

6 Der Bipolar-Transistor

Ziele:

1. Physikalische Beschreibung der Wirkungsweise
2. Diskussion der elektrischen Eigenschaften

Stichworte: Emitter, Kollektor, Basis, Emitter-Schaltung, Basis-Schaltung, Stromverstärkung, Betriebsbereiche, Kennlinien

Lehrbuch: z.B. S.M. Sze [2] oder K. Seeger [4]

Anregung: Wie läßt sich eine Stromverstärkung erzielen?

6.1 Entwicklung des Transistors

- Transistor (transfer resistor)
- J. Bardeen und W.H. Brattain [1]
 - Ge Punkt-Kontakt Transistor
- moderne Bipolar-Transistoren meist Si

Aufbau und Typen:

- pnp-Transistoren
- npn-Transistoren
- zwei nah aneinander gebrachte Dioden. 'Nah' heisst:
 - Diffusion spielt wichtige Rolle
 - Minoritäts-Ladungsträger sind wichtig

Warum bipolar?

- Stromtransport durch Minoritäts-Ladungsträger
- jedoch gleichzeitig Elektronen- und Loch-Strom, also bipolar

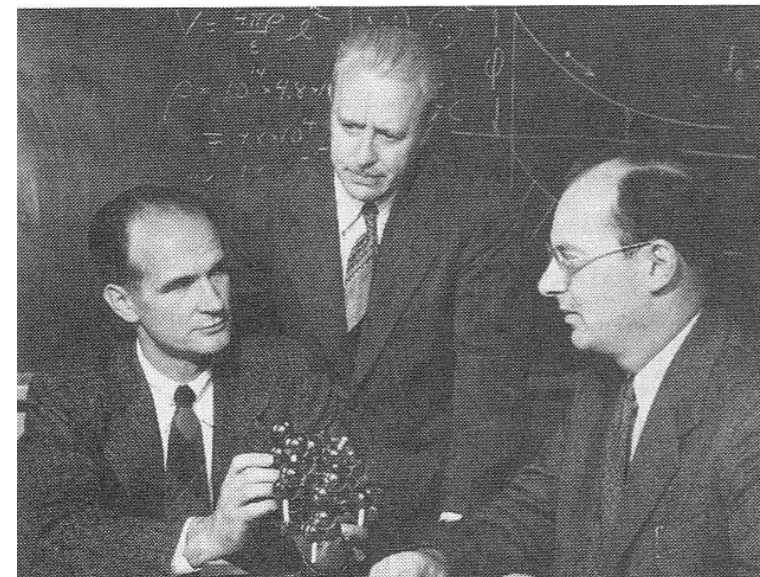
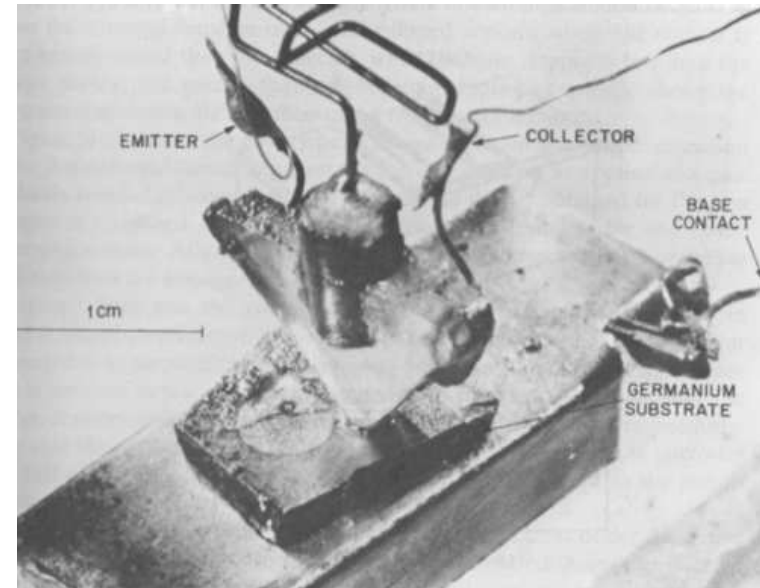


Abbildung 6.1: Der erste Transistor (nach Ref. [2], S. 109). Das obere Foto zeigt den Ge-Transistor von Bardeen und Brattain [1]. Foto von William P. Shockley, Walter H. Brattain und John Bardeen. Sie erhielten 1956 den Nobelpreis für die Verstärkung von Strömen in Halbleitern (nach Ref. [3], S. 542).

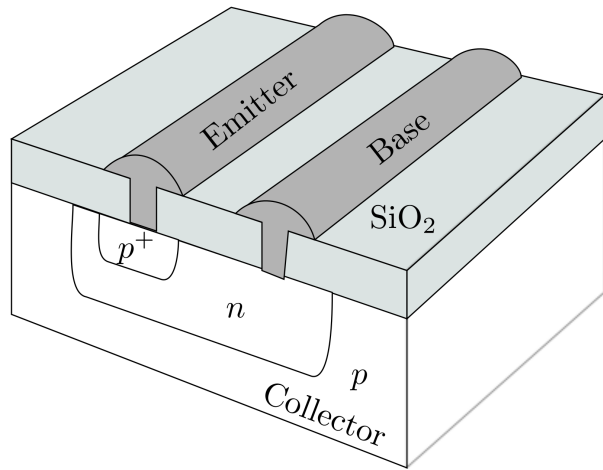
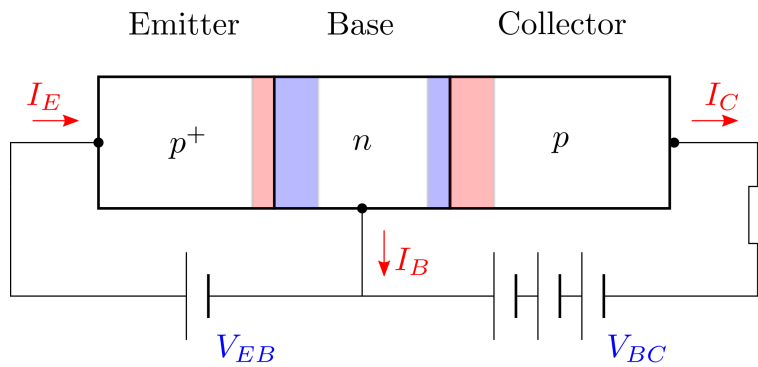


Abbildung 6.2: a) Aufbau eines pnp-Transistors aus Silizium. b) Ideali-
sierter eindimensionaler Aufbau. Nach Ref. [2], S. 110.

Herstellung:

- p-dotiertes Substrat
- erstes Aufwachsen einer SiO_2 -Schicht
- großes Fenster in SiO_2 -Schicht ätzen
- Eindiffusion eines Donators: liefert $n > p$
- zweites Aufwachsen einer SiO_2 -Schicht
- kleines Fenster in SiO_2 -Schicht ätzen
- Eindiffusion eines Akzeptors: liefert $p^+ n >$
- drittes Aufwachsen einer SiO_2 -Schicht
- Kontaktierung von Emitter und Basis
- Kontaktierung des Kollektors über das Substrat

6.2 Grundlegende Funktion

Hier wird der pnp-Transistor diskutiert. Angaben in Klammern beziehen sich auf npn-Transistoren.

- Emitter:
 - p^+ -dotiert (n^+ -dotiert)
 - Fermienergie nahe der Bandkante
 - emittiert Löcher (Elektronen) durch Diffusion in die Basis
- Basis:
 - sehr dünn
 - n -dotiert (p -dotiert)
 - Abstand zwischen Fermienergie und Bandkante
 - kontrolliert den Strom der Ladungsträger zwischen Emitter und Kollektor
- Kollektor
 - p -dotiert (n -dotiert)
 - Abstand zwischen Fermienergie und Bandkante
 - sammelt die Löcher (Elektronen), die aus dem Emitter kommen
 - nahezu alle Löcher kommen an, da Feldtransport

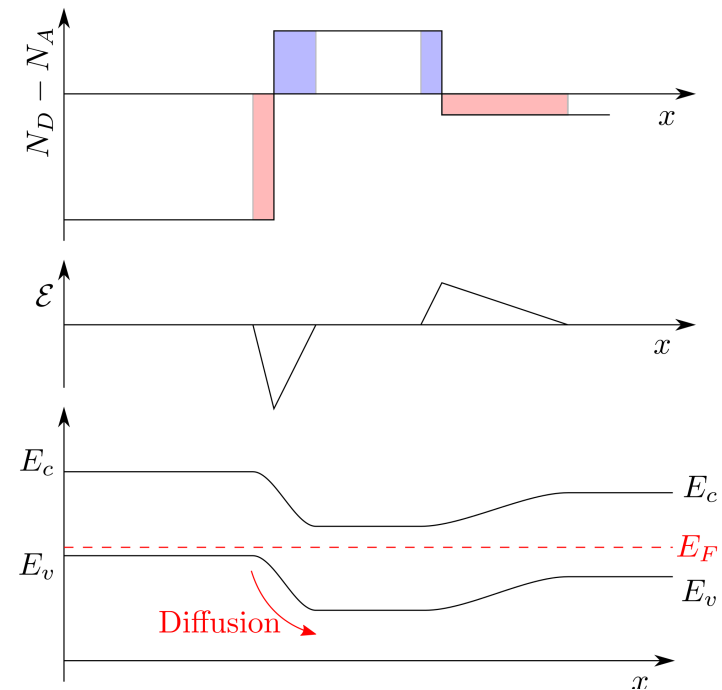
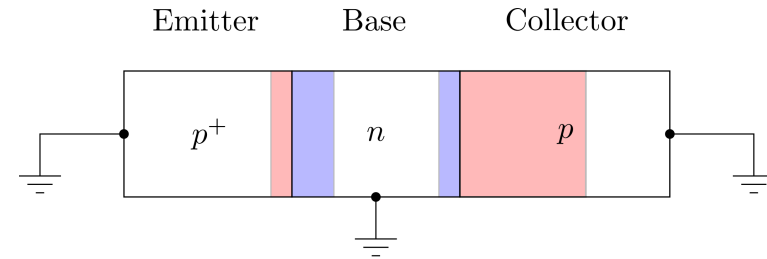


Abbildung 6.3: Ein p^+np -Transistor im Gleichgewicht, sowie Dotierungsprofil mit Raumladungen, elektrisches Feld und Banddiagramm. Nach Ref. [2], S. 112.

6.3 Idealisierte Grundsaltungen

Schaltzeichen von Bipolartransistoren: (s. Abb. 6.4)

- pnp-Transistor
- npn-transistor

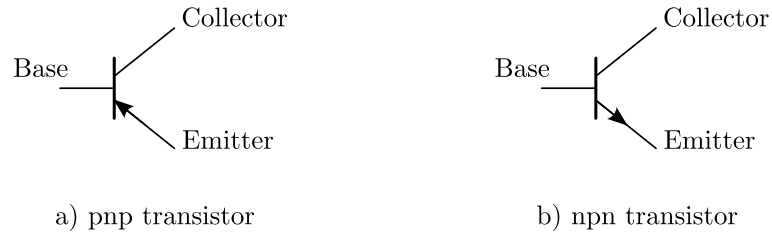
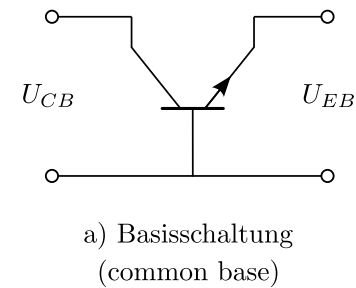


Abbildung 6.4: Schaltzeichen zu Bipolartransistoren



Grundsaltungen von Bipolartransistoren:

- Basisschaltung (common base)
- Emitterschaltung (common emitter)
- Kollektorschaltung (common collector)
- s. Abb. 6.5

Vorsicht:

- nicht notwendigerweise eindeutig
- schwächeres Kriterium: Bezeichnung nach dem Anschluss, der weder als Eingang noch als Ausgang dient.

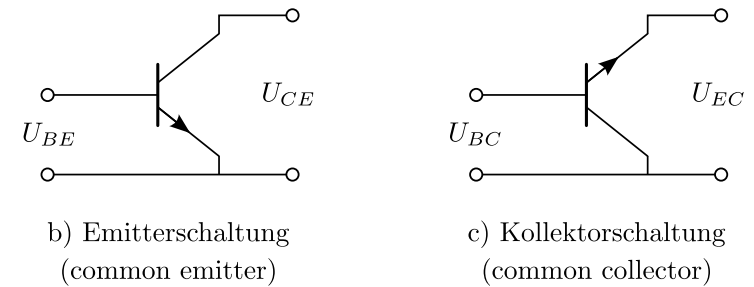


Abbildung 6.5: Grundsaltungen von Bipolartransistoren

6.4 Schaltung mit gemeinsamer Basis

Verstärker mit gemeinsamer Basis: (common base configuration)

- s. Abb. 6.6
- kaum technische Bedeutung, da keine Stromverstärkung
- Raumladungszone Emitter-Basis: nah
- Raumladungszone Basis-Kollektor: weit

Arbeitsweise: Transistor im aktiven Modus

1. s. Abb. 6.6
2. wichtigster Transportmechanismus: Diffusion
3. Emitter-Basis-Übergang:
 - Durchlassrichtung, also schmale Verarmungszone
 - von p^+ -Emitter in Basis: Injektion von Löchern
 - von der Basis in den p^+ -Emitter:
 - Injektion von Elektronen,
 - aber wenige, da $n \ll p^+$, irrelevant
4. Basis-Kollektor-Übergang:
 - Sperr-Richtung für
 - Elektronenstrom $B \rightarrow C$
 - Lochstrom $C \rightarrow B$
 - geringer Sperrstrom
5. wenn Basis dünn:
 - Löcher diffundieren durch gesamte Basis
 - hinter der Basis steigen die Löcher im Band-Diagramm auf (bubbles)
 - nahezu alle Löcher aus der Basis kommen im Kollektor an
 - folglich: großer Loch-Strom von Emitter zu Kollektor
 - Kontrolle über V_{EB} , da dies die Ursache des Stroms ist
6. wäre die Basis dick:
 - vollständige Rekombination der Löcher in der n-Basis
 - Transistor wie zwei Dioden, also kein guter Transistor

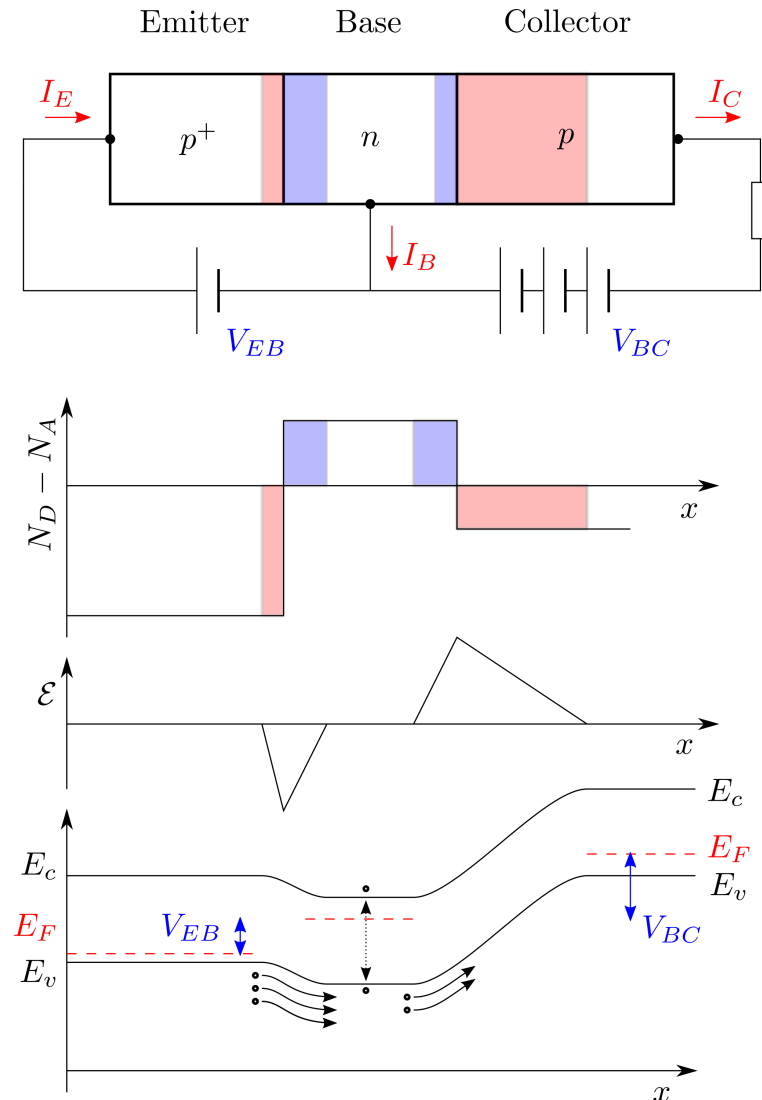


Abbildung 6.6: p^+np -Transistor im aktiven Modus sowie Dotierungsprofile mit Raumladungen, elektrisches Feld und Band-Diagramm mit Stromflüssen. Nach Ref. [2], S. 113.

6.4.1 Stromflüsse pnp-Transistor in Basisschaltung

- p⁺np-Transistor, s. Abb. 6.7
- Loch-Strom dominant
- Definitionen:
 - I_E : Emitterstrom
 - I_B : Basisstrom
 - I_C : Kollektorstrom
 - V_{EB} : Spannung Basis-Emitter
 - V_{BC} : Spannung Basis-Kollektor

mit Indices n oder p :

$$I_E = I_{En} + I_{Ep} \quad (105)$$

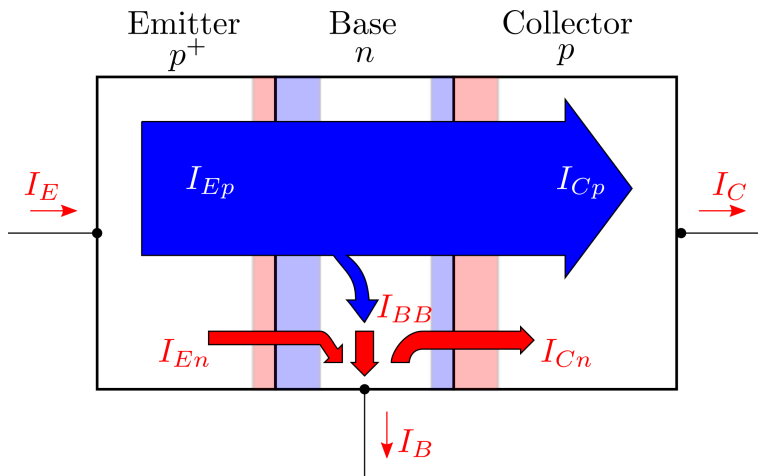


Abbildung 6.7: Stromflüsse im aktiven Modus. Die Bewegungsrichtungen der Elektronen sind den Strömen entgegengesetzt. Nach Ref. [2], S. 114.

Strom-Verstärkung: (common base current gain)

$$\alpha \equiv \frac{I_{Cp}}{I_E} < 1 \quad (106)$$

- Grund: Einige Löcher zweigen in die Basis ab.
- In der Basisschaltung gibt es keine Stromverstärkung!

Bemerkungen:

- es gibt auch Elektronenströme (Größenordnungen kleiner)
- wichtig: die Basis muss dünn sein
 - nahezu lineare Lochdichte über Basisdicke
 - Löcher werden vom Emitter zum Kollektor durchgereicht
 - andernfalls: entgegengesetzt geschaltete Dioden, $I_C \rightarrow 0$

Eignung von Basisschaltungen:

- als Impedanzwandler für $Z_e < Z_a$ (Eingang/Ausgang)
- Spannungsverstärker bis in Hochfrequenzbereich

6.4.2 Operationsbereiche

Kennlinien:

1. s. Abb. 6.8
2. Kennlinie des Emitter-Stroms:
 - exponentieller Anstieg mit V_{EB}
 - diodenähnlich
3. Kennlinie des Kollektor-Stroms:
 - über weiten Bereich unabhängig von V_{BC}
 - da V_{BC} nur für finalen Feldtransport
 - Emitterströme kommen nahezu vollständig am Kollektor an
 - Resultat: Plateaus mit gleichmäßigem Abstand (Saturation)

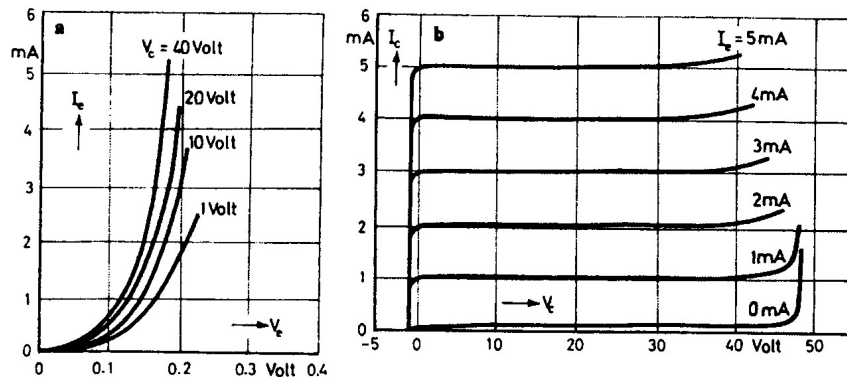


Abbildung 6.8: Emitter- und Kollektor-Charakteristiken eines pnp-Transistors in 'common base'-Konfiguration. Nach Ref. [4], S. 141. Parameter in a): V_C und in b): I_E .

Betriebs-Bereiche: s. Abb. 6.9

1. Aktiver Bereich: wie bereits diskutiert
2. Übersteuerungs-Bereich (saturation):
 - beide Dioden in Vorwärts-Richtung

- Transistor leitet
 - kleine Änderungen an der Basis haben kaum Einfluss auf Leitfähigkeit.
3. Sperr-Bereich (cut-off):
 - beide Dioden in Sperr-Richtung
 - keine Löcher in Basis
 4. Inverser Bereich :
 - Rolle von Kollektor und Emitter ist vertauscht
 - im Prinzip ähnlich zum aktiven Bereich

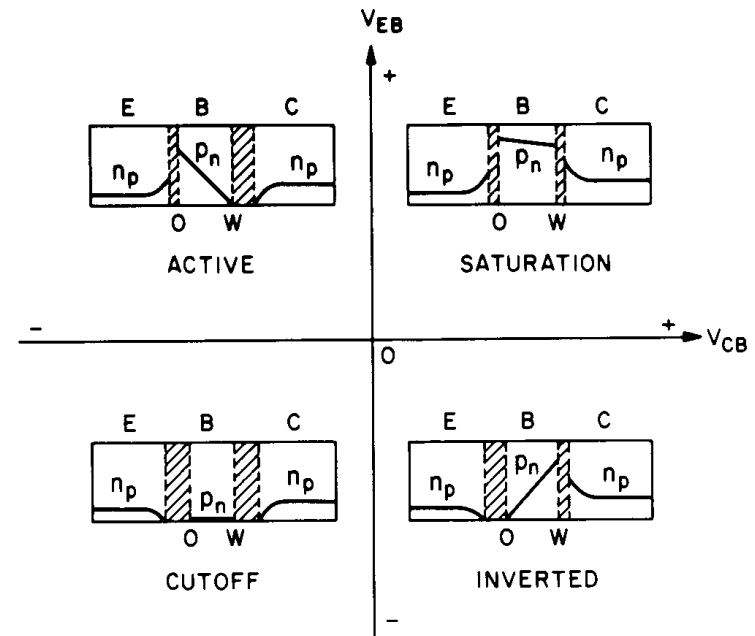


Abbildung 6.9: Die verschiedenen Arbeitsbereiche eines pnp-Transistors. Nach Ref. [2], S. 122.

6.5 Kennlinien in „common base configuration“

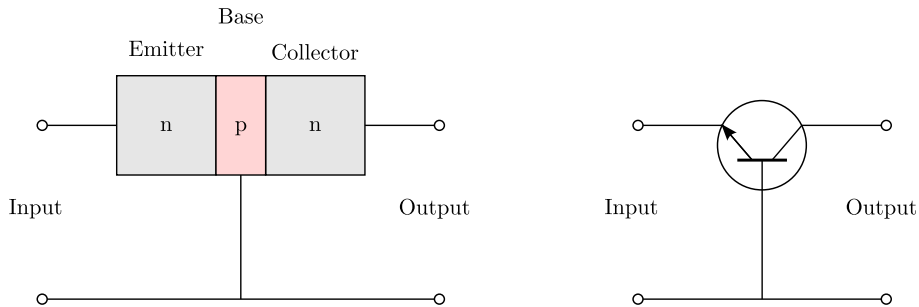


Abbildung 6.10: Schaltung mit gemeinsamer Basis eines npn-Transistors.

6.5.1 Emittercharakteristik / input characteristics

- Darstellung von $I_E(V_{BE})$
- Parameter: V_{CB}
- Kurven: Öffnung der Basis anhand des exponentiell ansteigenden Stroms
- ergibt den Eingangswiderstand

$$R_{in} = \frac{dV_{BE}}{dI_E} \neq const. \quad (107)$$

Folgende Simulationen: mit 2N3094

- Horowitz, Hill: "jelly bean"
- npn-Bipolartransistor
- für Verstärker mit geringer Leistung (200 mA, 40 V, 625 mW, 300 MHz)
- Motorola 1960's
- pnp-Gegenstück: 2N3096

Common base, input characteristics, MuSim03001

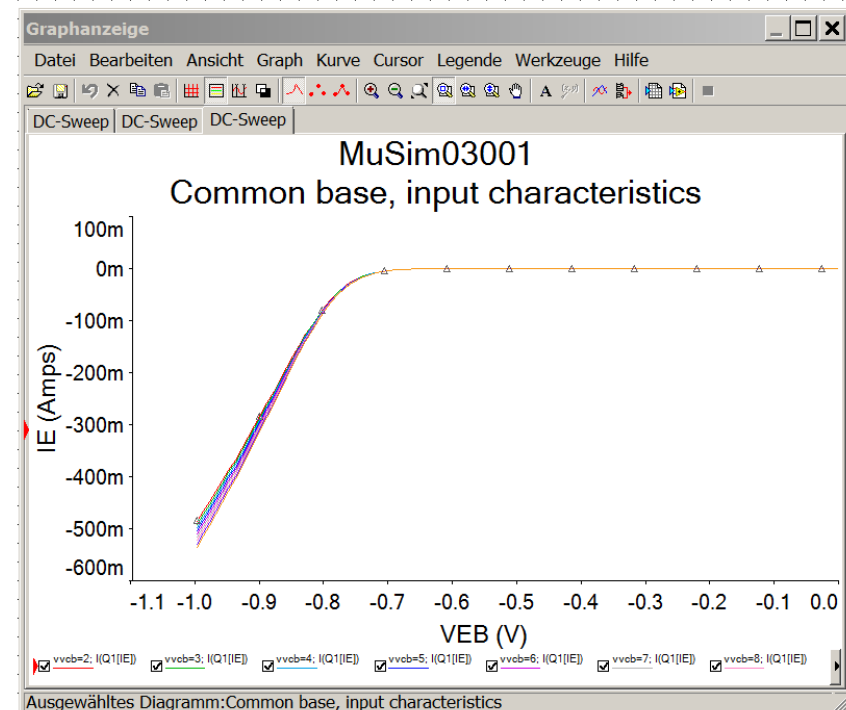
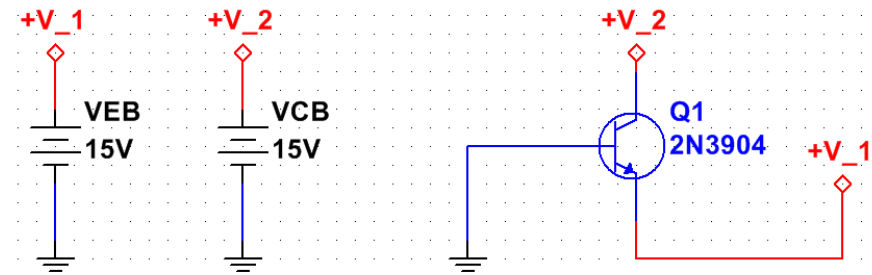


Abbildung 6.11: Simulation zur Eingangscharakteristik einer Schaltung mit gemeinsamer Basis.

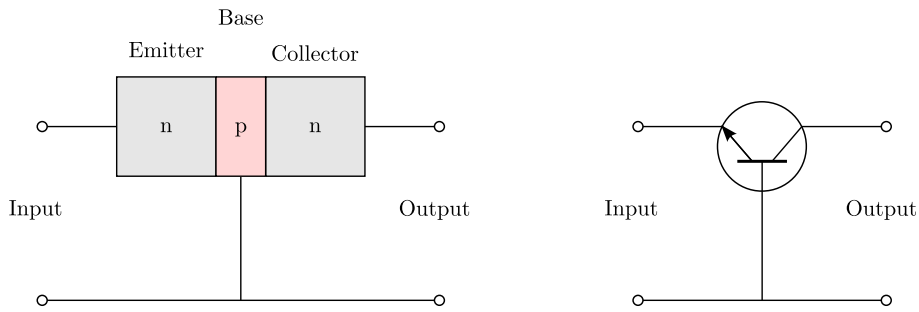


Abbildung 6.12: Schaltung mit gemeinsamer Basis eines npn-Transistors.

6.5.2 Kollektorcharakteristik / output characteristics

- Darstellung von $I_C(V_{CB})$
- Parameter: I_E
- zeigt den Ausgangswiderstand

$$R_{out} = \left. \frac{dV_{CB}}{dI_C} \right|_{I_E=const} \quad (108)$$

- nach Abb. 6.13:

$$R_{out} \neq const. \quad \text{für } V_{CB} > 0 \quad (109)$$

Common base, output characteristics, MuSim03002

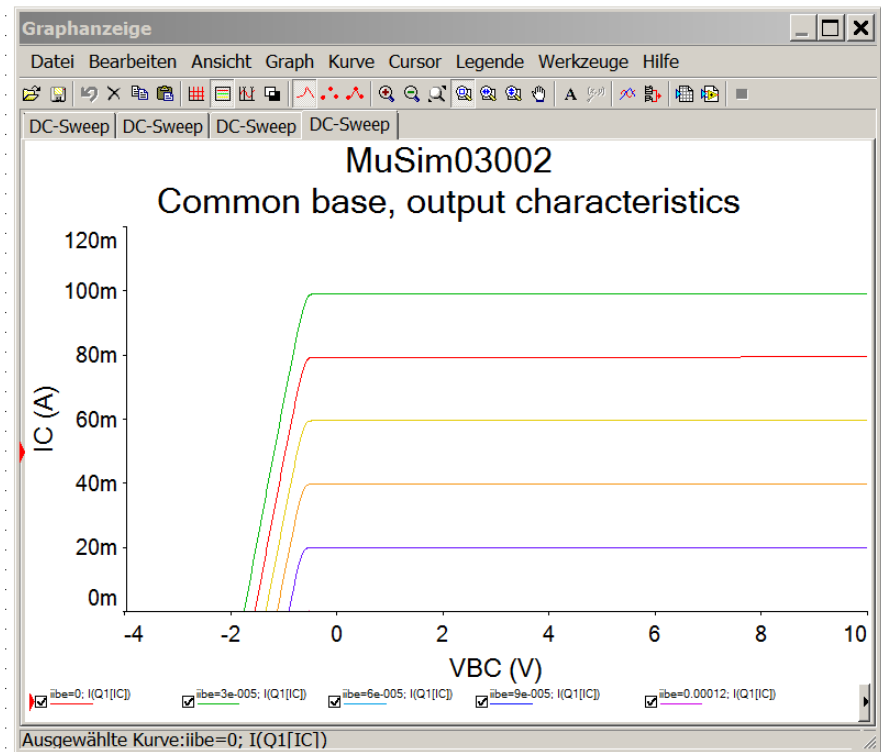
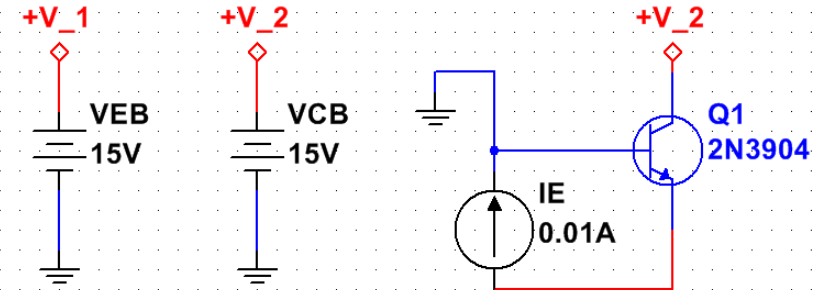


Abbildung 6.13: Simulation zur Kollektorcharakteristik einer Schaltung mit gemeinsamer Basis.

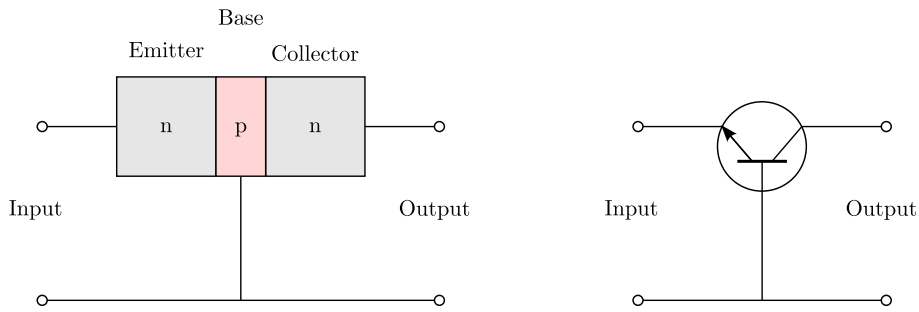


Abbildung 6.14: Schaltung mit gemeinsamer Basis eines npn-Transistors.

6.5.3 Verstärkungskennlinie / transfer characteristics

- Darstellung von $I_C(I_E)$
- konstant: V_{CB}
- zeigt die Stromverstärkung

$$\alpha = \left. \frac{dI_C}{dI_E} \right|_{V_{CB}=\text{const}} < 1 \quad (110)$$

Common base, transfer characteristics, MuSim03003

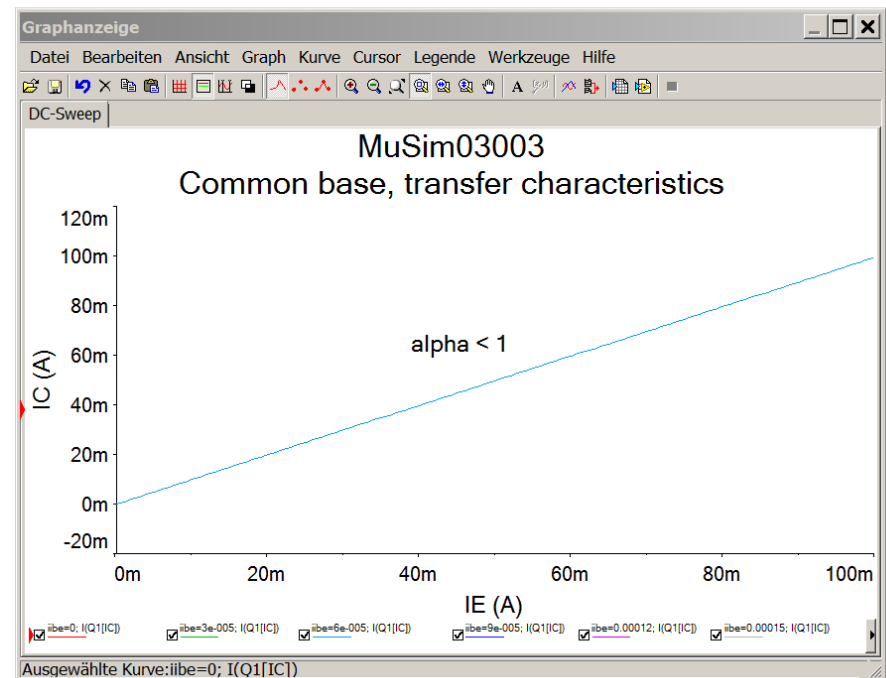
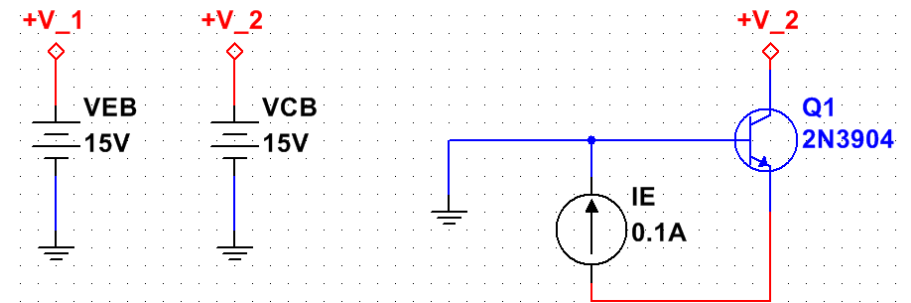


Abbildung 6.15: Simulation zur Verstärkungskennlinie einer Schaltung mit gemeinsamer Basis.

6.6 Emitterschaltung

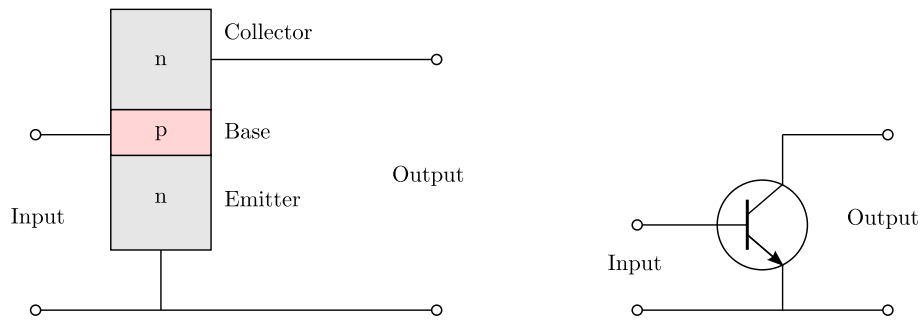


Abbildung 6.16: Emitterschaltung eines npn-Transistors.

Vorläufiges Ziel: Stromverstärkung

Mit der Stromverstärkung $\alpha = I_C/I_E$

Aber nach Abb. 6.7 auch:

$$I_C = I_E - I_B \quad \Rightarrow \quad I_C = \alpha (I_B + I_C) \quad (111)$$

$$I_C = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_B \quad (112)$$

Definiere Kollektor-Strom-Verstärkung:

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (113)$$

- Verstärkung: $I_B \rightarrow I_C$
- Ursache: $1 - \alpha$ ist klein da $\alpha \approx 1$

Anmerkungen:

- grobe Näherungen, Details: Thusetl
- typisch $\beta \approx 100$ mit großen Streuungen

6.6.1 Emitterschaltung, Eingangskennlinie

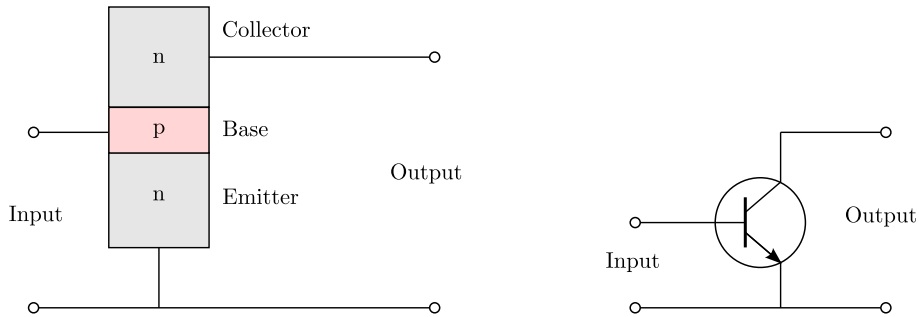


Abbildung 6.17: Emitterschaltung eines npn-Transistors.

Bekannter Zusammenhang:

- Konversion einer Basisspannung in einen Basisstrom:

$$I_B = I_0 \cdot \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_{th}}} - 1 \right) \quad (114)$$

- thermische Spannung:
 - Physik: $V_{th} \approx 25 \text{ meV}$ über $k_B T$
 - Elektronik: $V_{th} \approx 40 \text{ meV}$ nach HBG, p. 171
- $I_B(V_{BE})$ ist hochgradig nichtlinear
- Eingangsleitwert:

$$\frac{1}{R_{in}} = \frac{dI_B}{dV_{BE}} = \frac{I_0 \cdot e^{\frac{V_{BE}}{V_{th}}}}{V_{th}} \quad (115)$$

- Eingangswiderstand über Gl. (114):

$$R_{in} = \frac{V_{th}}{I_B} \quad (116)$$

Common emitter, input characteristics, MuSim03004

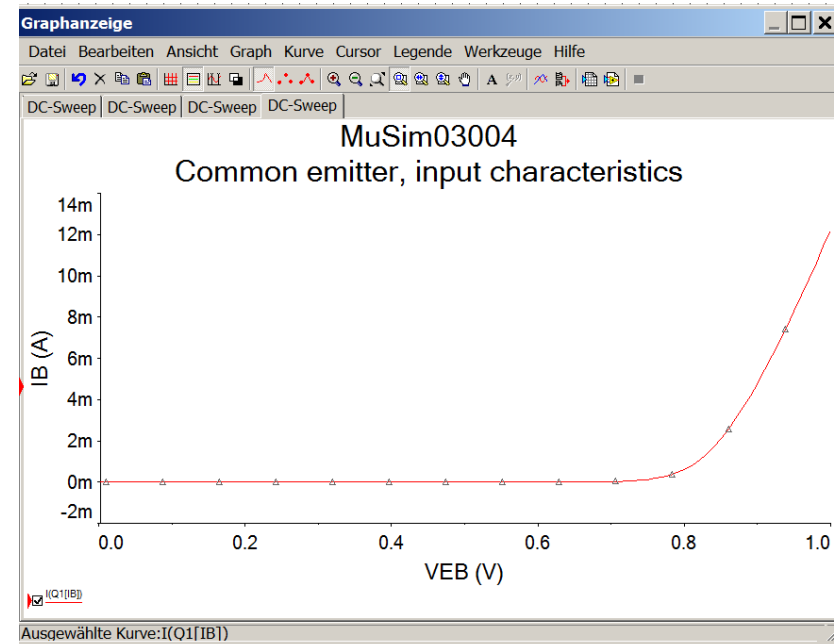
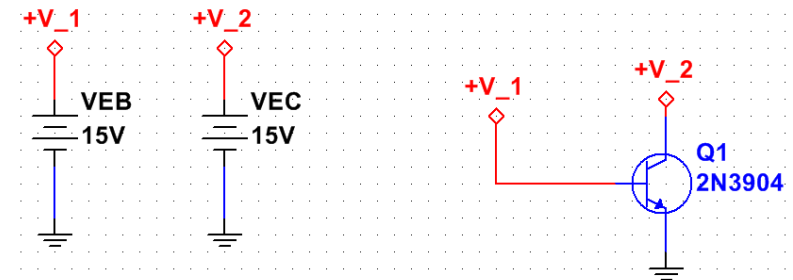


Abbildung 6.18: Eingangskennlinie einer Emitterschaltung.

6.6.2 Emitterschaltung, Verstärkung (transfer characteristics)

Stromverstärkung:

$$\beta = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right|_{V_{CE}=\text{const.}} \quad (117)$$

Wichtige Aussage: ist nahezu linear

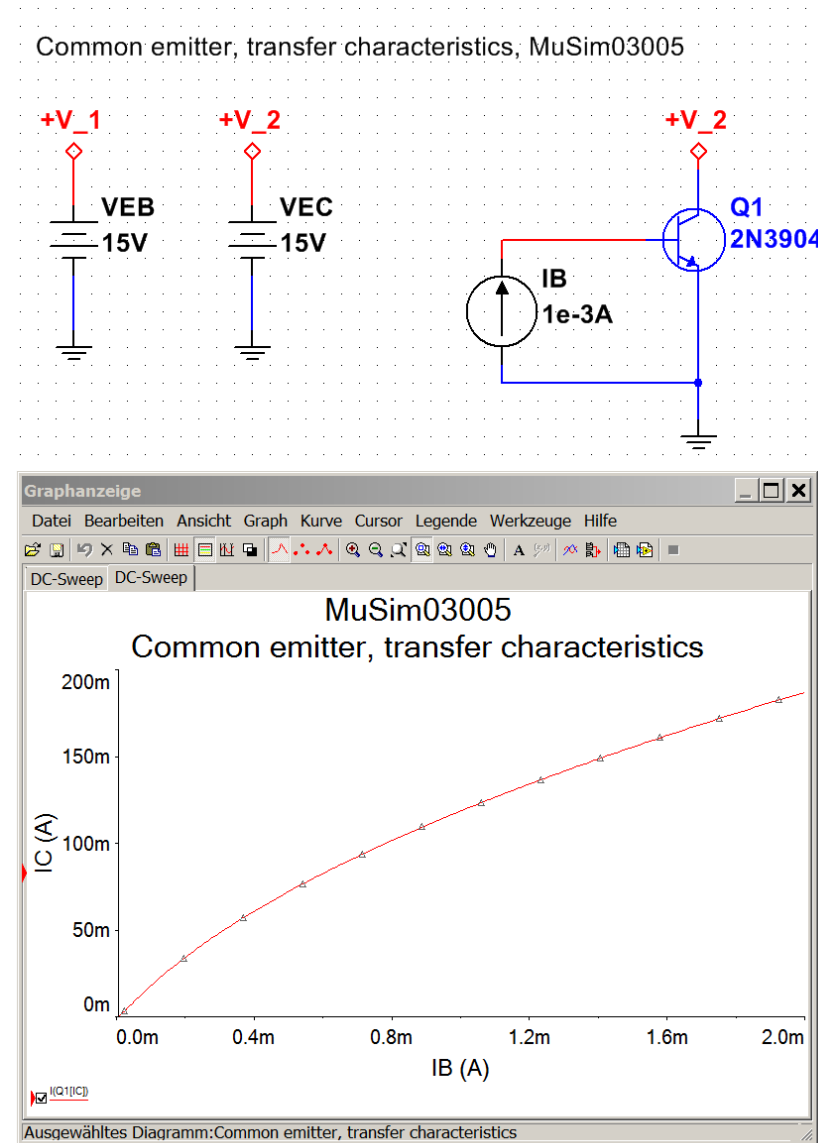


Abbildung 6.19: Stromverstärkung in einer Emitterschaltung.

6.6.3 Emitterschaltung, Ausgangskennlinie (output charact.)

Ausgangswiderstand:

$$R_{out} = \left. \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C} \right|_{I_B = const.} \quad (118)$$

Common emitter, output characteristics, MuSim03006

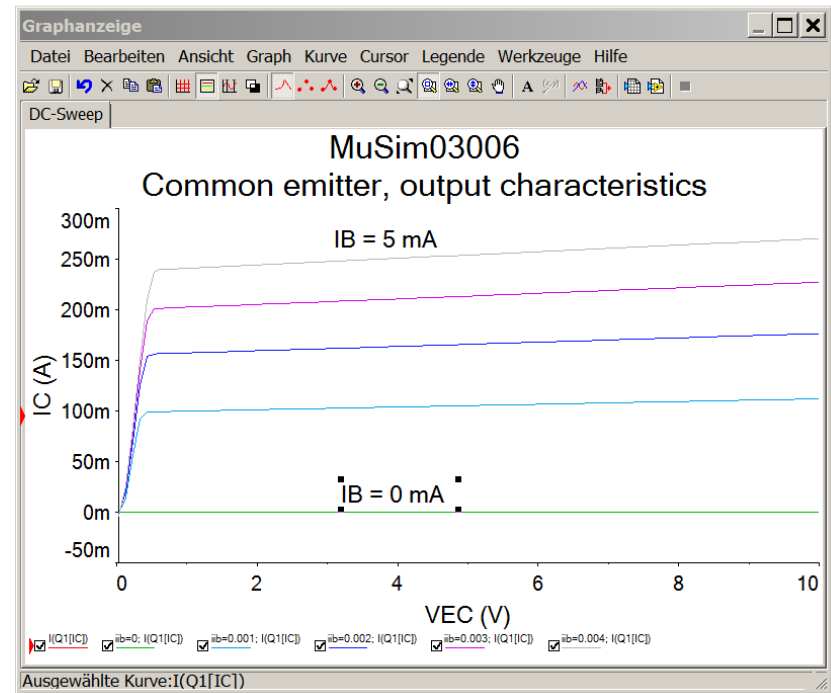
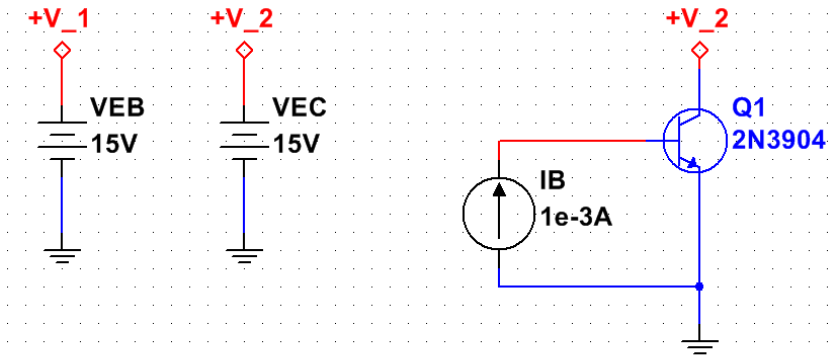


Abbildung 6.20: Ausgangskennlinie einer Emitterschaltung.

6.6.4 Kennlinienfeld

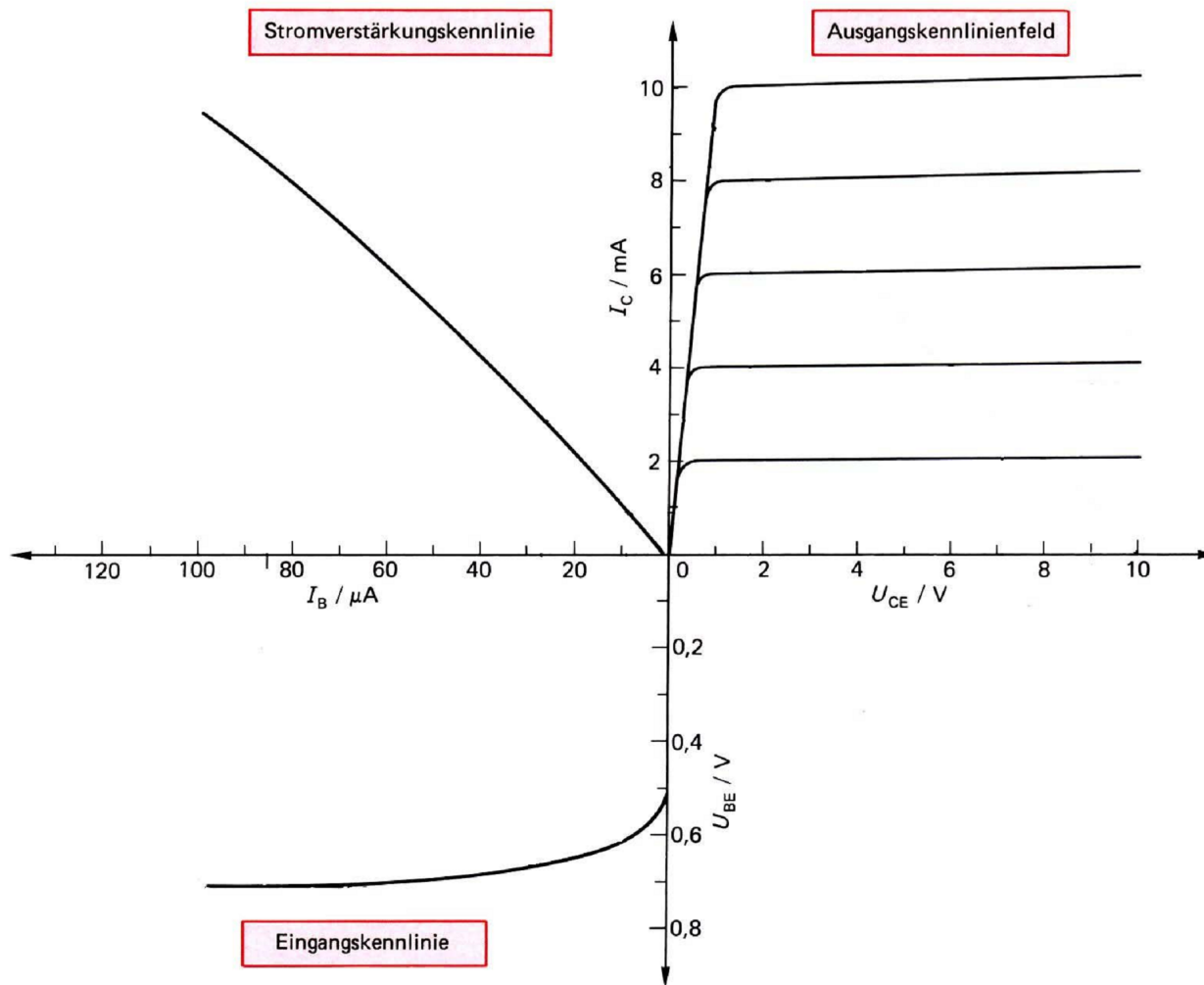


Abbildung 6.21: Kennlinienfeld. Zusammenfassung aller Kennlinien der Emitterschaltung. Aus Hering, Bresser & Gutekunst.

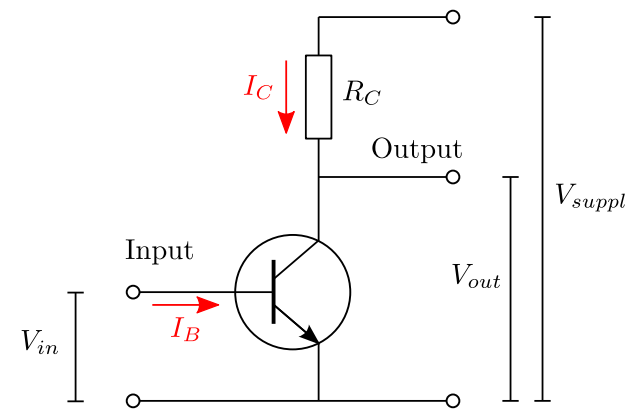
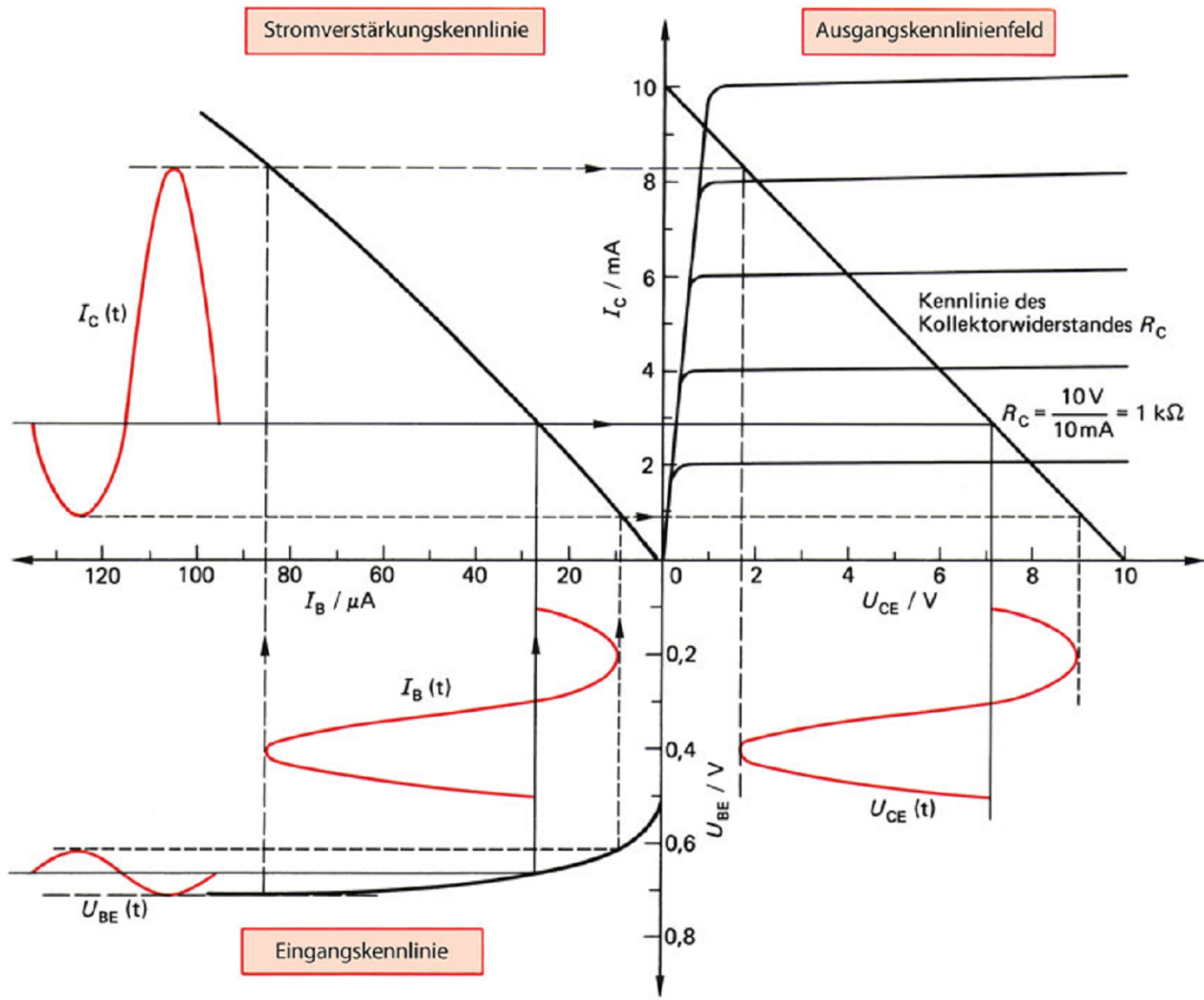


Abbildung 6.22: Zur Spannungsverstärkung. Aus Hering, Bresser & Gutkunst.

6.6.5 Verzerrungen, Emitterschaltung

Ziel: Spannungsverstärkung, z.B. von

$$U_{in} = U_0 \sin(\omega t) \quad (119)$$

Bekannt:

$$I_B = I_0 \cdot \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_{th}}} - 1 \right) \quad (120)$$

Konsequenz: große Verzerrungen