

2. Bipolartransistoren

2.1 Aufbau und Wirkungsweise

Bipolare Transistoren beruhen auf zwei PN-Übergängen zwischen drei Halbleiter-Elektroden (Emitter, Basis, Kollektor). Es gibt zwei Möglichkeiten, die PN-Übergänge anzuordnen. Demgemäß unterscheidet man die Transistoren nach dem *Leitfähigkeitstyp* und spricht von PNP- und von NPN-Transistoren.

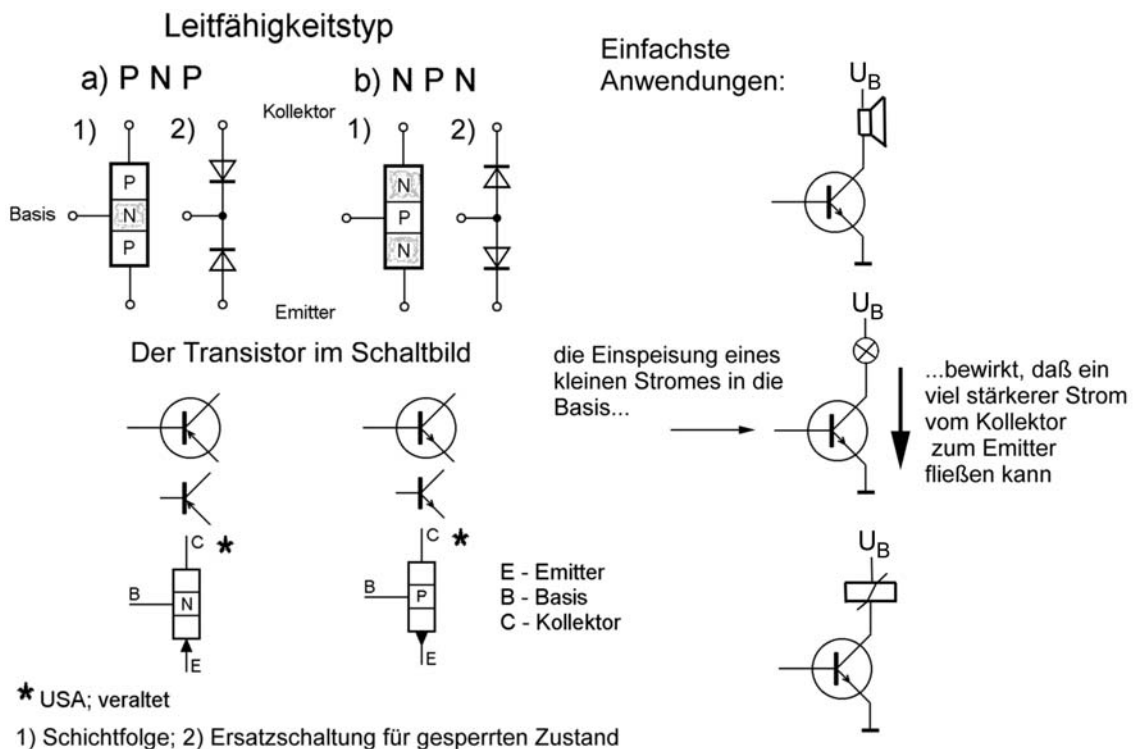
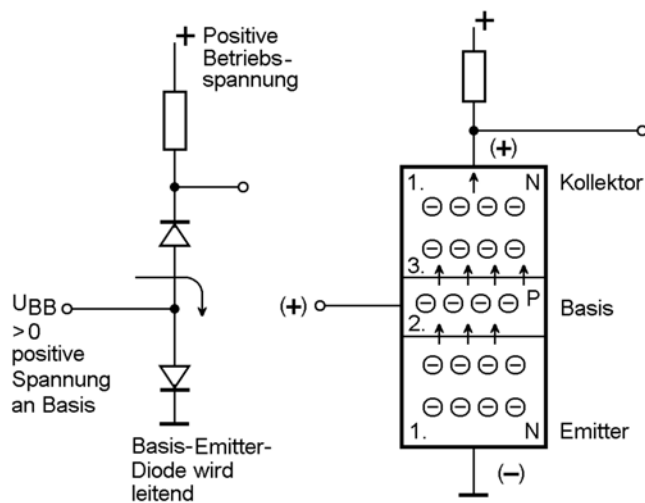


Abb. 2.1 PNP- und NPN-Transistoren.

Moderne Transistoren sind praktisch ausnahmslos Siliziumtransistoren. Auf Silizium-Grundlage lassen sich NPN-Transistoren wirtschaftlicher fertigen als PNP-Typen; der NPN-Typ braucht für den gleichen Kollektorstrom weniger Siliziumfläche als der PNP-Typ. In der modernen Schaltungstechnik werden NPN- und PNP-Transistoren oft im Verbund eingesetzt (Stichworte: Gegentakt- und Komplementärschaltungen). Deshalb gibt es von vielen Transistortypen sowohl NPN- als auch PNP-Ausführungen (daß PNP mehr Aufwand erfordert, erkennt man gelegentlich am Preisunterschied).

Wir werden uns im folgenden auf den NPN-Transistor beschränken. Bei PNP kehren sich lediglich Polaritäten und Stromrichtungen um (wie dies auch im Emitter-Pfeil des Schaltsymbols bildhaft zum Ausdruck kommt).

Wir wollen nun die Wirkungsweise des NPN-Transistors anhand der einfachsten Schaltungsanordnung (Emitterschaltung) näher erklären.



1. Im Emitter- und im Kollektorbereich herrscht Elektronenleitung.
2. Bei positiver Basis gelangen Elektronen vom Emitter in den Basisbereich.
3. Da der Basisbereich dünn ist, gelangen die Elektronen auch in die Sperrschicht zwischen Basis und Kollektor. Dort werden sie vom positiven Kollektor regelrecht angesaugt: es fließt Strom zwischen Emitter und Kollektor.

Abb. 2.2 Zur Wirkungsweise des Transistors

Ist die Basis nicht beschaltet, so sind Emitter und Kollektor praktisch über zwei entgegengesetzt in Reihe geschaltete Dioden miteinander verbunden. Durch eine solche Anordnung kann kein Strom fließen (Leck- bzw. Restströme werden bei solchen Betrachtungen stets vernachlässigt). Wird an die Basis eine gegenüber dem Emitter positive Spannung angelegt, so wird die Basis-Emitter-Diode in Durchlaßrichtung betrieben; es fließt ein Basisstrom. Auf Grund des Stromflusses gelangen die freien Elektronen aus dem Emitter-Bereich bis hin zum Kollektor (der Basisbereich ist entsprechend dünn ausgeführt, um dies zu ermöglichen). Wenn - wie hier vorausgesetzt - am Kollektor eine gegenüber dem Emitter positive Spannung anliegt, so fließt ein Kollektorstrom (da infolge des Basisstroms genügend freie Ladungsträger vorhanden sind). Der Kollektorstrom ist viel stärker als der Basisstrom (Stichwort: Stromverstärkungsfaktor; s. weiter unten).

Wir merken uns:

- Der (bipolare) Transistor ist grundsätzlich ein *Stromverstärker*. Ein schwacher Basisstrom genügt, einen starken Kollektorstrom fließen zu lassen.
- Beim NPN-Transistor liegt der Emitter auf negativerem, der Kollektor auf positiverem Potential (in Kurzform: + an Kollektor, – an Emitter). Sinngemäß liegt beim PNP-Transistor der Emitter auf positiverem und Kollektor auf negativerem Potential (– an Kollektor, + an Emitter).
- Damit Kollektorstrom fließen kann, muß an der Basis eine Spannung anliegen, die gegenüber dem Emitter beim NPN-Transistor positiv und beim PNP-Transistor negativ ist.

Abbildung 2.3 veranschaulicht die Wirkungsweise des Transistors an einem einprägsamen Modell.

Wenn kein Wasser in die Basis B fließt, bleibt der Weg vom Kollektor K zum Emitter E gesperrt. Wird hingegen der Basis ein Wasserstrom zugeführt, so wird das Ventil geöffnet, das dem Fluß vom Kollektor zum Emitter freigibt. Durch den Emitteranschluß fließt dann sowohl das Wasser vom Kollektor als auch das von der Basis.

Emitterstrom = Kollektorstrom + Basisstrom. (Bei Siliziumtransistoren ist der Basisstrom so gering, daß er meist vernachlässigt werden kann.)

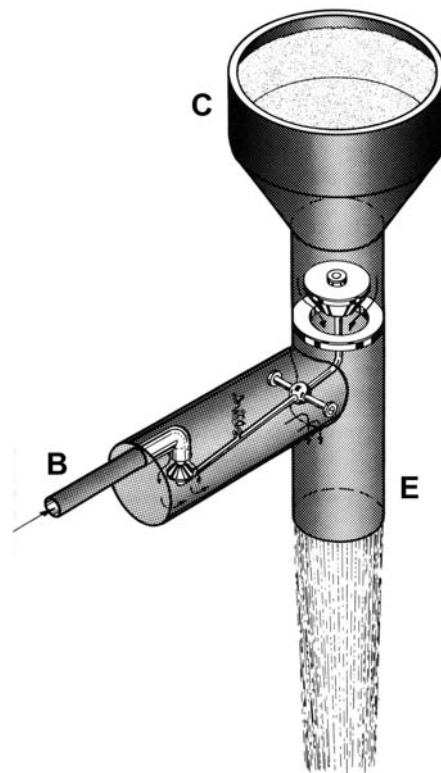


Abb. 2.3 Der Wassertransistor (Elektor).

Zu den Bezeichnungen

“Emitter” muß etwas mit "ausgeben, ausströmen" zu tun haben (es gibt Schadstoff- und Wertpapieremissionen), und "Kollektor" erinnert an die Kollekte in der Kirche (wo eingesammelt wird). Weshalb stimmt der Wortgebrauch offensichtlich nicht? – Das liegt am Unterschied zwischen technischer und physikalischer Stromrichtung. Elektronen fließen von – nach +, Löcher von + nach –. Im NPN-Transistor besteht der Stromfluß zwischen Emitter und Kollektor im wesentlichen aus Elektronen (die der Emitter sendet und der Kollektor "aufsammelt"). Der sinngemäße Stromfluß beim PNP-Transistor besteht hingegen aus Löchern. Die Techniker wollen jedoch gar nicht so tief in die Einzelheiten eindringen und nutzen zur Beschreibung des Verhaltens von Spannungen und Strömen die technische Stromrichtung von Plus nach Minus. Sie liegt auch der Pfeil-Symbolik in den Schaltbildern zugrunde.

2.2 Kennlinien und Kennwerte

Kennlinien

Der Transistor ist – trotz der einfachen Funktionserklärung – kein einfaches Bauelement. Sein Verhalten kann nicht durch eine einzige Kennlinie beschrieben werden. In den Abbildungen 2.4 bis 2.9 zeigen wir Beispiele von Transistorkennlinien. Tabelle 2.1 enthält die zugehörige Übersicht. Wie die Ströme und Spannungen definiert sind, wird in Abbildung 2.10 anhand der drei Transistor-Grundsaltungen gezeigt.

Hinweis:

In den Datenbüchern sind die Kennlinien oft einzeln dargestellt, gelegentlich aber zu einem *Vierquadranten-Kennlinienfeld* zusammengefaßt.

Oft sind in den Datenblättern weitere kennlinienförmige Darstellungen angegeben, die unter anderem die Verlustleistung, das Hochfrequenzverhalten, die parasitären Kapazitäten und das Rauschverhalten betreffen.

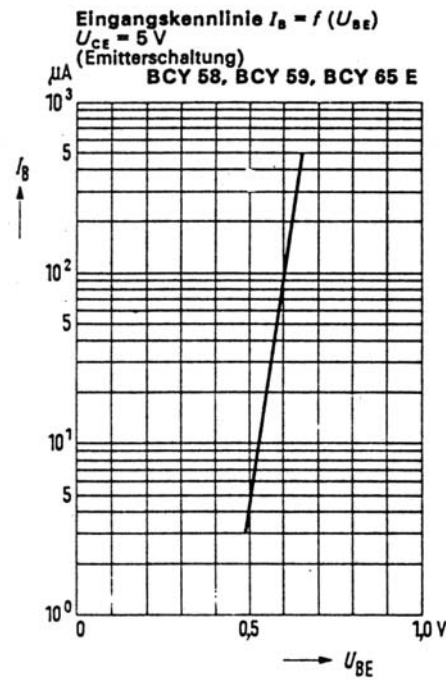


Abb. 2.4 Eingangskennlinie (Siemens).

Diese Kennlinie wird üblicherweise nur für eine typische Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} angegeben. Beachten Sie den Bereich der Basisspannungen, in dem der Basisstrom von Interesse ist.

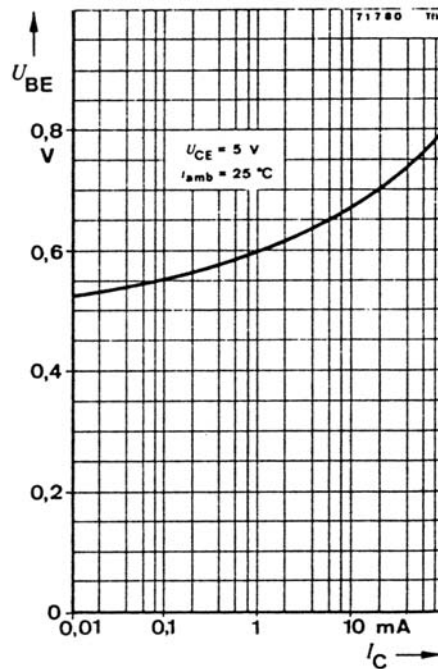


Abb. 2.5 Übertragungskennlinie (AEG-Telefunken).

Diese Kennlinie wird üblicherweise nur für eine typische Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} angegeben. Beachten Sie den Bereich der Basisspannungen, für den ein Kollektorstrom eingetragen ist.

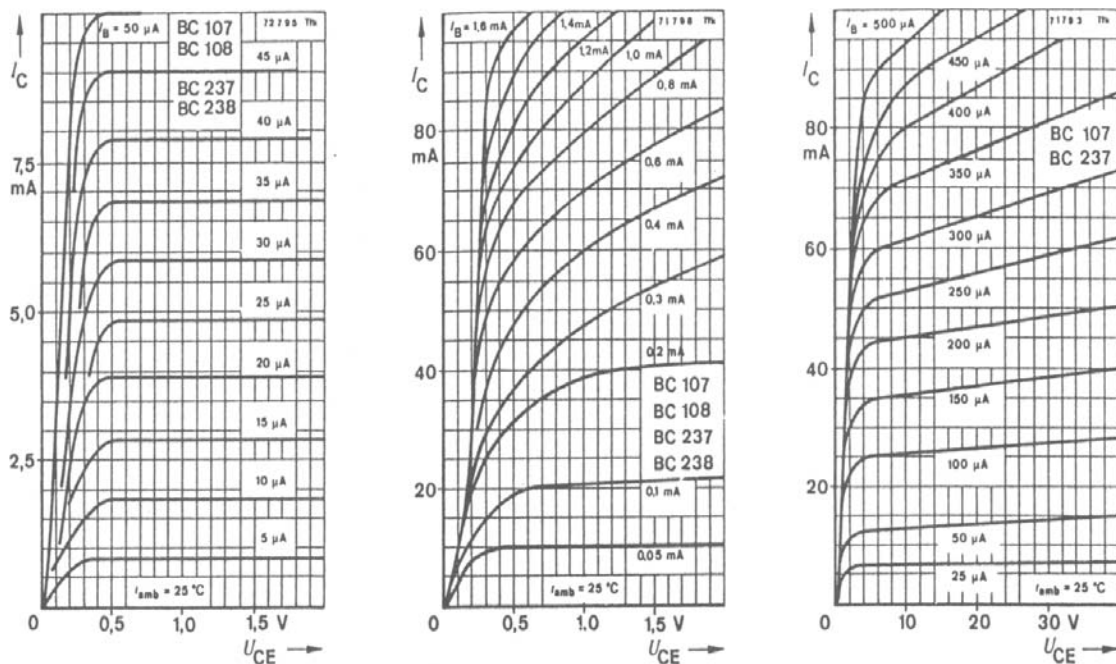


Abb. 2.6 Ausgangskennlinienfeld (AEG-Telefunken).

Dieses Kennlinienfeld gehört zu den wichtigsten Datenblattangaben: es zeigt auf, was hinten herauskommt (Kollektorstrom, Kollektor-Emitter-Spannung), wenn man vorn was reinsteckt (Basisstrom). In dieses Kennlinienfeld kann man die Arbeitspunkte und die Verlustleistungshyperbel eintragen. Manche Hersteller liefern nur recht grobe Kurvenverläufe, andere hingegen teilen – wie in der Abbildung gezeigt – die Kennlinie auf mehrere Diagramme auf, um im besonderen die Bereiche der niedrigen Ströme bzw. Spannungen genauer darzustellen. (Das hängt auch von den Vorzugs-Anwendungen des Transistors ab: um Verstärkerschaltungen zu dimensionieren, braucht man eine recht genaue Kennlinie, wird hingegen der Transistor vorwiegend als Schalter eingesetzt, reicht auch eine grobe.)

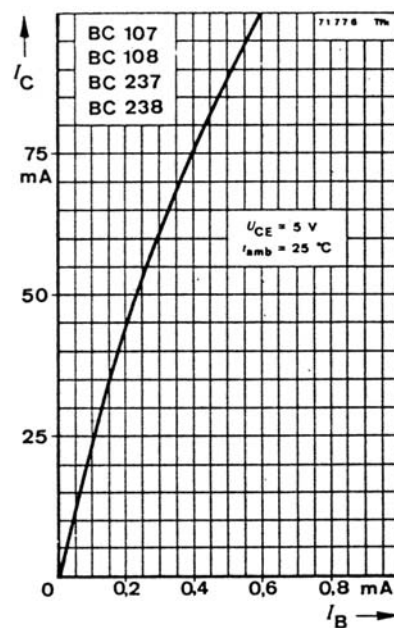


Abb. 2.7 Stromsteuerkennlinie (AEG-Telefunken).

In dieser Kennlinie ist die Abhängigkeit des Kollektorstroms vom Basisstrom dargestellt. Das Verhältnis beider Ströme ist die Stromverstärkung (genauer: die Gleichstromverstärkung) B:

$$B = \frac{I_C}{I_B}$$

Bezeichnung der Kennlinie	waagerechte Achse	senkrechte Achse	Parameter	Beispiel in Abbildung	Anordnung im Vierquadranten-Kennlinienfeld
Eingangskennlinie	Basis-Emitter-Spannung U_{BE}	Basisstrom I_B	Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE}	2.2.4	Quadrant III; U_{BE} senkrecht nach unten, I_B waagrecht nach links
Übertragungskennlinie	Kollektorstrom I_C	Basis-Emitter-Spannung U_{BE}	Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE}	2.2.5	manchmal in Quadrant IV, aber in Form $U_{BE} = f(I_{CE})$ mit I_B als Parameter
Ausgangskennlinie	Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE}	Kollektorstrom I_C	Basisstrom I_B	2.2.6	Quadrant I
Stromsteuerkennlinie	Basisstrom I_B	Kollektorstrom I_C	Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE}	2.2.7	Quadrant II
Stromverstärkungskennlinie (Forward Current Transfer Ratio h_{FE})	Stromverstärkung (Forward Current Transfer Ratio h_{FE})	Kollektorstrom I_C	Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE}	2.2.8	-
Sättigungsspannungskennlinie	Basisstrom I_B	Kollektorstrom I_C	Kollektor-Emitter-Sättigungsspannung U_{CEsat}	2.2.9	-

Tabelle 2.1 Transistor Kennlinien.

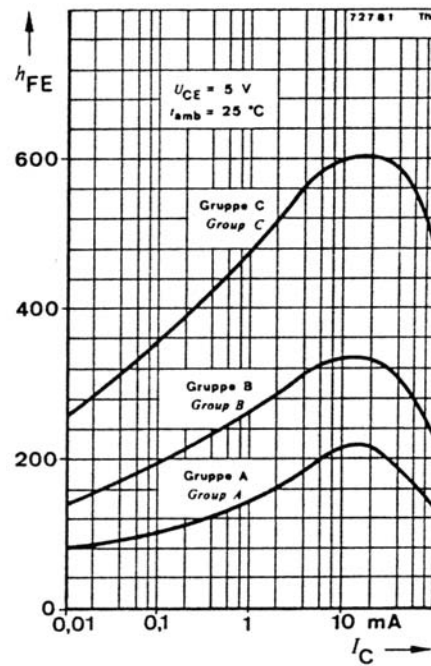


Abb. 2.8 Stromverstärkungskennlinie (AEG-Telefunken).

Die Stromverstärkungskennlinie gibt die Kurzschluß-Stromverstärkung h_{FE} in Abhängigkeit vom Kollektorstrom an. Im Beispiel wird der Transistortyp in 3 Stromverstärkungsgruppen (A, B, C) geliefert.

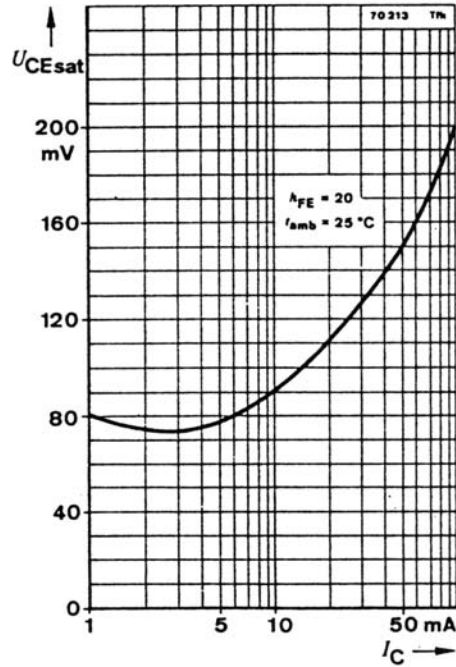


Abb. 2.9 Sättigungsspannungskennlinie (AEG-Telefunken).

Die Kennlinie zeigt die Abhängigkeit der Sättigungsspannung U_{CEsat} vom Kollektorstrom.

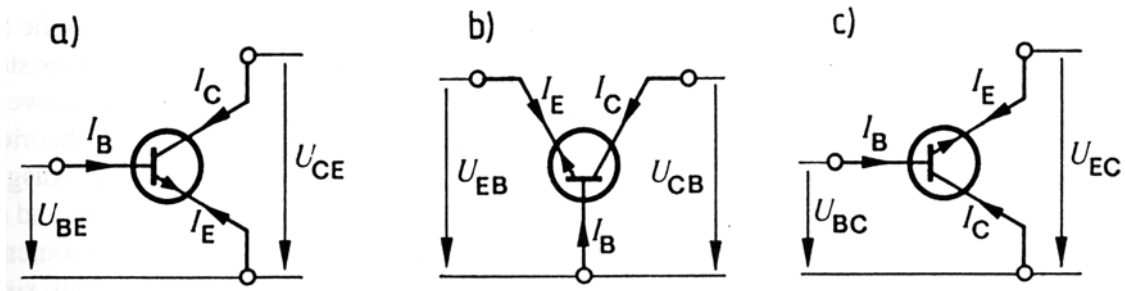


Abb. 2.10 Ströme und Spannungen am Transistor. a) Emitterschaltung, b) Basisschaltung, c) Kollektorschaltung (AEG-Telefunken)

2.3 Ersatzschaltungen

Transistor-Ersatzschaltbilder sind nicht gerade einfach. Als Beispiel zeigt Abbildung 2.11 das Ersatzschaltbild nach Giacoletto, das vorzugsweise benutzt wird, um den Transistor in typischen Analog-Anwendungen zu beschreiben. Es gilt für den sog. Kleinsignalbetrieb. Damit ist gemeint, daß man einen bestimmten Arbeitspunkt – Basisspannung, Basisstrom – eingestellt hat und das ankommende Signal an der Basis nur kleine Abweichungen um diesen Arbeitspunkt herum veranlaßt. Der extreme Gegensatz dazu ist der Schaltbetrieb. Um den Schaltbetrieb genauer zu modellieren, verwendet man andere Ersatzschaltbilder.)

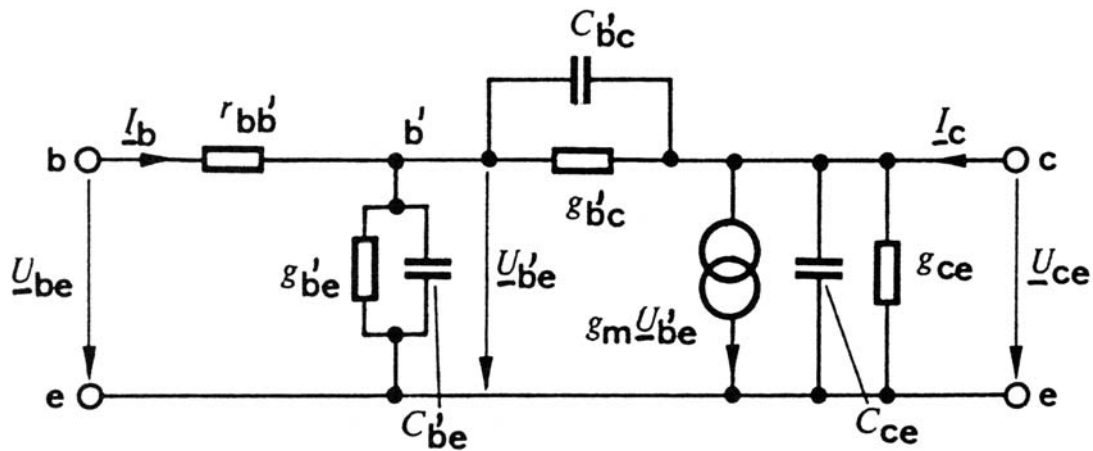


Abb. 2.11 Das Transistor-Ersatzschaltbild nach Giacoletto.

Die *h*- und die *y*- Parameter

Mit Ersatzschaltbildern versucht man, physikalische Sachverhalte so genau wie möglich nachzubilden. Oft reicht es aber aus, sich den Transistor als "black box" vorzustellen und nur das elektrische Verhalten durch passende Kennwerte in hinreichender Näherung zu beschreiben. Das ist der Grundgedanke der Vierpoltheorie. Ein Vierpol ist – zunächst ganz einfach – ein Kasten mit zwei Eingangs- und zwei Ausgangsklemmen. Über jedem Klemmenpaar liegt eine Spannung an, und durch jedes Klemmenpaar fließt ein Strom. Die Abhängigkeiten zwischen den Strömen und Spannungen werden durch Kennwerte (Parameter) beschrieben. Der große Vorteil: sind die Parameter erst einmal bestimmt, kann man damit ganz schematisch rechnen (Matrizenrechnung). Abbildung 2.13 gibt einen Überblick über die wichtigsten Parameter, mit denen Transistoren charakterisiert werden. Die Parameter haben auch eine anschauliche Bedeutung und sie sind oft in Typenlisten, Katalogen oder Vergleichstabellen zu finden.

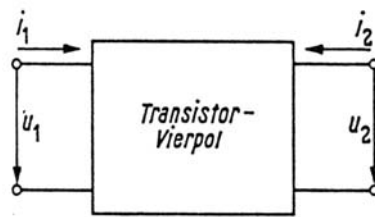


Abb. 2.12 Der Transistor als Vierpol.

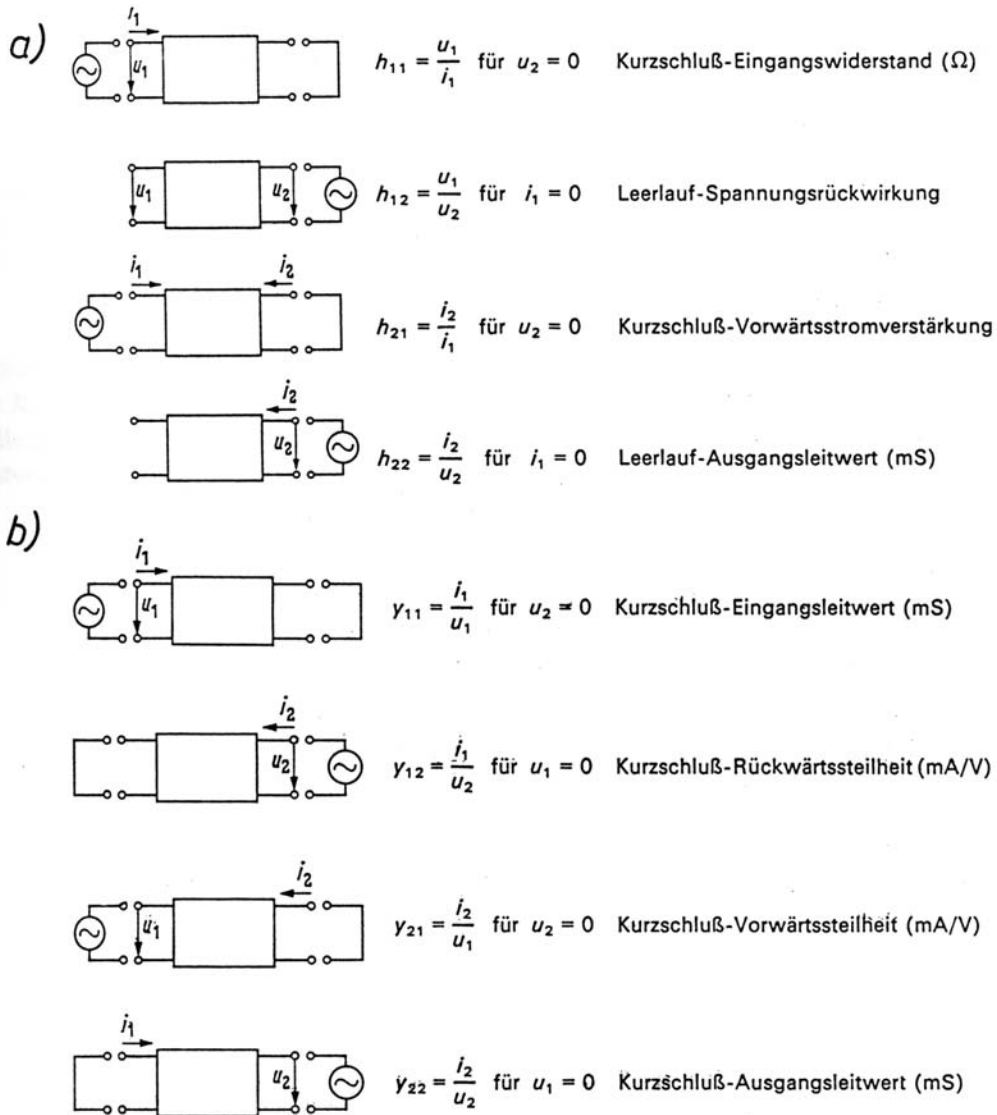


Abb. 2.13 Vierpol-Parameter des Transistors. a) h-Parameter, b) y-Parameter (Siemens).

2.4 Wichtige Kennwerte

Hinweise:

1. Kennwerte, die für den Schaltbetrieb typisch sind, betrachten wir in Kapitel 4 (Leistungselektronik). Dort zeigen wir auch, wie der sichere Arbeitsbereich des Transistors im Kennlinienfeld dargestellt wird (SOAR-Diagramm).
2. Zur Erinnerung: Spannungsbezeichnungen beginnen im Englischen mit V, im Deutschen mit U. Wir wollen hier im folgenden "U" beibehalten.

Höchstzulässiger Kollektorstrom $I_{C(max)}$

Das ist der höchstzulässige Gleichstrom, der durch die Kollektor-Emitter-Strecke fließen darf.

Weitere Stromkennwerte

Der *Kollektor-Spitzenstrom* I_{CM} ist der höchstzulässige Scheitelwert eines zeitveränderlichen Kollektorstromes (Frequenz ≤ 25 Hz; wenn der Verlauf nicht sinusförmig ist, muß das Tastverhältnis $\geq 0,5$ sein). I_{CM} ist meist größer als $I_{C(max)}$ ($I_{CM} = 1,1 \dots 2 I_{C(max)}$).

- Der *Basis-Gleichstrom* I_B ist der höchstzulässige Gleichstrom, der über den Basiseingang fließen darf. Das heißt in der Praxis: auch wenn es nicht darauf ankommt, den Transistor zu "übersteuern", muß der Basisstrom auf einen Wert $\geq I_B$ *begrenzt* werden. Des weiteren kann ein *Basis-Spitzenstrom* I_{BM} definiert sein.
- Der *Kollektor-Emitter-Reststrom* I_{CEO} ist der Strom, der bei anliegender Kollektor-Emitter-Sperrspannung U_{CEO} und offener Basis durch den (gesperrten) Transistor fließt. Weitere Reststromkennwerte betreffen Stromflüsse über den Basisanschluß (I_{CBO} , I_{EBO}).

Restströme (Cut-off Currents) moderner Siliziumtransistoren liegen in folgenden Bereichen:

- kleine Leistungen, niedrige Temperaturen: $< 1 \mu A$,
- höhere Temperaturen bzw. mittlere Leistung: $< 100 \mu A$,
- Leistungstransistoren, namentlich bei höheren Sperrspannungen und Temperaturen: $0,1 \dots 1$ mA (manchmal darüber).

Restströme sind temperaturabhängig (Abbildung 2.14).

Kollektor-Emitter-Sperrspannung $U_{CEO(max)}$

Das ist die Spannung über Kollektor und Emitter, die der (gesperrte) Transistor bei offener Basis "vertragen" muß.

Kollektor-Basis-Sperrspannung $U_{CBO(max)}$

Das ist die höchste zulässige Spannung zwischen Kollektor und Basis bei nicht angeschlossenem Emitter.

Sättigungsspannungen

Sättigungsspannungen sind stromabhängig.

- Die *Kollektor-Emitter-Sättigungsspannung* U_{CEsat} kennzeichnet den Spannungsabfall zwischen Kollektor und Emitter bei "voll" leitendem Transistor. Die Kollektor-Emitter-Sättigungsspannung eines SI-Transistors kleiner Leistung liegt typischerweise bei etwa 200 mV. Leistungstransistoren haben U_{CEsat} -Werte zwischen 0,5 und 6 V (typisch: 1,5... 3 V). Abbildung 2.15 gibt darüber Auskunft, wie U_{CEsat} im einzelnen definiert sein kann.

- Die *Basis-Emitter-Sättigungsspannung* U_{BEsat} kennzeichnet praktisch die Schwell- oder Schaltspannung des Transistors. Es muß wenigstens U_{BEsat} an der Basis anliegen, damit der Transistor voll leitend wird. Die Basis-Emitter-Sättigungsspannung eines SI-Transistors kleiner Leistung liegt typischerweise bei etwa 0,7 V. Bei wachsendem Basisstrom nimmt U_{BE} nur wenig zu (vgl. Abbildung 2.4). Ein Transistor, der mit $U_{BE} \geq U_{BEsat}$ betrieben wird, heißt "übersteuert". Typische U_{BE} -Werte, die einen Arbeitspunkt bei "analogem" Betrieb (Linearbetrieb) kennzeichnen, liegen zwischen $\geq 0,5$ und $< 0,7$ V (vgl. Abbildung 2.5). Bei Leistungstransistoren liegt U_{BEsat} typischerweise zwischen 1 und 4 V.

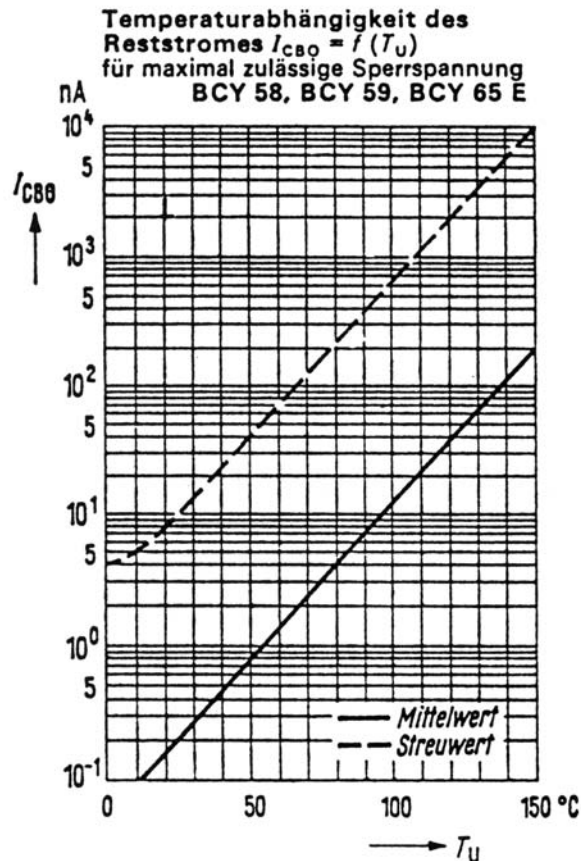


Abb. 2.14 Die Temperaturabhängigkeit des Reststroms (Siemens).

Übersteuerung

Übersteuerung liegt vor, wenn $U_{BE} > U_{CEB}$. Übersteuerungsgrenze: $U_{BE} = U_{CE}$ (Kollektor auf gleichem Potential wie die Basis; $U_{CB} = 0$).

Im Übersteuerungsfall: $I_B = m \cdot I_{BÜG}$. m = Übersteuerungsfaktor. Richtwert: $m = 2 \dots 4$. Dann erreicht U_{CE} seinen Minimalwert. Absolute Grenzen: max. Basisstrom, max. Spannungen U_{BE} und U_{CB} .

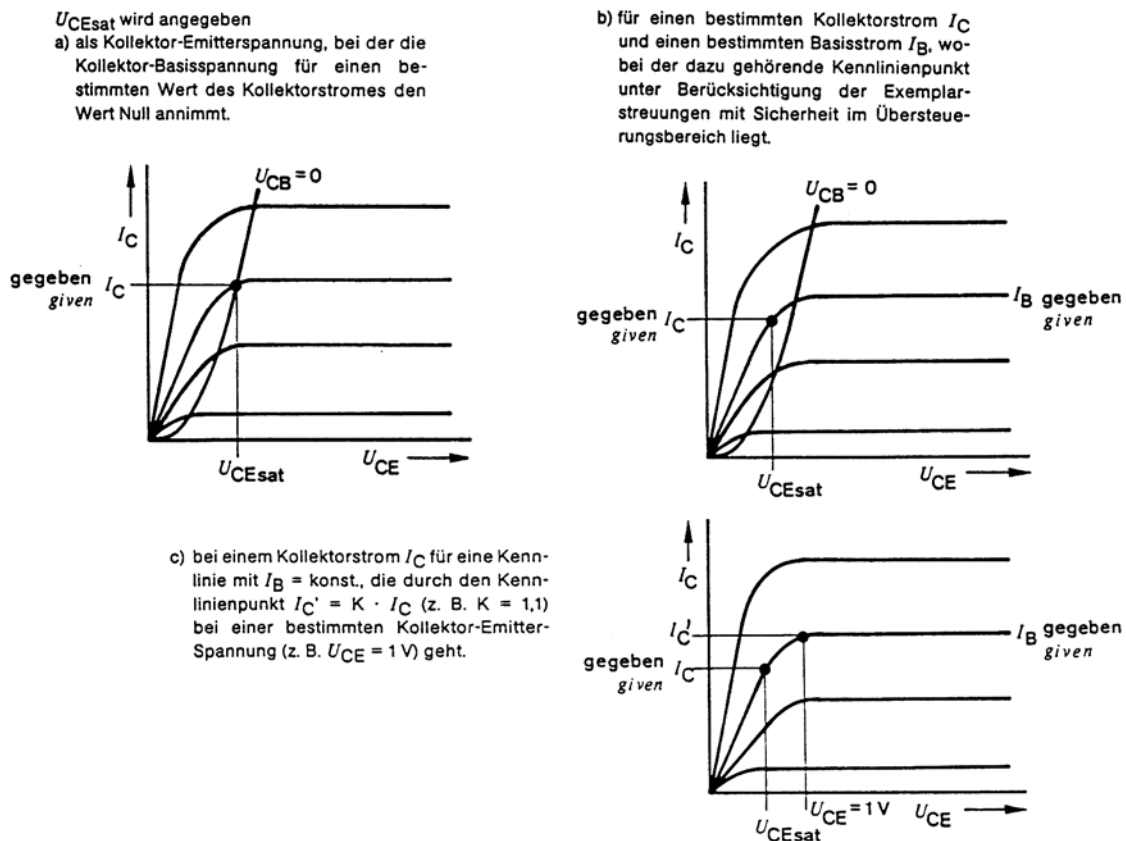


Abb. 2.15 Die Kollektor-Emitter-Sättigungsspannung U_{CEsat} näher betrachtet (AEG-Telefunken).

Stromverstärkung h_{FE}

Es gibt verschiedene Stromverstärkungsangaben. h_{FE} ist nur eine andere Bezeichnung für die Gleichstromverstärkung $B = I_C/I_B$, gemessen in Emitterschaltung.

Kurzschluß-Stromverstärkung h_{fe} oder β

h_{fe} (β) ergibt sich als Verhältnis von Kollektorwechselstrom zu Basiswechselstrom unter folgenden Bedingungen: (1) Kleinsignalbetrieb (kleine Aussteuerung; kein Schaltbetrieb), (2) Kollektor und Emittter für Wechselstrom kurzgeschlossen, (3) bestimmte Frequenz (typischerweise 1 kHz) und bestimmter Arbeitspunkt (steht im Datenblatt). h_{fe} gilt bei Betrieb des Transistors in Emitterschaltung; für die Basisschaltung gilt eine weitere Stromverstärkungsangabe h_{fb} .

Transitfrequenz f_T

Diese Angabe kennzeichnet die "Grenzfrequenz" eines Transistors. Der Wert ist mit Vorsicht zu genießen. Man darf nur Transitfrequenzen gleichartiger Transistoren miteinander vergleichen und auch nicht erwarten, daß man einen Transistor mit beispielsweise $f_T = 300 \text{ MHz}$ auch in einer Verstärker- oder Generatorschaltung einsetzen kann, die für 300 MHz ausgelegt ist. Die maximale *Schwingfrequenz* f_{max} ist erheblich niedriger (Faustregel: $f_{max} < 0,3 f_T$); die Frequenz, bei der der Transistor noch als richtiger Verstärker zu gebrauchen ist, liegt nochmals darunter (der Kennwert heißt h_{fe} -Grenzfrequenz f_{hfe}).

Genaugenommen ergibt sich f_T folgendermaßen:

$$f_T = \frac{1}{2 \pi t_t}$$

Dabei ist t_f die mittlere Laufzeit der Minoritätsträger durch die Basiszone des Transistors. f_T hängt von anderen Parametern ab. Um den näherungsweisen Vergleich zu ermöglichen, hat man in der Tabelle die zugehörigen Werte von Kollektorstrom I_C und Kollektor- Emitter-Spannung V_{CE} mit angegeben.

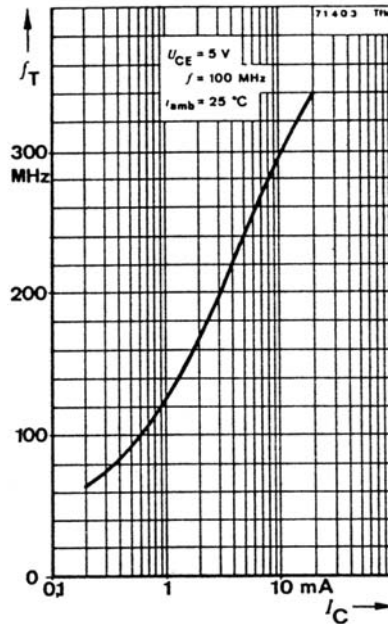


Abb. 2.16 Die Transitfrequenz in Abhängigkeit vom Kollektorstrom (AEG-Telefunken).

Höchstzulässige Verlustleistung $P_{v(max)}$ (auch: P_{tot})

Das ist die höchstzulässige Leistung, die im Transistor in Wärme umgesetzt werden darf ($P_{tot} = I_C \cdot U_{CE}$ im jeweiligen Arbeitspunkt). Der Höchstwert ist an bestimmte Gehäusetemperaturen gebunden, oft auch an Kühlvorschriften. Derart eingesetzte (zu kühlende) Transistoren nicht – auch nicht kurzzeitig – ohne Kühlvorkehrungen in Betrieb nehmen!

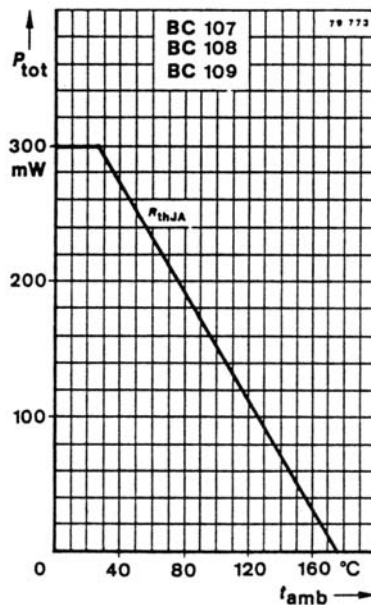


Abb. 2.17 Die zulässige Verlustleistung in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur (AEG-Telefunken).

2.5 Grundsaltungen

Wenn wir den Transistor als Vierpol betrachten (vgl. Abbildung.2.12), muß irgendeiner der drei Anschlüsse sowohl mit einer Eingangs- als auch mit einer Ausgangsklemme verbunden sein. Bei der Emitterschaltung ist der Emitter der Anschluß, der den Ein- und Ausgangstromkreisen gemeinsam ist, bei der Basisschaltung ist es die Basis usw. (vgl. Abbildung 2.10). Tabelle 2.2 gibt eine Übersicht über die grundsätzlichen Eigenschaften der drei Schaltungen.

	Emitterschaltung	Basisschaltung	Kollektorschaltung
Eingangswiderstand Z_1	mittel Z_{1e}	klein $Z_{1b} \approx \frac{Z_{1e}}{\beta}$	groß $Z_{1c} \approx \beta \cdot R_L$
Ausgangswiderstand Z_2	groß Z_{2e}	sehr groß $Z_{2b} \approx Z_{2e} \cdot \beta$	klein $Z_{2c} \approx \frac{Z_{1e} + R_E}{\beta}$
Stromverstärkung	groß β	< 1 $\alpha \approx \frac{\beta + 1}{\beta}$	groß $\gamma \approx \beta + 1$
Spannungsverstärkung	groß	groß	< 1
Leistungsverstärkung	sehr groß	groß	mittel
Grenzfrequenz	niedrig f_β	hoch $f_\alpha \sim \beta \cdot f_\beta$	niedrig $\approx f_\beta$

Tabelle 2.2 Emitterschaltung, Basisschaltung, Kollektorschaltung: ein Vergleich (Siemens). Die Ein- und Ausgangswiderstände sind grundsätzlich Wechselstromwiderstände (komplexe Widerstände, Impedanzen). Sie werden deshalb mit Z bezeichnet und nicht mit R.

Die Emitterschaltung

Die Emitterschaltung ist die sozusagen klassische Verstärkerschaltung. Eine kleine Basisstromänderung verursacht eine große Änderung des Kollektorstromes und folglich des Spannungsabfalls über dem Arbeitswiderstand. Wird die Spannung zwischen Emitter und Basis (die Eingangsspannung) erhöht, so steigt der Basisstrom. Entsprechend der Stromverstärkung steigt der Kollektorstrom. Mit wachsendem Stromfluß fällt über dem Arbeitswiderstand mehr Spannung ab, die Ausgangsspannung zwischen Kollektor und Emitter (Masse) wird demzufolge geringer.

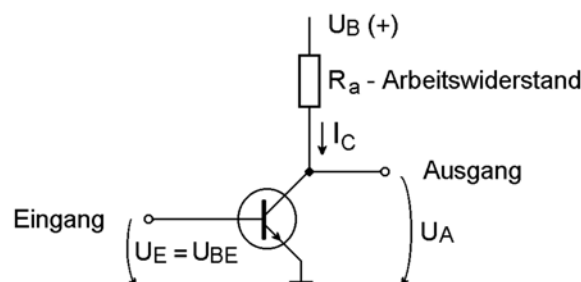


Abb. 2.18 Transistorstufe in Emitterschaltung.

Die Emitterschaltung bewirkt eine Phasenverschiebung von 180° zwischen Ein- und Ausgang (steigende Eingangsspannung führt zu fallender Ausgangsspannung und umgekehrt).

Einstellung des Arbeitspunktes

Der extreme Betriebsfall einer Transistorstufe in Emitterschaltung besteht darin, eine Basisspannung im Bereich zwischen 0 V und der Emitter-Basis-Sättigungsspannung ($\sim 0,7$ V) zuzuführen. Dann arbeitet der Transistor als Schalter und wirkt – wegen der Phasendrehung um 180° – aus "logischer" Sicht als Negator. Wie müssen wir aber den Transistor ansteuern, um analoge Signale zu verstärken? Hierbei sollen die zeitlichen Änderungen der Eingangsgröße ohne Einbußen, Verzerrungen oder Verfälschungen in entsprechende zeitliche Änderungen der Ausgangsgröße umgesetzt werden (Linearität der Verstärkung). Das ist dann gewährleistet, wenn die Kennlinie, die die Abhängigkeit der Ausgangsgröße von der Eingangsgröße beschreibt, eine (irgendwie geeignete) Gerade ist.

Die Kennlinien des Transistors sind aber alle irgendwie krumm! Betrachten wir beispielsweise Abbildung 2.5. Eine Änderung der Basis-Emitter-Spannung U_{BE} wird, je nachdem an welchem Punkt auf der U_{BE} -Achse wir ansetzen, zu unterschiedlich großen Änderungen des Kollektorstroms I_C führen. Der Ausweg: wir suchen uns ein Stück der Kennlinie heraus, das einigermaßen gerade ist. Der Mitte dieses Kennlinienstücks entspricht ein bestimmter Wert der Basis-Emitter-Spannung. Dies ist unser Arbeitspunkt, um den herum wir die Eingangsgröße nur um einen gewissen kleinen Betrag ändern. Der Bereich, der durch die zulässigen Änderungen nach oben und unten gegeben ist, heißt Aussteuerungsbereich. Bewegt sich die Eingangsgröße im Rahmen des Aussteuerungsbereichs, so arbeitet die Verstärkerstufe hinreichend linear.

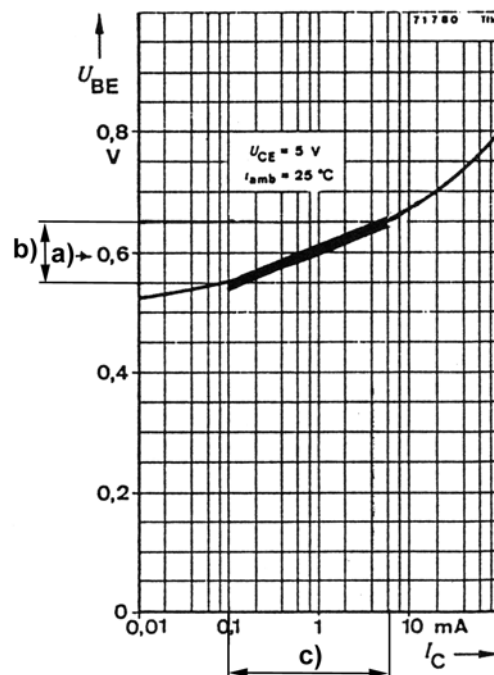


Abb. 2.19 Der Arbeitspunkt einer Transistorstufe. a) Arbeitspunkt, b) Aussteuerbereich, c) Bereich der Kollektorstromänderung.

Der Arbeitspunkt einer (Silizium-) Transistorstufe kleiner Leistung liegt typischerweise bei einer Basis-Emitter-Spannung U_{BE} von etwa 0,6 V. Die Basis-Emitter-Spannung, die den Arbeitspunkt bestimmt, heißt auch Basisvorspannung. Abbildung 2.20 zeigt verschiedene Möglichkeiten, die Basisvorspannung einzustellen.

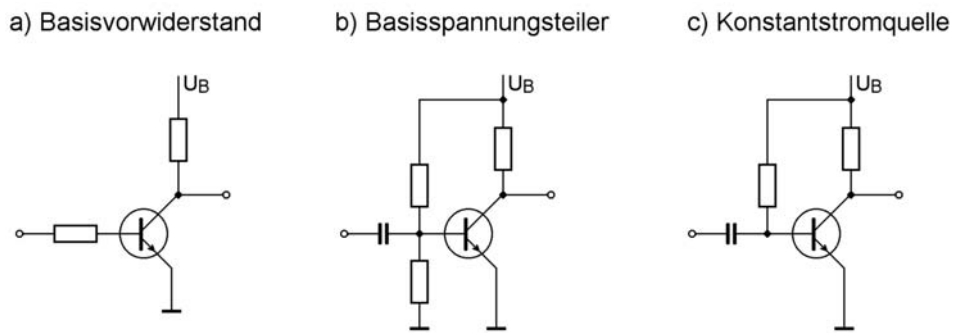


Abb. 2.20 Einstellung der Basisvorspannung.

Gegenkopplung

Transistorkennlinien sind nur in recht kleinen Abschnitten zufriedenstellend linear. Die Folgen: (1) der Aussteuerungsbereich ist vergleichsweise gering, (2) wie linear die Transistorstufe wirklich ist, hängt davon ab, wie genau die Arbeitspunkteinstellung während des Betriebs stabil gehalten werden kann.

Um diese Fragen zu beherrschen, kann man die Regelungstechnik zu Hilfe nehmen. Vom Ausgang wird eine Stellgröße auf den Eingang zurückgeführt, die den Abweichungen entgegenwirkt. Diese Gegenkopplung vermindert zwar die Verstärkung der Transistorstufe, verbessert aber die Linearität und die Stabilität der Arbeitspunkteinstellung. Zudem sind die entsprechenden Schaltungslösungen gar nicht einmal besonders aufwendig.

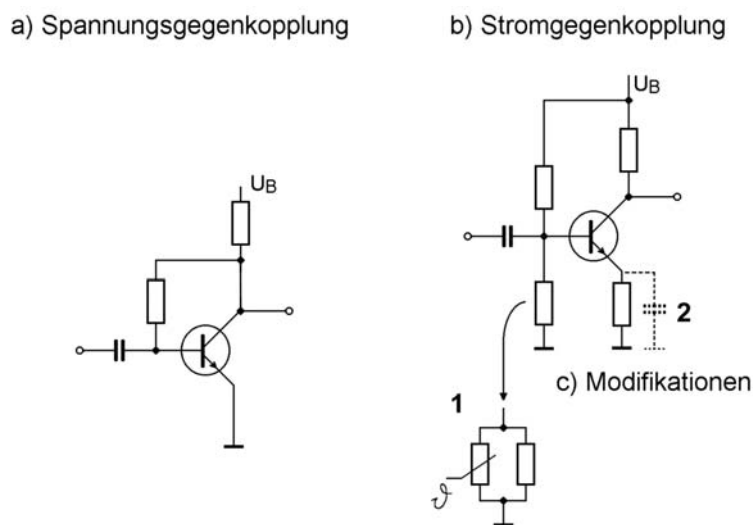


Abb. 2.21 Verstärkerstufen mit Gegenkopplung.

- a) Bei der Spannungsgegenkopplung wirkt die mit steigender Aussteuerung sinkende Kollektorspannung der Aussteuerung entgegen.
- b) Bei der Stromgegenkopplung bewirkt eine Zunahme des Emittersstroms, daß der Emitter – bezogen auf das Massepotential – positiver wird. Damit verringert sich die Basis-Emitter-Spannung.
- c) Modifikationen: (1) ein parallelgeschalteter Heißleiter im Basisspannungsteiler verbessert die Temperaturstabilität, (2) ein Kondensator über dem Emittewiderstand vermindert bzw. unterdrückt die Gegenkopplung für Wechselstrom (Frequenzgangkorrektur).

Abbildung 2.22 zeigt eine typische Verstärkerschaltung.

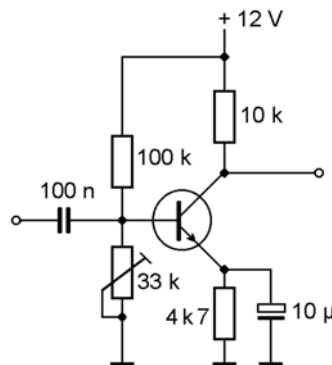


Abb. 2.22 Verstärkerstufe in Emitterschaltung.

Die Basisschaltung

Auch wenn die Basis an Masse angeschlossen ist, kommt eine Verstärkungswirkung zustande. Schwankt die Eingangsspannung am Emitter, so schwankt damit auch die Basis-Emitter-Spannung U_{BE} . Demgemäß ändert sich der Kollektorstrom, und das wiederum wirkt sich am Arbeitswiderstand als entsprechender Spannungsabfall aus. Eine niedrigere Spannung am Eingang (Emitter) erhöht U_{BE} , so daß ein stärkerer Kollektorstrom fließt. Das bedeutet einen höheren Spannungsabfall am Arbeitswiderstand und somit eine geringere Ausgangsspannung gegen Masse. Ein- und Ausgangsspannungen ändern sich hier also gleichsinnig. Allerdings ist von der Basisschaltung keine *Stromverstärkung* zu erwarten: der Kollektorstrom muß schließlich – vermindert um den sehr geringen Basisstrom – zum Emitter wieder hinausfließen. Ein hoher Strom am Eingang bei geringer Spannung bedeutet aber einen geringen Widerstand.

Die Basisschaltung hat einen sehr geringen Eingangswiderstand. Es gibt keine Phasenverschiebung zwischen Eingang und Ausgang. Die Basisschaltung eignet sich wegen ihrer hohen Grenzfrequenz vorzugsweise als Hochfrequenzverstärker.

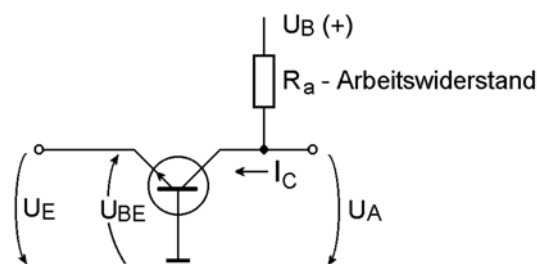


Abb. 2.23 Transistorstufe in Basisschaltung.

Arbeitspunkteinstellung

Auch wenn es im Schaltbild ungewohnt aussieht: die Verhältnisse entsprechen jenen der Emitterschaltung. Die Basis muß gegenüber dem Emitter um typischerweise etwa 0,6 V positiv vorgespannt sein, damit das Ganze funktioniert. (Sie müssen auf die *Spannungsdifferenzen* achten, auch wenn die Bauelemente in ungewohnter Lage dargestellt sind.) Abbildung 2.24 zeigt übliche Schaltungslösungen.

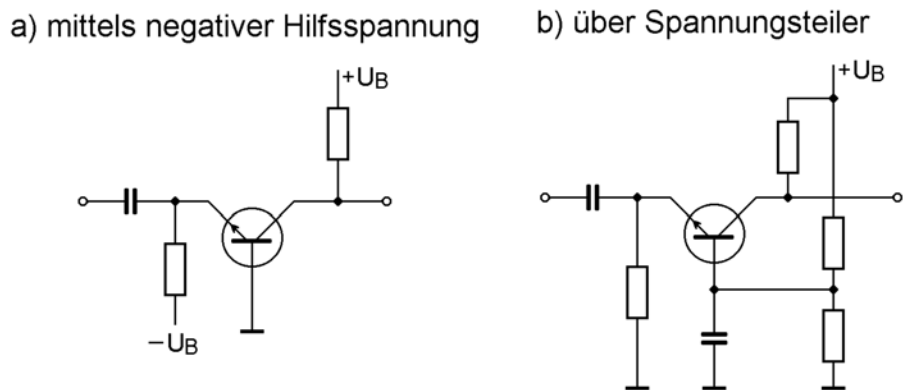


Abb. 2.24 Verstärkerstufen in Basisschaltung.

Die Kollektorschaltung

Bei der Kollektorschaltung ist der Arbeitswiderstand zwischen Emitter und Masse angeordnet. Steigt die Eingangsspannung (an der Basis), so wächst der Kollektorstrom. Damit steigt auch der Emitterstrom, der durch den Arbeitswiderstand fließt. Entsprechend wächst auch die Ausgangsspannung. Nun kommt aber dadurch der Emitter auf positiveres Potential; die Basis-Emitter-Spannung U_{BE} sinkt, der Emitterstrom wird geringer, demgemäß wird auch die Ausgangsspannung geringer, wodurch U_{BE} wieder ansteigt usw. Ist eine solche Schaltung überhaupt brauchbar? – Wie man durch Aufbauen und Messen leicht nachweisen kann, funktioniert sie tatsächlich. Die hier nacheinander beschriebenen Vorgänge laufen ja im Transistor gleichzeitig ab. Der Arbeitswiderstand wirkt im Sinne einer Gegenkopplung, so daß die Emitterspannung (= Ausgangsspannung) immer der Basisspannung nachfolgt. Die Schaltung heißt deshalb auch Emitterfolger. Dabei ist die Emitterspannung um den Betrag der Basis-Emitter-Sättigungsspannung U_{BEsat} (etwa 0,7 V) geringer als die Basisspannung. Der Ausgangswiderstand der Schaltung entspricht dem Arbeitswiderstand. Dieser kann so niederohmig ausgelegt werden, wie dies die Kennwerte des Transistors zulassen. Der Eingangswiderstand ist demgegenüber hoch, da nur der vergleichsweise geringe Basisstrom fließt.

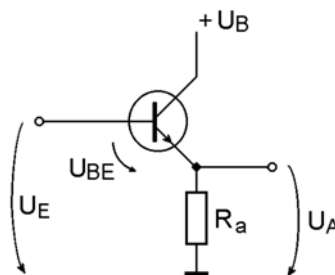


Abb. 2.25 Transistorstufe in Kollektorschaltung.

Die Kollektorschaltung hat einen sehr hohen Eingangs- und einen geringen Ausgangswiderstand. Sie wird deshalb auch als Impedanzwandler bezeichnet. Es gibt s keine Phasenverschiebung zwischen Eingang und Ausgang

Arbeitspunkteinstellung

Der Arbeitspunkt wird üblicherweise mit einem Widerstand, der als Konstantstromquelle dient, oder mit einem Spannungsteiler eingestellt (Abbildung 2.26).

a) mit Konstantstromquelle b) mit Spannungsteiler

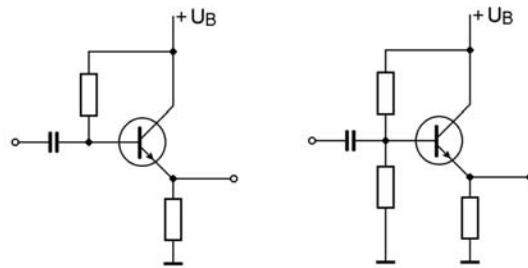


Abb. 2.26 Verstärkerstufen in Kollektorschaltung.

2.6 Weitere Grundschaltungen

Darlingtonschaltung

Die Darlingtonschaltung besteht aus zwei Transistoren, wobei der zweite dem ersten als Emitterfolger nachgeschaltet ist. Diese Anordnung erscheint als ein einziger Transistor mit interessanten Eigenschaften:

- die Gesamt-Stromverstärkung ist das Produkt der Stromverstärkungen beider Transistoren. Man kann also enorme Stromverstärkungen realisieren.
- Der Leitfähigkeitstyp des Gesamttransistors entspricht dem Leitfähigkeitstyp des ersten Transistors. Man kann also aus einem kleinen PNP-Transistor und einem preisgünstigen "dicken" NPN-Leistungstransistor einen PNP-Leistungstransistor bauen.
- Die Basis-Emitter-Sättigungsspannung (Schwellenspannung) ist die Summe der Schwellenspannungen beider Transistoren (typische Werte zwischen 1,4 und etwa 3,5 V).

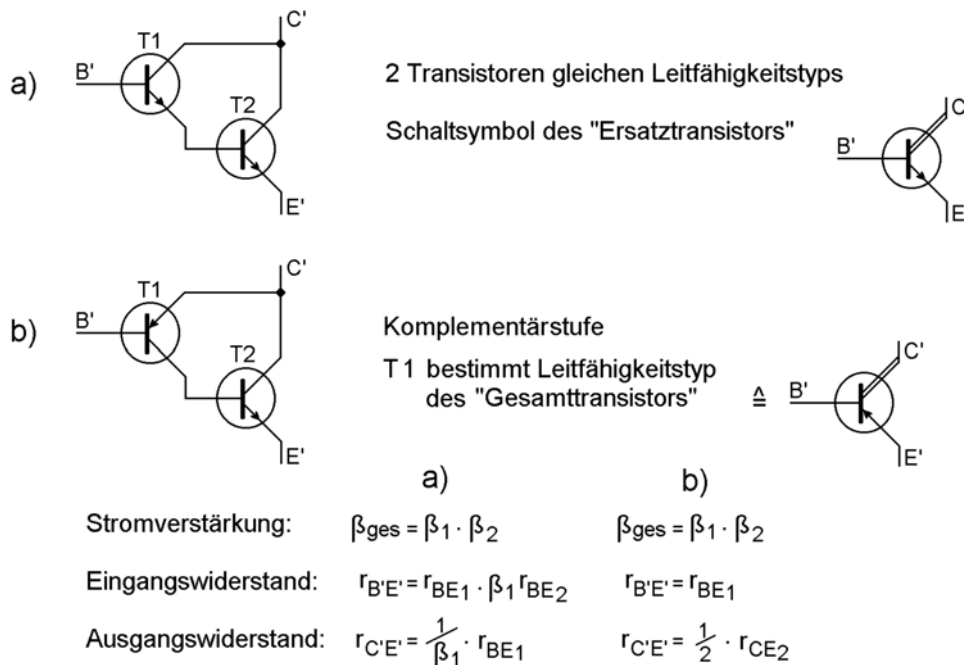


Abb. 2.27 Darlington-Transistoren.

Darlington-Transistoren gibt es auch als komplette integrierte Bauelemente.

Phasenumkehrschaltung

Die Phasenumkehrschaltung liefert zwei an sich gleichartige Ausgangssignale, die gegeneinander um 180° phasenverschoben sind. Es handelt sich praktisch um die Kombination von Emitter- und Kollektorschaltung. Die Spannungsverstärkung der Anordnung ist – wie bei der Kollektorschaltung – kleiner als 1.

Die Schaltung wird dazu benutzt, um aus einem Signal zwei gleichartige Signale mit entgegengesetzter Phase abzuleiten (bezogen auf den Schaltbetrieb: aus einem Signal am Eingang wird an einem Ausgang ein gleichartiges und am anderen ein negiertes Signal). Solche Signale werden beispielsweise benötigt, um Gegentaktstufen anzusteuern.

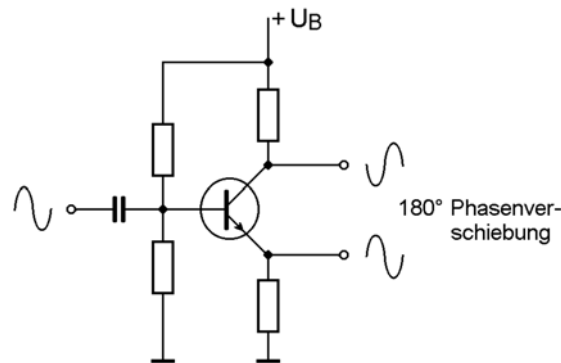


Abb. 2.28 Phasenumkehrschaltung.

Gegentaktchaltung

Die Gegentaktchaltung (auch Komplementärschaltung genannt) besteht aus zwei Emitterfolgern, die hintereinandergeschaltet sind. Diese Schaltung ist im besonderen für Leistungs- bzw. Endstufen üblich. Die Last wird dabei an dem Punkt angeschlossen, an dem beide Emitterfolger zusammengeschaltet sind. Dabei wirkt der eine Transistor, wenn die Ausgangsspannung steigen, und der andere, wenn sie sinken soll. (Wegen dieser Arbeitsweise ist auch die bildhafte Bezeichnung Push-Pull-Stufe üblich.)

Die Komplementärschaltung im eigentlichen Sinne enthält Transistoren unterschiedlichen Leitfähigkeitstyps (NPN + PNP; Abbildung 2.29). In quasikomplementären Schaltungen haben beide Transistoren denselben Leitfähigkeitstyp. Zum Ansteuern einer Gegentaktchaltung verwendet man üblicherweise eine Phasenumkehrstufe oder eine komplementäre Vorstufe.

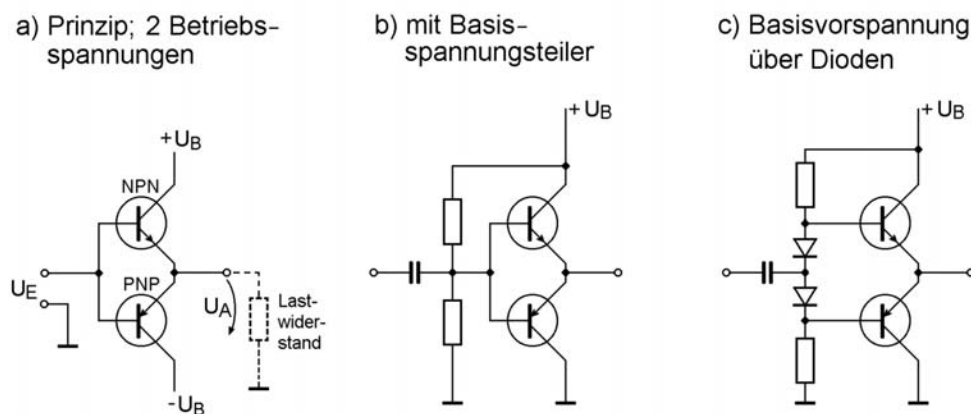


Abb. 2.29 Komplementärschaltungen.

Kaskodeschaltung

Die Kaskodeschaltung hat 2 Transistoren. Sie besteht aus einer Stufe in Kollektorschaltung, der eine weitere Stufe in Basisschaltung nachgeordnet ist. Die Kaskodeschaltung ist eine bevorzugte Grundschaltung in Hochfrequenz- und Meßverstärkern.

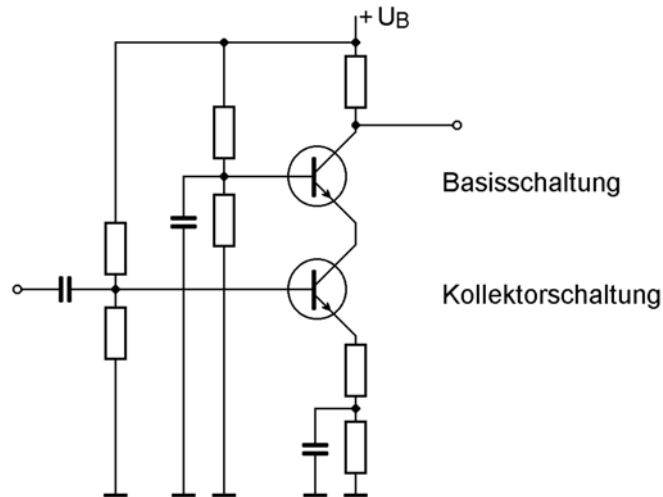


Abb. 2.30 Kaskodeschaltung.

Die Anordnung dient dazu, die Auswirkungen des sog. Miller-Effekts zu verringern.

Der Miller-Effekt

Jedes Bauelement ist unvermeidlich mit parasitären Kapazitäten behaftet. In der Emitterschaltung ist die Kapazität zwischen Kollektor und Basis von besonderer Bedeutung: sie erscheint am Eingang um die Spannungsverstärkung der Schaltung vergrößert:

Eingangskapazität = Spannungsverstärkung · technisch bedingter Basis-Kollektor-Kapazität

Der Grund: eine kleine Änderung der Eingangsspannung führt zu einer großen Änderung der Ausgangsspannung. Diese Änderung wirkt aber über die Basis-Kollektor-Kapazität auf den Eingang zurück! Bei Spannungsänderungen am Eingang entsteht also eine starke Gegenkopplung, die die Änderung der Ausgangsspannung zeitweilig hemmt. Das ist dieselbe Wirkung, die ein entsprechend großer Kondensator am Eingang hätte. Diese als Miller-Effekt bekannte Tatsache ist sogar technisch ausnutzbar: schaltet man einen richtigen Kondensator zwischen Basis und Kollektor, so werden aus Rechteckimpulsen am Eingang Sägezahnimpulse am Ausgang (Miller-Integrator; Abbildung 2.31).

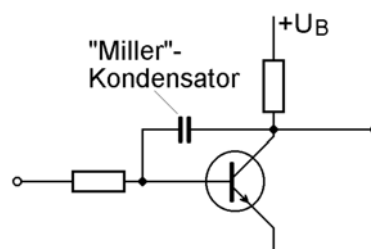


Abb. 2.31 Miller-Integrator.

Bei der Basisschaltung sieht es günstiger aus. Die Basis-Kollektor-Kapazität kann sich am Eingang gar nicht auswirken, und die Kapazität zwischen Kollektor und Emittor wirkt jener zwischen Emittor und Basis sogar entgegen. Die Basisschaltung hat aber einen sehr geringen Eingangswiderstand. In der Kaskodeschaltung ist deshalb der Basisschaltung eine Kollektorschaltung als Impedanzwandler vorgeordnet.

Differenzverstärker

Der Differenzverstärker besteht aus zwei gleichartigen ("symmetrischen") Transistorstufen mit zusammenschalteten Emittoren. Er hat zwei Eingänge und zwei Ausgänge.

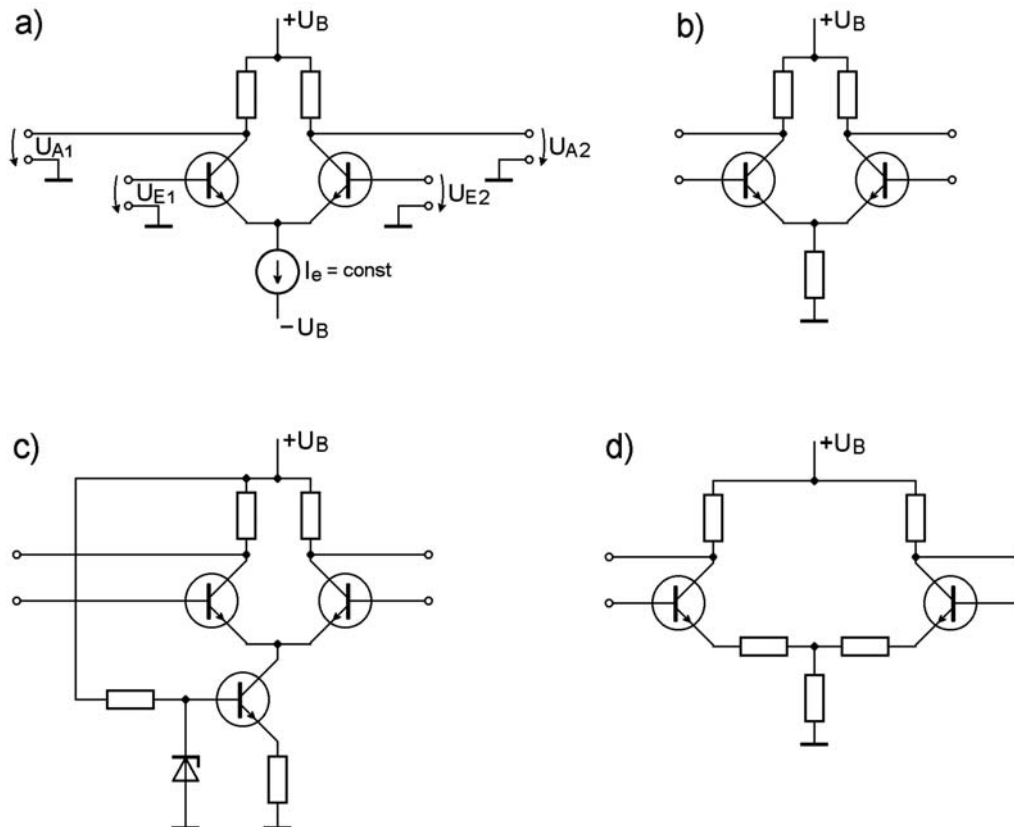


Abb. 2.32 Differenzverstärker. a) Prinzipschaltung, b) gemeinsamer Emittorwiderstand als Konstantstromquelle, c) mit einer richtigen Konstantstromquelle, d) mit Stromgegenkopplung in den Emittorzeigenen.

Der Gesamt-Emittorstrom wird über eine Konstantstromquelle (im einfachsten Fall über einen entsprechend hochohmigen Widerstand) geliefert. Somit muß die Summe der Kollektorströme beider Transistoren stets konstant sein. Die Folge: legt man an beide Eingänge die gleiche Spannung, so führen auch beide Ausgänge gleiche Pegel. Nur Eingangsspannungsdifferenzen werden verstärkt, wobei sich die Ausgangsspannungen jeweils entgegengesetzt ändern: nimmt die Spannung am Eingang 1 gegenüber der am Eingang 2 zu, so nimmt die Ausgangsspannung an Ausgang 1 ab und an Ausgang 2 zu. Mit anderen Worten: An beiden Ausgängen liegen Spannungen an, die der Spannungsdifferenz zwischen beiden Eingängen entsprechen. Der zum jeweiligen Eingang gehörende Ausgang liefert dabei einen um 180° phasenverschobenen (gegenphasigen) Werteverlauf, der jeweils andere Ausgang hingegen einen nicht phasenverschobenen (gleichphasigen).

Differenzverstärkerstufen bilden die schaltungstechnische Grundlage der Operationsverstärker.