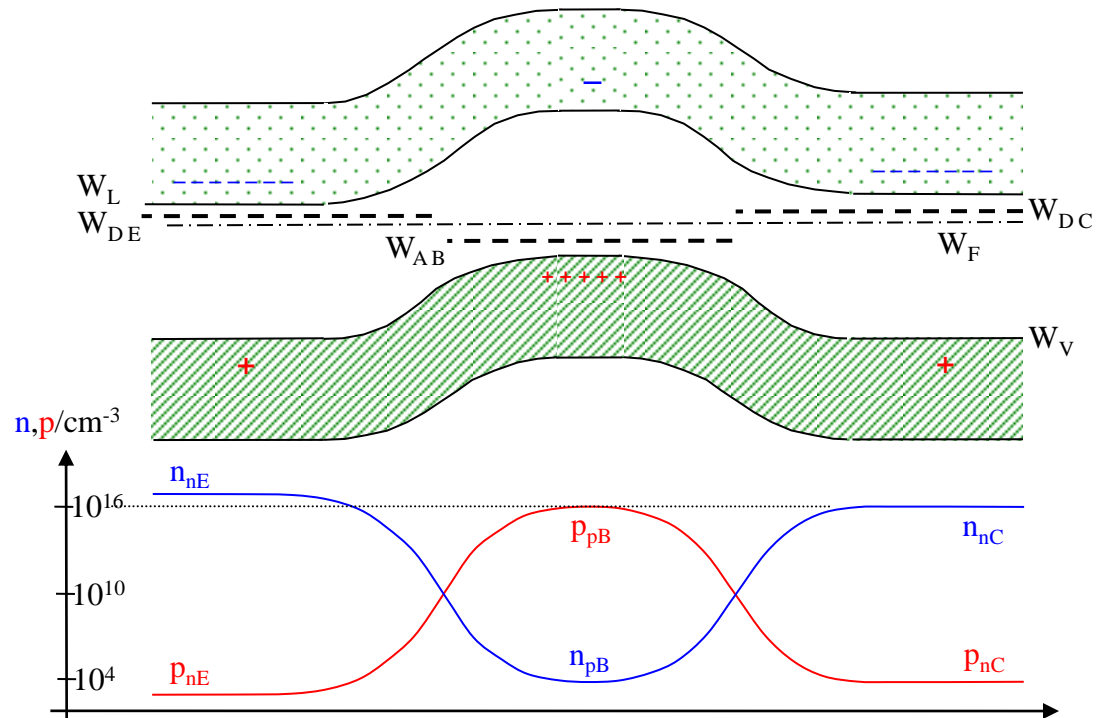
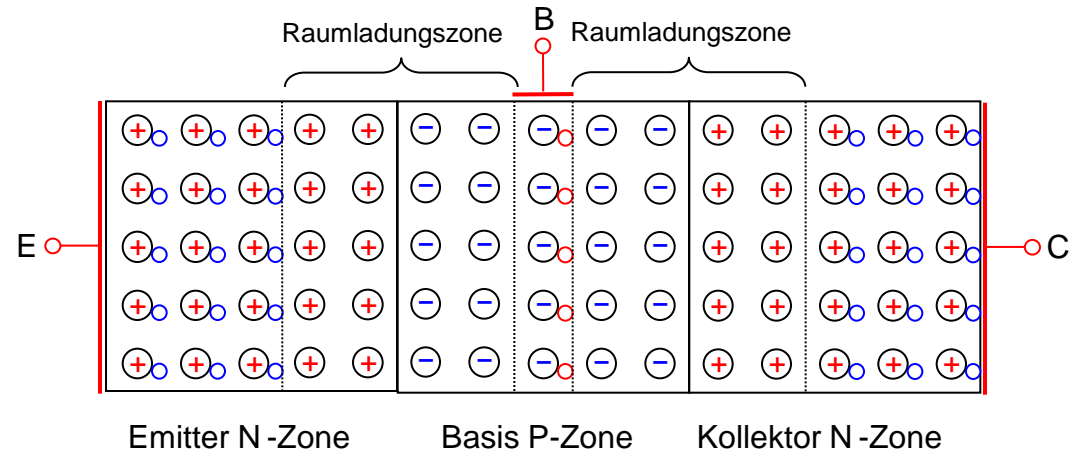


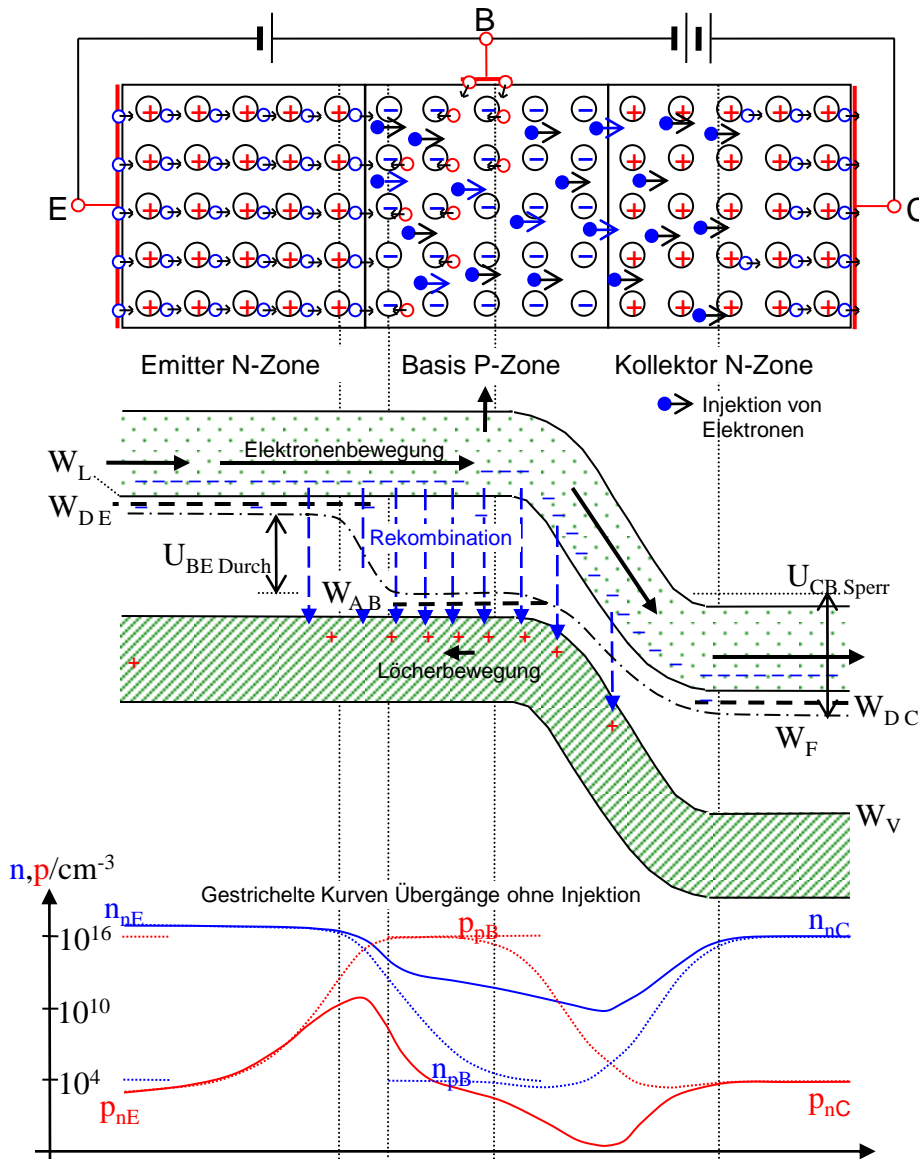
2.3 Bipolartransistor

Drei Halbleiterschichten ungleichen Leitungstyps mit einer **Mittelschicht dünner als die Diffusionslänge** ergibt den Bipolartransistor.

Emitter ist höher dotiert \rightarrow höhere Majoritätsträgerdichte (n_{nE}).

Ein Mechanismus der Elektronen in die Basis bringt \rightarrow steuerbarer Strom zum Kollektor \leftarrow Basis–Emitter–Spannung in Durchlassrichtung.



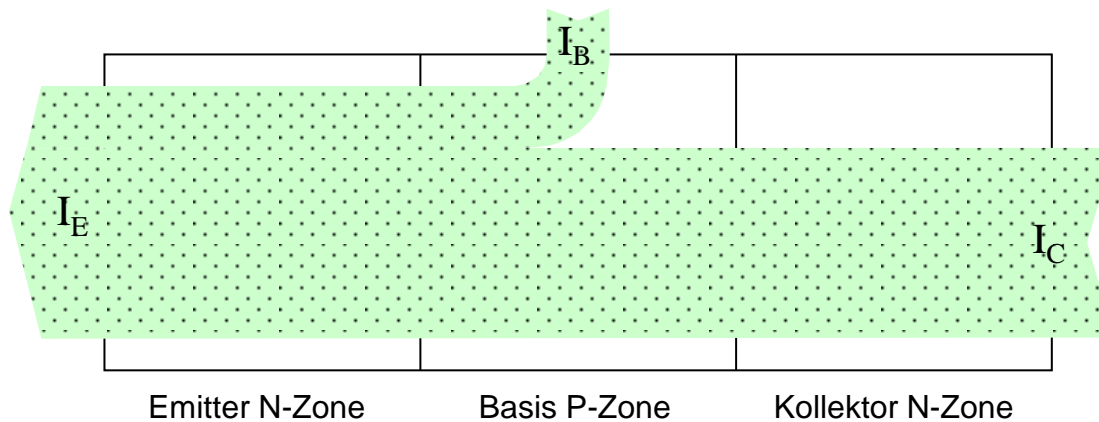


Elektronen in der Basis können nicht vollständig rekombinieren, weil Basis zu dünn ist. (Zur größeren Trägerinjektion ist Emitter höher dotiert.)

Löcher von der Basiselektrode gehen durch Rekombination schnell in Elektronenstrom über.

Kollektor – Basis – Spannung in Sperrrichtung (n-Minoritätsträger) treibt die Elektronen weiter **zum Kollektor**.

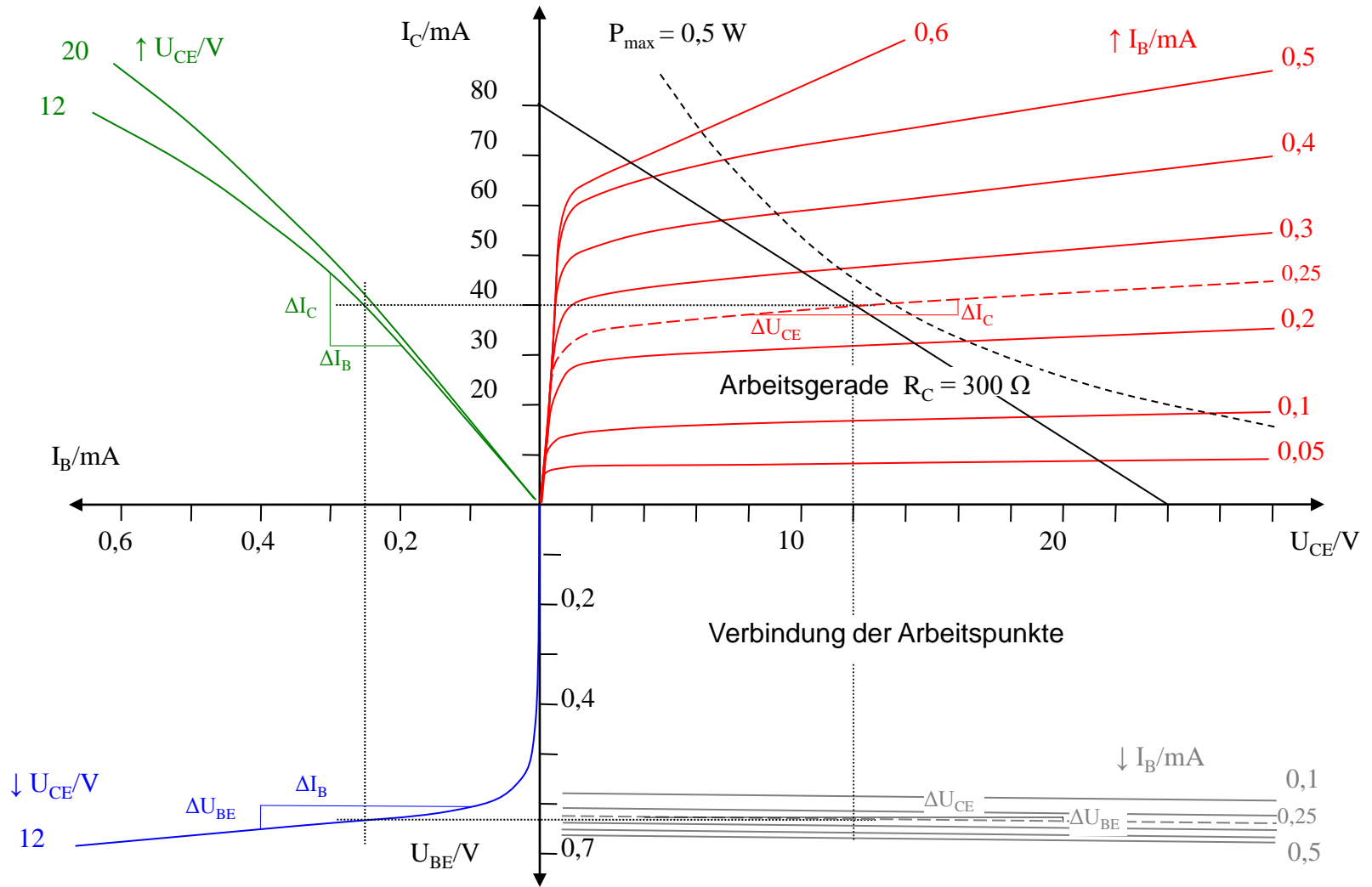
Der Basisstrom **steuert** die Größe der Injektion, auch wenn die meisten Elektronen **zum Kollektor weiterfließen**.



pnp – Transistor: in Beschreibung Elektronen gegen Löcher tauschen und Spannungsquellen umpolen → Injektion von Löchern vom Emitter in die Basis.

Transistor kann auch in umgekehrte Richtung betrieben werden. Aber **inverser Transistor** hat sehr schlechte Kennwerte durch die geringere Dotierung des Kollektors.

Die übliche Darstellung des **Kennlinienfeldes** zeigt in jedem Quadranten eine Zusammenstellung von jeweils zwei Variablen und einen Parameter für die Kurvenscharen.



Standard-NF-Transistor mit 0,5 W



1. Quadrant: **Ausgangskennlinie** $I_C = f(U_{CE})$ mit Parameter I_B
2. Quadrant: **Steuerkennlinie** $I_C = f(I_B)$ mit Parameter U_{CE}
3. Quadrant: **Eingangskennlinie** $U_{BE} = f(I_B)$ mit Parameter U_{CE}
4. Quadrant: **Rückwirkungskennlinie** $U_{BE} = f(U_{CE})$ mit Parameter I_B



Arbeitsgerade: durch Kollektorwiderstand R_C (zwischen Kollektor und Spannungsquelle), wird U_{CE} (entsprechend $I_C \cdot R_C$) gegenüber der Batteriespannung verringert, bei **Wahl** muss **maximale Verlustleistung** und ein möglichst **großer linearer Bereich** für die Steuerung beachtet werden. **(Es können U_{Bat} und R_C gewählt werden.)**

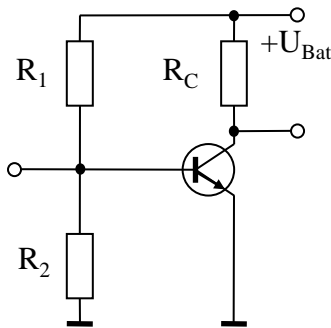
(P_{max} folgt aus maximaler Wärmeabgabe des Transistors.)

Arbeitspunkt: $U_{CE} = 12 \text{ V}$, $I_C = 40 \text{ mA}$ und $U_B = 0,25 \text{ mA}$ in Abbildung

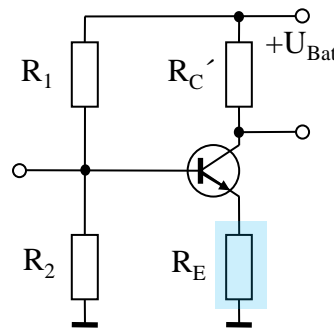
Dimensionierung Transistorschaltung: Wahl des Arbeitspunktes und U_B , R_C , Bestimmung von I_B und $U_{BE} \rightarrow$ Spannungsteiler zur Erzeugung des I_B , (U_B).

Für Parameter der Ersatzschaltungen: Anstiege $\Delta I_C / \Delta U_{CE}$, $\Delta I_C / \Delta I_B$, $\Delta U_{BE} / \Delta I_B$ und $\Delta U_{BE} / \Delta U_{CE}$

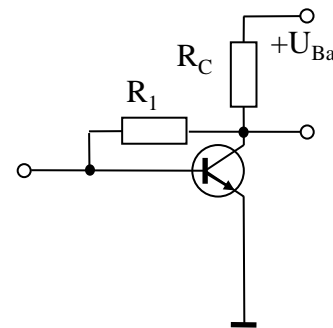
Die Festlegung des **Arbeitspunktes** ist der erste Schritt zur Dimensionierung einer Transistorverstärkerstufe.



$$R_C = \frac{U_{\text{Bat}} - U_{\text{CE}}}{I_C}$$



$$R_1 + R_2 = \frac{U_{\text{Bat}}}{10 I_B}$$



$$\text{und} \quad \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{U_{\text{BE}}}{U_{\text{Bat}}}$$

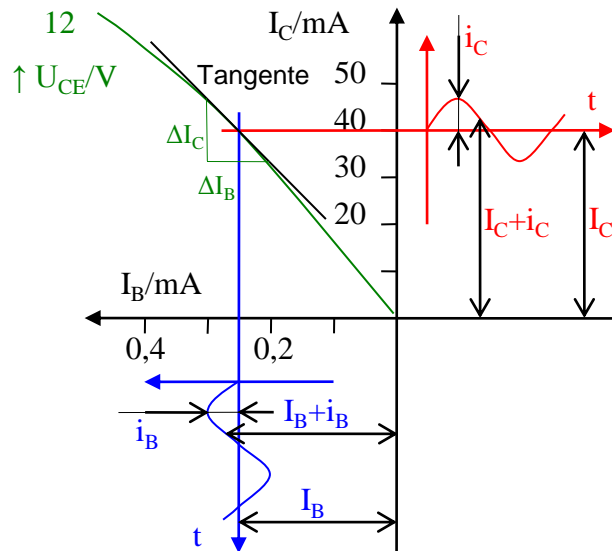
Wegen **Exemplarstreuung** bei Transistoren für Testbetrieb besser **Einstellregler**

Stabilisierung gegen Verschiebung des Arbeitspunktes durch Erwärmung → Kollektorwiderstand in $R_{C'}$ und **Emitterwiderstand** R_E aufteilen.

Anstieg von I_C (somit I_E) reduziert U_{BE} um Spannungsanstieg an R_E und rückwirkend I_C (Prinzip der Gegenkopplung).

Für **Signal** R_E durch Kondensator „**kurzschließen**“

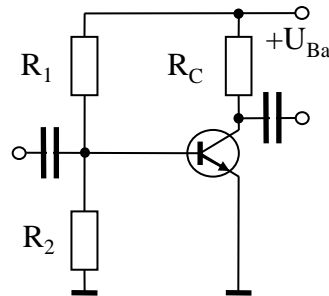
Betrachtungsweise: **Kleinsignalaussteuerung** → Behandlung der Transistorstufe (**Überlagerungsprinzip**). → Durchbruch für Schaltungstechnik.



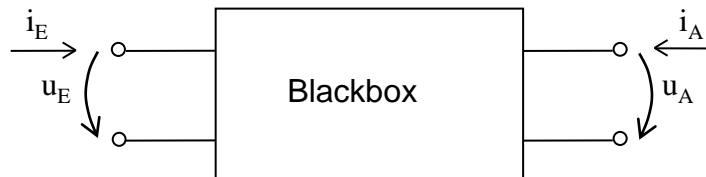
Überlagerungsprinzip: lineare Elementen

→ kleiner Bereich um den Arbeitspunkt
 \approx Tangente im Arbeitspunkt. →

1. **Dimensionierung** des Arbeitspunktes (Gleichstromquelle U_{Bat}) ohne Signale
2. **Behandlung der Signale** ohne Stromversorgung



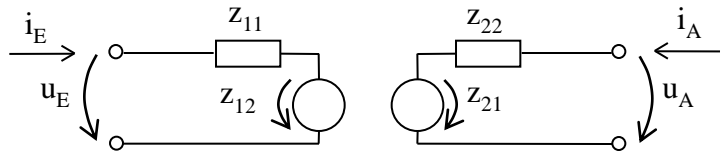
Vierpole sind wichtige Abstraktionsform und allgemeines Denkprinzip für einfach handhabbare Ersatzschaltungen (vergleiche auch Ersatzzweipole).



1. Widerstandsform (günstige Reihenschaltung der Ein- und Ausgänge)

$$u_E = z_{11} i_E + z_{12} i_A$$

$$u_A = z_{21} i_E + z_{22} i_A$$



$$\begin{aligned} z_{11} &= u_E / i_E \mid i_A = 0 & z_{22} &= u_A / i_A \mid i_E = 0 \\ z_{12} &= u_E / i_A \mid i_E = 0 & z_{21} &= u_A / i_E \mid i_A = 0 \end{aligned}$$

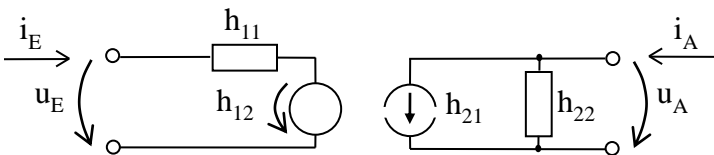
2. Leitwertform (günstige Parallelschaltung der Ein- und Ausgänge)

3. Hybridform (günstig Eingang mit Reihen-, Ausgang mit Parallelschaltung)

(auch umgekehrt)

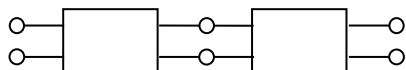
$$u_E = h_{11} i_E + h_{12} u_A$$

$$i_A = h_{21} i_E + h_{22} u_A$$



$$\begin{aligned} h_{11} &= u_E / i_E \mid u_A = 0 & h_{22} &= i_A / u_A \mid i_E = 0 \\ h_{12} &= u_E / u_A \mid i_E = 0 & h_{21} &= i_A / i_E \mid u_A = 0 \end{aligned}$$

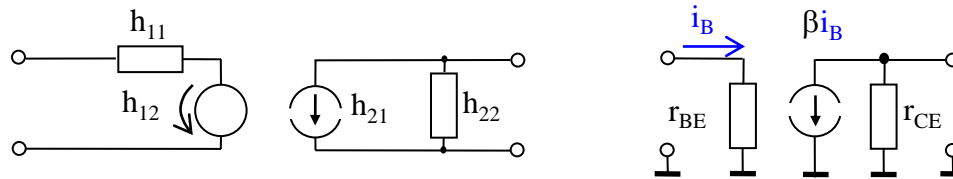
4. Kettenform (günstig für Kettenschaltungen) (auch Ausgang = f{Eingang}) (innere Struktur bleibt bei dieser Form „abstrakt“)



Vierpolgleichungen → Matrizenform → Matrixkonvertierungen → Parametern umwandeln

Transistorschaltungen Verwendung der Hybridform mit h-Parametern

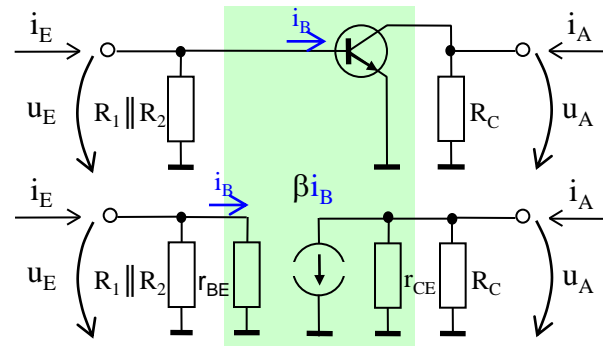
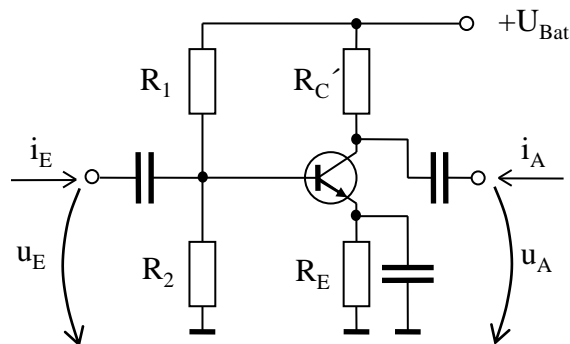
Messvorschrift = Anstiege in Kennlinie $\Delta U_{BE}/\Delta I_B$, $\Delta I_C/\Delta U_{CE}$, $\Delta U_{BE}/\Delta U_{CE}$ und $\Delta I_C/\Delta I_B$



mit $h_{11} = r_{BE}$, $h_{22} = r_{CE}$, $h_{12} = 0$, $h_{21} = \beta$ und i_B als Steuergröße

Drei Transistorgrundschaltungen mit unterschiedlichen Betriebs-eigenschaften. An Kleinsignalersatzschaltungen deutlich sichtbar.

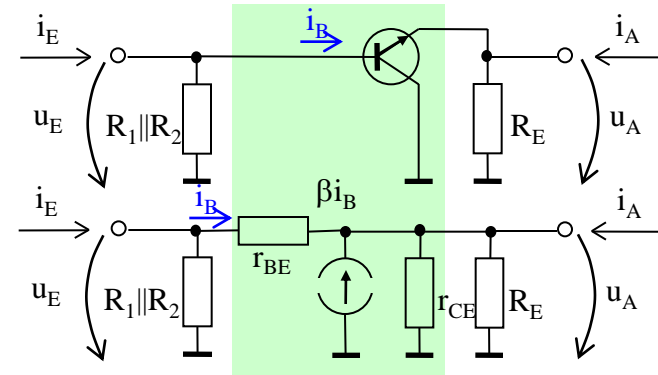
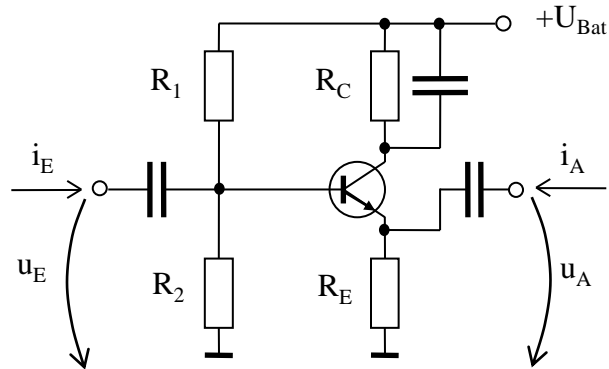
Emitterschaltung:



R_{EIN} mittel
 R_{AUS} mittel
 v_u leer gegenphasig hoch
 v_i kurz hoch

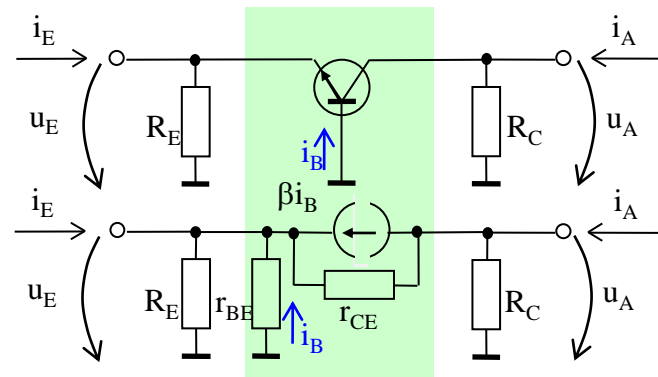
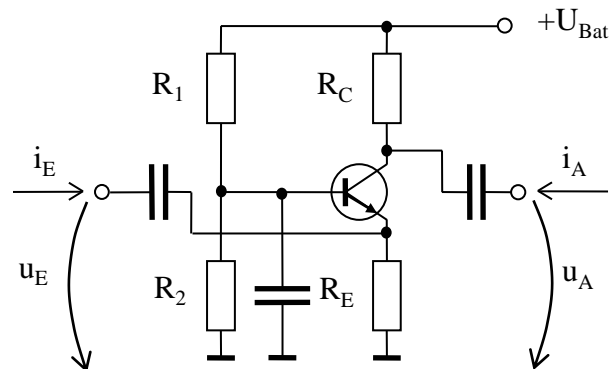
Kondensatoren sowie Batterie sollen für Signalfrequenz keinen Widerstand (0Ω) haben. (Für Gleichstrom haben sie einen unendlichen Widerstand.)

Kollektorschaltung:



R_{EIN} hoch, R_{AUS} niedrig, $v_{u \text{ leer}} < 1$, $v_{i \text{ kurz}}$ gegenphasig hoch

Basisschaltung:



R_{EIN} niedrig, R_{AUS} hoch, $v_{u \text{ leer}}$ hoch, $v_{i \text{ kurz}} \approx -1$

Aufgabe 2.3.1

Für einen Transistor empfiehlt der Hersteller den Arbeitspunkt $U_{CE} = 5 \text{ V}$ und $I_C = 2 \text{ mA}$. Die Gleichstromverstärkung wird mit $B = 180$ für diesen Arbeitspunkt angegeben. Zur Spannungsversorgung steht eine 12 V Batterie zur Verfügung.

Frage 1: Wie sind R_C , R_1 und R_2 zu wählen?

Hinweis: Aus B kann I_B bestimmt werden, nur Normwerte (E 6 mit 20 %) verwenden.

Frage 2: Wie verändert sich R_C' , wenn ein R_E mit 220Ω eingesetzt werden soll?

Frage 3: Wie könnte die Schaltung aussehen mit einem Einstellregler für R_1 und R_2 ?

Aufgabe 2.3.2

Für den gleichen Arbeitspunkt, wie er in Aufgabe 2.3.1 verwendet wird, gibt der Hersteller für 1 kHz die h -Parameter $h_{11} = 2,7 \text{ k}\Omega$, $h_{22} = 18 \mu\text{S}$, $h_{12} = 10^{-4}$ und $h_{21} = 220$ an. Für eine Verstärkerstufe in Emitterschaltung kann damit und mit den in Aufgabe 2.3.1 ermittelten Werten für R_C' (R_E soll durch einen Kondensator unwirksam sein), R_1 und R_2 die Leerlaufspannungsverstärkung $v_{u \text{ leer}} = u_A/u_E$ bei $i_A = 0$ bestimmt werden.

Frage: Wie groß ist $v_{u \text{ leer}}$?

Hinweis: Am Eingang die Stromteilung beachten; am Ausgang reicht die Gesamtspannung.

Aufgabe 2.3.3

Für einen Leistungstransistor empfiehlt der Hersteller den Arbeitspunkt $U_{CE} = 2 \text{ V}$ und $I_C = 150 \text{ mA}$. Die Gleichstromverstärkung wird mit $B = 100$ für diesen Arbeitspunkt angegeben. Zur Spannungsversorgung steht eine 12 V Batterie zur Verfügung.

Frage 1: Wie sind R_C , R_1 und R_2 zu wählen?

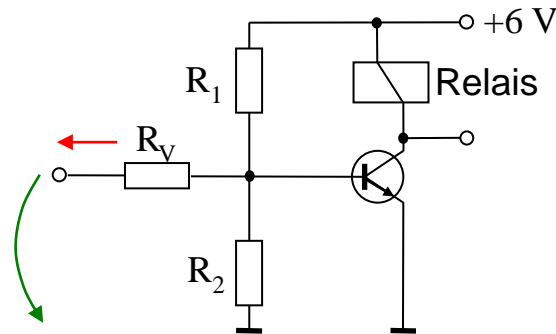
Hinweis: Aus B kann I_B bestimmt werden, nur Normwerte (E 6 mit 20 %) verwenden.

Frage 3: Wie könnte die Schaltung aussehen mit einem Einstellregler für R_1 und R_2 ?

Zusatzaufgabe: Vergleiche die Ergebnisse mit Aufgabe 2.3.1!

Aufgabe 2.3.4

Ein Transistor soll ein Relais (6 V, 10 mA mit $I_{\text{Schalt}} > 8 \text{ mA}$, $I_{\text{Abfall}} < 5 \text{ mA}$) schalten.



Das Eingangssignal beträgt entweder Low-Signal : 0 V ... max. 0,2 V und max. 2 mA oder
High-Signal: 5 V ... min. 3,4 V und max. -0,2 mA.

Auf der Arbeitsgeraden in der Kennlinie wurden zwei Arbeitspunkte ausgewählt:

$$I_C = 9,75 \text{ mA}, U_{CE} = 0,15 \text{ V}, I_B = 0,1 \text{ mA}, U_{BE} \approx 0,7 \text{ V}$$

$$I_C = 0,5 \text{ mA}, U_{CE} = 5,7 \text{ V bei } I_B \approx 0 \text{ mA}, U_{BE} < 0,4 \text{ V.}$$

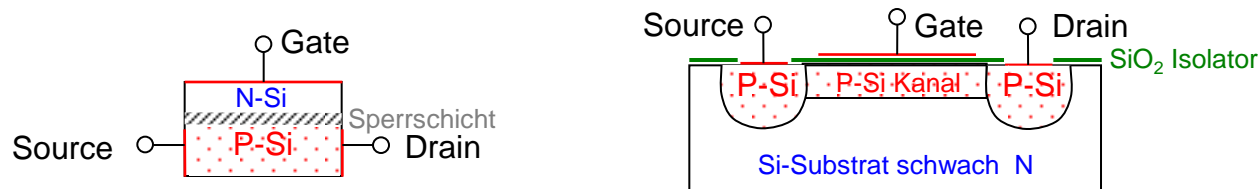
Der Transistor wirkt als Schalter (kein Kleinsignal).

Frage: Wie groß sind R_1 , R_2 und R_V zu wählen?

Hinweis: Ungünstige Fälle berücksichtigen. Es werden praktisch zwei Arbeitspunkte (Teilschaltung des Eingangs für Low- und High- Signal) einzeln dimensioniert. Da es mehr Unbekannte (R_1 , R_2 , R_V , I_E , U_{BLow}) als Gleichungen sowie Ungleichungen gibt, muss gewählt werden. Vorschlag: $R_1 = \infty$ versuchen.

2.4 Feldeffekttransistor

Ende der 1920er Jahre als unipolarer Transistor „erfunden“
Erst mit entwickelter Siliziumtechnologie Produktion möglich

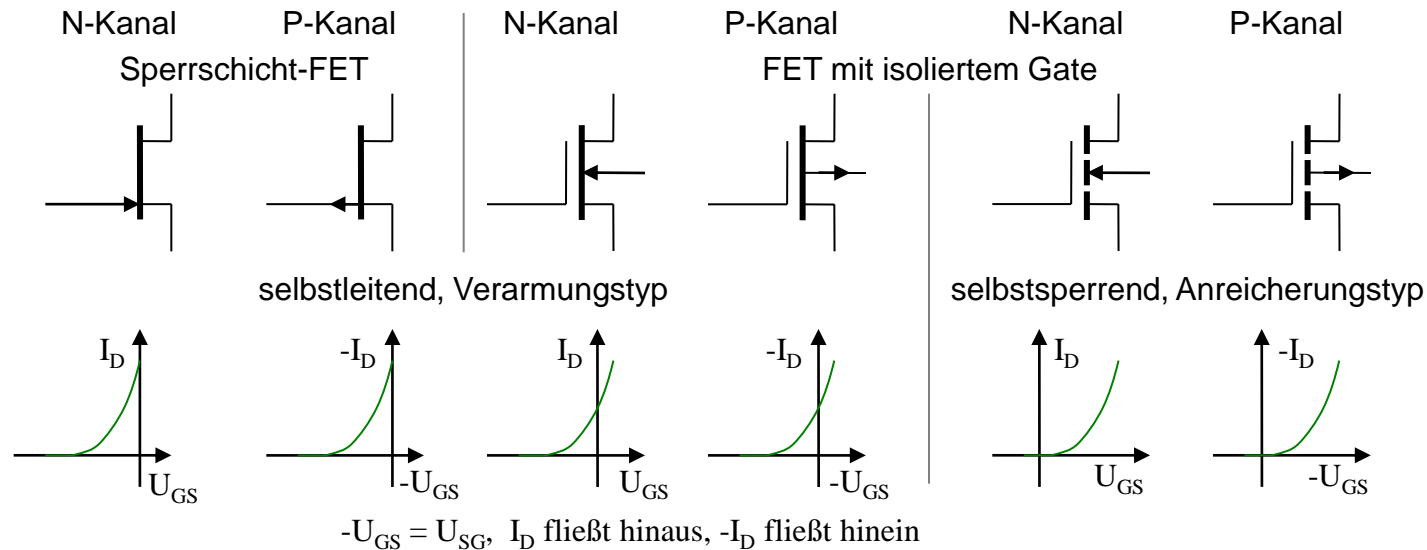


Leitfähigkeit des Kanals wird durch Anreicherung bzw. Verdrängung der Träger durch elektrisches Felde vom Gate zum Kanal gesteuert.

Sperrschicht-Feldeffekttransistor: Verdrängung der Träger in Sperrzone mit zunehmender Spannung

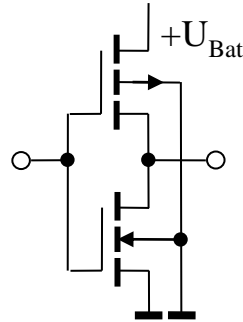
Feldeffekttransistor mit isoliertem Gate: Gateelektrode – Isolator – Kanal entspricht einem **Kondensator**. Feld des Kondensators verdrängt Träger um notwendige Ladung (Raumladung der feststehenden Ionen) zu speichern.

Aus Überlegung folgen **sechs Typen** von Feldeffekttransistoren (FET) gibt

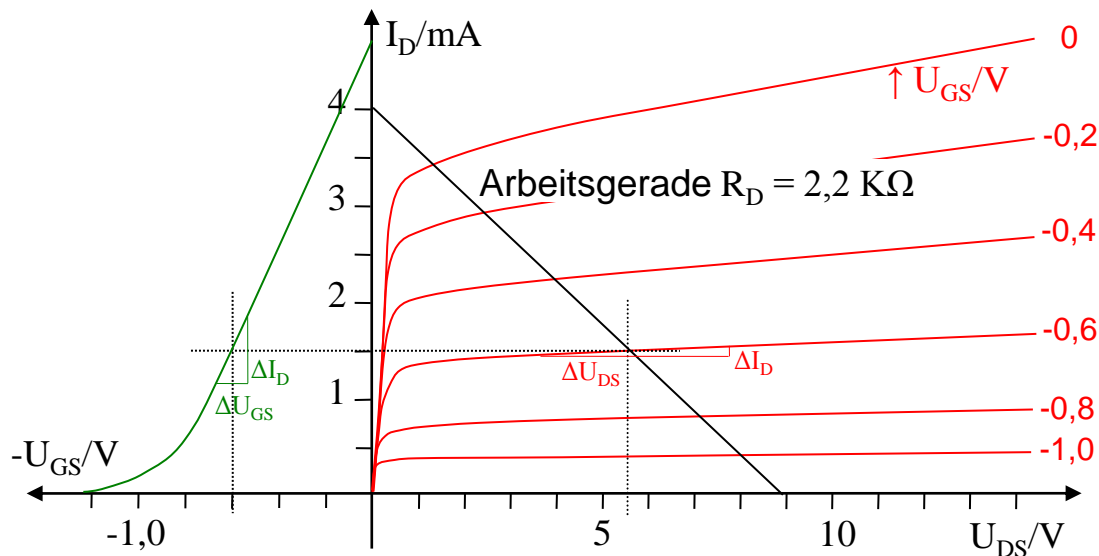


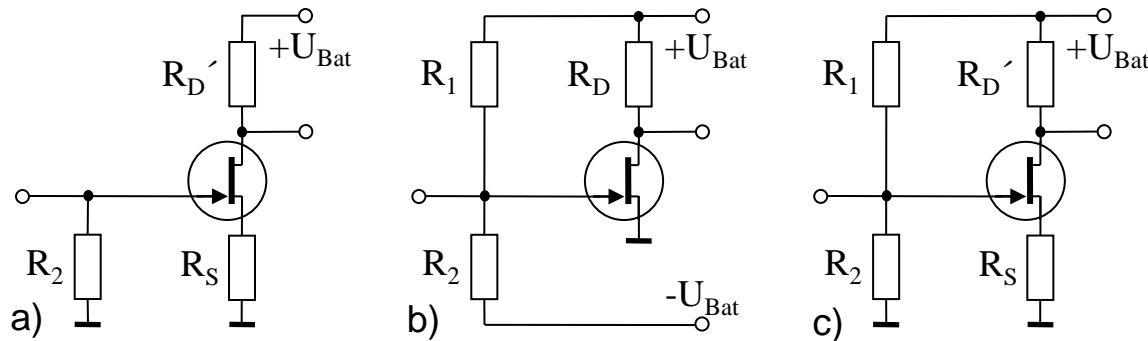
- Isolation: Gate – Kanal → **extrem geringer Gategleichstrom** (S-FET < 1 nA)
- Nur **Laden/Entladen** → Gate-Source-Kapazität **benötigt Strom**.
→ **leistungslosen Steuerung**.
- geringen Größe der Gate-Source-Kapazität → bei **kleinsten Ladungsmengen**
→ Durchbruchsspannung
- Feldeffekttransistoren mit isoliertem Gate werden auf einem Chip mittels Fotolithografie **in einem Durchlauf** mit nur **einem Diffusionsprozess** realisiert und ermöglichen so umfangreiche Strukturen.

Wegen **geringem Leistungsbedarf** → fast ausschließlich CMOS: N- und P-Kanal selbstsperrende Transistoren in Reihe → zwei Durchläufe sind notwendig.



Ausgangskennlinienfeld der Feldeffekttransistoren ähnlich dem des Bipolartransistors. Die Steuerkennlinie vergleichbar der Elektronenröhre





Durch den Drainwiderstand (R_D) wird der **Arbeitspunkt** festgelegt.

$$R_D = \frac{U_{\text{Bat}} - U_{\text{DS}}}{I_D}$$

- R_1 und R_2 sehr hochohmig
- Notwendige **negative Gatevorspannung** → b) zusätzliche Spannungsquelle $-U_{\text{Bat}}$ oder a) bzw. c) Verschiebung der Sourcespannung durch R_S (R_D wieder in R_D' und R_S aufteilen).

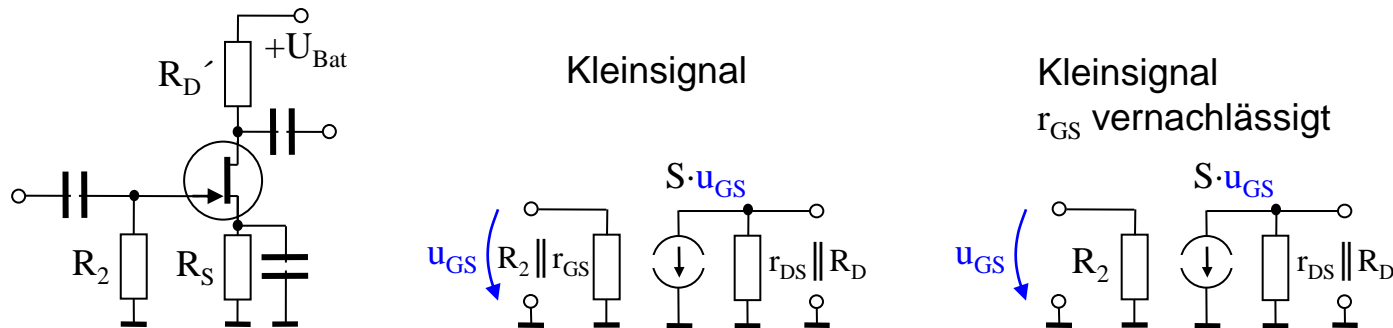
- R_S ergibt sich in a) zu

$$R_S = \frac{U_{\text{GS}}}{I_D} \quad \text{und} \quad R_D' = R_D - R_S$$

Da normalerweise kein Eingangsstrom fließt kann das **Gate** mit R_2 a) hochohmig **auf Masse gelegt** werden (ca. 1 ... 10 M Ω).

Außer der **Souceschaltung** gibt es auch beim FET eine **Drain-** und eine **Gateschaltung**

Wie Bipolartransistor hat auch der Feldeffekttransistoren eine ähnliche **Kleinsignalersatzschaltung** für Kleinsignalanwendungen.



Steilheit $S = \Delta I_D / \Delta U_{GS} = y_{21}$ und $r_{DS} = \Delta U_{DS} / \Delta I_D = 1/y_{22}$ entsprechend den Kennlinien $r_{GS} = 1/y_{11}$ sehr groß und **Rückwirkungen** y_{12} praktisch immer zu vernachlässigen



Die Schaltungen der anderen Feldeffekttransistorentypen funktionieren entsprechend

Aufgabe 2.4.1

Ein selbstleitender N-Kanal MOS-FET wird in Sourceschaltung entsprechend Abbildung a) bzw. d) mit $U_{\text{Bat}} = 9 \text{ V}$ aufgebaut. Aus den Angaben des Herstellers folgen $I_{\text{D}} = 1,5 \text{ mA}$, $U_{\text{DS}} = 5,5 \text{ V}$ bei einer Gatevorspannung $U_{\text{GS}} = 0,6 \text{ V}$. In diesem Arbeitspunkt wird $S = 6 \text{ mS}$ angegeben.

Frage 1: Wie sind R_{D}' und R_{S} zu dimensionieren?

Frage 2: Wie groß wird die Leerlaufspannungsverstärkung $v_{u \text{ Leer}}$?

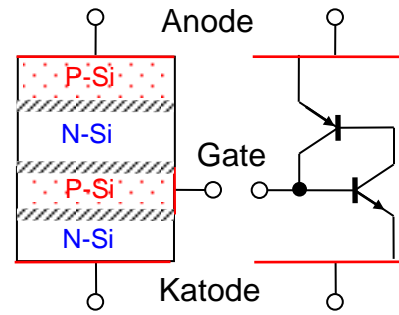
Hinweis: Nutze Abbildung f). Es gilt $R_{\text{D}} \ll r_{\text{DS}}$, somit kann r_{DS} vernachlässigt werden. (R_2 spielt keine Rolle und ist außerdem sehr groß gegenüber dem Ausgangswiderstand der Eingangsspannungsquelle, er kann z.B. zu $1 \text{ M}\Omega$ gewählt werden).

Zusatzfrage 1: Wie würde die Schaltung mit einem selbstleitenden P-Kanal MOS-FET aussehen (sonst vergleichbare Parameter)?

Zusatzfrage 2: Wie würde die Schaltung mit einem selbstsperrenden N-Kanal MOS-FET aussehen (sonst vergleichbare Parameter)?

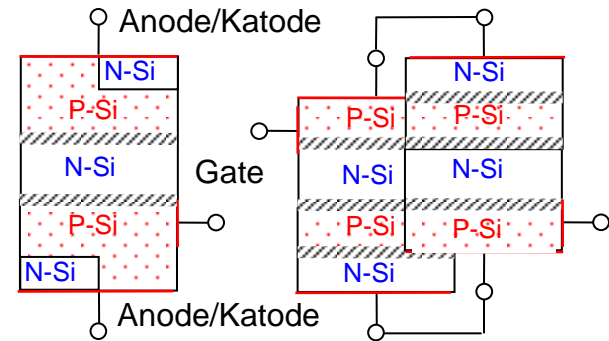
2.5 Weitere Halbleiterbauelemente

Vierschichtbauelemente



Tyristor und Prinzipschaltung

3 Sperrschichten



Triac und Triac aus 2 \updownarrow Tyristoren

- „+“ an Anode und „-“ an Kathode \rightarrow äußere Sperrschichten in Durchlassrichtung, mittlere in Sperrrichtung.
- Positive Spannung am Gate \rightarrow wie beim Transistor Trägerinjektion und mittlere Sperrschicht wird leitend. Nach Entfernen, Selbthalteeffekt. Für „Zündung“ reicht kurzer Spannungsimpuls.
- „-“ an der Anode und „+“ an Kathode äußeren Sperrschichten gesperrt leiten unmöglich.
- Vierschichtdiode, Triac, Diac, hohe Ströme \rightarrow Leistungselektronik
- maximal zulässiger Stromanstieg und Freiwerdezeit
- „abschaltbare“ Leistungsbaulemente: Bipolartransistor, Leistungs-MOS-FET sowie deren Kombination IGBT