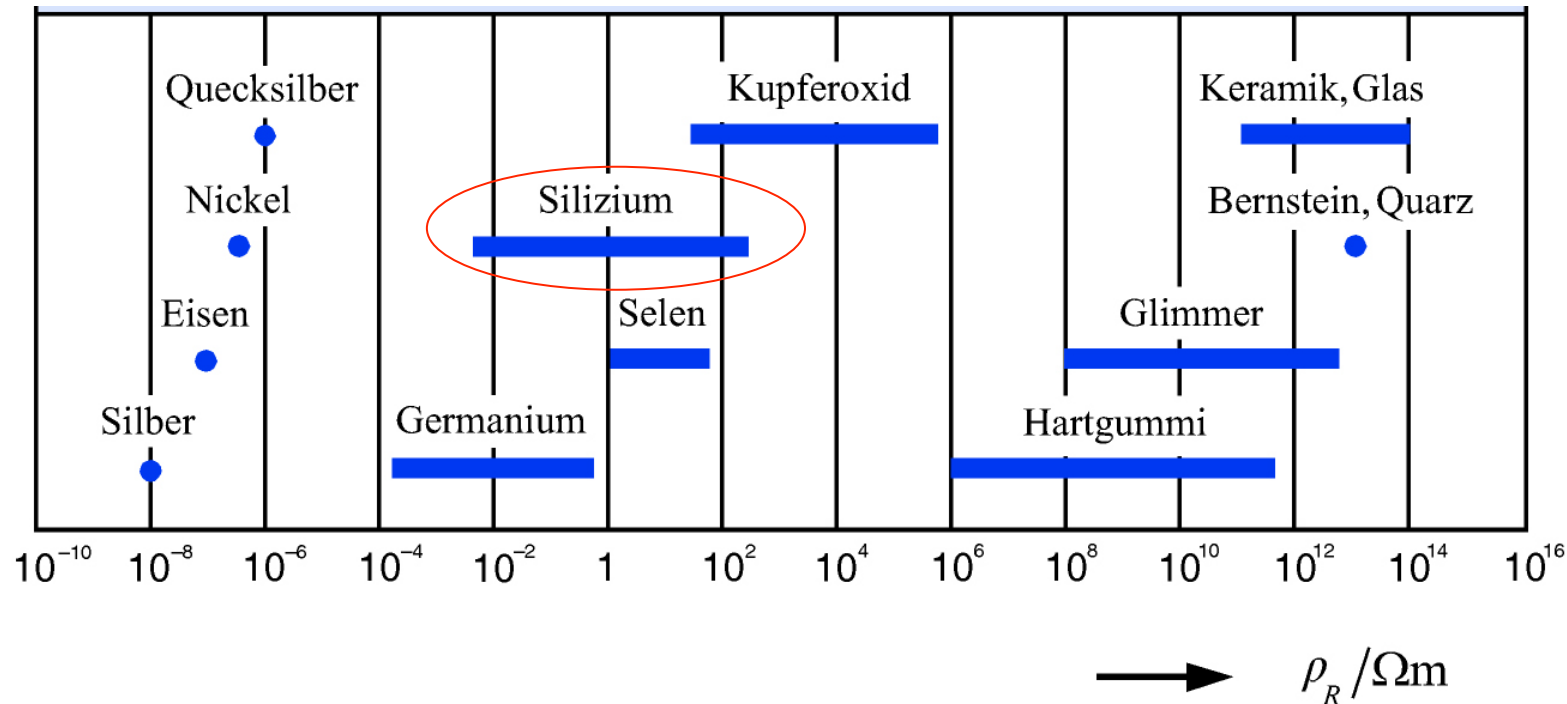


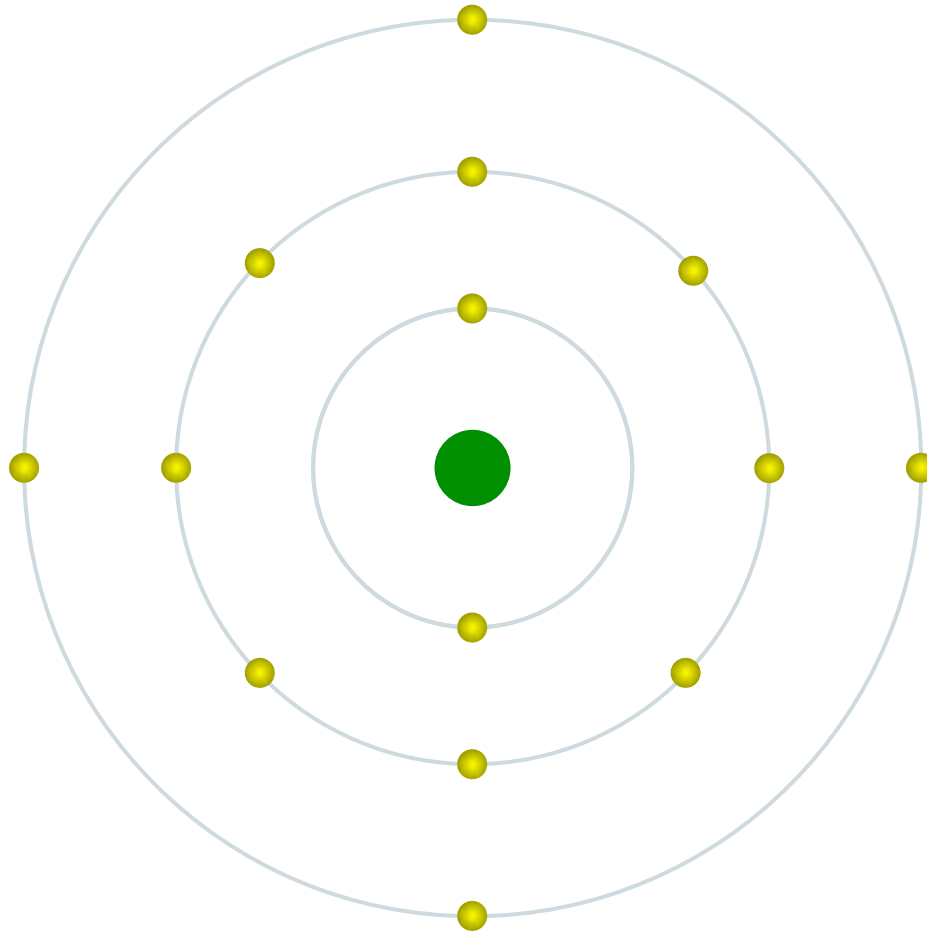
7. Halbleitertechnik

Leiter – Halbleiter – Nichtleiter



Halbleitermaterialien weisen einen spezifischen Widerstand auf, der zwischen dem von Leitern und Nichtleitern (Isolatoren) liegt. Durch gezielte Beeinflussung können die Eigenschaften von Halbleitern so verschoben werden, dass sie mehr in Richtung Leiter bzw. Nichtleiter gehen und so als steuerbare Schalter fungieren. Diese Eigenschaft wird verwendet, um binäre Zustände darzustellen: 1 = „Schalter ein“ = leitet, 0 = „Schalter aus“ = sperrt.

Modell des Siliziumatoms (nach Bohr)



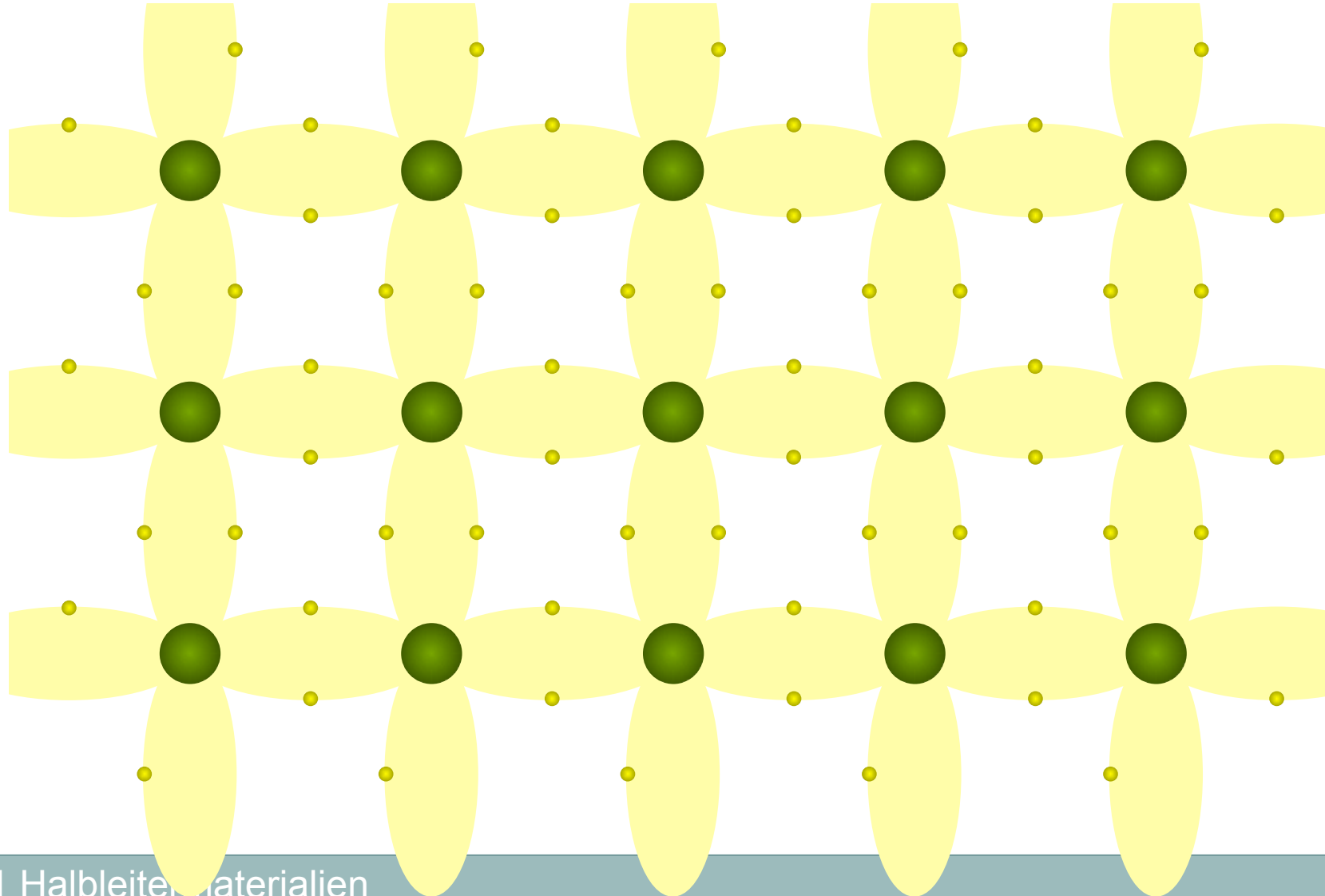
Schalenaufbau:

Die erste (innerste) Schale hat 2 Elektronen, die zweite 8 und die äußerste ("Valenzschale") hat 4 Elektronen

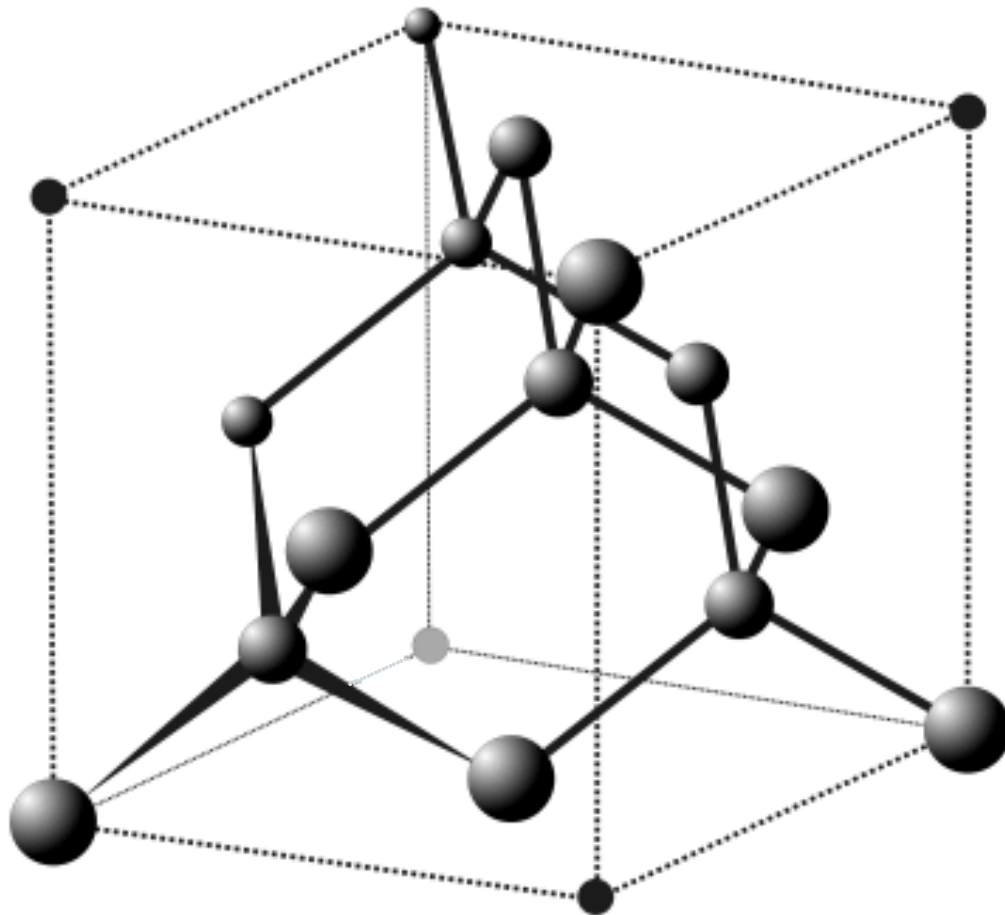
(**Valenzelektronen**). Sie ist nicht vollständig aufgefüllt, da sie bis zu 8 Elektronen aufnehmen kann.

Siliziumkristall

Jedes Siliziumatom teilt sich mit seinen vier Nachbarn je ein Elektron.



Diamantgitter

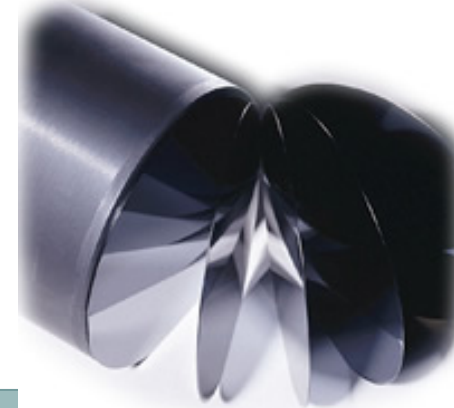
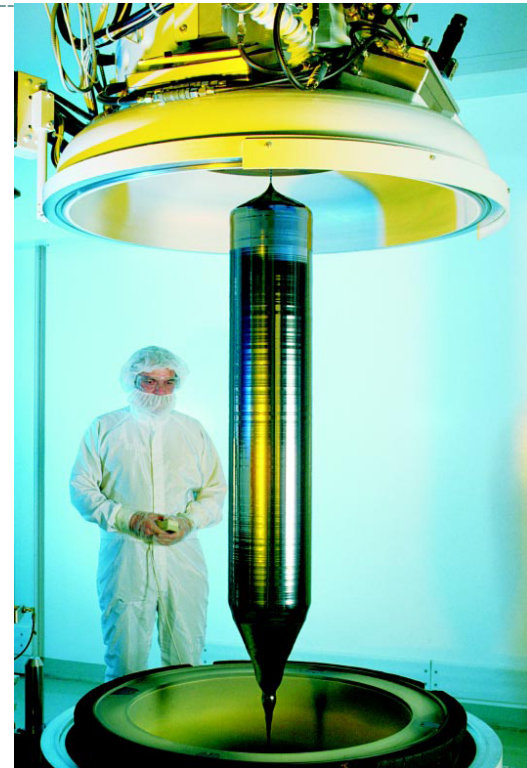


Die Grundstruktur des Siliziumkristalls ist dieselbe wie beim Diamant (Kristall des Kohlenstoffs). Größe der Einheitszelle (Seitenlänge): $5,43 \cdot 10^{-10}$ m. Anzahl der Atome pro Einheitszelle: 8.

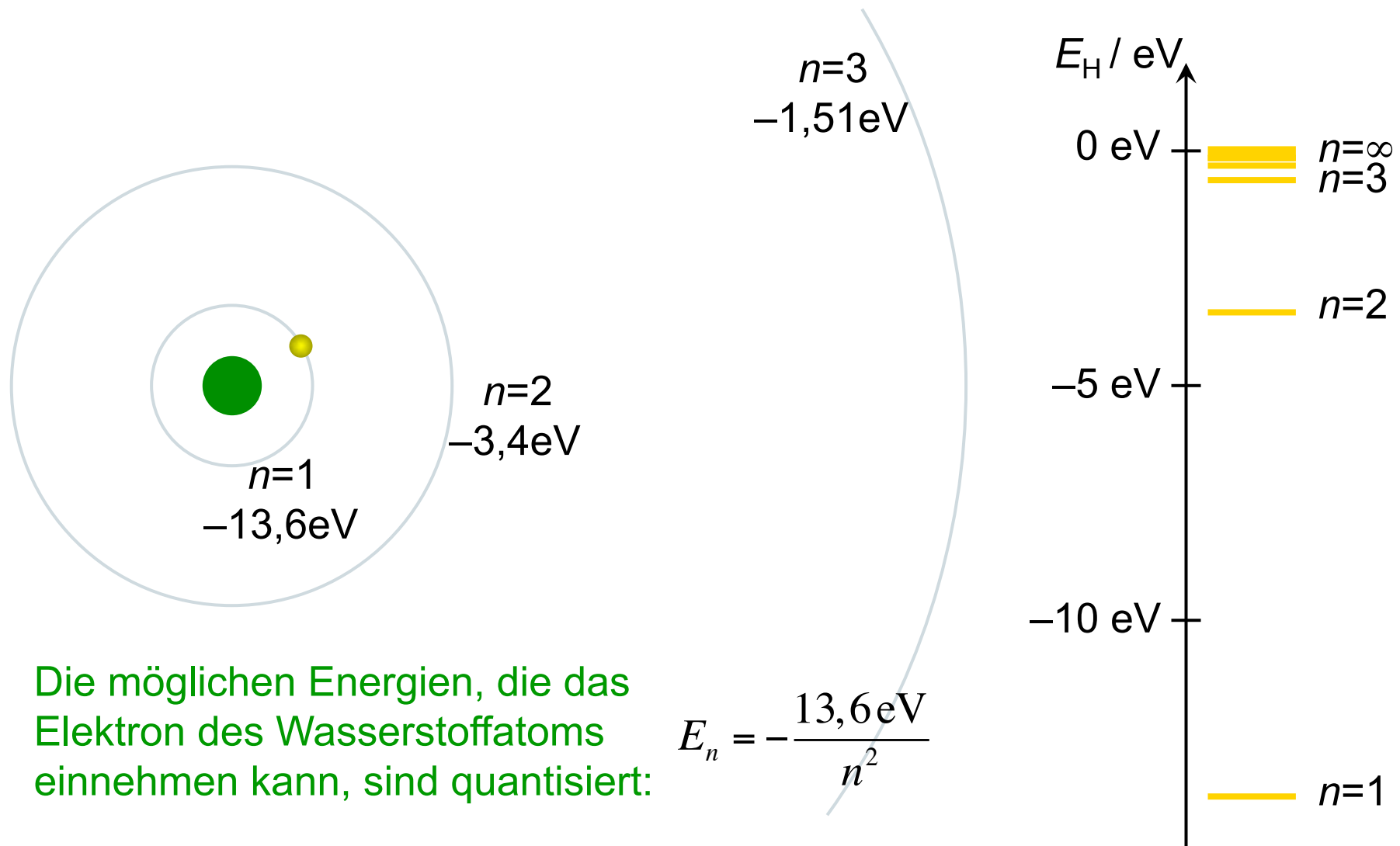
Herstellung von Silizium-Wafern

Das Ausgangsmaterial für die Fertigung von Halbleiterschaltungen ist monokristallines Silizium in hoher Reinheit. Es wird mit der sogenannten *Czochralski-Methode* hergestellt. Dazu wird ein Impfkristall (engl. *seed crystal*) in geschmolzenes Silizium abgesenkt. Beim Herausziehen aus der Schmelze lagern sich Siliziumatome an. Es wächst ein Kristall, dessen Gitterstruktur durch die des Impfkristalls vorgegeben ist.

Das Ziehen des Kristalls geschieht unter Rotation. Dadurch entstehen zylinderförmige Kristalle, die in Scheiben, sogenannte **Wafer**, gesägt werden.



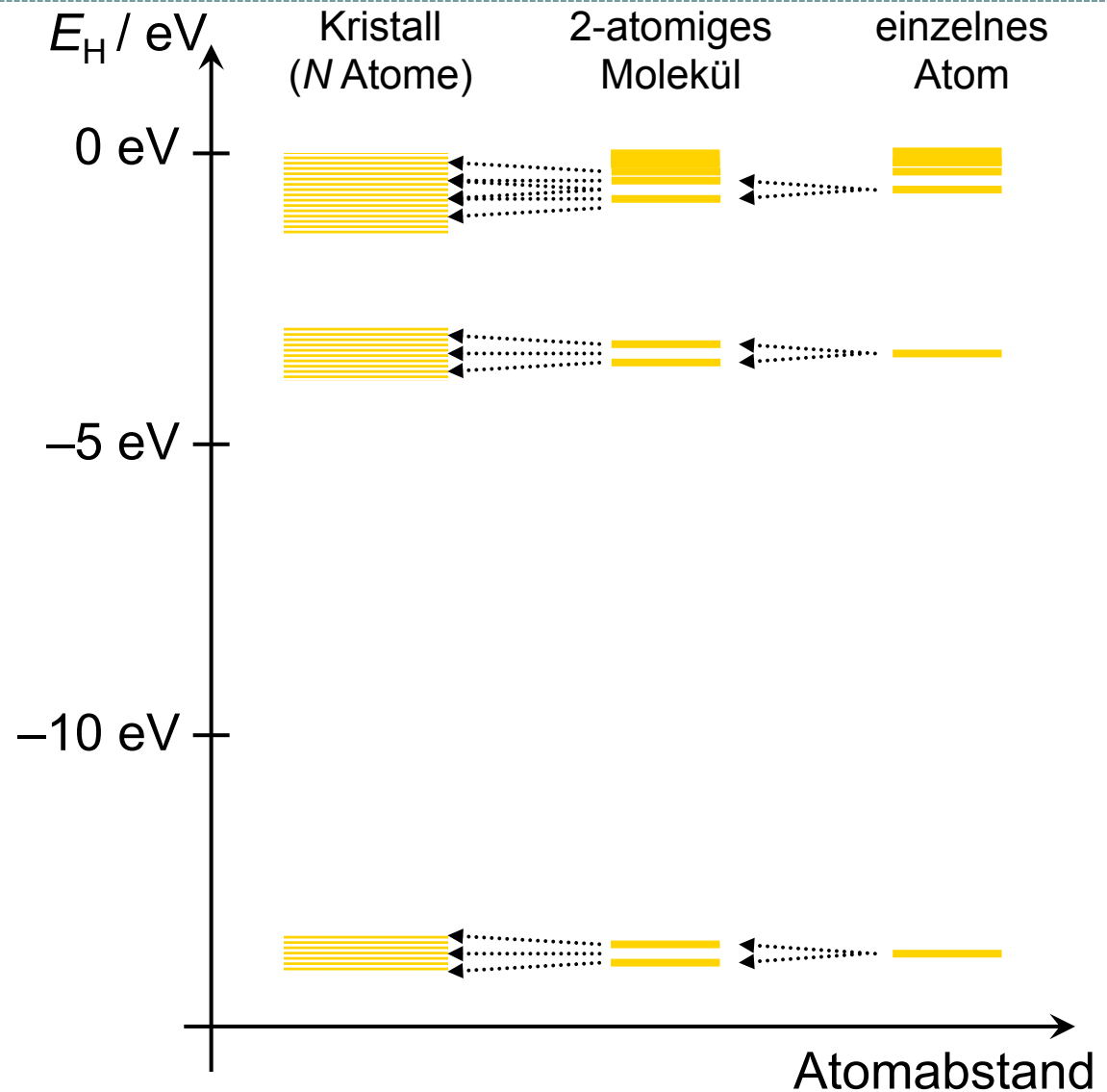
Energieniveaus (am Bsp. Wasserstoffatom)



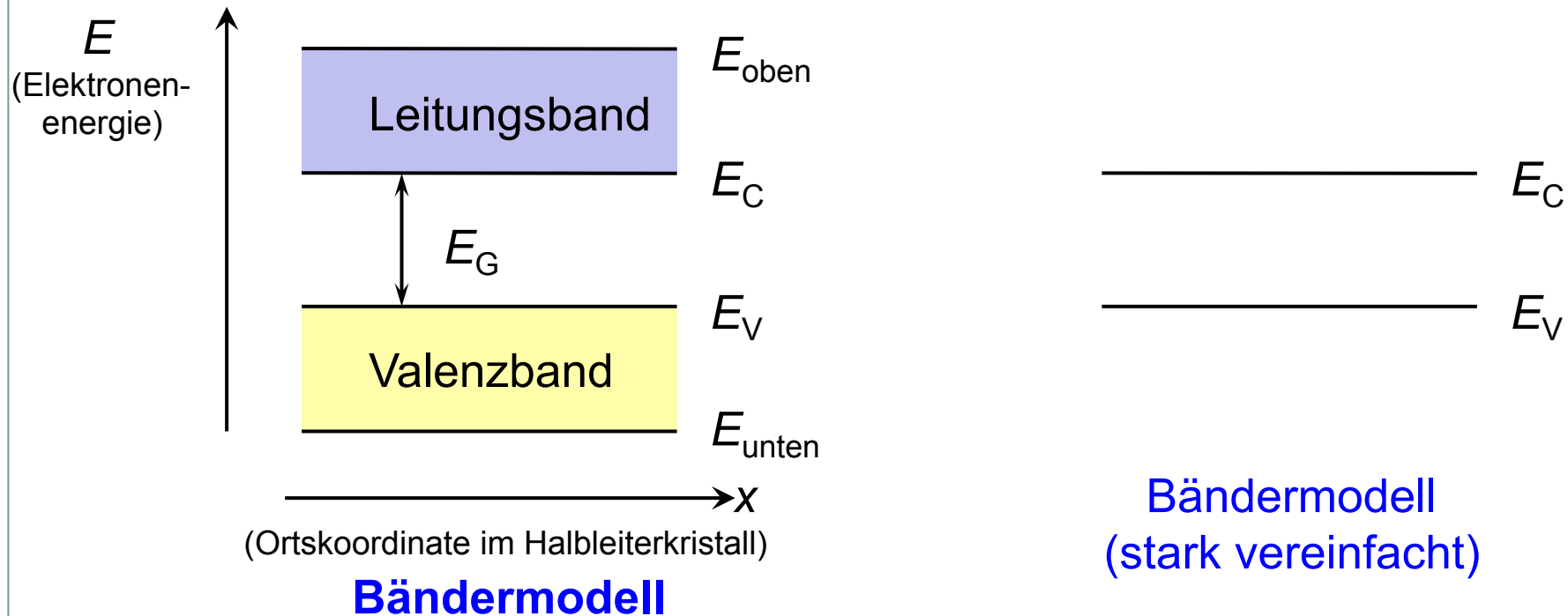
Energieniveaus in Mehratomsystemen

In einem Kristall sind die Atome nahe beieinander angeordnet und stehen in Wechselwirkung miteinander. Die Elektronen müssen dabei unterschiedliche Energiezustände einnehmen (Pauli-Prinzip). Bei N Atomen gibt es $2N$ mögliche Energieniveaus für die Elektronen.

Die Energieniveaus lassen sich durch **Energiebänder** veranschaulichen, in denen sehr viele Energieniveaus dicht beieinander liegen.



Bändermodell

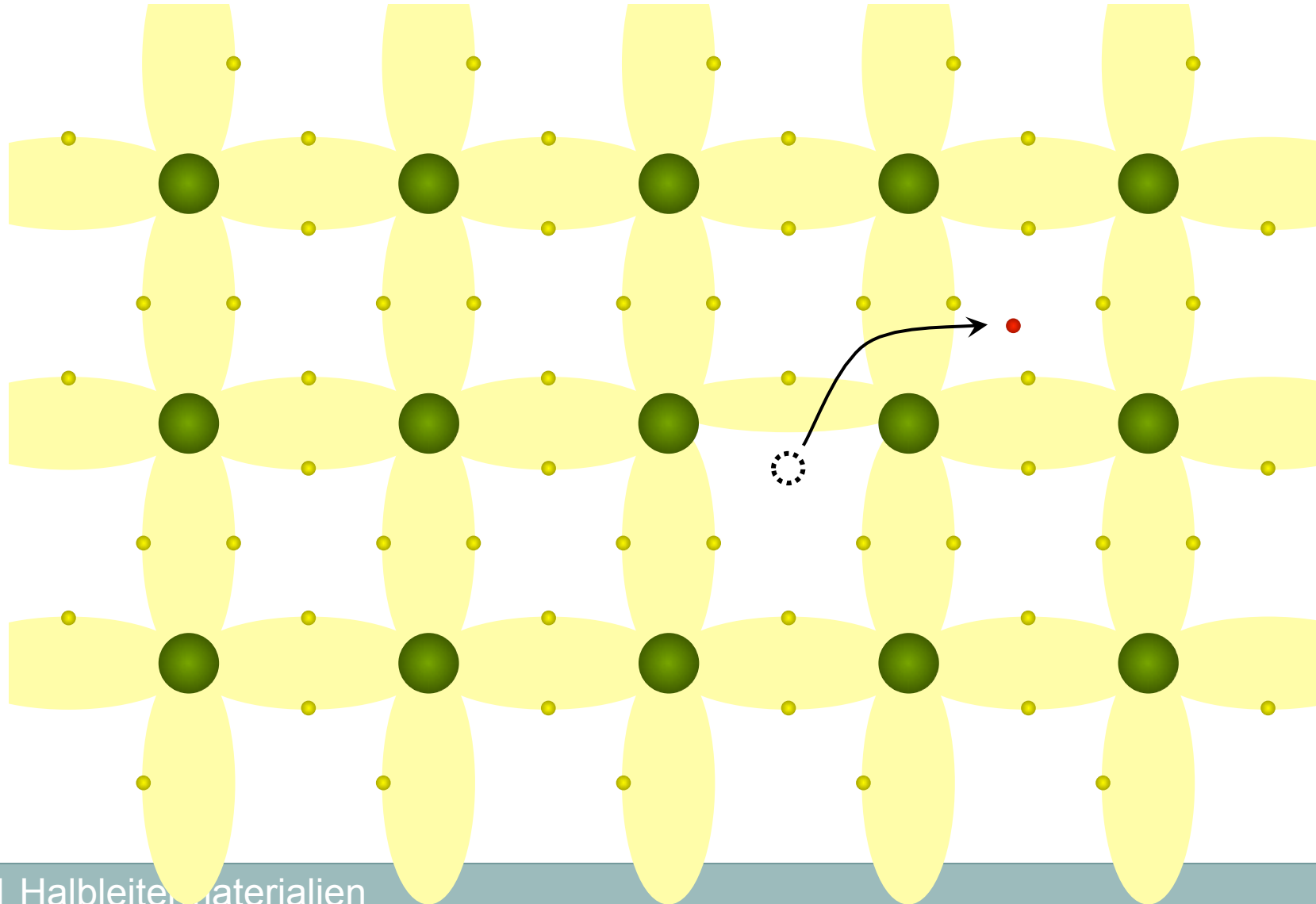


Die inneren 10 Elektronen der Siliziumatome sind sehr stark an den Atomkern gebunden. Sie werden durch die inneratomaren Kräfte kaum gestört. Es genügt daher, die Energiezustände, die aus der Valenzschale entstanden sind, sowie die Energiezustände, die aus den höheren Energieniveaus des Siliziumatoms, entstanden sind, zu betrachten.

Man spricht von **Valenzband** und **Leitungsband**.

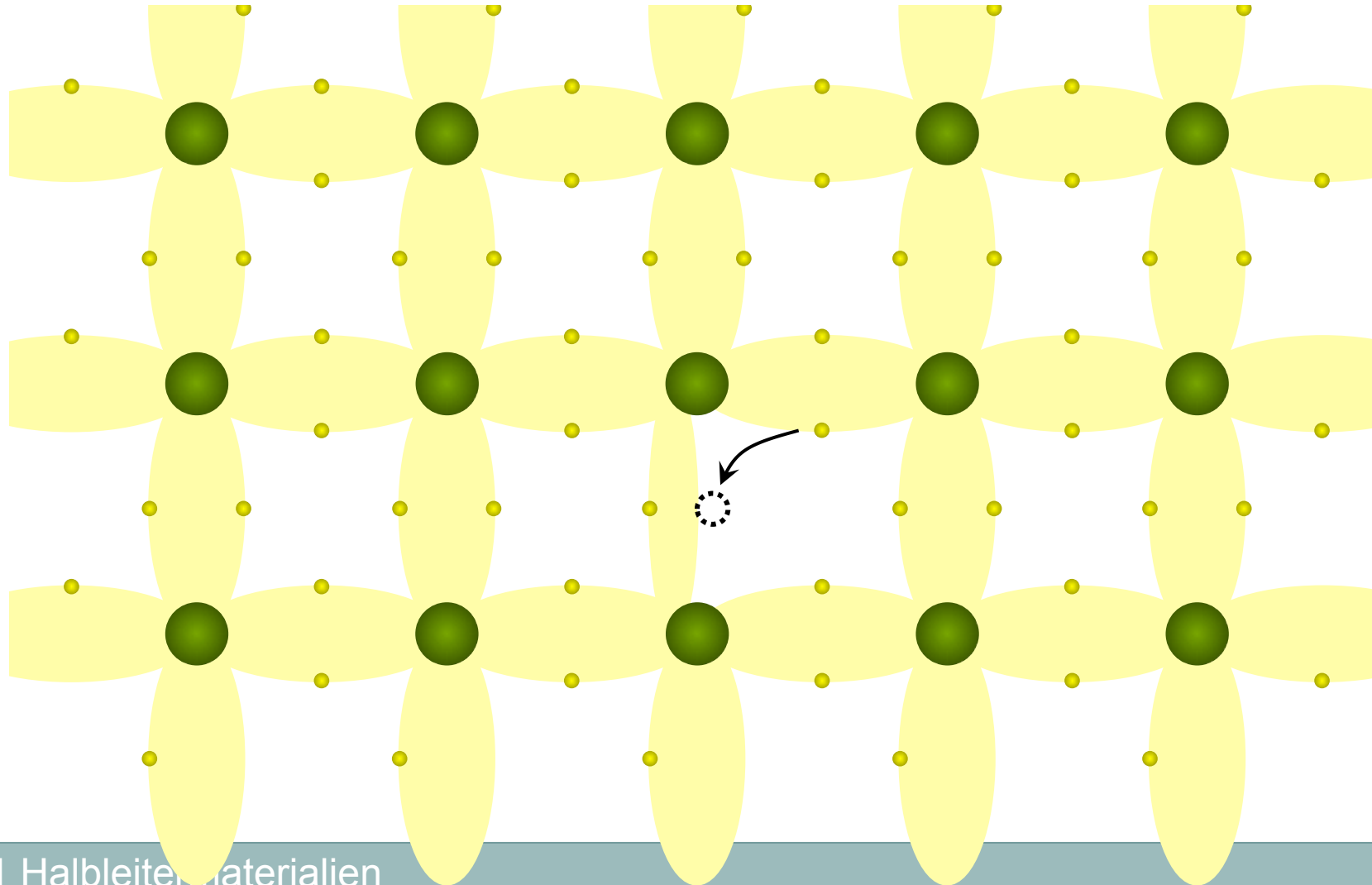
Leitungsvorgang im Halbleiterkristall

Durch thermische Anregung entstehen **freie Elektronen und Löcher**.

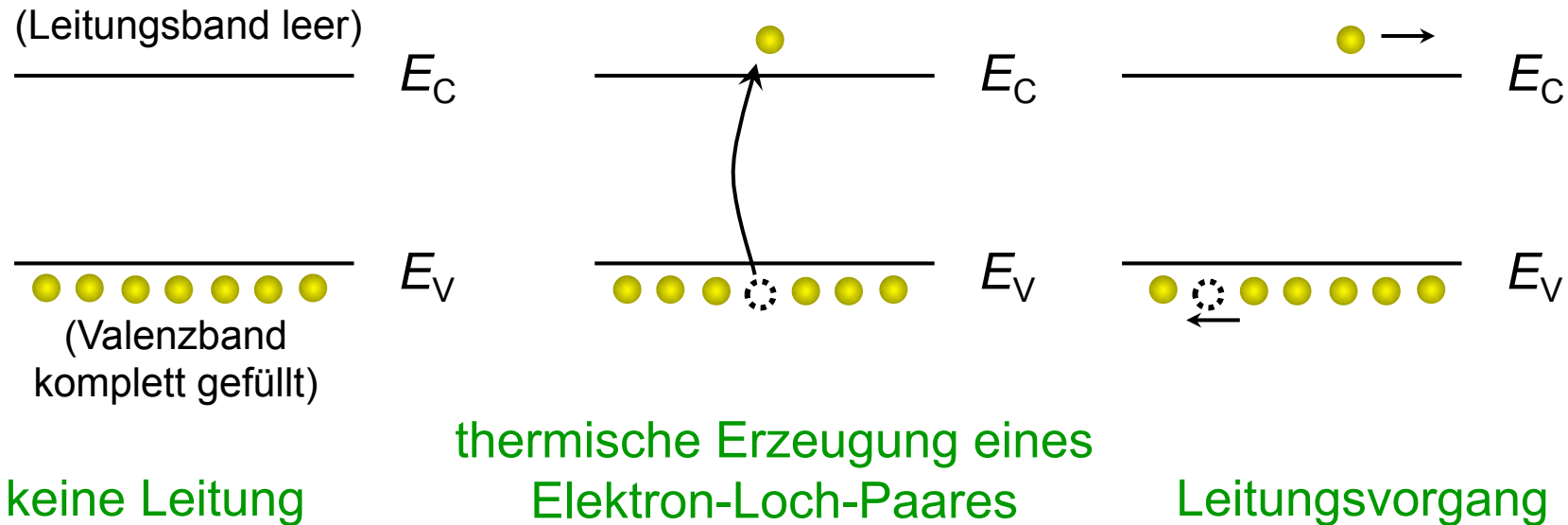


Löcherleitung

Löcher können wandern und damit Ladung transportieren.
Sie wirken wie positiv geladene Ladungsträger.



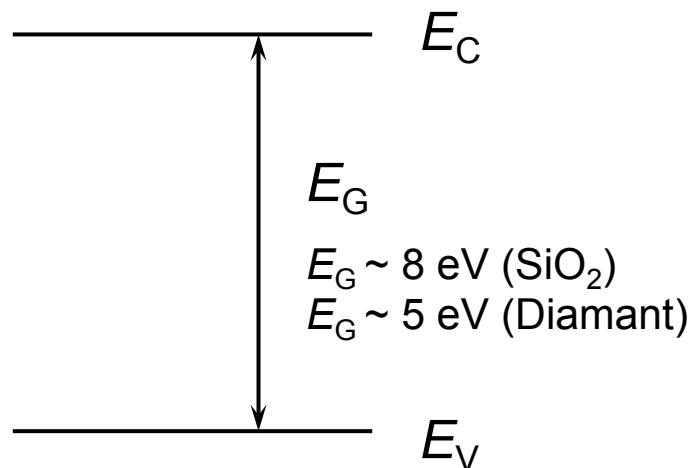
Darstellung im Bändermodell



In einem reinen Halbleiterkristall kann elektrischer Strom fließen, wenn thermisch erzeugte Ladungsträger zur Verfügung stehen. Elektronen und Löcher entstehen dabei gleichzeitig ("**Generation**") und tragen auch gleichzeitig zum Stromtransport bei. Elektronen fließen im Leitungsband. Löcher fließen im Valenzband. Ein reiner Halbleiter besitzt also eine gewisse **Eigenleitfähigkeit** (bei Silizium ca. $10^{-2}/(\Omega\text{m})$, Germanium ca. $1/(\Omega\text{m})$). Elektronen und Löcher können (unter Abgabe von Energie) auch wieder miteinander verschmelzen ("**Rekombination**").

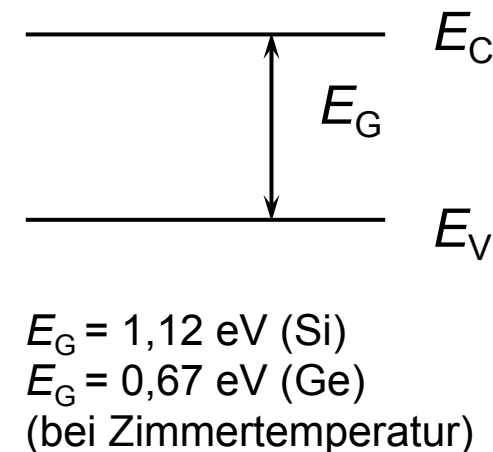
Klassifizierung von Materialien

Obwohl für Halbleiter entwickelt, lässt sich das Bändermodell (mit geringen Modifikationen) auf alle Materialien übertragen. Der Hauptunterschied liegt nicht in der Natur der Energiebänder, sondern in der Größe der **Bandlücke** (engl. **band gap**), d.h. im Abstand von Valenzband zu Leitungsband.



Nichtleiter:

thermische Anregung unwahrscheinlich, nur wenige Elektron-/Lochpaare werden generiert.

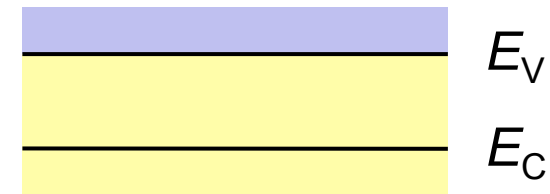
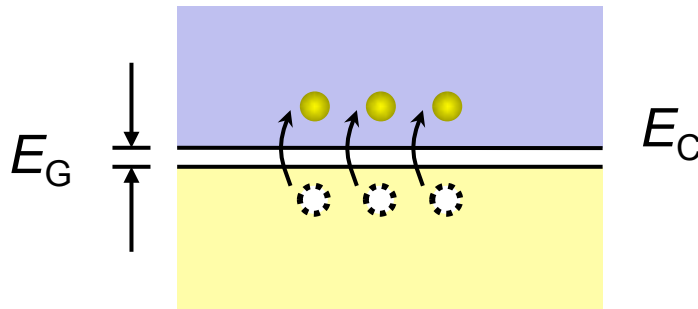


Halbleiter:

thermische Anregung relativ leicht möglich, es werden Elektron-/Lochpaaren in mittlerer Anzahl generiert.

Klassifizierung von Materialien

Leiter:



Bandabstand E_G sehr klein

oder

sich überlappende Bänder

Bei Metallen ist der Bandabstand entweder sehr klein, oder Valenzband und Leitungsband überlappen sich sogar. Eine thermische Anregung ist mit geringem Energieaufwand möglich. Es stehen daher sehr viele Ladungsträger zur Verfügung. Metalle sind ausgesprochen gute Leiter.

Dotierung von Halbleitermaterialien

Man kann die Leitfähigkeit des Halbleiters gezielt durch den Einbau von Fremdatomen ins Kristallgitter (sog. **Störstellen**) verändern, und zwar um Größenordnungen. Für die Halbleitermaterialien Silizium und Germanium, die 4 Valenzelektronen haben, werden zumeist folgende Elemente verwendet:

Elemente mit 5 Valenzelektronen:

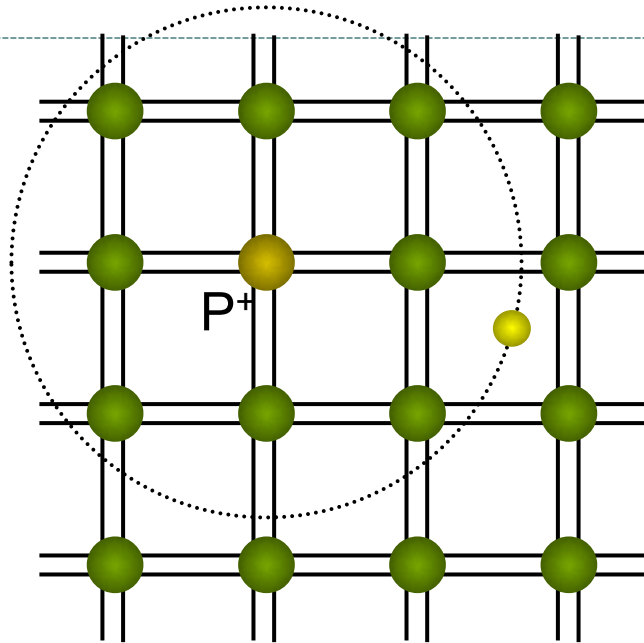
Arsen (As)
Antimon (Sb)
Phosphor (P)

Elemente mit 3 Valenzelektronen:

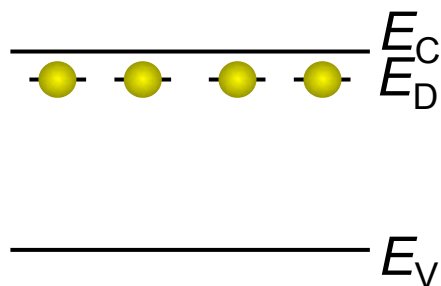
Bor (B)
Aluminium (Al)
Indium (In)

Der Einbau von Fremdatomen wird **Dotieren** (engl. *doping*) genannt. Die Konzentrationen der Fremdatome (sog. *Dotierungsgrad*) liegt zwischen 10^{13} und 10^{20} Fremdatomen/cm³.

n-Dotierung

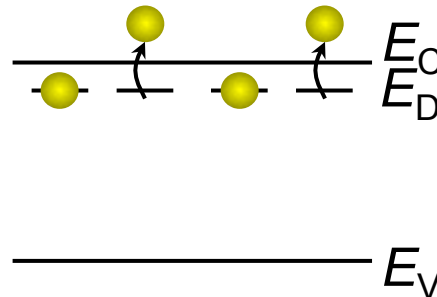


Beim Einbau von 5-wertigen Elementen (sog. **Donatoren**) in das Kristallgitter gehen nur 4 Valenzelektronen eine kovalente Bindung ein. Das fünfte Elektron ist nur lose an den Kern gebunden, d.h. es kann mit geringem Energieaufwand ins Leitungsband gehoben werden. Wenn das passiert, bleibt im Gitter ein positiv geladener Atomrumpf zurück. Die Energieniveaus der Donatoren (E_D) liegen nur geringfügig ($\sim 0,05$ eV) unter der Leitungsbandkante.

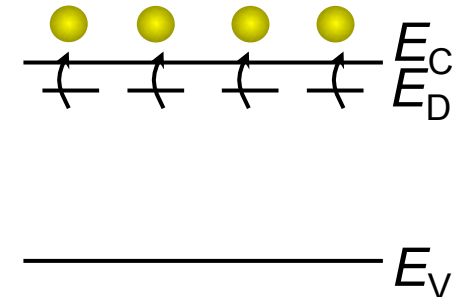


$T \rightarrow 0$ K

Störstellenreserve



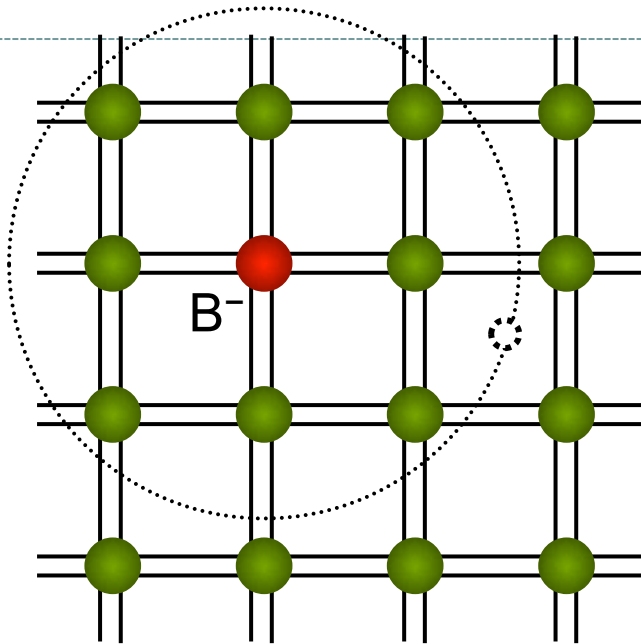
steigende Temperatur



Zimmertemperatur

Störstellenerschöpfung

p-Dotierung



Beim Einbau von 3-wertigen Elementen (sog. **Akzeptoren**) in das Kristallgitter gehen 3 Valenzelektronen eine kovalente Bindung ein. Dem Fremdatom fehlt ein weiteres Elektron für die Bindung an alle Nachbaratome. Es "besitzt ein Loch", in das unter geringem Energieaufwand Nachbarelektronen springen können. Wenn das passiert, stellt das Akzeptoratom eine ortsfeste negative Ladung dar.

Die Energieniveaus der Akzeptoren (E_A) liegen nur geringfügig ($\sim 0,05$ eV) über der Valenzbandkante.

_____ E_C

⊖ ⊖ ⊖ ⊖ E_A
_____ E_V

$T \rightarrow 0$ K

Störstellenreserve

_____ E_C

⊖ ● ⊖ ● E_A
_____ E_V

steigende Temperatur

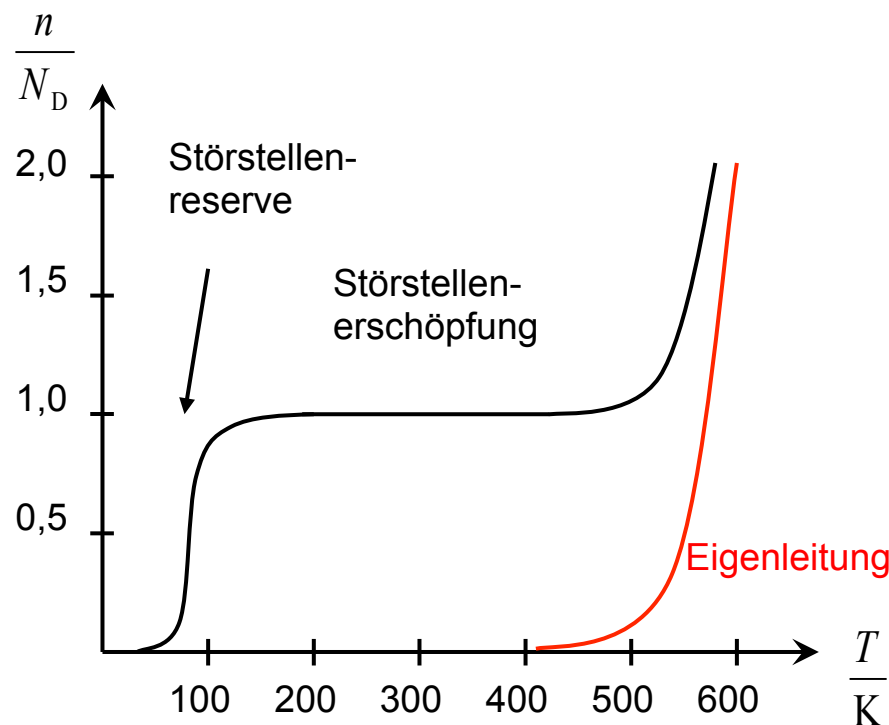
_____ E_C

● ● ● ● E_A
_____ E_V

Zimmertemperatur
Störstellenerschöpfung

Störstellenleitung

Bei Zimmertemperatur sind alle Störstellen (Akzeptoren oder Donatoren) ionisiert. Die Leitfähigkeit ist im Wesentlichen durch die Dotierung festgelegt. Man spricht (im Gegensatz zur Eigenleitung eines undotierten Halbleiters) von **Störstellenleitung**.



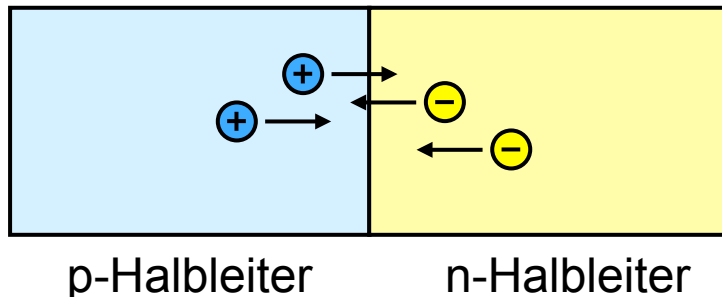
Schematische Darstellung der Majoritätsträgerkonzentration für n-dotiertes Silizium.

In einem n-dotierten Halbleiter herrscht dann ein Elektronenüberschuss. Es werden gleichzeitig mehr Löcher durch Rekombination aufgefüllt. Ihre Zahl geht dadurch zurück. Im n-Halbleiter bezeichnet man die Elektronen daher als **Majoritätsträger**, die Löcher als **Minoritätsträger**.

In einem p-dotierten Halbleiter sind die Verhältnisse gerade umgekehrt. Die Löcher sind die Majoritätsträger, die Elektronen die Minoritätsträger.

pn-Übergang

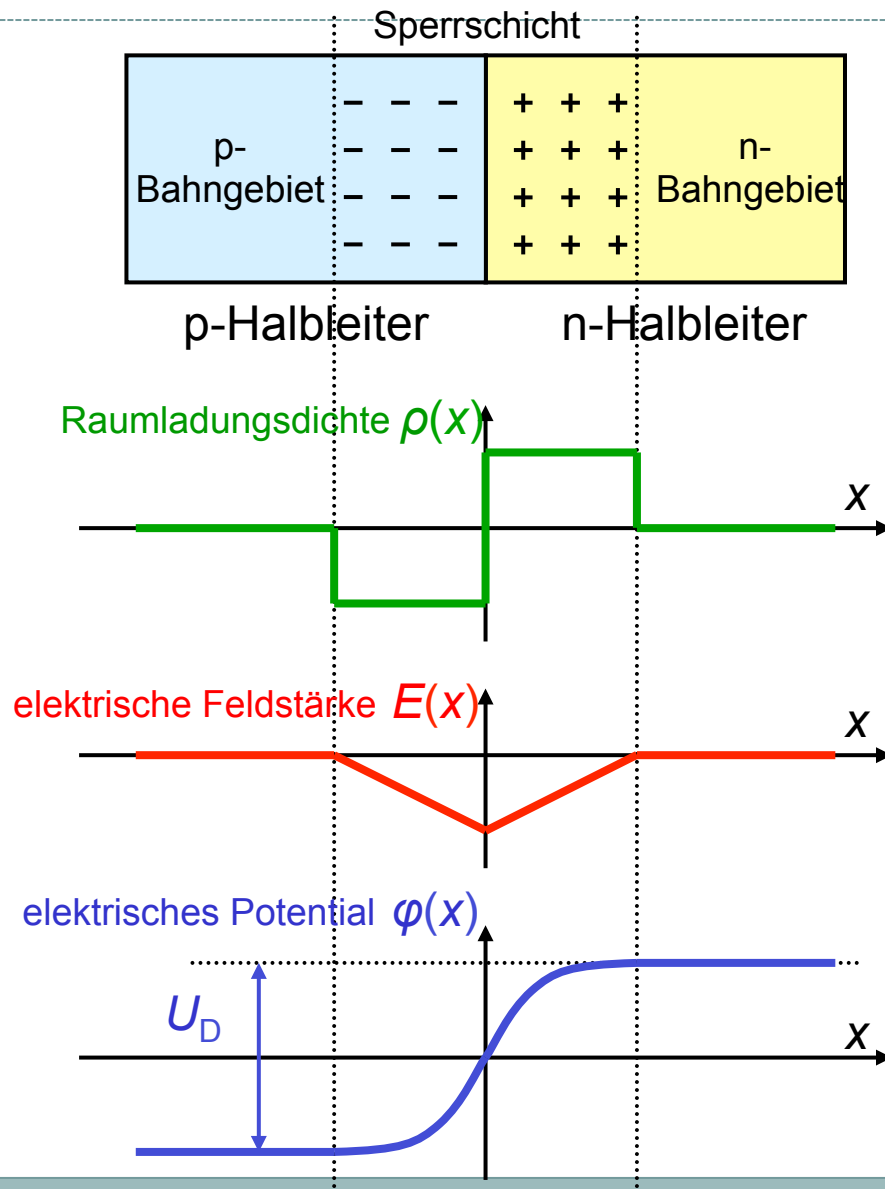
Die Funktion der meisten Halbleiterbauelemente beruht darauf, dass im Halbleiter Zonen unterschiedlicher Dotierung existieren. Wir betrachten zunächst den Fall, dass ein p-dotierter und ein n-dotierter Halbleiter in Kontakt gebracht werden. Wir nehmen an, dass alle Störstellen (Akzeptoren und Donatoren) ionisiert sind.



Im p-Halbleiter sind die Löcher als Majoritätsträger in großer Zahl vorhanden, im n-Halbleiter entsprechend die Elektronen. Aufgrund des Konzentrationsunterschiedes bewegen sich Löcher vom p-Halbleiter in den n-Halbleiter und Elektronen vom n-Halbleiter in den p-Halbleiter. Dort sind sie jeweils Minoritätsträger.

Diese Ladungsträgerbewegung geschieht als thermische **Diffusion**. Die Löcher, die im n-Halbleiter ankommen, rekombinieren dort mit Elektronen. Die Elektronen, die im p-Halbleiter ankommen, rekombinieren dort mit Löchern. Da die ionisierten Störstellenatome an ihre Orte im Kristallgitter gebunden sind, entsteht eine **Raumladungszone**, in der so gut wie keine beweglichen Ladungsträger vorhanden sind (**Sperschicht**, **Verarmungszone**).

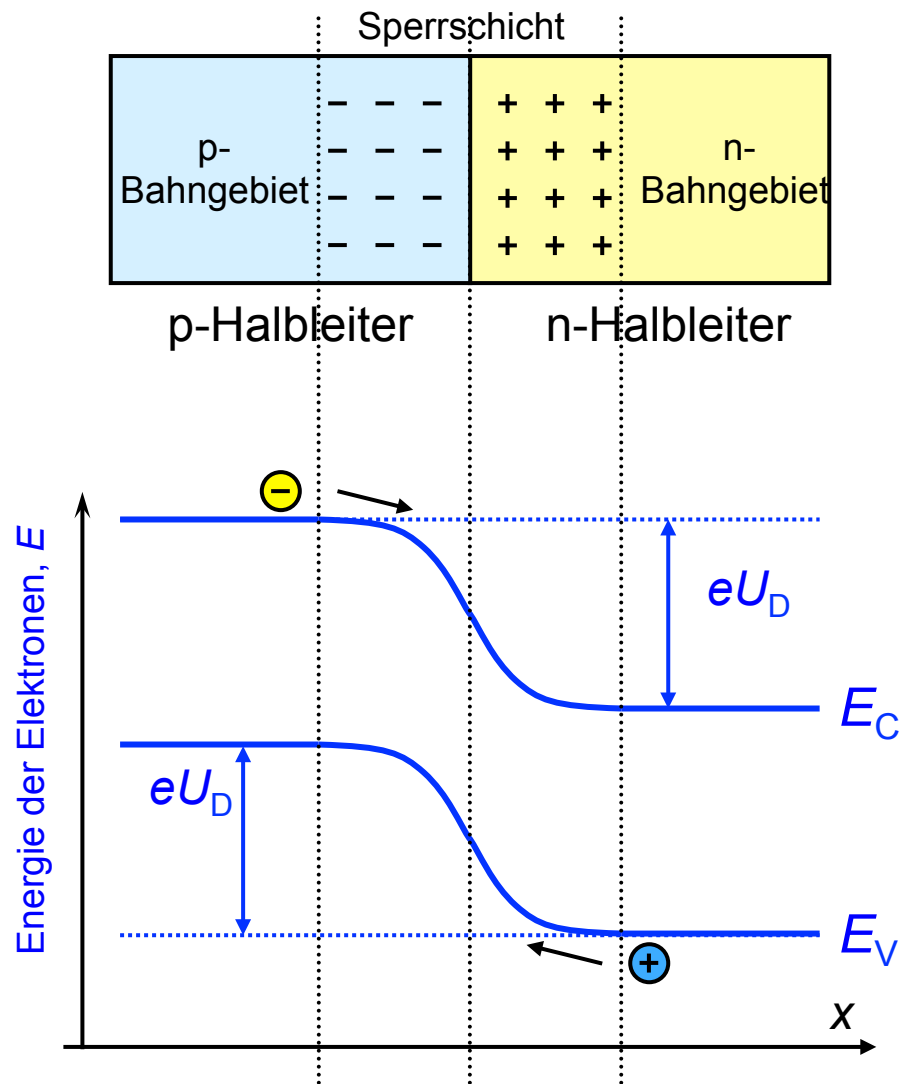
pn-Übergang im thermischen Gleichgewicht



Die Raumladungszone $\rho(x)$ erzeugt ein elektrisches Feld $E(x)$. Dieses wirkt der thermischen Diffusion der Ladungsträger entgegen. Es entsteht ein Gleichgewicht, bei dem sich der Diffusionsstrom und Driftstrom (Strom aufgrund des elektrischen Feldes) kompensieren.

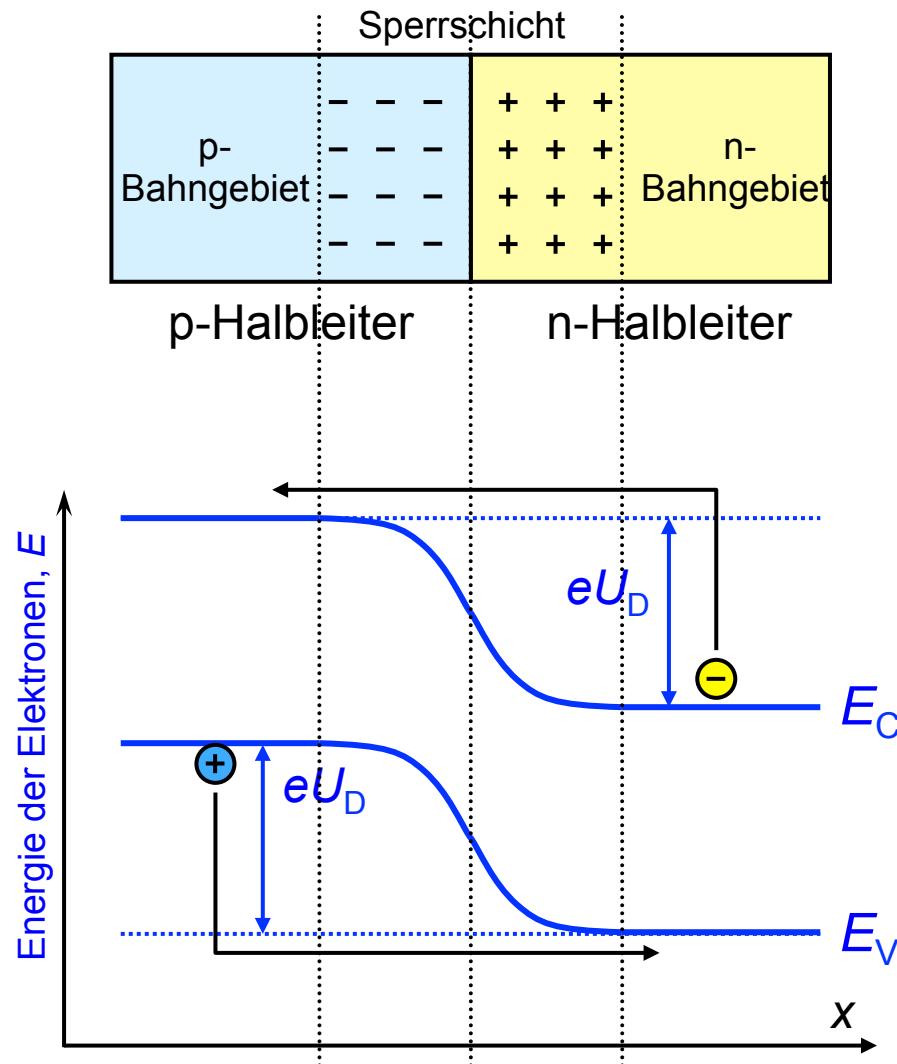
Das elektrische Feld verursacht eine Potentialdifferenz zwischen n-Halbleiter und p-Halbleiter, die sogenannte **Diffusionsspannung** U_D . Ihr Wert ist abhängig von der Dotierung und liegt meistens bei etwa 0,7 Volt.

pn-Übergang im Bändermodell: Minoritätsträger



Der Potentialunterschied (die Diffusionsspannung) sorgt für eine "Verbiegung" der Bänder. Elektronen im p-Bahnggebiet (dort Minoritätsträger) besitzen nun eine potentielle Energie gegenüber dem n-Bahnggebiet. In der Sperrschicht werden sie durch das elektrische Feld in positiver x-Richtung beschleunigt. ("Sie rutschen die Leitungsbandkante hinab.") Für die Löcher im n-Bahnggebiet (dort ebenfalls Minoritätsträger) kann man eine ähnliche Betrachtung anstellen. Sie besitzen eine positive potentielle Energie gegenüber dem p-Bahnggebiet. In der Sperrschicht werden sie durch das elektrische Feld in negativer x-Richtung beschleunigt. ("Sie steigen wie Luftblasen an der Valenzbandkante empor.")

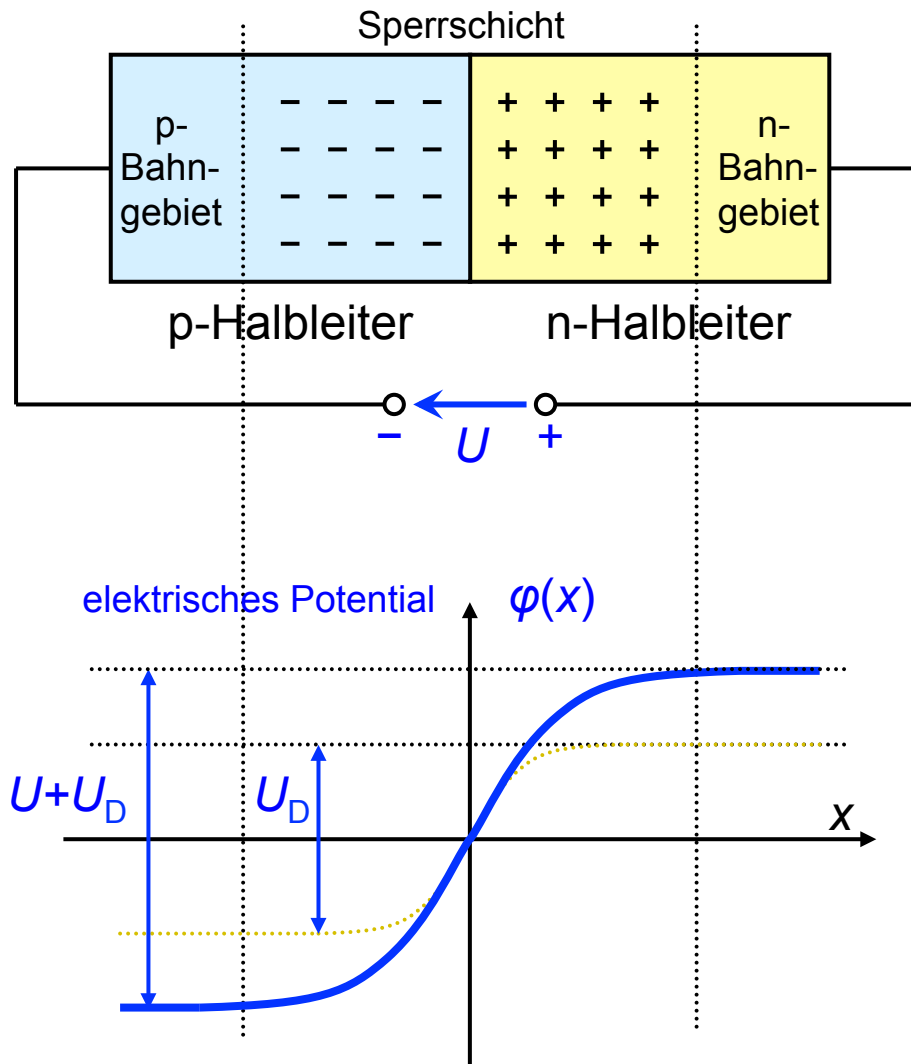
pn-Übergang im Bändermodell: Majoritätsträger



Für die Majoritätsträger (Elektronen im n-Bahngebiet und Löcher im p-Bahngebiet) ist es schwierig, auf die jeweils andere Seite zu diffundieren. Sie müssen mindestens die thermische Energie eU_D besitzen, um die Potentialbarriere des elektrischen Feldes der Sperrschicht zu überwinden. Es fließt ein geringer Diffusionsstrom.

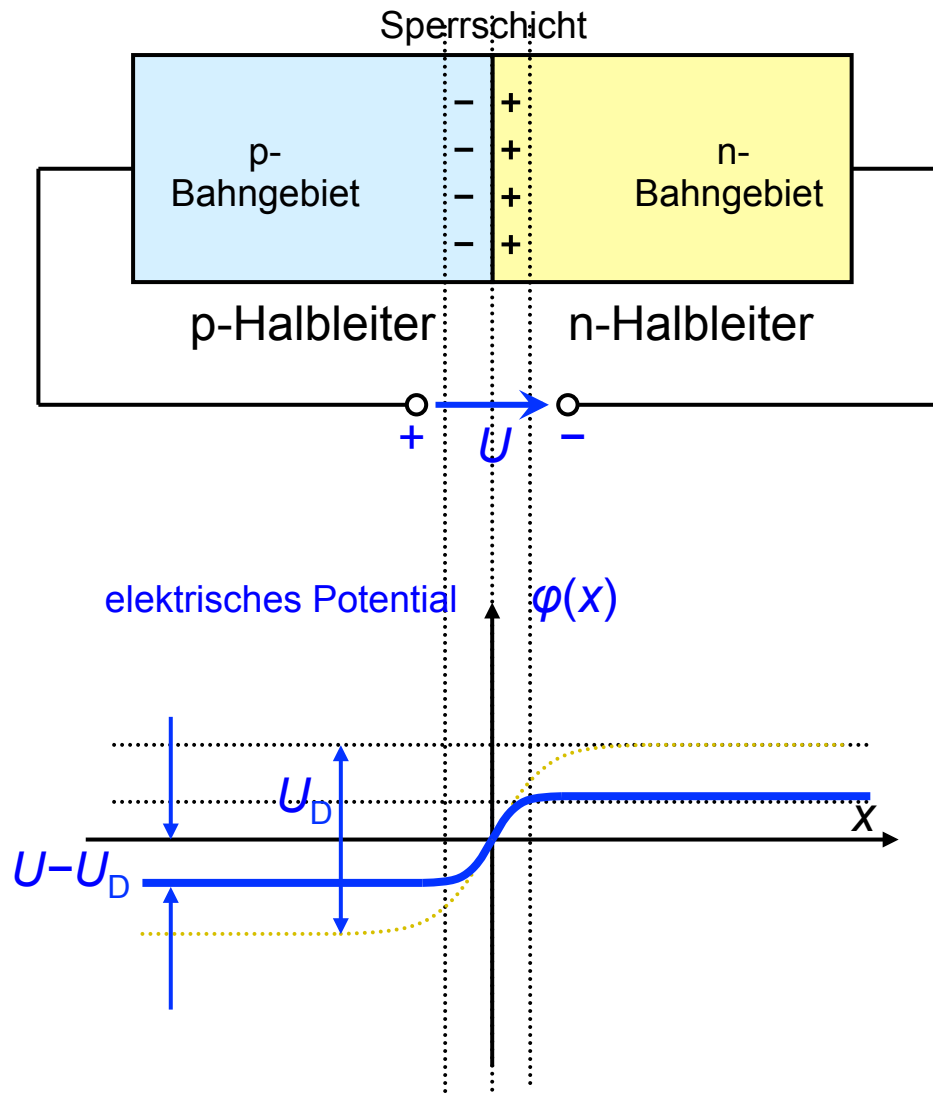
Im thermischen Gleichgewicht halten sich beide Ströme die Waage, d.h. die thermische Diffusion der Majoritätsträger kompensiert den Driftstrom der Minoritätsträger.

Anlegen einer Sperrspannung am pn-Übergang



Legen wir eine negative Spannung zwischen p-Halbleiter und n-Halbleiter an (der p-Halbleiter wird an den Minuspol angeschlossen, der n-Halbleiter an den Pluspol), dann werden die freien Ladungsträger von den Elektroden angezogen. Das elektrische Feld wird größer und die Raumladungszone wird breiter. Der pn-Übergang ist in **Sperrrichtung** gepolt (**Sperrpolung**). Nur Minoritätsträger, die durch thermische Generation entstehen, können zu einem Stromfluss beitragen. Dieser **Sperrstrom** ist von der Spannung unabhängig, jedoch abhängig von der Temperatur. Er ist sehr klein (im Bereich von μA).

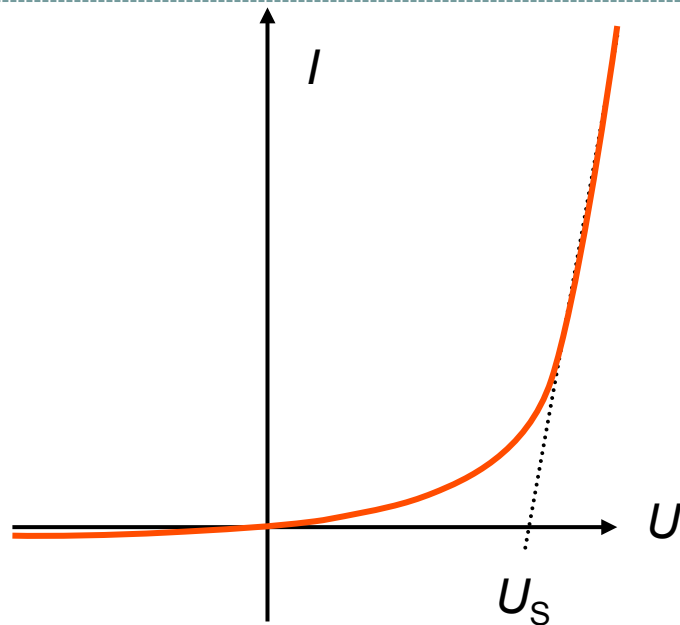
Umgekehrte Spannung am pn-Übergang



Legen wir eine positive Spannung zwischen p-Halbleiter und n-Halbleiter an (der p-Halbleiter wird an den Pluspol angeschlossen, der n-Halbleiter an den Minuspol), dann verringert sich das elektrische Feld und die Raumladungszone wird schmaler. Man sagt, der pn-Übergang ist in **Flussrichtung** oder **Durchlassrichtung** gepolt (**Flusspolung**).

Die Ladungsträger können nun mit wesentlich geringerem Energieaufwand den Übergang passieren. Der Diffusionsstrom vom p- ins n-Gebiet überwiegt den entgegengerichteten Driftstrom. Es fließt ein positiver "Nettostrom".

Diode



Der pn-Übergang lässt Stromfluss nur in Durchlasspolung zu. (In Sperrrichtung fließt lediglich der vernachlässigbar kleine Sperrstrom, im Bereich von μA).

Ein pn-Übergang stellt eine **Diode** dar.

Die Kennlinie der idealen Diode ergibt sich aus der Kennliniengleichung

$$I = I_S (e^{U/U_T} - 1)$$

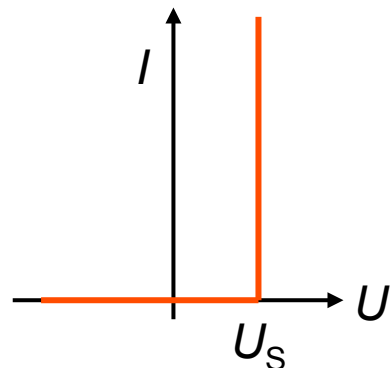
U_T : sog. **Temperaturspannung**.

$U_T \approx 25.2 \text{ mV}$ bei Raumtemperatur.

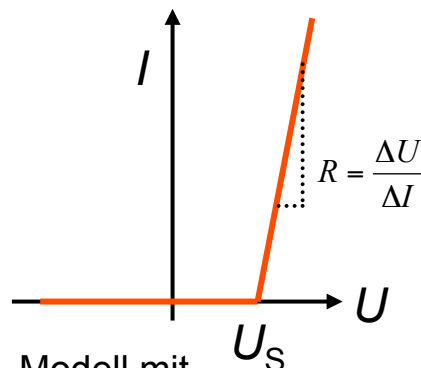
I_S : **Sättigungsstrom** in Sperrrichtung.

In vielen Fällen kann eine reale Diodenkennlinie durch zwei Geradenstücke angenähert werden. Dabei ist der Schnittpunkt der Tangente an die Kurve die sogenannte **Schleusenspannung** U_S .

$U_S \approx 0,7 \text{ V}$ bei Si, bei Raumtemperatur.

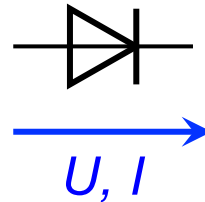


Modell mit Schleusenspannung

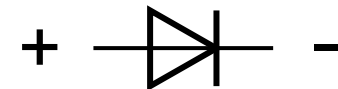


Modell mit Schleusenspannung und Bahnwiderstand

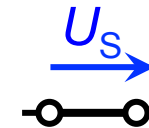
Schaltsymbol der Diode



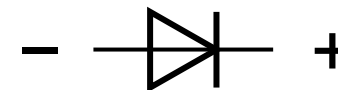
$U > U_S$: Durchlassrichtung, Strom $I > 0$ fließt.



Ersatzschaltbild: geschlossener Schalter, über dem die konstante Spannung U_S abfällt



$U < U_S$: Sperrrichtung, Strom $I = 0$ (ideale Diode, in der Realität fließt ein geringer Sperrstrom).



Ersatzschaltbild: geöffneter Schalter



Gleichrichter

Ein **Gleichrichter** ist eine Diodenschaltung, die eine Wechselspannung (die zwischen negativer und positiver Polarität wechselt) in eine Gleichspannung umwandelt (die immer positiv ist, aber möglicherweise pulsiert).

Die pulsierende Gleichspannung kann durch einen parallel zum Verbraucher nachgeschalteten Kondensator ausreichender Kapazität (Tiefpass) geglättet werden.

Ausführungsformen:

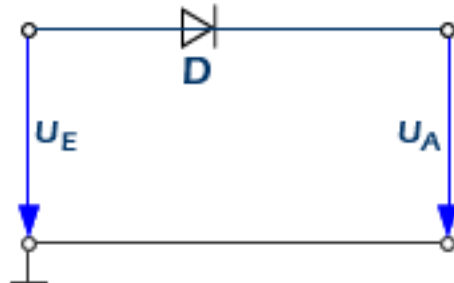
- Einfachgleichrichter
- Brückengleichrichter
- Gleichrichter mit Glättung

Anwendung:

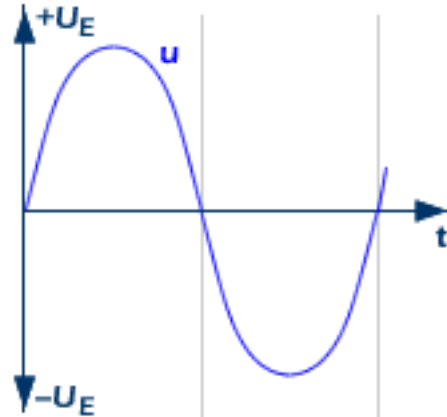
- Im Netzteil eines Rechners wird die Netzspannung (Wechselspannung) in die von den Rechnerkomponenten benötigte Gleichspannung umgewandelt.

Gleichrichterschaltungen

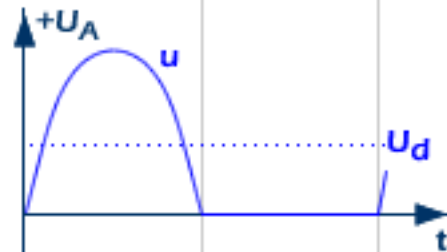
Einfachgleichrichter



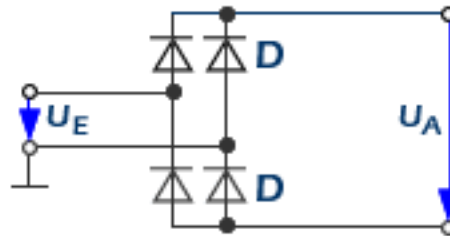
Spannung am Eingang



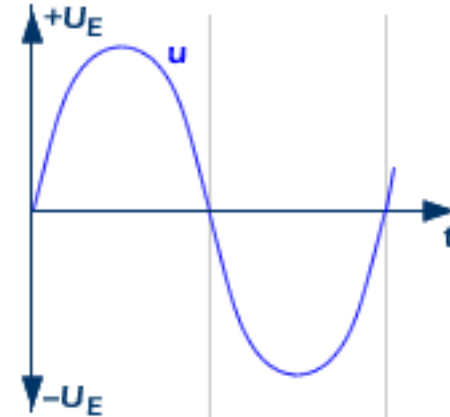
Spannung am Ausgang



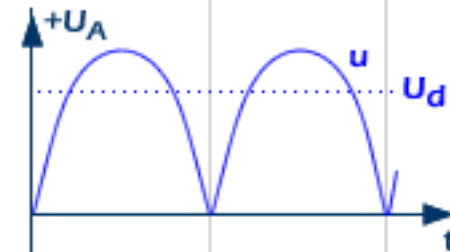
Brückengleichrichter



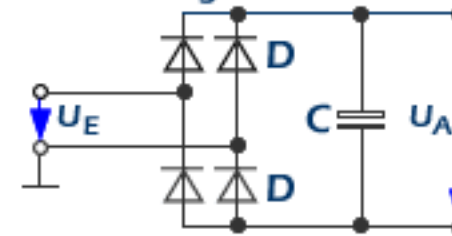
Spannung am Eingang



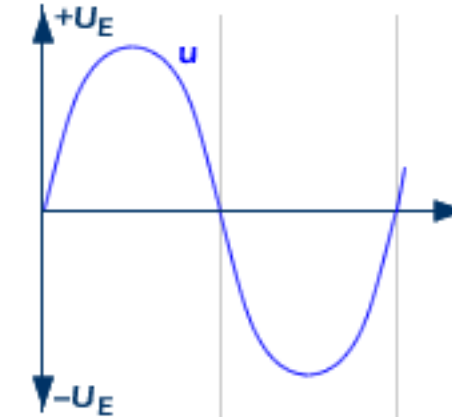
Spannung am Ausgang



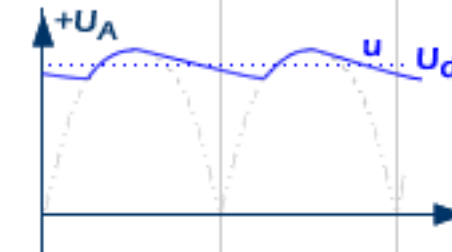
Brückengleichrichter mit Glättung



Spannung am Eingang



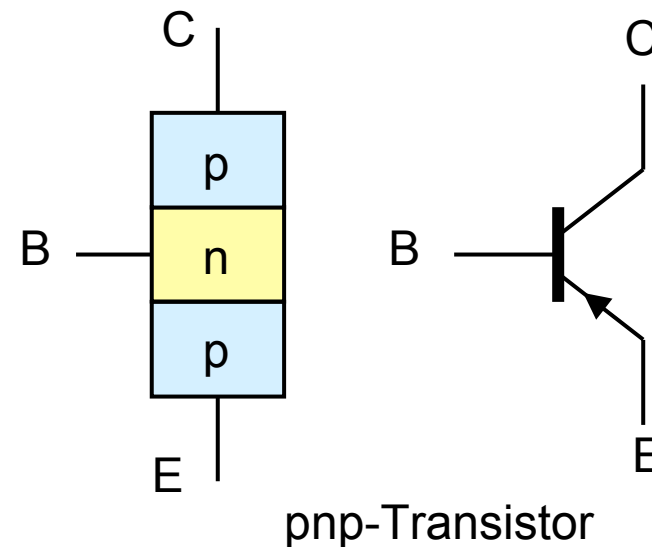
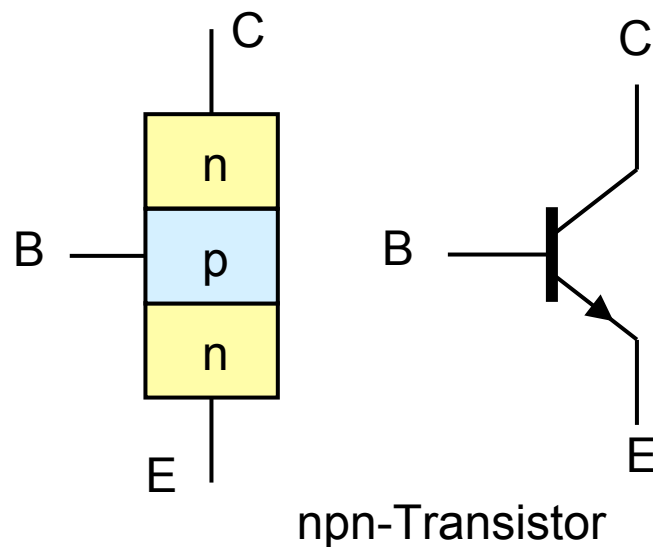
Spannung am Ausgang



Bipolartransistor (Aufbau)

Der Transistor wurde 1947 in den Bell Laboratories von Shockley, Bardeen und Brattain erfunden. Die hier gezeigte Variante heißt **Bipolartransistor**, weil in ihm *beide* Ladungsträgertypen (Elektronen und Löcher) zum Stromtransport beitragen. Der Transistor besteht aus drei Zonen unterschiedlich dotierten Halbleitermaterials. Beim **npn**-Transistor werden zwei n-dotierte Gebiete durch ein p-dotiertes Gebiet getrennt. Beim **pnp**-Transistor werden zwei p-dotierte durch ein n-dotiertes Gebiet getrennt. Es ergibt sich jeweils eine Abfolge von zwei nebeneinanderliegenden pn-Übergängen.

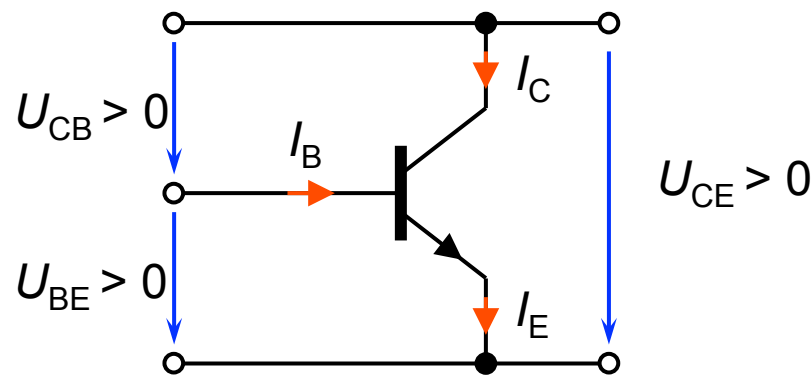
Die Zonen haben die Bezeichnungen **Emitter** (E), **Basis** (B) und **Kollektor** (C).



Bipolartransistor (Funktionsweise)

Die pn-Übergänge stellen Halbleiterdioden dar. Man spricht von der Basis-Emitter-Diode (BE-Diode) und der Basis-Kollektor-Diode (BC-Diode).

Im Normalbetrieb wird die BE-Diode in Durchlassrichtung, die BC-Diode in Sperrrichtung gepolt.

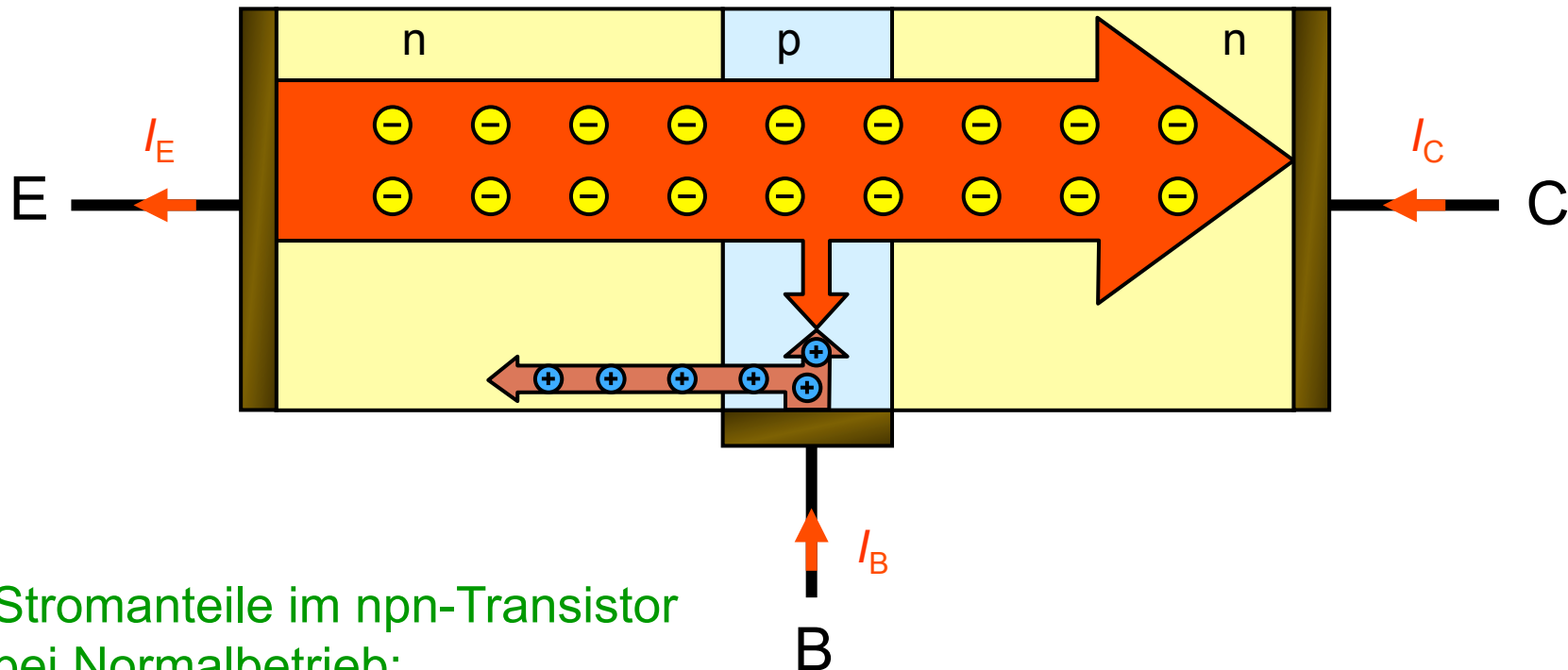


Beim npn-Transistor werden in dieser Beschaltung Elektronen vom Emitter in das Basisgebiet injiziert. Die Elektronen, die in der Basis nicht mit Löchern rekombinieren, können in die Sperrschicht der BC-Diode diffundieren. Dort werden sie durch das elektrische Feld "abgesaugt" und zum Kollektor transportiert.

Damit die injizierten Elektronen den Kollektor erreichen können, bevor sie mit Löchern in der Basis rekombinieren, wird die *Basisweite sehr klein* gewählt.

Die Basis injiziert ihrerseits Löcher in den Emitter, die dort mit Elektronen rekombinieren. Durch eine entsprechend *schwache Dotierung der Basis* sorgt man dafür, dass der Basisstrom I_B viel kleiner ist als der Emitterstrom I_E .

Ströme im npn-Transistor



Stromanteile im npn-Transistor bei Normalbetrieb:

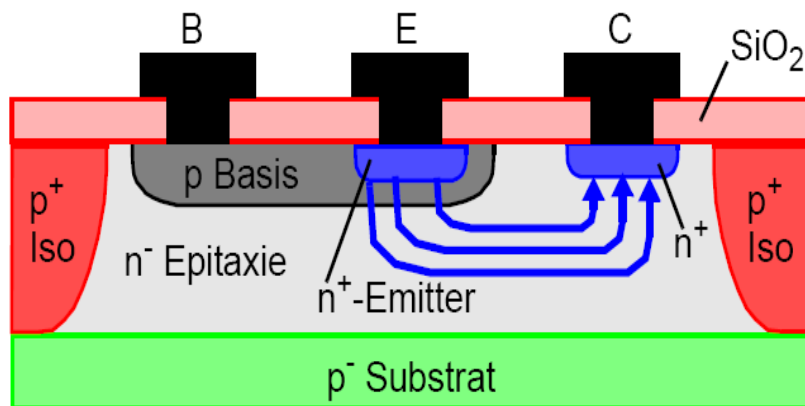
- Elektronen als Emitterstrom I_E aus dem Emitterbereich in die Basis. Der größte Teil gelangt als Transferstrom zum Kollektor und bildet den Kollektorstrom I_C . Ein kleiner Teil rekombiniert mit Löchern in der Basis.
- Löcher als Löcherstrom aus dem Basisbereich in den Emitter. Zusammen mit den in der Basis rekombinierenden Elektronen bildet er den Basisstrom I_B .

Stromverstärkung (npn-Transistor)

Mit der an der BE-Diode anliegenden Spannung in Durchlassrichtung kann die Rate der vom Emitter in die Basis injizierten Elektronen und damit auch die Rate der am Kollektor ankommenden Elektronen gesteuert werden. Der Kollektorstrom I_C wird also durch die Spannung U_{BE} gesteuert. Die Basis wirkt dabei als Steuerelektrode.

Da der gesteuerte Kollektorstrom wesentlich größer ist als der Basisstrom, stellt der Bipolartransistor ein Halbleiterbauelement mit Verstärkereigenschaften dar. Das Verhältnis von Kollektorstrom zu Basisstrom im Normalbetrieb wird bezeichnet als

Stromverstärkung $B_N = \frac{I_C}{I_B}$

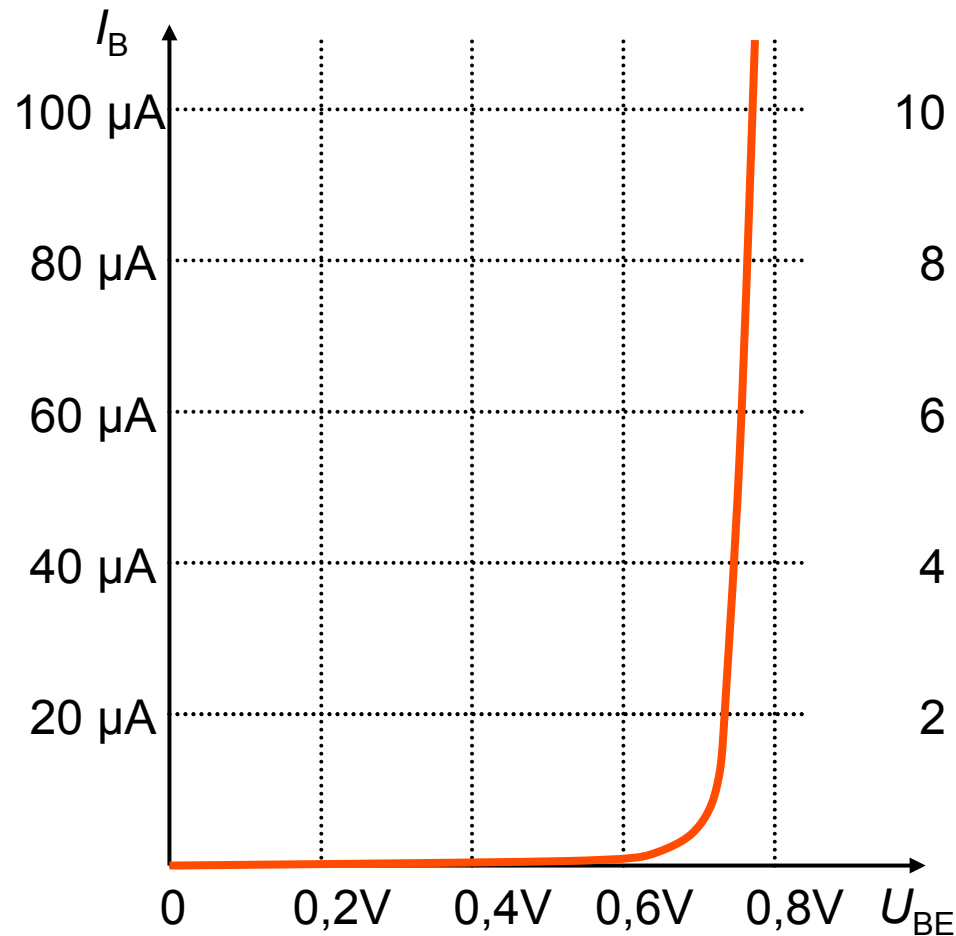


Integrierter npn-Transistor (Querschnitt)

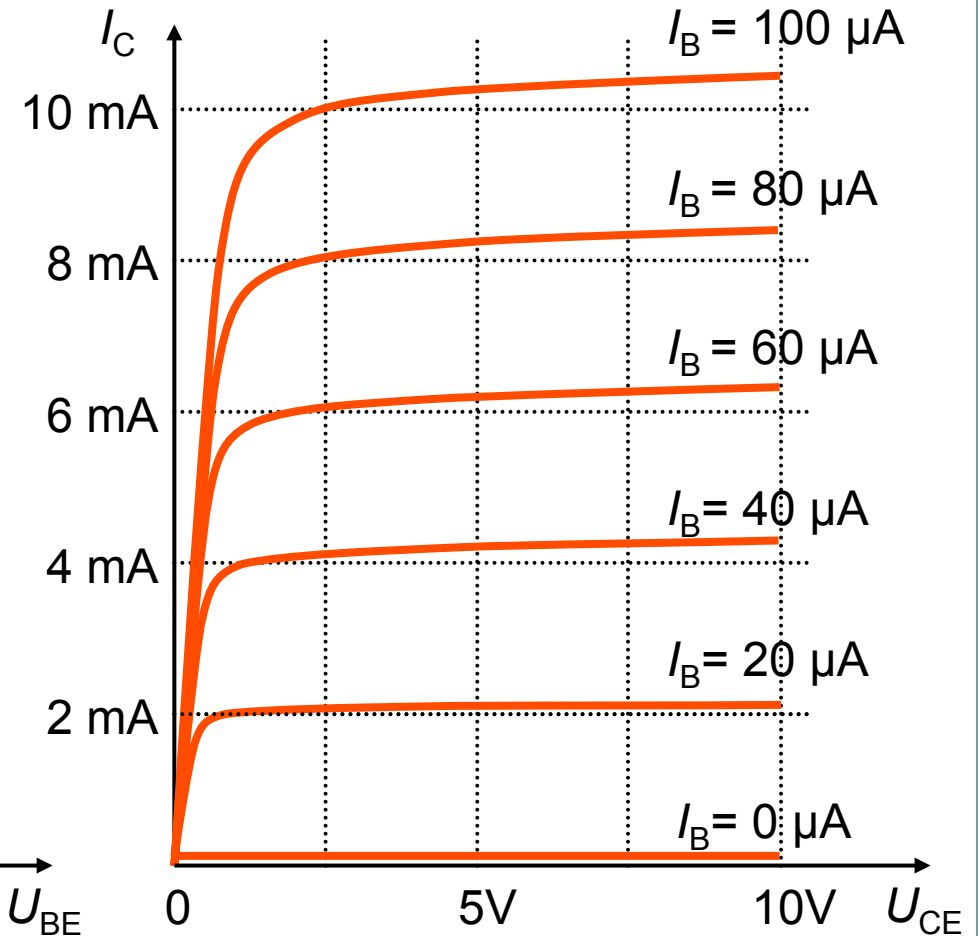
Der Wert von B_N liegt typischerweise zwischen 100 und 200, ist also sehr viel größer als 1.

Weil der Transistor (nur!) im Prinzip symmetrisch aufgebaut ist, kann man die Anschlüsse von Kollektor und Emitter vertauschen. In einem solchen **Rückwärtsbetrieb** (Inversbetrieb) ist die Stromverstärkung allerdings viel kleiner (≈ 1).

Kennlinien (npn-Transistor)



Eingangskennlinie



Ausgangskennlinienfeld

Betriebsbereiche (npn-Transistor)

Sperrbereich:

Beide pn-Übergänge sind gesperrt ($U_{BE} < U_S$; $-U_{CB} < U_S$; U_S : Schleusenspannung). Über den Transistor fließen trotz angelegter Ausgangsspannung $U_{CE} > 0$ nur sehr kleine Restströme. Der Transistor hat einen hohen Kollektor-Emitter-Widerstand – er entspricht einem geöffneten Schalter. (Im Kennlinienfeld der vorigen Folie: Kennlinie für $I_B=0\mu A$).

Linearer Bereich:

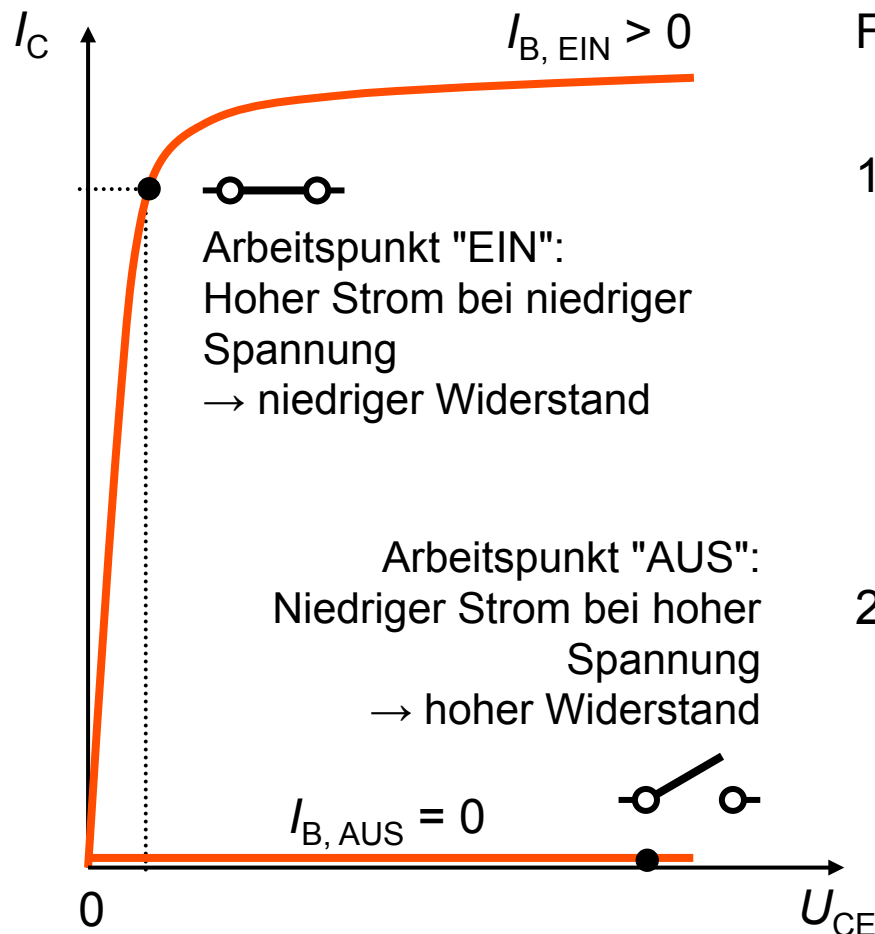
Der Basis-Emitter-Übergang ist leitend, der Basis-Kollektor-Übergang ist gesperrt ($U_{BE} > U_S$; $-U_{CB} < U_S$). Die Injektion von Elektronen in die Basis wird durch die Basis-Emitter-Spannung gesteuert, der Kollektorstrom I_C hängt kaum von U_{CE} ab. (Dieser Bereich wird in der Verstärkertechnik verwendet).

Sättigungsbereich:

Beide pn-Übergänge sind leitend ($U_{BE} > U_S$; $-U_{CB} > U_S$). Dies wird erreicht, wenn die Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} kleiner als die Basis-Emitter-Spannung U_{BE} gewählt wird. Dann injizieren sowohl Emitter als auch Kollektor Elektronen in die Basis – Kollektor- und Basisstrom steigen stark an. Dies entspricht einem niedrigen Widerstand – in der Digitaltechnik verwendet man den Transistor in diesen Zustand wie einen geschlossenen Schalter.

Bipolartransistor als gesteuerter Schalter

Durch Änderung der Basis-Emitter-Spannung U_{BE} kann der Strom I_C gesteuert werden. Damit eignet sich der Bipolartransistor als gesteuerter Schalter.



Für die Anwendung als Schalter kommen zwei Arbeitspunkte in Frage:

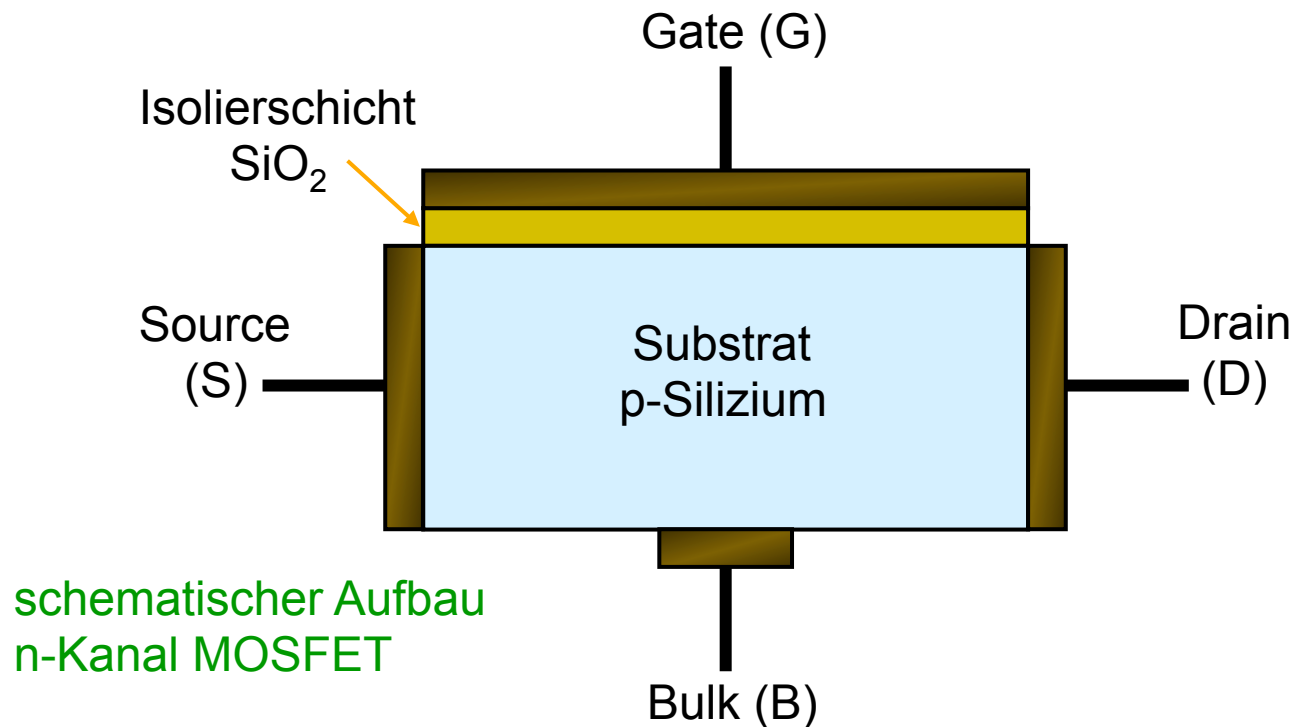
1. Arbeitspunkt "EIN": Bei Ansteuerung mit einer hohen Basis-Emitter-Spannung fällt auch bei hohem Strom I_C nur eine geringe Kollektor-Emitter-Spannung ab. Der Transistor hat einen niedrigen Kollektor-Emitter-Widerstand.
2. Arbeitspunkt "AUS": Bei Ansteuerung mit einer kleinen Basis-Emitter-Spannung fließt so gut wie kein Strom I_C . Der Transistor hat einen hohen Kollektor-Emitter-Widerstand.

Isolierschicht-Feldeffekttransistor (MOSFET)

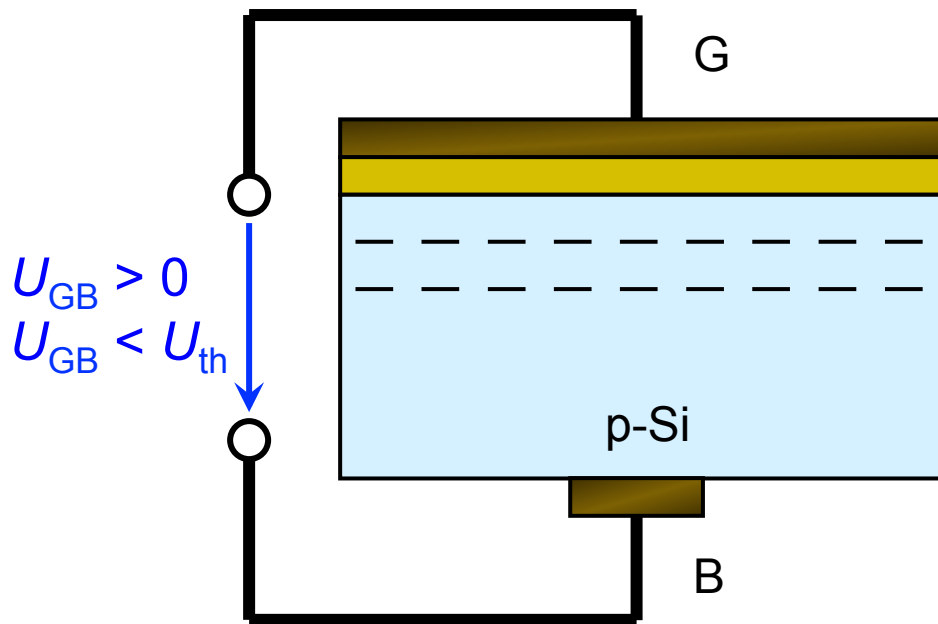
MOSFETs sind die wichtigsten Bauelemente heutiger integrierter Digitalschaltungen. MOS steht für **M**etall-**O**xid-**S**ilizium-Kapazität. FET steht für **F**eld-**E**ffekt-**T**ransistor.

Es gibt n-Kanal- und p-Kanal-MOSFETs.

Wesentlicher Bestandteil des MOSFETs ist der MOS-Kondensator. Er besteht aus der Gate-Elektrode ("Metall"), dem Dielektrikum aus Siliziumdioxid ("Oxid") und dem Substrat ("Silizium"). Das Substrat ist mit dem Anschluss "Bulk" verbunden.



MOS-Kapazität unterhalb Schwellwertspannung



Verhalten der MOS-Kapazität eines n-Kanal-MOSFET:

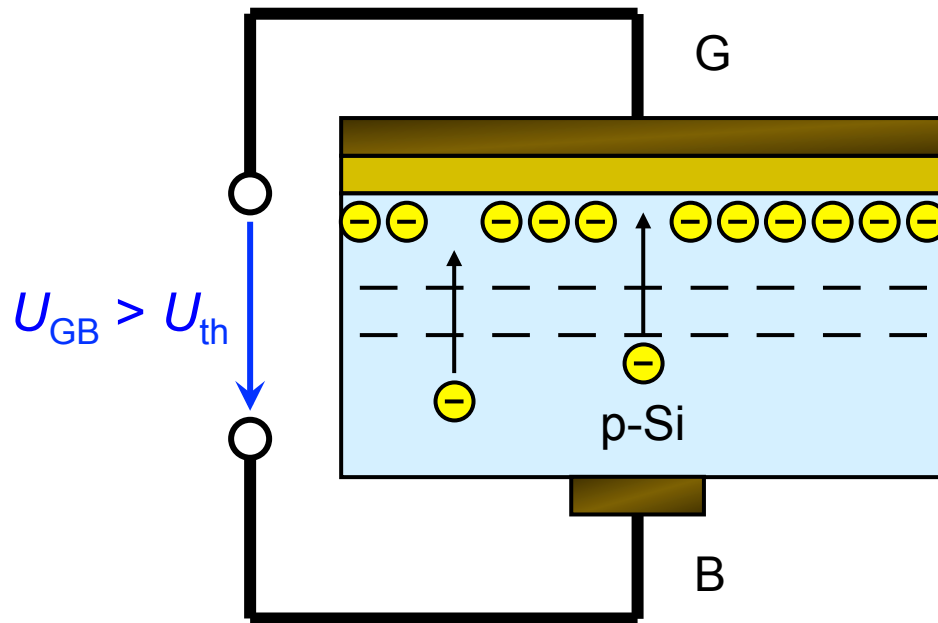
Bei Anlegen einer positiven Spannung U_{GB} zwischen Gate und Bulk bildet sich im n-Kanal-MOSFET an der Grenzfläche zwischen Substrat und Oxid eine negative Influenzladung. Sofern die Spannung nicht zu groß ist, besteht diese Influenzladung lediglich aus einer negativen Raumladungszone (Verarmungszone, Sperschicht).

Verhalten der MOS-Kapazität eines p-Kanal-MOSFET:

Sie verhält sich prinzipiell wie die des n-Kanal-MOSFET, allerdings sind die Polaritäten der Spannungen und Ladungen umzukehren.

Im Folgenden betrachten wir die Verhältnisse beim n-Kanal-MOSFET. Die Bedingungen für den p-Kanal-MOSFET können daraus leicht abgeleitet werden.

MOS-Kapazität oberhalb Schwellwertspannung



Verhalten der MOS-Kapazität
eines n-Kanal-MOSFET:

Überschreitet die Spannung U_{GB} die sogenannte **Schwellspannung** U_{th} , (engl. **threshold voltage**) dann kann die Gate-Ladung nicht mehr alleine durch die Raumladung im p-Silizium kompensiert werden. Es bildet sich eine dünne Schicht freier Elektronen (entstanden aus thermischer Generierung), genannt **Kanal**. An der Oberfläche des p-Siliziums hat eine Umkehr (**Inversion**) des Leitungstyps stattgefunden. Der Kanal ist n-leitend geworden (**Inversionskanal**). Es existieren nun freie Ladungsträger, die für Stromtransport zur Verfügung stehen.

Schwell(wert)spannung U_{th}

Die Schwellspannung U_{th} ist abhängig von der Geometrie der Anordnung, der Substrat-dotierung, dem Gatematerial sowie von festen Flächenladungen an der Si-SiO₂-Grenz-fläche. Sie lässt sich bei der Herstellung in gewissen Grenzen einstellen. Sie kann sogar negativ werden: Wird unterhalb der Isolierschicht ein leitender Kanal eingebracht (z.B. durch *Ionenimplantation*), dann fließt bereits bei $U_{GS} = 0$ ein Strom, wenn an den Kanal eine Spannung U_{DS} angelegt wird. Eine negative Schwellspannung U_{th} bedeutet also: Erst wenn die Gate-Source-Spannung negativ ist und unterhalb von U_{th} liegt, wird ein solcher Transistor ausgeschaltet. Ansonsten leitet er.

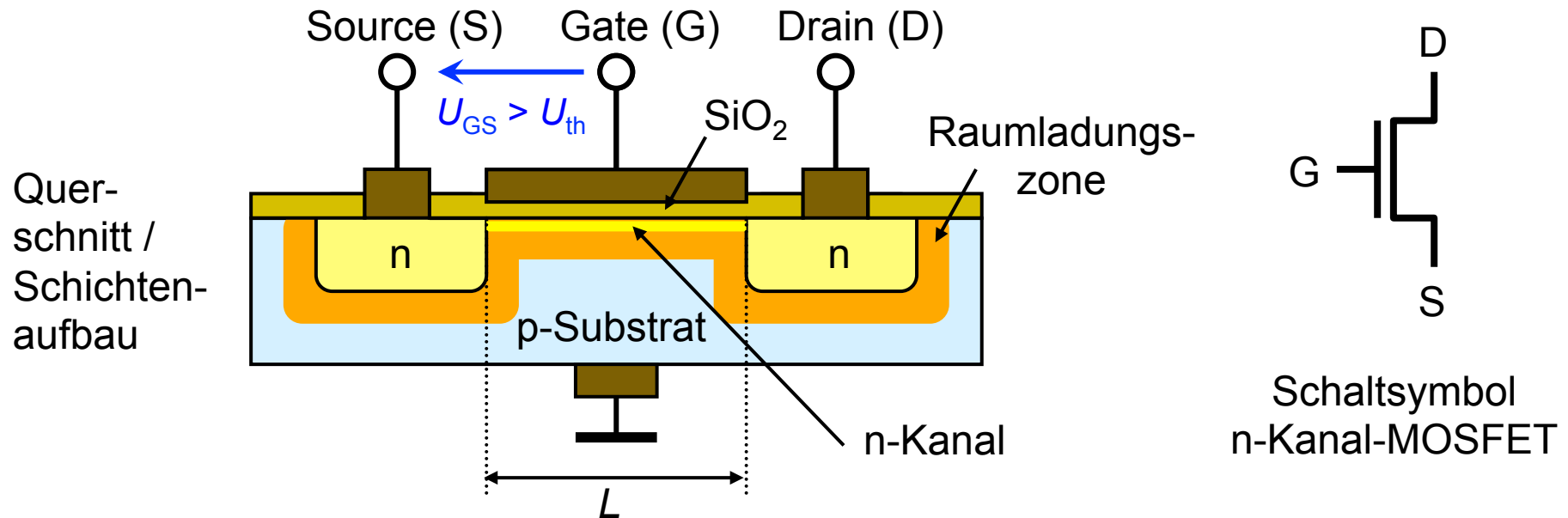
n-Kanal-MOSFETs werden nach dem Vorzeichen ihrer Schwellspannung klassifiziert in zwei Typen:

$U_{th} > 0$: selbstersperrend, "Anreicherungstyp", engl. "enhancement mode"

$U_{th} < 0$: selbstleitend, "Verarmungstyp", engl. "depletion mode"

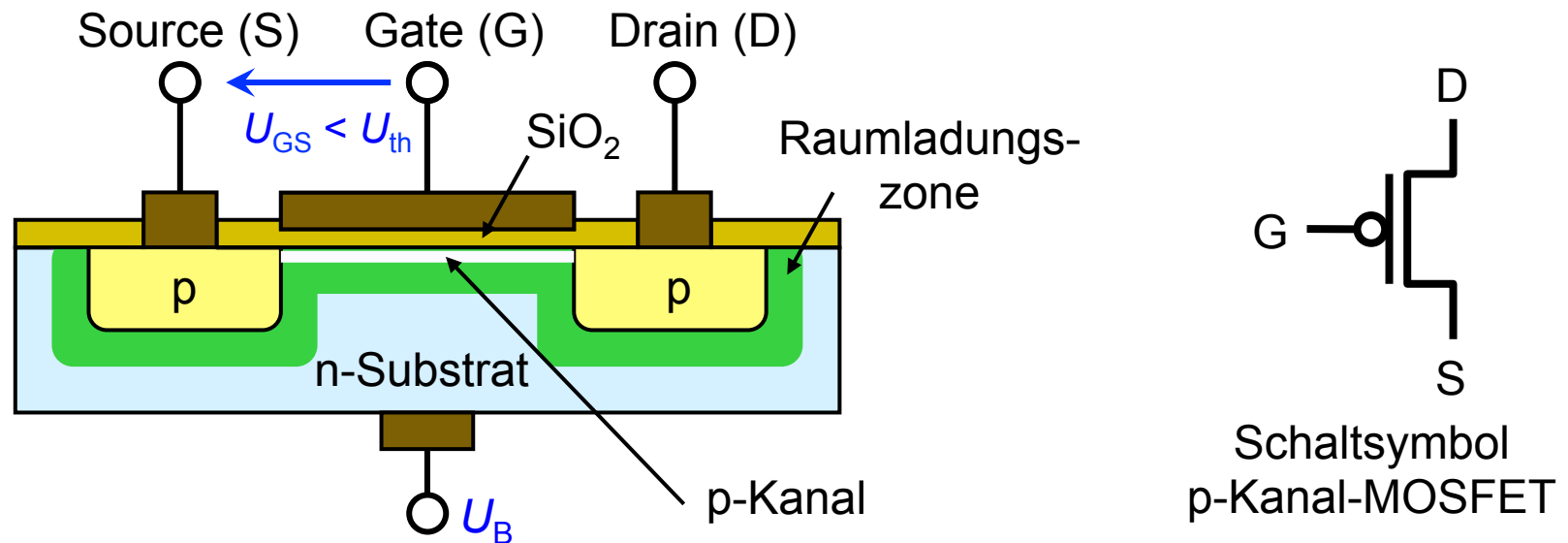
Für p-Kanal-MOSFETs gilt Entsprechendes. Es ändern sich nur die Vorzeichen aller Spannungen und Ströme.

Integrierter n-Kanal MOSFET



Ein integrierter n-Kanal-MOSFET besteht aus einem p-Substrat mit zwei stark n-dotierten Zonen im Abstand L (Kanallänge) voneinander. Die n-Zonen bilden Source und Drain des Transistors. Über dem Kanalgebiet befindet sich die Isolierschicht (SiO₂) und darüber die Gate-Elektrode. Der Bulk-Anschluss ist meist mit dem niedrigsten Potential in der gesamten Schaltung (z.B. 0V, Masse) verbunden. Legt man eine positive Gate-Source-Spannung $U_{GS} > U_{th}$ an, so bildet sich die Raumladungszone und der n-leitende Kanal aus. Legt man dann eine positive Drain-Source-Spannung U_{DS} an, so fließt ein Strom. Der MOSFET verhält sich dann wie ein spannungsgesteuerter Widerstand.

Integrierter p-Kanal MOSFET

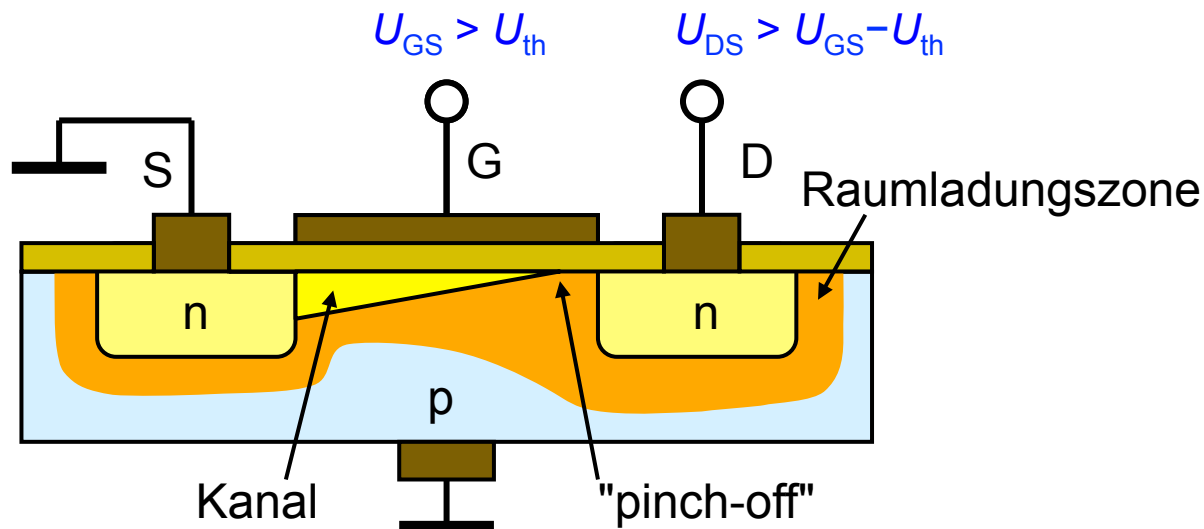


Der p-Kanal-MOSFET ist entsprechend aus n-Substrat und p-dotierten Zonen für Source und Drain aufgebaut. Der Bulk-Anschluss ist meist mit dem höchsten Potential in der gesamten Schaltung verbunden (z.B. Betriebsspannung U_B).

Um die Inversion einzuleiten, ist eine negative Gate-Source-Spannung $U_{GS} < U_{th}$ notwendig. Eine negative Drain-Source-Spannung U_{DS} führt zu einem Stromfluss durch den Transistor.

Abschnüreffekt

Hier: am Beispiel des n-Kanal MOSFET (p-Kanal: analog)



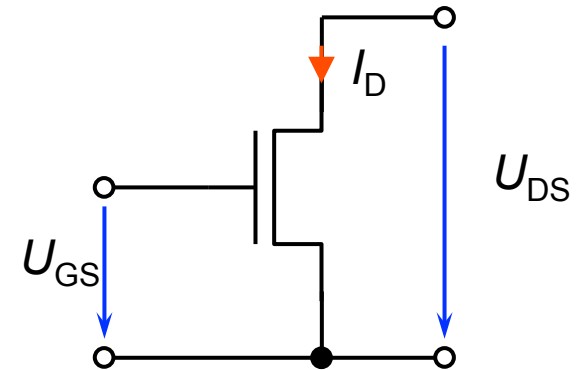
Mit zunehmender Spannung wird die influenzierte Ladung im Kanal ortsabhängig. Durch den Spannungsabfall im Kanal wird am Kanalende kaum noch Ladung influenziert. Der Kanal wird "**abgeschnürt**" (engl.: "*pinched off*"). Dies führt dazu, dass der Strom I_D nicht mehr weiter ansteigen kann, sondern einen Sättigungswert annimmt. Dieser hängt von der Gate-Source-Spannung U_{GS} ab.

Betriebsbereiche des n-Kanal MOSFET

Sperrbereich:

$$U_{GS} < U_{th} \quad I_D = 0$$

Der Transistor sperrt, es fließt kein nennenswerter Drainstrom. Das Kanalgebiet hat einen sehr hohen Widerstand.



Widerstandsbereich oder ohm'scher Bereich:

$$U_{GS} > U_{th} \quad U_{DS} < U_{GS} - U_{th} = U_{DS,sat}$$

$$I_D = \beta \left(U_{GS} - U_{th} - \frac{U_{DS}}{2} \right) U_{DS} \quad \text{mit} \quad \beta = \mu_e \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{t_{ox}} \frac{W}{L}$$

Der Faktor β enthält Geometriegrößen (Kanalbreite W , Kanallänge L , Dicke des Gateoxids t_{ox}) sowie Materialgrößen (Beweglichkeit μ_e der Elektronen, Dielektrizitätszahl ϵ_r des Gateoxids).

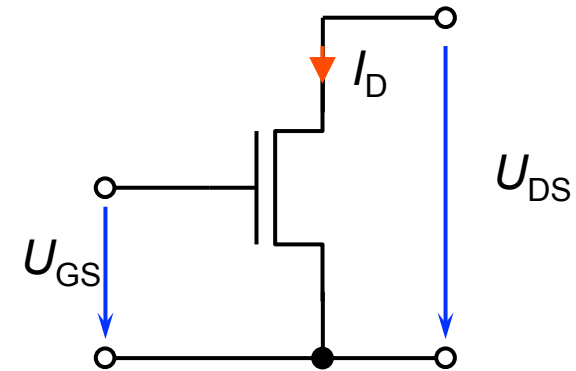
Der Transistor verhält sich wie ein spannungsgesteuerter Widerstand. Sein Leitwert ändert sich in Abhängigkeit von U_{GS} .

Betriebsbereiche MOSFET

Sättigungsbereich oder **Abschnürbereich**:

$$U_{GS} > U_{th} \quad U_{DS} \geq U_{GS} - U_{th} = U_{DS,sat}$$

$$I_{D,sat} = \frac{\beta}{2} (U_{GS} - U_{th})^2 \quad \text{mit} \quad \beta = \mu_e \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{t_{ox}} \frac{W}{L}$$

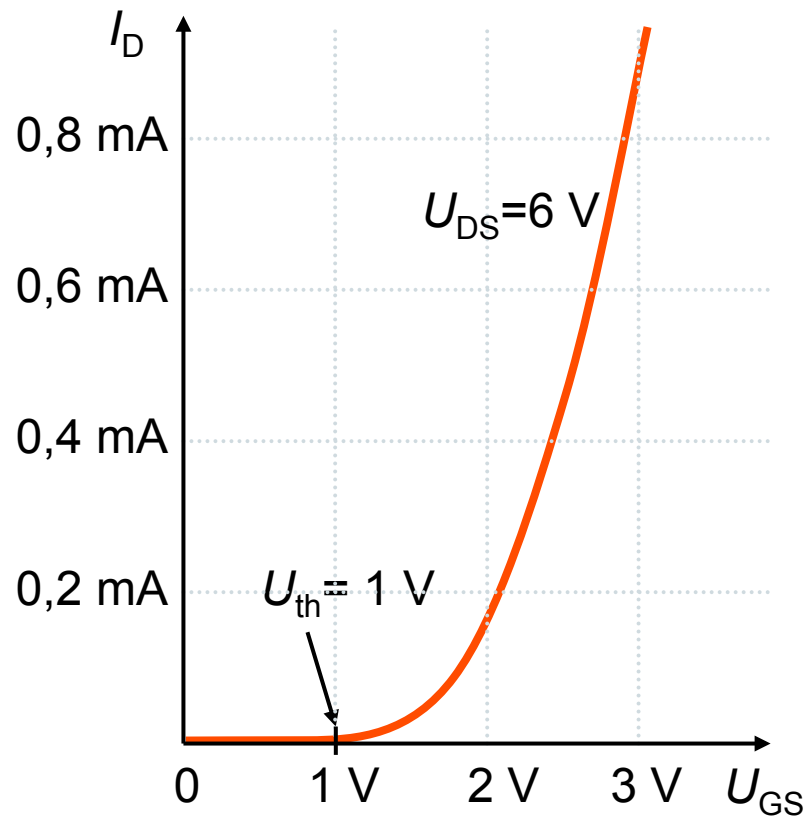


Der Drainstrom ändert sich nicht mehr bei weiterer Erhöhung der Drain-Source-Spannung U_{DS} über den Wert $U_{DS,sat} = U_{GS} - U_{th}$ hinaus.

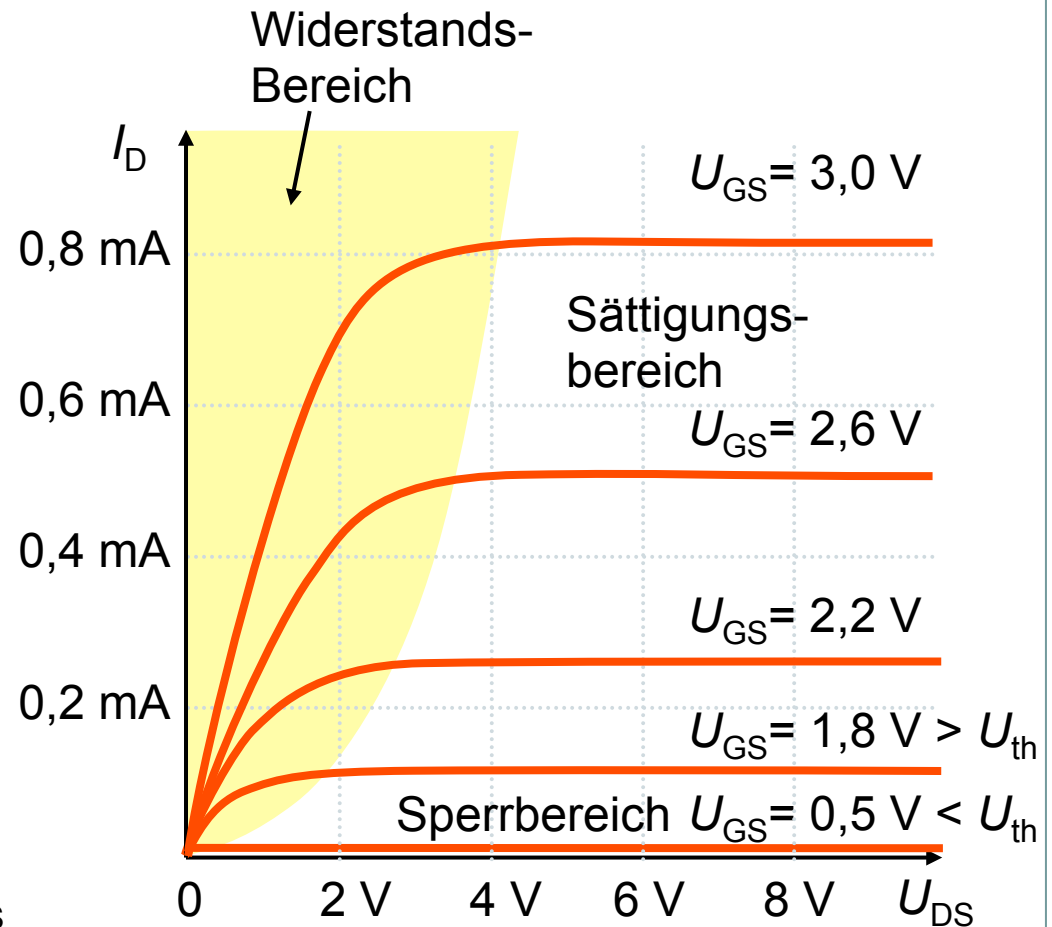
Betriebsbereiche des p-Kanal-MOSFET

Für die Betriebsbereiche des p-Kanal-MOSFET gilt Entsprechendes; es sind dabei lediglich die Vorzeichen der Spannungen und Ströme sowie die Vergleichsoperatoren ($<$, \leq , $>$, \geq) umzukehren.

Kennlinien des n-Kanal MOSFET



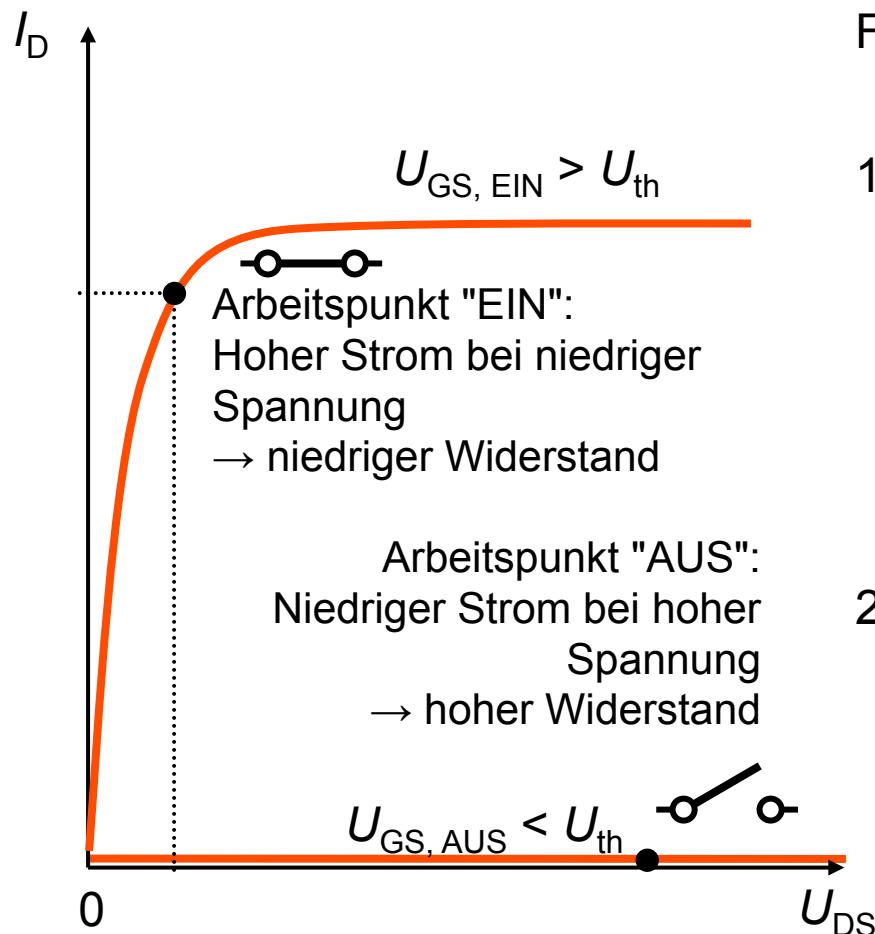
Transferkennlinie



Ausgangskennlinienfeld

MOSFET als gesteuerter Schalter

Durch Änderung der Gate-Source-Spannung U_{GS} kann der Strom I_D gesteuert werden. Damit eignet sich auch der MOSFET als gesteuerter Schalter.



Für die Anwendung als Schalter kommen zwei Arbeitspunkte in Frage:

1. Arbeitspunkt "EIN": Bei Ansteuerung mit einer Spannung $U_{GS} > U_{th}$ ist der Transistor leitend, d.h. bei hohem Drainstrom fällt eine geringe Drain-Source-Spannung ab. Der Transistor hat einen niedrigen Drain-Source-Widerstand.
2. Arbeitspunkt "AUS": Bei Ansteuerung mit einer Spannung $U_{GS} < U_{th}$ sperrt der Transistor. Es fließt so gut wie kein I_D . Der Transistor hat einen hohen Drain-Source-Widerstand.

Schaltkreisfamilien

Schaltkreisfamilien sind Kollektionen standardisierter digitaler Bausteine, die die gleiche Basistechnologie verwenden und gleiche elektronische Kenngrößen besitzen. Man kann aus ihnen auf einfache Weise größere Digitalschaltungen zusammensetzen.

In den frühen Jahren der Mikroelektronik wurden integrierte Digitalschaltungen zunächst mit **Bipolartransistoren** aufgebaut. Die ersten Schaltkreisfamilien hießen RTL (Resistor-Transistor Logic), DTL (Diode-Transistor Logic), **TTL** (**Transistor-Transistor Logic**) und **ECL** (**Emitter-Coupled Logic**). TTL und ECL werden auch heute noch in bestimmten Anwendungen eingesetzt.

Der Großteil der integrierten Digitalschaltungen, aus denen informationstechnische Systeme heute aufgebaut werden, basieren auf der **MOS-Technik**. Hier hat sich insbesondere die **CMOS-Technologie** durchgesetzt (CMOS=Complementary MOS). Dazu mehr im nächsten Kapitel.

Vergleich von Schaltkreisfamilien

Vorteile der Bipolartechnologie:

- Fähigkeit, große Ströme zu treiben (dadurch sind schnelle Umladevorgänge möglich).
- Die Basis-Emitter-Schleusenspannung von ca. 0,7 V ist sehr stabil und reproduzierbar einzustellen und nur wenig von der Prozesstechnologie abhängig.
- Kurze Umschaltzeiten und damit hohe Arbeitsfrequenzen möglich.

Vorteile der MOS-Technologie:

- Weil das Gate isoliert ist, fließt im stationären Fall kein Strom ins Gate. Dadurch niedrige Leistungsaufnahme.
- Der stromführende Kanal ist durch den Transistoraufbau bereits isoliert. Dadurch ist keine zusätzliche Isolation notwendig. Ein MOS-Transistor ist ein sehr platzsparendes Bauelement und erlaubt daher hohe Integrationsdichten.
- Schwellspannung U_{th} ist einstellbar.

Die Weiterentwicklung der Technologie führt allerdings auch bei der MOS-Technik zu immer schnelleren Bauelementen, so dass der Geschwindigkeitsvorsprung der Bipolartechnik allmählich verschwindet.

Kontrollfragen

- Was ist eine Bandlücke?
- Wodurch sind Halbleitermaterialien charakterisiert?
- Definieren Sie den Begriff „freies Elektron“.
- Welche Leitungsmechanismen für elektrischen Strom gibt es in Halbleiterkristallen?
- Wie können die Leitungsmechanismen beeinflusst (verbessert) werden?
- Was ist ein pn-Übergang?
- Was passiert beim Anlegen einer Spannung an einen pn-Übergang?
- Nennen Sie möglichst viele Unterschiede zwischen einer Diode und einem Transistor.
- Stellen Sie die Eigenschaften von Bipolartransistoren und MOS-Transistoren in einer Tabelle gegenüber. Wo gibt es Unterschiede, wo gibt es Ähnlichkeiten?
- Zeichnen Sie schematisch den Aufbau eines MOS-Transistors.
- Welche Betriebsbereiche hat ein MOS-Transistor?
- Welche vier unterschiedlichen MOS-Transistor-Typen gibt es?
- Leiten Sie die Formeln für den Drain-Strom in diesen Betriebsbereichen aus einem geometrischen Modell der Ladungsträgerverteilung im Transistorkanal ab. Z.B. Sättigung: Dreieck, vgl. Abschnüreffekt. Hinweis: wurde in der Vorlesung näher erläutert.
- Was ist ein Arbeitspunkt?