

Benutzte Quellen

- ❑ Vorlesungen von Dr.-Ing. Vogelmann, Universität – Karlsruhe
- ❑ Vorlesungen von Dr.-Ing. Klos, Universität – Karlsruhe
- ❑ Vorlesungen von Dr.-Ing. Crokol, Universität – Karlsruhe
- ❑ <http://www.solarserver.de/wissen/photovoltaik.html#unt>
- ❑ <http://www.energiwelten.de/elexikon/lexikon/index3.htm>
- ❑ <http://www.elektronik-kompendium.de/sites>
- ❑ <http://www.prof-gossner.de/>
- ❑ <http://vcs.abdn.ac.uk/ENGINEERING/lasers/lasers.html>
- ❑ <http://people.fh-landshut.de/~gsh/>

Benutzte Bezeichnungen

- Aufschrift der Thema, die zum ersten Mal erscheint
- Aufschrift der Thema, die schon bekannt ist

Halbleiterbauelemente

- **pn-Übergang**
- Diode
- Transistor
- Verlustleistung, Wärmewiderstand

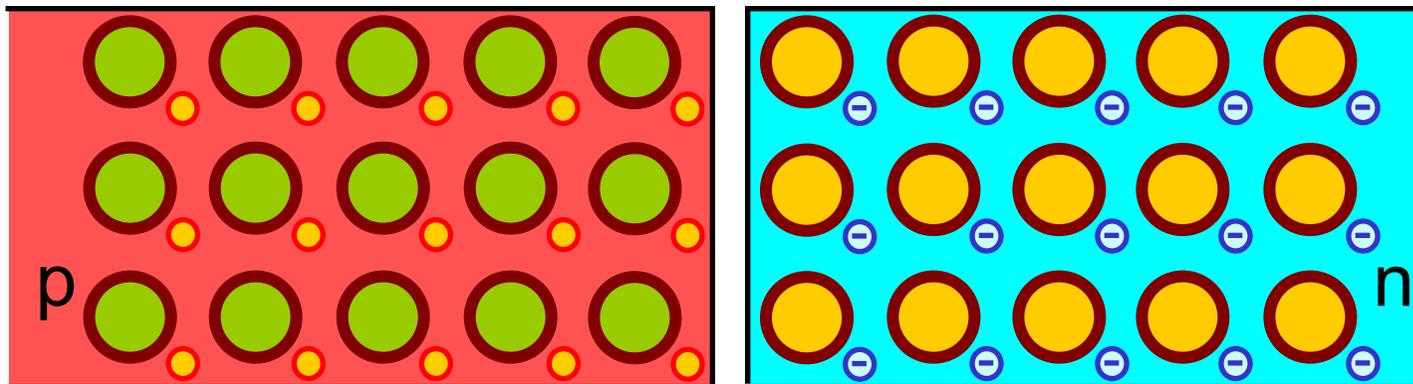
Halbleiterbauelemente

Lernziel:

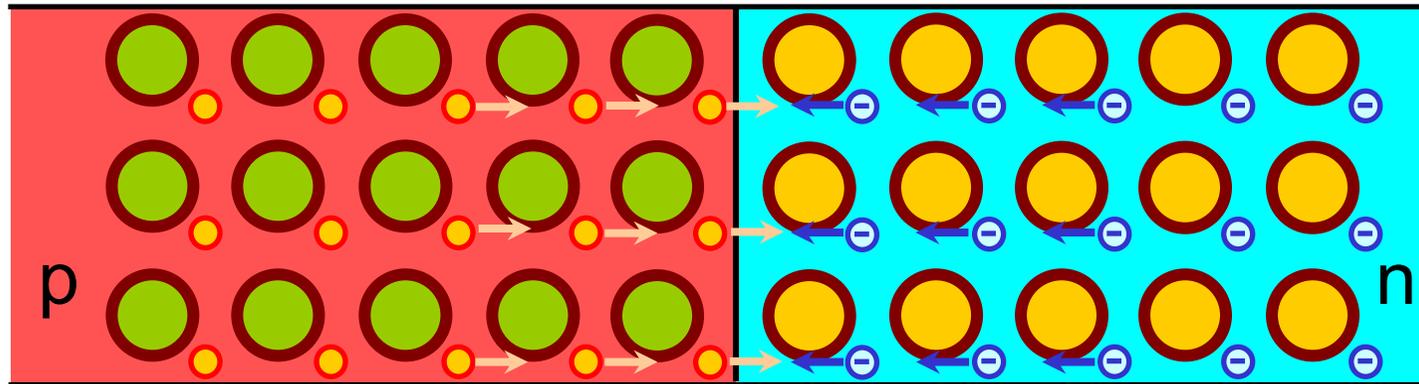
- Antworten auf folgende und ähnliche Fragen geben zu können:
 - Was versteht man unter pn-Übergang, Diode, Transistor?
 - Welche Typen Dioden und Transistoren sind Ihnen bekannt?
 - Welche sind die wichtigsten Kennlinien?
 - Welche sind die gemeinsamen Prinzipien zur Funktion der Bauelemente?
 - Welche sind die Unterschiede?

pn-Übergang

- Grenzfläche zwischen einer n- und einer p-dotierten Zone innerhalb eines monokristallinen Halbleiters
- In der n-dotierten Zone ist ein Elektron bei jedem Phosphor-Atom
- In der p-dotierten Zone ist ein Loch bei jedem Bor-Atom



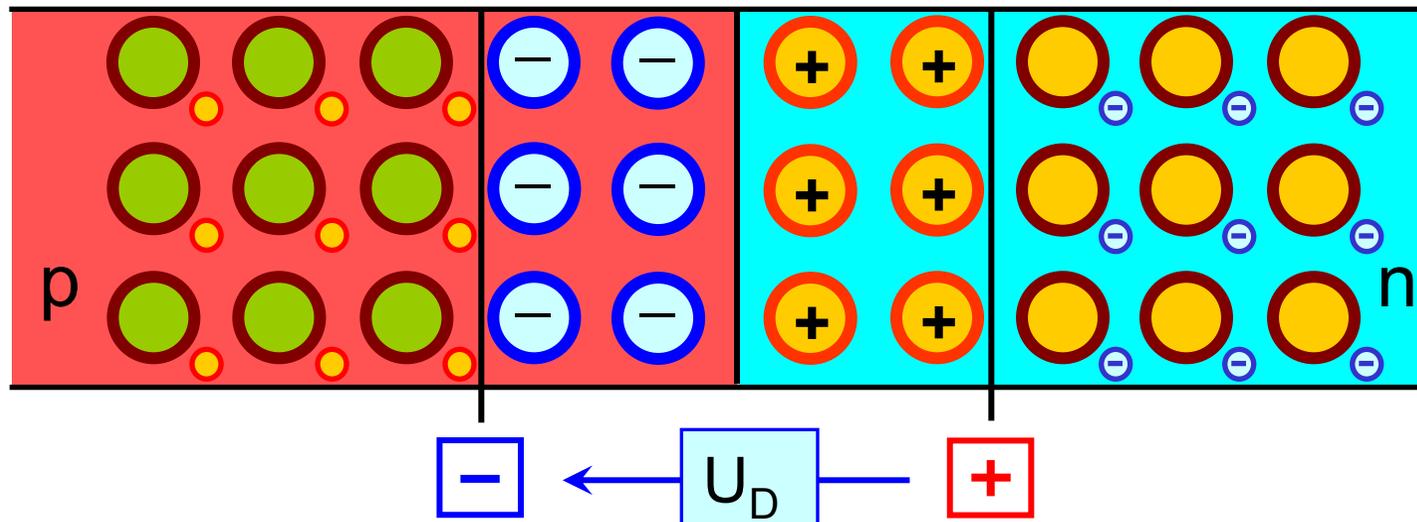
pn-Übergang



- Diffusion und Rekombination der Majoritätsträger führen dazu, daß in der Nähe des pn-Überganges bewegliche Ladungsträger verschwinden \Rightarrow **Raumladungszone**
- Auf der n- und p-Seite bleiben ortsfesten positiven und negativen Raumladungen, die nicht mehr elektrisch kompensiert sind

pn-Übergang

- Die ortsfesten positiven und negativen Raumladungen stoßen die Majoritätsträger ab.
- Die Raumladungen bewirken eine Diffusionsspannung (U_D), die der thermischen Bewegung entgegenwirkt



pn-Übergang

- Weil in dieser Zone keine Majoritätsträger gibt, weist die Raumladungszone hochohmigen Widerstand.
- Deswegen wird sie noch als **Sperrschicht** bezeichnet.
- Im normalen Fall sind die p- und n-Schichten mit verschiedener Dotierungskonzentration.
- Davon hängt die Breite der Raumladungszone ab.

Halbleiterbauelemente

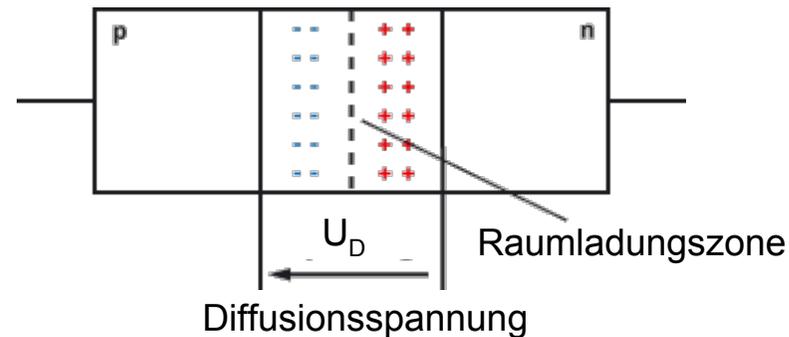
- *pn-Übergang*
- **Diode**
- Transistor
- Verlustleistung, Wärmewiderstand

Diode

- Die Diode ist ein pn-Übergang mit zwei Anschlüsse.
- Der Anschluss zu der p-Schicht heißt **Anode (A)**;
- Der Anschluss zu der n-Schicht heißt **Kathode (K)**.



Schaltsymbol

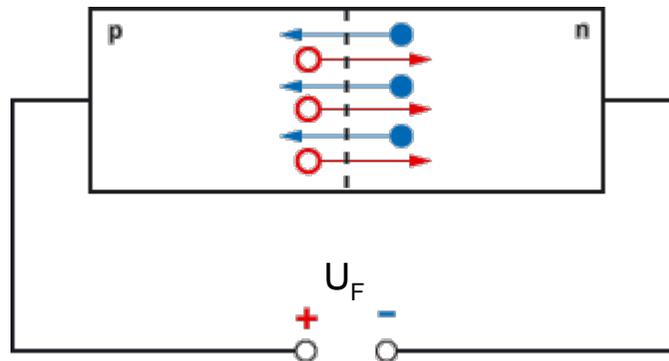


Diode

- Es sind zwei Varianten möglich die Aussenspannung zu den Anschlüssen der Diode zu verbinden:
 - Durchlaßrichtung - die **Anode** ist an **Plus** der Spannungsquelle verbunden, die **Kathode** – an **Minus**.
 - Sperrrichtung – die **Anode** ist an **Minus** der Spannungsquelle verbunden, die **Kathode** – an **Plus**.

Diode in Durchlaßrichtung

- Die Aussenspannung U_F wirkt entgegen der Diffusionsspannung U_D
- Bei der Erhöhung der Aussenspannung:
 - Die Raumladungszone wird schmaler;
 - Mehr Majoritätsträger passieren die Grenzfläche.



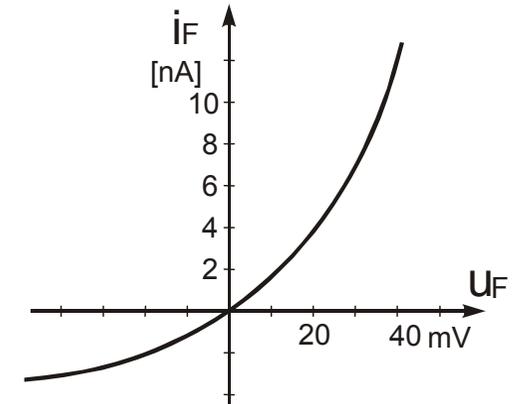
Diodenkennlinie

- Der Diodenstrom I_F steigt exponentiell an, der wird mit folgender Gleichung beschrieben:

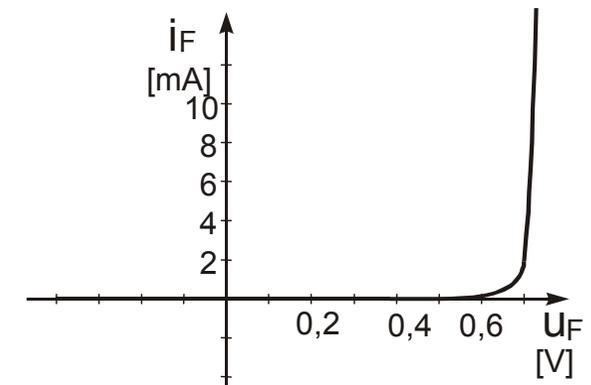
$$I_F = I_S \cdot \left(e^{\frac{U_F}{U_T}} - 1 \right) \approx I_S \cdot e^{\frac{U_F}{U_T}}, \text{ bei } U_F > 0,1 \text{ V}$$

$$U_T = \frac{k \cdot T}{q} = 26 \text{ mV}, \text{ bei } T = 300 \text{ K}$$

I_S – Sättigungssperrstrom



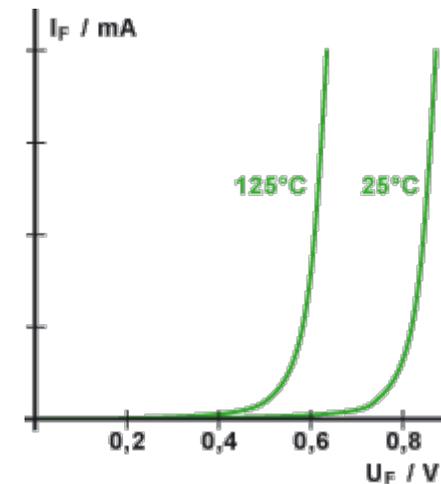
bei sehr kleinem Strom



bei großem Strom

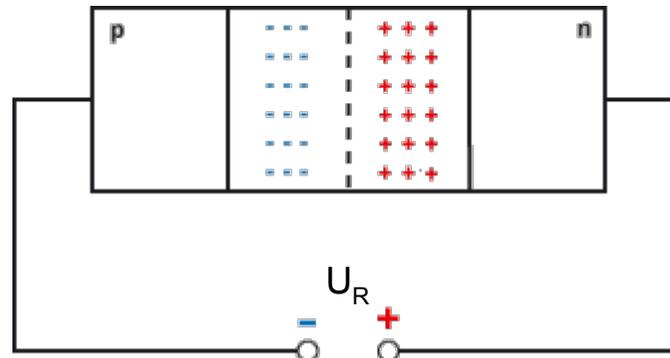
Diode. Temperaturabhängigkeit

- Die Kennlinie der Diode in Durchlaßrichtung ändert sich bei Temperaturänderung.
- Die Abhängigkeit $\frac{dU_F}{dT} \approx -2 \frac{\text{mV}}{\text{K}}$ ist linear:
- Sie wird benutzt zur Temperaturmessung im Bereich von -20° bis $+100^\circ$.
- Bei einem konstanten Diodenstrom ist die Diodenspannung der Temperatur proportional.



Diode in Sperrrichtung

- Die Aussenspannung U_R und die Diffusionsspannung U_D wirken in derselben Richtung
- Bei der Erhöhung der Aussenspannung :
 - Die Raumladungszone wird breiter;
 - Die Majoritätsträger passieren die Grenzfläche **nicht**.

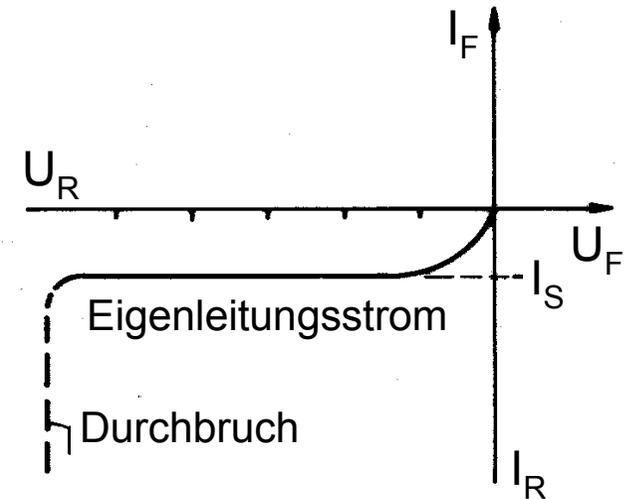


Diodenkennlinie

- Der Diodenstrom in Sperrrichtung I_R bleibt konstant:

$$I_R = I_S \cdot \left(\frac{1}{e^{\frac{U_R}{U_T}}} - 1 \right) \approx -I_S, \text{ при } U_R \gg U_T$$

- Der Sättigungssperrstrom I_S ist Eigenleitungsstrom, daher klein aber extrem temperaturabhängig
- Bleibt konstant, da Raumladungszone wächst

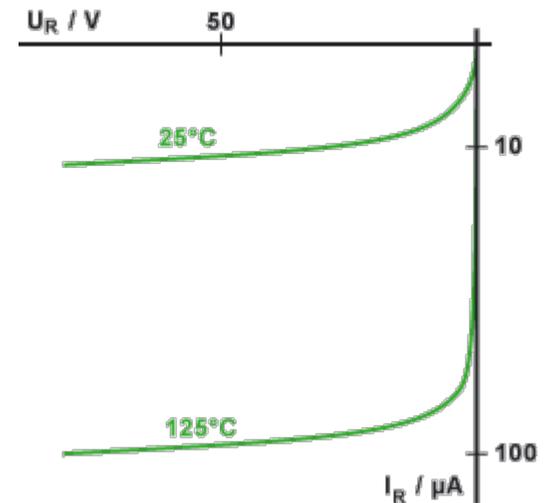


Diodenkennlinie

- ❑ Durchbruch bei hohen Sperrspannungen, weil durch große Feldstärke Ladungsträger aus dem Valenzband lawinenartig freigesetzt werden (Lawinendurchbruch)
- ❑ Durchbruchspannung ist die maximale Spannung in Sperrrichtung
- ❑ Durchbruchspannungen im Bereich von V bis kV
- Auch bei kleinen Strömen hohe Verlustleistung ⇒ Zerstörung des pn-Übergangs!

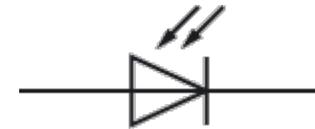
Diode. Temperaturabhängigkeit

- ❑ Bei einer höheren Temperatur stoßen die Ladungsträger öfter zusammen und werden somit unbeweglicher.
- ❑ Doch gerade durch die höhere Temperatur werden weitere Ladungsträger aus dem Halbleitermaterial frei, was zur Erhöhung der Leitfähigkeit führt.
- ❑ Das führt zu einem größeren Sperrstrom.
- Der Sperrstrom wächst annähernd exponentiell mit zunehmender Temperatur.

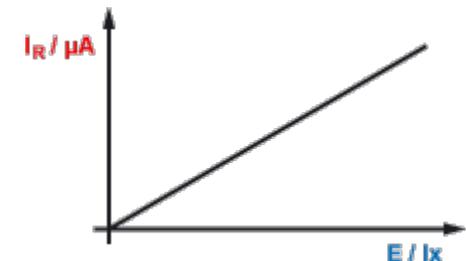
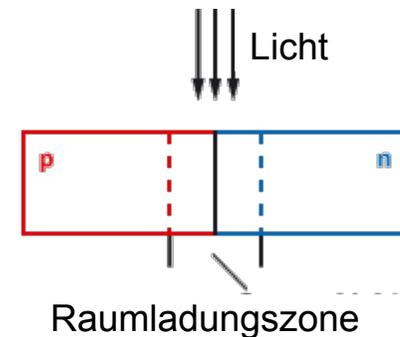


Fotodiode

- Die Fotodioden wandeln Licht in elektrische Energie um
- Bei einfallendem Licht auf den pn-Übergang werden freie Ladungsträger erzeugt
- Die Fotodiode wird in Sperrrichtung betrieben
- Sperrstrom I_R und Lichtstärke sind linear zueinander



Schaltsymbol

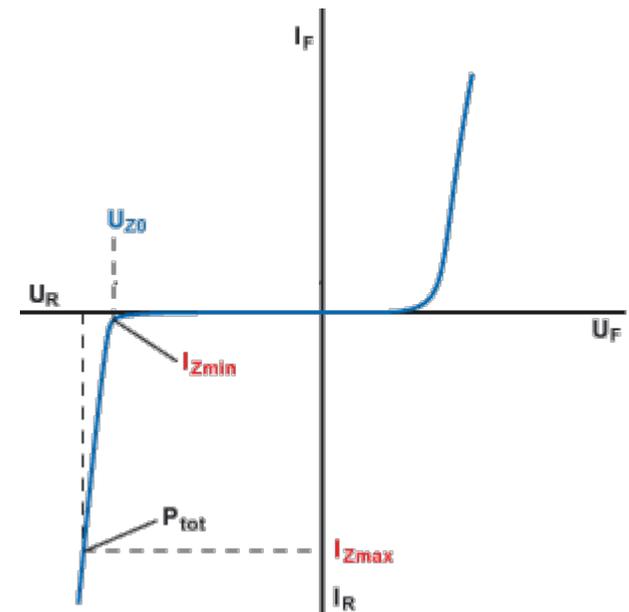


Zenerdiode

- ❑ Wird zur Stabilisierung von pulsierenden Gleichspannungen verwendet
- Wird in Sperrrichtung betrieben
- In Durchlaßrichtung arbeitet sie wie eine normale Diode
- ❑ Bei einer Veränderung des Stroms von I_{Zmin} bis I_{Zmax} bleibt die Diodenspannung fast konstant
- ❑ Wird der Strom größer als I_{Zmax} , wird die Zenerdiode zerstört

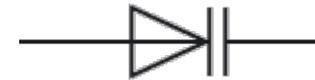


Schaltsymbol

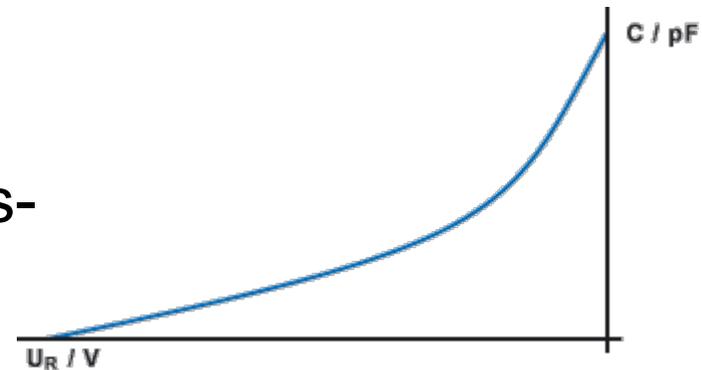


Kapazitätsdiode

- Ersatz für Drehkondensatoren für die Schwingkreisabstimmung in Radios und Fernsehgeräten
- Ist in Sperrrichtung geschaltet
- Zwischen der Sperrschicht-Kapazität und der Sperrspannung besteht eine nichtlineare Abhängigkeit
- Das ist die Kapazität der Raumladungszone, die bei höherer Sperrspannung kleiner wird, weil die Zone breiter wird

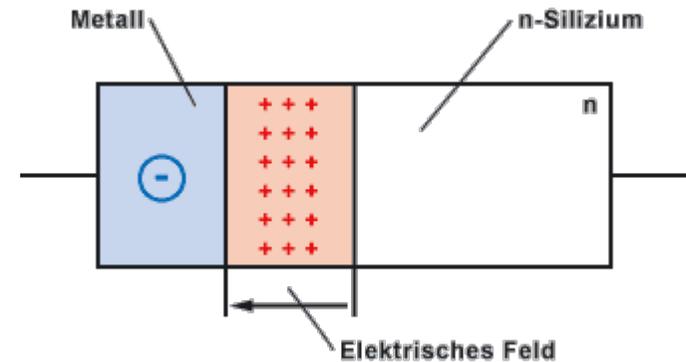


Schaltsymbol



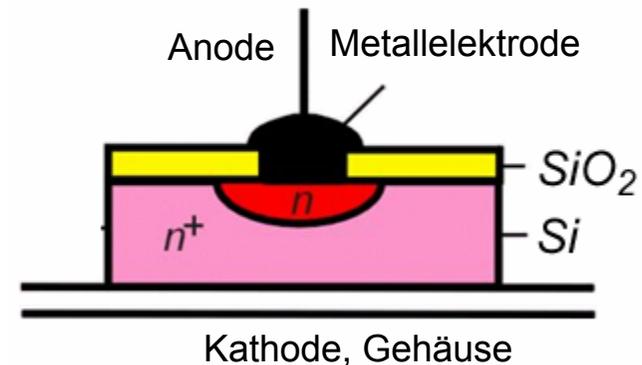
Schottky-Diode (Hot-Carrier-Diode)

- Die Elektronen der n-Schicht (Majoritätsträger) wandern zur Metallschicht.
- Elektronen gelangen leichter aus n-Silizium in die Metallschicht als umgekehrt, in der Silizium-Schicht entsteht eine Raumladungszone.
- Keine Minoritätsträger (Löcher).
- Das Schalten vom Durchlaßzustand in den Sperrzustand bzw. umgekehrt erfolgt sehr schnell.



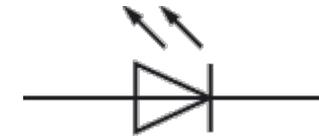
Schottky-Diode

- Geringe Durchlaßspannung \Rightarrow kleinere Verlustleistung
- Geringe Sperrspannung
- Größerer Sperrstrom \Rightarrow größere Verlustleistung
- Wird benutzt:
 - in der integrierten Schaltungstechnik wegen der kleinen Durchlaßspannung
 - In der Mikrowellentechnik wegen der kleinen Schaltzeiten

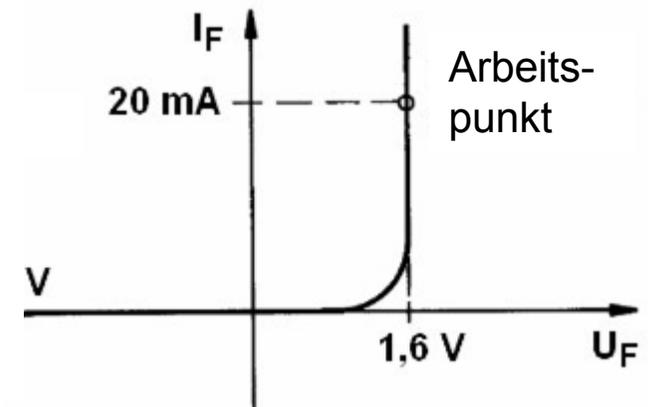
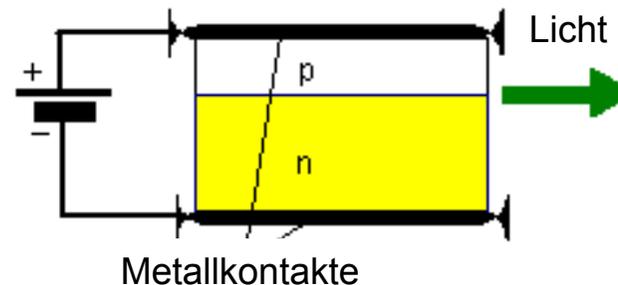
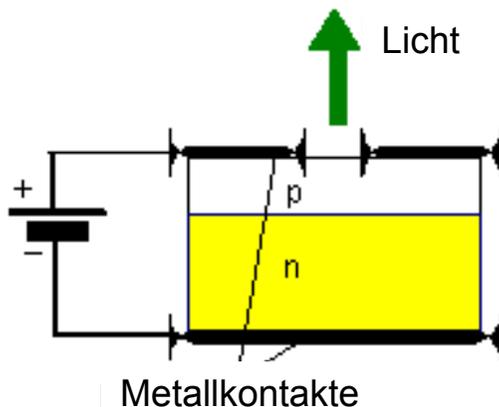


Leuchtdiode

- Leuchtdioden wandeln elektrische Energie in Licht um
- Bei einigen mA Durchflußstrom leuchten sehr hell
- Die Elektronen rekombinieren mit den Löchern und geben ihre Energie in Form eines Lichtblitzes frei.

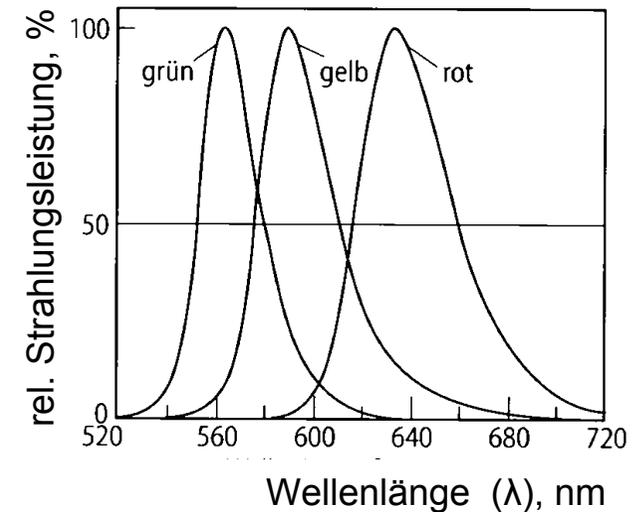


Schaltsymbol



Leuchtdiode

Farbe	Flußspannung bei $I=20$ mA	Material	Wellenlänge
IR	1,3	GaAs:Si	930 nm
rot	1,6	GaP:Zn,O	690 nm
rot	1,8	GaAs _{0,6} P _{0,4}	650 nm
orange	2,0	GaAs _{0,35} P _{0,65} :N	630 nm
gelb	2,2	GaAs _{0,15} P _{0,85} :N	590 nm
grün	2,4	GaP:N	570 nm
blau	4	SiC:AL,N	470 nm
blau	4,5	GaN:Zn	440 nm



- Die Strahlungsenergie wird größer von infrarot zu blau
- Die Flußspannung U_F der Leuchtdioden wird auch größer

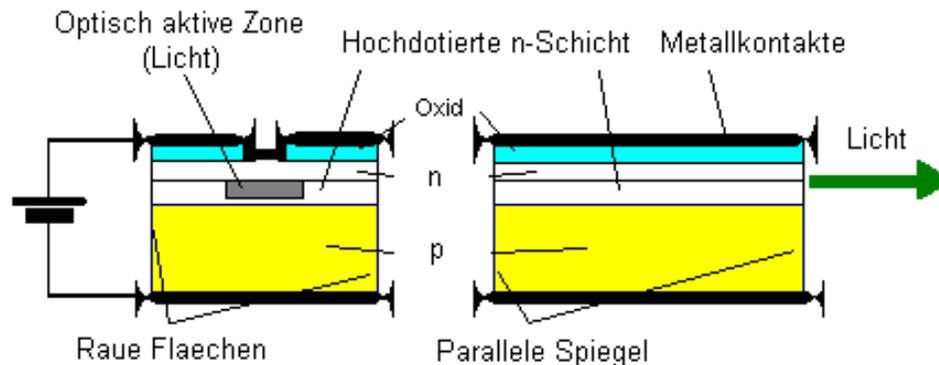
Leuchtdiode (LED)



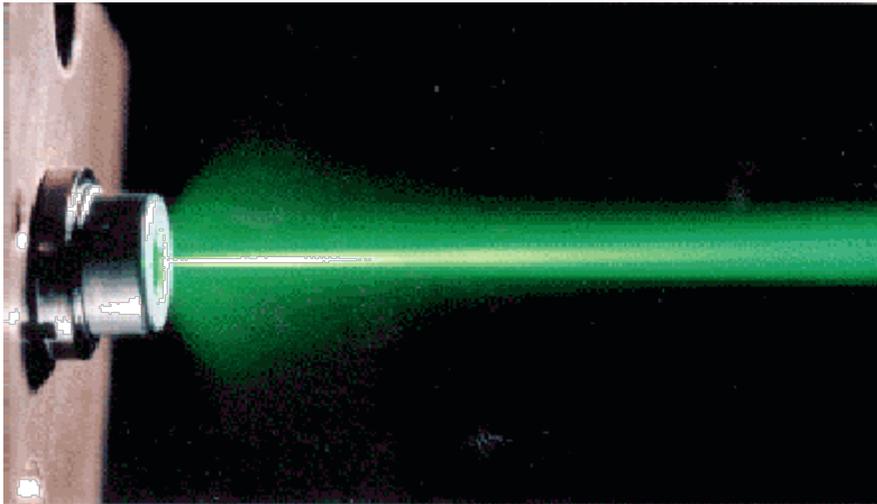
- 7-Segment Anzeige
- Diverse LEDs

Laserdiode (LASER)

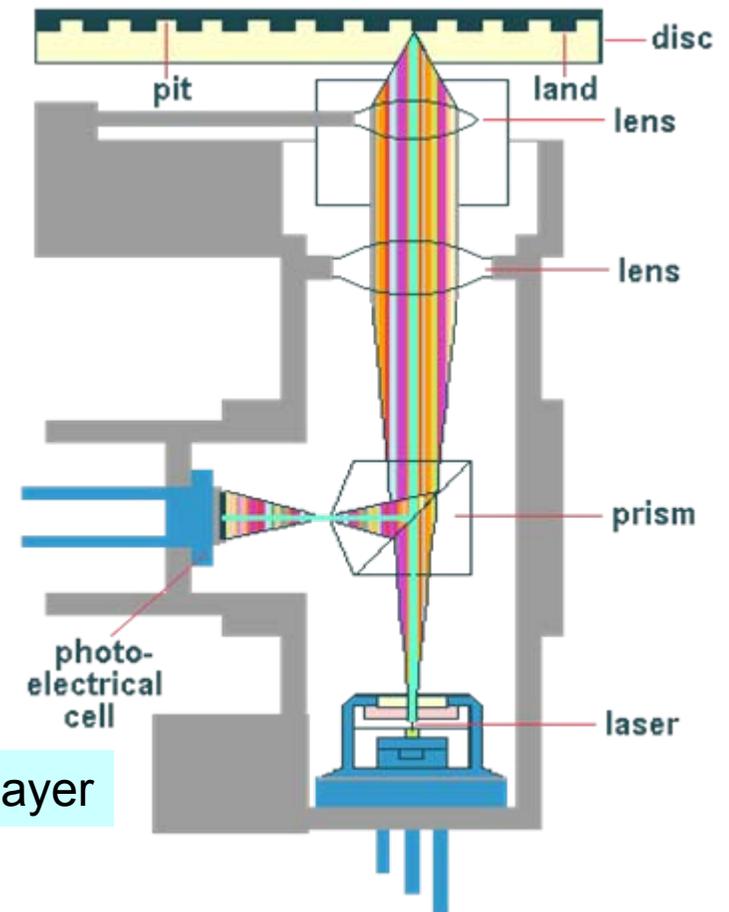
- Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation
- In der LED-Struktur wird eine hochdotierte n-Schicht eingefügt.
- Der Stromfluss durch die Sperrzone ruft Rekombinationsprozesse hervor. Die Endflächen des Bauelements sind teilreflektierend und bilden somit einen optischen Resonator, in dem sich eine stehende Lichtwelle ausbilden kann. ⇒ Licht



Laserdiode



Laserstrahl

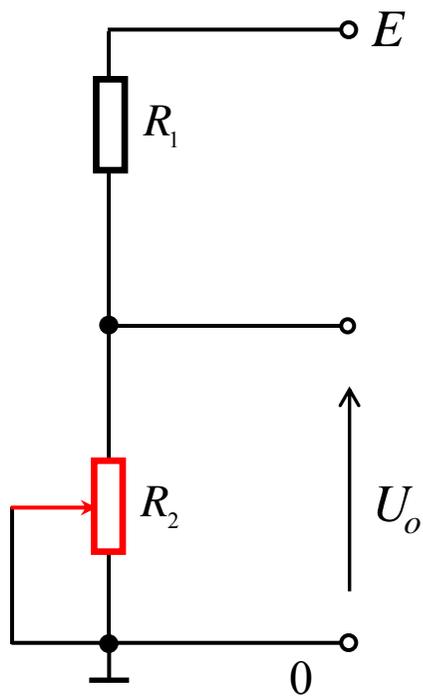


Laserdiode im CD-Player

Halbleiterbauelemente

- *pn-Übergang*
- *Diode*
- **Transistor**
- Verlustleistung, Wärmewiderstand

Spannungsteiler mit Potenziometer



$$U_o = E \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

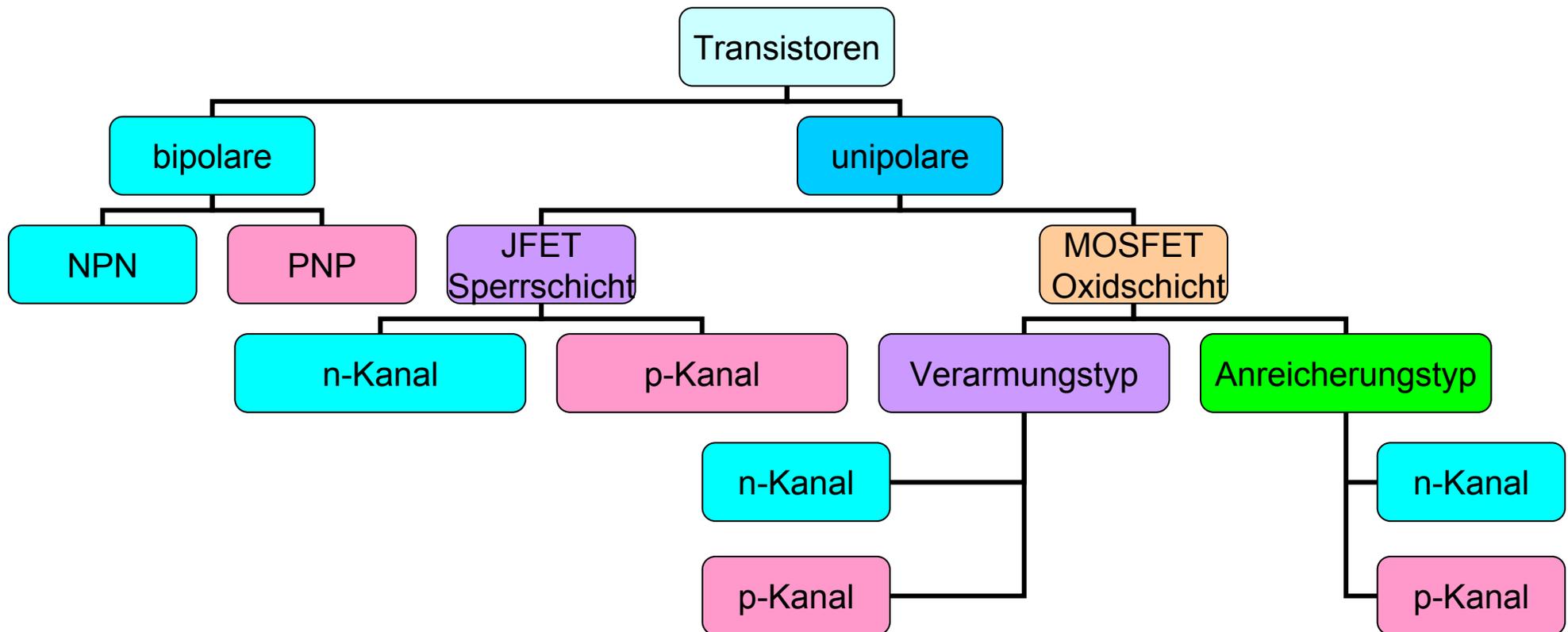
Bei $R_2 \gg R_1$ (und Schleifer ganz unten)

$$U_o \approx E$$

Bei Schleifer ganz oben :

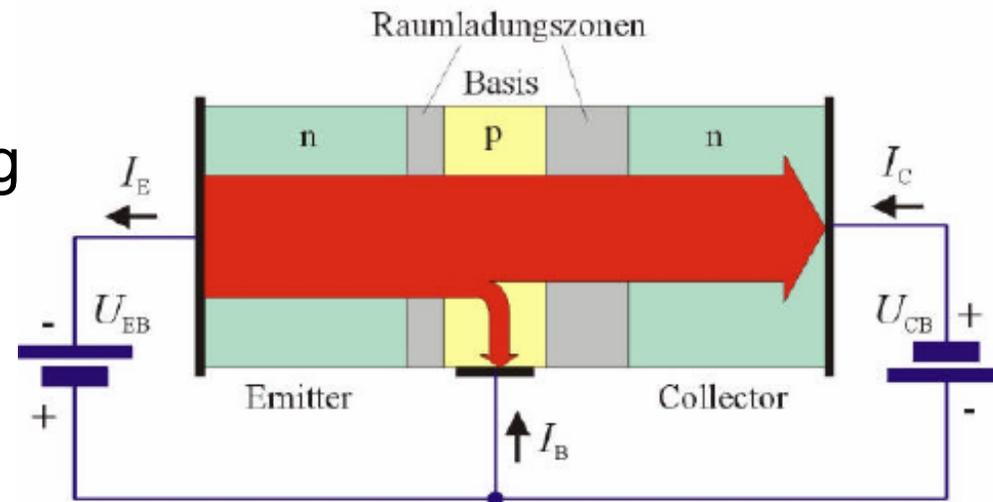
$$U_o = 0$$

Transistortypen



Bipolartransistor (NPN)

- ❑ Es gibt zwei hochdotierten n-Schichten und eine leicht dotierte und dünne p-Schicht dazwischen, (**Basis**)
- ❑ Die beiden n-Schichten sind **Emitter** und **Kollektor**
- 2 Raumladungszonen
- oder 2 pn-Übergänge
- ❑ Jeder von denen kann in Durchlaß- oder Sperrrichtung verbunden werden
- Vier mögliche Betriebsbereiche

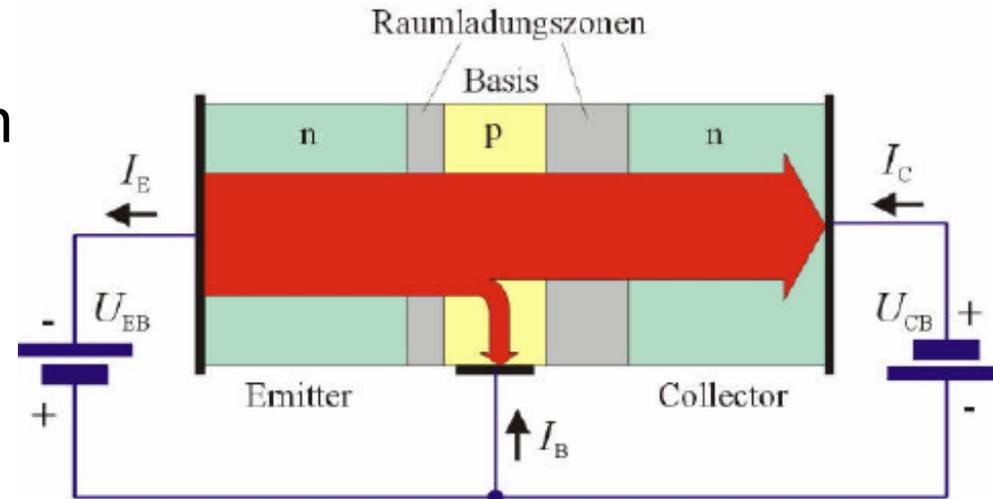


Bipolartransistor(NPN)

- *Aktiv normaler Bereich* \Rightarrow die **E-B**-Sperrschicht ist in Durchlaßrichtung, die **C-B**-Sperrschicht ist in Sperrrichtung gepolt.
- *Sättigungsbereich* \Rightarrow beide Sperrschichten sind in Durchlaßrichtung gepolt.
- *Sperrbereich* \Rightarrow beide Sperrschichten sind in Sperrrichtung gepolt.
- *Aktiv inverser Bereich* \Rightarrow die **C-B**-Sperrschicht ist in Durchlaßrichtung, die **E-B**-Sperrschicht ist in Sperrrichtung gepolt.

Bipolartransistor (NPN)

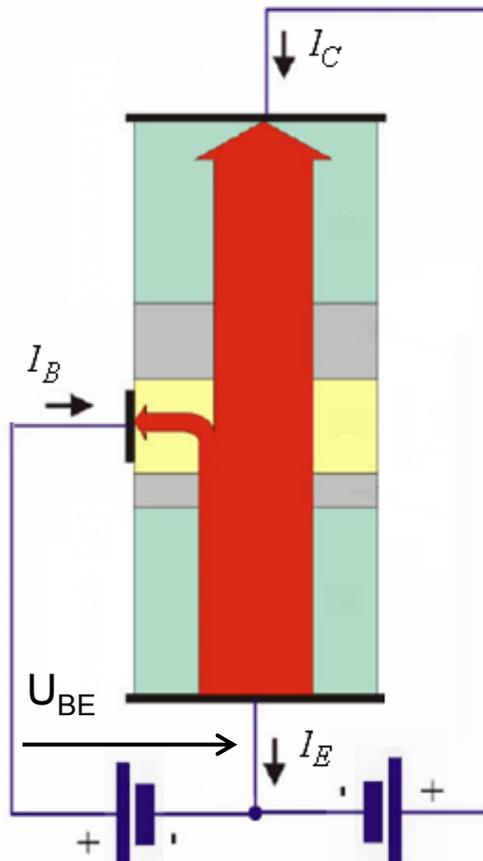
- Im *Aktiv normalen Betrieb* werden vom **E** in die **B** Elektronen hineingetrieben. Von der **B** in den **E** bewegen sich Löcher, aber viel weniger, weil die Basis leicht dotiert ist.
- Es gibt **zwei Typen Ladungsträger**, die Transistoreigenschaften hängen von den Elektronen ab.
- Die meisten davon gelangen vor der Rekombination durch thermische Bewegung in die C-B-Raumladungszone und werden von der dort vorhandenen Feldstärke zum Kollektor getrieben.



Bipolartransistor (NPN)

- Der Basisstrom ist wesentlich kleiner als der Emitterstrom und der Kollektorstrom ($I_E = I_C + I_B$)
- Man unterscheidet je nach Wahl der Bezugselektrode drei verschiedene *Grundsaltungen* – Basisschaltung, Emitterschaltung und Kollektorschaltung ⇒ jede Grundsaltung hat verschiedene Eigenschaften
- Stromverstärkung:
 - Das Verhältnis des Ausgangsstroms zum Eingangsstrom (oder das Verhältnis dessen Veränderung)
- Steilheit:
 - Das Verhältnis der Ausgangsstromsänderung zur Eingangsspannungsänderung

Stromverstärkung (Emitterschaltung)



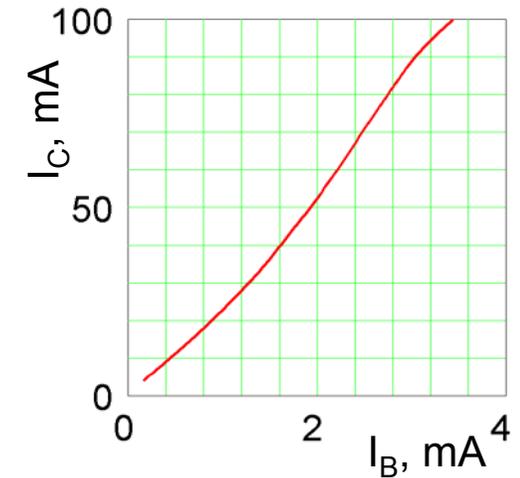
□ Stromverstärkung:

➤ Gleichstrom-
verstärkung

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

➤ Wechselstrom-
verstärkung

$$\beta = \frac{dI_C}{dI_B}$$

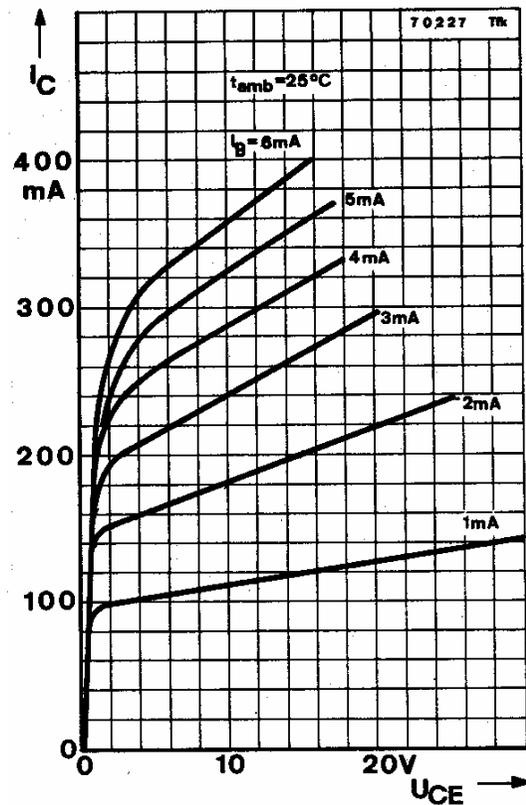


□ Die Stromverstärkung ist extrem von Fertigungstoleranzen abhängig und weist eine große Exemplarstreuung auf.

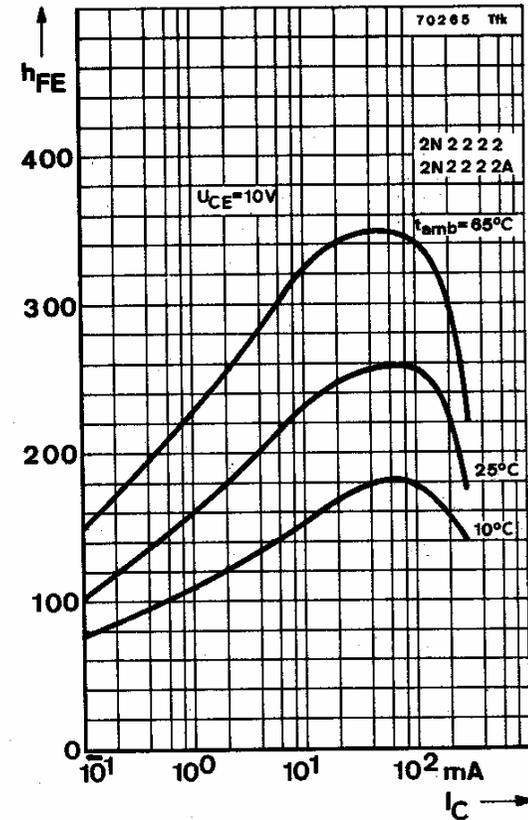
Steilheit (Emitterschaltung)

- Die Basis-Emitter-Strecke ist in Durchlaßrichtung gepolter pn-Übergang, d.h. $I_E = I_S e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}$
- Der größte Teil der vom Emitter in die Basis-Zone emittierten Ladungsträger diffundiert zum Kollektor ($I_C \approx I_E$), oder $I_C = I_S e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}$
- $$S = \frac{dI_C}{dU_{BE}} = I_S \frac{de^{\frac{U_{BE}}{U_T}}}{dU_{BE}} = \frac{I_S}{U_T} e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} = \frac{I_C}{U_T}$$
- Die Steilheit ist wenig temperaturabhängig und unterliegt kaum der Exemplarstreuung
- Die Stromverstärkung und die Steilheit werden bei $U_{CE} = \text{const.}$ bestimmt.

Kennlinien



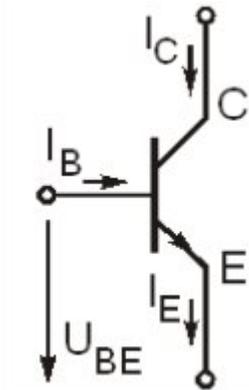
Ausgangskennlinienfeld



Wechselstromverstärkung ($h_{FE} = \beta$)

Schaltsymbole

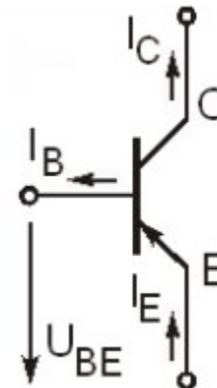
NPN-Transistor



$$0 < U_{BE} < 0,6 \text{ V}$$

$$U_{CE} > 0,6 \text{ V}$$

PNP-Transistor

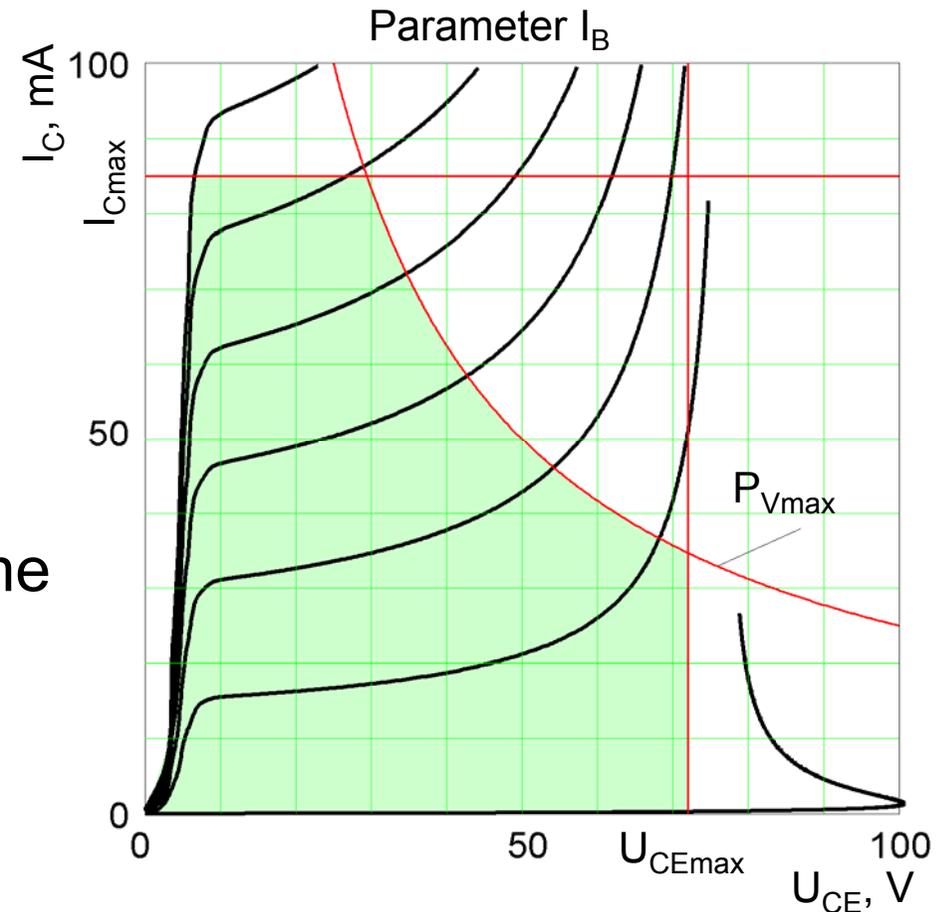


$$-0,6 \text{ V} < U_{BE} < 0$$

$$U_{CE} < -0,6 \text{ V}$$

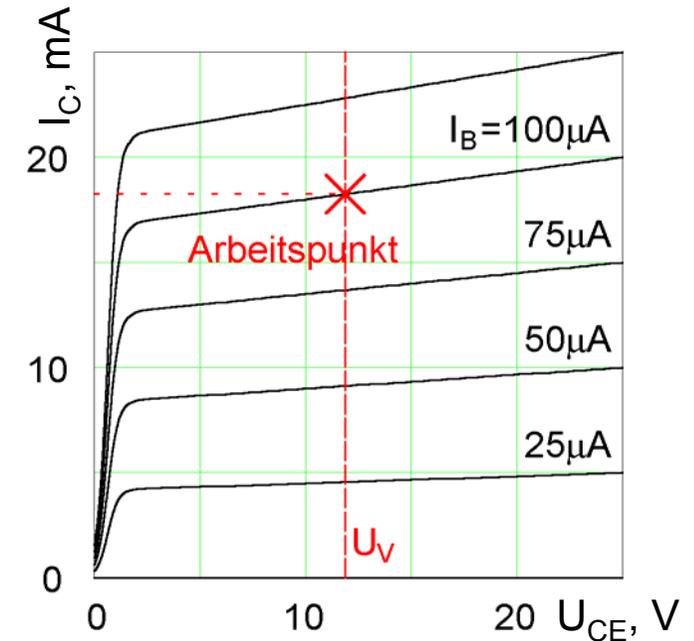
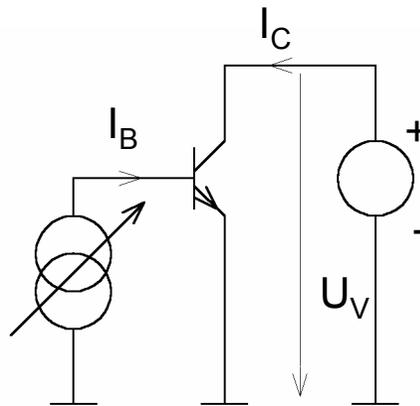
Arbeitsbereich

- ❑ Die Maximalwerte sind abhängig von:
- ❑ Strom I_{Cmax} \Rightarrow Bonden (Drahtdurchmesser)
- ❑ Spannung U_{CEmax} \Rightarrow Durchbruch
- ❑ Leistung P_{Vmax} \Rightarrow Verlustwärme
- In gruen gefärbte Arbeitszone ist als SOA (Safe Operating Area) bekannt.



Arbeitspunkt

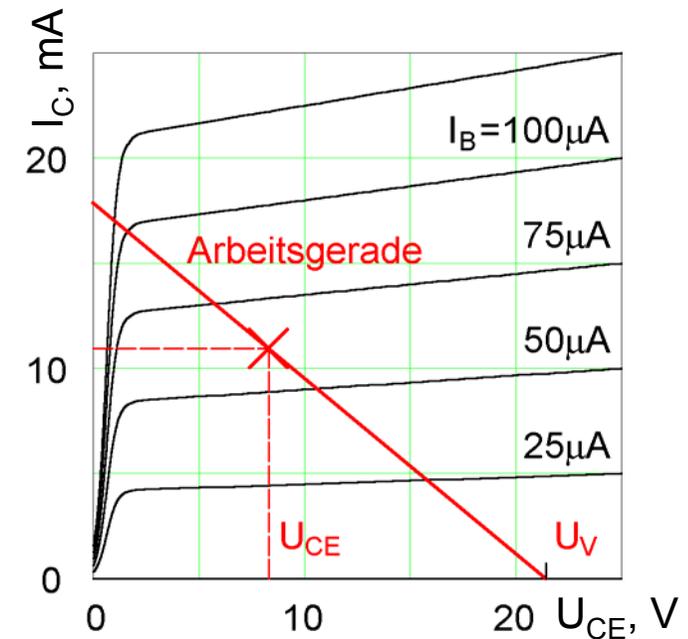
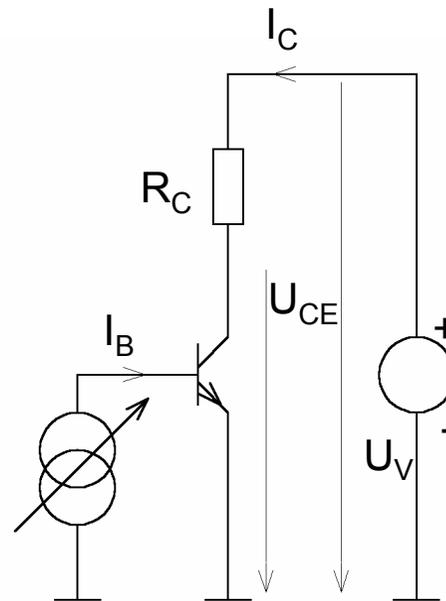
- Der Arbeitspunkt ist irgendeine Kombination von Kollektor-Emitter-Spannung und Kollektorstrom im erlaubten Arbeitsbereich des Transistors.
- Seine Position wird durch den Basisstrom bestimmt.



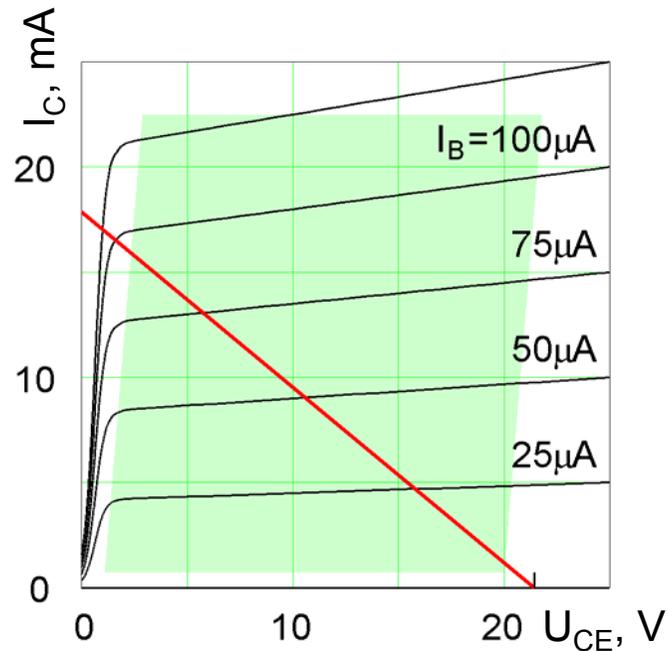
Arbeitsgerade

- Der Kollektorstrom I_C verursacht an dem Widerstand R_C eine Spannung.
- Dadurch ändert sich die Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} .

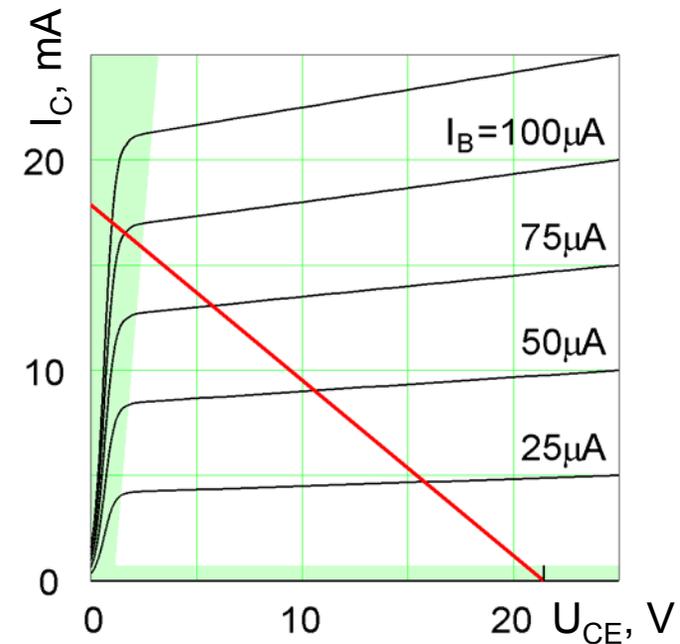
$$U_{CE} = U_V - R_C \cdot I_C$$



Aussteuerbereich

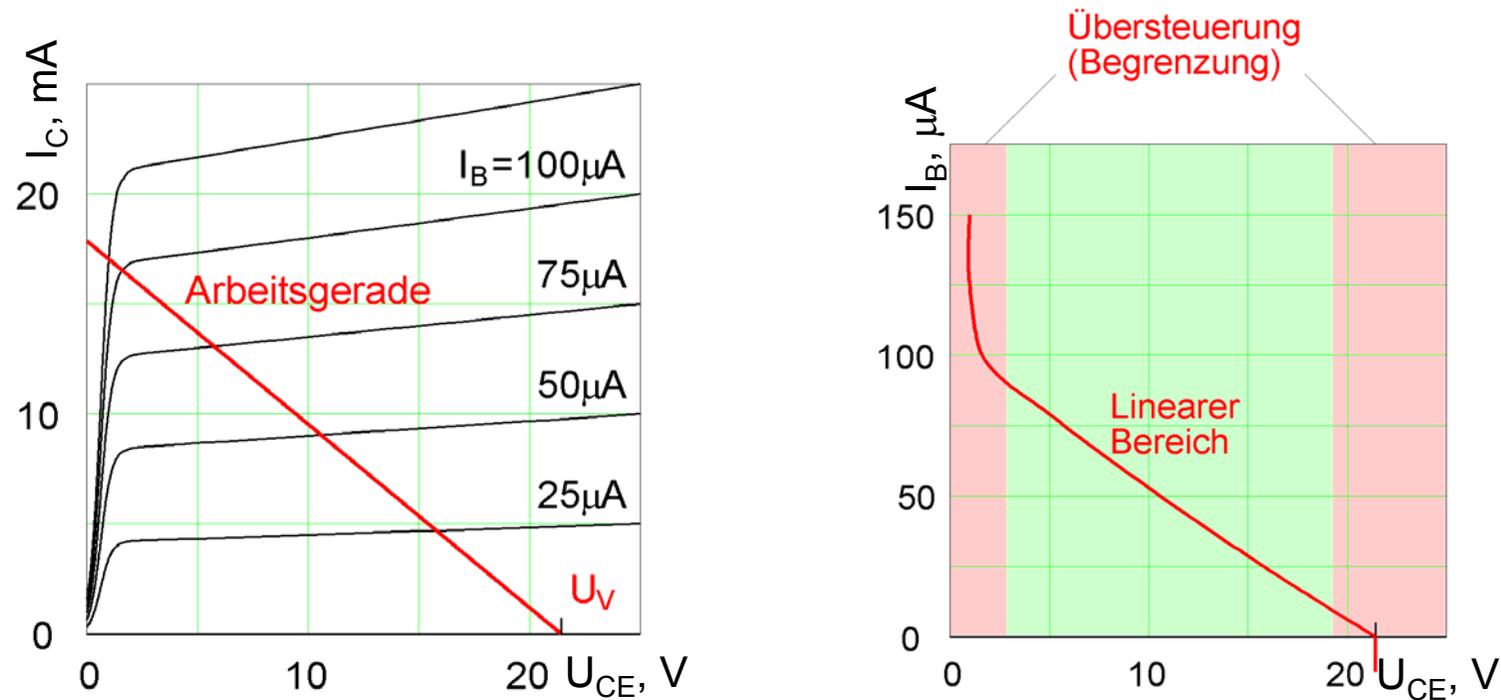


Linearer Bereich: Das Ausgangssignal hängt linear vom Eingangssignal ab.



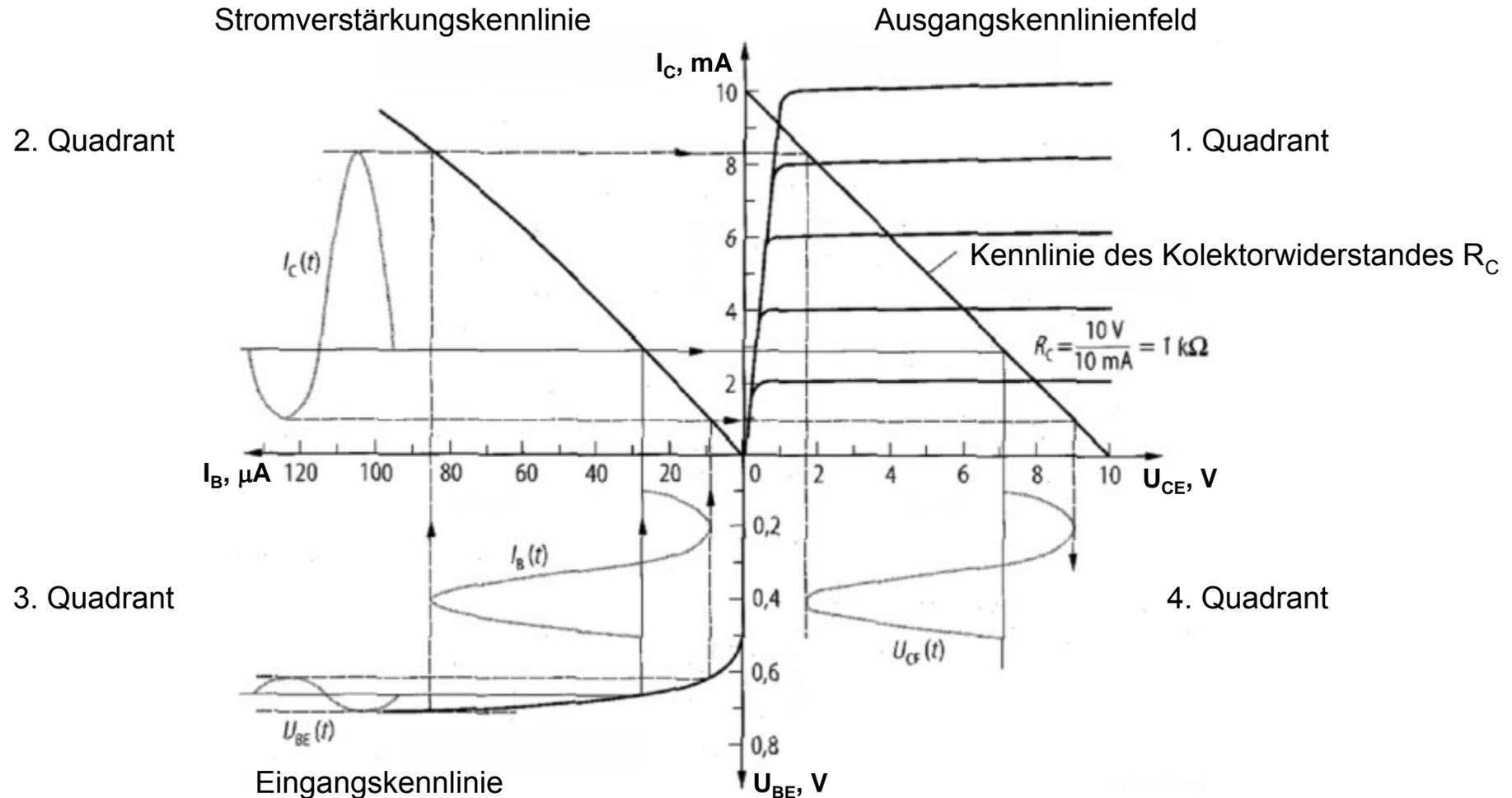
Übersteuerungs-Bereich: Das Ausgangssignal wird unabhängig vom Eingangssignal begrenzt.

Grenzen der Aussteuerung

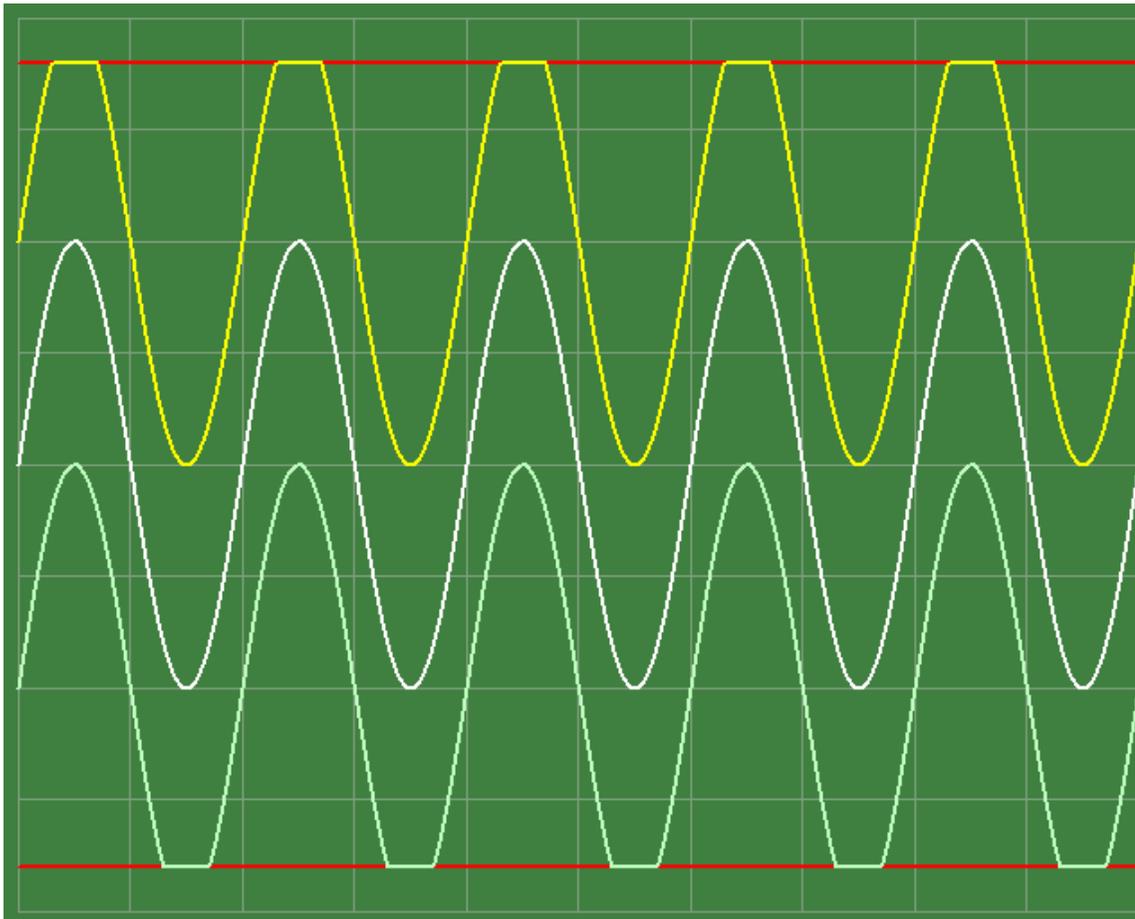


Mit Vergrößerung des Basisstromes bewegt sich der Arbeitspunkt auf der Arbeitsgerade von gesperrten Zustand des Transistors (rechte Begrenzungszone) durch den linearen Bereich bis zur Sättigung (Linke Zone)

Aussteuerung



Wechselspannung im Aussteuerbereich



- rot: Aussteuergrenzen.
- weis: unverzerrte Spannungskurve.
- gelb: Spannung stößt an obere Aussteuergrenze und wird verzerrt.
- grün: Spannung stößt an untere Aussteuergrenze und wird verzerrt.

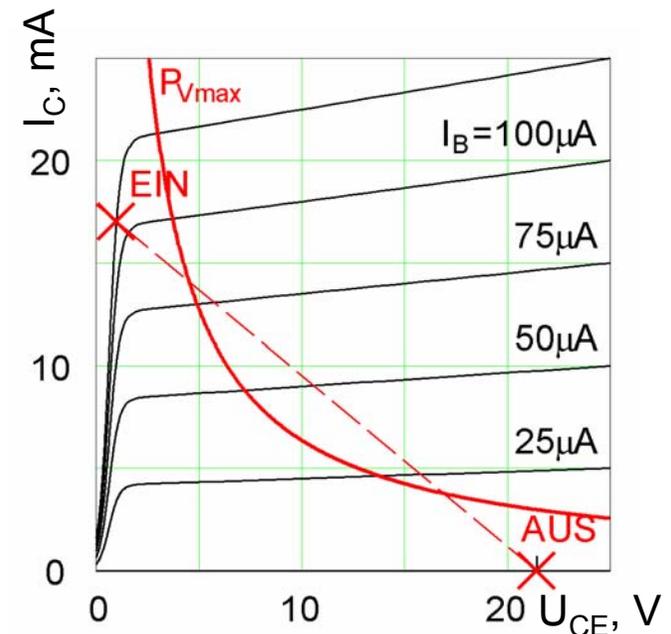
Modulierte Wechselspannung



- Bei zu großer Aussteuerung wird die Spannung begrenzt

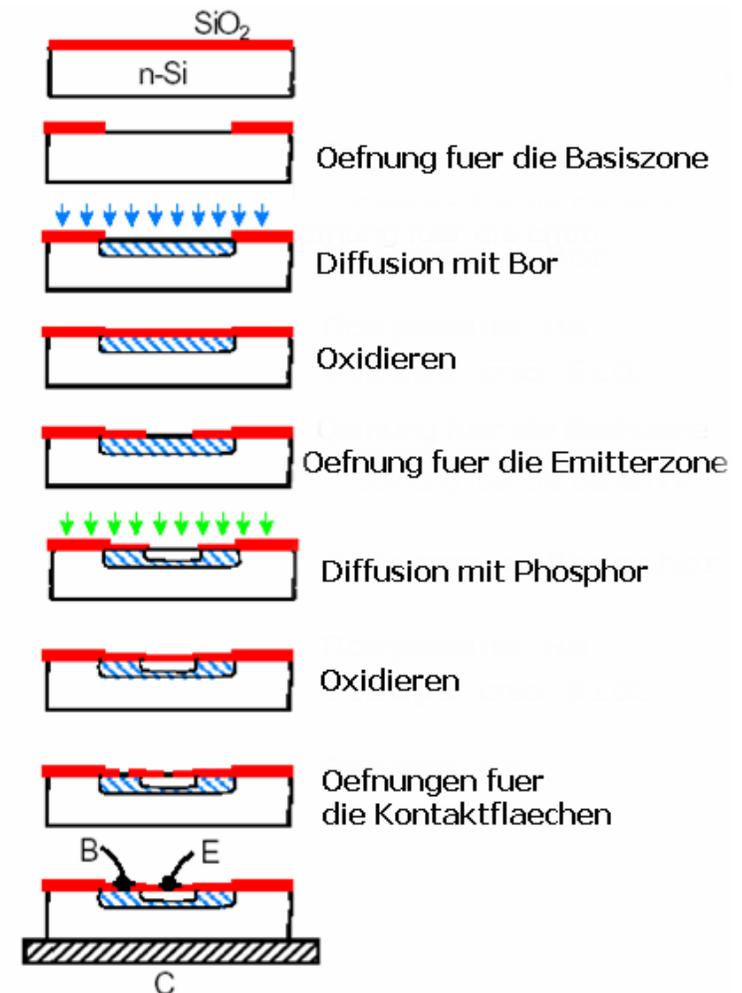
Schaltbetrieb

- Zwei Ausgangszustände:
 - „EIN“
 - „AUS“
- Darstellung binärer Zahlen in der Digitaltechnik: 1 Bit
- Schalter in der Leistungstechnik
- Die Arbeitspunkte „EIN“ und „AUS“ sind die beiden Punkte der Arbeitsgeraden mit der kleinsten Verlustleistung.
- Der lineare Bereich mit der großen Verlustleistung muß schnell durchquert werden.



Diffusionstransistor (NPN)

- Zur Herstellung der notwendigen Elemente auf einem Halbleitersubstrat sind mehrere Diffusionsvorgänge notwendig
- Transistoren, Dioden, Widerstände, ...
- Zwischen zwei Diffusionen folgen mehrere Vorgänge: oxidieren, mit Fotolack abdecken, belichten durch die Masken, entwickeln, ätzen

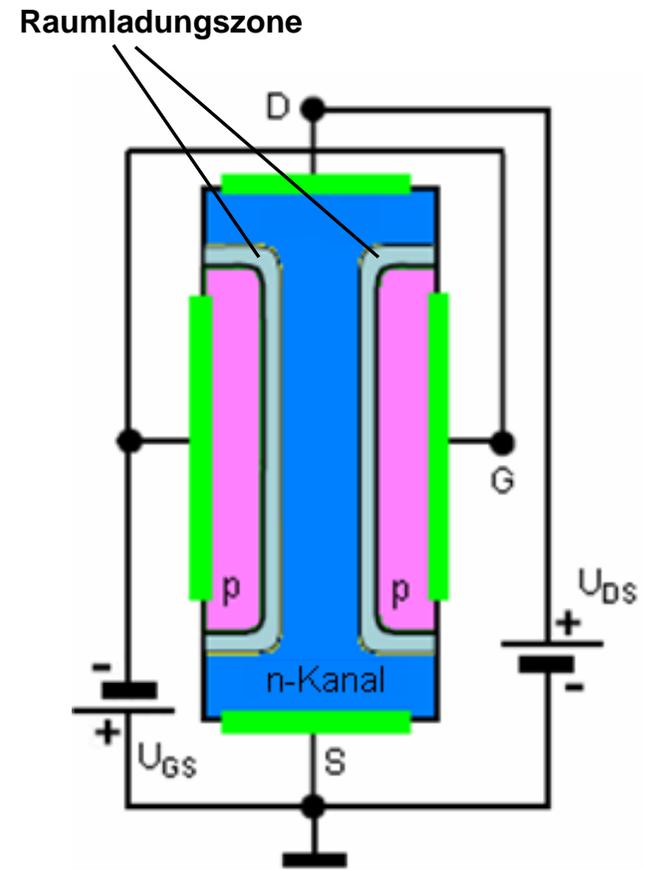


Unipolartransistor

- ❑ Die bipolaren Transistoren sind stromgesteuert.
- ❑ Die Unipolartransistoren sind spannungsgesteuert (Feld), deswegen werden die als Feldeffekttransistoren bezeichnet
 - FET (Field Effect Transistors).
- ❑ J ist die Bezeichnung in der englischen Sprache für den PN-Übergang
 - JFET ist ein Sperrschichttransistor
- ❑ MOS (Metal Oxide Semiconductor)
 - MOSFET ist ein Isolierschicht-Feldeffekttransistor

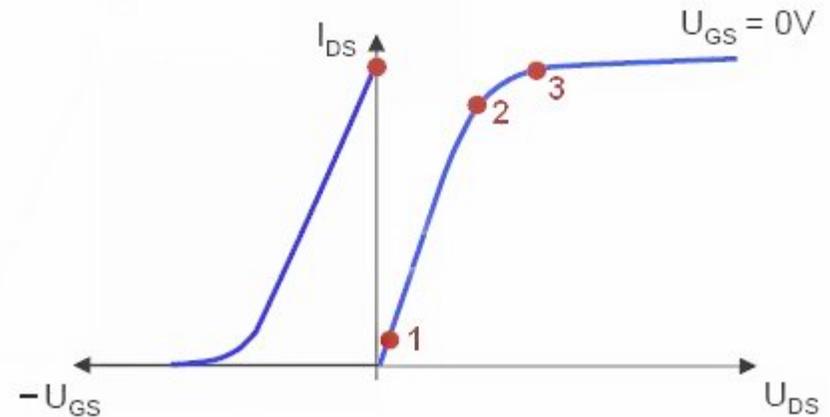
Sperrschicht-FET (JFET) (n-Kanal)

- Der Kanal besteht aus einem n-dotierten Halbleiter, es gibt nur Elektronen als Ladungsträger
- An den beiden Seiten des Kanals sind die Ausgänge (Source – geben, Drain – sammeln)
- Die Steuerelektrode, verbunden mit den beiden p-Schichten, wird als Gate bezeichnet



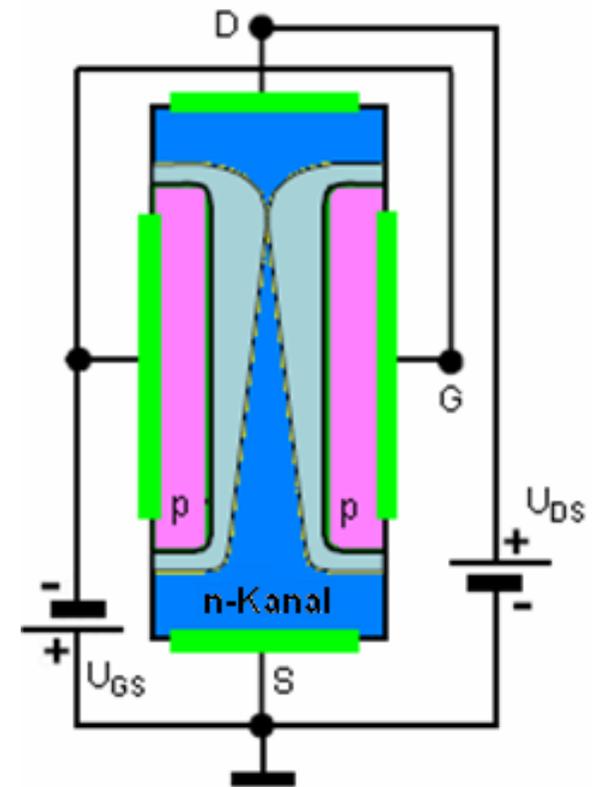
JFET (n-Kanal)

- Bei $U_{GS} = 0 \text{ V}$ ist der Kanal leitend
- Wenn $U_{DS} > 0 \text{ V}$ ist, bewegen sich die Elektronen vom S zu D.
- Bei steigender U_{DS} ändert sich der Strom durch den Kanal laut des Ohmschen Gesetzes (deswegen wird die Zone vom Nullpunkt durch P.1 bis P.2 als **Ohmscher Bereich** bezeichnet).
- Die RLZ wird mit zunehmender U_{DS} unsymmetrisch



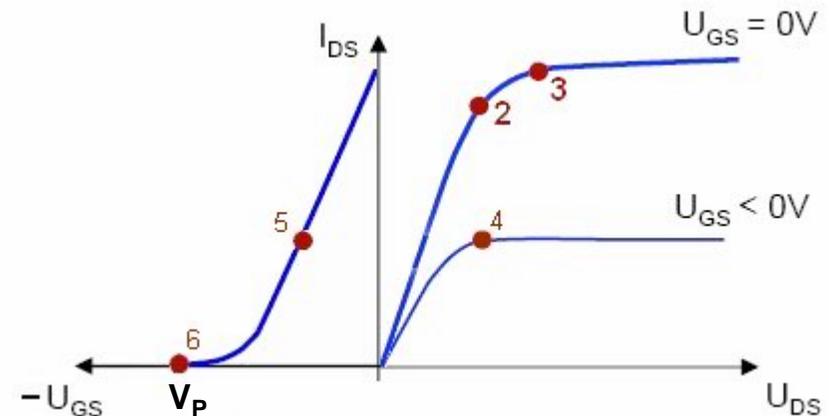
JFET (n-Kanal)

- Der Kanal wird enger
- Der Strom ändert sich nicht mehr laut des Ohmschen Gesetzes (die Zone zwischen P.2 und P.3)
- Nach P.3 wird der Kanal an der D-Seite abgeschnürt ($U_{DS} > U_{DSP}$) und der Drain-Strom geht in Sättigung
- U_{DSP} – Drain-Abschürspannung, oder Drain-Source-Pinch-Off Voltage
- I_{DSS} – Sättigungsstrom

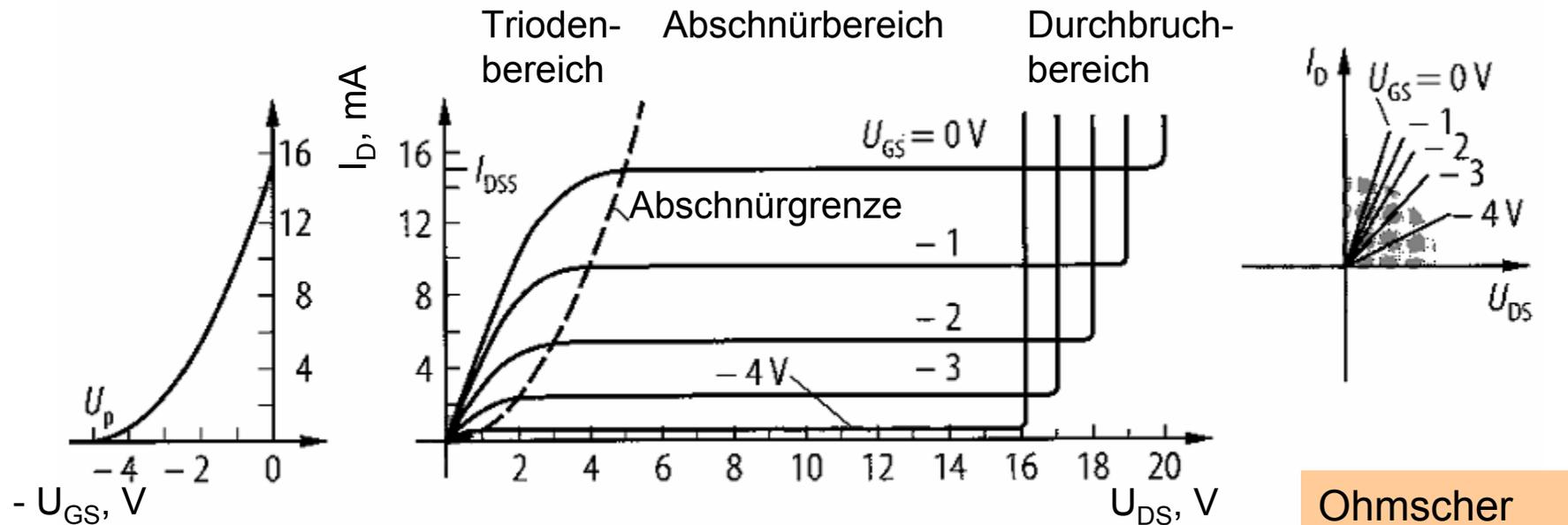


JFET (n-Kanal)

- ▣ Bei $U_{GS} < 0 \text{ V}$ (P.5 und P.4):
 - Die Raumladungszone wird breiter symmetrisch in der ganze Länge des Kanals
 - Bei Veränderung der U_{DS} finden dieselben Prozessen statt, aber die Sättigung geschieht bei kleinerer Spannung
- ▣ Bei $U_{GS} = U_P$ (P.6) durch den Transistor kann kein Strom mehr fließen, unabhängig von U_{DS}
 - U_P – Gate-Abschnürspannung, oder Gate-Source-Pinch-Off Voltage (oder nur Pinch Off Voltage)



JFET (n-Kanal). Kennlinien



Übertragungskennlinie

Ausgangskennlinienfeld

Ohmscher
Bereich

$$R_{DS} = U_{DS} / I_D$$

JFET (n-Kanal). Arbeitsprinzipien

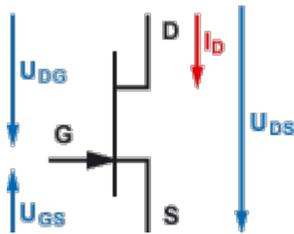
- Es gelten dieselben Arbeitsprinzipien bei der **FE-Transistoren** wie bei der Bipolartransistoren
 - Linearer Betrieb
 - Schaltbetrieb
 - Analogisch wird die Arbeitsgerade benutzt
- Bei denen ist aber noch einer Betrieb möglich:
 - Bei Spannungen $U_{DS} < 1 \text{ V}$ werden die Transistoren als Widerstand (veränderbar) benutzt $\Leftrightarrow R_{DS} = U_{DS}/I_D$

JFET (n-Kanal). Arbeitsprinzipien

- ❑ Die Position des Arbeitspunktes wird durch die Gate-Source-Spannung (U_{GS}) bestimmt
- ❑ Der Arbeitsbereich wird genau wie bei der Bipolartransistoren bestimmt
- ❑ Bei der FE-Transistoren unterscheidet man je nach Wahl der Bezugselektrode auch drei verschiedene Grundschaltungen:
 - Gateschaltung, Sourceschaltung und Drainschaltung ⇒ jede Grundschaltung hat verschiedene Eigenschaften

JFET. Schaltsymbole

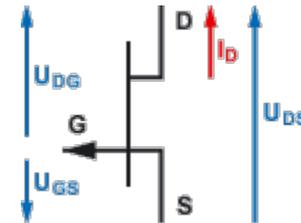
n-Kanal



$$U_P < U_{GS} < 0 \text{ V}$$

$$U_{DS} > 0 \text{ V}$$

p-Kanal

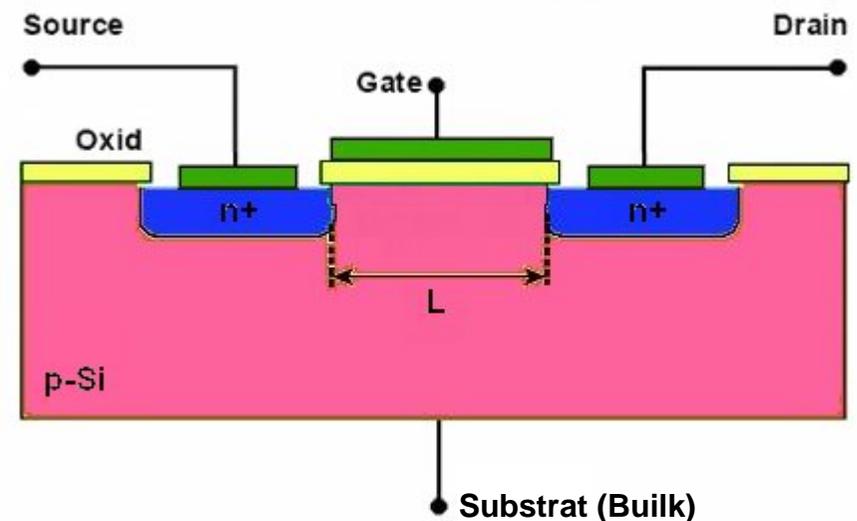
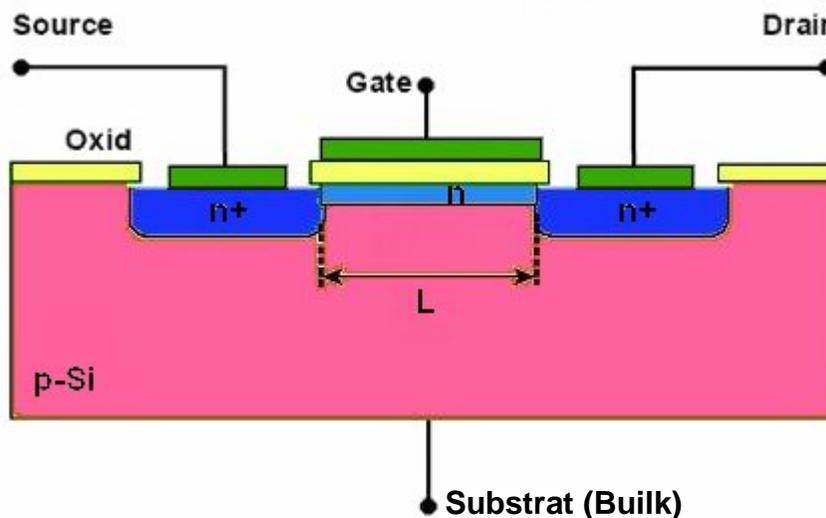


$$0 \text{ V} < U_{GS} < U_P$$

$$U_{DS} < 0 \text{ V}$$

MOSFET (n-Kanal)

- In einem p-Si Substrat (B) sind zwei hoch dotierte (n+) Gebiete (S,D).
- Beim **Verarmungstyp** wird die leitende Verbindung zwischen S und D durch Dotierung erreicht (**selbstleitend**)
- Beim **Anreicherungstyp** wird die leitende Verbindung zwischen S und D durch Inversion erreicht (**selbstsperrend**)



MOSFET

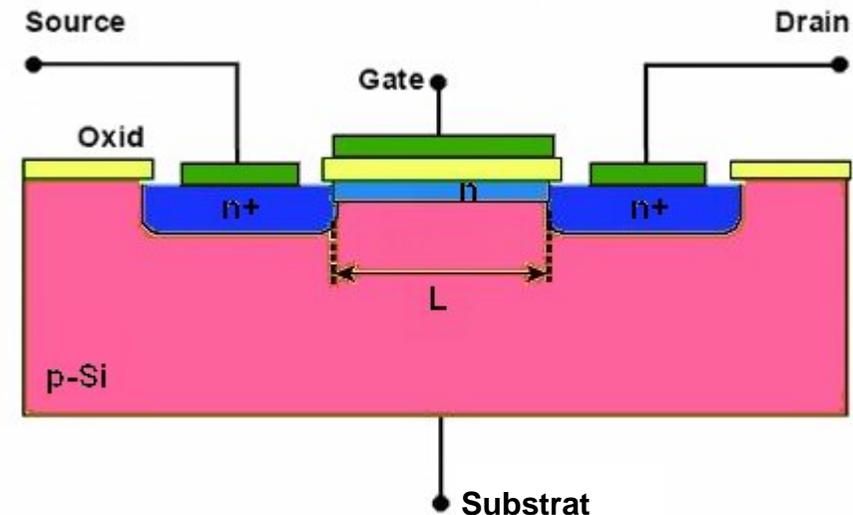
- An dem Substrat soll solche Spannung angelegt werden, dass die PN-Übergänge in Sperrrichtung arbeiten!
- Bei n-Kanal FET wird am Substrat die negative Source-spannung (oder noch größere negative Spannung) angelegt
- Bei p-Kanal FET wird am Substrat die positive Source-spannung (oder noch größere positive Spannung) angelegt
- Die Transistorstruktur ist symmetrisch, so dass Drain und Source elektrisch gleichwertig sind und können schaltungs-technisch vertauscht werden, wenn aber das Substrat bei der Herstellung nicht mit dem Source verbunden ist!!!

MOSFET

- Die MOSFET mit n-Kanal haben zwei wichtige Vorteile gegenüber der MOSFET mit p-Kanal:
 - Die Ladungsträger im n-Kanal sind die Elektronen, dessen Beweglichkeit ist mehrmals größer als diese der Löcher, d.h. diese FET arbeiten bei viel größere Frequenzen.
 - Der Widerstand des n-Kanals (R_{DSon}) ist mindestens zwei Mal kleiner als dieser des p-Kanals, das ist von großem Vorteil im Schaltbetrieb.

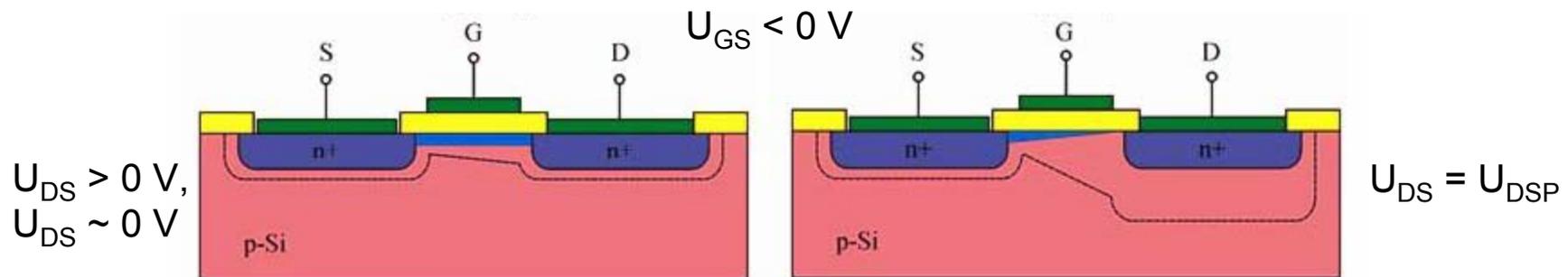
MOSFET (Verarmungstyp – n-Kanal)

- Die Steuerelektrode (Gate) ist durch eine Isolierschicht (Siliziumoxyd, Glas) vom Kanal getrennt, (deswegen wird auch den Begriff **IGFET** – Insulated Gate FET benutzt.)
- Die Wirkungsweise und die Kennlinien sind wie beim JFET.
- Am Gate kann hier auch eine positive Spannung angelegt werden, aber technisch ist das sinnlos.

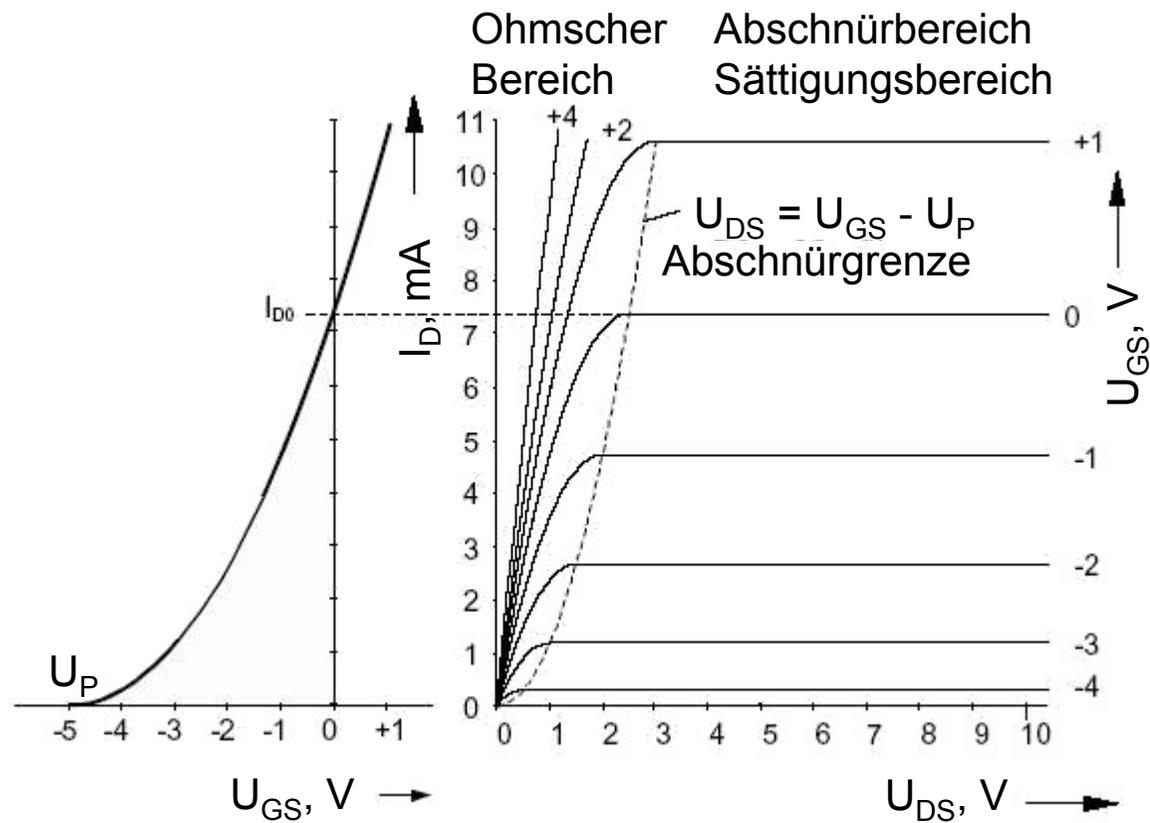


MOSFET (Verarmungstyp – n-Kanal)

- Die Spannungen U_{GS} und U_{DS} beeinflussen folgendermaßen die Arbeit der Transistoren:
 - U_{GS} engt den Kanal symmetrisch in der ganze Länge und bestimmt den maximalen Strom;
 - U_{DS} verändert die Breite der Raumladungszone, oder den Kanalquerschnitt, der Kanal wird an der D-Seite abgeschnürt und der Drain-Strom geht in Sättigung.



Kennlinien (Verarmungstyp – n-Kanal)

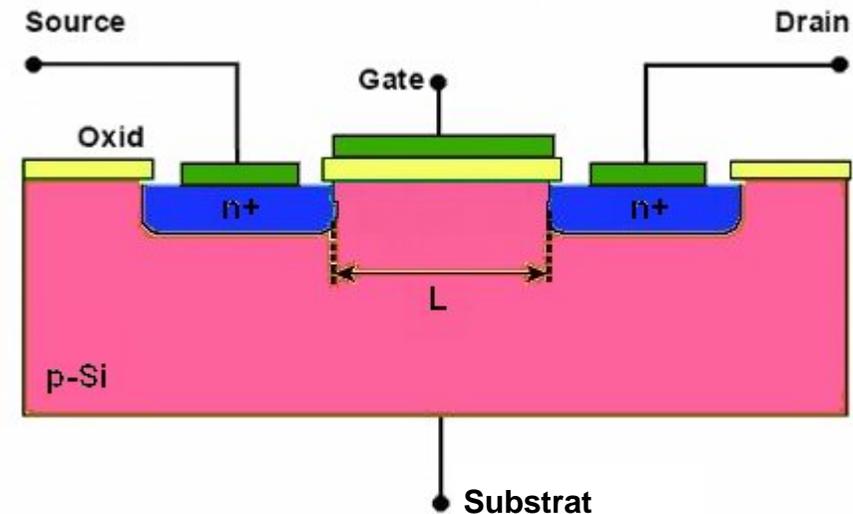


Übertragungskennlinie

Ausgangskennlinienfeld

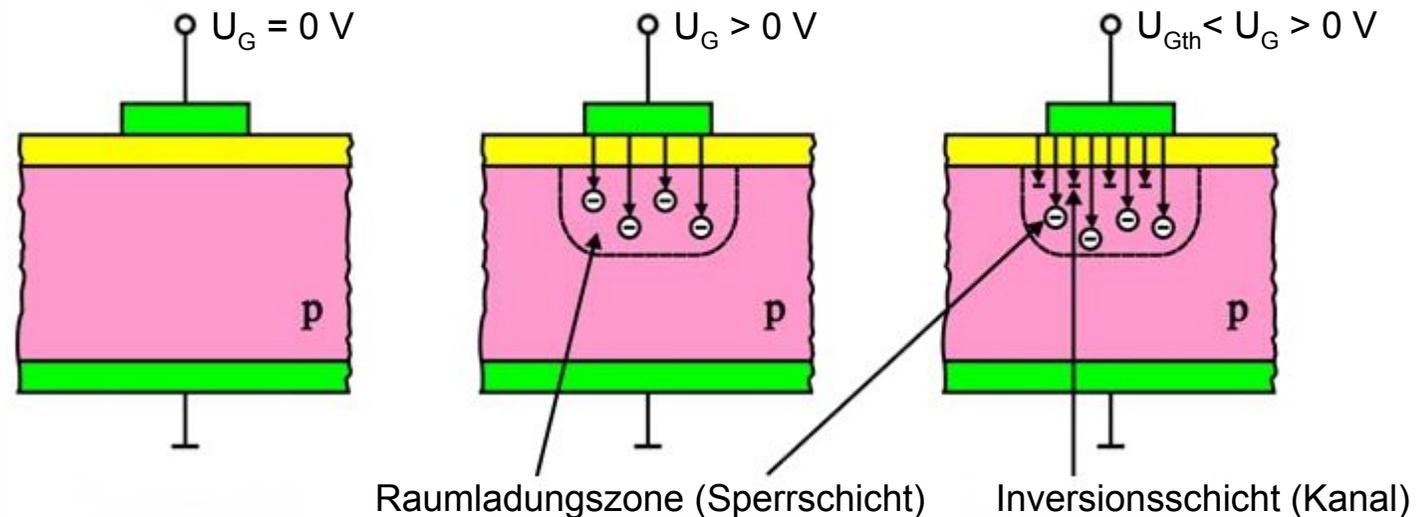
MOSFET (Anreicherungstyp – n-Kanal)

- Die Steuerelektrode (Gate) ist durch eine Isolierschicht (Siliziumoxyd, Glas) vom Kanal getrennt, (deswegen wird auch den Begriff **IGFET** – Insulated Gate FET benutzt.)
- Die leitende Verbindung zwischen den beiden n⁺-Gebiete (S und D) wird beim Anlegen von einer passenden Spannung durch Inversion erreicht
- Bei $U_{GStH} < U_{GS} > 0 \text{ V}$



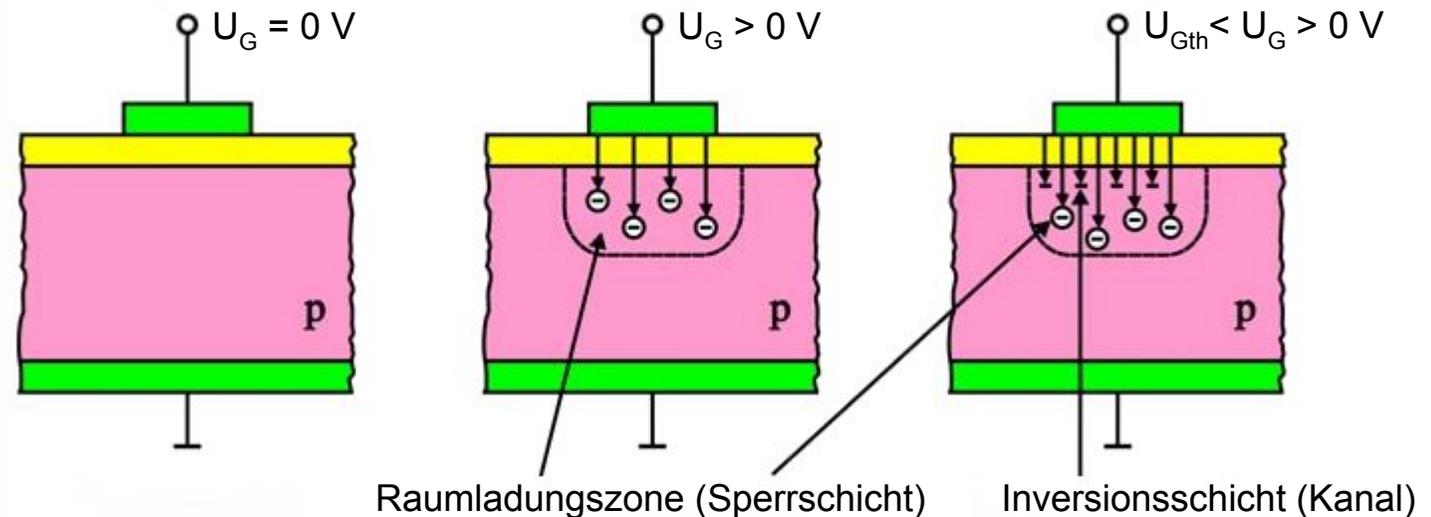
Prinzip der Inversionsschicht

- Bei einer kleiner positiven GS-Spannung stößt das elektrische Feld die beweglichen Löcher im Si-Substrat ab und unter der Isolierschicht wird eine Raumladungszone gebildet
- In der RLZ bleiben nur die unbeweglichen negativ geladene Akzeptoren



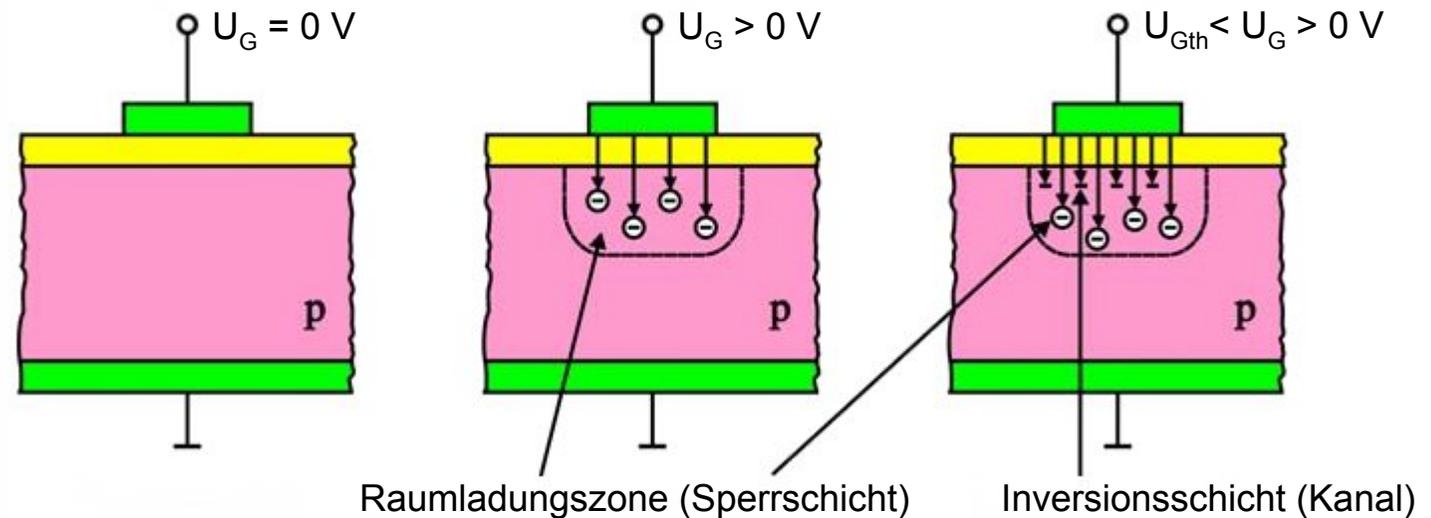
Prinzip der Inversionsschicht

- Bei Erhöhung der Spannung wird die RLZ breiter
- Wenn U_G größer als die Einsatzspannung U_{Gth} wird, unter der Isolierschicht wird eine dünne Schicht von beweglichen Elektronen (Inversionsschicht) gebildet.



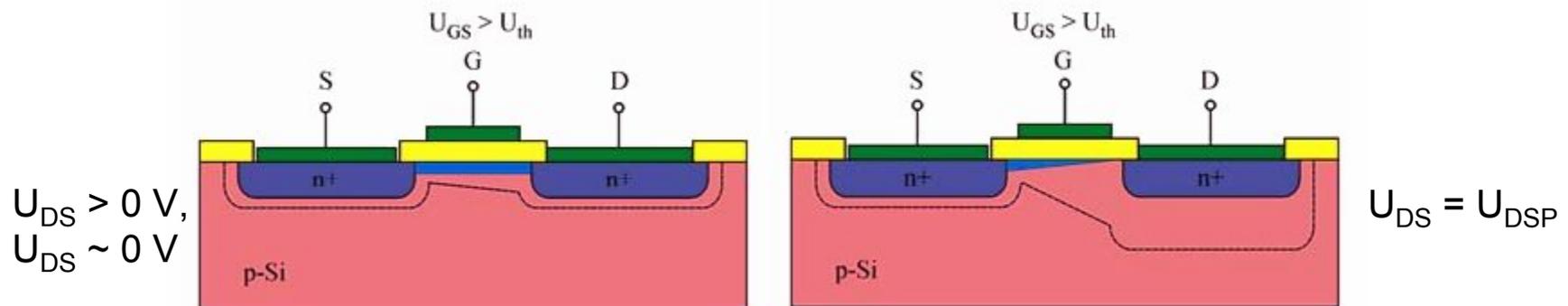
Prinzip der Inversionsschicht

- Bei weiterer Erhöhung der Spannung ändert sich die RLZ nicht mehr
- Nur die Elektronendichte wird größer

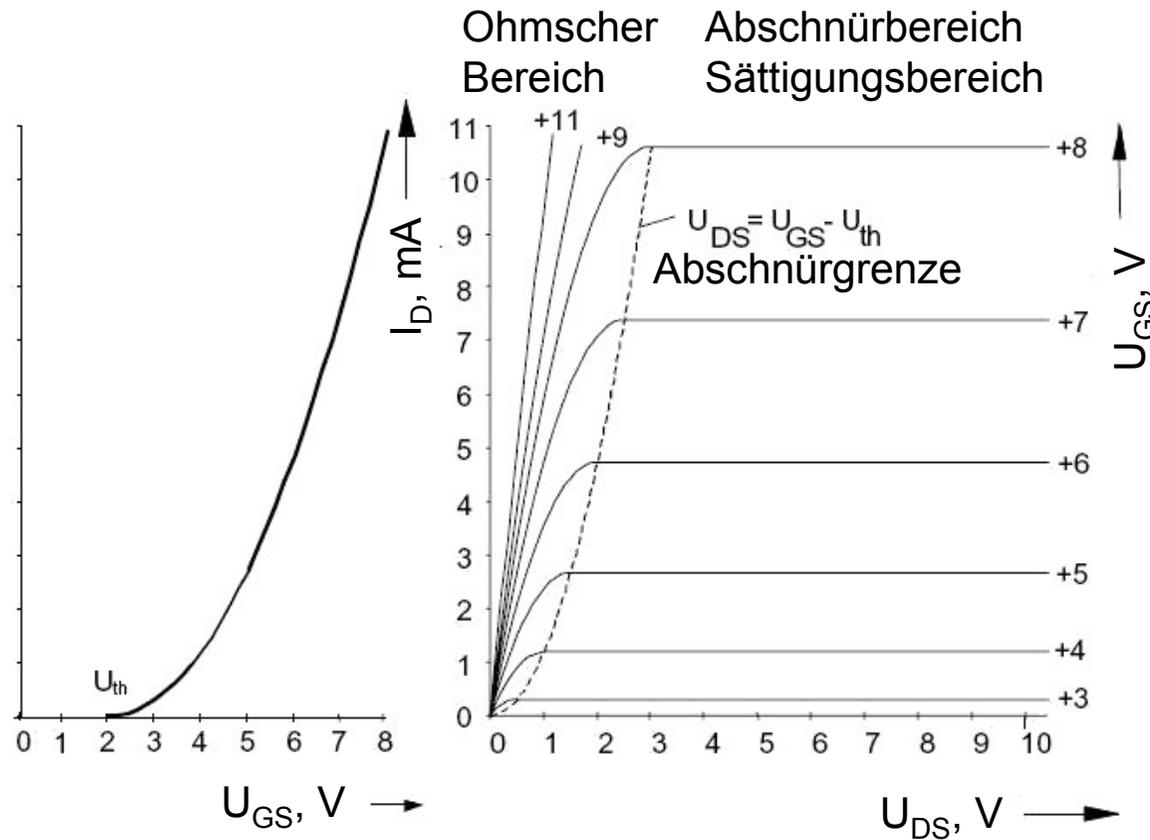


MOSFET (Anreicherungstyp – n-Kanal)

- Die Spannungen U_{GS} und U_{DS} beeinflussen die Arbeit der Transistoren genau wie beim Verarmungstyp:
 - U_{GS} engt den Kanal symmetrisch in der ganze Länge und bestimmt den maximalen Strom;
 - U_{DS} verändert die Breite der Raumladungszone, oder den Kanalquerschnitt, der Kanal wird an der D-Seite abgeschnürt und der Drain-Strom geht in Sättigung.



Kennlinien (Anreicherungstyp – n-Kanal)



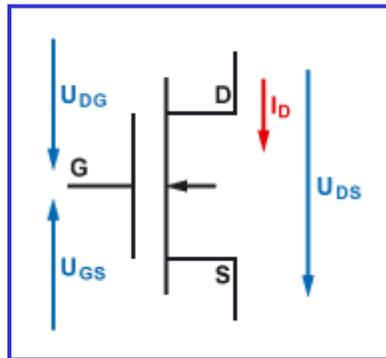
Übertragungskennlinie

Ausgangskennlinienfeld

MOSFET. Schaltsymbole

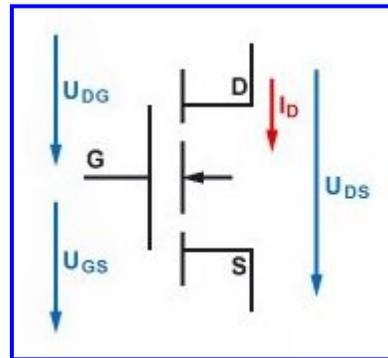
n-Kanal
Verarmung

n-Kanal
Anreicherung



$$U_P < U_{GS}$$

$$U_{DS} > 0 \text{ V}$$

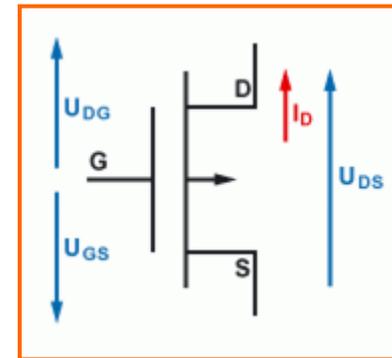


$$U_{th} < U_{GS}$$

$$U_{DS} > 0 \text{ V}$$

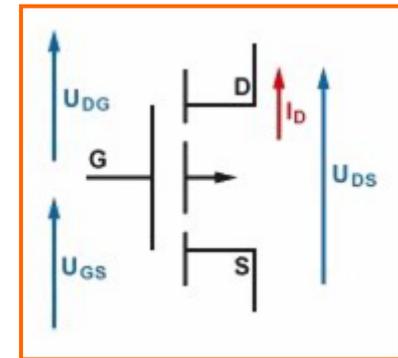
p-Kanal
Verarmung

p-Kanal
Anreicherung



$$U_{GS} < U_P$$

$$U_{DS} < 0 \text{ V}$$

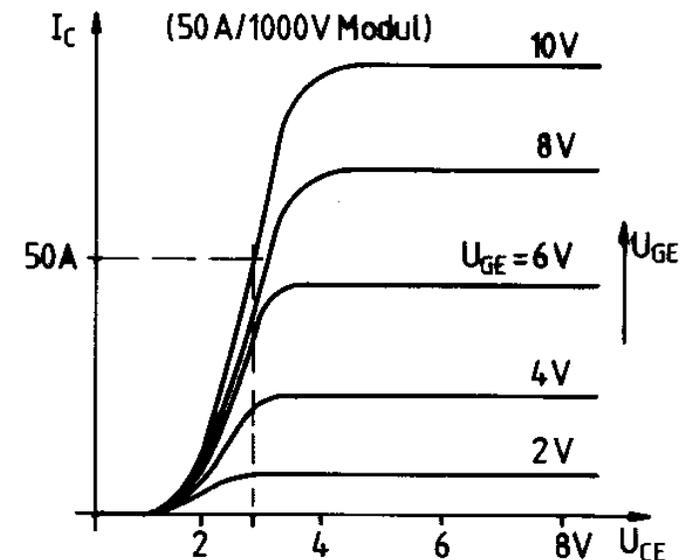
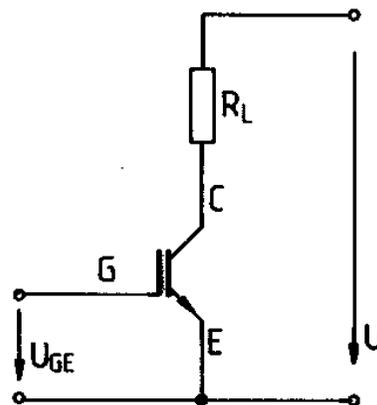


$$U_{th} < U_{GS}$$

$$U_{DS} < 0 \text{ V}$$

Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)

- Immer grössere Anwendung, Vorteile von MOSFET und Bipolartransistor werden vereinigt:
 - Steuerung nur mit Spannung (0 bis 20 V), d.h. sehr kleine Steuerungsleistung (MOS oder IG)
 - Kleinere Sättigungsspannung
- Module für Ströme bis 400 A, Spannung bis 1200 V



Halbleiterbauelemente

- *pn-Übergang*
- *Dioden*
- *Transistoren*
- **Verlustleistung, Wärmewiderstand**

Verlustleistung

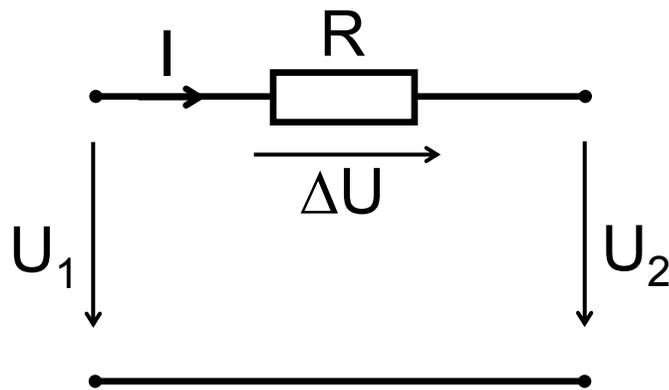
- ❑ Bei der Arbeit von allen Halbleiterelementen, wegen der angelegten Spannung und des fließenden Stromes entsteht im Kristall Verlustleistung P_V , die in Wärme umgewandelt wird
- ❑ Wenn diese Wärme nicht an die Umgebung abgeführt wird, steigt die Kristalltemperatur
- Es folgt Zerstörung des Kristalls (Bauelementes)
- ❑ Die Kette des Wärmetransports ist Kristall – Gehäuse – Umgebung

Verlustleistung

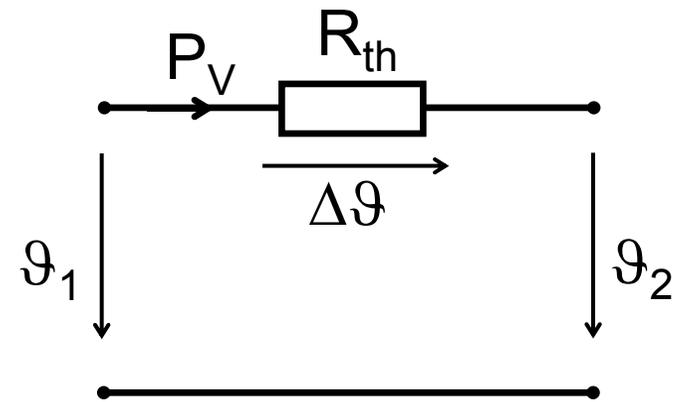
- ❑ Die Wärmeabführung hängt von der Wärmeleitfähigkeit des Gehäuses und der Temperaturdifferenz des Kristalls und der Umgebung ab
- ❑ Der Kehrwert der Wärmeleitfähigkeit ist der **Wärmewiderstand**

Wärmewiderstand

- Äquivalenz elektrischer Widerstand - Wärmewiderstand



$$R = \frac{\Delta U}{I} = \frac{U_1 - U_2}{I}$$



$$R_{th} = \frac{\Delta \theta}{P_v} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{P_v}$$

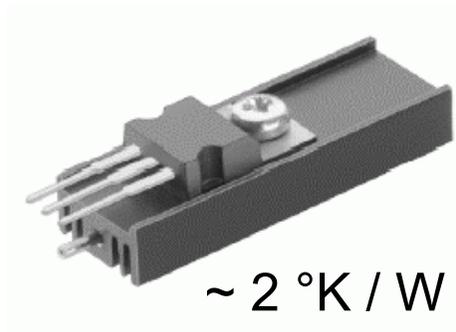
- Bei Reihenschaltung

$$R_{th} = R_{th1} + R_{th2}$$

Kühlung (Kühlkörper)

- Die Wärmeenergie wird an die Umgebung meistens durch Kühlkörper abgeführt
- Wenn das nicht hilft, wird Zwangskühlung benutzt (Luft oder Wasser)

Alu Kühlkörper



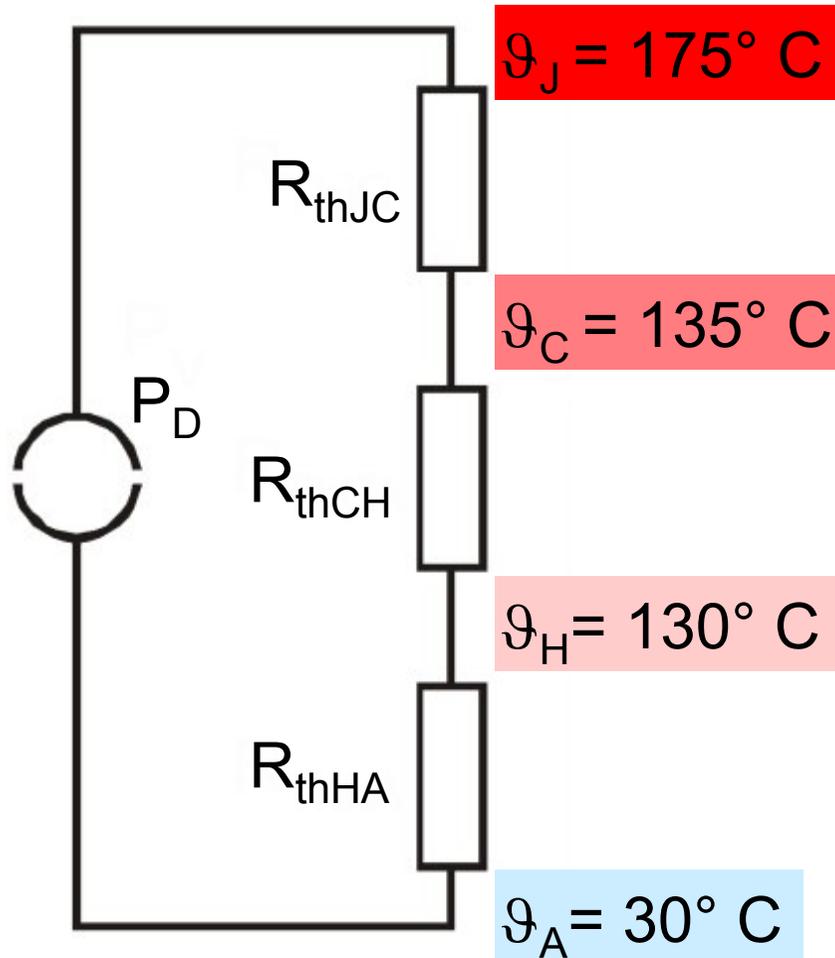
Kühlkörper mit Lüfter



Beispiel

- ❑ An einem Transistor fällt eine Verlustleistung von $P_V = 50 \text{ W}$ bei $\vartheta_A = 30 \text{ °C}$ Umgebungstemperatur an.
- ❑ Der Wärmewiderstand zwischen:
 - Halbleiterkristall (Junction) und Gehäuse (Case) ist:
 $R_{thJC} = 0,8 \text{ °K/W}$;
 - Gehäuse und Kühlkörper (Heatsink) e $R_{thCH} = 0,1 \text{ °K/W}$;
 - Kühlkörper und der Umgebung (Ambient) e $R_{thHA} = 2 \text{ °K/W}$.
- ❑ Wie groß sind die absoluten Einzeltemperaturen?
- ❑ **Die Temperatur des Halbleiterkristalls muss $< 150 \text{ °C}$**

Beispiel

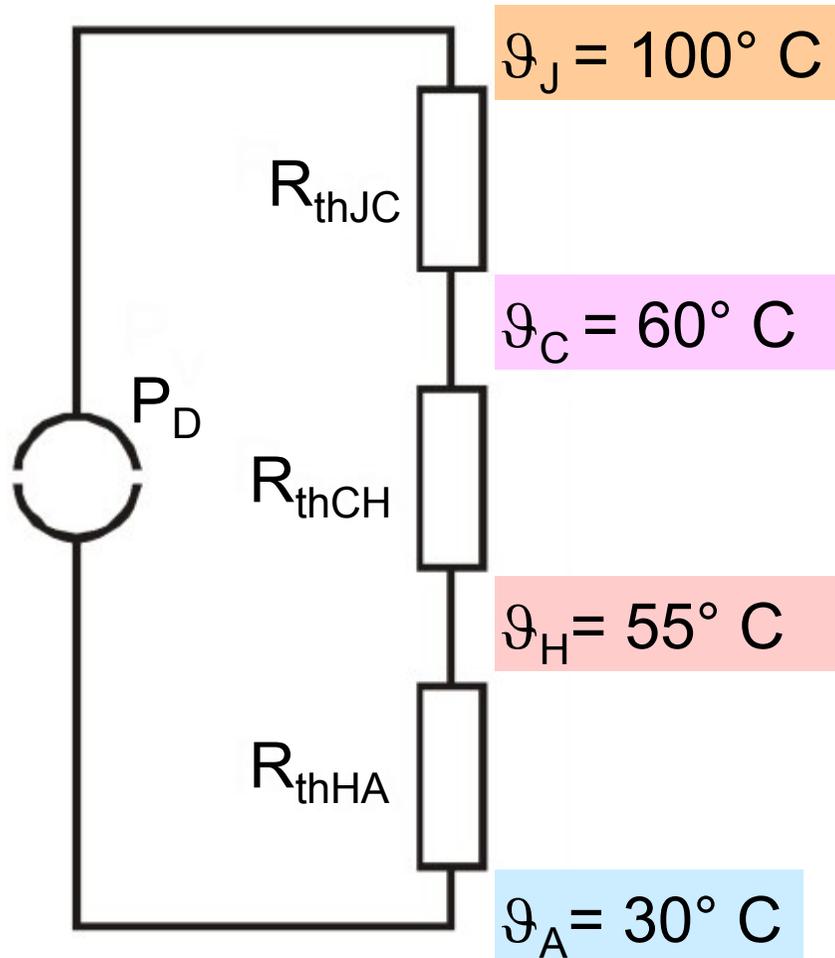


$$\Delta \vartheta = R_{thJC} \cdot P_D = 0,8 \frac{^\circ K}{W} \cdot 50 W = 40^\circ K$$

$$\Delta \vartheta = R_{thCH} \cdot P_D = 0,1 \frac{^\circ K}{W} \cdot 50 W = 5^\circ K$$

$$\Delta \vartheta = R_{thHA} \cdot P_D = 2 \frac{^\circ K}{W} \cdot 50 W = 100^\circ K$$

Beispiel



$$\Delta \vartheta = R_{thJC} \cdot P_D = 0,8 \frac{^\circ K}{W} \cdot 50 W = 40^\circ K$$

$$\Delta \vartheta = R_{thCH} \cdot P_D = 0,1 \frac{^\circ K}{W} \cdot 50 W = 5^\circ K$$

$$\Delta \vartheta = R_{thHA} \cdot P_D = 0,5 \frac{^\circ K}{W} \cdot 50 W = 25^\circ K$$