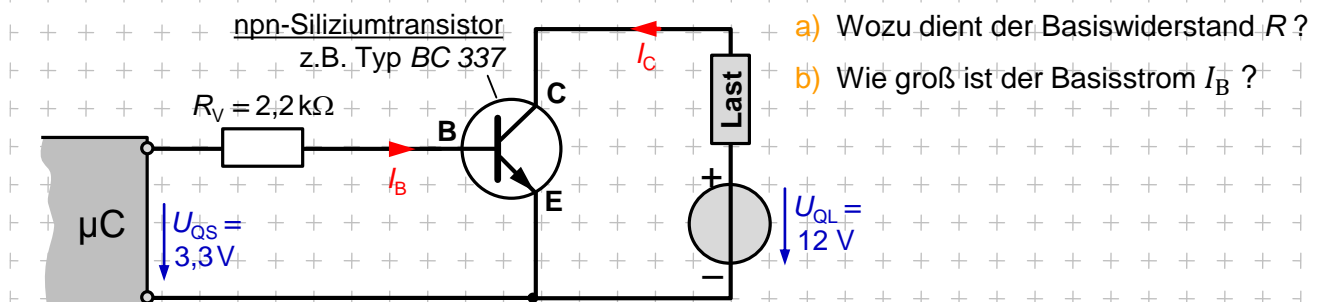
Die Helligkeit des Lämpchens im **Bild** kann mit einem Potentiometer gesteuert werden. Welche Spannung U_L fällt am Lämpchen ab, wenn das Potentiometer genau in der Mitte steht?



- Bei der **Emitterschaltung** ist die Last am *Kollektor* angeschlossen. Der Kollektorstrom I_C ergibt sich damit aus dem Basisstrom und der Stromverstärkung des Transistors: $I_C = I_B \cdot \beta$.

Beispiel Praxisbeispiel: Schalten einer Last mit sehr wenig Strom

Soll mit dem Ausgang eines Mikrocontrollers eine größere Last geschaltet werden, lässt sich das einfach mit einem Transistor bewerkstelligen. Die Last kann dabei durchaus auch mit einer höheren Spannung arbeiten als der Mikrocontroller, wie die 12-V-Last in folgendem **Bild**:



- Wozu dient der Basiswiderstand R ?
- Wie groß ist der Basisstrom I_B ?

Weitere Arten von Transistoren







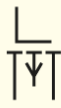



■ Überblick

Der Bipolartransistor war der erste Transistortyp, der Anfang der 1950er Jahre kommerziell eingesetzt wurde.

Inzwischen gibt es eine ganze Reihe verwandter Typen – s. Bild rechts. Allen gemeinsam sind folgende Eigenschaften:

- Sie verfügen über drei Anschlüsse.
- Einer der Anschlüsse ist in der Lage, den Widerstand zwischen den beiden anderen zu steuern.

Transistor-Arten mit Schaltzeichen

| Bipolare Transistoren | | | Unipolare Transistoren | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| | | | Uni-junction-Transistor | Feldeffekt-Transistoren | | | | | |
| | | | | Sperrschicht-FET | Isolierschicht-FET | | | | |
| | | | | | P-Kanal | | N-Kanal | | |
| NPN | PNP | IGBT* | N-Typ | P-Kanal | N-Kanal | Anreicherung | Verarmung | Anreicherung | Verarmung |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

* Der IGBT (Seite 246) ist eine Kombination aus einem bipolaren und einem unipolaren Transistor.

* Der IGBT (Seite 246) ist eine Kombination aus einem bipolaren und einem unipolaren Transistor.

aus [BumilFE], mit freundlicher Genehmigung

■ Feldeffekttransistoren

Im Gegensatz zu Bipolartransistoren, bei denen sowohl Elektronen- als auch Löcherleitung eine Rolle spielen, erfolgt der Ladungstransport in **Feldeffekttransistoren (FETs)** ausschließlich mit einer Trägersorte – FETs zählen daher zu den sog. *Unipolartransistoren*. Während bei Bipolartransistoren ein Steuerstrom an der Basis fließen muss, um den Transistor leitend zu machen, genügt bei den FETs eine angelegte Spannung. Der Steuer-Anschluss **Gate** ist elektrisch isoliert vom Laststromkreis, den der FET mit seinen Anschlüssen **Drain** und **Source** steuert. Nachfolgend ein Praxisbeispiel, wie sich mittels FETs Lasten schalten lassen – direkt von einem Mikrocontroller.

Beispiel Verlustarmes Schalten großer Lasten mit Hilfe eines N-Kanal MOSFET

N-Kanal MOS(Metall-Oxide-Semiconductor)FETs (im Bild oben der zweite Typ von rechts) leiten an ihrer **Drain**→**Source**-Strecke, wenn die **Gate** Spannung U_{GS} deutlich größer als 0 V ist. Bei sog. *Logic-Level*-Typen reicht sogar eine Spannung von $U_{GS} = +5$ V, um den FET vollständig durchzuschalten. Diese Typen können direkt an den Ausgängen eines Mikrocontrollers oder eines Logik-Gatters (log. 0 $\hat{=}$ 0V, log. 1 $\hat{=}$ 5V) betrieben werden, um Lasten mit größeren Spannungen und Strömen von mehreren Ampere zu schalten:

