

Thema	Bereiche	Seite
Grundlagen	Elektronenverteilung auf Atomschalen	1-3
	Elementarladung	1-3
	Elektronen in einer Ladungsmenge	1-3
	Atommasse und -abmessungen	1-3
	Elektronenleitung in Metallen	1-3
Widerstandberechnung	mit spezifischem Widerstand	1-4
	mit spezifischer Leitfähigkeit	1-4
Grundformeln	Kreisfläche, Einheiten der Arbeit (Energie)	1-4
Spezifische Leitfähigkeit	wichtige Materialien	1-4
	Eigenleitfähigkeit von Halbleitern	1-5
Elektronenablenkung	im elektrischen Feld	1-5
	im magnetischen Feld	1-5
Grundlagen	Geschwindigkeit eines Elektron im Vakuum	1-6
	Daten von Dioden BAY 18 und 1N4148	1-7
	differenzieller Widerstand einer Diode	1-7
Spannung	Definition	1-8
	Scheitelwert	1-8
	Spitze-Spitze-Wert	1-8
	Arithmetischer Mittelwert	1-8
	Effektivwert	1-8
Gleichrichterschaltungen	M1-Schaltung (Einweg)	1-9
	M2-Schaltung (Zweiweg-Mittelpunkt)	1-9
	B2-Schaltung (Zweiweg-Brücken)	1-9
Glättung	Berechnung Bauteile	1-10
	Glättungsfaktor	1-10
	Stabilisierungsfaktor	1-10
E-Reihe	E6, E12 und E24-Reihe	1-11
Zener-Diode	Berechnung	1-11
Transistor	Darstellung normal und Ersatzschaltbild	1-12
	Darstellung als Vierpol	1-12
	Kennlinienfeld	1-12
	Berechnungen am Transistor	1-13
	Regeln für Wechselstrom-ESB	1-13
Arbeitspunkteinstellung	Basis-Spannungsteiler	1-14
	Basis-Vorwiderstand	1-14
Stabilisierung des Arbeitspunktes	Stromrückkopplung	1-15
	Spannungsrückkopplung	1-15
	NTC-Rückkopplung	1-15
Emitterschaltung	Schaltbild	1-16
	Eigenschaften	1-16
	Wechselstrom-ESB	1-16
	Oszillogramme	1-17
Kollektorschaltung	Schaltbild	1-18
	Eigenschaften	1-18
	Wechselstrom-ESB	1-18
	Oszillogramme	1-19
Basisschaltung	Schaltbild	1-20
	Eigenschaften	1-20
	Wechselstrom-ESB	1-20

Thema	Bereiche	Seite
Basisschaltung	Oszillogramme	1-21
H-Parameter für Transistor	Berechnungen	1-22
Wechselstrom-ESB für Transistor	Berechnung und Darstellung	1-22
Transistor als Schalter	Schaltsbild	1-23
	Berechnungen	1-23
	Kennlinie	1-23
Transistor und Induktivität	Schaltsbild	1-24
	Signalverlauf	1-24
	Kennlinie	1-24
Transistor und Kondensator	Schaltsbild	1-24
	Signalverlauf	1-24
	Kennlinie	1-24
Schaltzeiten von Transistoren	Signalverläufe	1-25
	Berechnungen	1-25
Feldeffekttransistoren	Übersicht	1-26
	Kennwerte	1-26
J-FET (selbstleitend)	Funktionsprinzip	1-27
	Ansteuerung	1-27
	Funktionsweise	1-27
	Kennlinien	1-27
MOS-FET (selbstleitend)	Funktionsprinzip	1-28
	Ansteuerung	1-28
	Funktionsweise	1-28
	Kennlinien	1-28
MOS-FET (selbstsperrend)	Funktionsprinzip	1-28
	Ansteuerung	1-28
	Funktionsweise	1-28
	Kennlinien	1-28
Steuerkennlinie eines FET	Kennlinie	1-29
	Berechnungen	1-29
Steilheit S eines FET	Berechnungen, typische Werte der FET-Typen	1-29
	typische Werte der FET-Typen	1-29
Ausgangskennlinie eines FET	Kennlinie	1-30
Source-Schaltung	Schaltsbilder	1-31
	Wechselstrom-ESB	1-31
	Berechnungen	1-31 1-32
Drain-Schaltung	Schaltsbilder	1-33
	Wechselstrom-ESB	1-33
	Berechnungen	1-33 1-34
Gate-Schaltung	Schaltsbilder	1-34
	Wechselstrom-ESB	1-34
	Berechnungen	1-35

Elektronenanzahl auf der jeweiligen Schale:

$$Z = 2 \cdot n^2$$

Z = maximale Anzahl der Elektronen auf der Schale

n = Nummer der Schale: K = 1, L = 2, M = 3, N = 4, O = 5, P = 6, Q = 7

Elementarladung:

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As oder C (Coloumb)}$$

Anzahl der Elektronen in einer Ladungsmenge:

$$Q = n \cdot e \quad n = \frac{Q}{e}$$

n = Anzahl der Elektronen

Q = Ladungsmenge in As

e = Elementarladung

Atommasse und -abmessungen:

Masse eines Proton: 1 Proton = $1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Masse eines Neutron: 1 Neutron = $1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Masse eines Elektron: 1 Elektron = $0,911 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$

Atomkernradius: $R = 10^{-12} \text{ cm}$

Schalenradius: $u = 0,53 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$

Geschwindigkeit der Elektronen (nicht auf allen Schalen gleich): $V_{\text{Elektron}} = 1000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$

Elektronenleitung in Metallen:

$$K \cdot T = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad T = \frac{m \cdot v^2}{2 \cdot K} \quad v = \sqrt{\frac{2 \cdot K \cdot T}{m}}$$

K = Boltzmannkonstante = $1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Ws}}{\text{K}}$

T = Temperatur in K

m = Elektronenmasse

v = Geschwindigkeit in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

Widerstandsberechnung**mit spezifischem Widerstand und spezifischer Leitfähigkeit:**

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A}$$

$$A = \frac{\rho \cdot l}{R}$$

$$l = \frac{R \cdot A}{\rho}$$

$$\rho = \frac{R \cdot A}{l}$$

$$\rho = \frac{1}{\chi}$$

$$\chi = \frac{1}{\rho}$$

R = Widerstand in Ohm

ρ = spezifischer Widerstand (Rho) in $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} = 10^{-4} \Omega \text{cm}$

l = Länge in m

A = Querschnittsfläche in mm^2

χ = spezifische Leitfähigkeit in $\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$

Rho kann auch noch anders berechnet werden:

$$\rho = \frac{1}{n \cdot e \cdot b}$$

n = Elektronendichte (Anzahl / cm^3)

e = Elementarladung

b = Elektronenbeweglichkeit = $\frac{\text{Geschwindigkeit}}{\text{elektrische Feldstärke}}$ in $\frac{\frac{\text{cm}}{\text{s}}}{\frac{\text{V}}{\text{cm}}} = \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$

Grundformeln:

$$A = r^2 \cdot \pi$$

$$r = \frac{d}{2}$$

$$A = \frac{d^2 \cdot \pi}{4}$$

$$1 \text{ Nm} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ J} = 1 \text{ VAs}$$

Spezifische Leitfähigkeit:

Spezifische Leitfähigkeit von Kupfer: $\chi_{\text{Cu}} = 56 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$

Spezifische Leitfähigkeit von Silber: $\chi_{\text{Ac}} = 62 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$

Spezifische Leitfähigkeit von Gold: $\chi_{\text{Au}} = 48 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$

Spezifische Leitfähigkeit von Alu: $\chi_{\text{Al}} = 36 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$

Eigenleitfähigkeit von Halbleitern bei 20 °C:

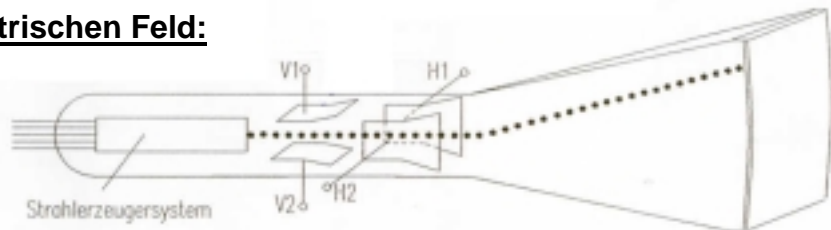
Spezifische Leitfähigkeit von Silizium: $\chi_{Si} = \frac{1}{2 \cdot 10^5 \Omega cm} = 0,5 \cdot 10^{-9} \frac{m}{\Omega \cdot mm^2}$

Spezifische Leitfähigkeit von Germanium: $\chi_{Ge} = \frac{1}{4 \cdot 10^1 \Omega cm} = 2,5 \cdot 10^{-6} \frac{m}{\Omega \cdot mm^2}$

Hervorgerufen durch **Wärmeschwingung** (freigeschlagen, zurückgesprungen), **Oberflächenleitfähigkeit** (Außen fehlt Bindungselektron) und **Restverunreinigungen**.
 Bei Silizium: Bei Erhöhung von Temperatur um 10 K steigt die Leitfähigkeit um das 3-fache !! \Rightarrow Heißleiter = NTC

Elektronenablenkung im elektrischen Feld:

$F = E \cdot Q$ $Q = \frac{F}{E}$



F = Ablenkkraft in N

E = elektrische Feldstärke in $\frac{V}{m}$

Q = Ladung in As oder C (Coloumb)

Elektronenablenkung im magnetischen Feld:

$F = B \cdot I \cdot l$ $B = \frac{F}{I \cdot l}$ $I = \frac{F}{B \cdot l}$ $l = \frac{F}{B \cdot I}$

oder

$F = B \cdot v \cdot Q$ $B = \frac{F}{v \cdot Q}$ $v = \frac{F}{B \cdot Q}$ $Q = \frac{F}{B \cdot v}$

F = Ablenkkraft in N

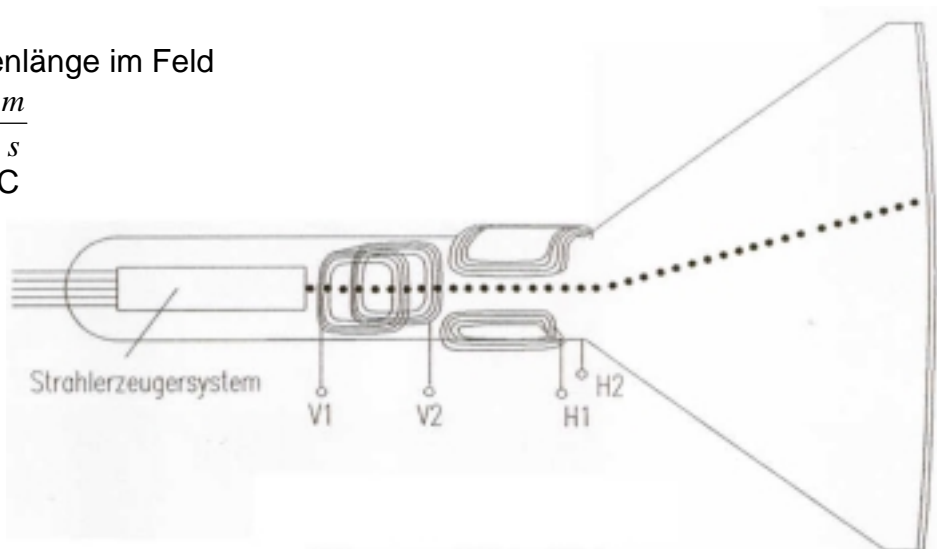
B = magnetische Induktion in $\frac{Vs}{m^2}$

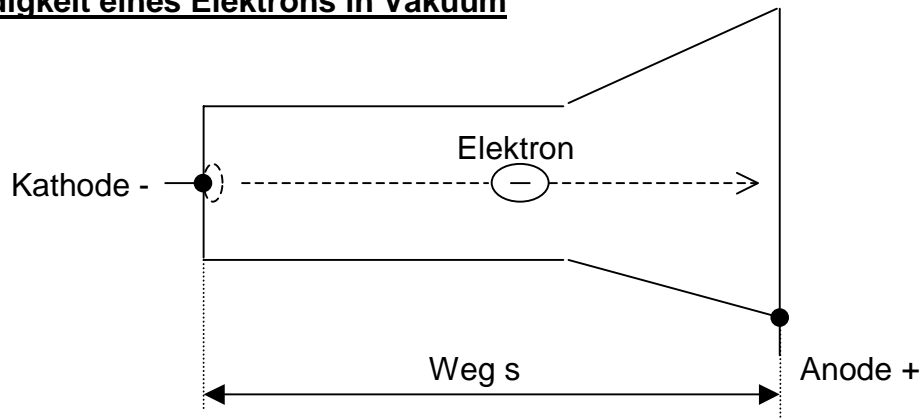
I = Stromstärke in A

l = wirksame Stromfadenlänge im Feld

v = Geschwindigkeit in $\frac{m}{s}$

Q = Ladung in As oder C



Geschwindigkeit eines Elektrons in Vakuum

Arbeit \Rightarrow Bewegungsenergie (Arbeit an einem Elektron führt zur Bewegung.)

$$W_{mech} = F \cdot s \quad W_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m_0 \cdot v^2$$

$$E = \frac{U}{s} \quad \text{Einheit} \quad \left[E = \frac{V}{m} \right]$$

$$\Rightarrow W_{mech} = E \cdot Q \cdot s$$

$$\Rightarrow W_{mech} = \frac{U_{AK} \cdot Q \cdot s}{s} = U_{AK} \cdot Q$$

$$\Rightarrow W_{mech} = U_{AK} \cdot e^-$$

mit $W_{mech} = W_{kin}$

$$\Rightarrow U_{AK} \cdot e^- = \frac{1}{2} \cdot m_0 \cdot v^2$$

$$\Rightarrow v = \sqrt{\frac{2 \cdot U_{AK} \cdot e^-}{m_0}} \quad \text{in } \frac{m}{s} \quad \text{Einheit:} \quad \left[v = \sqrt{\frac{V \cdot As}{kg}} = \sqrt{\frac{Ws}{kg}} = \sqrt{\frac{Nm}{kg}} = \sqrt{\frac{kg \cdot m \cdot m}{s^2 \cdot kg}} = \sqrt{\frac{m^2}{s^2}} = \frac{m}{s} \right]$$

$$\Rightarrow U_{AK} = \frac{v^2 \cdot m_0}{2 \cdot e^-} \quad \text{in V} \quad \text{Einheit:} \quad \left[U_{AK} = \frac{\left(\frac{m}{s}\right)^2 \cdot kg}{As} = \frac{m^2 \cdot kg}{s^2 \cdot As} = \frac{Nm}{As} = \frac{Ws}{As} = \frac{V \cdot A}{A} = V \right]$$

W_{mech} = Mechanische Arbeit in Js ; W_{kin} = Kinetische (Bewegungs-) Energie in Nm

F = Kraft in N

s = zurückgelegter Weg in m

m_0 = Masse des Elektrons in kg

v = Geschwindigkeit

U_{AK} = Anoden-Kathoden-Spannung in V

Grunddaten von Halbleitern:

Diode BAY 18: $I_F = 10\text{mA}$
 $U_R = 10\text{ V}$
 $I_R = 0,1\text{ mA}$
 $t_{rr} = 0,1\text{ }\mu\text{s}$

Diode 1N4148: $I_F = 10\text{mA}$
 $U_R = 6\text{ V}$
 $I_R = 1\text{ mA}$
 $t_{rr} = 4\text{ }\mu\text{s}$

Differenzieller (Wechselstrom-) Widerstand einer Diode:

$$r = \frac{\Delta u}{\Delta i}$$

$$\Delta i = \frac{\Delta u}{r}$$

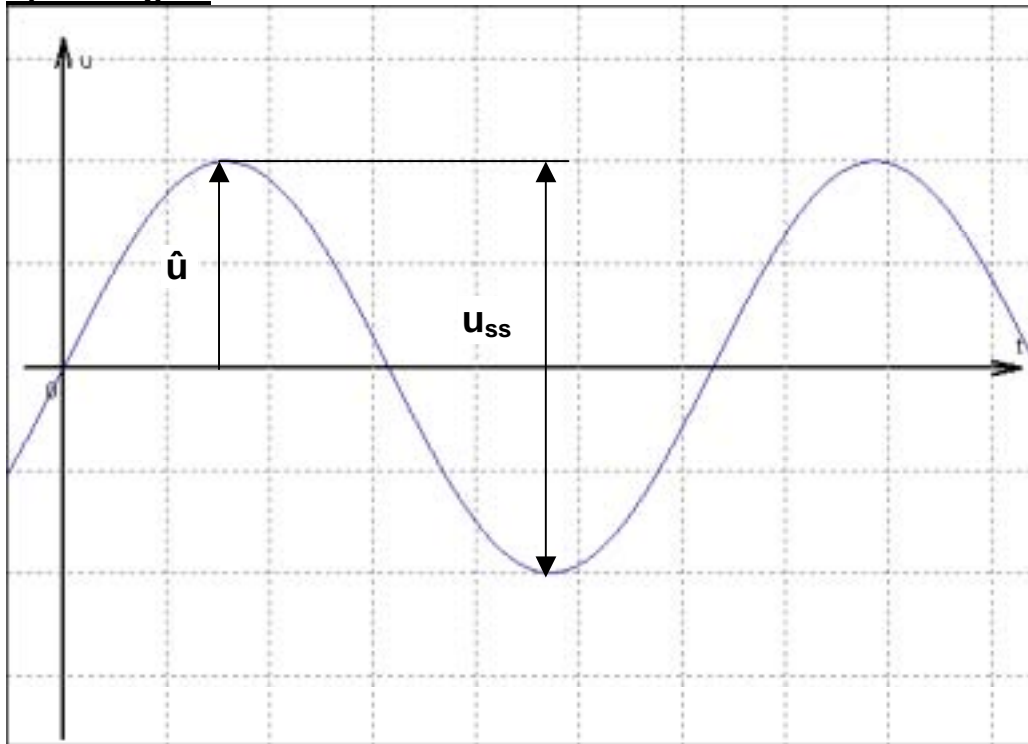
$$\Delta u = r \cdot \Delta i$$

r = differenzieller (Wechselstrom-) Widerstand

Δu = Spannungsänderung der Tangente an den Arbeitspunkt

Δi = Stromänderung der Tangente an der Arbeitspunkt

je kleiner r desto besser ist die Diode \Rightarrow wenig Verlustleistung an der Diode

Spannungen:

Scheitelwert einer Spannung = maximaler Wert bezogen auf 0V

Bezeichnung: $\hat{u} = u_{\max} = \text{Amplitude} = u_s$

Spitze-Spitze-Wert einer Spannung = Wert zwischen Maxima und Minima

Bezeichnung: $u_{ss} = \hat{u} + |-\hat{u}| = 2 \cdot \hat{u}$

Arithmetischer Mittelwert einer Spannung = Differenz der Flächen über und unter der Zeitachse.

Muß bei reinen Wechselspannungen immer 0 sein !!

Bezeichnung: U_{AV}

Effektivwert einer Spannung = Wert der Spannung, die benötigt wird, um die selbe Leistung aufzubringen wie eine gleich große Gleichspannung.

Bezeichnung: U_{eff}

Formel:

- bei Sinus: $\hat{u} = \sqrt{2} \cdot U_{eff}$ $U_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \hat{u}$

- bei Dreieck: $\hat{u} = \sqrt{3} \cdot U_{eff}$ $U_{eff} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \hat{u}$

- bei Rechteck: $\hat{u} = U_{eff}$

Augenblickswert oder **Momentanwert** = Wert der Spannung bei einer bestimmten Zeit in einer Periode.

Bezeichnung: u_t, u_{mom}, u_α

M1-Schaltung (Einweggleichrichter-Schaltung):

$$U_{1\text{ eff}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \hat{u}$$

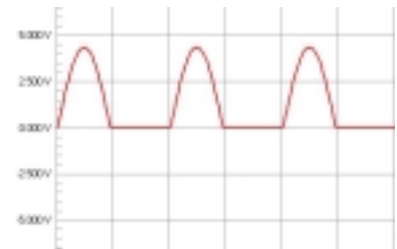
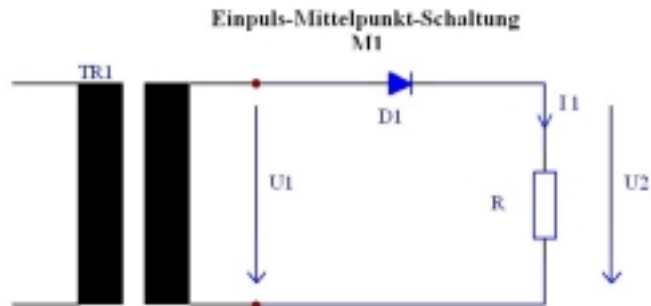
$$U_{2\text{ AV}} = \frac{1}{\pi} \cdot \hat{u}$$

$$U_{2\text{ AV}} = 0,45 \cdot U_{1\text{ eff}}$$

$$U_{2\text{ eff}} = 0,5 \cdot U_{1\text{ eff}} - U_D$$

$$U_{2\text{ eff}} = 0,35 \cdot \hat{u}$$

U_1 = Spannung vor der Gleichrichtung
 U_2 = Spannung nach der Gleichrichtung
 \hat{u} = Scheitelspannung vor der Gleichrichtung
 U_D = Durchbruchspannung der Diode



M2-Schaltung (Zweiweg-Mittelpunkt-Schaltung):

$$U_{3\text{ AV}} = 0,45 \cdot U_{1\text{ eff}}$$

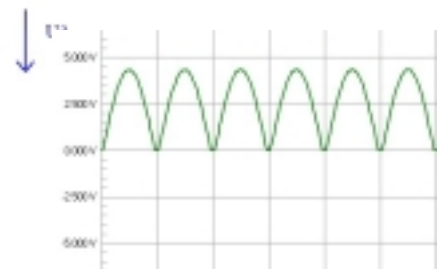
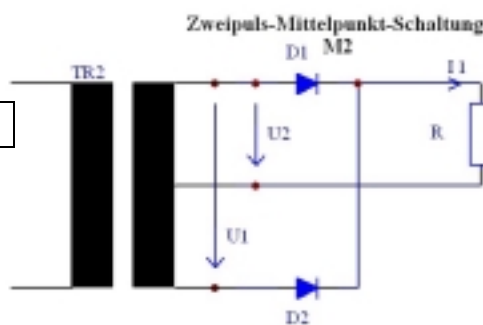
$$U_{3\text{ eff}} = 0,5 \cdot U_{1\text{ eff}} - U_D$$

oder

$$U_{3\text{ AV}} = 0,9 \cdot U_{2\text{ eff}}$$

$$U_{3\text{ eff}} = U_{2\text{ eff}} - U_D$$

U_2 = Spannung vor der Gleichrichtung zwischen Mittelpunkt und Abgriff
 U_1 = Spannung vor der Gleichrichtung zwischen beiden Abgriffen
 U_3 = Spannung nach der Gleichrichtung
 U_D = Durchbruchspannung der Diode



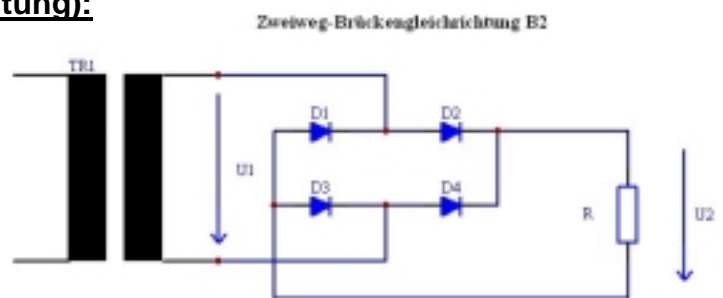
B2-Schaltung (Zweiweg-Brückenschaltung):

$$U_{2\text{ AV}} = 0,9 \cdot U_{1\text{ eff}}$$

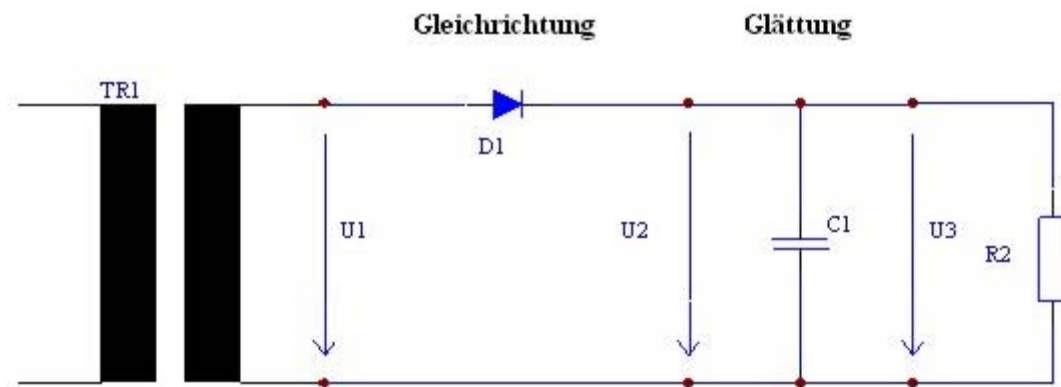
$$U_{2\text{ eff}} = U_{1\text{ eff}} - (2 \times U_D)$$

U_1 = Spannung vor der Gleichrichtung
 U_2 = Spannung nach der Gleichrichtung
 U_D = Durchbruchspannung der Diode

Spannungsverlauf siehe M2-Schaltung



Achtung: Bei kleinen Eingangsspannungen Schwellenspannungen der Dioden beachten (Bei Si 0,7V, bei Ge 0,3 V)!

**Glättung:**

$$C_L = \frac{\hat{u}}{R_L \cdot f_{Br} \cdot \Delta u_{Br}}$$

$$f_{Br} = \frac{\hat{u}}{R_L \cdot C_L \cdot \Delta u_{Br}}$$

$$\Delta u_{Br} = \frac{\hat{u}}{R_L \cdot f_{Br} \cdot C_L}$$

$$R_L = \frac{\hat{u}}{C_L \cdot f_{Br} \cdot \Delta u_{Br}}$$

$$\hat{u} = C_L \cdot R_L \cdot f_{Br} \cdot \Delta u_{Br}$$

$C_L = C1$ = Glättungskondensator

$\hat{u} = \hat{u}_2$ = Scheitel- oder Spitzenspannung vor der Glättung

$R_L = R2$ = Lastwiderstand

f_{Br} = Frequenz der Spannung

$\Delta u_{Br} = \Delta u_3$ = Brummspannung nach der Glättung

Glättungsfaktor:

$$G = \frac{\Delta u_2}{\Delta u_3} = \frac{u_{2Br}}{u_{3Br}}$$

G immer ≥ 1 , je größer G, desto besser

$\Delta u_2 = u_{2Br}$ = Brummspannung vor der Glättung

$\Delta u_3 = u_{3Br}$ = Brummspannung nach Glättung

Stabilisierungsfaktor:

$$S = \frac{u_{2Br} \cdot U_{3m}}{u_{3Br} \cdot U_{2m}}$$

S immer ≥ 1 , je höher S, desto besser

u_{2Br} = Brummspannung vor der Stabilisierung

U_{2m} = Gleichspannungsanteil vor der Stabilisierung

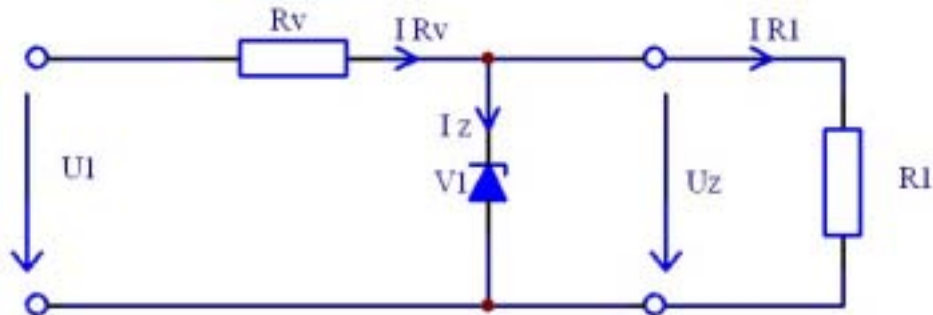
u_{3Br} = Brummspannung nach Stabilisierung

U_{3m} = Gleichspannungsanteil nach der Stabilisierung

E-Reihe:

E6	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8						
E12	1,0	1,2	1,5	1,8	2,2	2,7	3,3	3,9	4,7	5,6	6,8	8,2
E24	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,7	3,0
	3,3	3,6	3,9	4,3	4,7	5,1	5,6	6,2	6,8	7,5	8,2	9,1

Zener-Diode:



$$R_V = \frac{U_1 - U_Z}{I_Z + I_{R1}}$$

- R_V = Vorwiderstand in Ω
- U_1 = Eingangsspannung in V
- U_Z = Zenerspannung in V
- I_Z = Strom durch die Zenerdiode in A
- I_{R1} = Strom durch den Lastwiderstand in A

$$I_{Z \max} = \frac{P_{tot}}{U_Z}$$

$$U_Z = \frac{P_{tot}}{I_{Z \max}}$$

$$P_{tot} = I_{Z \max} \cdot U_Z$$

$$I_{Z \min} = 0,1 \cdot I_{Z \max}$$

$$P_V = U_Z \cdot I_Z$$

$$R_{V \min} = \frac{U_{1 \max} - U_Z}{I_{L \min} + I_{Z \max}}$$

$$R_{V \max} = \frac{U_{1 \min} - U_Z}{I_{L \max} + I_{Z \min}}$$

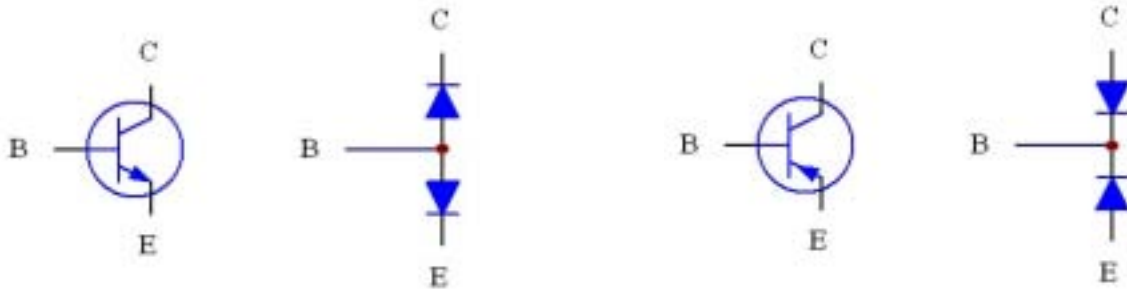
- P_{tot} = Maximale Verlustleistung der Zenerdiode in W
- P_V = Verlustleistung der Diode in W
- $R_{V \min}$ = Minimaler Vorwiderstand für Funktion im Arbeitsbereich der Diode
- $R_{V \max}$ = Maximaler Vorwiderstand für Funktion im Arbeitsbereich der Diode

R_V muß zwischen $R_{V \min}$ und $R_{V \max}$ liegen. Wenn angegeben aus der E-Reihe aussuchen.

Transistor:

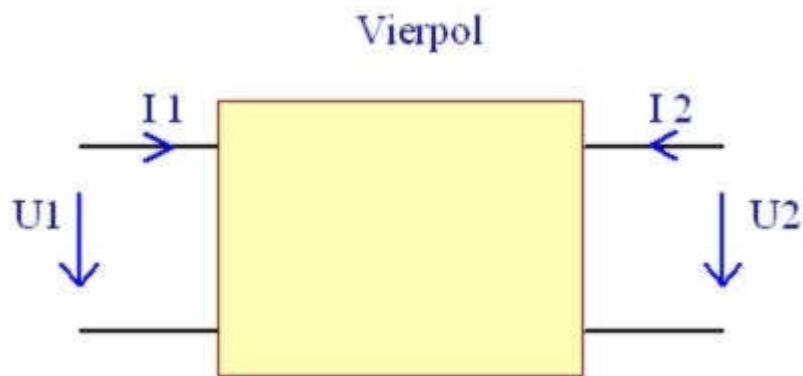
NPN-Transistor mit Diodenersatzschaltbild (Ebers-Moll-Methode)

PNP-Transistor mit Diodenersatzschaltbild



Wirkung des Transistors: Ein kleiner Basisstrom hat einen großen Kollektorstrom zur Folge

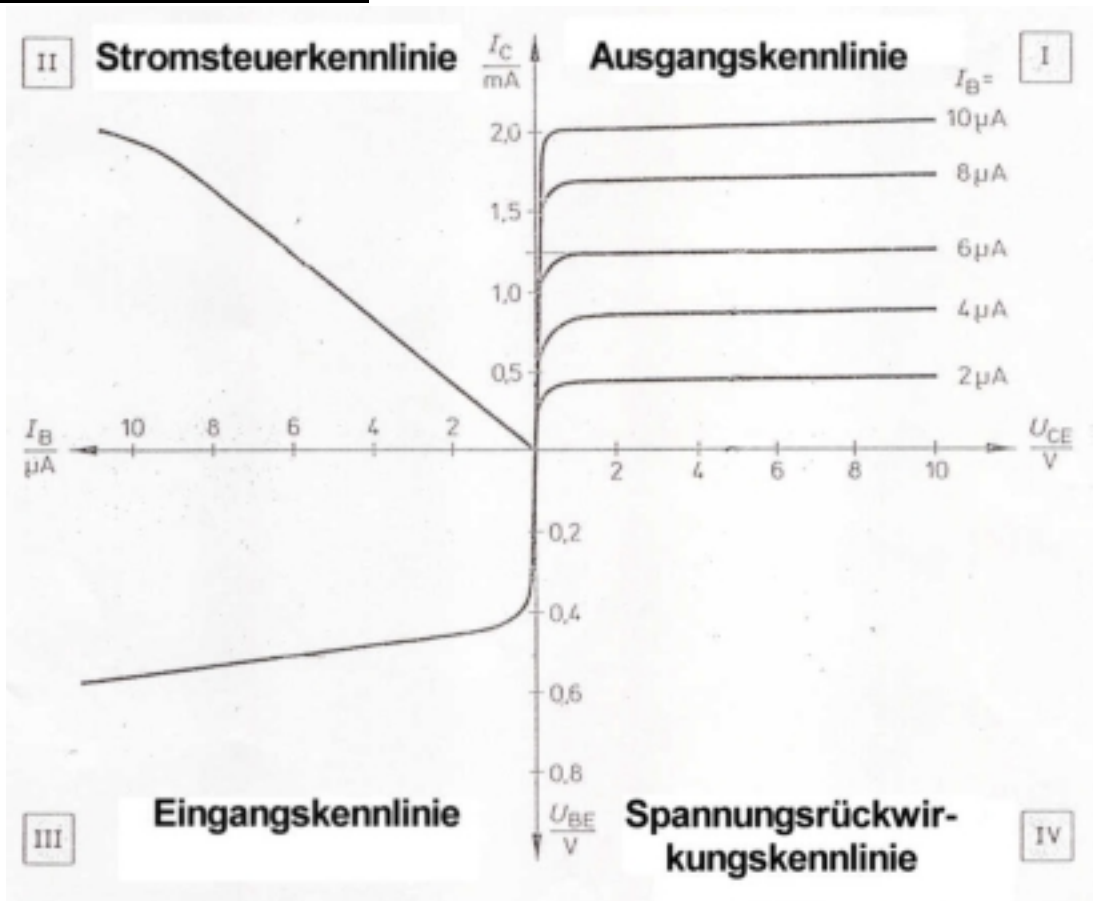
Darstellung als Vierpol:



I_1 entspricht I_B
 U_1 entspricht U_{BE}

I_2 entspricht I_C
 U_2 entspricht U_{CE}

Kennlinienfeld eines Transistors:



Berechnungen am Transistor:

Für Gleichstrom gilt:

$$I_C = B \cdot I_B$$

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

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

$$I_E = I_C + I_B$$

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

 I_C = Kollektorstrom; U_{CE} = Kollektor-Emitter-Spannung I_B = Basisstrom ; U_{BE} = Basis-Emitter-Spannung I_E = Emitterstrom B = Verstärkungsfaktor P_{tot} = maximale Verlustleistung

Für Wechselstrom gilt:

$$\Delta I_C = \beta \cdot \Delta I_B$$

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

$$\Delta I_B = \frac{\Delta I_C}{\beta}$$

$$v_U = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta U_{BE}}$$

$$\Delta U_{BE} = \frac{\Delta U_{CE}}{v_U}$$

$$\Delta U_{CE} = v_U \cdot \Delta U_{BE}$$

$$v_I = \beta$$

$$v_P = v_U \cdot v_I$$

$$r_{BE} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B}$$

$$r_{CE} = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C}$$

 ΔI_C = Kollektorstromänderung ΔI_B = Basisstromänderung ΔI_E = Emitterstromänderung β = Wechselstromverstärkung v_I = Wechselstromverstärkung v_U = Wechselspannungsverstärkung v_P = Leistungsverstärkung für Wechselspannung ΔU_{CE} = Kollektor-Emitter-Spannungsänderung ΔU_{BE} = Basis-Emitter-Spannungsänderung r_{BE} = Wechselstromwiderstand des Eingangs (Basis-Emitter-Strecke) r_{CE} = Wechselstromwiderstand des Ausgangs (Kollektor-Emitter-Strecke)**Wechselstromersatzschaltbilder: (~ESB)**Vorgaben:

1. Gleichspannungsquellen: Wirken für hohe Frequenzen wie ein Kurzschluß. $f \uparrow \Rightarrow x_C \downarrow$
2. Kondensatoren: Wirkt auch wie ein Kurzschluß für Wechselspannung. $f \uparrow \Rightarrow x_C \downarrow$
3. Spulen: Stellen für hohe Frequenzen einen hohen Widerstand dar. Ideal $\rightarrow \infty$
4. Sonstige Zweipole: Wirken normal

Arbeitspunkteinstellung beim Transistor:

Basisspannungsteiler:

⇒ Spannungsprägung

$$q = n = \frac{I_2}{I_B}$$

$$I_2 = n \cdot I_B$$

$$I_B = \frac{I_2}{n}$$

$$I_1 = (n+1) \cdot I_B$$

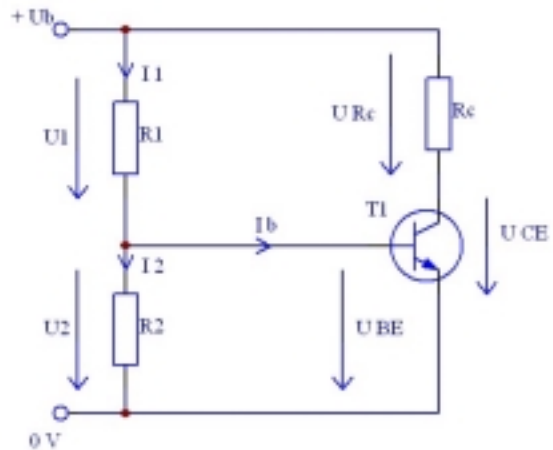
$$I_B = \frac{I_1}{(n+1)}$$

$$m = \frac{R_C}{R_E}$$

$$R_1 = \frac{U_b - U_{BE}}{I_1} = \frac{U_b - U_{BE}}{(n+1) \cdot I_B}$$

$$R_2 = \frac{U_{BE}}{n \cdot I_B}$$

$$R_C = \frac{U_b - U_{CE}}{I_C} = \frac{U_b - U_{CE}}{B \cdot I_B}$$



q = n = Querstromverhältnis (2 ... 10 ; 10 = beste Spannungseinstellung)

I₁ = Strom durch Widerstand R₁

I₂ = Strom durch Widerstand R₂

I_B = Basisstrom

U_b = Betriebsspannung

U_{BE} = Basis-Emitterspannung

U_{CE} = Kollektor-Emitterspannung

B = Verstärkungsfaktor

R₁ , R₂ = Basisspannungsteiler

m = Verhältnis von Kollektorwiderstand zu Emittorwiderstand

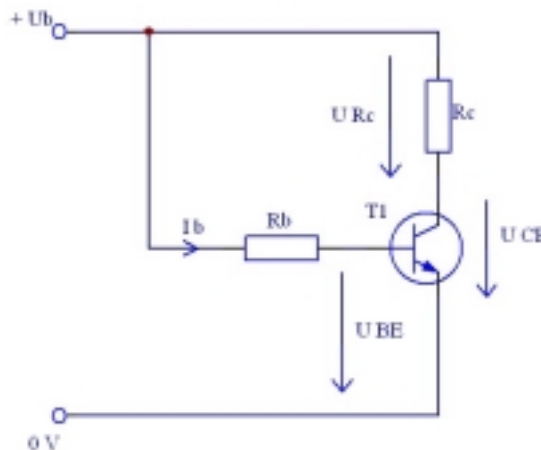
Basisvorwiderstand:

⇒ Stromprägung

$$R_b = \frac{U_b - U_{BE}}{I_B}$$

$$R_C = \frac{U_b - U_{CE}}{I_C} = \frac{U_b - U_{CE}}{B \cdot I_B}$$

R_b = Basisvorwiderstand

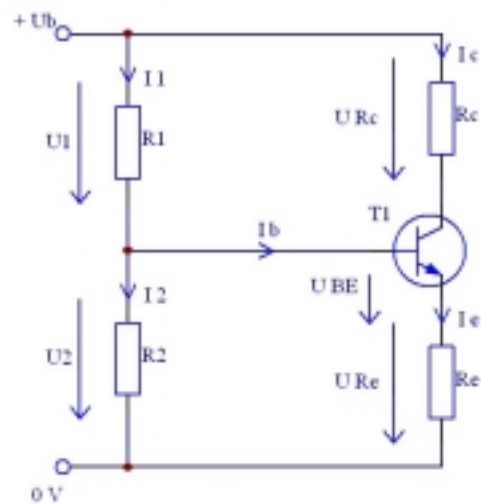


Stabilisierung des Arbeitspunktes beim Transistor

Stromrückkopplung:

$$\vartheta \uparrow \Rightarrow I_B \uparrow \Rightarrow I_C \uparrow \Rightarrow I_E \uparrow \Rightarrow U_{RE} \uparrow$$

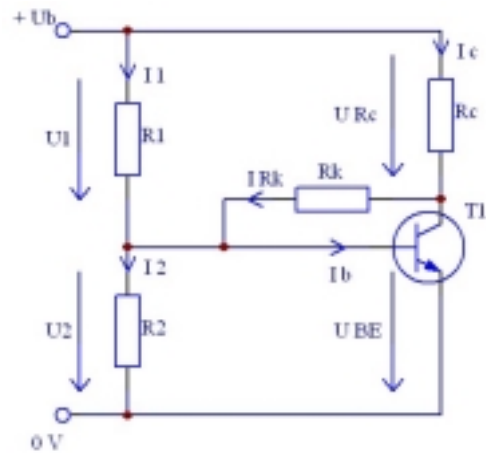
$$\Rightarrow U_{BE} \downarrow \Rightarrow I_B \downarrow \Rightarrow I_C \downarrow \Rightarrow \vartheta \downarrow$$



Spannungsrückkopplung:

$$\vartheta \uparrow \Rightarrow I_B \uparrow \Rightarrow I_C \uparrow$$

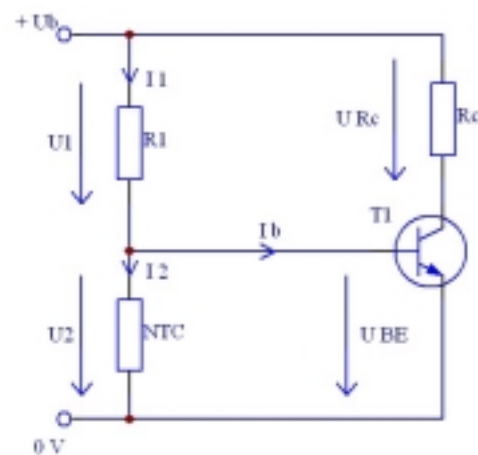
$$\Rightarrow I_{Rk} \downarrow \Rightarrow I_B \downarrow \Rightarrow I_C \downarrow \Rightarrow \vartheta \downarrow$$



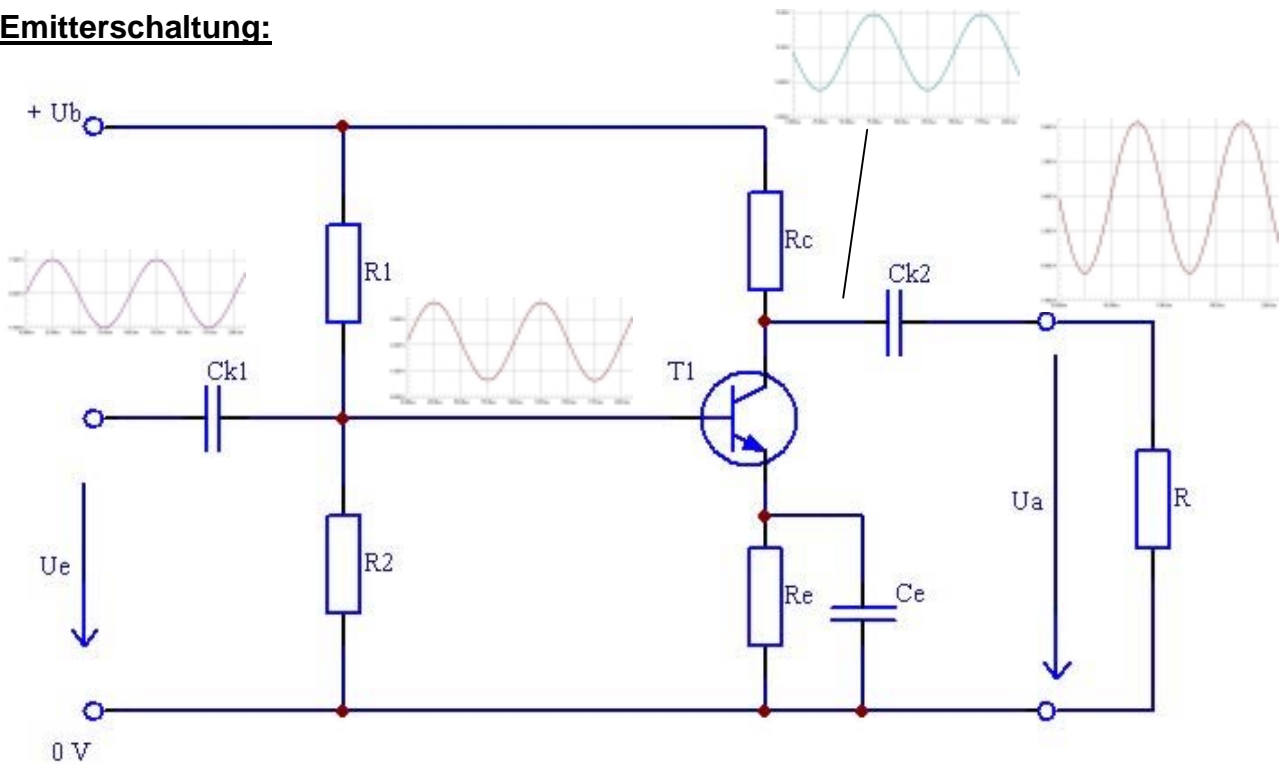
NTC-Rückkopplung:

$$\vartheta \uparrow \Rightarrow I_B \uparrow \Rightarrow I_C \uparrow$$

$$\Rightarrow R_{NTC} \downarrow \Rightarrow U_{BE} \downarrow \Rightarrow I_B \downarrow \Rightarrow I_C \downarrow \Rightarrow \vartheta \downarrow$$



Emitterschaltung:



Eigenschaften:

Phasendrehung des Signales: 180°

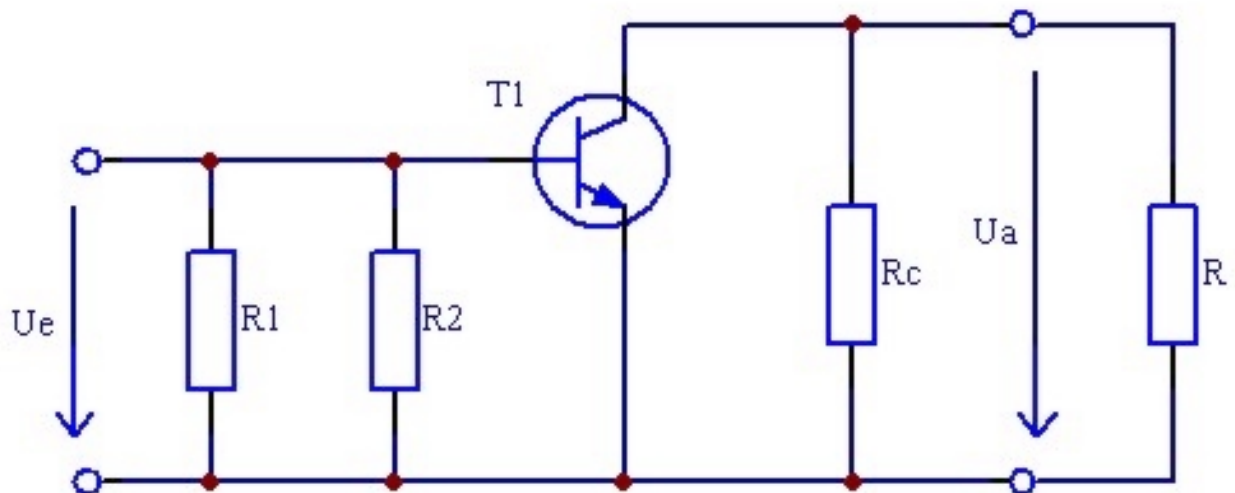
$v_i = \text{gro\ss}$ (100 ... 200)

$v_U = \text{gro\ss}$

$v_P = v_i \cdot v_U = \text{sehr gro\ss}$

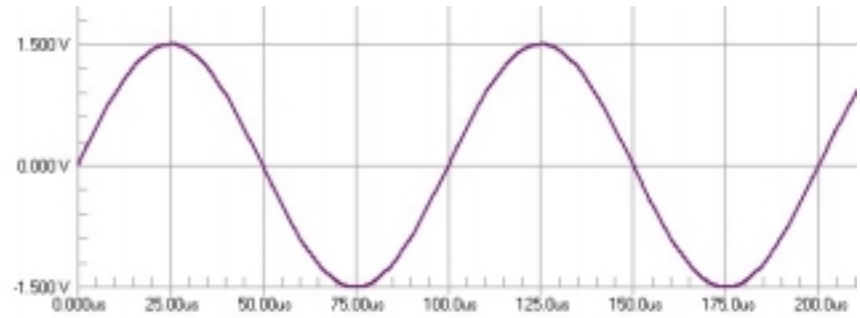
⇒ Einsatz als Leistungsverstärker

Wechselstromersatzschaltbild: (~ESB)

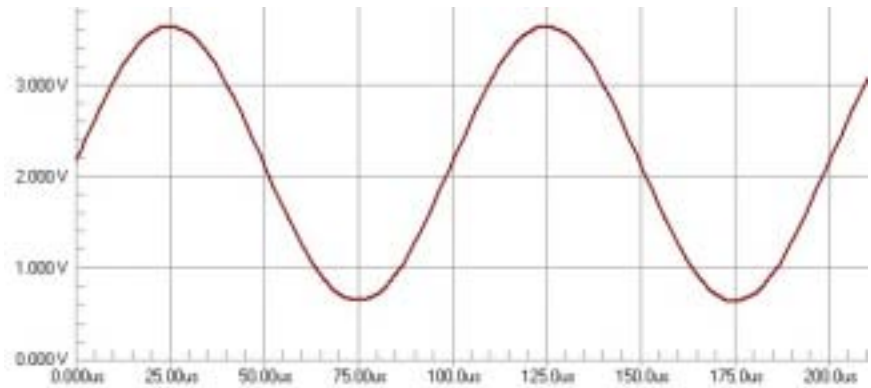


Oszillogramme der Emitterschaltung:

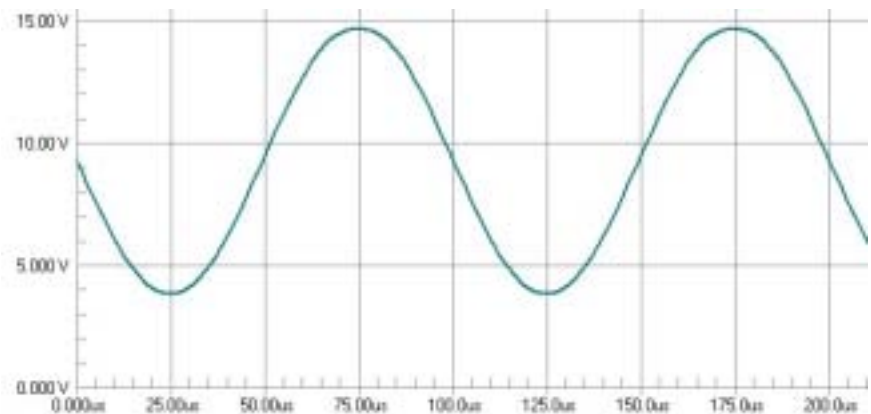
Vor Ck1 (Eingang):



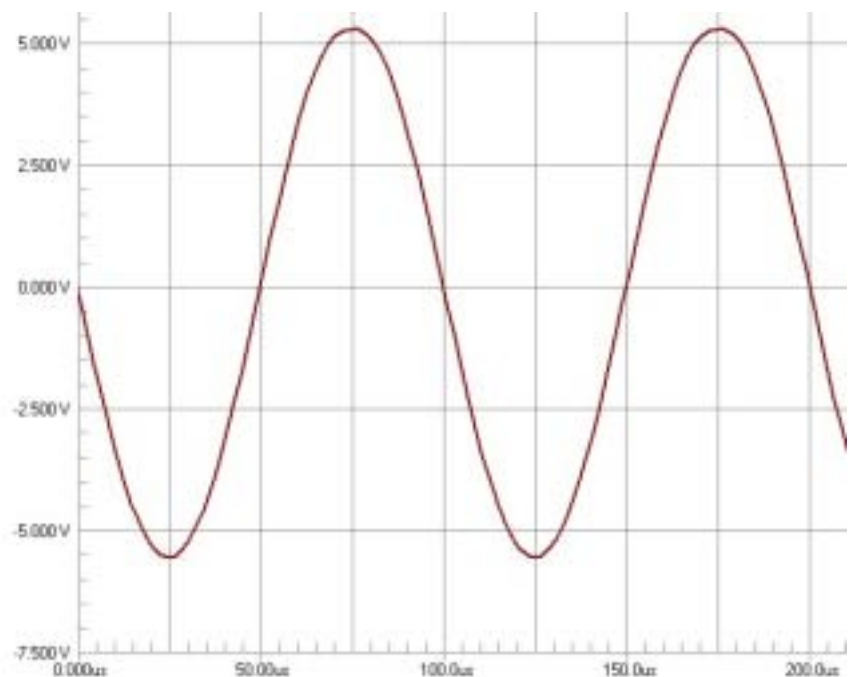
Nach Ck1:



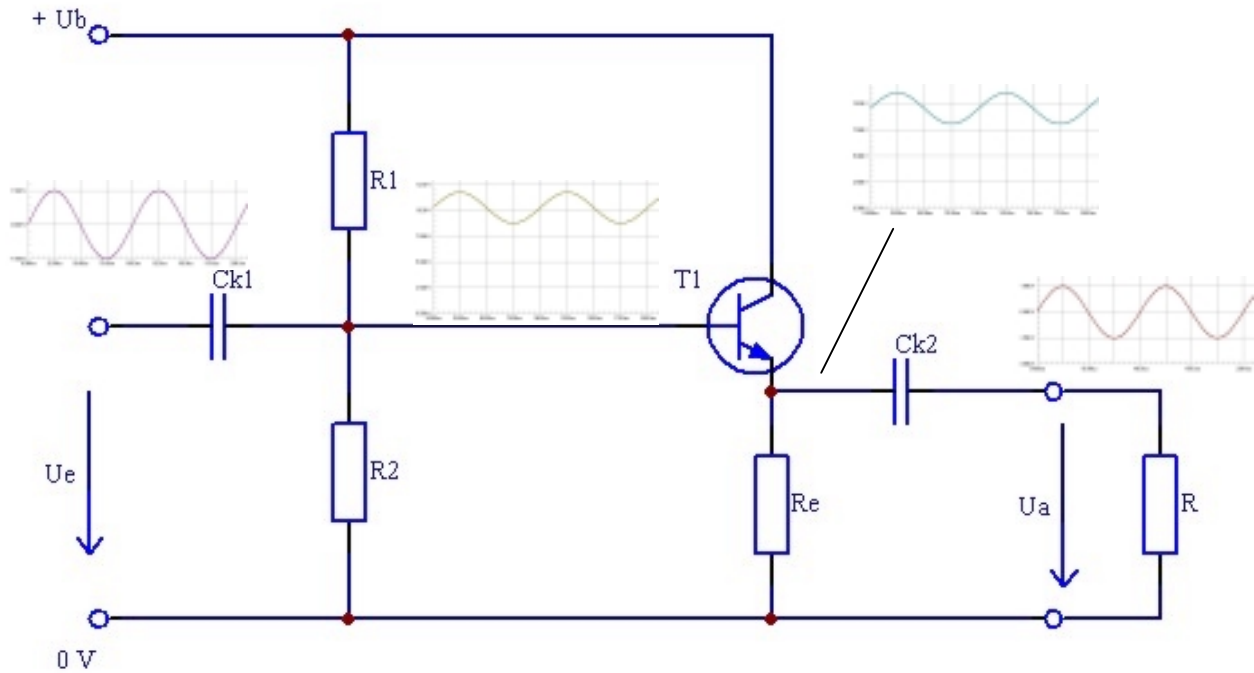
Vor Ck2:



Nach Ck2 (Ausgang):



Kollektorschaltung:



Eigenschaften:

Phasendrehung des Signales: 0°

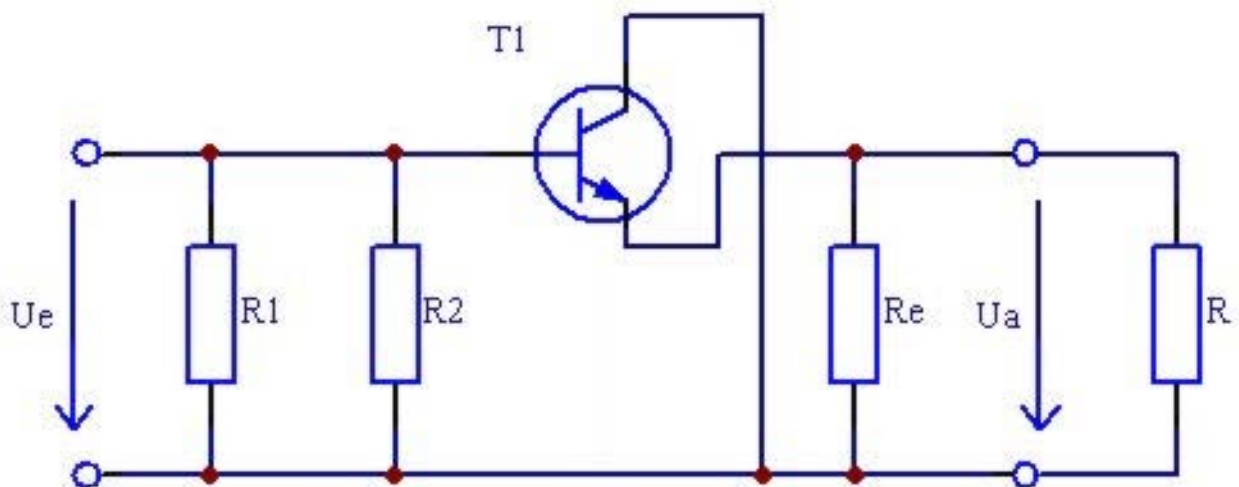
$v_i = \text{gro\ss}$ (100 ... 200)

$v_U \leq 1$

$v_P = v_i \cdot v_U = \text{gro\ss}$

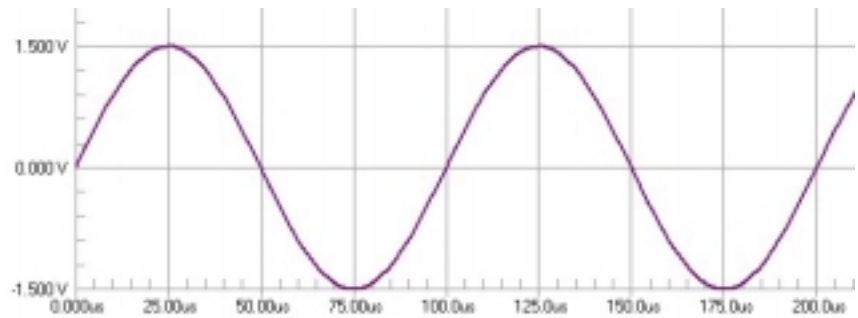
⇒ Einsatz als Impedanz-Wandler (Stromverstärker)

Wechselstromersatzschaltbild: (~ESB)

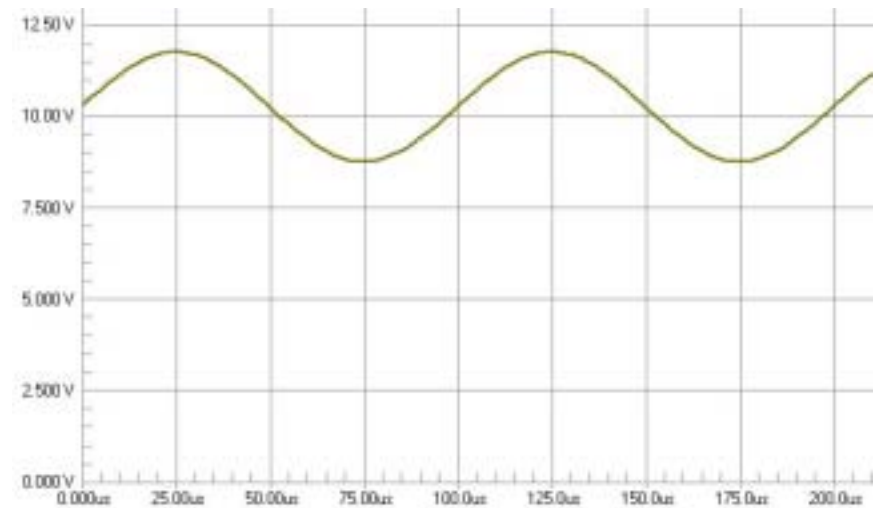


Oszillogramme der Kollektorschaltung:

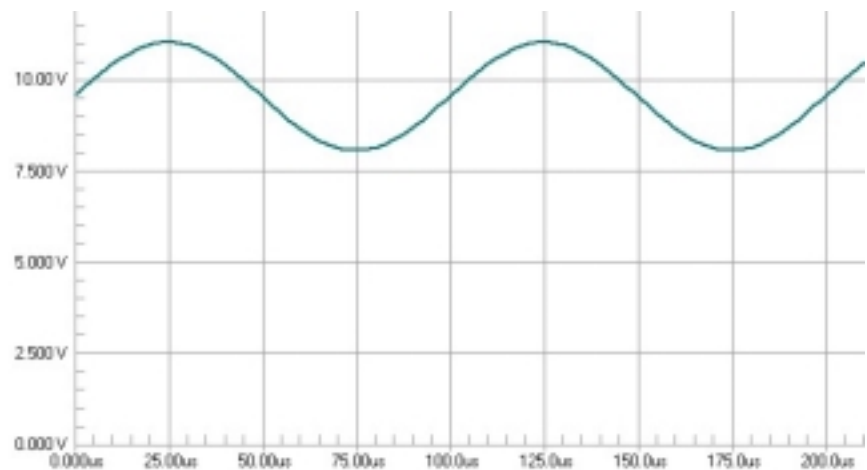
Vor Ck1 (Eingang):



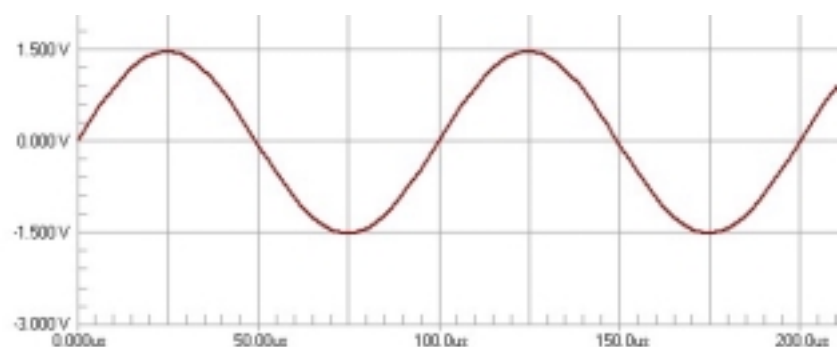
Nach Ck1:



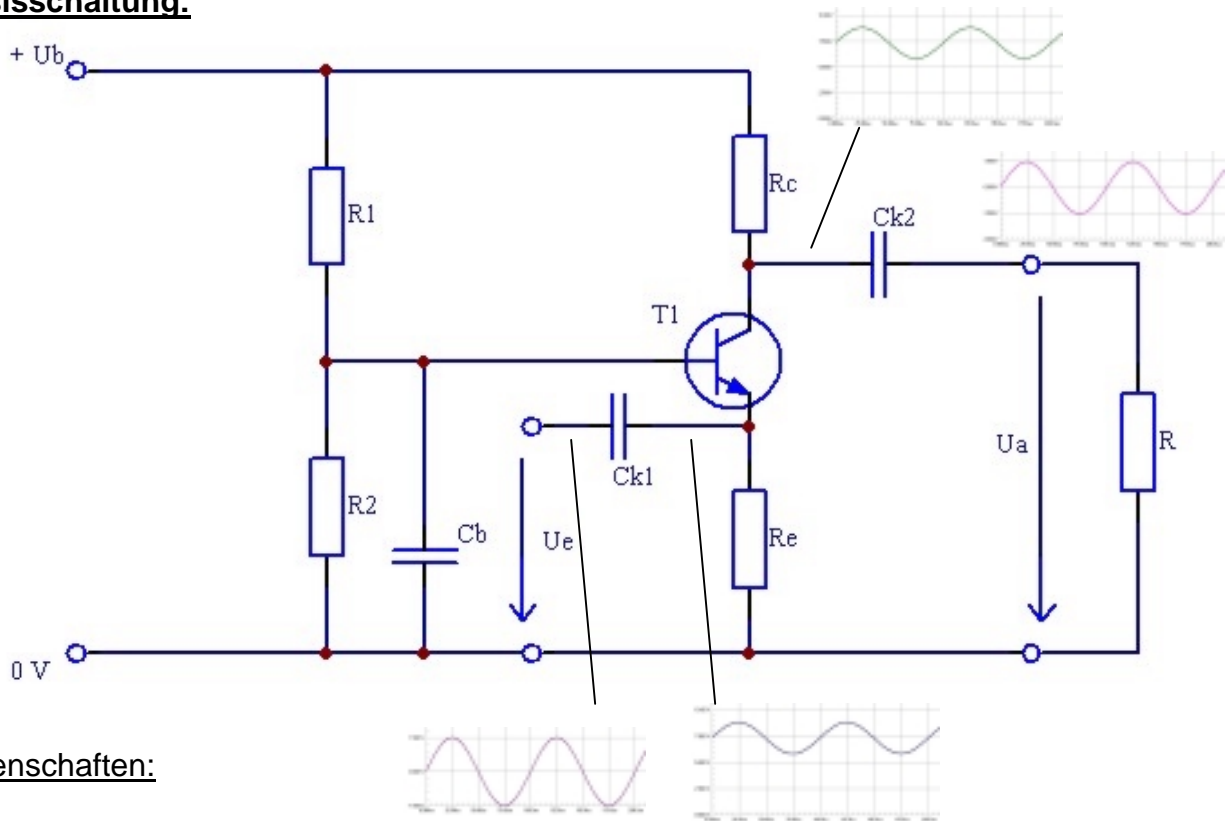
Vor Ck2:



Nach Ck2 (Ausgang):



Basisschaltung:



Eigenschaften:

Phasendrehung des Signales: 0°

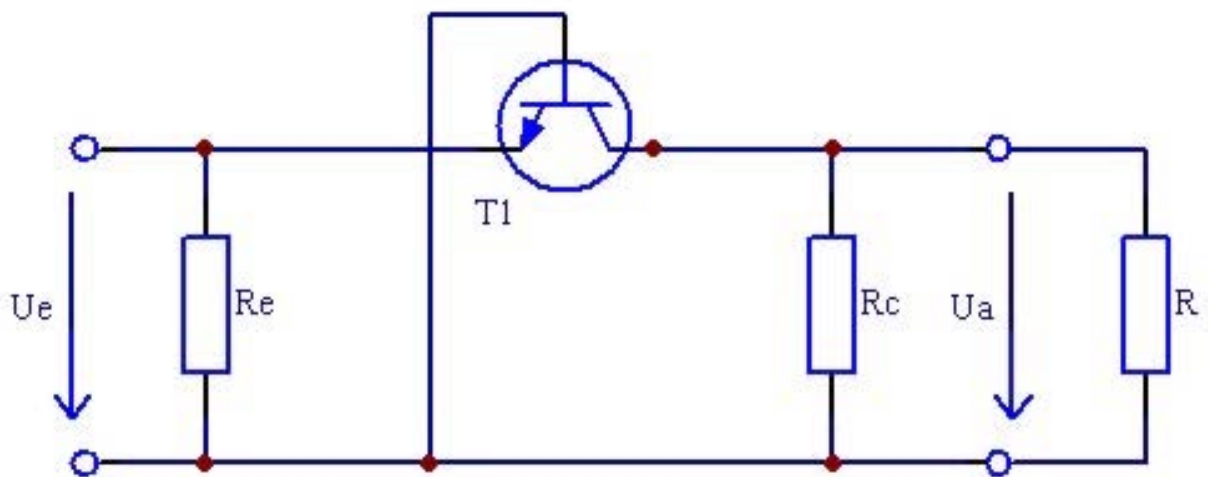
$v_i \leq 1$

$v_U = \text{gro\ss}$ (100 ... 200)

$v_P = v_i \cdot v_U = \text{gro\ss}$

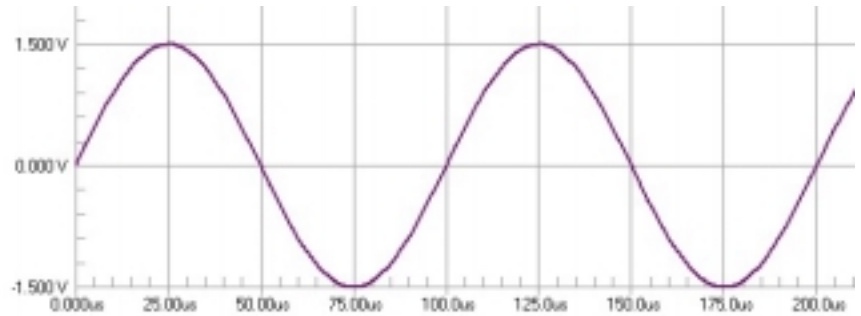
\Rightarrow Einsatz als HF-Verstärker

Wechselstromersatzschaltbild: (~ESB)

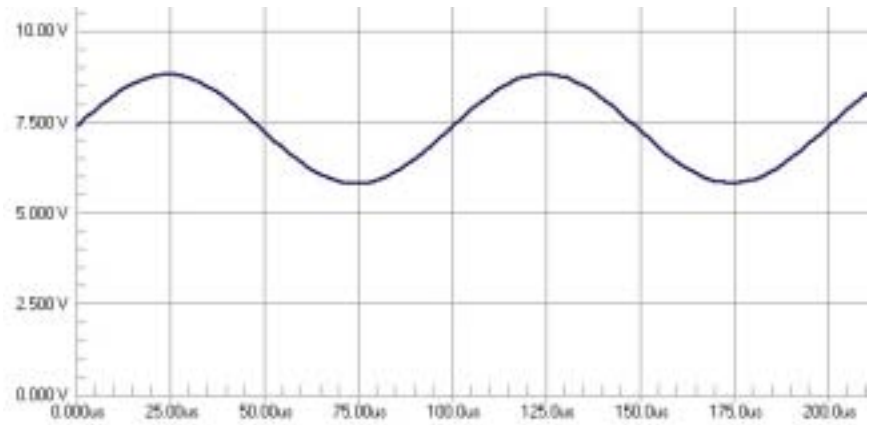


Oszillogramme der Basisschaltung:

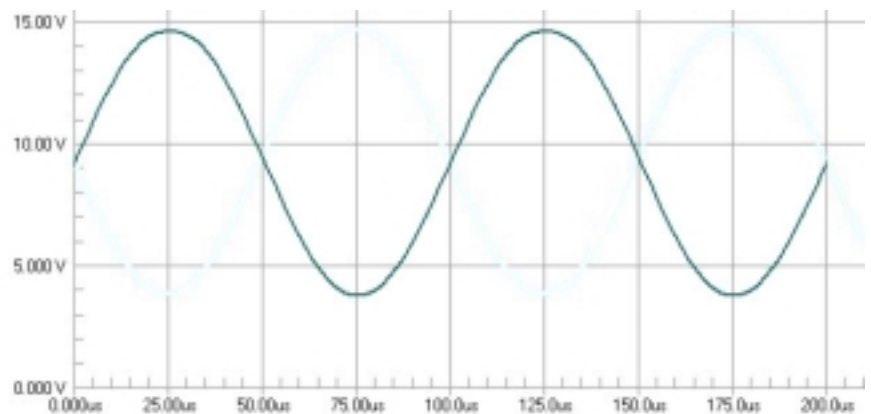
Vor Ck1 (Eingang):



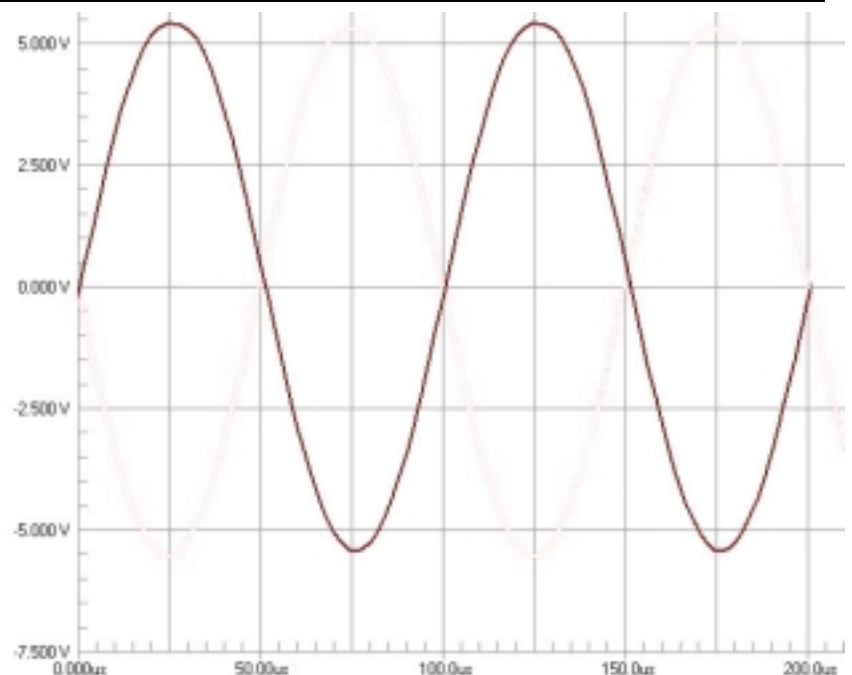
Nach Ck1:



Vor Ck2:



Nach Ck2 (Ausgang):



Darstellung des Transistors mit Hilfe der H-Parameter:

H-Matrix (Hybrid-Matrix):

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_1 \\ U_2 \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow U_1 = h_{11} \cdot I_1 + h_{12} \cdot U_2$$

$$\Rightarrow I_2 = h_{21} \cdot I_1 + h_{22} \cdot U_2$$

$$h_{11} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} = r_{BE}$$

$$h_{12} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{CE}} = \frac{1}{v_U}$$

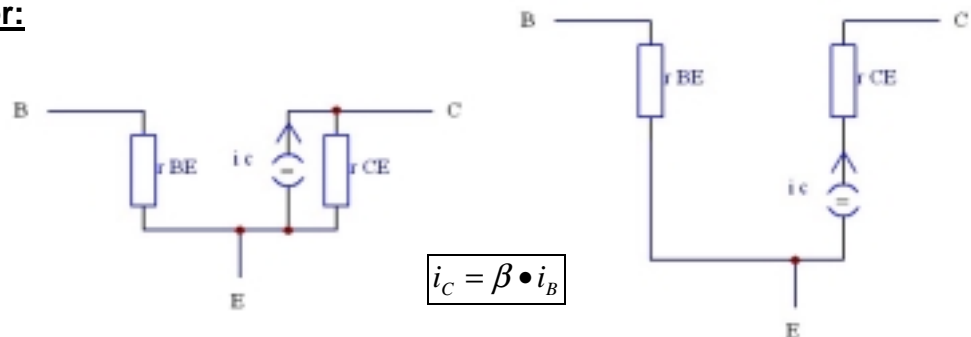
$$h_{21} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \beta$$

$$h_{22} = \frac{\Delta I_B}{\Delta U_{CE}} = \frac{1}{r_{CE}}$$

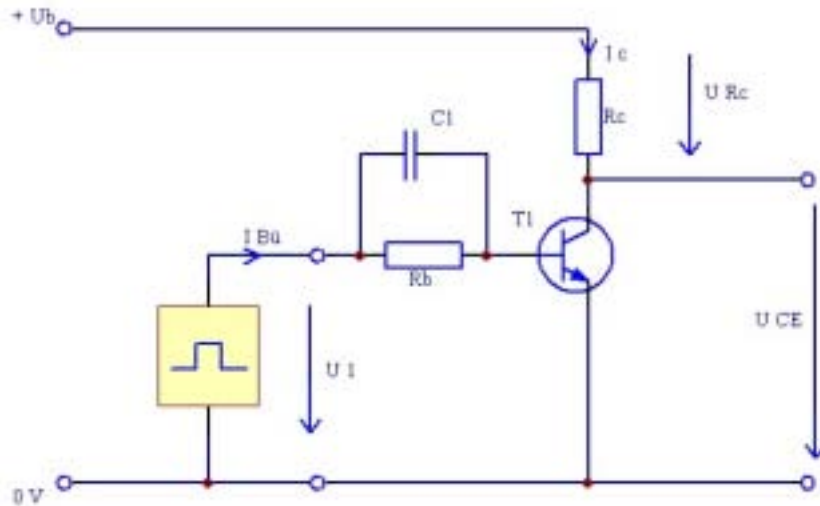
 h_{11} = Wechselstromeingangswiderstand r_{BE} h_{12} = Kehrwert der Wechselspannungsverstärkung $\frac{1}{v_U}$ h_{21} = Wechselstromverstärkung β h_{22} = Kehrwert des Wechselstromausgangswiderstandes (Ausgangsleitwert) $\frac{1}{r_{CE}}$ **~ESB für Transistor:**

$$r_{BE} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B}$$

$$r_{CE} = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C}$$

 ΔI_C = Kollektorstromänderung ; ΔI_B = Basisstromänderung ; β = Wechselstromverst. ΔU_{CE} = Kollektor-Emitter-Spannungsänderung ΔU_{BE} = Basis-Emitter-Spannungsänderung r_{BE} = Wechselstromwiderstand des Eingangs (Basis-Emitter-Strecke) r_{CE} = Wechselstromwiderstand des Ausgangs (Kollektor-Emitter-Strecke)

Transistor als Schalter:



C_1 = Kondensator zur Verkürzung der Einschaltzeit

Schaltzustand EIN: (A1)

$$U_{CE} = U_{CEsat} (\approx 0,1 \dots 0,2V)$$

$$P_V = U_{CEsat} \cdot I_C$$

$$I_{Bü} = \ddot{u} \cdot I_B$$

$$R_C = \frac{U_b - U_{CEsat}}{I_C}$$

$$I_C = I_{Cmax} = \frac{U_b - U_{CEsat}}{R_C}$$

$$P_L = I_C^2 \cdot R_C = I_C \cdot (U_b - U_{CEsat})$$

Schaltzustand AUS: (A2)

$$U_{CE} \approx U_b$$

$$I_C = I_{CRest} \approx 0$$

U_{CEsat} = Restspannung am Transistor im Sättigungsbereich (A1)

P_V = Verlustleistung am Transistor

$I_{Bü}$ = Übersteuerter Basisstrom

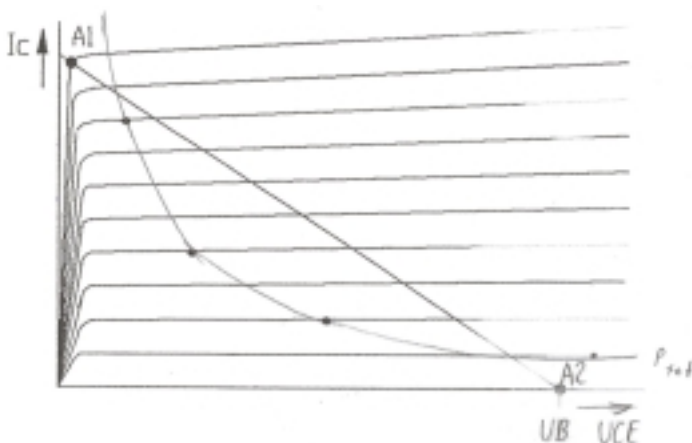
\ddot{u} = Übersteuerungsfaktor

I_B = Basisstrom an der Sättigungsgrenze

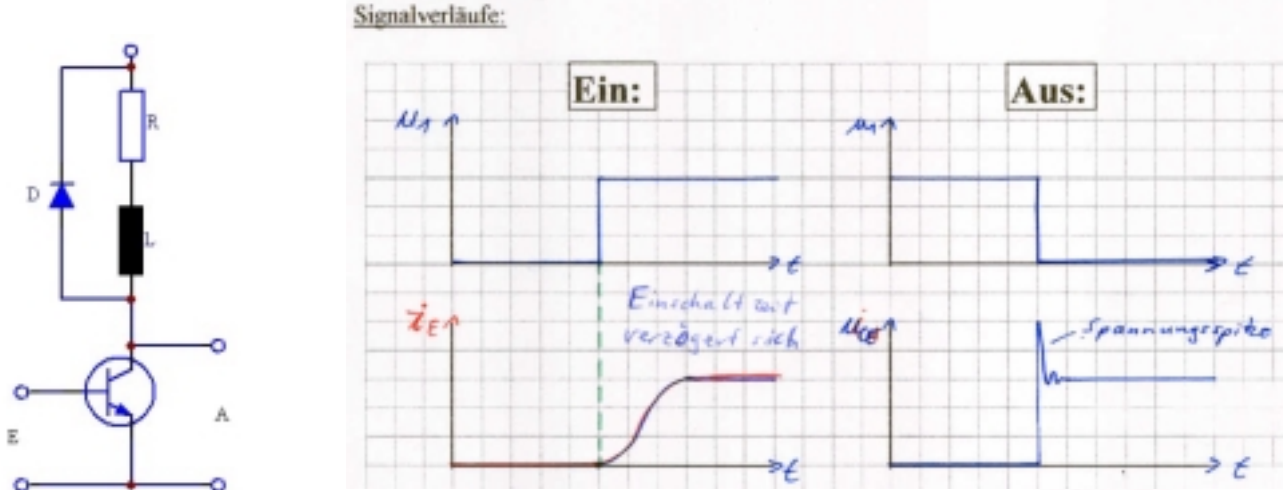
U_b = Betriebsspannung

I_{CRest} = Reststrom im Sperrbereich (A2)

Die Punkte A1 und A2 müssen außerhalb der P_{tot} -Kennlinie liegen !!!



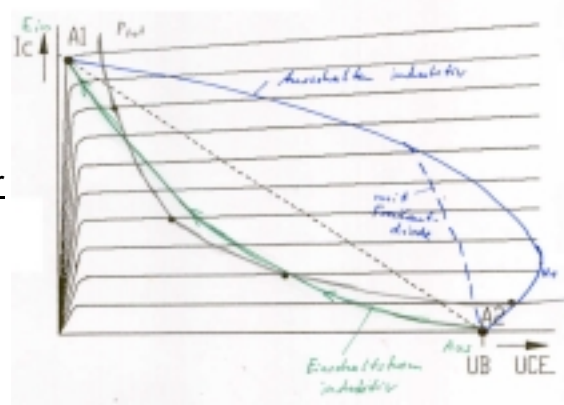
Transistor und Induktivität:



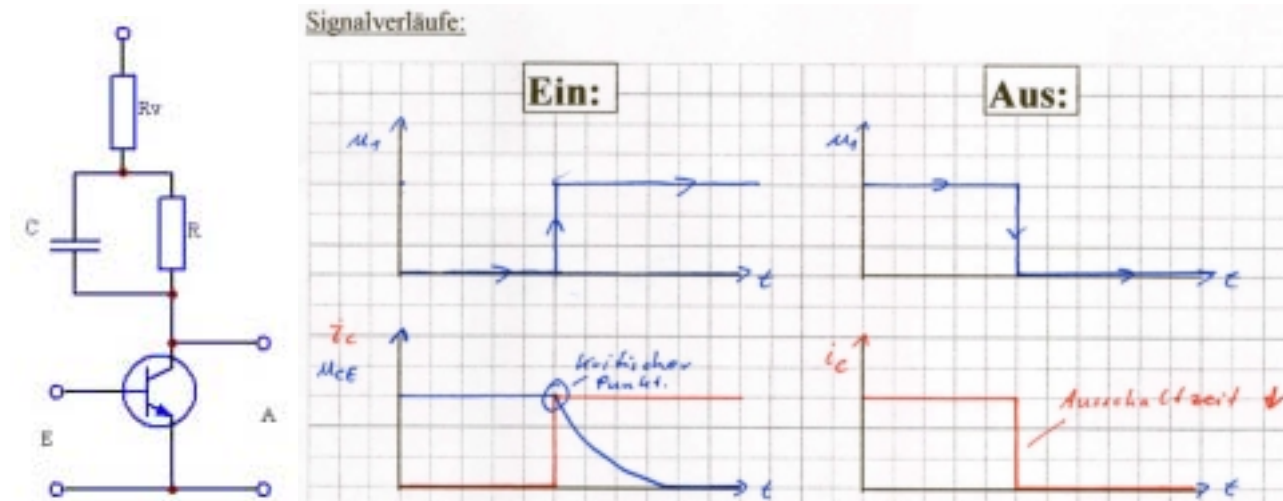
⇒ Das Einschalten von Induktivitäten ist unproblematisch.

!! Das Ausschalten erzeugt durch Selbstinduktion in der Spule Spannungsspitzen, die den Transistor zerstören können.

⇒ Abhilfe: Freilaufdiode



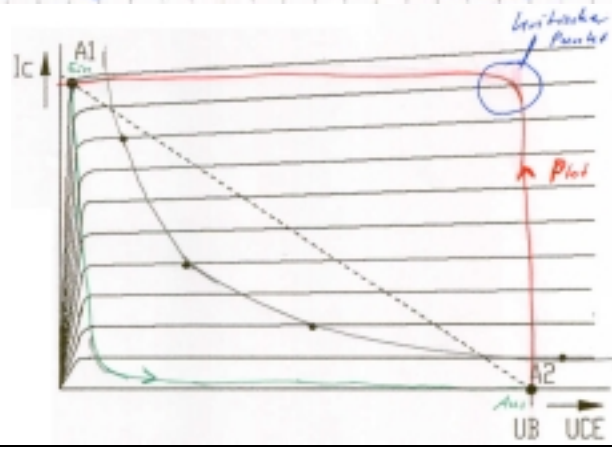
Transistor und Kondensator:

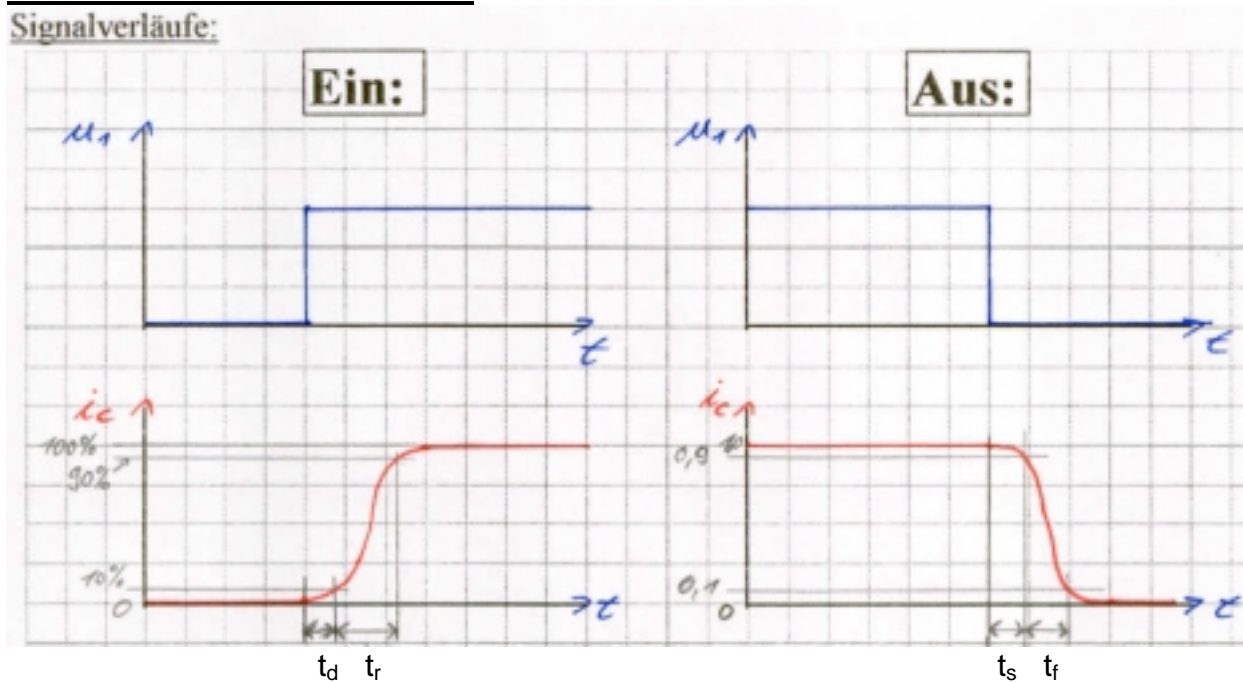


⇒ Das Ausschalten kapazitiver Lasten ist unproblematisch

!! Beim Einschalten fließt im ersten Moment ein hoher Strom bei der maximalen Betriebsspannung am Transistor. P_V ist sehr hoch.

⇒ Abhilfe: Vorwiderstand vor RC-Glied



Schaltzeiten von Transistoren:**Signalverläufe:**

$$t_{Ein} = t_d + t_r$$

$$t_{Aus} = t_s + t_f$$

t_{Ein} = Einschaltzeit des Transistors

t_d = Verzögerungszeit (delay)

t_r = Anstiegszeit (rise)

t_{Aus} = Ausschaltzeit des Transistors

t_s = Speicherzeit (save)

t_f = Abfallzeit (fall)

Je nach Transistortyp ergeben sich Schaltzeiten von 5ns bis 500ns pro Schaltvorgang.

!!! Einschaltzeit und Ausschaltzeit müssen nicht gleich sein !!!!

Aus den Schaltzeiten ergibt sich die Grenzfrequenz f_{Gr} des Transistors im Schalterbetrieb:

$$T_{Gr} = t_{Ein} + t_{Aus} = t_d + t_r + t_s + t_f$$

$$f_{Gr} = \frac{1}{T_{Gr}}$$







T_{Gr} = minimale Schaltzeit des Transistors als Schalter

f_{Gr} = Grenzfrequenz (maximale Schaltfrequenz) des Transistors als Schalter

Feldeffekt-Transistoren Übersicht:

Der Name Feldeffekt-Transistor (FET) kommt daher, das die steuernde Größe für den Drainstrom ein elektrisches Feld ist, das zwischen Gate und Source durch die Spannung U_{GS} erzeugt wird. Es fließt kein Gate-Strom ($I_G = 0$), daher leistungslose Ansteuerung.

FET's heißen auch unipolare Transistoren, da der Drainstrom zwischen Drain und Source keine Sperschichten durchlaufen muß, sondern nur in Schichten einer Dotierungsart (N oder P) fließt. Es gibt folgenden FET-Typen:

Sperrschicht-FET's (J-FET's)		Isolierschicht-FET's (IG-FET's , MOS-FET's)			
Verarmungstyp		Verarmungstyp		Anreicherungstyp	
					
N-Kanal	P-Kanal	N-Kanal	P-Kanal	N-Kanal	P-Kanal
selbstleitend				selbstsperrend	

Kennwerte eines FET:

Eingangswiderstand statisch (Gleichspannung):

$$R_E = R_{GS} = \frac{U_{GS}}{I_G} \qquad I_G = \frac{U_{GS}}{R_E} \qquad U_{GS} = R_E \cdot I_G$$

R_E ist sehr hochohmig, da I_G im nA-Bereich liegt.

Eingangswiderstand dynamisch (Wechselspannung):

$$r_E = \frac{\Delta U_{GS}}{\Delta I_G} \qquad \Delta I_G = \frac{\Delta U_{GS}}{r_E} \qquad \Delta U_{GS} = r_E \cdot \Delta I_G$$

r_E ist sehr hochohmig.

Ausgangswiderstand statisch (Gleichspannung):

$$R_A = \frac{U_{DS}}{I_{DS}} \qquad I_{DS} = \frac{U_{DS}}{R_A} \qquad U_{DS} = R_A \cdot I_{DS}$$

R_A ist variabel von ca. 100 Ω bis in den G Ω -Bereich.

Ausgangswiderstand dynamisch (Wechselspannung):

$$r_A = \frac{\Delta U_{DS}}{\Delta I_{DS}} \qquad \Delta I_{DS} = \frac{\Delta U_{DS}}{r_A} \qquad \Delta U_{DS} = r_A \cdot \Delta I_{DS}$$

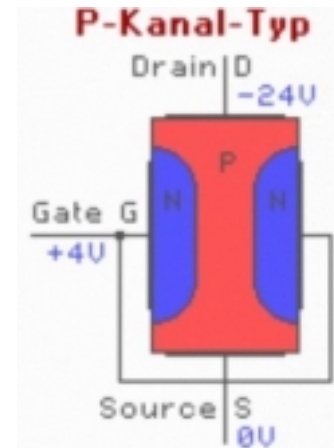
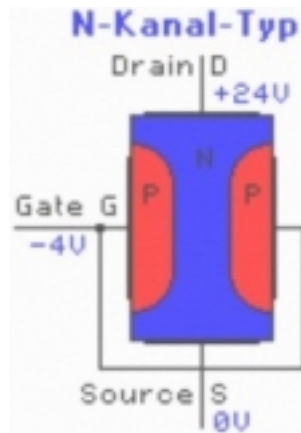
r_E in der Praxis von ca. 25 k Ω bis 100 k Ω

J-FET's (Junction-FET's , selbstleitend):**Funktionsprinzip:**

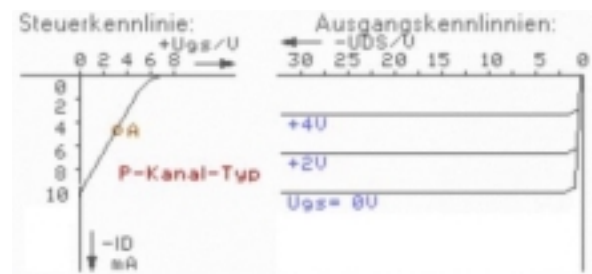
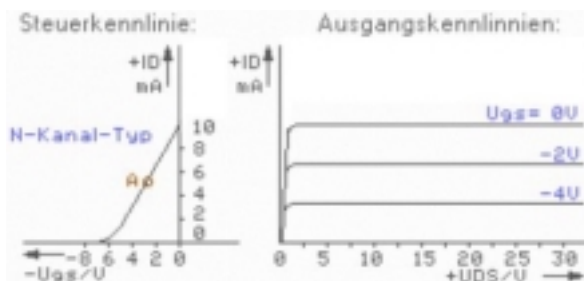
Beim J-FET wird der Querschnitt bzw. die Anzahl der freien Ladungsträger durch die angelegte Gate-Spannung verändert.

Ansteuerung:

- Die Spannung U_{GS} muß so gepolt sein, daß der PN-Übergang in Sperrrichtung gepolt ist.
- Die Spannung U_{DS} muß so gepolt sein, daß Drain die Ladungsträger aus Source absaugen kann.

**Funktionsweise:**

1. $U_{GS} = 0V \Rightarrow$ J-FET leitet
2. Mit zunehmender Sperrspannung (U_{GS} wird negativer) am Gate verbreitern sich die Sperrschichten der PN-Übergänge und schnüren den Kanal Drain-Source ab.
 \Rightarrow J-FET sperrt
3. Gatespannung entgegen der Polungsrichtung (z.B. bei N-FET + ans Gate)
 \Rightarrow Dioden sind nun in Durchlaßrichtung gepolt. Sperrschicht baut sich schnell ab.
Es fließt ein großer Gatestrom.
 \Rightarrow !!! Leistungslose Ansteuerung geht verloren. Große Gefahr der Zerstörung !!!

Kennlinien:

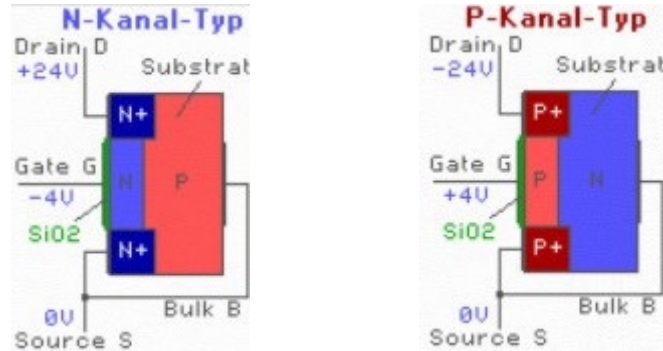
MOS-FET's (Metal Oxide Semiconductor) vom Verarmungstyp (selbstleitend):

Funktionsprinzip:

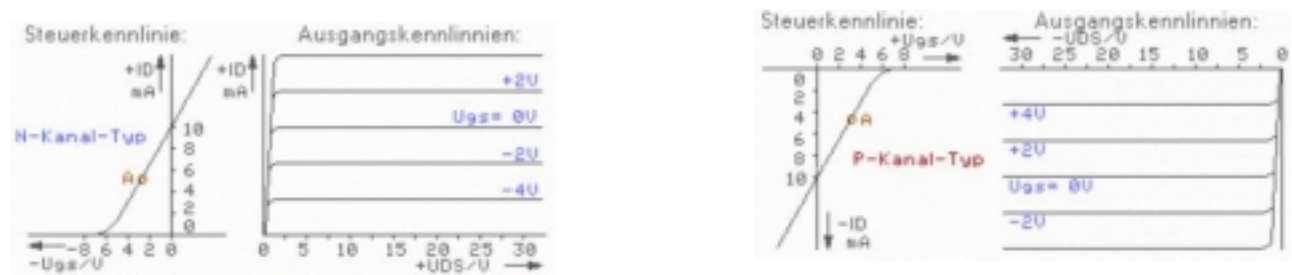
Es ist ein leitender Kanal zwischen Drain und Source vorhanden. Durch Anlegen einer entsprechenden Gate-Spannung werden entweder Ladungsträger aus dem Kanal verdrängt oder in den Kanal gezogen.

Ansteuerung:

- Das Potential am Gate muß die Ladungsträger im Kanal mehr oder weniger ins Substrat drängen, so daß der Kanal verarmt.
- Die Spannung U_{DS} muß so gepolt sein, daß Drain die Ladungsträger aus Source absaugen kann.



Kennlinien:



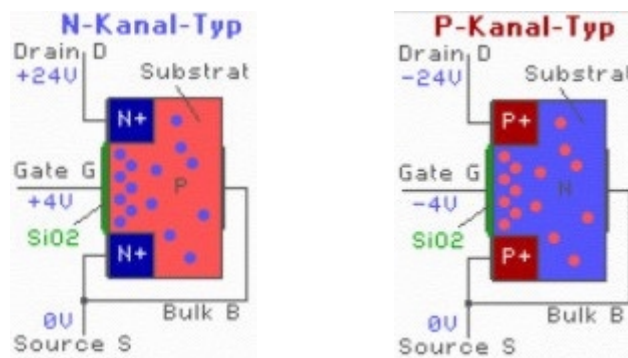
MOS-FET's vom Anreicherungstyp (selbstsperrend):

Funktionsprinzip:

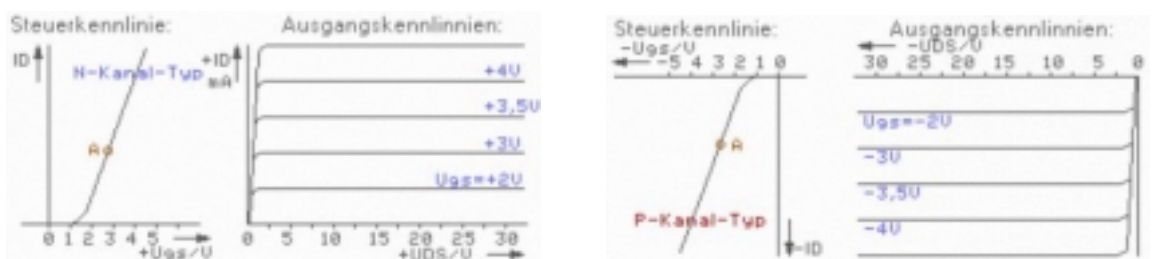
Es ist kein leitender Kanal zwischen Drain und Source vorhanden. Durch anlegen einer entsprechenden Gate-Spannung werden Ladungsträger, die im Substrat als Minoritätsträger vorhanden sind, im Substrat unter den Gate-Anschluß gezogen und bilden dort einen leitenden Kanal. Man nennt diesen Vorgang **Inversion**, da die Minoritätsträger den Ladungstransport übernehmen.

Ansteuerung:

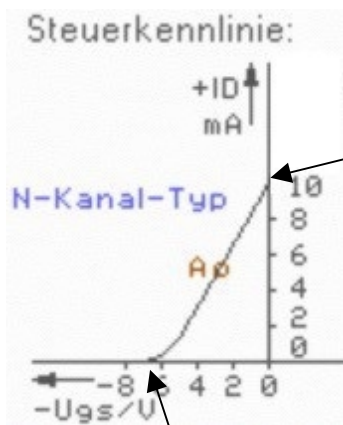
- Das Potential an Gate saugt nach überschreiten einer Schwellenspannung Minoritätsträger aus dem Substrat in die Kanalzone.
- Die Spannung U_{DS} muß so gepolt sein, daß Drain die Ladungsträger aus Source absaugen kann.



Kennlinien:



Die Steuerkennlinie:



I_{DSS} (maximaler Drainstrom)

U_P = Pinch off Voltage Point (Abschnürspannung)

Für $|U_{DS}| \geq |U_P|$ stellt sich der **maximale Drainstrom** ein.

Für $|U_{DS}| \leq |U_P|$ sinkt der Drainstrom.

Berechnung:

$$I_D = I_{DSS} \cdot \left(1 - \frac{|U_{GS}|}{|U_P|}\right)^2 \quad \text{für } |U_{DS}| \leq |U_P|$$

Die Steilheit S:

Die Steilheit S gibt die Verstärkereigenschaften des FET an.

$$S = \frac{\Delta I_{DS}}{\Delta U_{GS}}$$

$$\Delta U_{GS} = \frac{\Delta I_{DS}}{S}$$

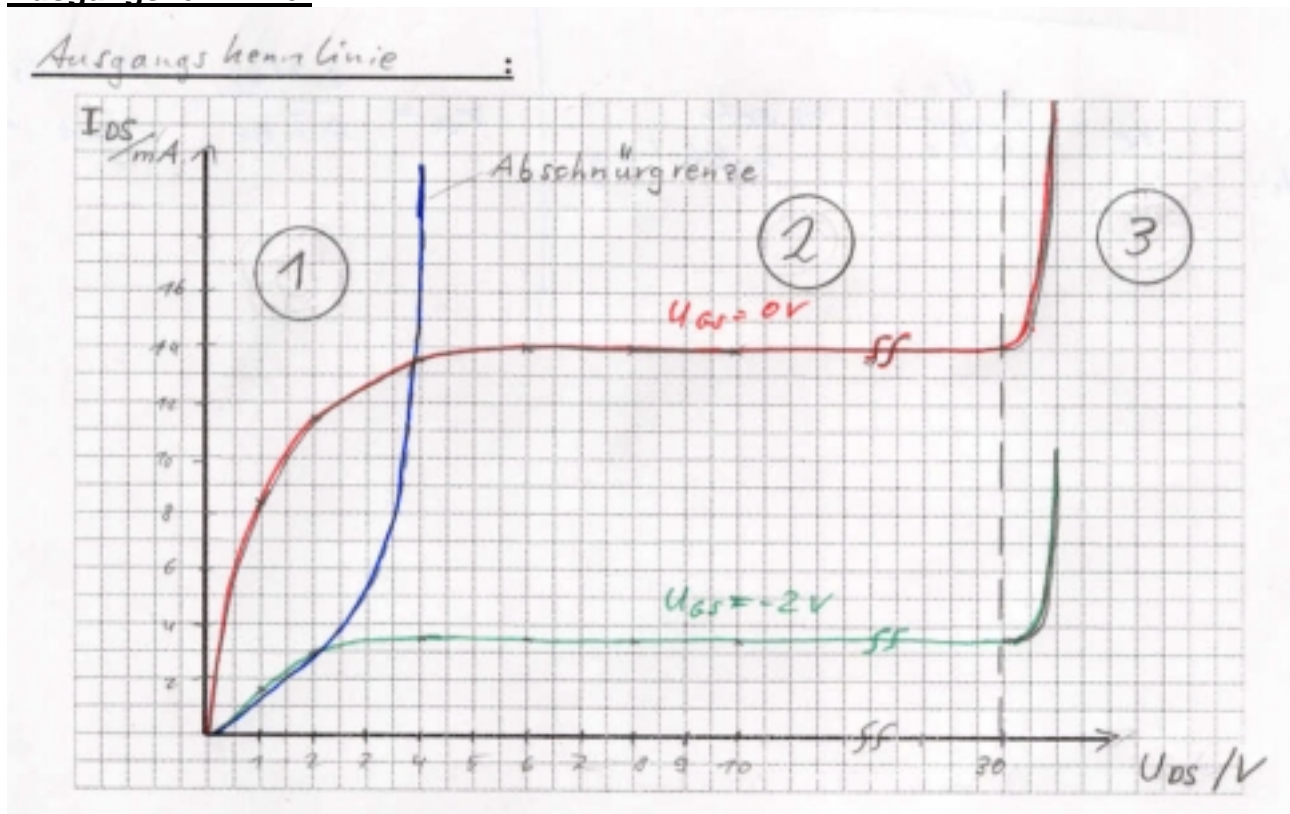
$$\Delta I_{DS} = \Delta U_{GS} \cdot S$$

S = Steilheit in $\frac{mA}{V}$

ΔI_{DS} = Änderung des Drain-Source-Stromes (im Arbeitspunkt) in mA

ΔU_{GS} = Änderung der Gate-Source-Spannung (im Arbeitspunkt) in V

FET- Typ	Steilheit
J-FET	2 bis 5 $\frac{mA}{V}$
MOS-FET Verarmungstyp	3 bis 8 $\frac{mA}{V}$
MOS-FET Anreicherungstyp	bis ca. 30 $\frac{mA}{V}$

Ausgangskennlinie:

Die Ausgangskennlinie besitzt 3 Bereiche:

1. Ohm'scher Bereich:

Der Drainstrom I_{DS} ist abhängig von der Drain-Source-Spannung U_{DS} .
Im Bereich des Nullpunktes verhält sich der J-FET wie ein ohm'scher Widerstand

2. Abschnürbereich:

Der Drainstrom ist nahezu konstant. ($U_{GS} = \text{konstant}$)

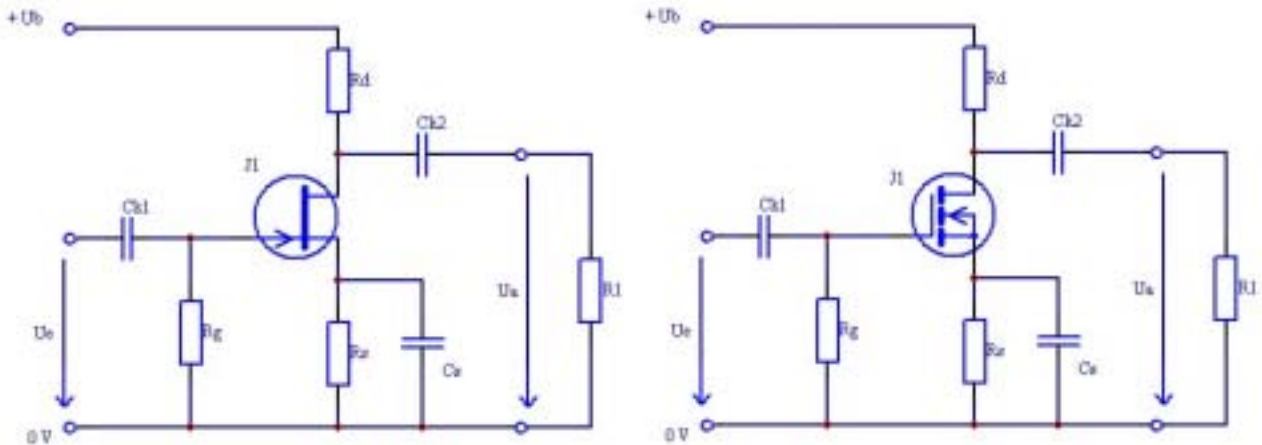
⇒ Verstärkerbetrieb

!! Spannungen dürfen nicht in den Ohm'schen Bereich abfallen, sonst Verzerrung !!

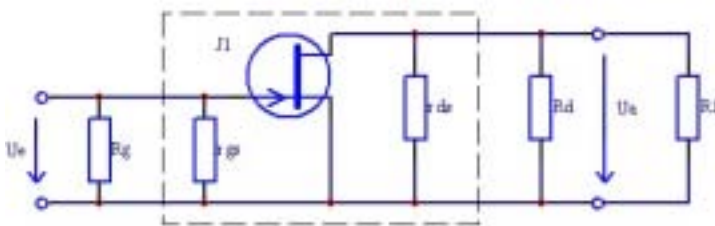
3. Durchbruchbereich: ($U_{DS} \geq U_{DSmax}$)

⇒ sehr starker Drainstromanstieg. Führt meist zur Zerstörung des FET

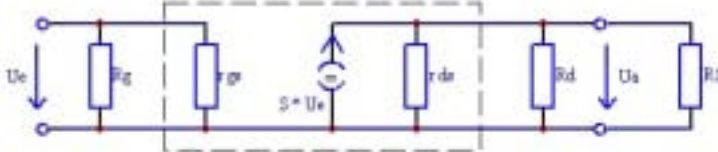
Source-Schaltung:



Wechselstrom-ESB:



Wechselstrom-ESB mit FET-ESB:



Berechnungen zur Source-Schaltung:

Wechselstromeingangswiderstand:

$$r_E = R_G \parallel R_{GS} \Rightarrow r_E = \frac{R_G \cdot r_{GS}}{R_G + r_{GS}} ; \text{ da } r_{GS} \text{ sehr viel hochohmiger als } R_G \Rightarrow r_E \approx R_G$$

Wechselstromausgangswiderstand:

$$r_A = r_{DS} \parallel R_D \Rightarrow r_A = \frac{r_{DS} \cdot R_D}{r_{DS} + R_D} ; \text{ da } r_{DS} \text{ hochohmiger als } R_D \Rightarrow r_A \approx R_D$$

**Spannungsverstärkung:
ohne Lastwiderstand R1:**

$$v_U = S \cdot r_A \Rightarrow v_U = S \cdot R_D \quad S = \frac{v_U}{R_D} \quad R_D = \frac{v_U}{S}$$

mit Lastwiderstand R1:

$$v_U = S \cdot (r_A \parallel R_1) \Rightarrow v_U = \frac{S \cdot R_D \cdot R_1}{R_D + R_1}$$

Fortsetzung Berechnungen zur Source-Schaltung:**Einkoppelkondensator:**

$$x_{Ck1} = r_E \Rightarrow Ck1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{GrU} \cdot R_G} \quad f_{GrU} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot Ck1 \cdot R_G} \quad R_G = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{GrU} \cdot Ck1}$$

f_{GrU} = Tiefste noch zu verstärkende Frequenz

**Auskoppelkondensator:
ohne Lastwiderstand R1:**

$$x_{Ck2} = r_A \Rightarrow Ck2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{GrU} \cdot R_D} \quad f_{GrU} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot Ck2 \cdot R_D} \quad R_D = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{GrU} \cdot Ck2}$$

f_{GrU} = Tiefste noch zu verstärkende Frequenz

mit Lastwiderstand R1:

$$x_{Ck2} = r_A \parallel R_1$$

$$Ck2 = \frac{R_D + R_1}{2 \cdot \pi \cdot f_{GrU} \cdot R_D \cdot R_1} \quad f_{GrU} = \frac{R_D + R_1}{2 \cdot \pi \cdot Ck2 \cdot R_D \cdot R_1}$$

f_{GrU} = tiefste noch zu verstärkende Frequenz

Source-Kondensator:

Der Source-Kondensator muß die tiefste noch zu verstärkende Frequenz f_{GrU} der Eingangswechselspannung noch überbrücken können.

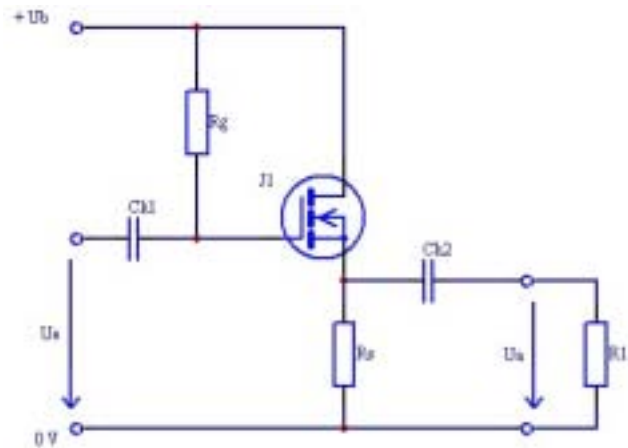
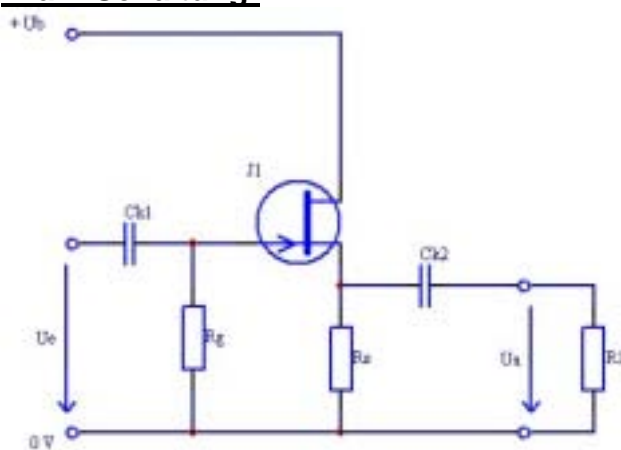
$$C_S = 0,2 \cdot \frac{S}{f_{GrU}} \quad f_{GrU} = 0,2 \cdot \frac{S}{C_S} \quad S = 5 \cdot C_S \cdot f_{GrU}$$

f_{GrU} = Tiefste noch zu verstärkende Frequenz

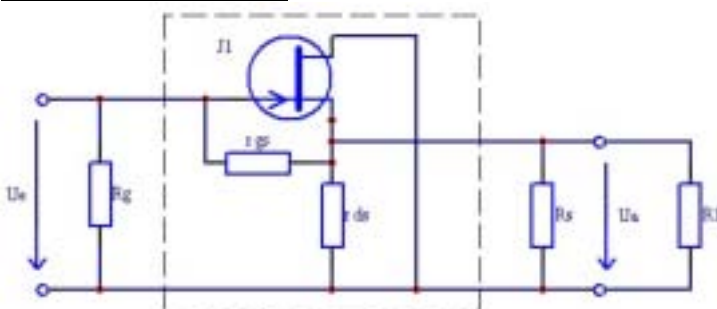
Automatische Gate-Source-Spannungseinstellung:

$$|U_{GS}| = U_{Rs}$$

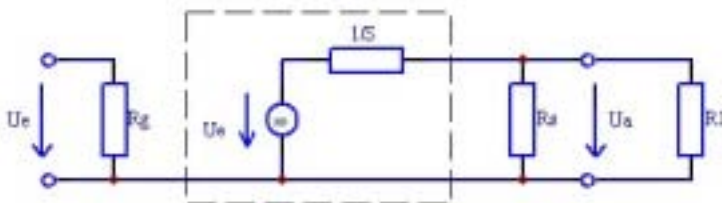
Drain-Schaltung:



Wechselstrom-ESB:



Wechselstrom-ESB mit FET-ESB:



Berechnungen zur Drain-Schaltung:

Wechselstromeingangswiderstand (hochohmig):

$$r_E = R_G(1 + S \cdot R_S)$$

$$R_G = \frac{r_E}{(1 + S \cdot R_S)}$$

$$R_S = \frac{r_E - R_G}{S \cdot R_G}$$

$$S = \frac{r_E - R_G}{R_S \cdot R_G}$$

Wechselstromausgangswiderstand (niederohmig):

für Lastwiderstand $R_1 > 1\text{k}\Omega$:

$$r_A \approx \frac{1}{S}$$

für Lastwiderstand $R_1 < 1\text{k}\Omega$:

$$r_A = \frac{1}{S} \parallel R_S \Rightarrow r_A = \frac{\frac{1}{S} \cdot R_S}{\frac{1}{S} + R_S} \Rightarrow r_A = \frac{R_S}{1 + (R_S \cdot S)}$$

Fortsetzung Berechnungen zur Drain-Schaltung:

Spannungsverstärkung (<1):

$$v_U = \frac{S \cdot R_S}{1 + (S \cdot R_S)}$$

$$v_U = \frac{U_A}{U_E} = \frac{U_{R_S}}{U_{R_S} + U_{G_S}}$$

Ein- und Auskoppelkondensator:

$$Ck1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{GrU} \cdot R_G}$$

$$f_{GrU} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot Ck1 \cdot R_G}$$

$$R_G = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{GrU} \cdot Ck1}$$

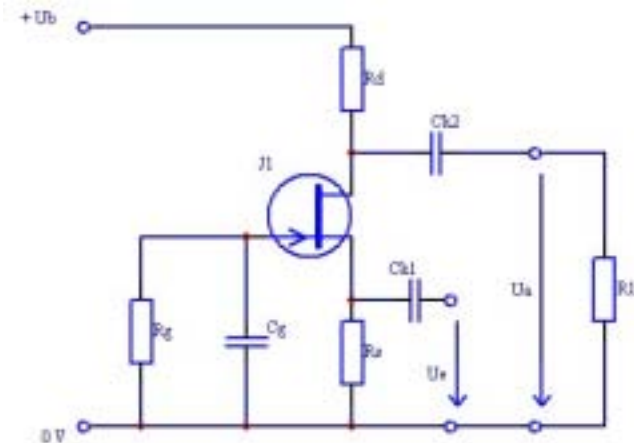
$$Ck2 = \frac{S}{2 \cdot \pi \cdot f_{GrU}}$$

$$f_{GrU} = \frac{S}{2 \cdot \pi \cdot Ck2}$$

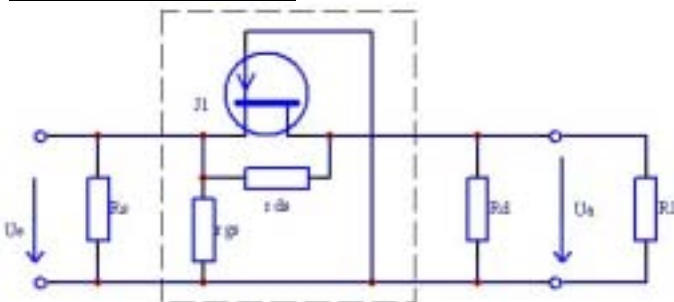
$$S = 2 \cdot \pi \cdot f_{GrU} \cdot Ck2$$

f_{GrU} = Tiefste noch zu verstärkende Frequenz

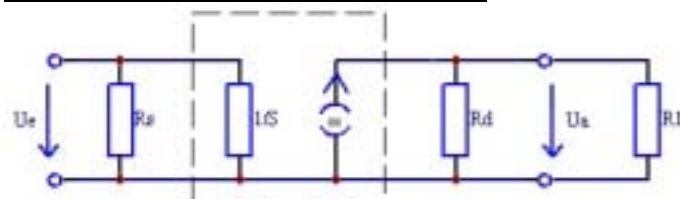
Gate-Schaltung:



Wechselstrom-ESB:



Wechselstrom-ESB mit FET-ESB:



Berechnungen zur Gate-Schaltung:Wechselstromeingangswiderstand (sehr klein):

$$r_E = R_S \parallel \frac{1}{S} \Rightarrow r_E = \frac{R_S}{1 + (R_S \cdot S)}$$

Wechselstromausgangswiderstand (mittel):

$$r_A = R_D \parallel r_{DS} \Rightarrow r_A = \frac{R_D \cdot r_{DS}}{R_D + r_{DS}}$$

Spannungsverstärkung:

$$v_U = S \cdot r_A$$

Gatekondensator:

$$C_G = \frac{10}{2 \cdot \pi \cdot f_{GrU} \cdot R_G}$$

$$f_{GrU} = \frac{10}{2 \cdot \pi \cdot C_G \cdot R_G}$$

$$R_G = \frac{10}{2 \cdot \pi \cdot f_{GrU} \cdot C_G}$$

f_{GrU} = Tiefste noch zu verstärkende Frequenz