

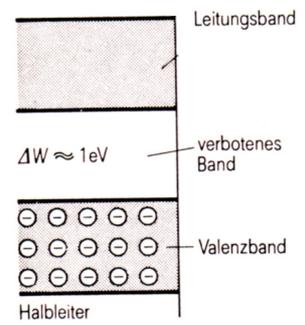
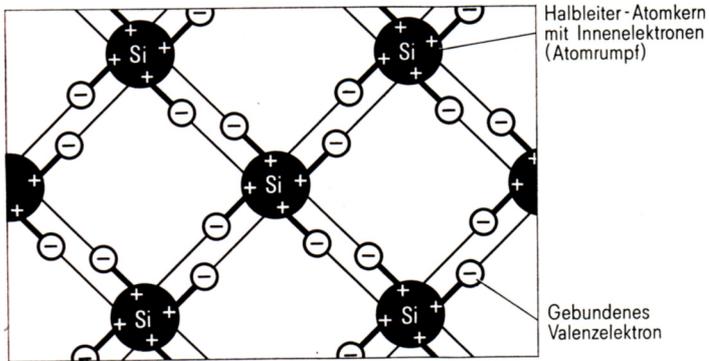
# „Integrierte Schaltungstechnik“

Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Kampe

## Bauelemente (1)

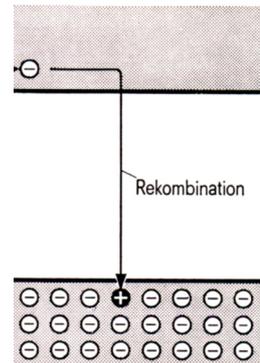
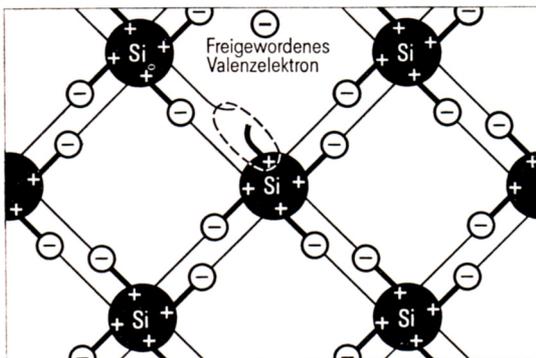
# Halbleiter

## Siliziumgitter bei 0 K

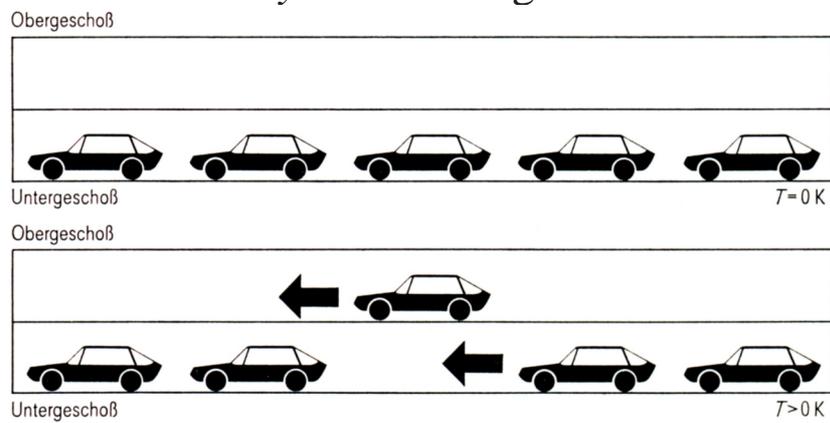


# Halbleiter

## Siliziumgitter bei $> 0 \text{ K}$



### Shockley'sches Garagenmodell



# Halbleiter

## Eigenleitung

Im *thermischen Gleichgewicht* liegt Gleichheit zwischen Paarerzeugung und Rekombination vor:

$$n_0 \cdot p_0 = n_i^2$$

Neutralitätsbedingung des reinen Halbleiters im thermischen Gleichgewicht:

$$n_0 = p_0 = n_i$$

mit  $n_i$ : Inversions- oder Eigenleitungsichte, temperaturabhängig, für Silizium:  $n_i \approx 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ .

Die Eigenleitfähigkeit des Halbleiters beträgt:

$$\sigma_0 = e n \mu_n + e p \mu_p = e n_i (\mu_n + \mu_p)$$

$e$ : Elementarladung  $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$ ,

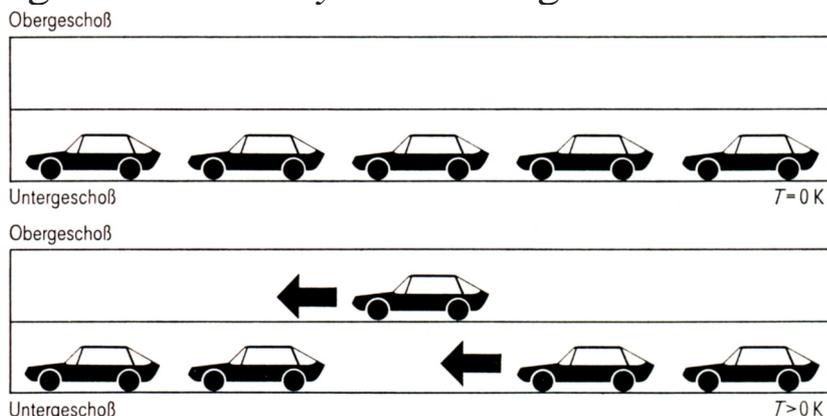
$\mu_n$ : Beweglichkeit der Elektronen,

$\mu_p$ : Beweglichkeit der Löcher (bei Si:  $\mu_n \approx 3\mu_p$ ).

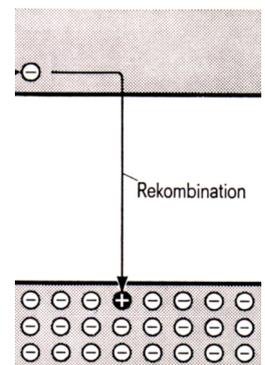
Paarerzeugung



*Shockleysches* Garagenmodell



Rekombination

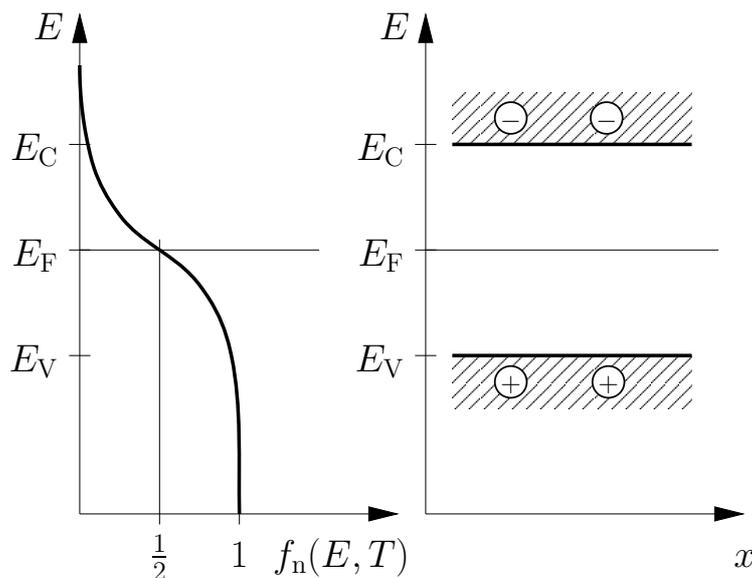


# Besetzungswahrscheinlichkeit und *Fermi-Niveau* im thermischen Gleichgewicht

*Fermi-Dirac-Verteilung:*

$$f_n(E, T) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E-E_F}{kT}}}$$

Das *Fermi-Niveau*  $E_F$  ist die Schwellenenergie, deren Besetzungswahrscheinlichkeit 50 % beträgt — bzw. die Hälfte der Elektronen besitzt eine Energie  $E \leq E_F$ .

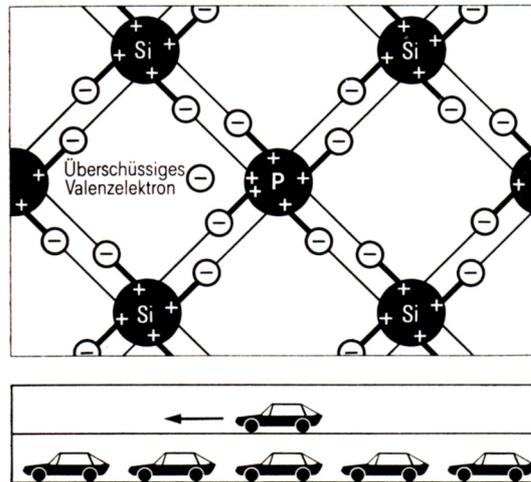


Besetzungswahrscheinlichkeit der Löcher:

$$f_p(E, T) = 1 - f_n(E, T)$$

# Halbleiter

## Einbau eines Donators



Als Donator wird ein Element der V. Hauptgruppe verwendet: z. B. Phosphor.

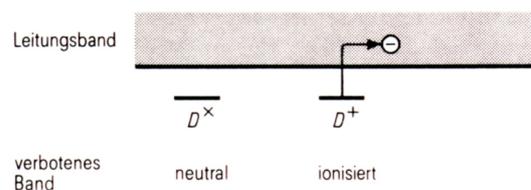
Konzentration der Donatoren dominiert die Konzentration der frei beweglichen Elektronen im thermischen Gleichgewicht:

$$n_0 \approx n_{D^+} \gg n_i$$

*Majoritätsträger* sind Elektronen, *Minoritätsträger* sind Löcher

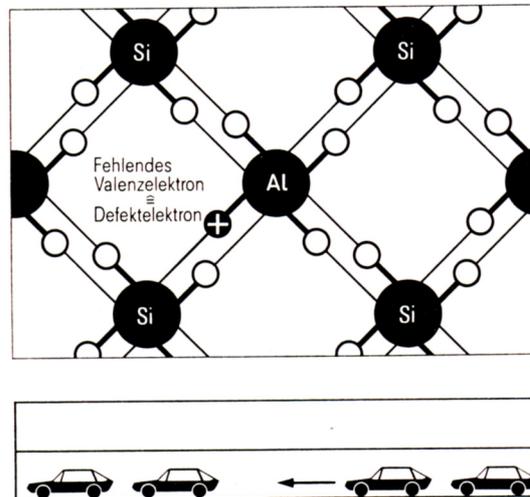
Leitfähigkeit des mit Donatoren N-dotierten Halbleiters:

$$\sigma_n = e \mu_n n_{D^+}$$



# Halbleiter

## Einbau eines Akzeptors



Als Akzeptor wird ein Element der III. Hauptgruppe verwendet: z. B. Aluminium.

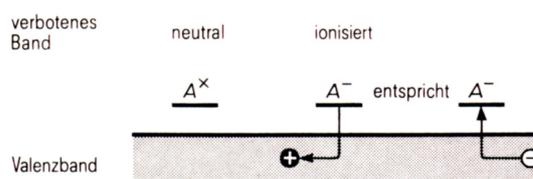
Konzentration der Akzeptoren dominiert die Konzentration der frei beweglichen Löcher im thermischen Gleichgewicht:

$$p_0 \approx n_{A^-} \gg n_i$$

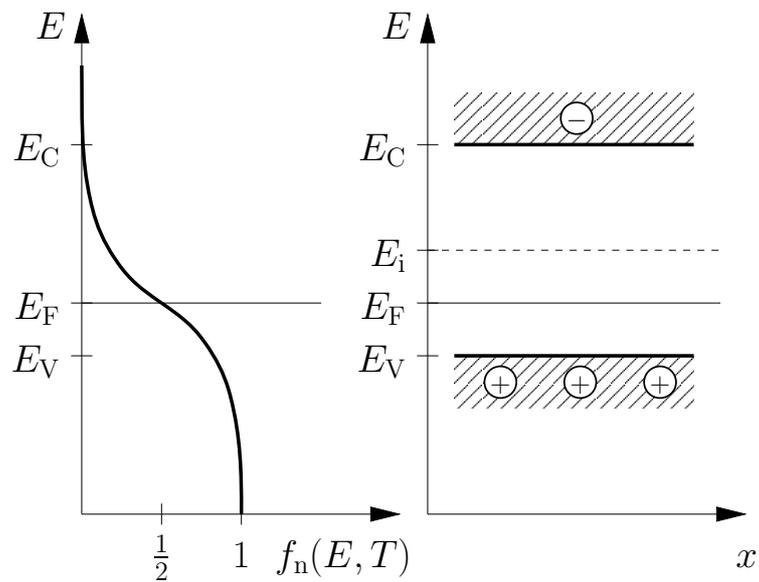
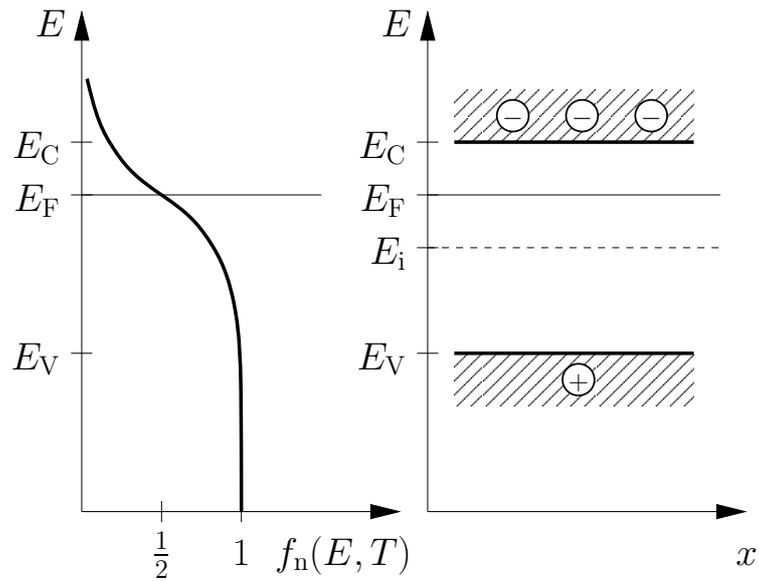
*Majoritätsträger* sind Löcher, *Minoritätsträger* sind Elektronen

Leitfähigkeit des mit Akzeptoren P-dotierten Halbleiters:

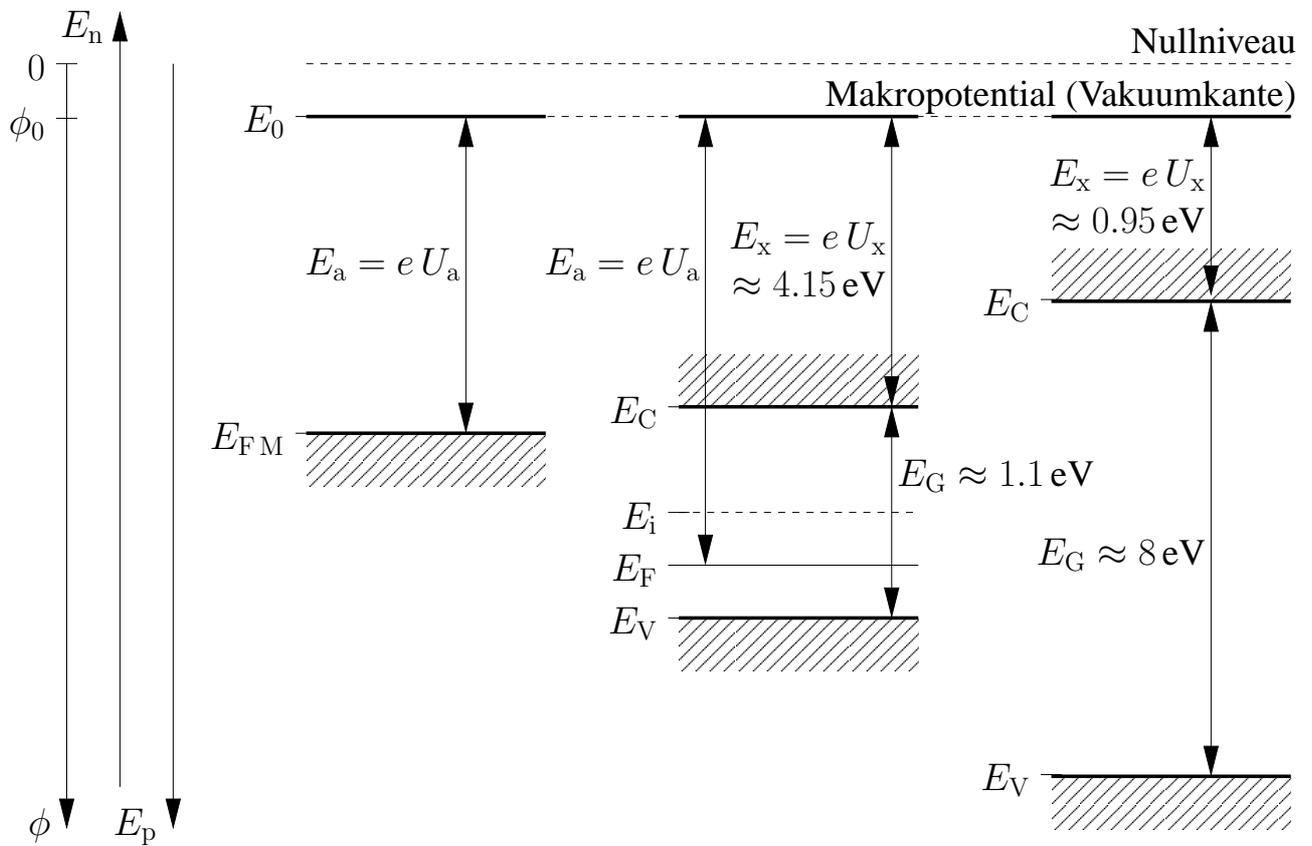
$$\sigma_p = e \mu_p n_{A^-}$$



# Besetzungswahrscheinlichkeit und *Fermi-Niveau* im dotierten Halbleiter

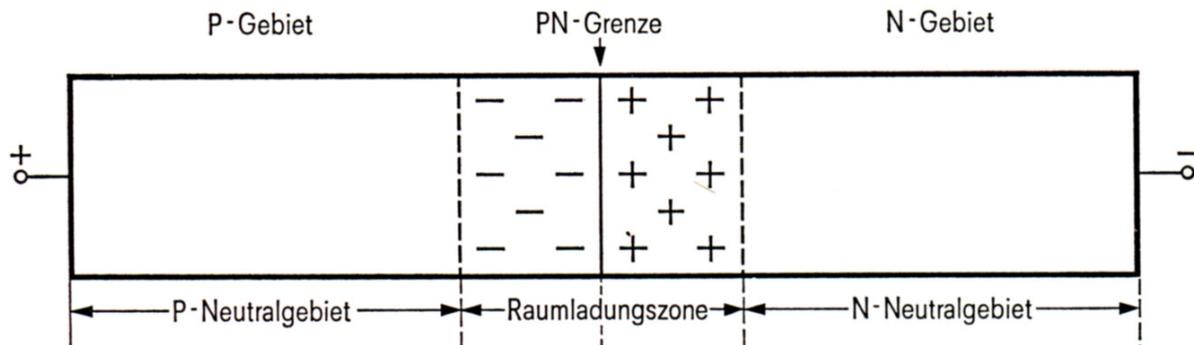


# Gegenüberstellung der Bändermodelle

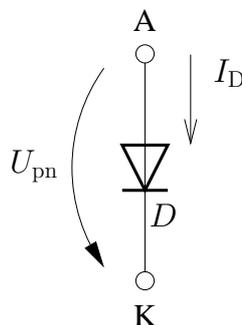


# Diode

## Aufbau



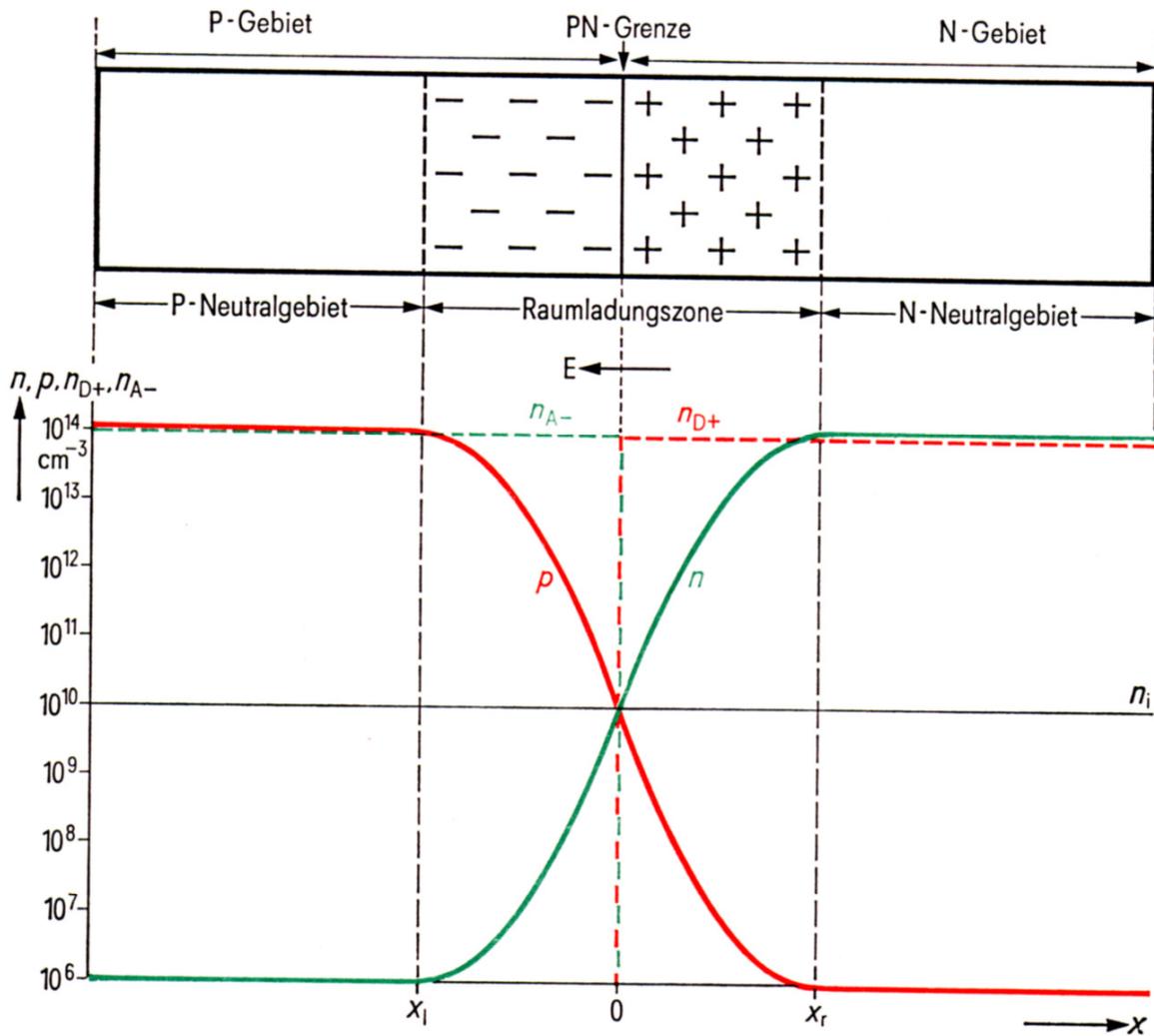
Die Diode ist ein Zweipol und besteht aus zwei dotierten Halbleiterzonen unterschiedlichen Leitfähigkeitstyps, wobei zwischen dem N- und P-dotierten Halbleiter ein direkter Kontakt besteht. Die beiden Elektroden heißen Anode und Katode. Die Anode kontaktiert den P-dotierten Halbleiter, die Katode kontaktiert den N-dotierten Halbleiter.



# Diode

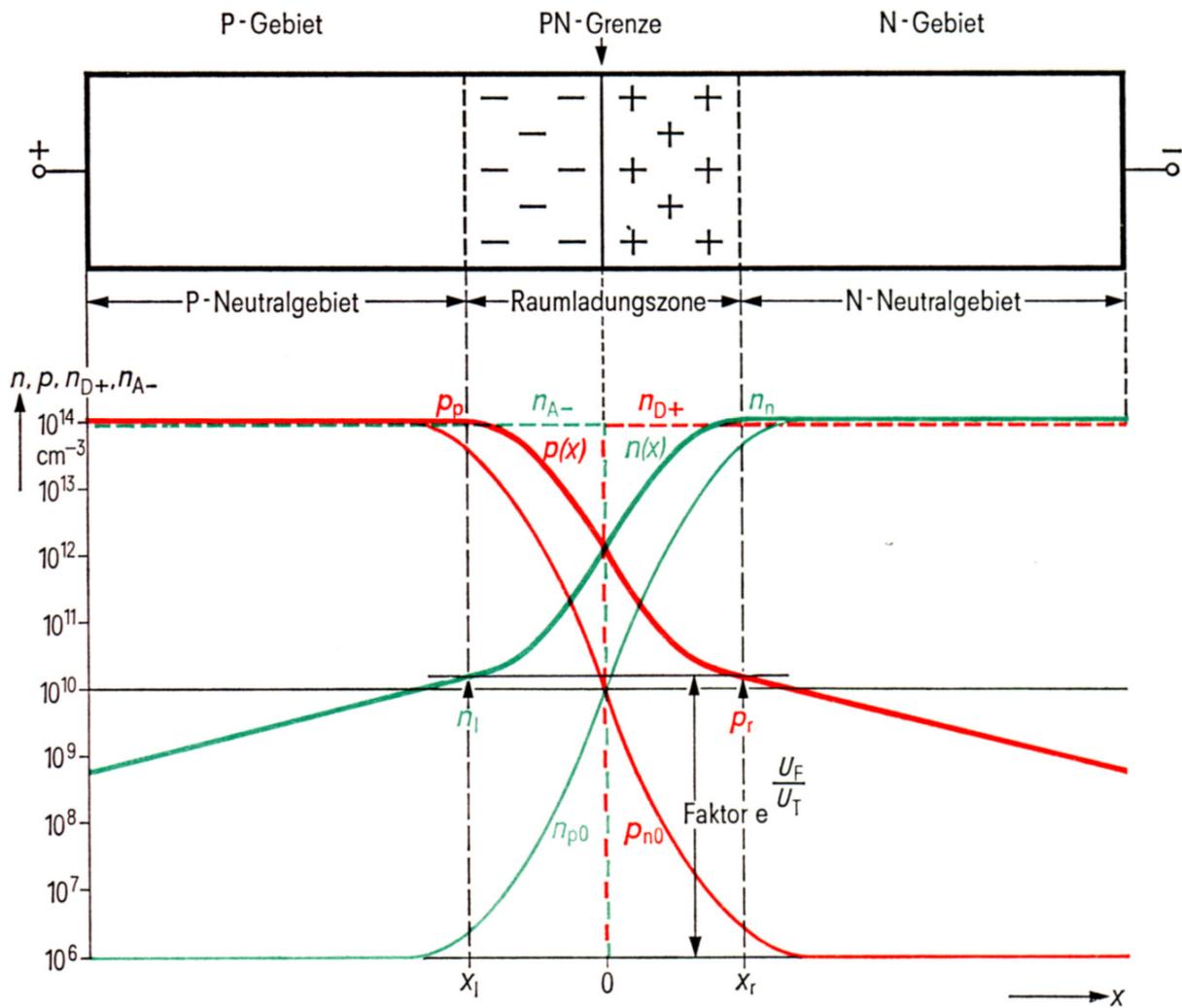
## Thermisches Gleichgewicht

Dotierungs- und Konzentrationsverlauf im thermischen Gleichgewicht



# Diode

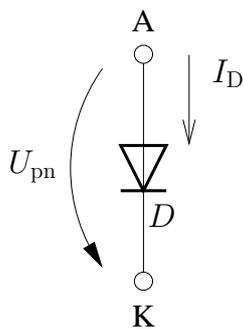
## Durchlassbelastung



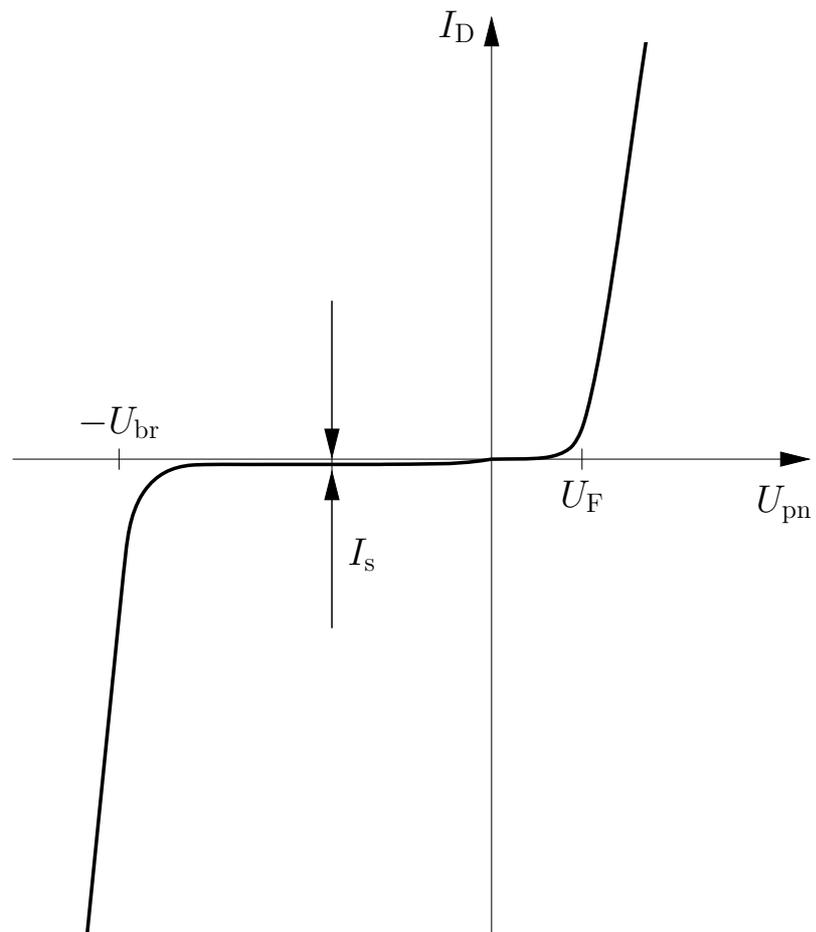
# Diode

## Kennlinie

Schaltzeichen



$I_D$ - $U_{pn}$ -Kennlinie



$U_F$  Flussspannung ( $\approx 0.7 \text{ V}$  für Si)

$I_s$  Sperrsättigungsstrom

$U_{br}$  Durchbruchspannung

# Diode

## Durchbruch

- **thermischer Durchbruch:**  $I_s$  ist temperaturabhängig, so dass  $U_{br} I_s$  zur Temperaturerhöhung und zur fortlaufenden Sperrstrom-Erhöhung beiträgt: Zerstörung der Diode.
- **Durchgriff:** Die Raumladungszone wird so breit, dass sie bis an die äußeren Kontakte reicht. Unter der Voraussetzung, dass die Kontakte niederohmig Minoritätsträger liefern können, kommt es durch das elektrische Feld der Raumladungszone zum Stromfluss.
- **Zener-Durchbruch (Tunnel-Durchbruch):** die Konzentrationsgefälle an der Grenze der Raumladungszone werden sehr steil: Die Ladungsträger durchtunneln die ladungsträgerarme Raumladungszone.
- **Avalanche- (Lawinendurchbruch):** Stoßionisation des Sperrstromes in der Raumladungszone bei hoher elektrischer Feldstärke führt zu einem lavinenartigen Ansteigen des Stromes.

# Diode

## Modell für die Durchlassrichtung

Modifizierte *Shockley*-Gleichung:

$$I_D = I_s \left( e^{\frac{U_{pn}}{nU_T}} - 1 \right)$$

- Dotierungsindex  $1 \leq n \leq 2$ ,
- Temperaturspannung

$$U_T = \frac{kT}{e} \approx 26 \text{ mV bei Raumtemperatur}$$

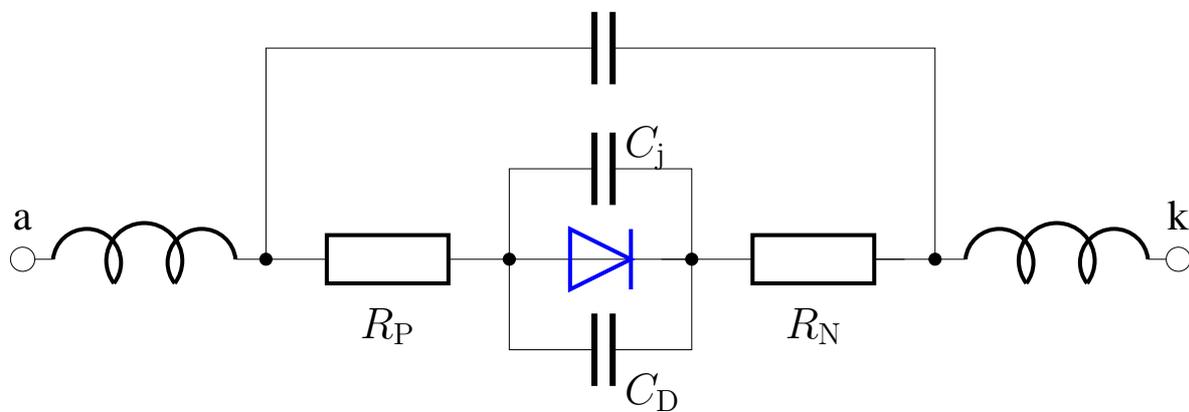
- *Bolzmann*-Konstante  $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ VAs/K}$ ,
- Elementarladung  $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$
- temperaturabhängiger Sperrsättigungsstrom  $I_s(T)$

$$I_s(T) = I_s(T_0) e^{\frac{U_G}{nU_T} \left( \frac{T}{T_0} - 1 \right)} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{\frac{x_{TI}}{n}}$$

(Bandabstandsspannung (*band gap voltage*) für Si:  $U_G = 1.12 \text{ V}$ ,  $x_{TI} \approx 3$ )

# Diode

## Ersatzschaltung der realen Diode



- Zuleitungsinduktivität
- Gehäuse-Kapazität
- Bahnwiderstände  $R_P$  und  $R_N$
- Sperrschichtkapazität  $C_j$
- Diffusionskapazität  $C_D$

# Diode

## Kennwerte

- Flussspannung  $U_F$ , bei Si  $\approx 0.7$  V
- Sperrsättigungsstrom  $I_s = 10^{-12} \dots 10^{-6}$  A
- Sperrschichtkapazität  $C_j$  bei  $U_{pn} = 0$  V

### Grenzwerte:

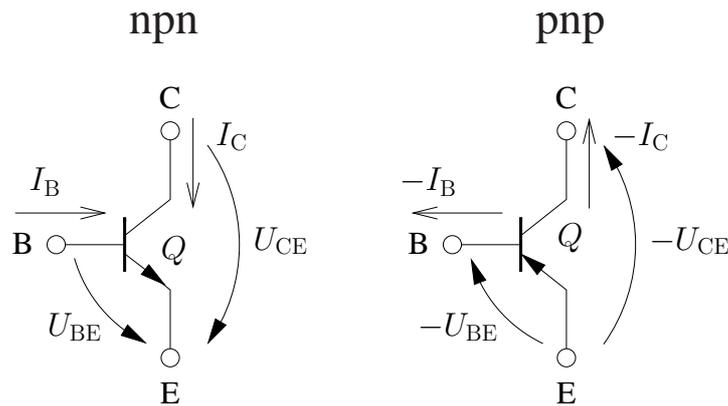
- max. Sperrspannung  $U_{R,max} < \text{Durchbruchspannung } U_{br}$
- max. Durchlassstrom  $I_{F,max}$
- max. Verlustleistung  $P_{tot}$

Alle Grenzwerte für Gleichströme und -spannungen, für periodische Spitzenströme und -spannungen sowie für Impuls-Spitzenströme und -spannungen.

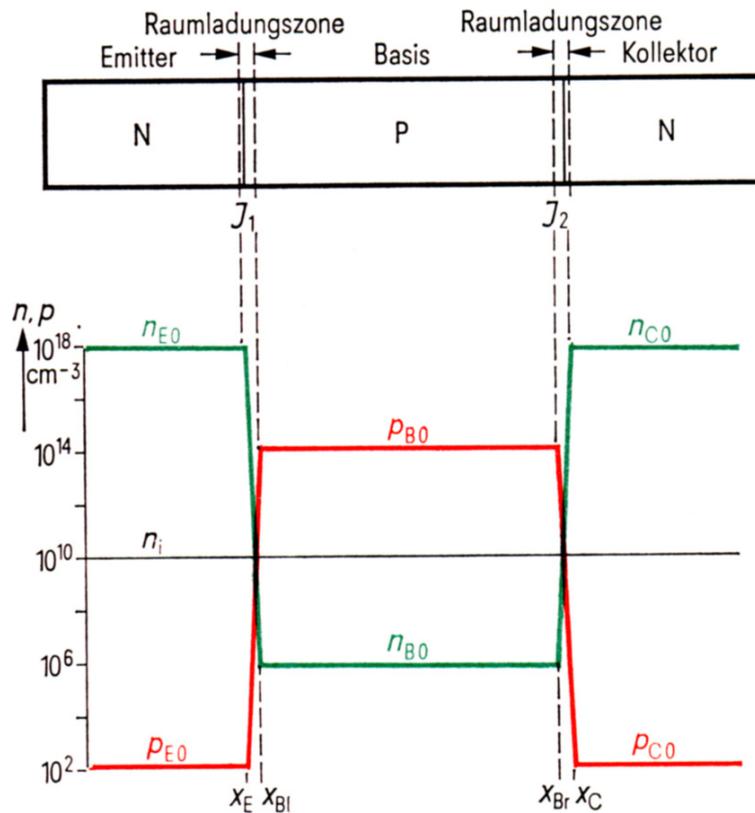
# Bipolar-Transistor

## Aufbau und Wirkungsweise

Schaltzeichen des npn- und des pnp-Transistors



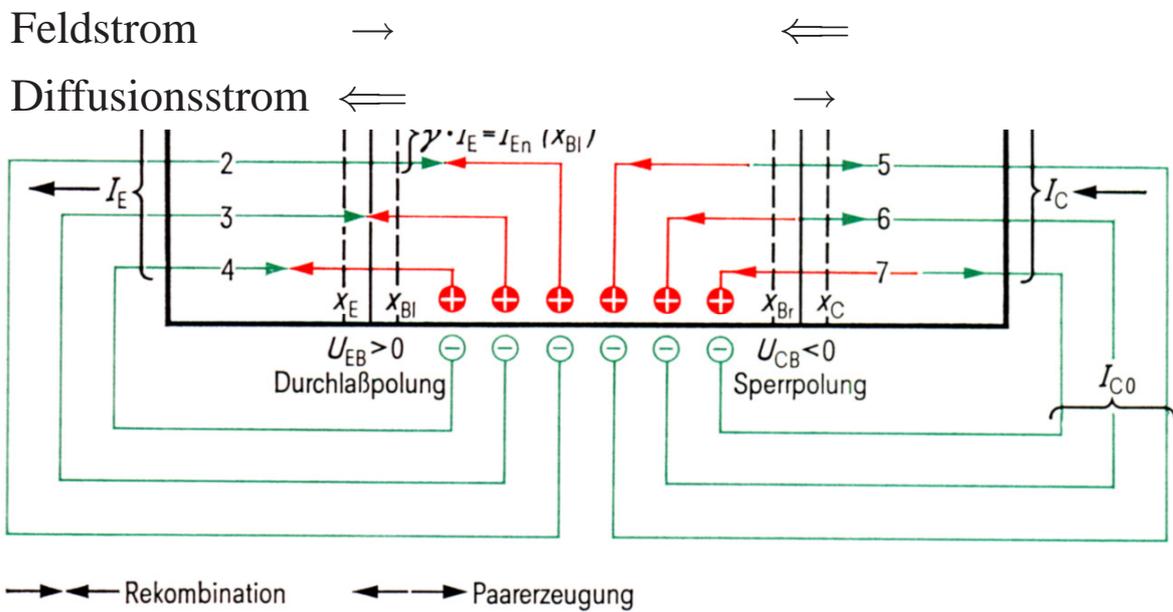
Aufbau des npn-Transistors



# Bipolar-Transistor

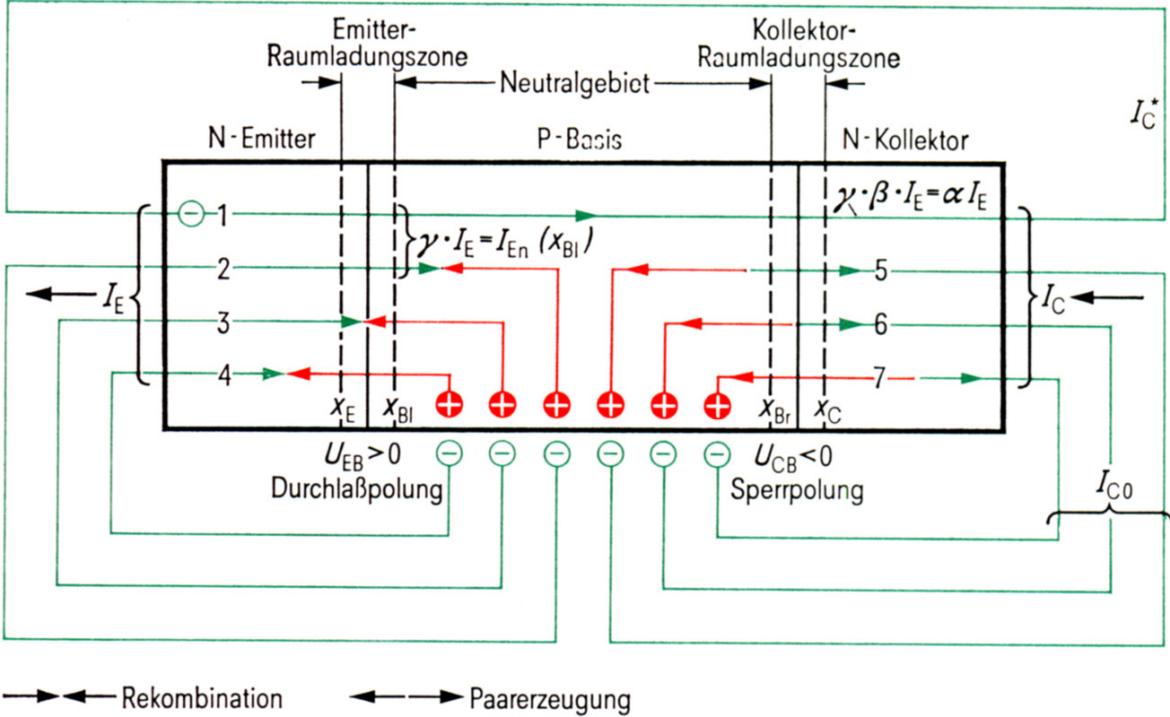
## Wirkungsweise (1)

Stromfluss durch die durchlass- und sperrbelasteten PN-Übergänge



# Bipolar-Transistor

## Wirkungsweise (2)



# npn-Bipolartransistor (BJT)

## Transportstrommodell nach *Gummel-Poon*

Basis-Kollektor-Diode:

$$I_{BC} = \frac{I_s}{B_r} \left( e^{\frac{U_{BC}}{n_r U_T}} - 1 \right)$$

Basis-Emitter-Diode:

$$I_{BE} = \frac{I_s}{B_f} \left( e^{\frac{U_{BE}}{n_f U_T}} - 1 \right)$$

$I_s$  Sperrsättigungsstrom

$B_f$  statische Stromverstärkungsfaktor in Vorwärtsrichtung

$n_f$  Dotierungsindex der BE-Diode

$B_r$  statische Stromverstärkungsfaktor in Rückwärtsrichtung

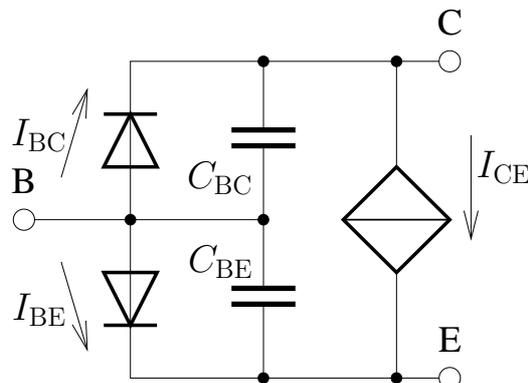
$n_r$  Dotierungsindex der BC-Diode

$U_T$  Temperaturspannung

Transportstrom  $I_{CE}$ :

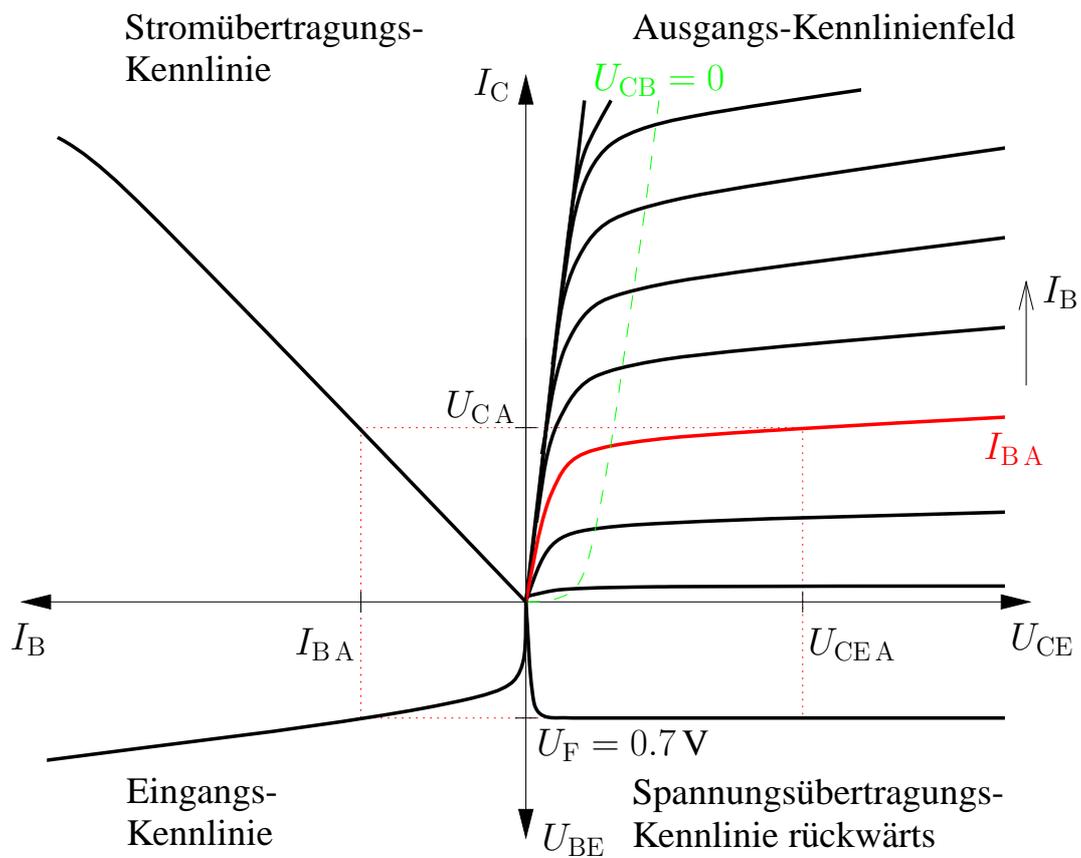
$$I_{CE} = \frac{I_s}{q_B} \left( e^{\frac{U_{BE}}{n_f U_T}} - e^{\frac{U_{BC}}{n_r U_T}} \right)$$

$q_B$  berücksichtigt den *Early*-Effekt und den Hochstromeffekt



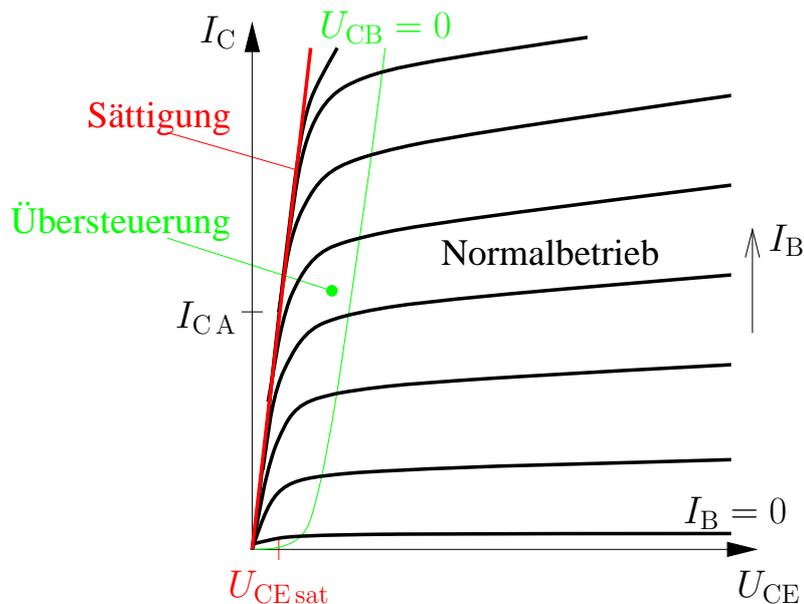
# nnp-Bipolartransistor

## Kennlinien im Vorwärtsbetrieb



# nnp-Bipolartransistor

## Betriebsbereiche in Vorwärtsrichtung



- Normalbetrieb  $U_{CB} > 0$

Die Basis-Kollektor-Diode wird in Sperrrichtung betrieben.

- Übersteuerung oder Sättigung  $U_{CB} \leq 0$

Die Basis-Kollektor-Diode wird unterhalb der Flussspannung  $U_F$  in Durchlassrichtung betrieben.

- Sättigung oder Sättigungsgrenze  $U_{CE,sat}$

Die Sättigungsgrenze  $U_{CE,sat}$  ist abhängig vom Kollektorstrom, der dann nur noch vom Ausgangskreis bestimmt wird. Es gibt keine Beeinflussung mehr durch den Basisstrom.

# npn-Bipolartransistor

## Vereinfachtes Großsignalmodell:

### Vorwärtsbetrieb

Im Vorwärtsbetrieb gilt unter Vernachlässigung der Sperrströme:

Für den Ausgangskreis:

$$I_C = I_{CE} - I_{BC} \approx \frac{I_s}{q_B} e^{\frac{U_{BE}}{n_f U_T}}$$

mit *Early*-Effekt (Näherung bei kleinen und mittleren Strömen)

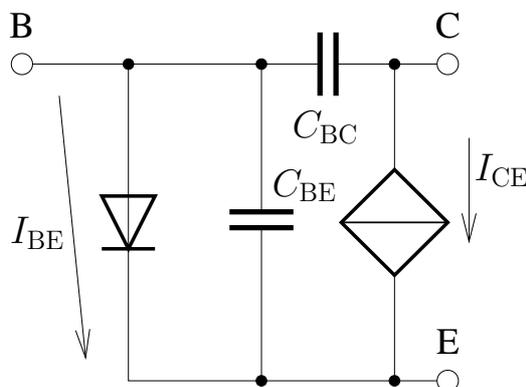
$$q_B \approx \frac{1}{1 + \frac{U_{CE}}{U_A}}$$

$$I_C \approx I_s e^{\frac{U_{BE}}{n_f U_T}} \left(1 + \frac{U_{CE}}{U_A}\right)$$

Für den Eingangskreis:

$$I_B = I_{BE} + I_{BC} \approx \frac{I_s}{B_f} e^{\frac{U_{BE}}{n_f U_T}} \approx \frac{I_C}{B_f}$$

$$U_{BE} \approx U_F$$



# npn-Bipolartransistor

## Kennwerte

- Stromverstärkung  $B = B_f$

für diskrete Transistoren entsprechend Stromverstärkungsgruppen

$$C : \quad 56 - 140$$

$$D : \quad 112 - 280$$

$$E : \quad 224 - 560$$

$$F : \quad 450 - 1120$$

- *Early*-Spannung  $U_A$ , typisch  $50 \text{ V} \leq U_A \leq 200 \text{ V}$

Grenzwerte:

- max. Basis- und Kollektorströme  $I_{B \max}$  und  $I_{C \max}$

- max. Spannungen  $U_{EB}$  und  $U_{CB}$

Diese Grenzwerte ergeben sich aus der Durchbruchfestigkeit der PN-Übergänge, in Vorwärtsrichtung ist die Basis-Kollektor-Diode relevant.

- max. Verlustleistung  $P_{\text{tot}}$

Aus der max. Verlustleistung folgt ein max. Kollektorstrom

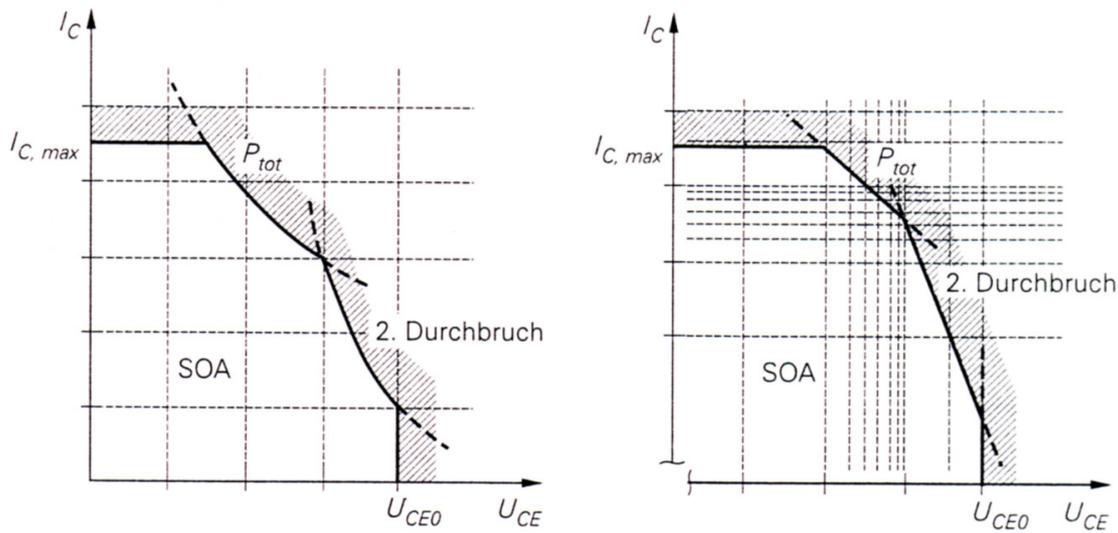
$$I_{C \max} = \frac{P_{\text{tot}}}{U_{CE}}$$

Es ergeben sich unterschiedliche Grenzwerte für die statische Belastung und für Impulsbelastungen bei verschiedenen Impulsbreiten.

# npn-Bipolartransistor

## Zulässiger Betriebsbereich

Die *safe operating area* SOA gibt die zulässigen Aussteuerbereiche des Ausgangsstroms  $I_C$  und der Ausgangsspannung  $U_{CE}$  im Ausgangskennlinienfeld an.



# Layout

## Lateral PNP-Transistor

