

## 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-kompodium.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

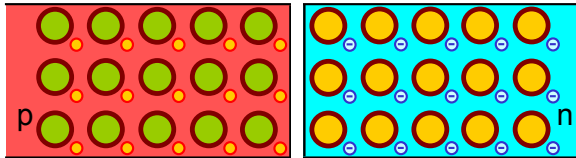
## Halbleiterbauelemente

### Lernziel:

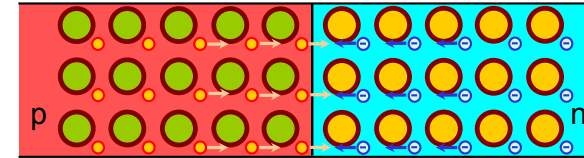
- Antworten auf folgende und ähnliche Fragen geben zu können:
  - Was versteht man unter pn-Übergang, Diode, Transistor?
  - Welche Typen Dioden und Transistoren sind Ihnen bekannt?
  - Welche sind die wichtigsten Kennlinien?
  - Welche sind die gemeinsamen Prinzipien zur Funktion der Bauelemente?
 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



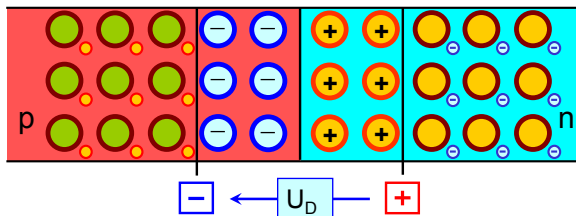
## pn-Übergang



- 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

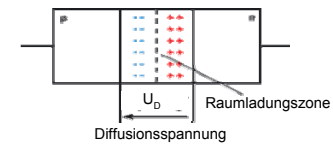
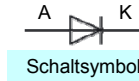
- Weil in dieser Zone keine Majoritätsträger gibt, weist die Raumladungszone hochohmigen Widerstand.
- Deswegen wird sie noch als **Sperrschicht** bezeichnet.
- Im normalen Fall sind die p- und n-Schichten mit verschiedener Dotierungskonzentration.
- Davon hängt die Breite der Raumladungszone ab.

## 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)**.

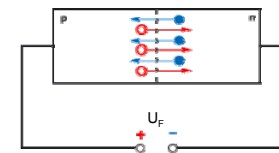


## Diode

- 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.



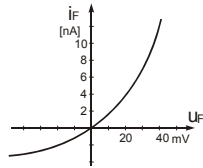
## Diodenkennlinie

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

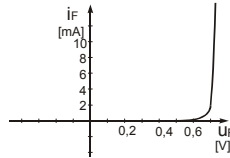
$$I_F = I_S \cdot \left( e^{\frac{U_F}{U_T}} - 1 \right) \approx I_S \cdot e^{\frac{U_F}{U_T}}, \text{ bei } U_F > 0,1 \text{ V}$$

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

$I_S$  – Sättigungssperrstrom



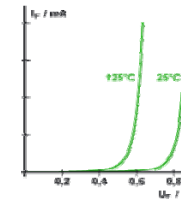
bei sehr kleinem Strom



bei großem Strom

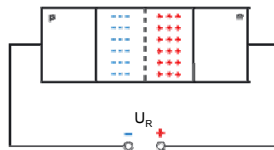
## Diode. Temperaturabhängigkeit

- 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  $-20^\circ$  bis  $+100^\circ$ .
- Bei einem konstanten Diodenstrom ist die Diodenspannung der Temperatur proportional.



## Diode in Sperrrichtung

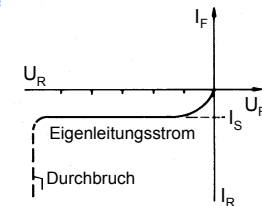
- Die Aussenspannung  $U_R$  und die Diffusionsspannung  $U_D$  wirken in derselben Richtung
- Bei der Erhöhung der Aussenspannung :
  - Die Raumladungszone wird breiter;
  - Die Majoritätsträger passieren die Grenzfläche **nicht**.



## Diodenkennlinie

- Der Diodenstrom in Sperrrichtung  $I_R$  bleibt konstant:
- Der Sättigungssperrstrom  $I_S$  ist Eigenleitungsstrom, daher klein aber extrem temperaturabhängig
- Bleibt konstant, da Raumladungszone wächst

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

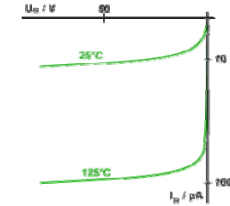


## Diodenkennlinie

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

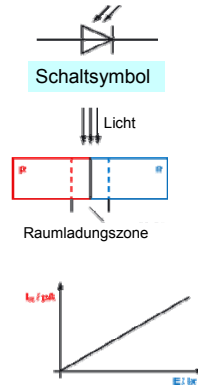
## Diode. Temperaturabhängigkeit

- 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.



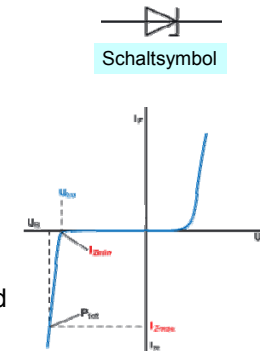
## Fotodiode

- 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



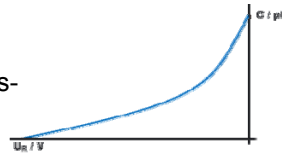
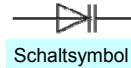
## Zenerdiode

- 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



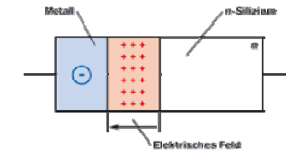
## Kapazitätsdiode

- 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



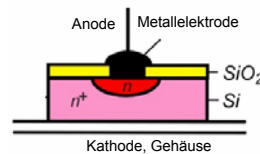
## Schottky-Diode (Hot-Carrier-Diode)

- 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.



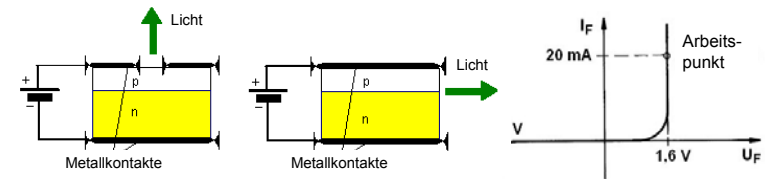
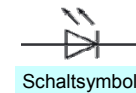
## Schottky-Diode

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



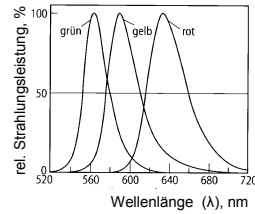
## Leuchtdiode

- 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.



# 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 <sub>0,6</sub> P <sub>0,4</sub>	650 nm
orange	2,0	GaAs <sub>0,35</sub> P <sub>0,65</sub> :N	630 nm
gelb	2,2	GaAs <sub>0,15</sub> P <sub>0,85</sub> :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

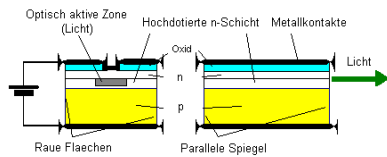
# Leuchtdiode (LED)



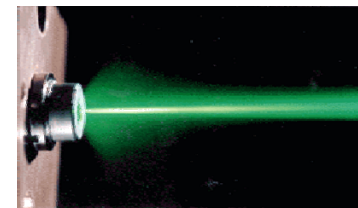
- 7-Segment Anzeige
- Diverse LEDs

# Laserdiode (LASER)

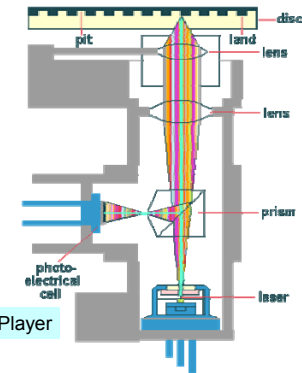
- Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
- In der LED-Struktur wird eine hochdotierte n-Schicht eingefügt.
- Der Stromfluss durch die Sperrzone ruft Rekombinationsprozesse hervor. Die Endflächen des Bauelements sind teilreflektierend und bilden somit einen optischen Resonator, in dem sich eine stehende Lichtwelle ausbilden kann. ⇒ Licht



# Laserdiode



Laserstrahl

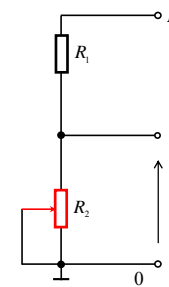


Laserdiode im CD-Player

## Halbleiterbauelemente

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

## Spannungsteiler mit Potenziometer



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

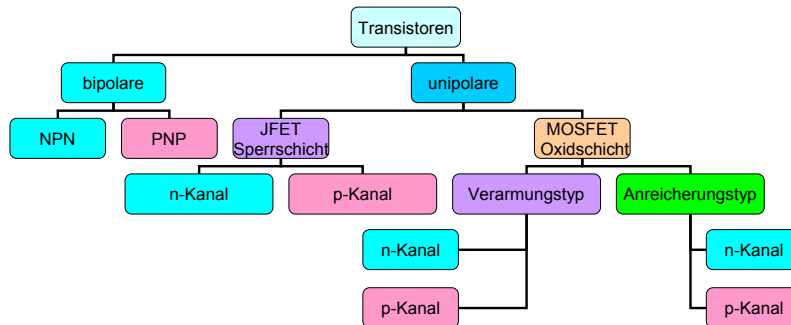
Bei  $R_2 \gg R_1$  (und Schleifer ganz unten)

$$U_o \approx E$$

Bei Schleifer ganz oben :

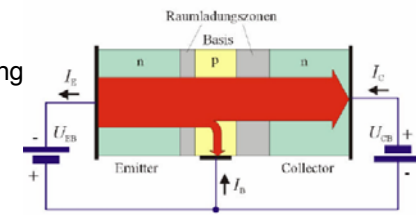
$$U_o = 0$$

## 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



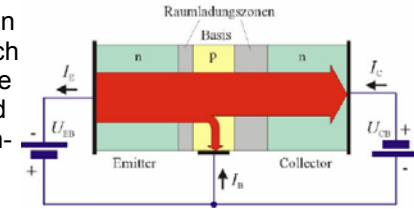


## Bipolartransistor(NPN)

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

## Bipolartransistor (NPN)

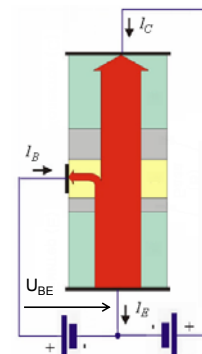
- Im *Aktiv normalen Betrieb* werden vom E in die B Elektronen hineingetrieben. Von der B in den E bewegen sich Löcher, aber viel weniger, weil die Basis leicht dotiert ist.
- Es gibt zwei Typen Ladungsträger, die Transistoreigenschaften hängen von den Elektronen ab.
- Die meisten davon gelangen vor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



## Bipolartransistor (NPN)

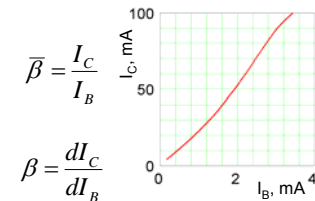
- Der Basisstrom ist wesentlich kleiner als der Emitterstrom und der Kollektorstrom ( $I_E = I_C + I_B$ )
- Man unterscheidet je nach Wahl der Bezugselektrode drei verschiedene *Grundsaltungen* – Basisschaltung, Emitterschaltung und Kollektorschaltung ⇒ jede Grundsaltung hat verschiedene Eigenschaften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

## Stromverstärkung (Emitterschaltung)



- Stromverstärkung:

- Gleichstromverstärkung



- Wechselstromverstärkung

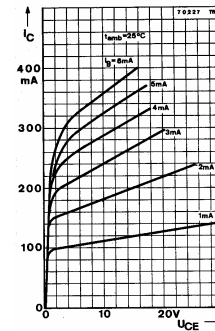
$$\beta = \frac{dI_C}{dI_B}$$

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

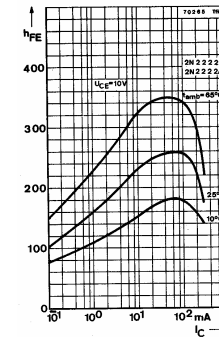
# Steilheit (Emitterschaltung))

- 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



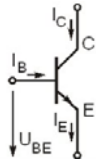
Ausgangskennlinienfeld



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

# Schaltsymbole

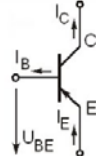
NPN-Transistor



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

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

PNP-Transistor

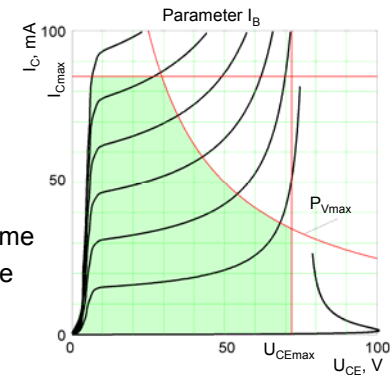


$$-0,6 \text{ V} < U_{BE} < 0$$

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

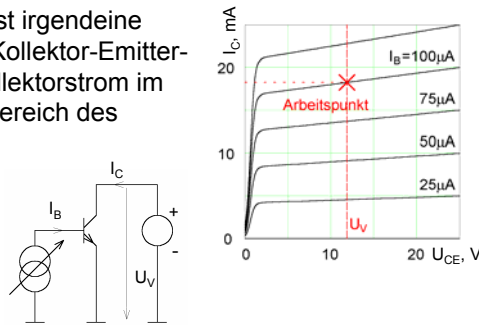
# Arbeitsbereich

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



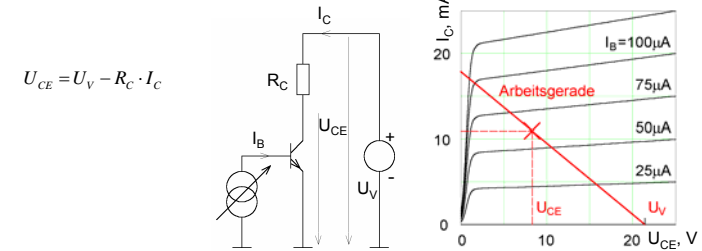
# Arbeitspunkt

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

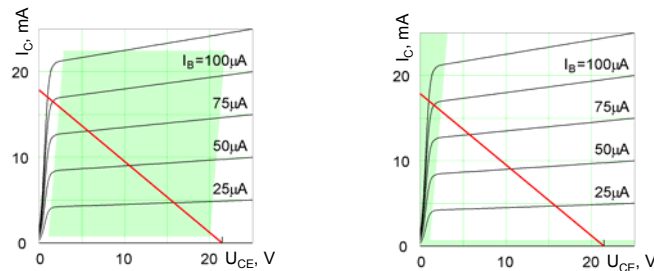


# Arbeitsgerade

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



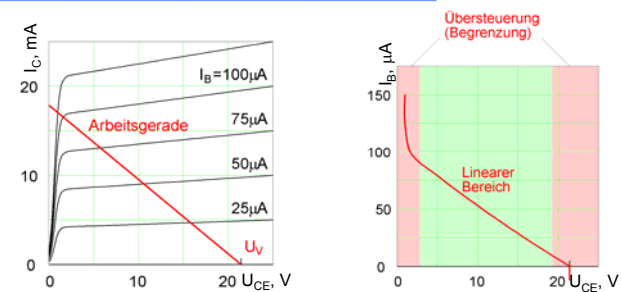
# Aussteuerbereich



Linearer Bereich: Das Ausgangssignal hängt linear vom Eingangssignal ab.

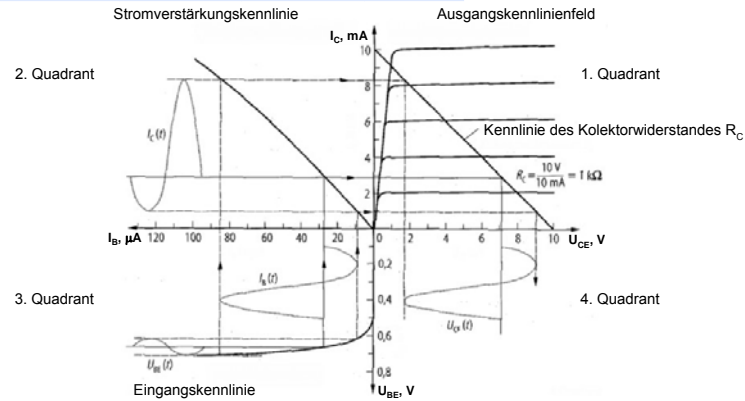
Übersteuerungs-Bereich: Das Ausgangssignal wird unabhängig vom Eingangssignal begrenzt.

# Grenzen der Aussteuerung

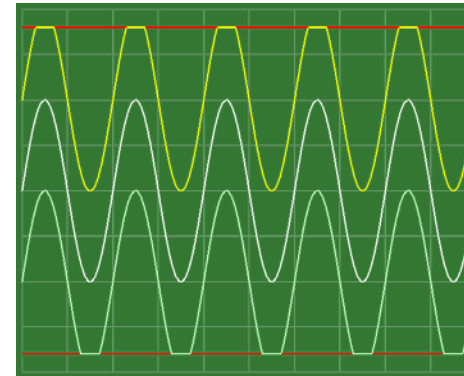


Mit Vergrößerung des Basisstromes bewegt sich der Arbeitspunkt auf der Arbeitsgeraden von gesperrten Zustand des Transistors (rechte Begrenzungszone) durch den linearen Bereich bis zur Sättigung (Linke Zone)

# Aussteuerung



# Wechselspannung im Aussteuerbereich



- rot: Aussteuer Grenzen.
- weis: unverzerrte Spannungskurve.
- gelb: Spannung stößt an obere Aussteuer Grenze und wird verzerrt.
- grün: Spannung stößt an untere Aussteuer Grenze und wird verzerrt.

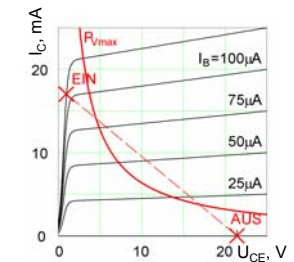
# Modulierte Wechselspannung



- Bei zu großer Aussteuerung wird die Spannung begrenzt

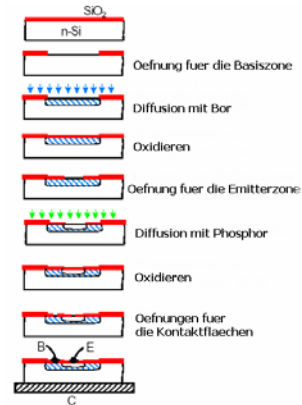
# Schaltbetrieb

- 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

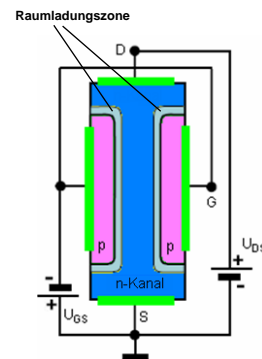


## Unipolartransistor

- 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

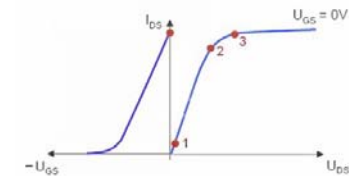
## Sperrschicht-FET (JFET) (n-Kanal)

- 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



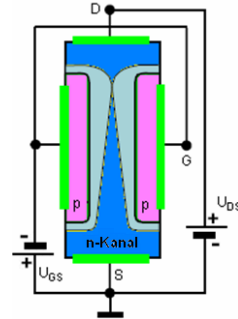
## JFET (n-Kanal)

- 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



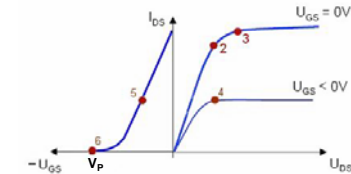
## JFET (n-Kanal)

- 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-Abschnürspannung, oder Drain-Source-Pinch-Off Voltage
- $I_{DSS}$  – Sättigungsstrom

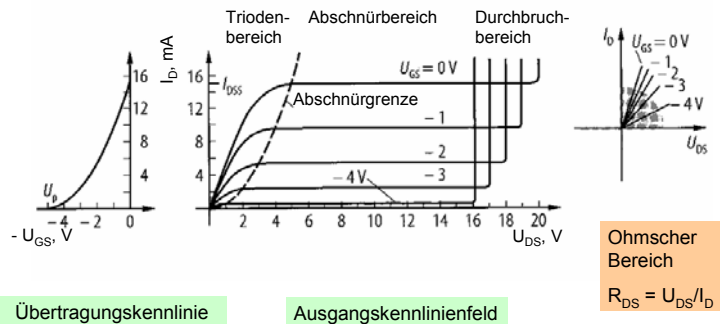


## JFET (n-Kanal)

- 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

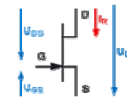
- Es gelten dieselben Arbeitsprinzipien bei der FE-Transistoren wie bei der Bipolartransistoren
- Linearer Betrieb
- Schaltbetrieb
- Analogisch wird die Arbeitsgerade benutzt
- Bei denen ist aber noch einer Betrieb möglich:
- Bei Spannungen  $U_{DS} < 1\text{ V}$  werden die Transistoren als Widerstand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

## 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 Bezugelektrode auch drei verschiedene Grundschaltungen:
  - Gateschaltung, Sourceschaltung und Drainschaltung ⇒ jede Grundschaltung hat verschiedene Eigenschaften

## JFET. Schaltsymbole

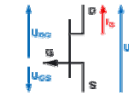
n-Kanal



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

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

p-Kanal

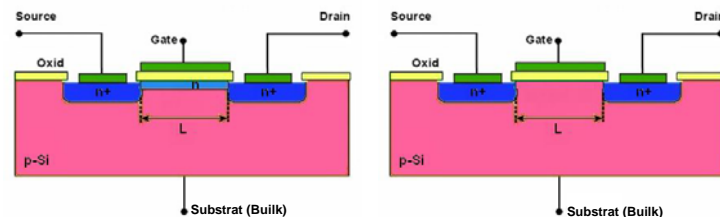


$$0 \text{ V} < U_{GS} < U_P$$

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

## 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

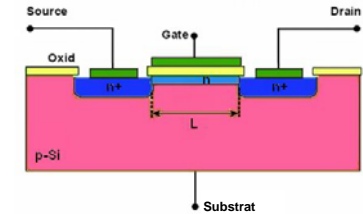
- An dem Substrat soll solche Spannung angelegt werden, dass die PN-Übergänge in Sperrrichtung arbeiten!
- Bei n-Kanal FET wird am Substrat die negative Source-Spannung (oder noch größere negative Spannung) angelegt
- Bei p-Kanal FET wird am Substrat die positive Source-Spannung (oder noch größere positive 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.

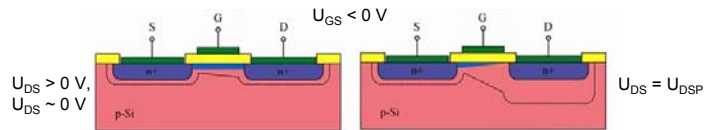
# MOSFET (Verarmungstyp – n-Kanal)

- 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.

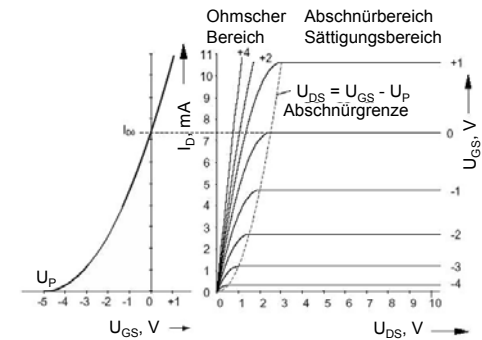


# MOSFET (Verarmungstyp – n-Kanal)

- 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)



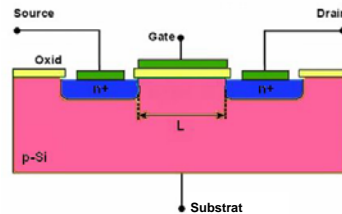
Übertragungskennlinie

Ausgangskennlinienfeld



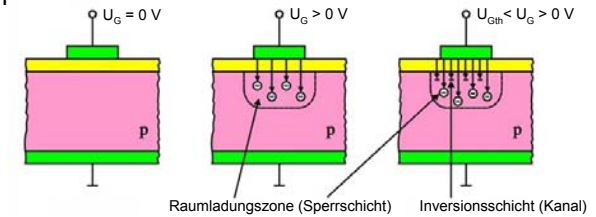
## MOSFET (Anreicherungstyp – n-Kanal)

- 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  $U_{Gsth} < U_{GS} > 0 V$



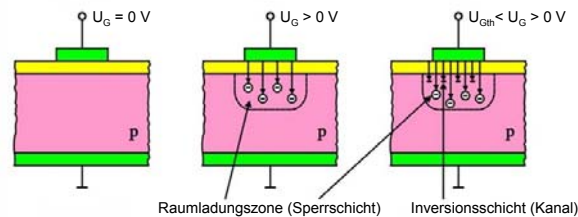
## Prinzip der Inversionsschicht

- 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



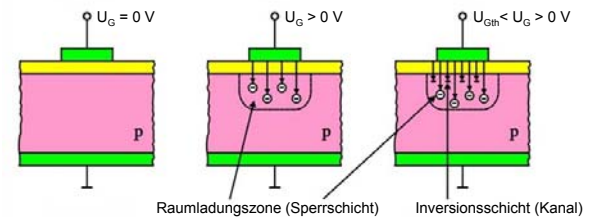
## Prinzip der Inversionsschicht

- 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.



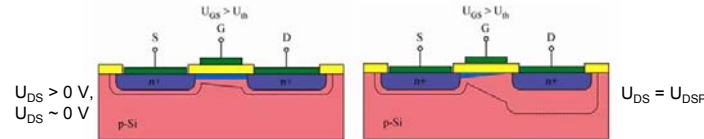
## Prinzip der Inversionsschicht

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

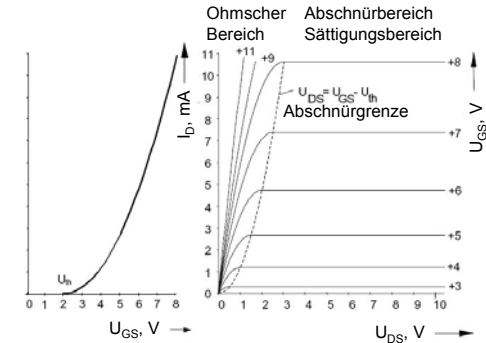


## MOSFET (Anreicherungstyp – n-Kanal)

- Die Spannungen  $U_{GS}$  und  $U_{DS}$  beeinflussen die Arbeit der Transistoren genau wie beim Verarmungstyp:
  - $U_{GS}$  engt den Kanal symmetrisch in der 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    p-Kanal Verarmung    p-Kanal Anreicherung



$U_P < U_{GS}$   
 $U_{DS} > 0 V$

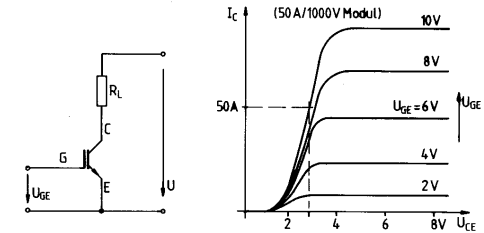
$U_{th} < U_{GS}$   
 $U_{DS} > 0 V$

$U_{GS} < U_P$   
 $U_{DS} < 0 V$

$U_{th} < U_{GS}$   
 $U_{DS} < 0 V$

## 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 Steuerleistung (MOS oder IG)
  - Kleinere Sättigungsspannung
- Module für Ströme bis 400 A, Spannung bis 1200 V



## Halbleiterbauelemente

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

## Verlustleistung

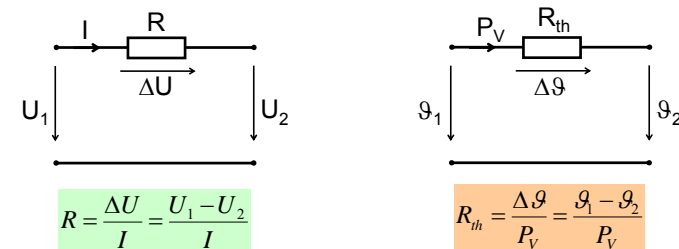
- Bei der Arbeit von allen Halbleiterelementen, wegen der angelegten Spannung und des fließenden Stromes entsteht im Kristall Verlustleistung  $P_V$ , die in Wärme umgewandelt wird
- Wenn diese Wärme nicht an die Umgebung abgeführt wird, steigt die Kristalltemperatur
- Es folgt Zerstörung des Kristalls (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



- 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



~ 2 °K / W

Kühlkörper mit Lüfter

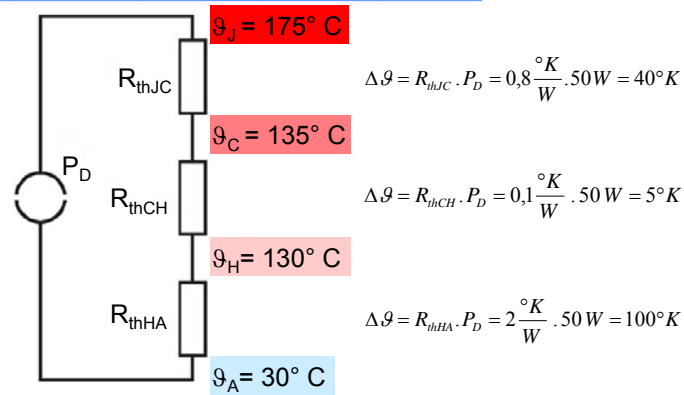


~ 0,1...0,5 °K / W

# Beispiel

- An einem Transistor fällt eine Verlustleistung von  $P_V = 50 \text{ W}$  bei  $\vartheta_A = 30^\circ \text{ C}$  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  $R_{thHA} = 2^\circ \text{ K/W}$ .
- Wie groß sind die absoluten Einzeltemperaturen?
- Die Temperatur des Halbleiterkristalls muss  $< 150^\circ \text{ C}$

# Beispiel



# Beispiel

