



Leibniz
Universität
Hannover

Bipolartransistoren

H. Jörg Osten

**Institut für Materialien und Bauelemente
der Elektronik**

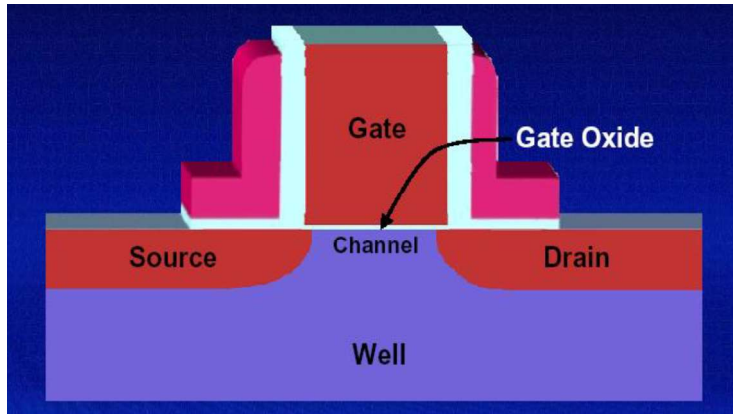
- MBE -

**Leibniz Universität Hannover
Schneiderberg 32, 30167 Hannover**

nur für den LUH-internen Gebrauch

Transistoren

- verwendet zum Schalten und Verstärken
- bestehen aus dotierten Halbleiterschichten
- bipolare Varianten (Majoritäten und Minoritäten sind wichtig)
 - BJT: Homojunction Bipolartransistor
 - HBT: Heterojunction Bipolartransistor
 - IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor
 - Fototransistor
 - Darlington Transistor (eigentlich 2 Bipolartransistoren)
- unipolare Varianten (nur eine Ladungsträgerart im Einsatz)
 - JFET: Sperrschicht Feldeffekttransistor
 - MOSFET: Metall-Oxid-Feldeffekttransistor
 - MISFET: Schottky-Feldeffekttransistor
 - HEMT: High Electron Mobility Transistor
 - ISFET: Ionen-Sensitiver Feldeffekttransistor



Feldeffekttransistor (FET)

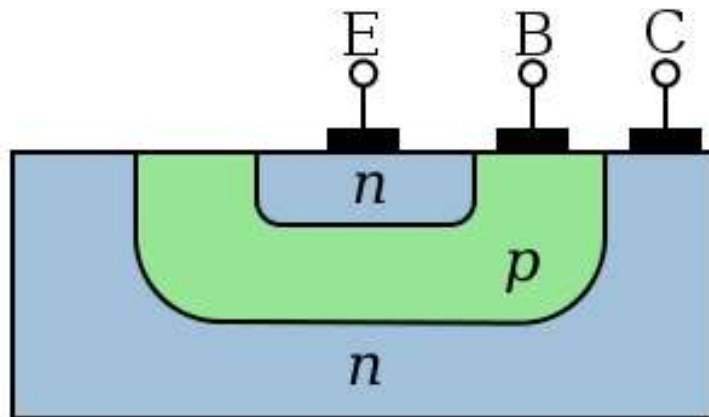
Geschwindigkeit:

Ladungsträgertransport von Source nach Drain

→ laterales Bauelement

→ heute: Kanallängen < 22 nm

→ **limitiert durch Lithografie**



Bipolar Transistor (HBT)

Geschwindigkeit:

Ladungsträgertransport vom Emitter zum Kollektor

→ vertikales Bauelement

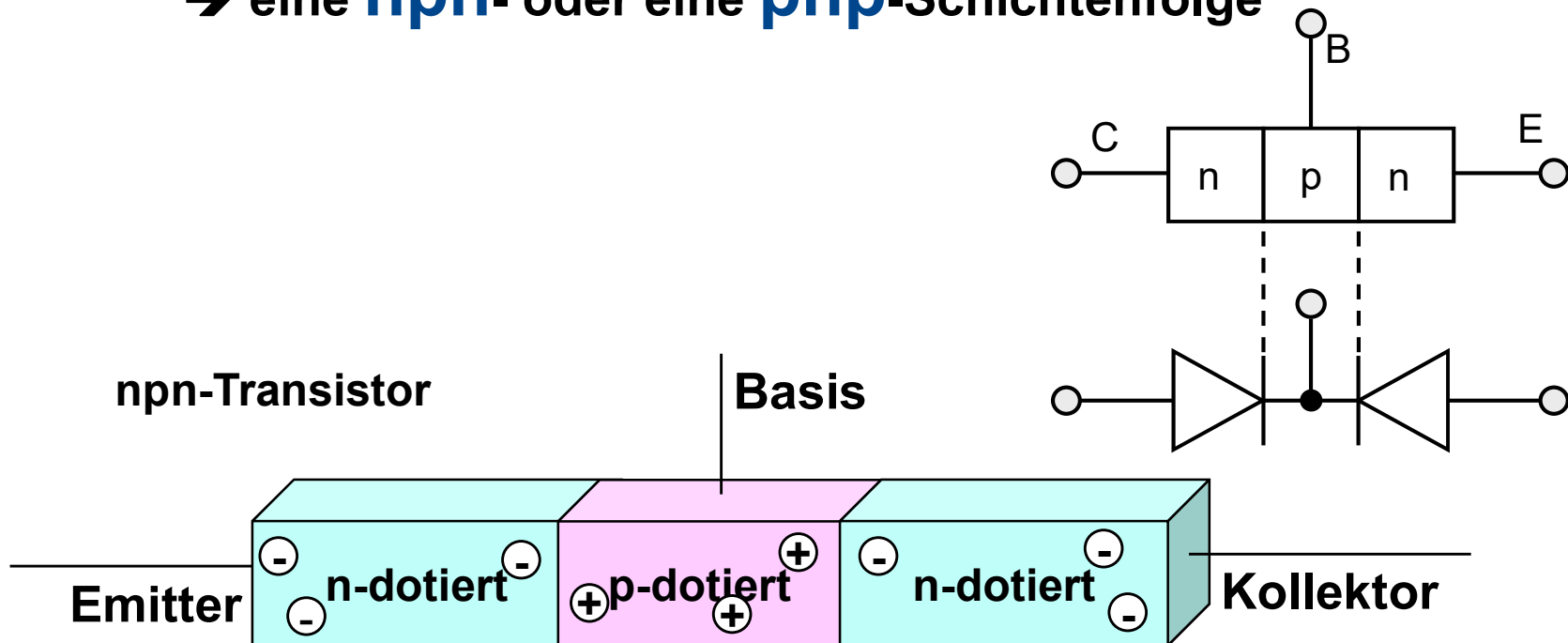
→ heute: Basisdicke < 25 nm

→ fast unabhängig von lateralen Abmessungen

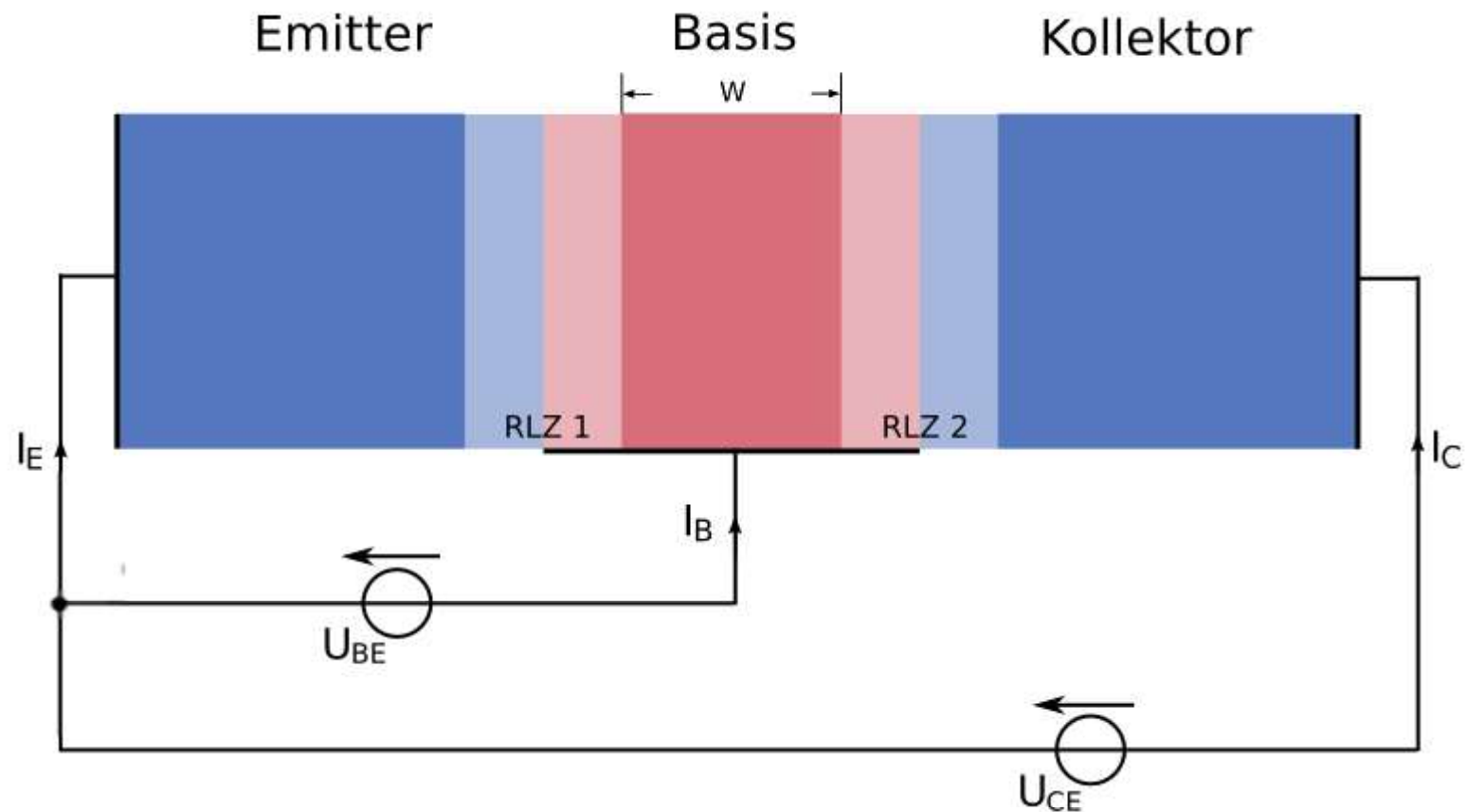
→ **limitiert durch Schichtherstellung**

Bipolartransistoren

- Die einfachste Variante entsteht aus drei abwechselnd dotierten Schichten von halbleitenden Materialien
 → zwei pn-Dioden hintereinander
 → eine **npn**- oder eine **pnp**-Schichtenfolge



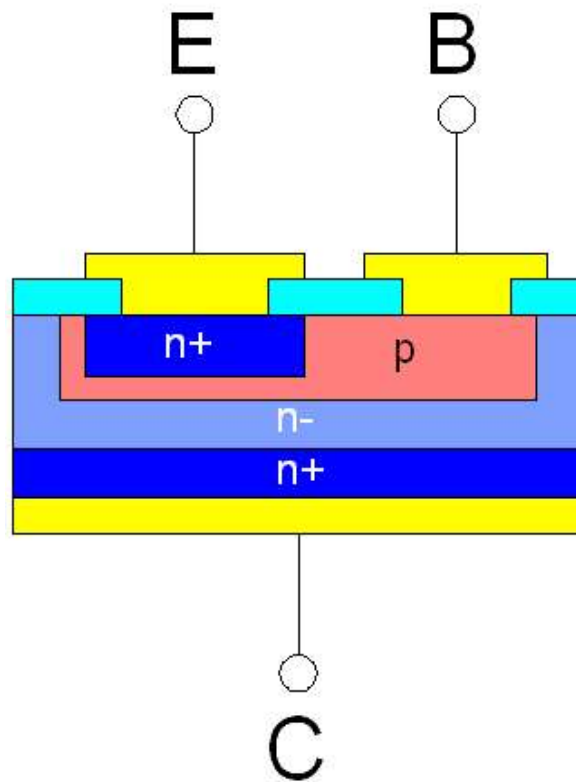
Schema eines Bipolartransistors



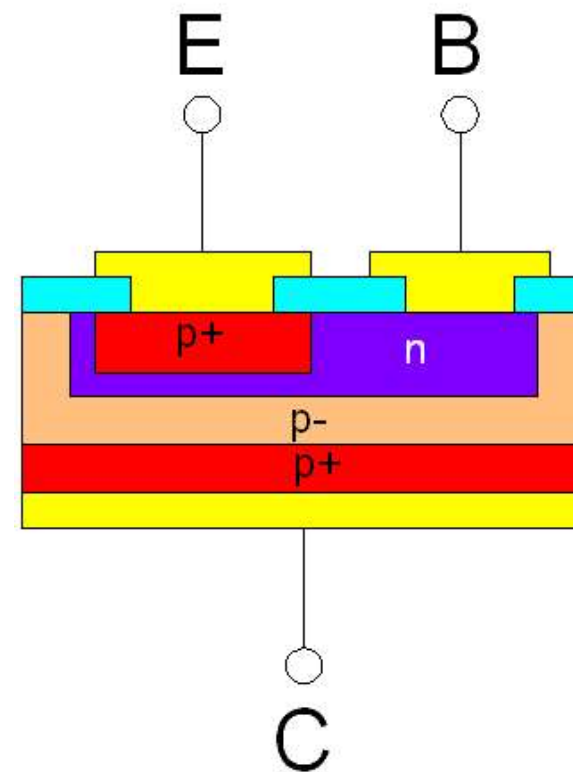
Bipolartransistor

- Die Außenschichten des Bipolartransistors werden **Kollektor(C)** und **Emitter(E)** genannt.
 - Die mittlere Schicht hat die Bezeichnung **Basis(B)** und ist die Steuerelektrode, oder auch der Steuereingang des Transistors.
Diese mittlere Schicht ist im Vergleich zu den beiden anderen Schichten besonders dünn.
 - Normalerweise kann kein Strom vom Emitter zum Kollektor fließen.
Legt man an die mittlere Schicht (Basis) eine Steuerspannung, so öffnet der Transistor.
- Die Spannung an der Basis bestimmt, ob Strom vom Emitter zum Kollektor fließt, oder nicht.**

Aufbau von einfachen Bipolartransistoren

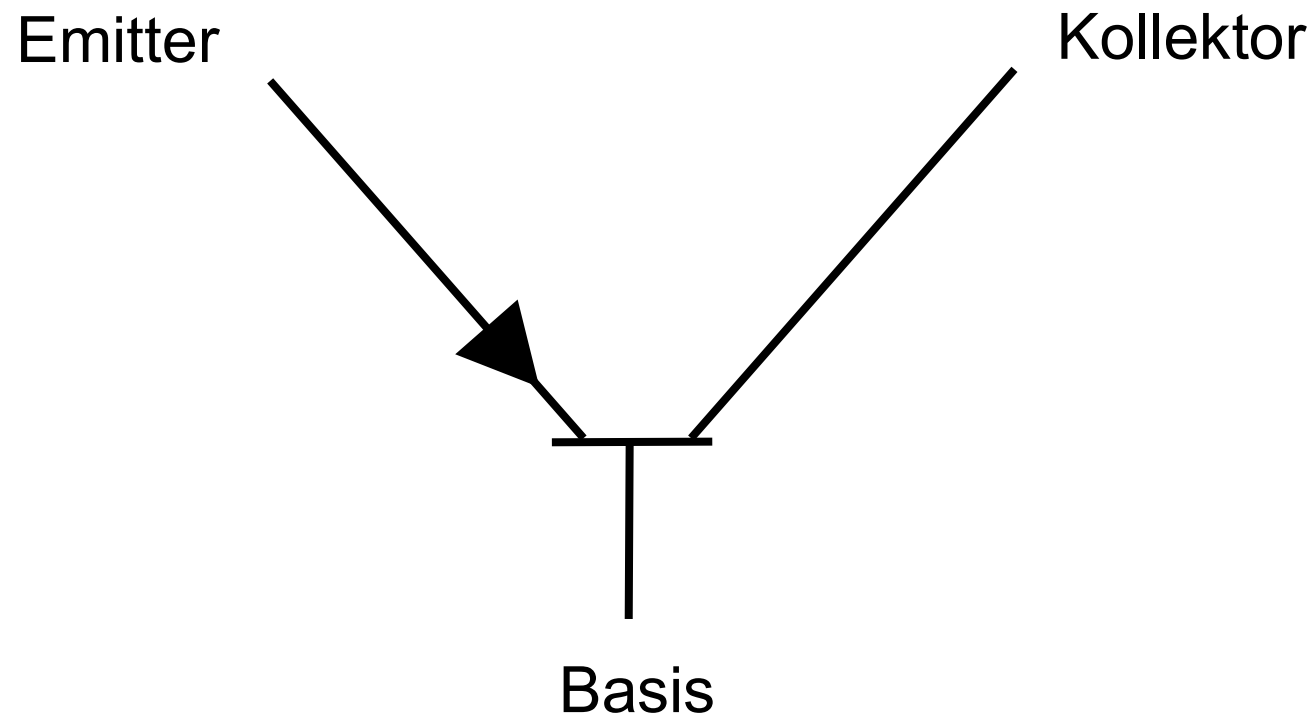


npn



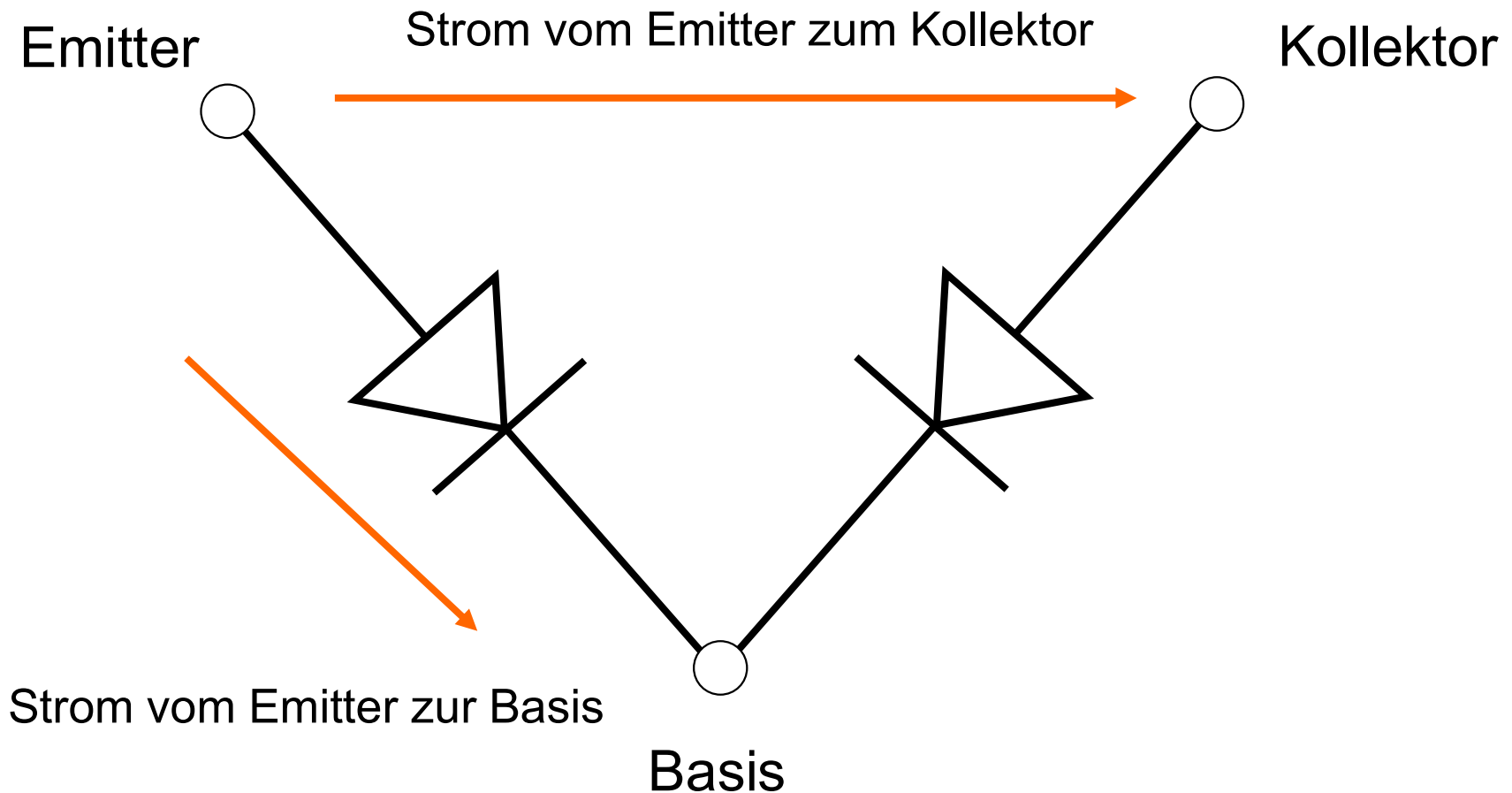
pnp

Zeichen für einen pnp Transistor



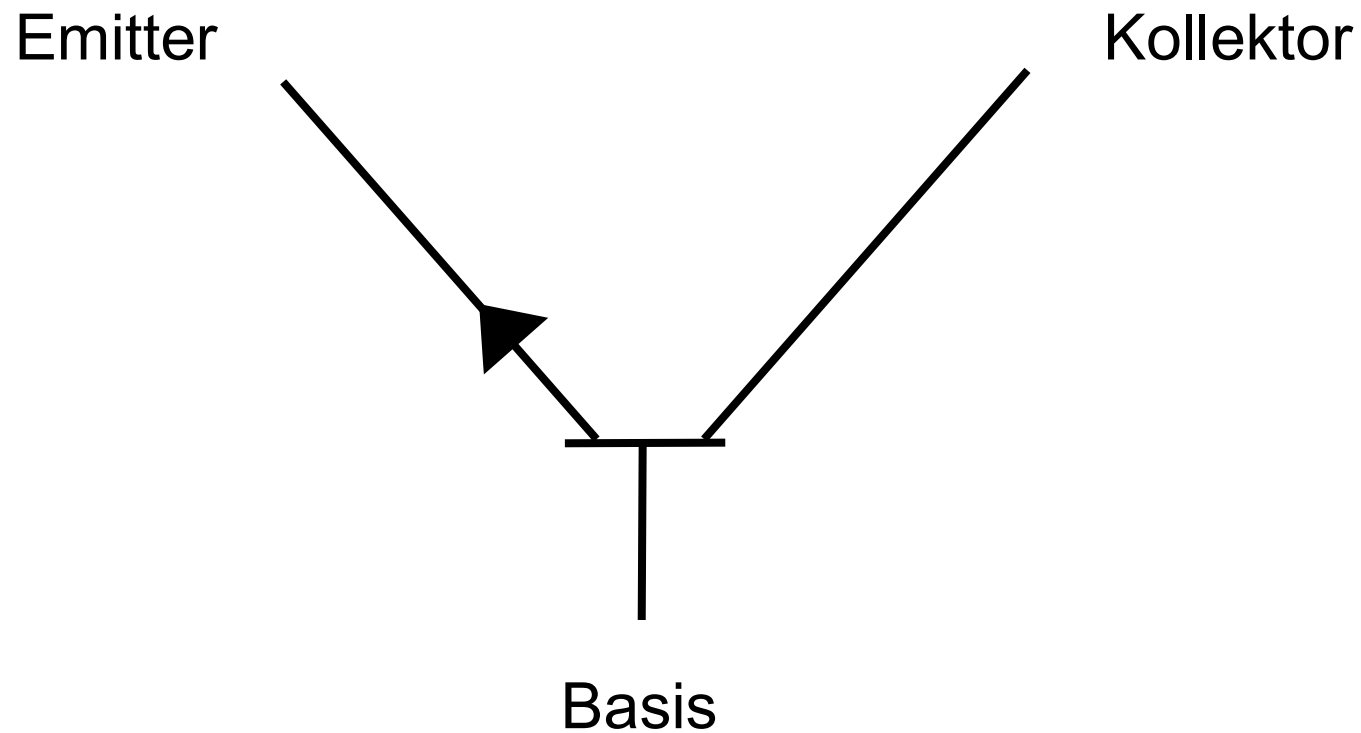
„Tut der Pfeil der Basis weh, handelt sich's um pnp.“

Ersatzschaltbild eines pnp Transistors

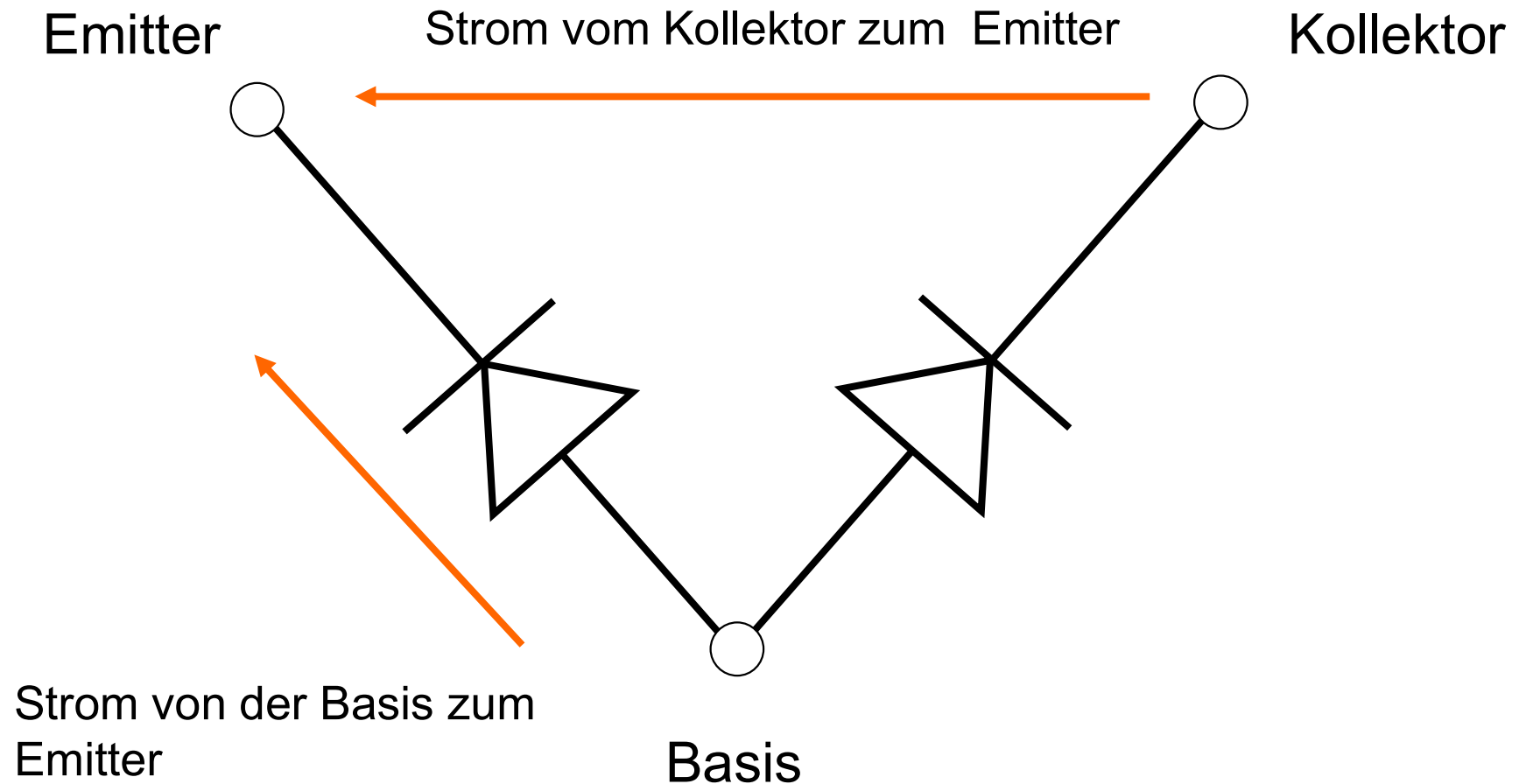


→ zwei gegeneinander geschaltete pn-Dioden

Schaltzeichen für einen npn Transistor



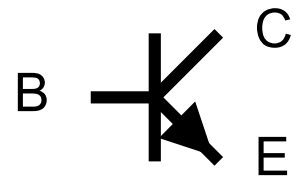
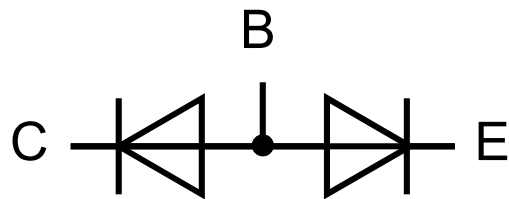
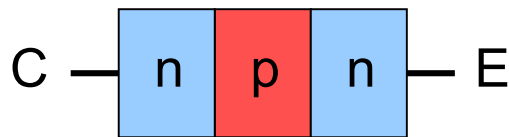
Ersatzschaltbild eines npn Transistors



→ zwei gegeneinander geschaltete np-Dioden

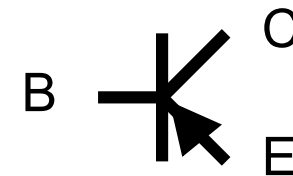
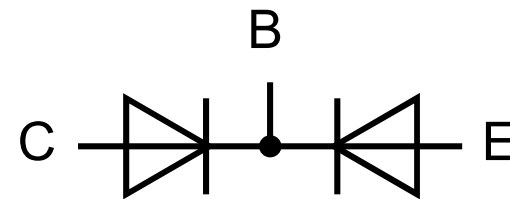
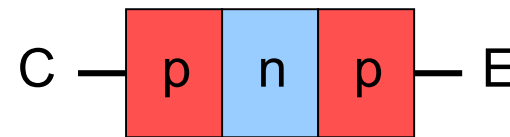
npn / pnp Aufbau und Bezeichnungen

NPN



B Basis
E Emitter
C Kollektor

PNP



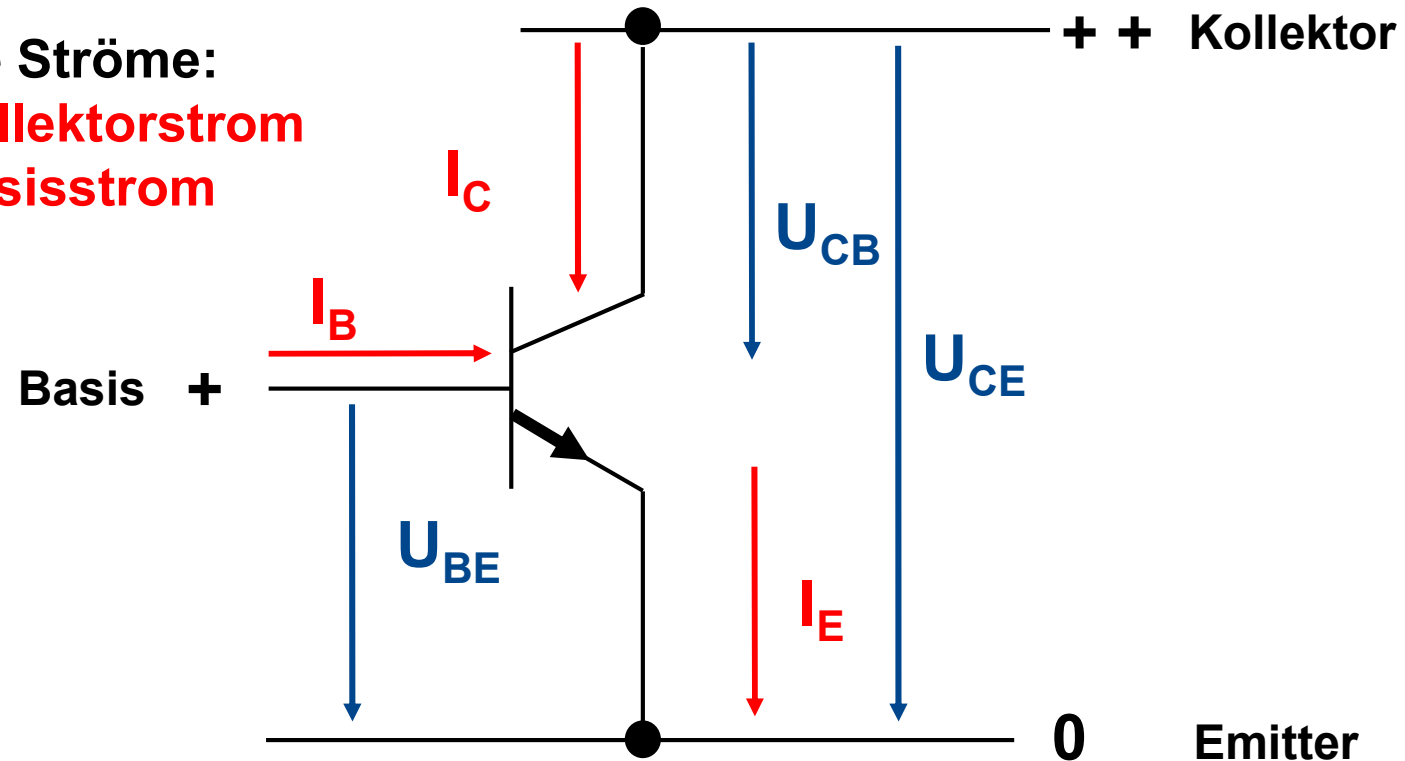
B Basis
E Emitter
C Kollektor

Ströme und Spannungen (npn)

Wichtige Ströme:

I_C = Kollektorstrom

I_B = Basisstrom



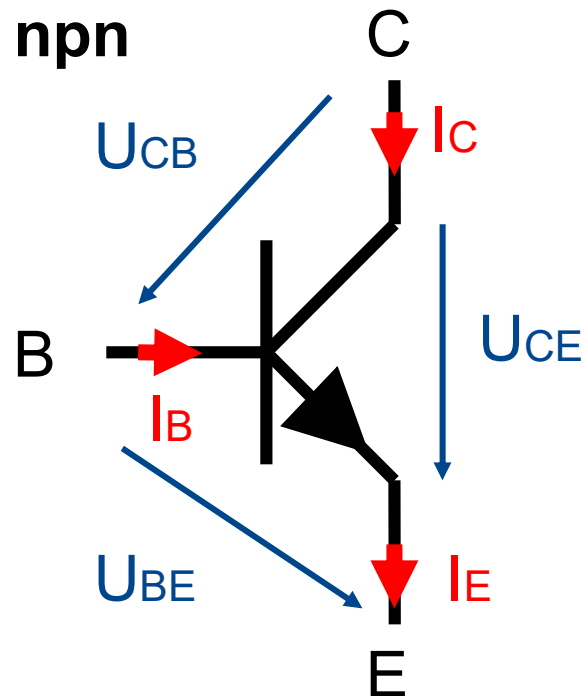
Wichtige Spannungen:

U_{CE} = Kollektor-Emitter-Spannung

U_{BE} = Basis-Emitter-Spannung

Wichtige Beziehungen

npn



$$U_{CE} = U_{CB} + U_{BE}$$

$$I_E = I_B + I_C$$

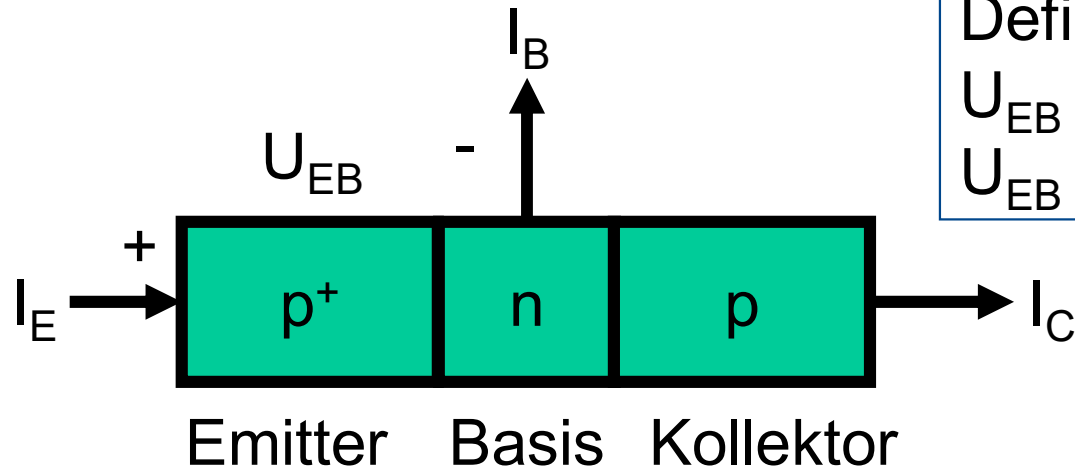
$$\beta = I_C / I_B$$

$$P_V = U_{BE} \cdot I_B + U_{CE} \cdot I_C$$

$$\sim U_{CE} \cdot I_C$$

β Stromverstärkung

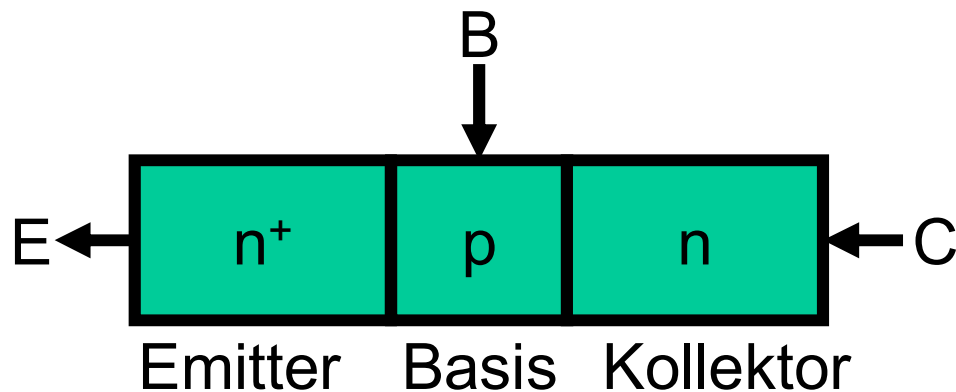
P_V Verlustleistung



Definition der Spannungen:

$$U_{EB} > 0$$

$$U_{EB} = -U_{BE}$$



nützliche Gleichungen:

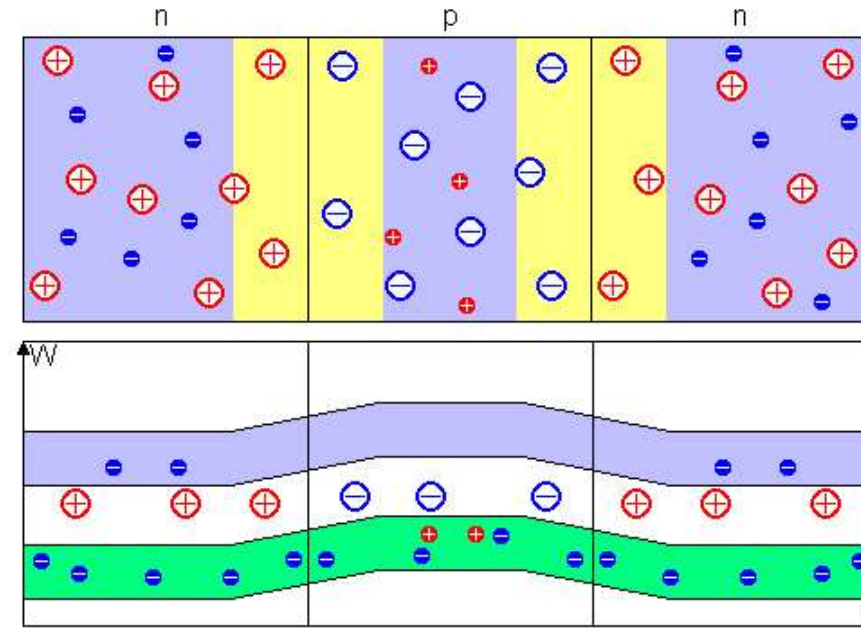
$$I_E = I_B + I_C$$

$$U_{EB} + U_{BC} + U_{CE} = 0$$

Funktionsweise eines npn Transistors

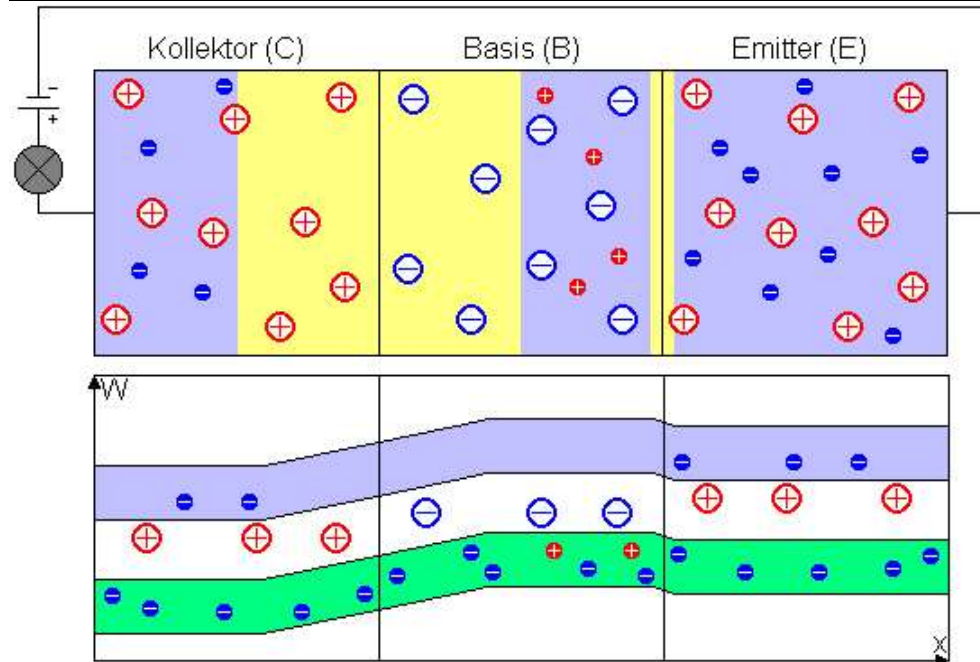
- Der Transistor besteht aus drei hintereinander geschalteten, verschieden dotierten Halbleiterschichten,
Emitter (n), Basis (p) und Kollektor (n)
Sie können auch als zwei pn-Dioden betrachtet werden
- Der Kollektor muss positiv gegenüber dem Emitter sein
- Das Potential an der Basis steuert den Stromfluss vom Emitter zum Kollektor

Funktion: ohne Basisspannung



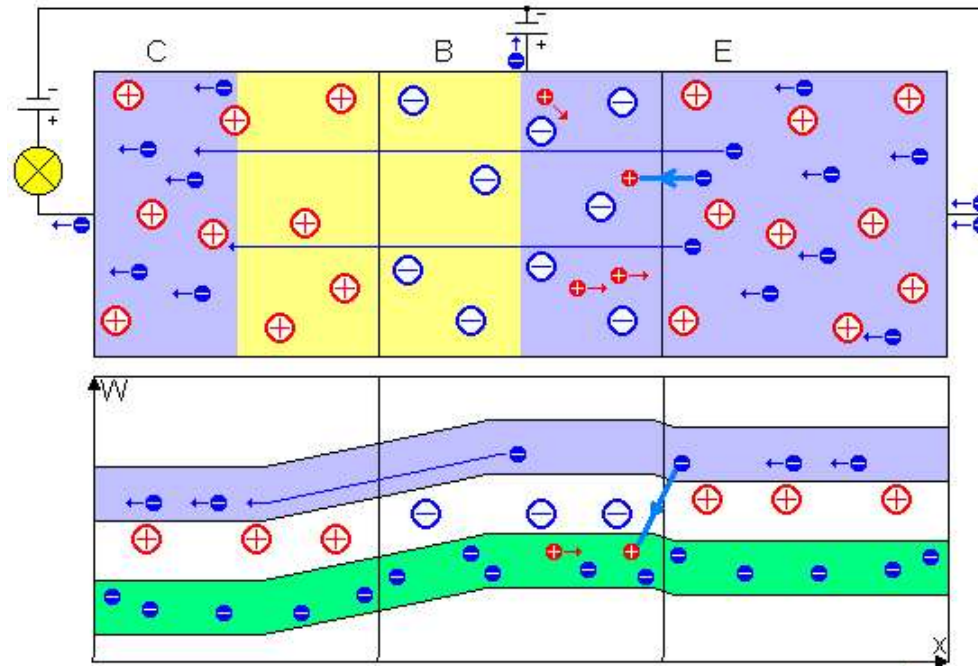
➔ beide pn-Übergänge bilden eine Sperrschicht (RLZ) aus

Funktion: mit Emitter-Kollektorspannung



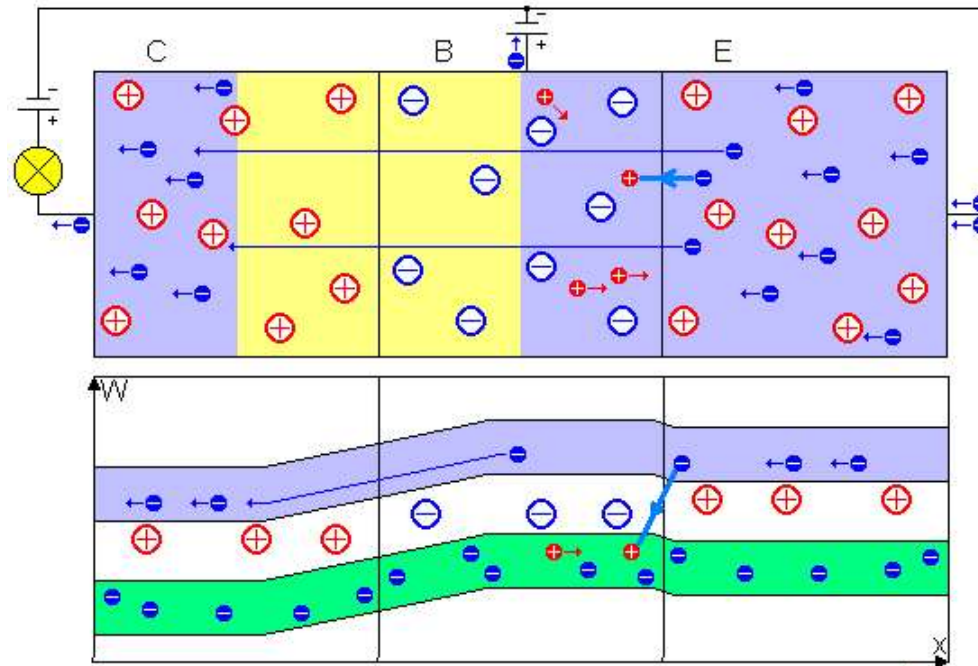
- Verhalten von pn-Dioden mit externer Spannung
 - ➔ BE-Sperrschicht wird kleiner
 - ➔ CB-Sperrschicht wird größer
 - ➔ Noch immer kein Stromfluß zwischen E und C möglich

Funktion: mit Basisspannung



- **BE-Stromkreis geschlossen:**
 - ➔ Verarmungsschicht zwischen B und E verschwindet
 - ➔ Elektronen diffundieren vom Emitter zur Basis

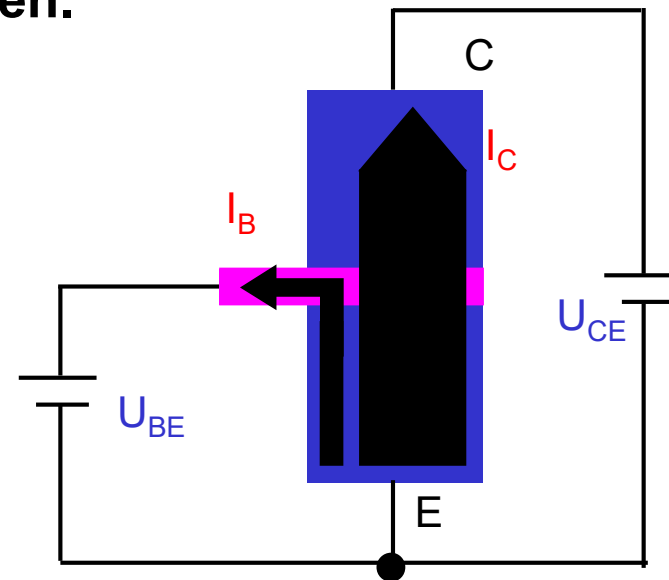
Funktion: mit Basisspannung



- Wenig Rekombination in der Basis, da:
 → geringe Basisbreite
- Die meisten Elektronen fließen direkt zum Kollektor weiter

Bipolarer Transistor: Funktionsweise (npn)

- Durch das Anlegen einer Spannung U_{BE} ist die untere Diode in Durchlassrichtung geschaltet.
- Die Elektronen gelangen in die p-Schicht und werden von dem Plus-Pol der Spannung U_{BE} angezogen. Da die p-Schicht sehr dünn ist, wird nur ein geringer Teil der Elektronen angezogen.

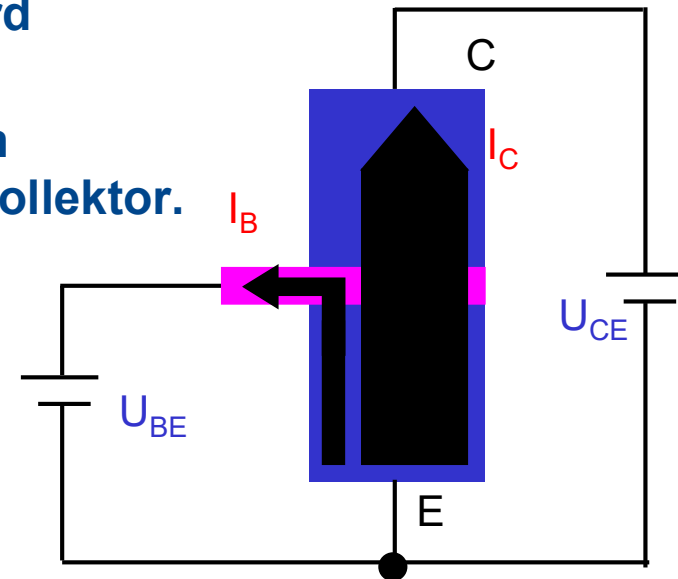


Bipolarer Transistor: Funktionsweise (nnp)

- Der größte Teil der Elektronen bewegt sich weiter in die obere Sperrschicht.

Der Basis-Kollektor-Übergang wird in Sperrrichtung betrieben.

Dort driften sie wegen des großen Potentialabfalls ($U_{CB} > 0$) in den Kollektor.



→ Es fließt ein Kollektorstrom I_C .

- Bei üblichen Transistoren bewegen sich etwa 99% der Ladungen (Elektronen) von Emitter zum Kollektor.
- In der Basisschicht verbleiben etwa 1% der Ladungen.

Funktionsprinzip eines npn Transistors

- Durch Schließen des Basis-Emitter-Stromkreises (Spannung $U_{BE} > U_D$ (Diffusionsspannung)) wird die Basis-Emitter-Diode leitend.

Wie bei der einfachen pn-Diode werden Löcher aus der Basis (p-dotiert) in den Emitter (n-dotiert) injiziert.

Es fließt ein kleiner Basisstrom I_{BE} .

Im Emittergebiet klingt der Minoritätsladungsträgerüberschuss mit der Diffusionslänge ab.

Analog dazu werden Elektronen aus dem Emitter in die Basis injiziert.

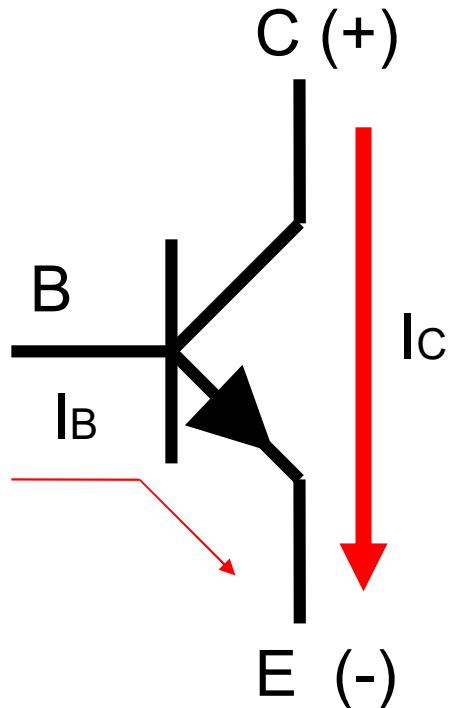
Aufgrund der geringen Weite der Basis, die kleiner als die Diffusionslänge der Ladungsträger sein muss, rekombinieren jedoch nur wenige der Elektronen mit den Löchern in der Basis.

→ Die meisten Elektronen erreichen den Kollektor.

Zusammenfassung: Funktionsweise

- Der Kollektorstrom I_C fließt nur, wenn auch ein Basisstrom I_B fließt.
Wird der Basisstrom I_B verändert, nimmt auch der Kollektorstrom I_C einen anderen Wert an.
Der Transistor wirkt dabei wie ein elektrisch gesteuerter Widerstand.
- Der Kollektorstrom I_C ist um ein vielfaches größer als der Basisstrom I_B .
Diesen Größenunterschied nennt man Stromverstärkung $\beta = I_C/I_B$.
- Ein Basisstrom kann erst dann fließen, wenn die Spannung an der Basis-Emitter-Strecke(-Diode) einen Schwellenwert erreicht hat.
- Mittels einer Hilfsspannung U_{BE} kann der Schwellwert vorab eingestellt werden.
→ Arbeitspunkteinstellung

Funktionsweise des npn-Transistors



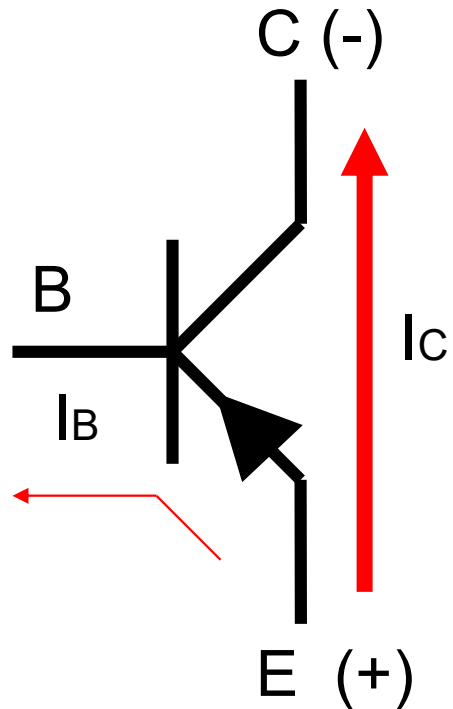
→ Ein kleiner Basisstrom I_B steuert einen großen Kollektorstrom I_C .

→ $\beta = I_C / I_B$ - Stromverstärkung

→ Ein Basisstrom I_B kann fließen, wenn die Basis-Emitterspannung groß genug ist ($> U_D$).

→ Die Kollektor-Emitterspannung U_{CE} muss positiv sein.

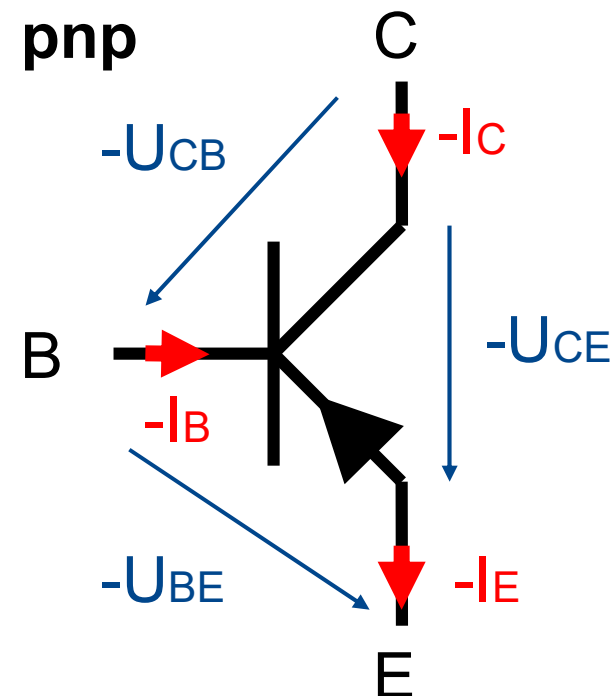
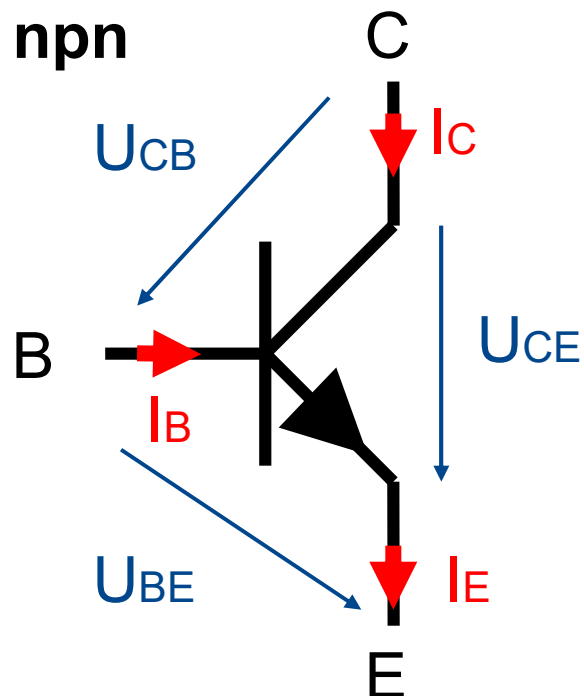
Funktionsweise des pnp-Transistors

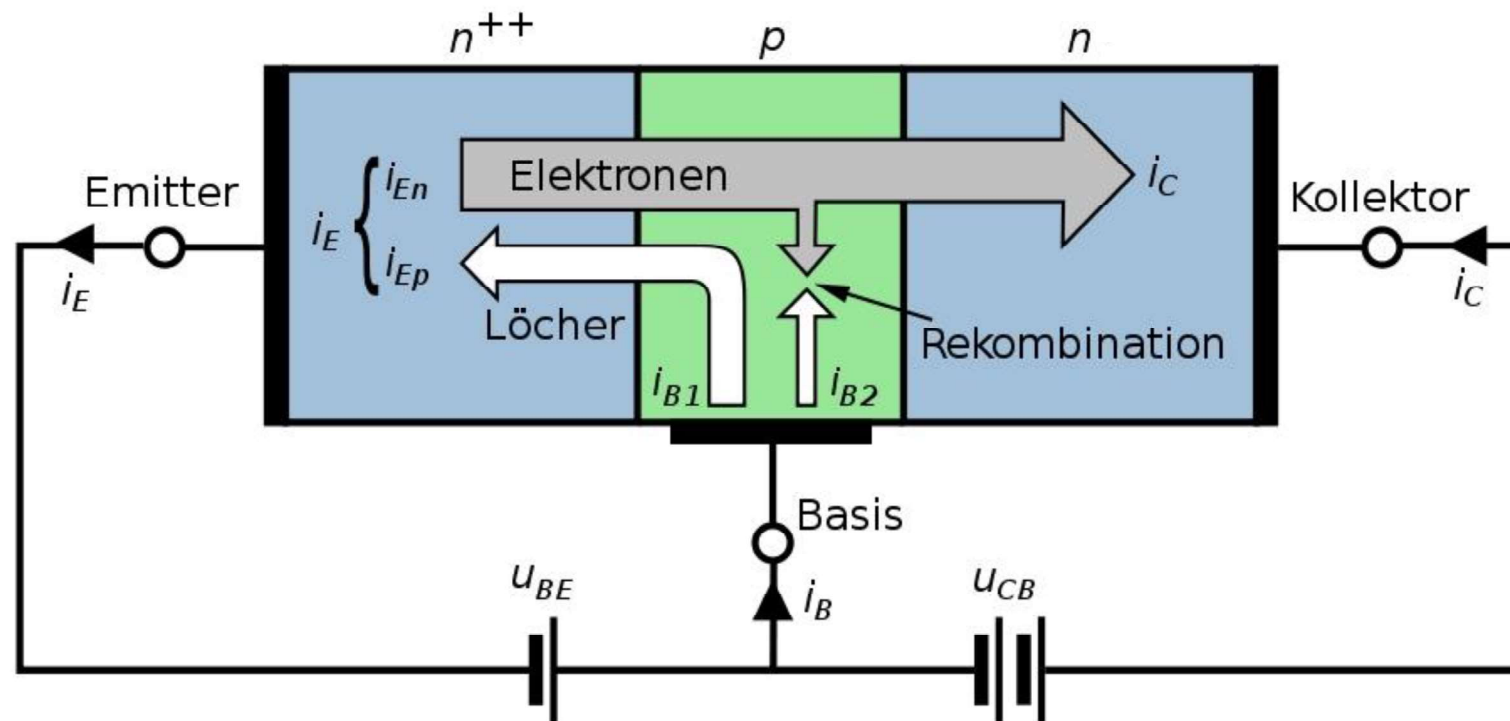


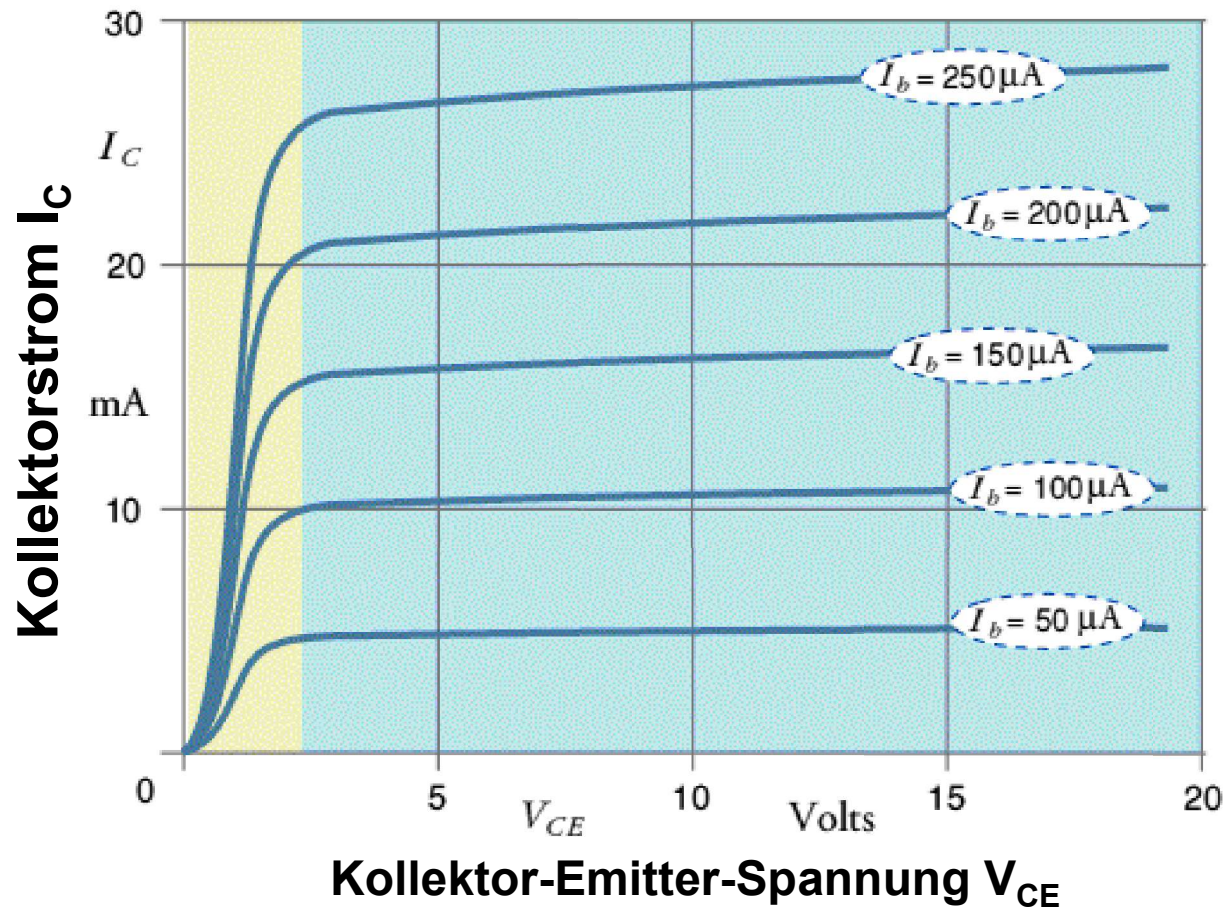
- Der pnp-Transistor funktioniert wie der npn-Transistor.
- Alle Polaritäten der Ströme und Spannungen sind aber umgekehrt!

Spannungen und Ströme am Transistor

Spannungs- und Strompfeile werden bei npn- und pnp-Transistoren gleich eingetragen. Da beim pnp-Transistor die Polaritäten umgekehrt sind, wird der Bezeichnung ein Minuszeichen vorgestellt.

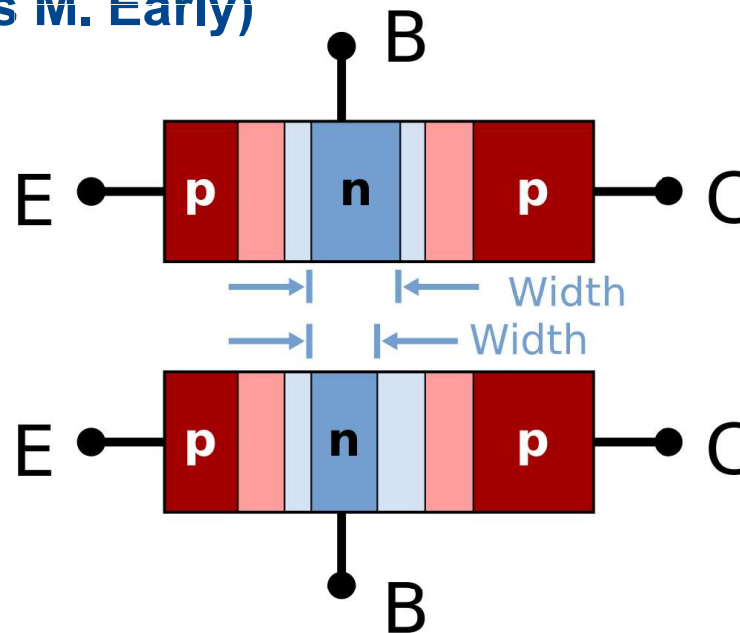






Early-Effekt

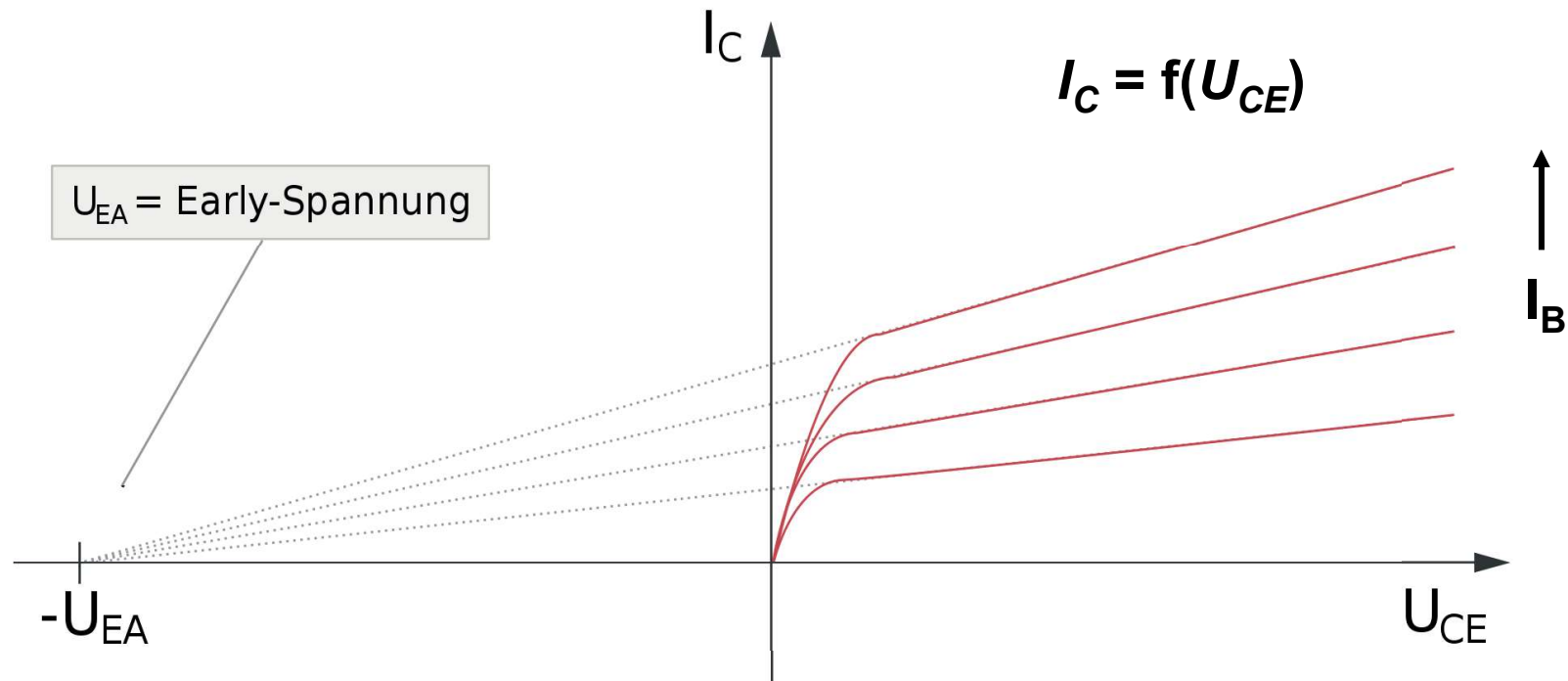
- Wird die Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} erhöht, verbreitert sich die RLZ des Kollektor-Basis-pn-Übergangs.
 → Die effektive Weite der Basis verringert sich.
 wird als Early-Effekt bezeichnet
 (benannt nach James M. Early)





Early-Effekt

- Der Early-Effekt (Basisweiten-Modulation) beschreibt die Änderung der effektiven Basisweite W eines bipolaren Transistors durch die Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} .
Wird U_{CE} erhöht, verbreitert sich die Raumladungszone (RLZ) des Kollektor-Basis-pn-Übergangs und die Weite der Basis verringert sich
 $\rightarrow W_{basis} = f(U_{CE})$
- Auswirkungen
Der Kollektorstrom ist von U_{CE} abhängig.
 $\rightarrow I_C = f(U_{CE})$
 \rightarrow Der Transistor ist keine ideale Stromquelle
Die Auswirkungen des Early-Effekts nehmen mit abnehmender Basisweite zu, da die relative Änderung der Raumladungszonen größer wird.



➔ Je größer die Early-Spannung, desto besser ist der Transistor für analoge/HF-Anwendungen geeignet.

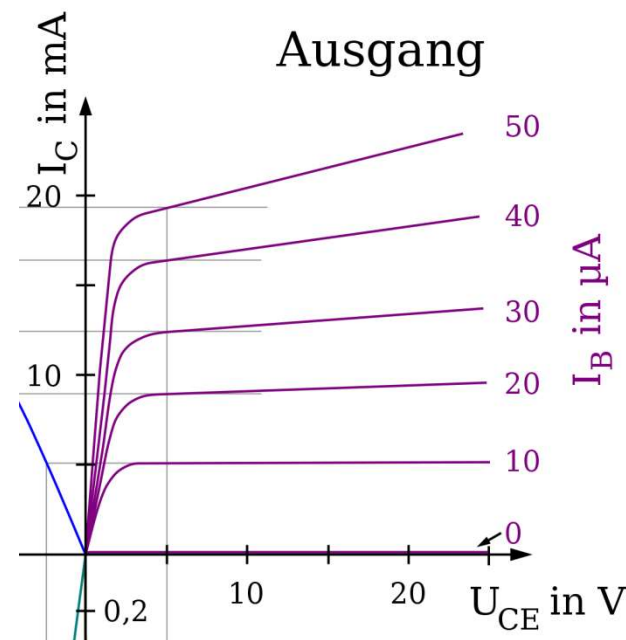
Kennlinienfelder

- Für die Beschreibung eines Bipolartransistors (als elektrischen Schalter oder in Verstärkerschaltungen) reichen vier grundlegende Kennlinien aus
 - das Eingangskennlinienfeld
 - das Ausgangskennlinienfeld
 - das Stromsteuer- oder Übertragungskennlinienfeld
 - das Spannungsrückwirkungskennlinienfeld
- Werden die Kennlinien gemeinsam dargestellt spricht man auch vom Vierquadrantenkennlinienfeld.

Kennlinienfelder: Ausgang

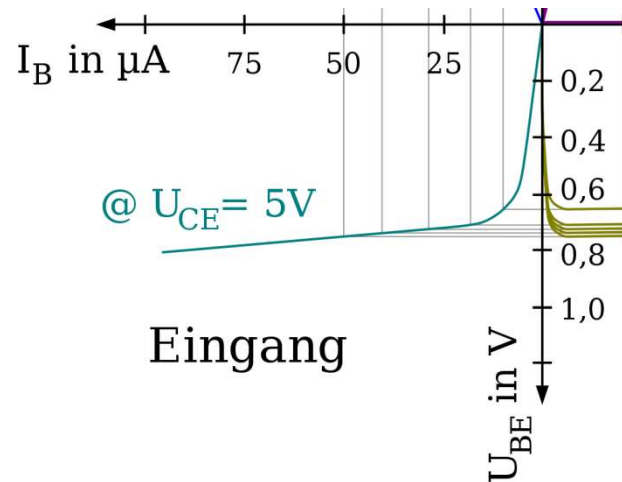
- Das Ausgangskennlinienfeld stellt die Abhängigkeit des Kollektorstroms I_C von der Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} bei ausgewählten Basissteuerströmen I_B dar.

$$I_C = f(U_{CE})$$



Kennlinienfelder: Eingang

- Beim Eingangskennlinienfeld wird der Basisstrom I_B gegen die Basisspannung U_{BE} aufgetragen.
Da es sich hierbei nur um den Basis-Emitter pn-Übergang handelt, entspricht die Kennlinie der einer pn-Diode.

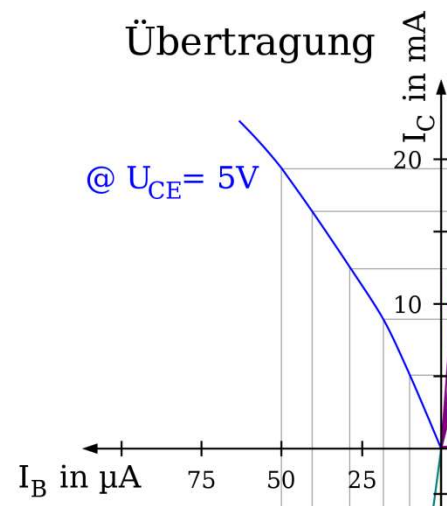


$$I_B = f(U_{BE})$$

Kennlinienfelder: Übertragung

- Beim Stromsteuer- oder Übertragungskennlinienfeld bzw. bei der Stromsteuerkennlinie wird die Abhängigkeit des Kollektorstroms I_C vom ansteuernden Basisstrom I_B bei konstanter Kollektor-Emitterspannung U_{CE} dargestellt.

In der Regel hat sie den Verlauf einer Geraden (annähernd linear) durch den Ursprung, wobei die Steigung dem Stromverstärkungsfaktor β entspricht.

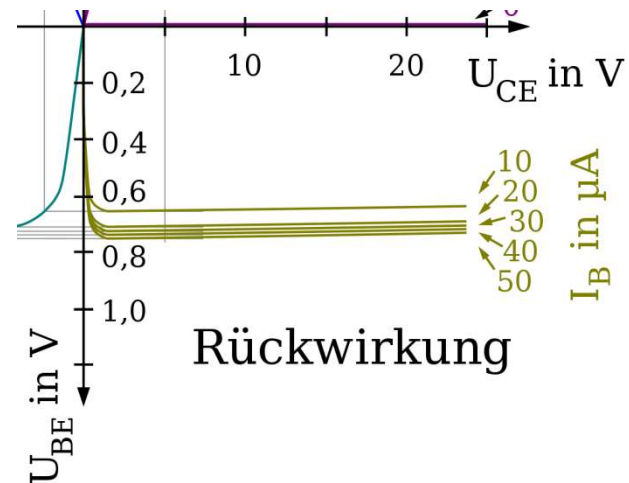


$$I_C = f(I_B)$$

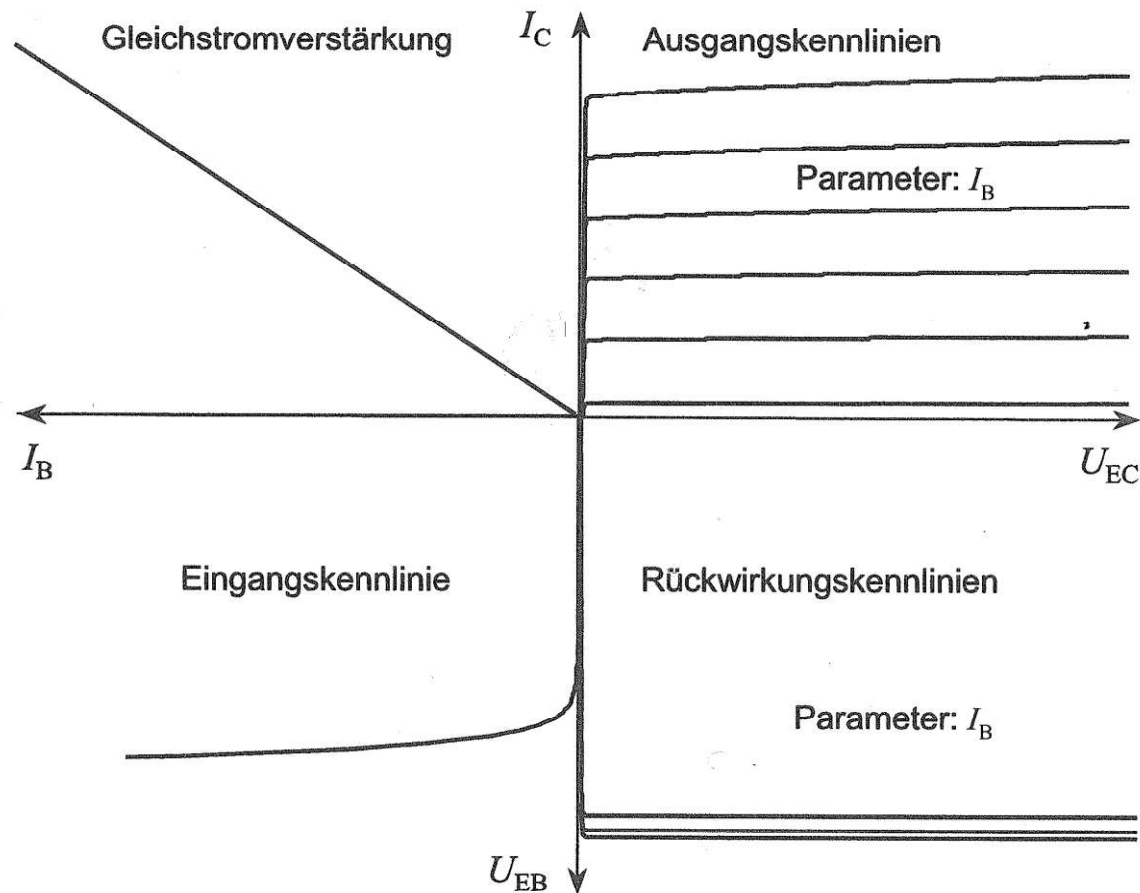
Kennlinienfelder: Rückwirkung

- Das Spannungsrückwirkungskennlinienfeld (auch Rückwirkungskennlinienfeld genannt) stellt die Rückwirkung der Ausgangsspannung U_{CE} auf den Eingang (Basis bzw. Basisspannung U_{BE}) dar.

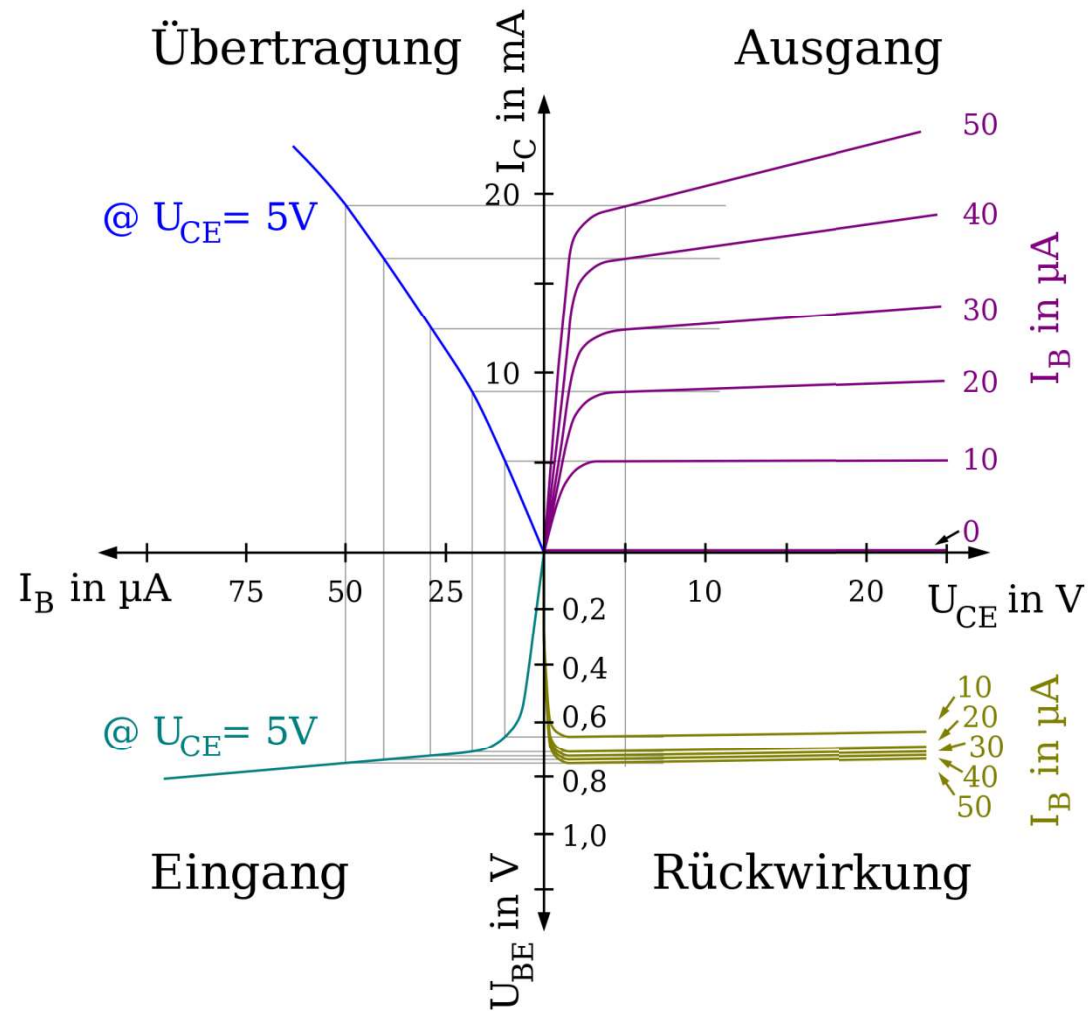
$$U_{BE} = f(U_{CE})$$



Vierquadranten-Darstellung (idealisiert)



Vierquadranten-Darstellung



Betriebsmöglichkeiten

- Der Bipolartransistor besteht aus zwei pn-Übergängen.
- Indem man entsprechende Spannungen anlegt, kann man beide Übergänge unabhängig voneinander sperren oder durchschalten.
- Dadurch ergeben sich vier mögliche Arbeitsbereiche, in denen der Transistor je ein eigenes Verhalten zeigt.

Betriebsart	Spannungspolarität	
	EB-Übergang	CB-Übergang
Sättigung	Fluss	Fluss
Aktiv (Normal)	Fluss	Sperr
Invertiert	Sperr	Fluss
Sperrbetrieb	Sperr	Sperr

Arbeitsbereiche

- **Sperrbereich (*cut-off region*) oder Sperrbetrieb**
beide Übergänge sperren
theoretisch leitet der Transistor keinen Strom und entspricht damit einem geöffneten Schalter
praktisch fließt auch im Sperrbetrieb ein geringer Strom
→ nichtidealer Schalter
- **Verstärkungsbereich oder Normalbetrieb**
Emitterdiode in Flussrichtung und Kollektordiode in Sperrrichtung
näherungsweise gilt $I_C = \beta I_B$
 β ist relativ groß → kleine Änderungen von I_B führen zu großen Änderungen von I_C
→ Signalverstärkung
Im Normalbetrieb wird der Transistor üblicherweise nur in dem Bereich betrieben, in dem die Verstärkung näherungsweise linear verläuft.

- **Sättigungsbereich oder Sättigungsbetrieb**
Beide pn-Übergänge leiten, in der Basis befinden sich jedoch mehr Ladungsträger als für den Kollektorstrom benötigt werden.
Der Kollektorstrom I_C ist unabhängig vom Basisstrom I_B .
→ geschlossener Schalter mit konstantem Durchgangswiderstand
- **inverser Verstärkungsbereich (*reverse region*) oder Inversbetrieb**
BC-Übergang in Durchlassrichtung und BE-Übergang in Sperrrichtung
funktioniert ähnlich wie der normale Verstärkungsbereich, jedoch mit umgekehrten Vorzeichen der Spannungen
Der Stromverstärkungsfaktor ist deutlich kleiner.
Die maximale Sperrspannung der Basis-Emitterdiode beträgt nur einige Volt.

- analoge Signaltechnik
Transistoren, die im linearen Verstärkungsbereich arbeiten
- ältere Digitalelektronik und Schaltanwendungen
fast ausschließlich im Sperr- und im Sättigungsbereich
- Für diese beiden grundsätzlich unterschiedlichen Betriebsarten werden auch die Bezeichnungen **Linearbetrieb** (Betrieb nur im Verstärkungsbereich) und **Schaltbetrieb** (Betrieb nur im Sperr- und Sättigungsbereich) verwendet.
- Schnelle moderne Digitalschaltungen
arbeiten ebenfalls im linearen Bereich um die Verzögerungen durch die Sättigung zu vermeiden.
Alternativ werden heute bei Schaltanwendungen häufig Feldeffekttransistoren eingesetzt.
Sie weisen keine Sättigungserscheinungen durch überschüssige Ladungsträger und somit keine Sperrverzögerungen auf.

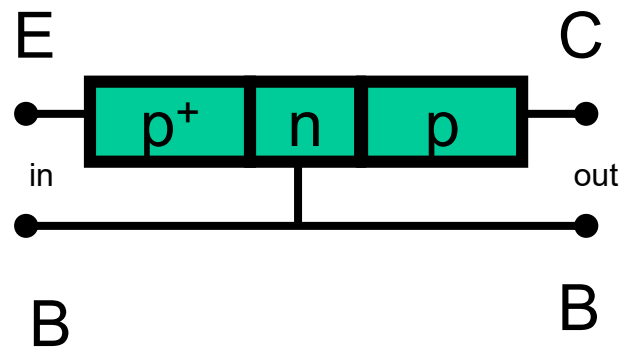
Eingangssignal: 2 Anschlüsse des Bipolartransistors

Ausgangssignal: 2 Anschlüsse des Bipolartransistors

Transistor hat nur 3 Anschlüsse:

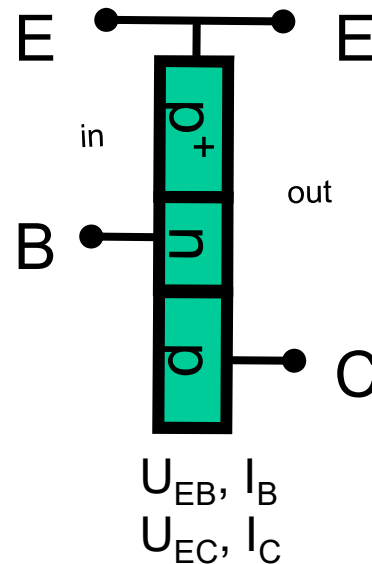
→ ein Anschluss wird gemeinsam genutzt

Basisschaltung

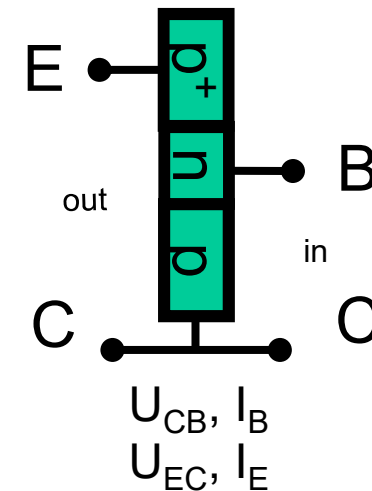


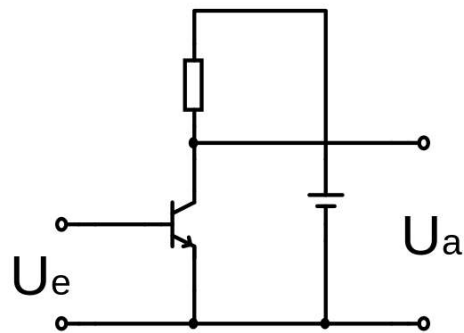
Eingangsgrößen: U_{EB} , I_E
Ausgangsgrößen: U_{CB} , I_C

Emitterschaltung

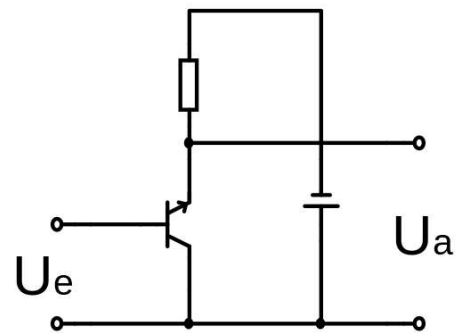


Kollektorschaltung

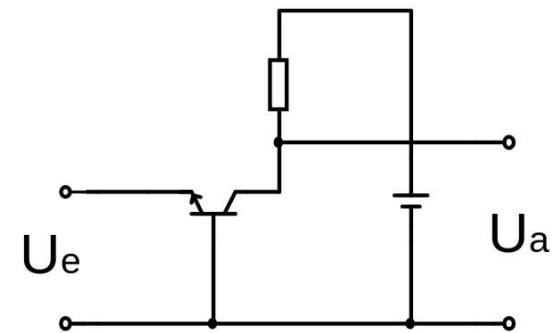




Emitterschaltung



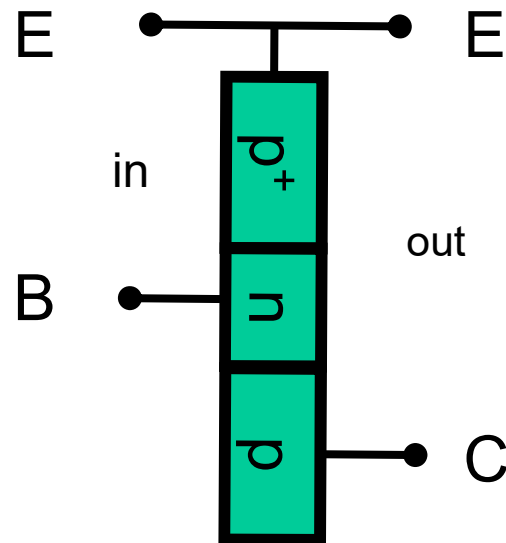
Kollektorschaltung



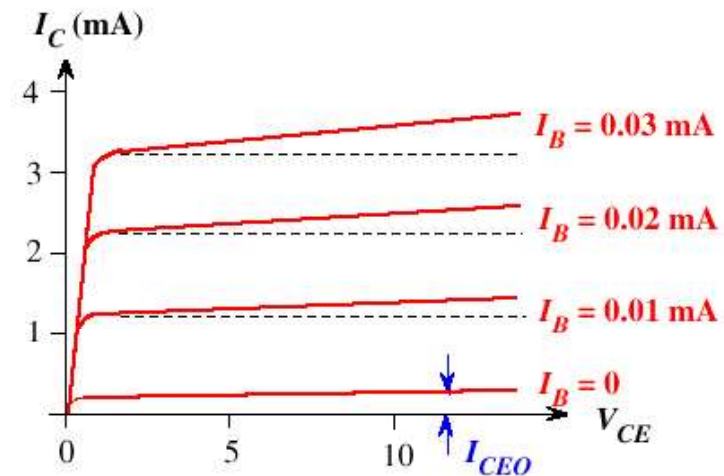
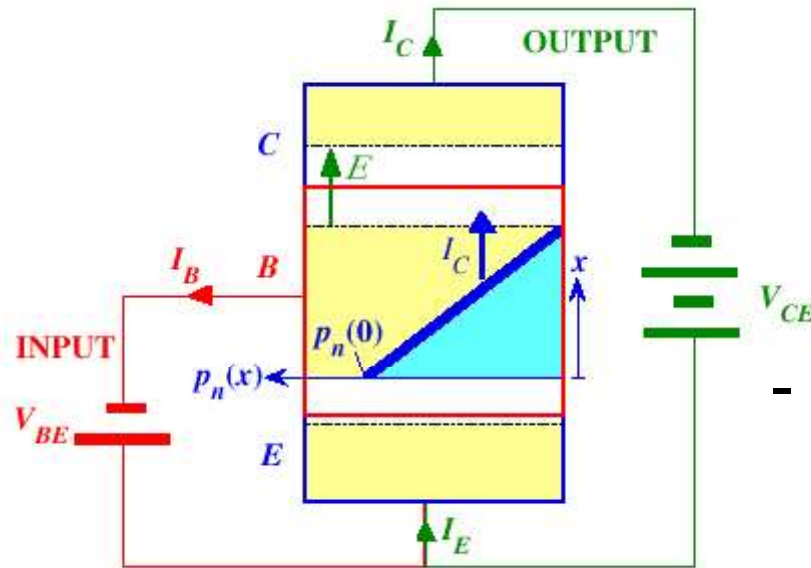
Basisschaltung

U_e : Eingangsspannung

U_a : Ausgangsspannung



Eingangsgrößen: U_{EB}, I_B
 Ausgangsgrößen: U_{EC}, I_C



- Sättigung tritt rechts von der Achse auf
- I_C kann deutlich ansteigen, wenn U_{CE} vergrößert wird:
Basisweitenmodulation (Early-Effekt)

➔ **Stromverstärkung**

- **Eigenschaften**

Stromverstärkung hoch

Spannungsverstärkung hoch

Leistungsverstärkung etwa

Spannungsverstärkung \times Stromverstärkung

**verzerrungsarme Verstärkung nur für sehr kleine
Eingangsspannungen**

- **Anwendungen**

Kleinsignal-Verstärkern und elektronischen Schaltern

Eine Emitterschaltung mit nachfolgender

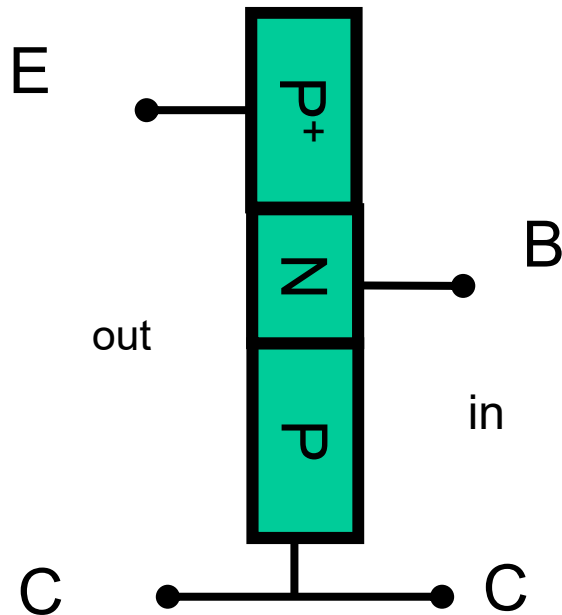
Basisschaltung ergibt einen Verstärker, bei dem der

Eingangswiderstand niedrig und der

Ausgangswiderstand sehr hoch ist

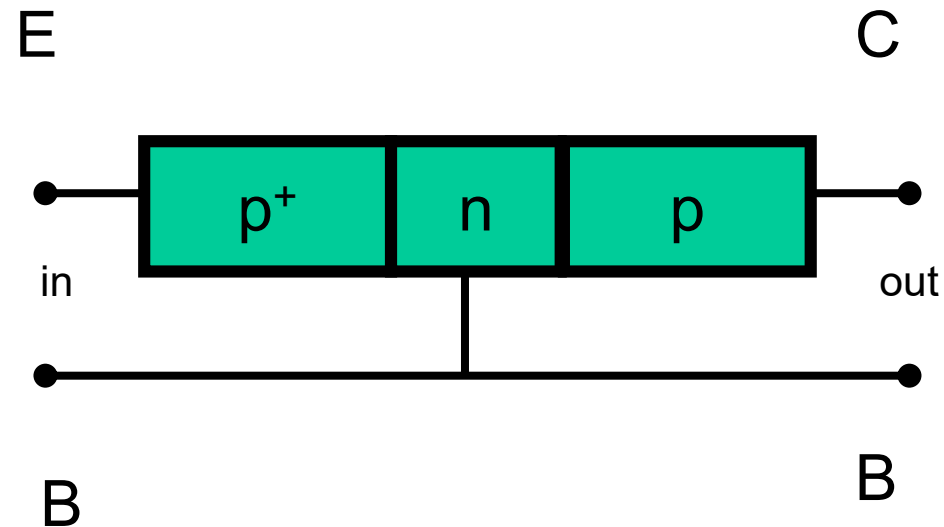
→ nur für spezielle HF-Anwendungen geeignet

Kollektorschaltung



Eingangsgrößen: U_{CB}, I_B
 Ausgangsgrößen: U_{EC}, I_E

- **Eigenschaften**
 - Spannungsverstärkung nahezu 1**
 - Stromverstärkung hoch**
 - Leistungsverstärkung nahezu gleich der Stromverstärkung**
 - verzerrungsfreie Übertragung für Eingangsspannungen bis zur Versorgungsspannung**
- **Einsatzgebiete**
 - Impedanzwandler, z. B. für Kristall-Tonabnehmer und Piezo-Schallaufnehmer, in Kondensator- und Elektret-Mikrofonen**
 - als Vorstufe der Darlington-Schaltung und vieler Audioverstärker-Endstufen**

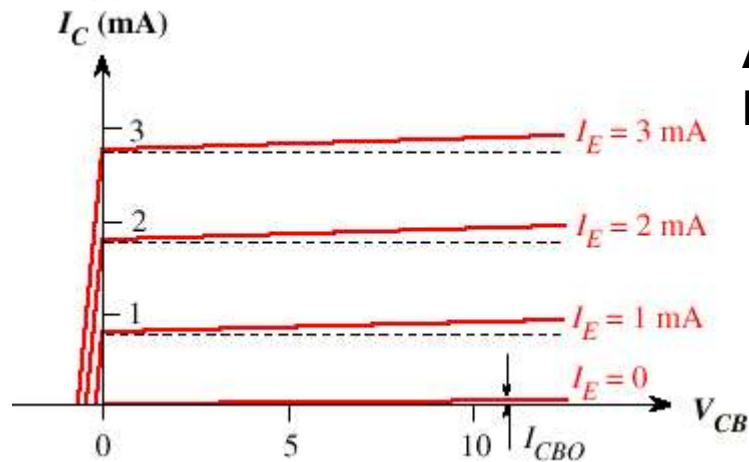


Eingangsgrößen: U_{EB}, I_E
 Ausgangsgrößen: U_{CB}, I_C



MBE

Basisschaltung

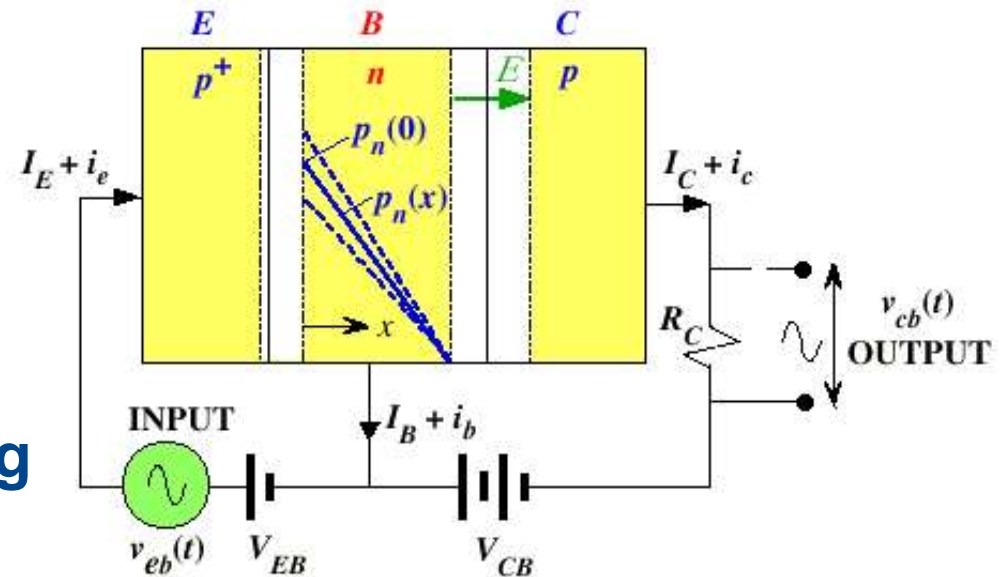


Anstieg von I_C mit V_{CB} ist vernachlässigbar
 I_C fällt erst links von der Achse auf 0

Verstärkungsfaktor: $A_v = R_C / r_e$

r_e - Kleinsignaleingangswiderstand

➔ Leistungsverstärkung

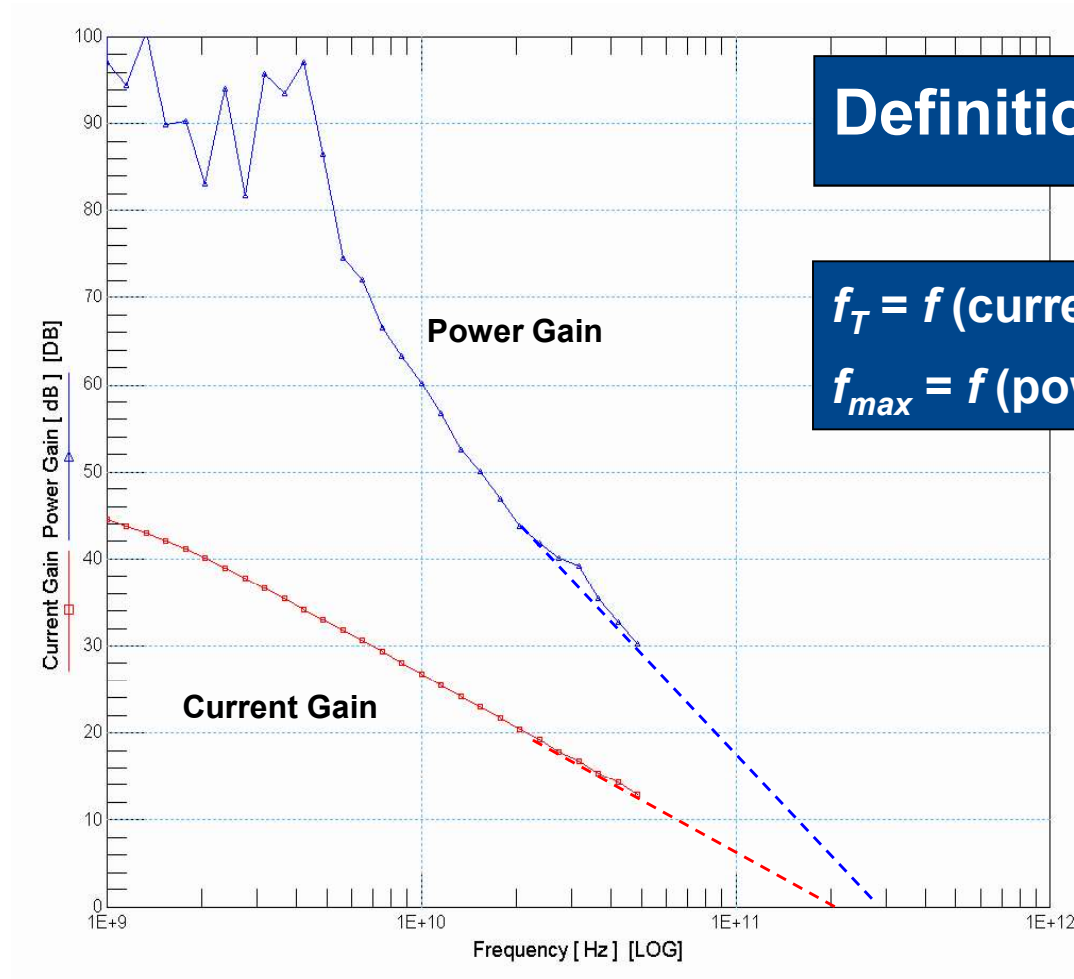


- **Basisschaltung**
 - Stromverstärkung geringfügig unter 1**
 - Spannungsverstärkung hoch**
 - Leistungsverstärkung \sim Spannungsverstärkung**
 - höhere Grenzfrequenz durch geringere Rückwirkung**
 - verzerrungsfreie Verstärkung für Eingangsspannungen bis zu einem Zehntel der Versorgungsspannung**
- **Anwendungen**
 - HF-Stufen**
 - HF-Oszillatoren**

Widerstände bei den Grundsaltungen

Schaltungsart	Eingangs- widerstand	Ausgangs- widerstand	Grenz- frequenzen
Emitter- schaltung	mittel	hoch	niedrig
Kollektor- schaltung	hoch	niedrig	mittel
Basis- schaltung	niedrig	hoch	hoch

Charakteristische Frequenzen



Definition

$f_T = f$ (current gain = 0 dB)

$f_{max} = f$ (power gain = 0 dB)

Charakteristische Frequenzen

- **Transitfrequenz f_T**
Frequenz, bei der die Stromverstärkung des Transistors den Wert eins hat ($\beta = 1$)
(wird auch als Cutoff-Frequenz bezeichnet)

$$f_T = \frac{1}{2\pi\tau_{EC}} \quad \tau_{EC} - \text{Gesamtlaufzeit vom Emitter zum Kollektor}$$

$$\tau_{EC} = \tau_E + \tau_{EB} + \tau_B + \tau_{BC} + \tau_C$$

→ f_T wird wesentlich durch die Basislaufzeit bestimmt

- **Maximale Schwingfrequenz f_{\max}**
Frequenz, bei der die Leistungsverstärkung des Transistors auf den Wert eins abgefallen ist

Zusammenhang zwischen f_T und f_{max}

$$f_{max} = \sqrt{\frac{f_T}{8\pi R_B C_{BC}}}$$

- eine hohe maximale Schwingfrequenz wird erreicht durch:

eine hohe Transitfrequenz f_T

einen kleinen Basiswiderstand R_B

eine kleine Basis-Kollektor-Kapazität C_{BC}

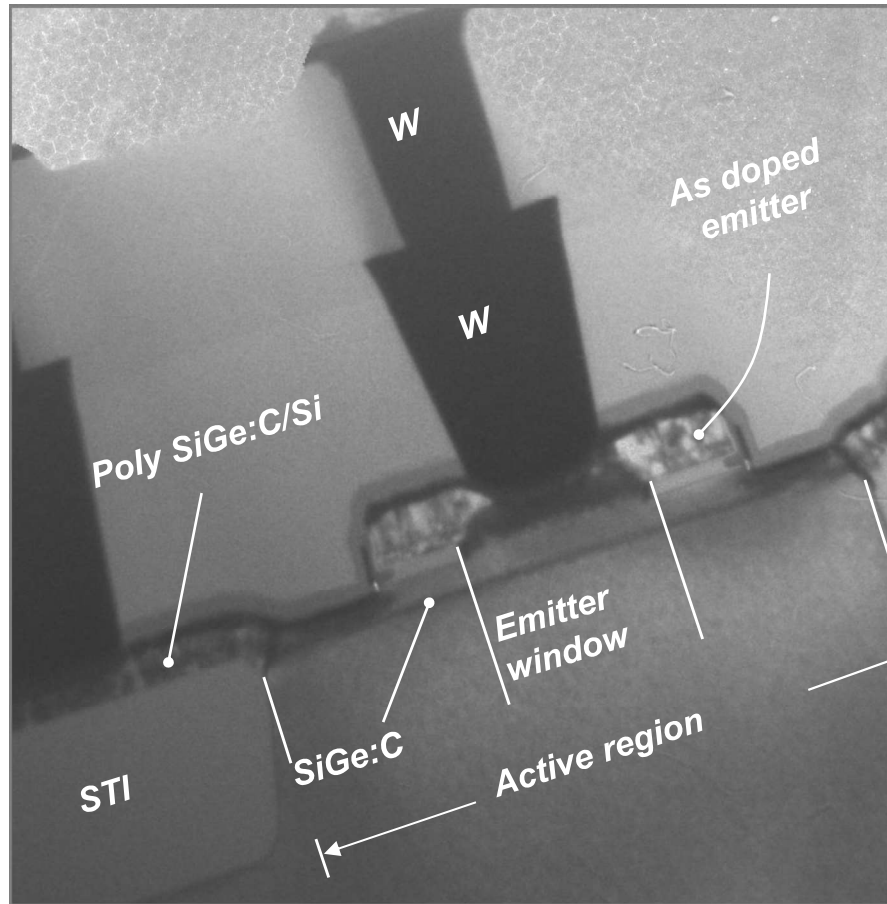
Grenzfrequenzen für Si Bipolar Transistoren

- Die Grenzfrequenzen für Si BJTs sind < 50 GHz.
Achtung: Ein Transistor wird in einer Schaltung deutlich unterhalb der Grenzfrequenzen betrieben!
- Die Ladungsträgerbeweglichkeit von Elektronen ist höher als die der Löcher.
 - ➔ Basislaufzeiten in npn-Transistoren sind kürzer als in pnp-Transistoren.
 - ➔ npn-Transistoren haben somit bei gleicher Basisdicke höhere Grenzfrequenzen.

Heterojunction Bipolartransistor

- HBT -

Heterojunction Bipolartransistor (HBT)



**TEM-Querschnitts-
aufnahme eines HBTs
mit SiGe:C-Basis**



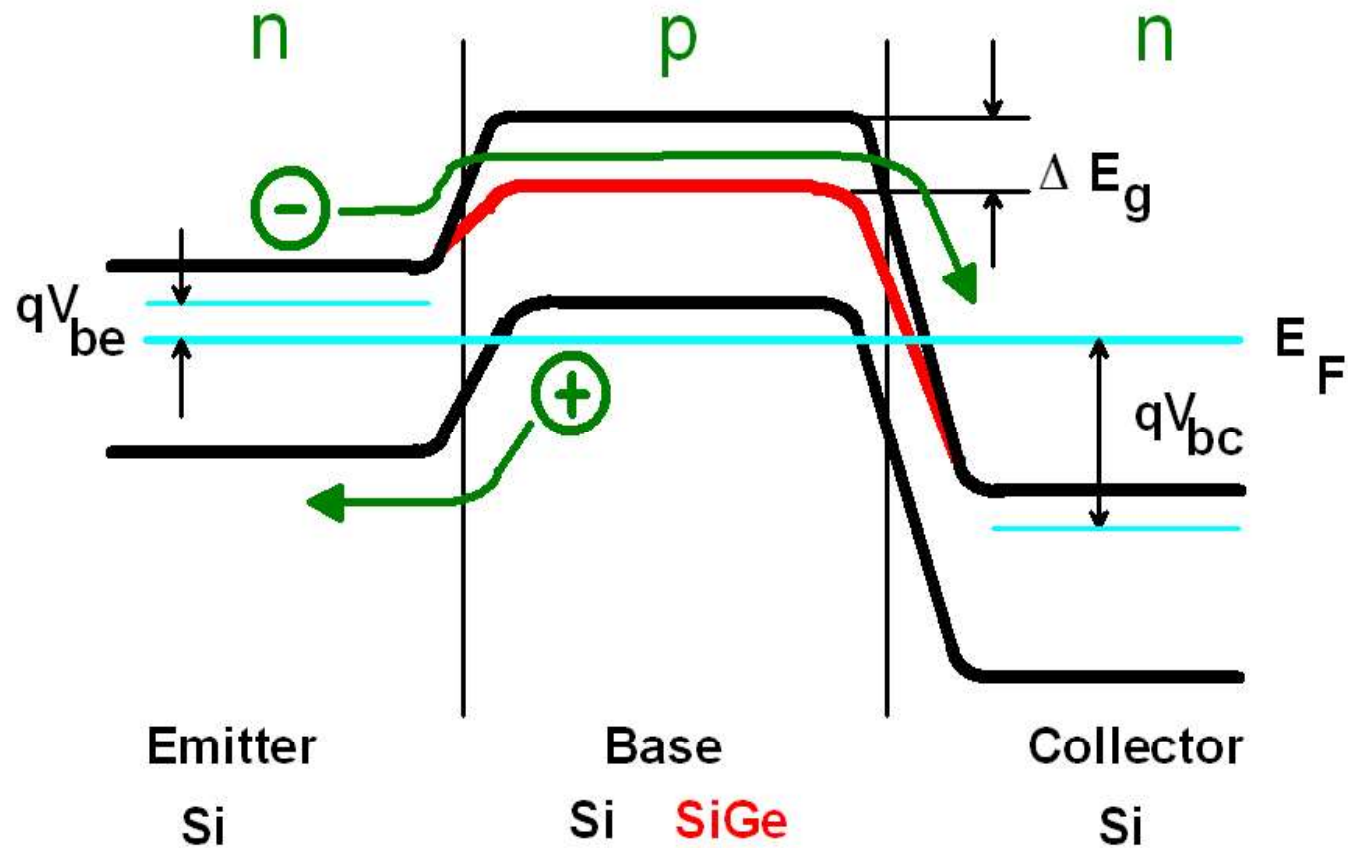


- ➔ $f_T/f_{\max} > 500 \text{ GHz}$
- ➔ *verschiedene Schaltungen* $> 70 \text{ GHz}$
- ➔ realisiert auf Silizium!!

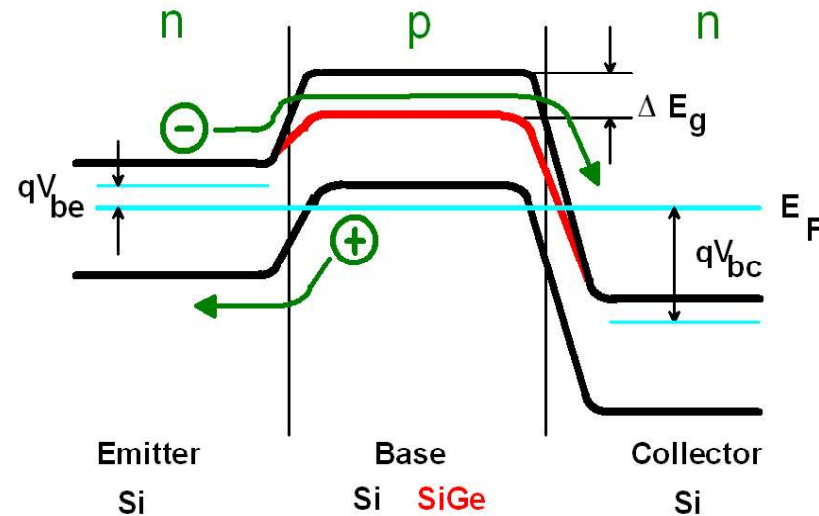
Heterojunction Bipolar Transistor

- Heterojunction Bipolar Transistor (HBT bzw. HJBT)
dt. “Bipolartransistor mit Heteroübergang“
- ein Bipolartransistor (BJT), dessen Emittermaterial anders als das der Basis gewählt ist
→ Heterostruktur
- Emittermaterial mit einer größeren Bandlücke als die des Basismaterials
 - sehr geringe Löcherinjektion aus der Basis
 - hohe p-Dotierung der Basis möglich
 - große Elektronbeweglichkeit in der Basis
 - sehr schnelles Schalten des Transistors

Vorteile eines npn-HBTs mit SiGe-Basis

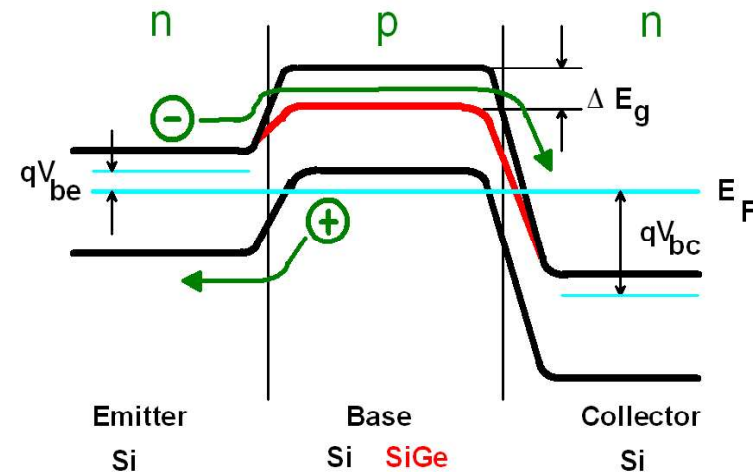


Vorteile eines npn-HBTs mit SiGe-Basis



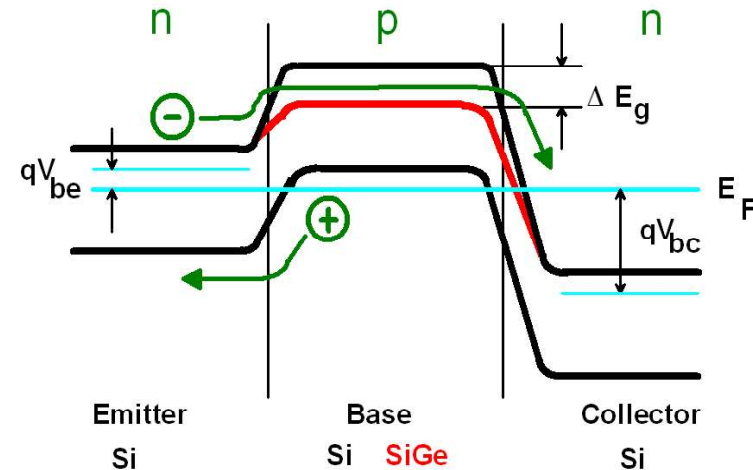
- In einem SiGe/Si-HBT bestehen das Kollektor- und das Emittergebiet aus Siliziumschichten.
- Das Basisgebiet wird durch eine SiGe-Schicht gebildet, die eine kleinere Bandlücke E_g als Si besitzt.

Vorteile eines npn-HBTs mit SiGe-Basis



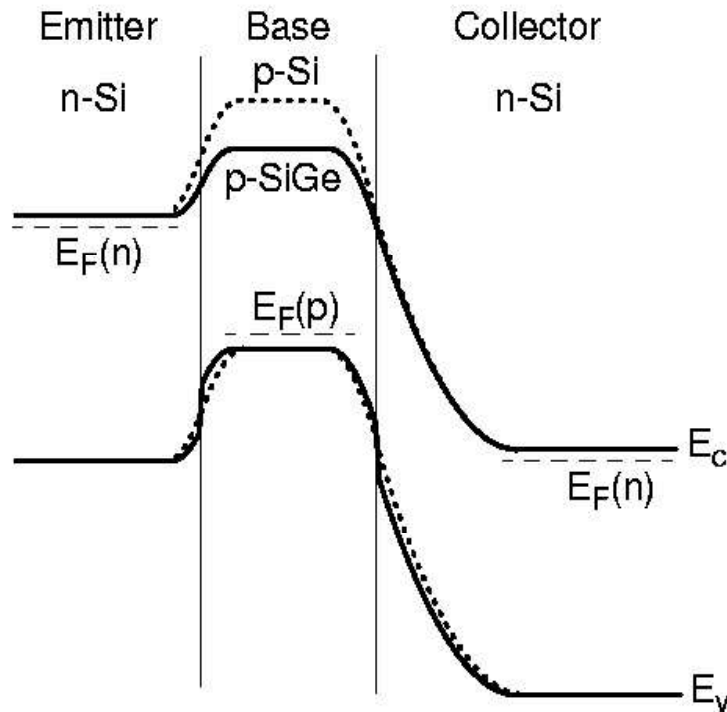
- die kleine Bandlücke der SiGe-Basis führt zu einem geringeren Energieniveau ihrer Leitungsbandkante im Vergleich zur Silizium-Basis
 - kleinere Leitungsbandbarriere für die aus dem Emitter injizierten Elektronen
 - Elektroneninjektion vom Emitter in die Basis wird erhöht
 - Anstieg des Kollektorstroms I_C

Vorteile eines npn-HBTs mit SiGe-Basis



- die kleine Bandlücke der SiGe-Basis führt zu einem geringeren Energieniveau ihrer Leitungsbandkante im Vergleich zur Silizium-Basis
 - Barriere für die Löcher aus der Basis bleibt unverändert
 - keine Veränderung des Basisstroms I_B
 - Erhöhung der Stromverstärkung

npn HBT und Si Bipolartransistor (BJT)

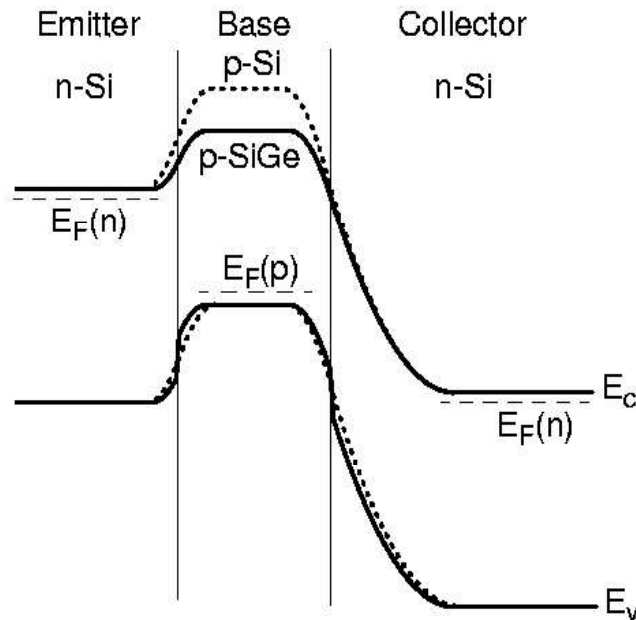


$$I_B(HBT) = I_B(BJT)$$

$$\frac{I_C(HBT)}{I_C(BJT)} = \frac{n_i^2(HBT)}{n_i^2(BJT)} \frac{\int p_{BJT}(y) dy}{\int p_{HBT}(y) dy}$$

$$\frac{n_i^2(HBT)}{n_i^2(BJT)} = \frac{(N_{LB}N_{VB})_{HBT}}{(N_{LB}N_{VB})_{BJT}} \exp\left[\frac{E_g(Si) - E_g(SiGe)}{kT}\right]$$

Beispiel: SiGe-Basis mit 20 % Germanium



$$\Delta E_{LB} = 150 \text{ meV}$$

(verspanntes SiGe mit 20 %)

Annahme: gleiche Dotierung

$$\rightarrow \frac{n_i^2(HBT)}{n_i^2(BJT)} = 130 \text{ bei } 300\text{K}$$

$$\beta_{HBT} = 130 \beta_{BJT}$$

$E_g(\text{Basis}) < E_g(\text{Emitter}) \rightarrow$ bessere Stromverstärkung

Vergleich HBT und BJT (z.B. SiGe mit 20% Ge)

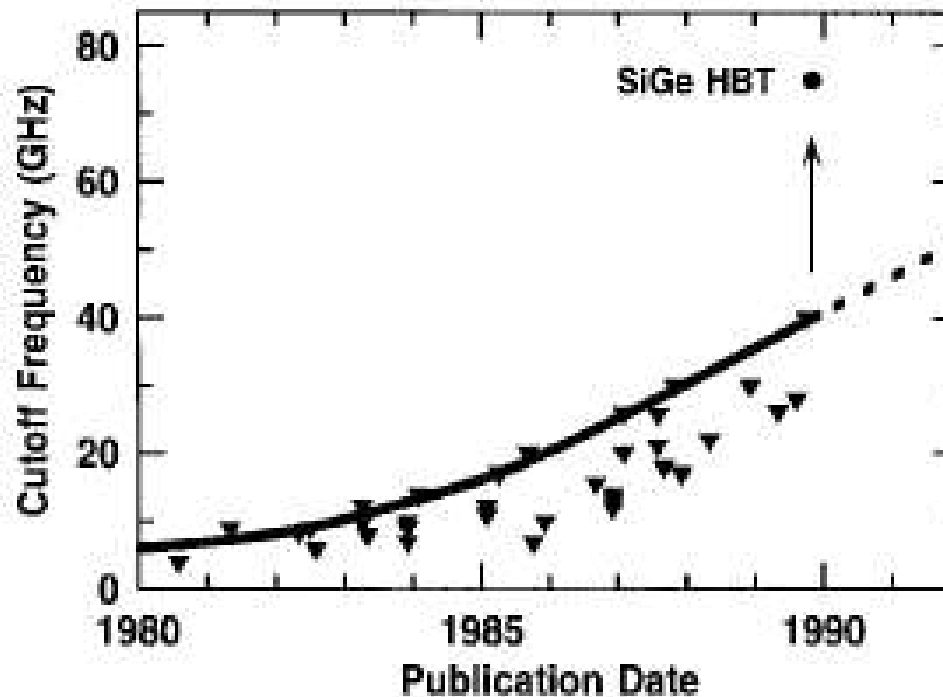
- Ein HBT hätte bei gleicher Löcherkonzentration die 130-fache Stromverstärkung eines Silizium-Bipolar-Transistors.
- Für die Anwendung ist aber noch wesentlicher, dass die Löcherkonzentration in der Basis um den Faktor 130 erhöht werden kann, ohne die Stromverstärkung gegenüber dem BJT zu reduzieren.
- Eine Erhöhung der Löcherkonzentration in der Basis hat eine Reduzierung ihres Schichtwiderstandes zur Folge.

➔ **deutlich besseres dynamisches Verhalten**

Vergleich HBT und BJT

- HBT: Bandlücke des Emittermaterials sollte größer sein als die der Basisschicht
 - Höherer Kollektorstrom
→ bessere Stromverstärkung
 - Löcherkonzentration in der Basis kann erhöht werden, ohne die Stromverstärkung zu reduzieren
→ niedrigerer Basiswiderstand
- höhere Geschwindigkeit

Erste Forschungsergebnisse



Erstmalig in ITRS Roadmap berücksichtigt: 1997

Zusammenhang zwischen f_T und f_{\max}

$$f_{\max} = \sqrt{\frac{f_T}{8\pi R_B C_{BC}}}$$

- eine hohe maximale Schwingfrequenz wird erreicht durch:

eine hohe Transitfrequenz f_T

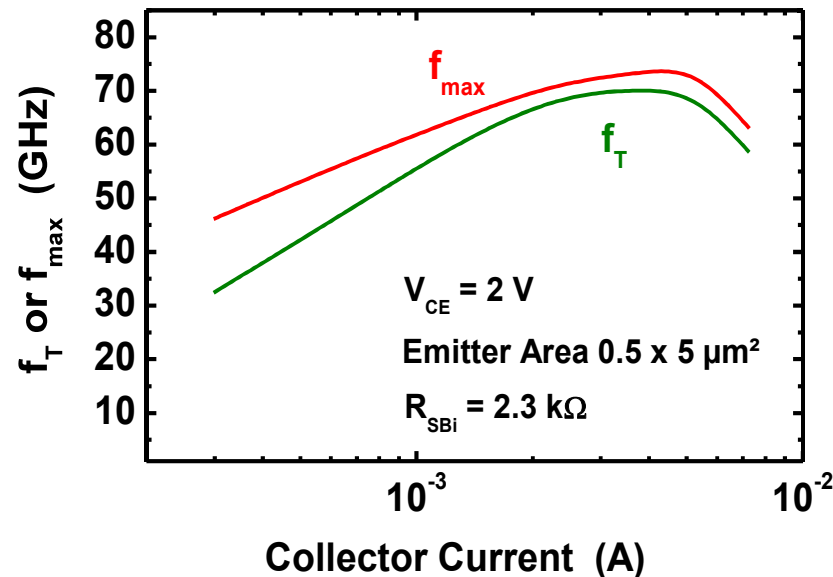
einen kleinen Basiswiderstand R_B

eine kleine Basis-Kollektor-Kapazität C_{BC}

- ➔ HBT: viel höhere Löcherkonzentration in der HBT-Basis
- ➔ deutlich geringerer Basiswiderstand R_B möglich
- ➔ HBT: höhere f_{\max} -Werte möglich

SiGe:C Heterojunction Bipolar Transistor

→ Weltweit erster einfacher HBT mit $f_T/f_{\max} > 50$ GHz



Ring Oscillator Delay

CML-type, FI/FO = 1

25 HBTs, $0.9 \times 1.3 \mu\text{m}^2$

$t_d \pm \sigma =$
 (12.9 ± 0.2) ps

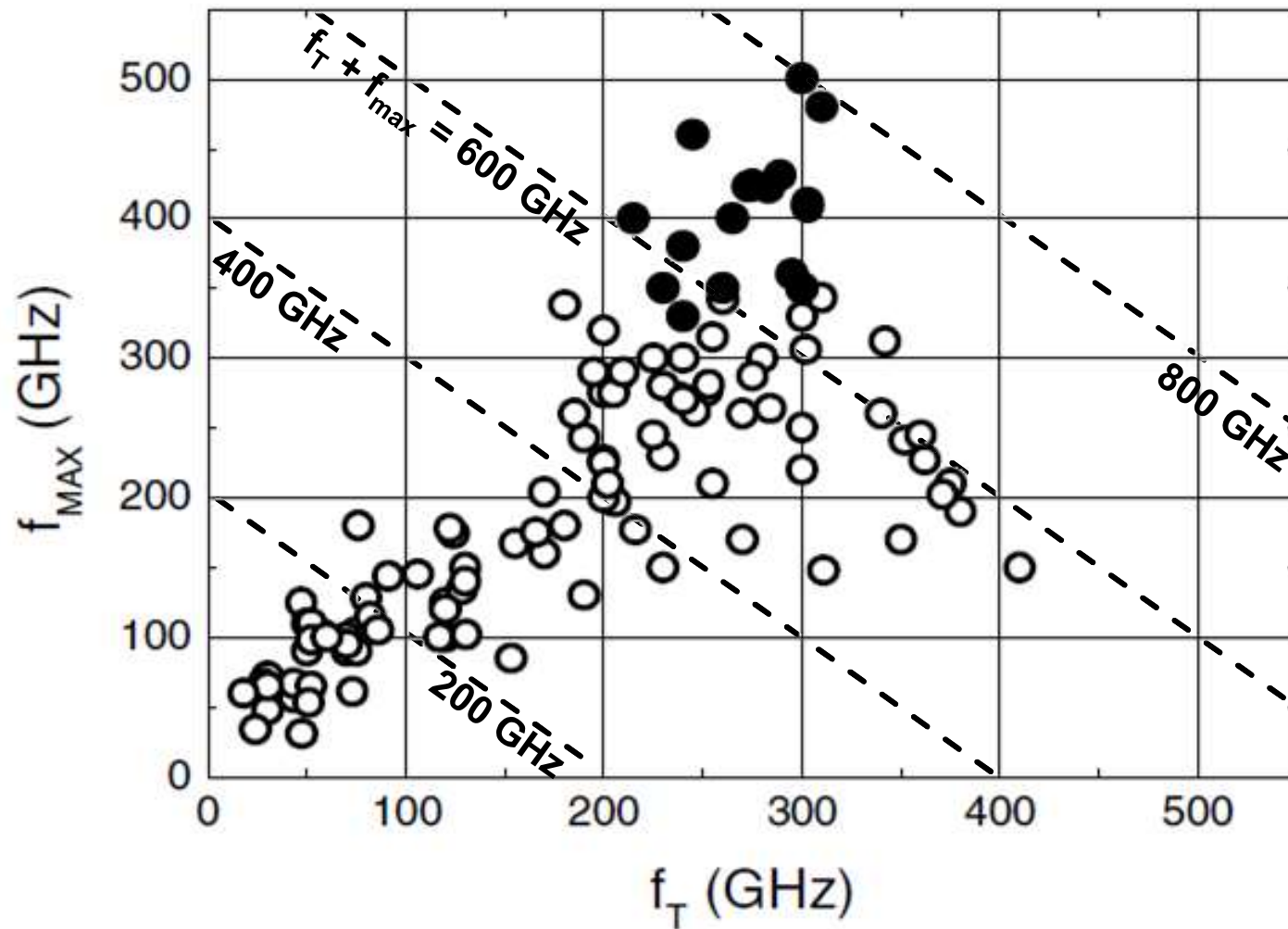
best value: **12.6 ps**

H.J. Osten, G. Lippert, B. Heinemann, R. Barth, H. Rücker, P. Schley:

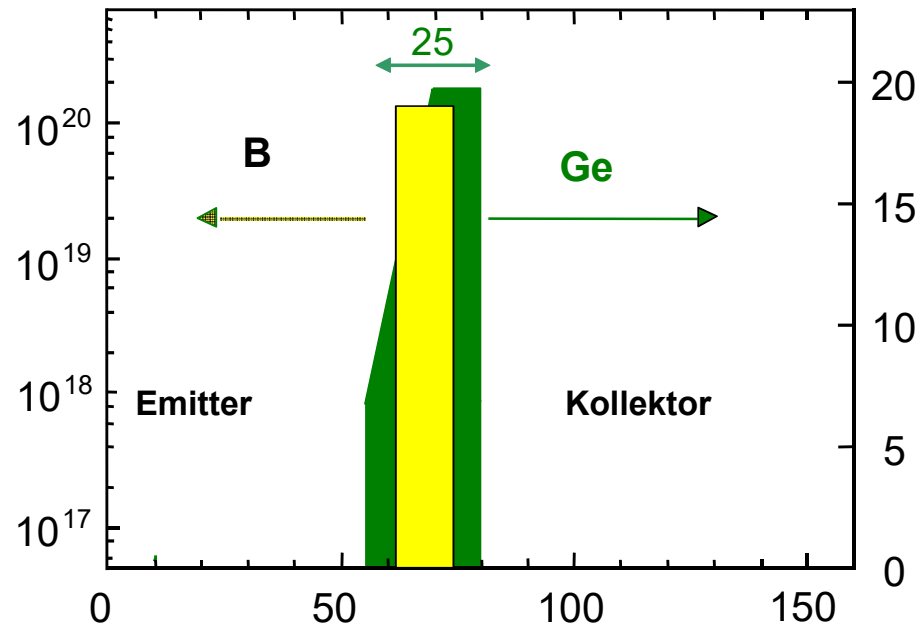
The effect of carbon incorporation on SiGe HBT performance and process margins

International Electron Device Meeting (IEDM), Washington DC, Dec. 97

SiGe und SiGe:C HBT-Entwicklung seit 1998



Quelle: www.dotfive.eu

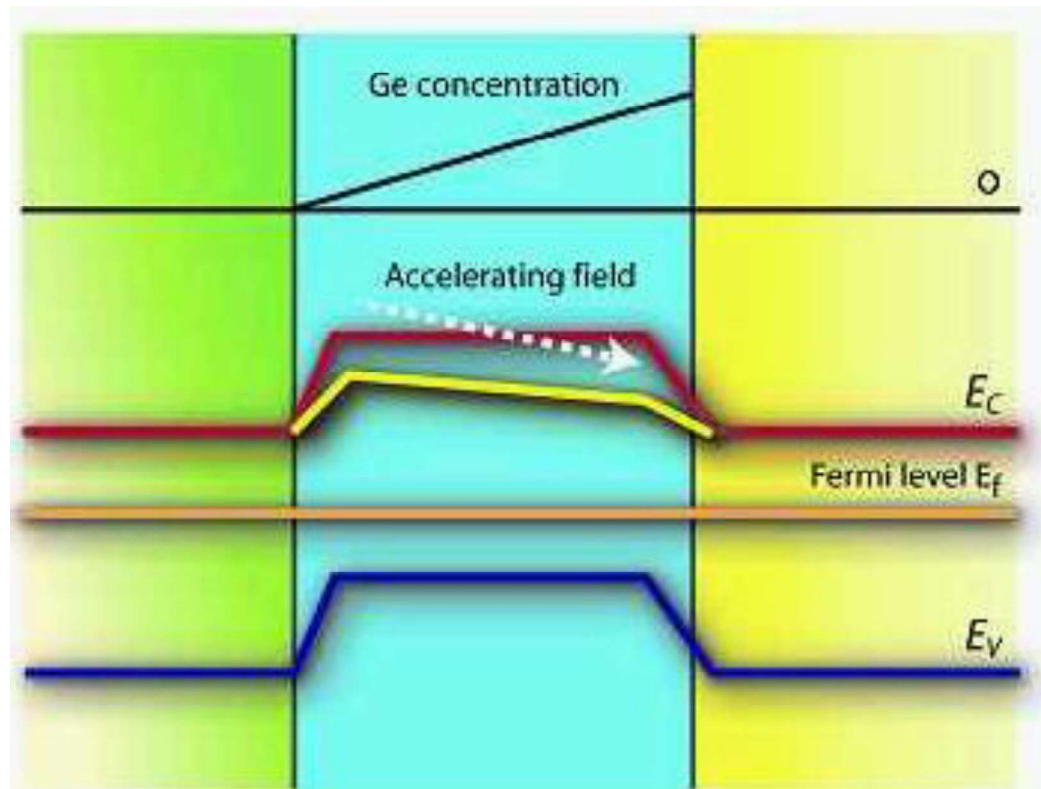


SiGe Basis
B Dosis: $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$
--> $R_{\text{SBI}}: (3.5-4.5) \text{ k}\Omega$

sehr dünne SiGe Basisschicht mit hoher B-Dotierung

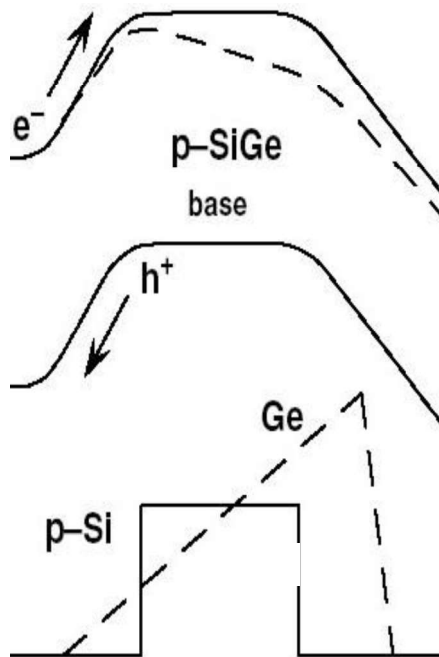
→ graduierte Ge-Konzentration

Weitere Modifikationen: Driftfeld SiGe-HBT



Konsequenzen:

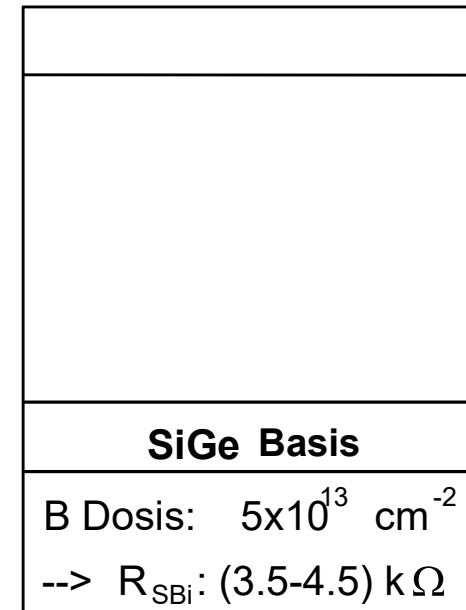
- geringere Bandlücke der Basis erhöht die Elektroneninjektion ($\beta \uparrow$)
- Gradierung \rightarrow Feld \rightarrow Elektronenbeschleunigung ($f_T \uparrow$)
- Gradierung \rightarrow höhere Early-Spannung ($V_A \uparrow$)



$$\left. \frac{\beta_{SiGe}}{\beta_{Si}} \right|_{V_{BE}} \equiv \Xi = \left\{ \frac{\tilde{\gamma} \tilde{\eta} \Delta E_{g,Ge}(grade)/kT e^{\Delta E_{g,Ge}(0)/kT}}{1 - e^{-\Delta E_{g,Ge}(grade)/kT}} \right\}$$

$$\frac{\tau_{b,SiGe}}{\tau_{b,Si}} = \frac{2}{\tilde{\eta}} \frac{kT}{\Delta E_{g,Ge}(grade)} \left\{ 1 - \frac{kT}{\Delta E_{g,Ge}(grade)} \left[1 - e^{-\Delta E_{g,Ge}(grade)/kT} \right] \right\}$$

$$\left. \frac{V_{A,SiGe}}{V_{A,Si}} \right|_{V_{BE}} \equiv \Theta \simeq e^{\Delta E_{g,Ge}(grade)/kT} \left[\frac{1 - e^{-\Delta E_{g,Ge}(grade)/kT}}{\Delta E_{g,Ge}(grade)/kT} \right]$$



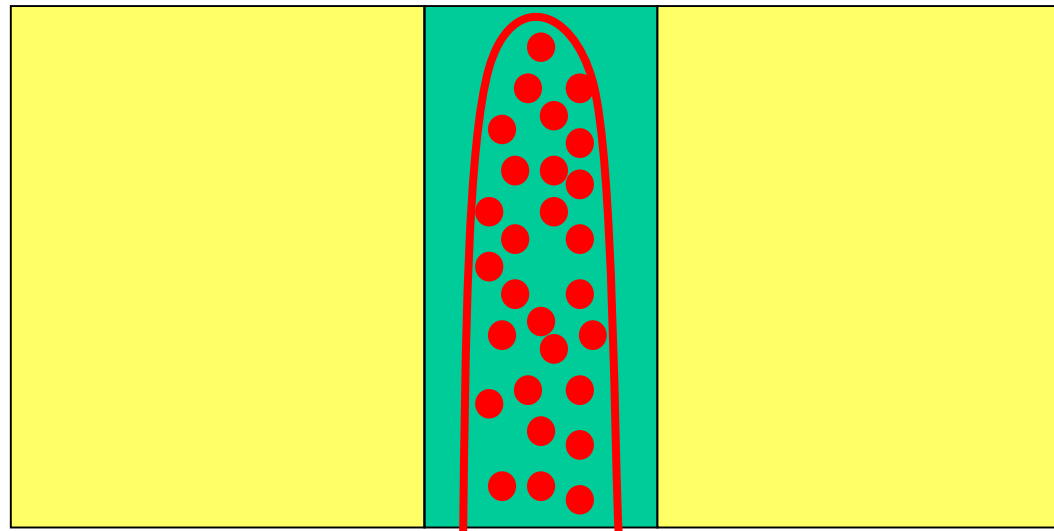
→ Problem: Boratome sollten in der Basis bleiben

Temperaturbelastung

Emitter (Si)

Basis (SiGe)

Kollektor (Si)



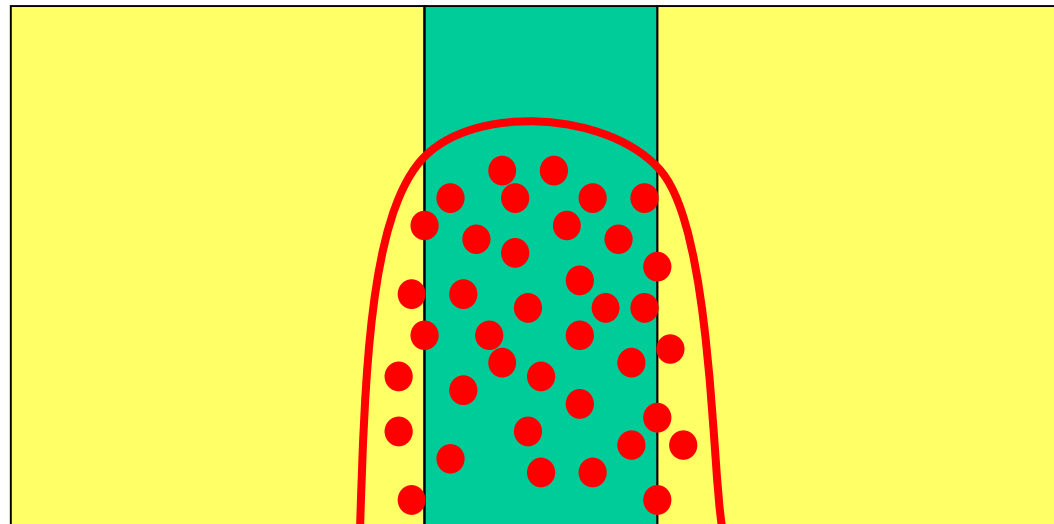
Bor-Dotierung

Temperaturbelastung

Emitter (Si)

Basis (SiGe)

Kollektor (Si)

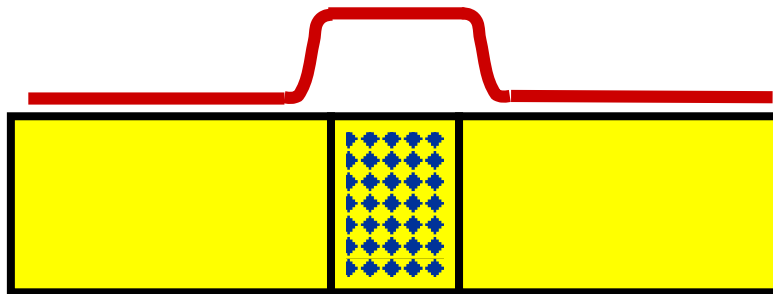


**Bor-Dotierung
(diffundiert)**

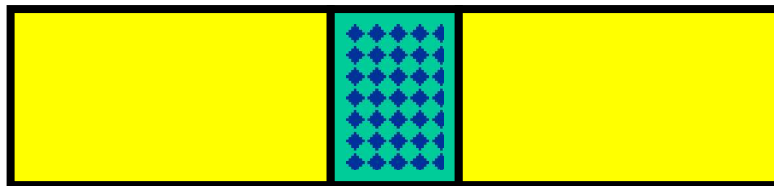


Borausdiffusion: Das Problem

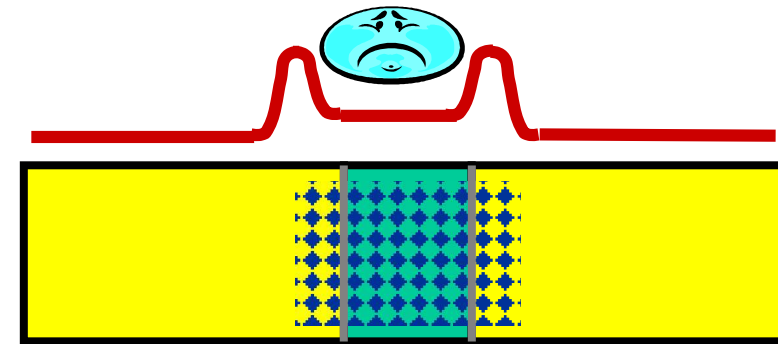
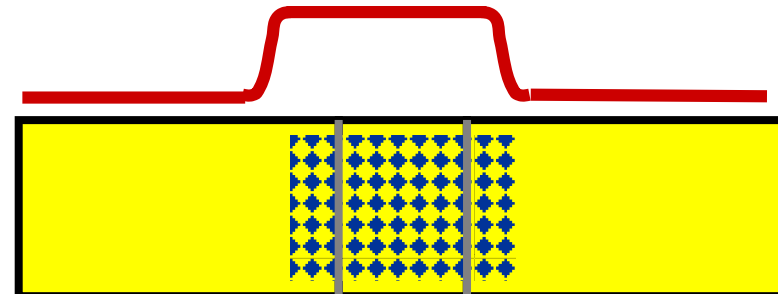
Leitungsband für stark p-dotierte Si- bzw. SiGe-Basissschichten (Schema)

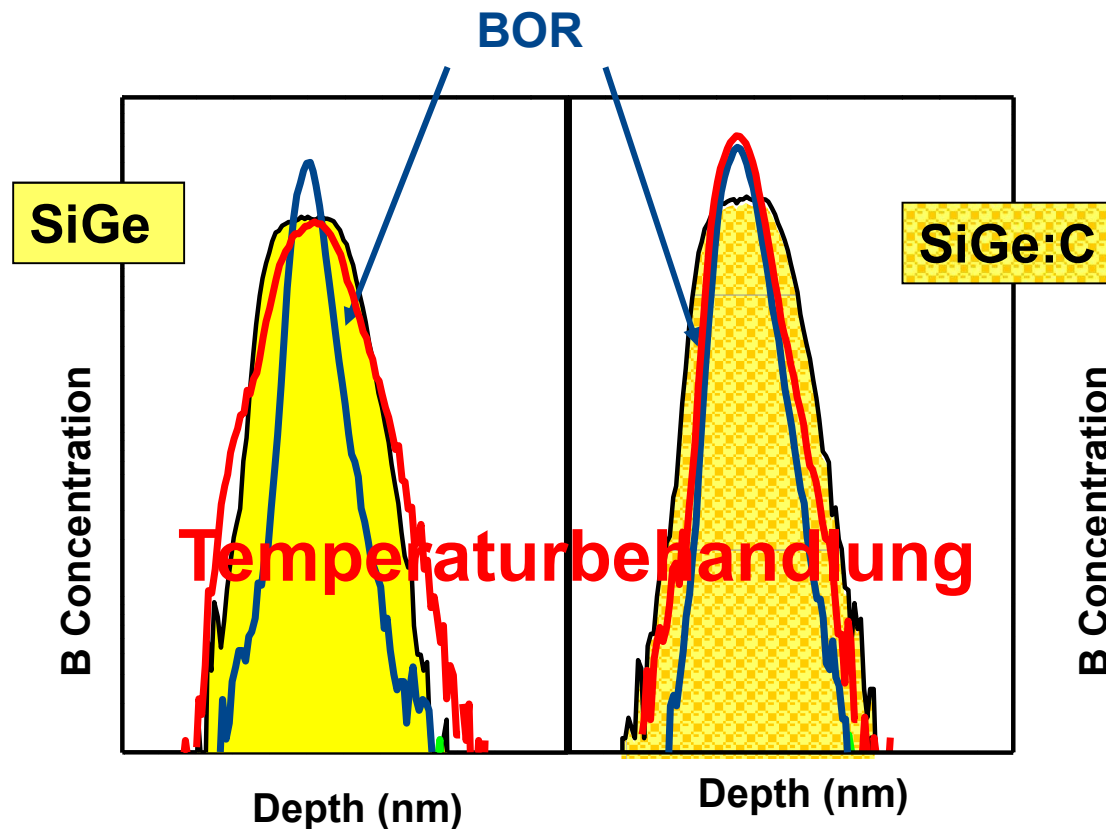


npn-Si

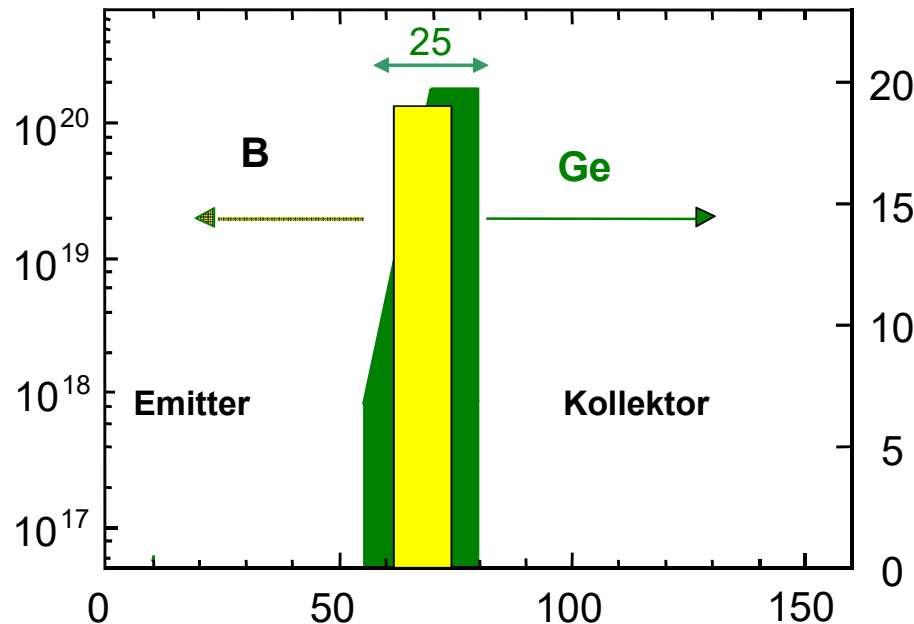


npn-Si/SiGe/Si





Messungen mit SIMS (Sekundärionen Massenspektrometrie)



SiGe:C Basis

C Konzentration:
 $(5 \times 10^{19} - 1 \times 10^{20}) \text{ cm}^{-3}$
 B Dosis: $1.4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$
 --> $R_{\text{SBI}}: (1.2-1.5) \text{ k}\Omega$

SiGe Basis

B dose: $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$
 --> $R_{\text{SBI}}: (3.5-4.5) \text{ k}\Omega$

sehr dünne SiGe Basisschicht mit hoher B-Dotierung

→ **Problem: Boratome sollten in der Basis bleiben**

→ **Unterdrückung der Borausdiffusion durch SiGe:C**

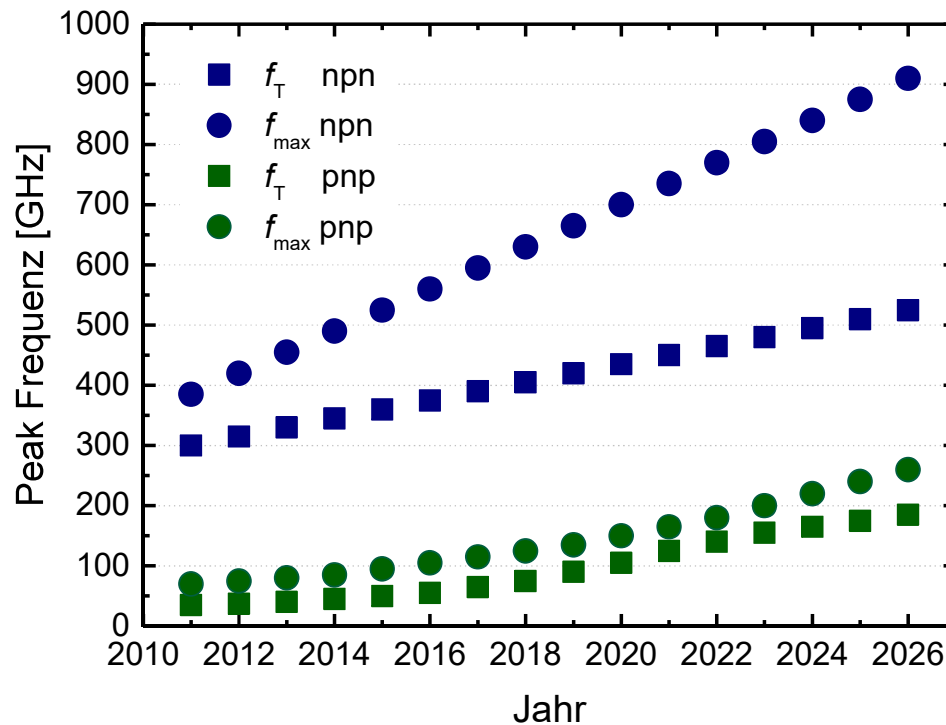


Highlights der SiGe-HBT-Entwicklung

1999: SiGe HBTs erreichen f_T und $f_{max} \sim 100\text{GHz}$

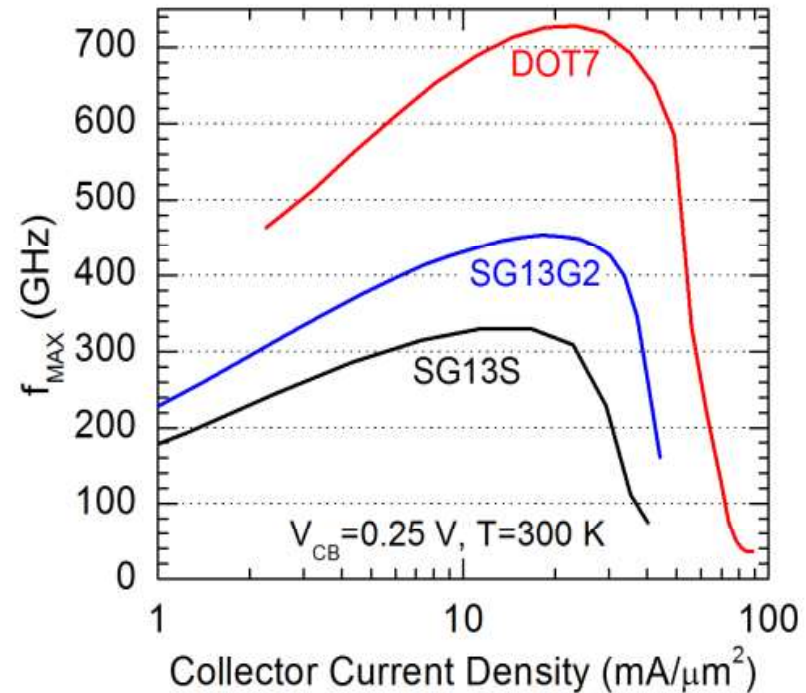
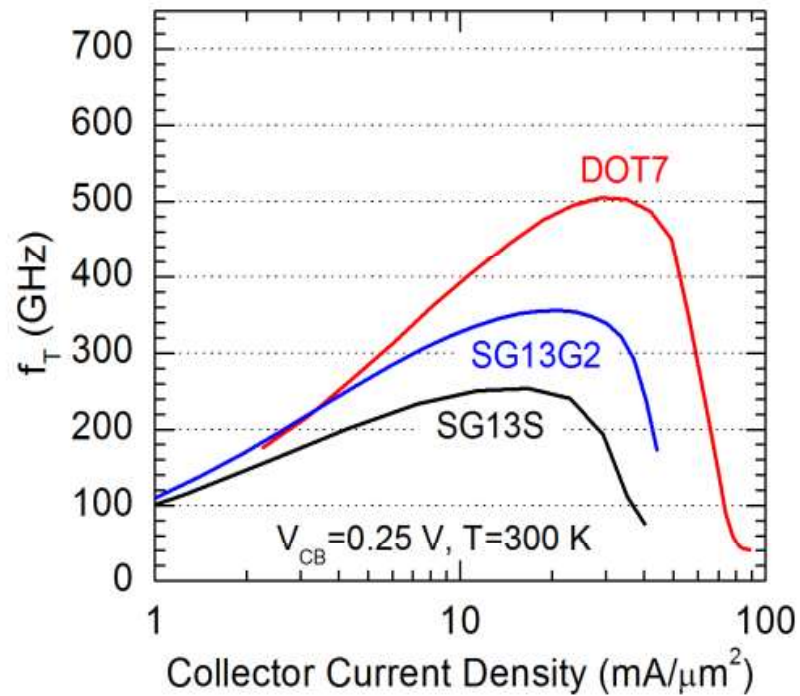
2002/2003: SiGe:C HBTs erreichen $f_T, f_{max} > 200\text{ GHz}$

2013: $f_{max} \sim 500\text{ GHz}$ (= .5 THz)



ITRS:
Roadmap für SiGe-HBT:
 f_T, f_{max}

Quelle: ITRS 2011



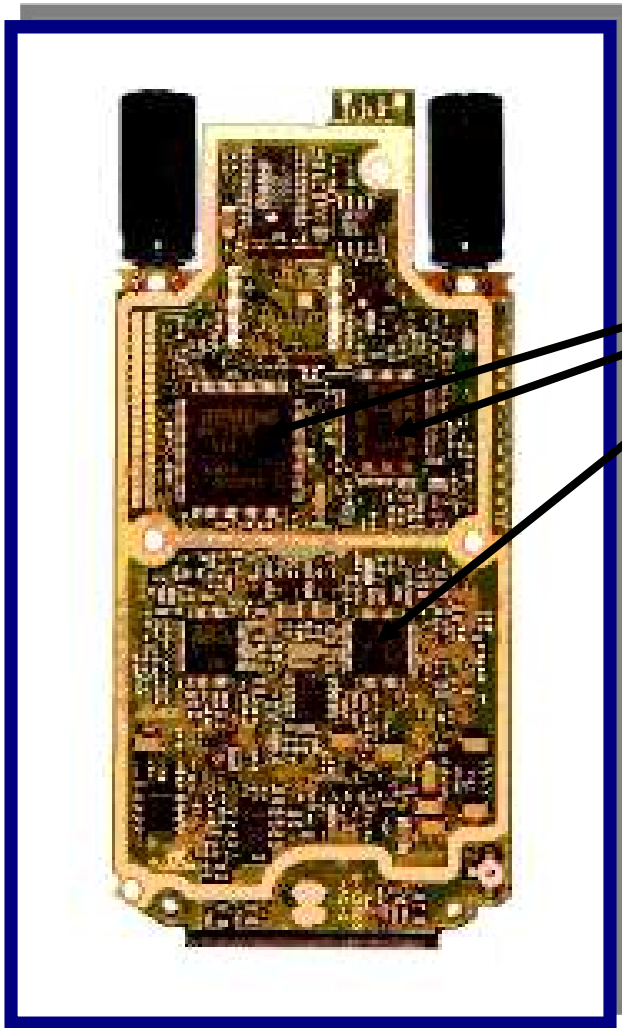
Quelle: H. Rücker, B. Heinemann: SiGe HBTs for High-Performance BiCMOS Technology
ISTDM/ICS Mai 2018

Vergleich: RF CMOS, Si BJT und SiGe HBT

Parameter	Si BJT	SiGe HBT	RF CMOS
f_T	gut	hoch	hoch
f_{\max}	gut	hoch	hoch
Linierität	gut	besser	am besten
1/f Rauschen	gut	gut	schlecht
Breitbandrauschen	gut	besser	schlecht
Early-Spannung	OK	gut	schlecht
Steilheit	gut	gut	schlecht

Source: D. Hareme (IBM)

Das Innenleben eines Handy's vor 20 Jahren



Digitale CMOS-Chips

sowie

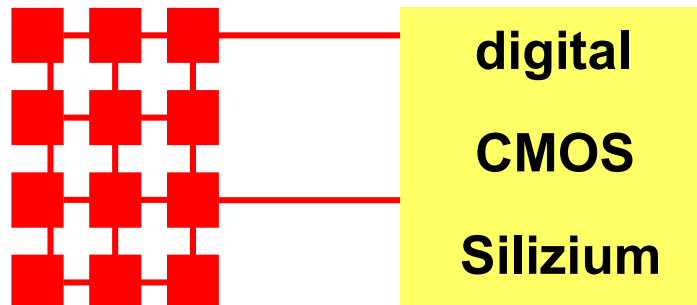
> 100 diskrete III/V-
Bauelemente (GaAs HEMTs)
für den Empfänger- und
Senderteils (analog)

Das Problem

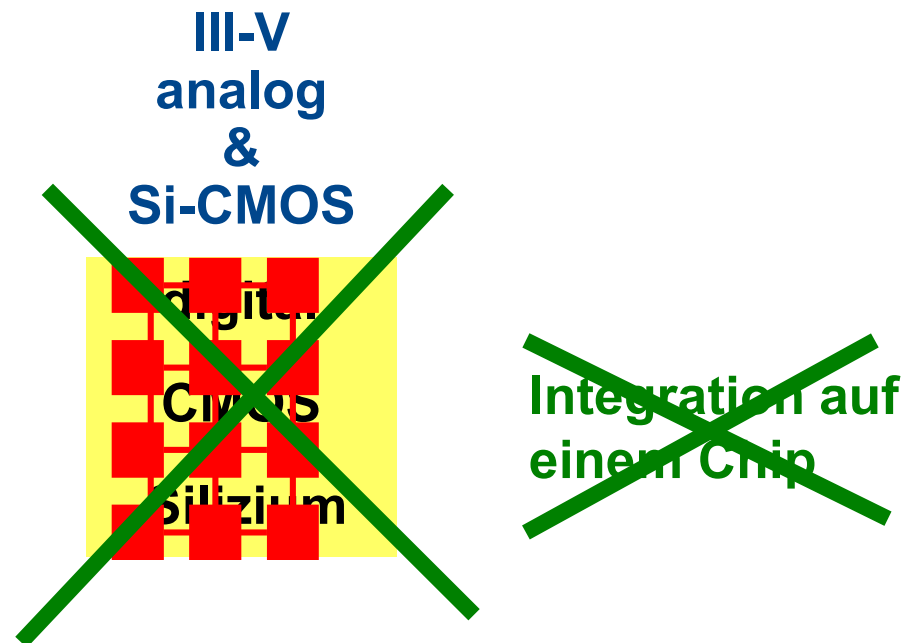
Analog:
> 100 BE
III-V (GaAs)

Si-CMOS

- Viele Baugruppen
- teuer
- hoher Stromverbrauch
- Rauschen

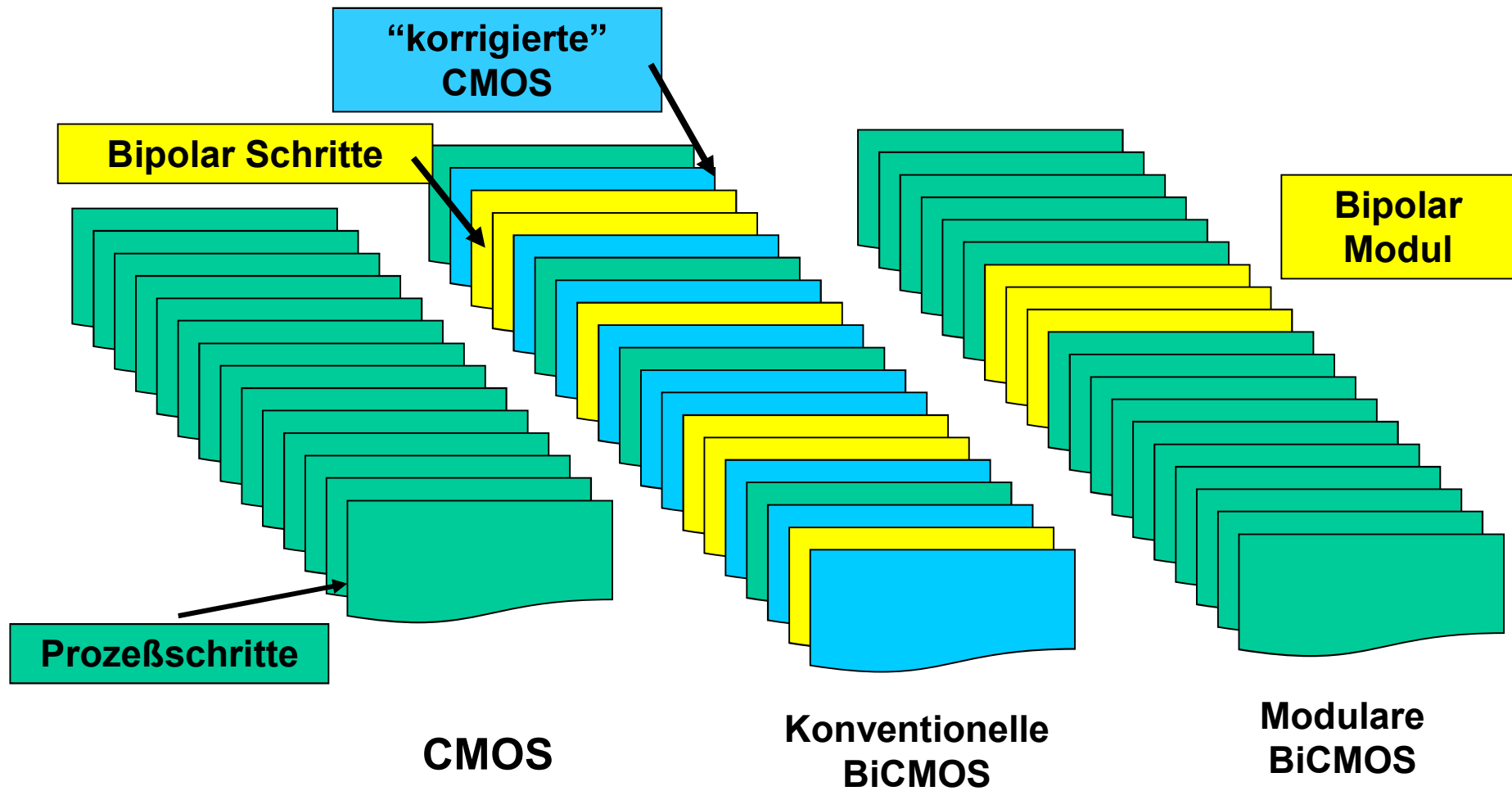


Das Problem

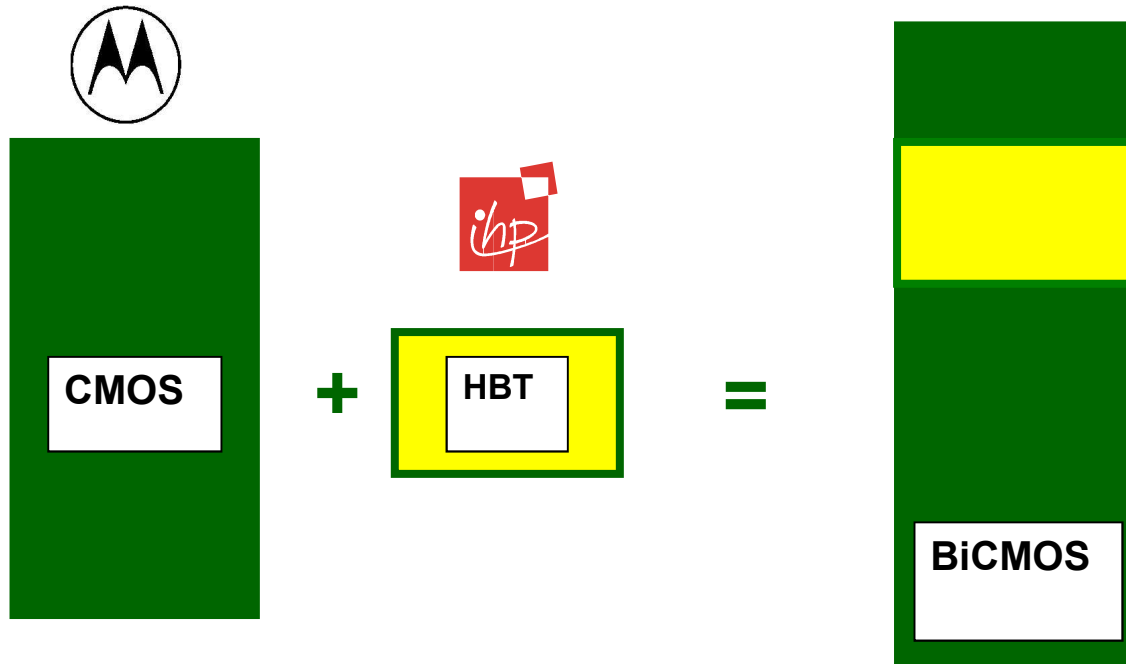


Lösung:

SiGe BiCMOS: analog (SiGe) und digital (Si) auf einem Chip



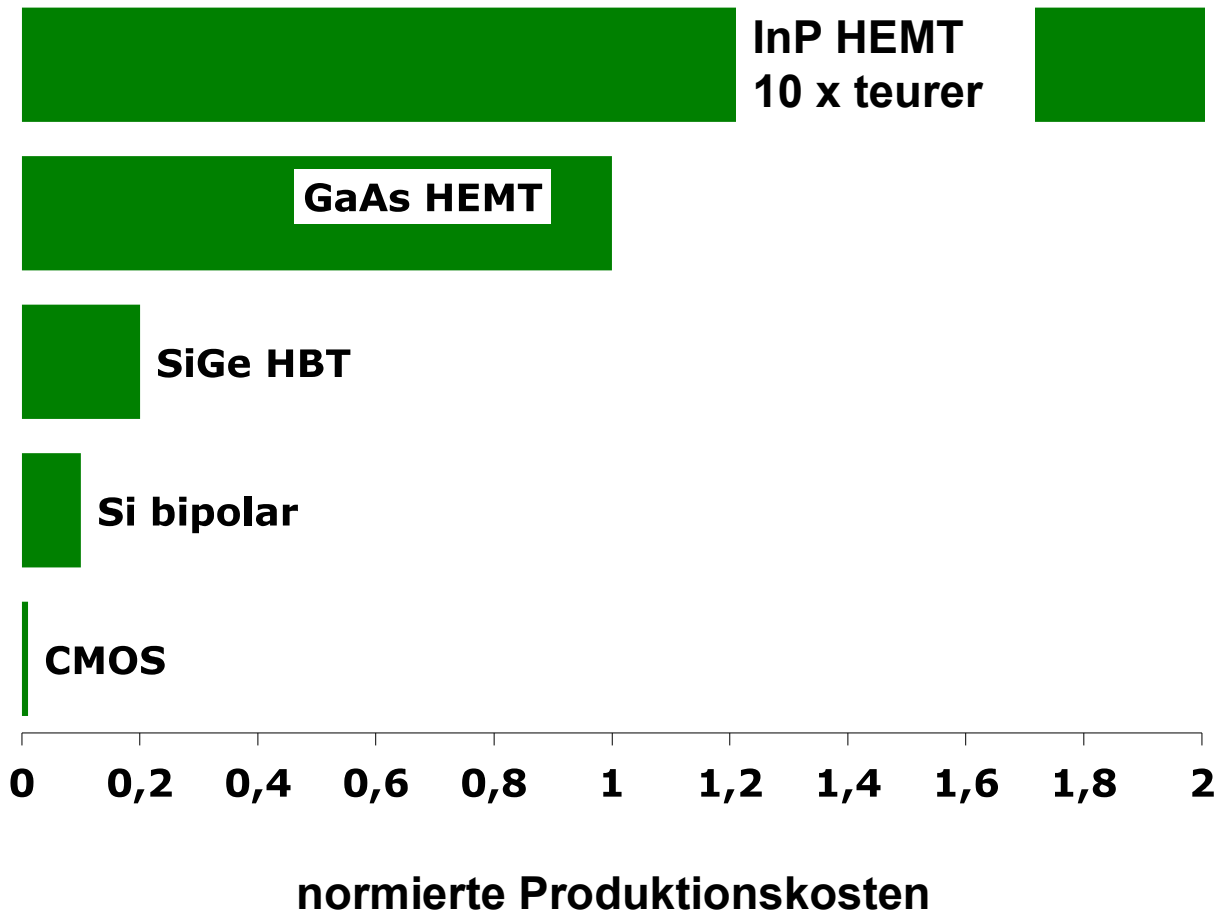
Erste Modulare Integration: 1999



- Modul kann in nahezu jeden CMOS-Prozeß integriert werden
- Keine Veränderungen im CMOS-Ablauf (modulare Integration)
- Wiederverwendbarkeit aller CMOS-Bibliotheken
- Erhöht den Gesamtprozeß nur geringfügig

Osten *et al*, 1999

Technologiekosten im Vergleich



Wichtige Begriffe

- **Bipolartransistor *versus* Feldeffekttransistor**
Einfluss der Skalierung
Grundeigenschaften
Anwendungsfelder
- **Bipolartransistor (Homojunction, BJT)**
nnp versus pnp
Kenngrößen
Funktionsprinzip
Grundsaltungen
- **Heterojunction Bipolartransistor (HBT)**
Aufbau
Vorteile gegenüber BJT
Erreichbare Leistungen
Modulare Integration