



6.2.2.2 Glättung und Siebung

Die von der Gleichrichterschaltung (Bild 1) gelieferte pulsförmige Spannung ist die Summe aus der Gleichspannung U_d und der Wechselspannung u_p mit der Pulsfrequenz $f_p = 1/T_p$ (Bild 2). Diese Wechselspannung nennt man Brummspannung. Durch den Glättungskondensator C_G wird U_d vergrößert und U_p verkleinert.

Beispiel 1: Brummspannung berechnen

Eine Gleichrichterschaltung B2 mit Halbleiterdioden für das Netz mit 50 Hz (Bild 1) liefert den Lastgleichstrom $I_d = 150 \text{ mA}$. Der Glättungskondensator hat die Kapazität $C_G = 500 \mu\text{F}$. Berechnen Sie die Brummspannung \hat{U}_p .

Lösung:

$$\hat{U}_p \approx \frac{0,75 \cdot I_d}{f_p \cdot C_G} = \frac{0,75 \cdot I_d}{2 \cdot f \cdot C_G} = \frac{0,75 \cdot 150 \text{ mA}}{2 \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 500 \mu\text{F}} = 2,25 \text{ V}$$

Reicht die Glättung durch den Glättungskondensator allein nicht aus, so schaltet man zwischen ihn und die Last ein Siebglied, das als Tiefpass wirkt.

Aufgaben zu 6.2.2.2

- Bei einem Siebglied beträgt die Brummspannung am Eingang 5 V. Am Ausgang darf die Brummspannung noch 0,2 V betragen. Berechnen Sie den Siebfaktor.
- Mit dem Oszilloskop wurde der Spitze-Tal-Wert der Brummspannung zu 3,5 V gemessen. Berechnen Sie den Effektivwert.
- Welche Brummspannung \hat{U}_p stellt sich bei einem 50-Hz-Netz am Glättungskondensator $C_g = 100 \mu\text{F}$ in einer Gleichrichterschaltung B2 ein, der ein Lastgleichstrom von 80 mA entnommen wird?
- Einer Gleichrichterschaltung E1 am Netz 50 Hz wird ein Lastgleichstrom von 110 mA entnommen. Berechnen Sie den Effektivwert der Brummspannung am Glättungskondensator mit der Kapazität von 250 μF .
- Ein elektronischer Gegentaktspannungswandler erzeugt eine Wechselspannung, die mit einer Gleichrichterschaltung B2 gleichgerichtet und mit dem Glättungskondensator $C_G = 2,2 \mu\text{F}$ geglättet wird. Welche Frequenz muss die erzeugte Wechselspannung mindestens haben, damit bei einem Lastgleichstrom von 100 mA der Spitze-Tal-Wert der Brummspannung höchstens 1 V ist?

$$Q = C_G \cdot \hat{U}_p \approx t_E \cdot I_d$$

$$\hat{U}_p \approx \frac{t_E \cdot I_d}{C_G}$$

$$\hat{U}_p \approx \frac{0,75 \cdot T_p \cdot I_d}{C_G}$$

$$U_p \approx \frac{\hat{U}_p}{2 \cdot \sqrt{3}}$$

$$\hat{U}_p \approx 0,75 \cdot \frac{I_d}{f_p \cdot C_G}$$

$$s = \frac{\hat{U}_{p1}}{\hat{U}_{p2}}$$

$$s = \frac{U_{p1}}{U_{p2}}$$

\hat{U}_p	Brummspannung (Spitze-Tal-Wert)
I_d	Lastgleichstrom
t_E	Entladzeit ($t_E \approx 0,75 \cdot T_p$)
T_p	Periodendauer der Brummspannung
f_p	Brummfrequenz (Pulsfrequenz)
C_G	Kapazität des Glättungskondensators
U_p	Brummspannung (Effektivwert)
s	Siebfaktor
U_{p1}, U_{p2}	Brummspannungen am Eingang, Ausgang

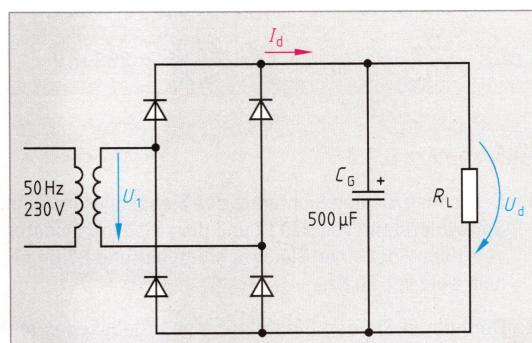


Bild 1: Gleichrichtung und Glättung

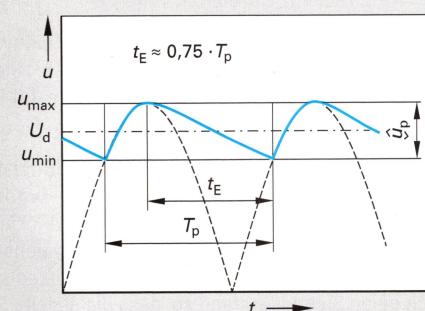


Bild 2: Glättung der gleichgerichteten Spannung



6.2.2.3 Siebung mit RC und LC

Bei **RC-Siebung** wird die Brummspannung durch den Siebwiderstand R_s und den Siebkondensator C_s herabgesetzt (**Bild 1**). Durch den Lastgleichstrom I_d entsteht am Siebwiderstand R_s ein Gleichspannungsfall und eine Verlustleistung. Die RC-Siebung eignet sich daher nur für kleine Lastströme.

Bei der **LC-Siebung** wird die Brummspannung durch die Siebdrosselspule der Induktivität L_s und der Siebkondensator C_s herabgesetzt (**Bild 2**).

Beispiel 1: Kennwerte einer RC-Siebung berechnen

Am Ladekondensator einer Gleichrichterschaltung B2 am 50-Hz-Netz beträgt die Brummspannung $U_{p1} = 2,5 \text{ V}$. Das nachgeschaltete Siebglied besteht aus $R_s = 100 \Omega$ und $C_s = 100 \mu\text{F}$. Berechnen Sie a) Siebfaktor, b) Brummspannung am Siebkondensator.

Lösung:

$$\text{a) } s = \omega_p \cdot R_s \cdot C_s = 2\pi \cdot f_p \cdot R_s \cdot C_s \\ = 2\pi \cdot 2 \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 100 \Omega \cdot 100 \mu\text{F} = 6,28$$

$$\text{b) } s = \frac{U_{p1}}{U_{p2}} \Rightarrow U_{p2} = \frac{U_{p1}}{s} = \frac{2,5 \text{ V}}{6,28} = 398 \text{ mV}$$

Aufgaben zu 6.2.2.3

1. Berechnen Sie den Siebfaktor des Siebgliedes mit dem Siebwiderstand von 220Ω und dem Siebkondensator von $100 \mu\text{F}$ bei einer Gleichrichterschaltung B2 an einem Netz von 60 Hz.
2. Berechnen Sie den Siebfaktor eines Siebgliedes mit $L_s = 2 \text{ H}$ und $C_s = 250 \mu\text{F}$ bei einer Gleichrichterschaltung B2 für die Netzfrequenz 50 Hz.
3. Welchen Siebfaktor hat ein Siebglied mit einer Drosselspule der Induktivität von $3,5 \text{ H}$ und einem Siebkondensator von $100 \mu\text{F}$ bei Gleichrichterschaltung B2 und einer Netzfrequenz von 60 Hz?
4. Berechnen Sie für die Schaltung **Bild 1** a) Effektivwert der Brummspannung am Ladekondensator, b) Gleichspannungsfall am Siebwiderstand, c) Spitze-Tal-Wert der Brummspannung am Lastwiderstand R_L .
5. An einer Gleichrichterschaltung B2 am 50-Hz-Netz liegt ein LC-Siebglied mit $C_s = 100 \mu\text{F}$. Die Siebdrosselspule hat die Induktivität $L_s = 2,5 \text{ H}$ und den Wicklungswiderstand $R_{Cu} = 80 \Omega$. Es fließt ein Lastgleichstrom $I_d = 120 \text{ mA}$. a) Ersetzen Sie die Siebdrosselspule durch einen Siebwiderstand so, dass die gleiche Siebwirkung entsteht. b) Berechnen Sie den Gleichspannungsfall an der Drosselspule und am Siebwiderstand.

$$\omega_p = 2\pi \cdot f_p$$

RC-Siebung:

$$s \approx \frac{R_s}{X_{Cs}}$$

Für $R_s \gg X_{Cs}$:

$$s = \omega_p \cdot R_s \cdot C_s$$

LC-Siebung:

$$s \approx \frac{X_{Ls}}{X_{Cs}}$$

Für $X_{Ls} \gg X_{Cs}$:

$$s = \omega_p^2 \cdot L_s \cdot C_s$$

s Siebfaktor

ω_p Pulskreisfrequenz

f_p Pulsfrequenz

R_s Siebwiderstand

L_s Induktivität der Siebdrosselspule

C_s Kapazität des Siebkondensators

X_{Ls} Blindwiderstand der Siebdrosselspule

X_{Cs} Blindwiderstand des Siebkondensators

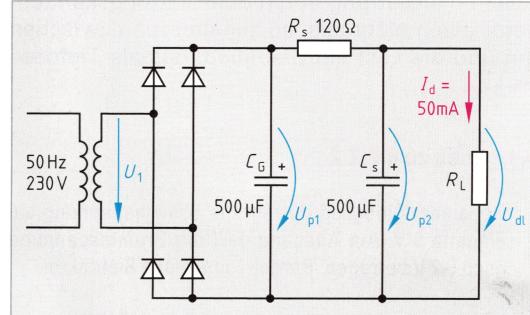


Bild 1: Gleichrichterschaltung mit RC-Siebung

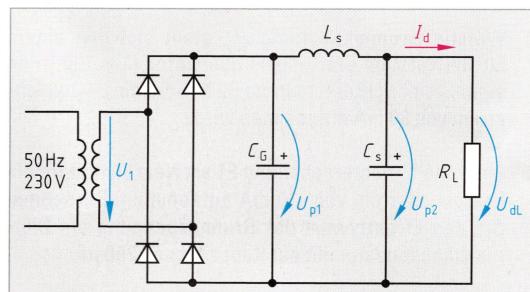


Bild 2: Gleichrichterschaltung mit LC-Siebung

6. Eine Gleichrichterschaltung B2 nach **Bild 2** liefert bei $U_d = 24 \text{ V}$ den Lastgleichstrom $I_d = 1,5 \text{ A}$. Glättungs- und Siebkondensator haben je $1000 \mu\text{F}$. Berechnen Sie die Induktivität der Siebdrosselspule, wenn die Brummspannung am Ausgang 100 mV betragen darf.



6.2.3 Spannungsstabilisierung mit Z-Dioden

6.2.3.1 Vorwiderstand für die Spannungsstabilisierung mit Z-Diode

Z-Dioden¹ gibt es in verschiedenen Bauformen (**Bild 1**).

Der Vorwiderstand R_v in der Stabilisierungsschaltung **Bild 2** muss so bemessen sein, dass der Strom I_Z im zulässigen Bereich bleibt.

I_{Zmin} wird meist mit $0,1 \cdot I_{Zmax}$ eingesetzt, damit der Knickbereich der Z-Diodenkennlinie vermieden wird.

Beispiel 1: Spannung stabilisieren

Die Stabilisierungsschaltung **Bild 2** enthält eine Z-Diode mit $P_{tot} = 750 \text{ mW}$. Die Eingangsspannung ist $42 \text{ V} \pm 10\%$. Der Laststrom ändert sich zwischen 12 mA und 18 mA bei 15 V . Berechnen Sie a) I_{Zmax} , b) I_{Zmin} , c) R_{max} , d) R_{min} .

Lösung:

$$\text{a) } I_{Zmax} \approx \frac{P_{tot}}{U_Z} = \frac{750 \text{ mW}}{15 \text{ V}} = 50 \text{ mA}$$

$$\text{b) } I_{Zmin} = \frac{I_{Zmax}}{10} = \frac{50 \text{ mA}}{10} = 5 \text{ mA}$$

$$\text{c) } R_{max} = \frac{U_{1min} - U_Z}{I_{Zmin} + I_{Lmax}} = \frac{37,8 \text{ V} - 15 \text{ V}}{5 \text{ mA} + 18 \text{ mA}} = 991 \Omega$$

$$\text{d) } R_{min} = \frac{U_{1max} - U_Z}{I_{Zmax} + I_{Lmin}} = \frac{46,2 \text{ V} - 15 \text{ V}}{50 \text{ mA} + 12 \text{ mA}} = 503 \Omega$$

In Frage kommen von der Reihe E12 die Vorwiderstände 560Ω , 680Ω und 820Ω . Mit 820Ω ergeben sich die kleinsten Verlustleistungen in Vorwiderstand und Z-Diode.

Aufgaben zu 6.2.3.1

- An einer Stabilisierungsschaltung **Bild 2** werden gemessen: $U_1 = 60 \text{ V}$, $U_Z = 27 \text{ V}$ und $I_L = 20 \text{ mA}$. Der Z-Strom beträgt 5 mA . Berechnen Sie vom Vorwiderstand a) Widerstandswert, b) Leistung.
- In einer Stabilisierungsschaltung **Bild 2** mit $U_1 = 36 \text{ V}$ und $U_Z = 9 \text{ V}$ hat der Vorwiderstand 100Ω . a) Welcher Strom fließt durch den Vorwiderstand? b) Wie groß ist der Z-Strom, wenn der Laststrom $0,15 \text{ A}$ ist?
- Die Stabilisierungsschaltung für einen Verstärker hat eine Z-Diode mit $U_Z = 15 \text{ V}$ und $I_{Zmax} = 100 \text{ mA}$. Die Schaltung liegt an $35 \text{ V} \pm 5 \text{ V}$ und wird mit höchstens 15 mA belastet. a) Berechnen Sie R_{max} und R_{min} . b) Wählen Sie aus der Reihe E24 (Toleranz $\pm 5\%$) denjenigen Widerstand, der den Arbeitspunkt der Z-Diode vom Knickbereich möglichst fern hält.
- Der Stabilisierungsteil einer Messeinrichtung arbeitet mit der Z-Diode BZX 55 C20 ($U_Z = 20 \text{ V}$, $I_{Zmax} = 20 \text{ mA}$, $I_{Zmin} = 3 \text{ mA}$). Die Schaltung liegt an $60 \text{ V} \pm 5\%$ und liefert $10 \text{ mA} \pm 20\%$ Laststrom. a) Berechnen Sie R_{max} und R_{min} . b) Wählen Sie aus der Reihe E24 (Toleranz $\pm 5\%$) denjenigen Widerstand, der den Arbeitspunkt der Z-Diode vom Knickbereich möglichst fern hält.
- Mit einer Z-Diode BZY 91 C33 ($U_Z = 33 \text{ V}$, $I_{Zmax} = 2,2 \text{ A}$, $I_{Zmin} = 0,1 \text{ A}$) soll ein Stabilisierungsteil zu einem Stromversorgungsgerät gebaut werden. Vorgesehen sind Eingangsspannungen von 64 V bis 80 V . Berechnen Sie R_{max} und R_{min} für die Laststrombereiche a) 0 A bis 2 A , b) 0 A bis 1 A . c) Für welchen der beiden Laststrombereiche kann man die Schaltung verwirklichen?

$$R_{vmax} = \frac{U_{1min} - U_Z}{I_{Zmin} + I_{Lmax}}$$

$$R_{vmin} = \frac{U_{1max} - U_Z}{I_{Zmax} + I_{Lmin}}$$

R_v : Vorwiderstand

U_1 : Eingangsspannung

U_Z : Z-Spannung (Bemessungsspannung)

I_Z : Z-Strom

I_L : Laststrom

$I_{Zmin} = 0,1 \cdot I_{Zmax}$

Die Indizes max und min geben jeweils Größtwert und Kleinstwert für eine funktionierende Stabilisation an.

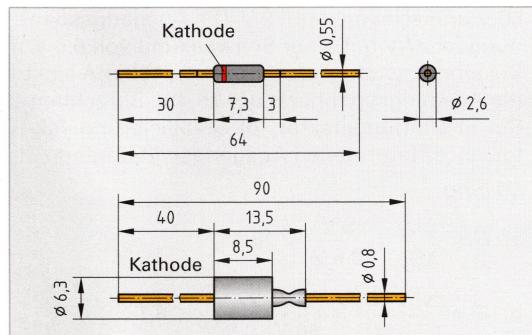


Bild 1: Z-Dioden

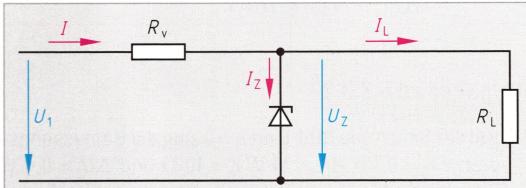
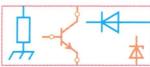


Bild 2: Spannungsstabilisierung mit Z-Diode

¹ Z von Clarence Melvin Zener, am. Physiker, 1905 bis 1993



6.2.3.2 Eigenschaften von Stabilisierungsschaltungen

Das Verhältnis Eingangsspannungsschwankung zu Ausgangsspannungsschwankung bezeichnet man als Glättungsfaktor. Das Verhältnis relative Eingangsspannungsschwankung zu relativer Ausgangsspannungsschwankung bezeichnet man als Stabilisierungsfaktor. Je größer der differenzielle Ausgangswiderstand ist, desto stärker ist die Ausgangsspannung vom Laststrom abhängig.

Beispiel 1: Kennwerte bei Glättung berechnen

Die Eingangsspannung einer Stabilisierung ist 60 V und schwankt um 9 V. Die Ausgangsspannung ist 27 V mit einer Schwankung von 0,5 V. Bei einer Laststromzunahme von 100 mA sinkt die Ausgangsspannung um 25 mV. Berechnen Sie a) Glättungsfaktor, b) Stabilisierungsfaktor, c) differenziellen Ausgangswiderstand.

Lösung:

$$a) G = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} = \frac{9 \text{ V}}{0,5 \text{ V}} = 18$$

$$b) S = \frac{\Delta U_1 \cdot U_2}{U_1 \cdot \Delta U_2} = \frac{9 \text{ V} \cdot 27 \text{ V}}{60 \text{ V} \cdot 0,5 \text{ V}} = 8,1$$

$$c) Z_a = \frac{\Delta U_2}{-\Delta I_L} = \frac{-25 \text{ mV}}{-(+100 \text{ mA})} = 0,25 \Omega$$

$$G = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2}$$

$$S = \frac{\Delta U_1 \cdot U_2}{U_1 \cdot \Delta U_2}$$

$$r_z = R_v \cdot \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2}$$

$$Z_a = \frac{\Delta U_2}{-\Delta I_L}$$

G Glättungsfaktor

ΔU_1 Eingangsspannungsschwankung

ΔU_2 Ausgangsspannungsschwankung

S Stabilisierungsfaktor

U_1 Eingangsspannung

U_2 Ausgangsspannung

R_v Vorwiderstand

r_z differenzieller Z-Widerstand

Z_a differenzieller Ausgangswiderstand

ΔI_L Laststromänderung

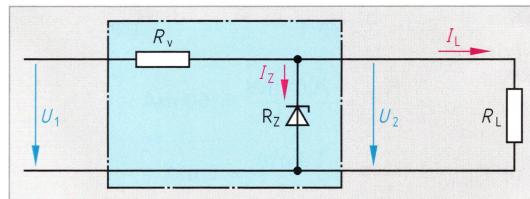


Bild 1: Spannungsstabilisierung mit Z-Diode

Aufgaben zu 6.2.3.2

- Bei der Schaltung Bild 1 mit $I_L = 0$ sind die Bemessungswerte $I_z = 0,1 \text{ A}$, $U_z = 24 \text{ V}$, $r_z = 10 \Omega$ und $\Delta U_2 = 0,4 \text{ V}$. Berechnen Sie U_1 , ΔU_1 und den Stabilisierungsfaktor für a) $R_v = 100 \Omega$, b) $R_v = 200 \Omega$. c) Vergleichen Sie die Stabilisierungsfaktoren der Ausführungsformen a) und b).
- Bei der Schaltung Bild 1 ist $I_L = 0$ und $U_1 = 100 \text{ V}$, $\Delta U_1 = 10 \text{ V}$, $U_2 = 27 \text{ V}$ und $r_z \approx 10 \Omega$. Berechnen Sie R_v , ΔU_2 und S für a) $I_z = 0,1 \text{ A}$, b) $I_z = 0,2 \text{ A}$. c) Vergleichen Sie die Stabilisierungsfaktoren der beiden Ausführungsarten miteinander.
- Die Ausgangsspannung U_2 der Stabilisierungsschaltung mit Regelkreis Bild 2 ist mit dem Spannungsteiler R_3 , R_4 etwa zwischen der Z-Spannung von R_z und der Eingangsspannung einstellbar. In einem Falle ist die Ausgangsspannung 10 V bei 200 mA Laststrom. Der differenzielle Ausgangswiderstand beträgt 50 mΩ. a) Welchen Glättungsfaktor hat die Schaltung, wenn die Ausgangsspannung um 0,03 V zunimmt, weil die Eingangsspannung um 5 V erhöht wird? b) Welche Leistung erhält Q1? (Sein Kollektorstrom ist etwa gleich dem Laststrom.)

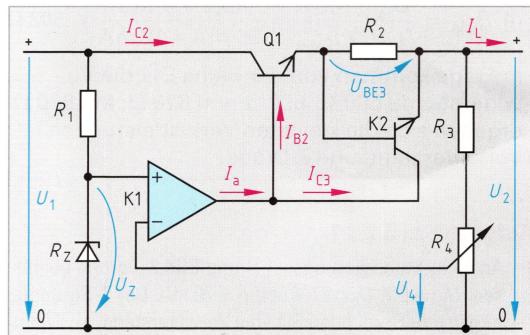


Bild 2: Stabilisierung mit Regelkreis

- Von einer Stabilisierungsschaltung mit Regelkreis (Bild 2) gibt der Hersteller an: U_2 einstellbar von 6 V bis 24 V, grösster Laststrom 250 mA, Glättungsfaktor 200, differenzieller Ausgangswiderstand 30 mΩ. Berechnen Sie a) Ausgangsspannungsänderung für 2 V Eingangsspannungsänderung, b) Leistung in Q1 im ungünstigsten Belastungsfall bei $U_1 = 25 \text{ V}$ (der Laststrom ist etwa gleich dem Kollektorstrom von Q1), c) Ausgangsspannungsänderung für 150 mA Laststromzunahme bei konstant bleibender Eingangsspannung.



6.3 Licht

Licht ist elektromagnetische Strahlung mit Wellenlängen von etwa 400 nm (rot) bis 800 nm (violett).

Lichtstrom einer Lichtquelle ist die auf das Auge gleich hell wirkende Strahlungsleistung wie die einer elektromagnetischen Strahlung von 555 nm Wellenlänge. Die Einheit des Lichtstromes ist das Lumen (lm) (**Tabelle 1**).

Bei 555 nm Wellenlänge erhält man den Lichtstrom, wenn man die Strahlungsleistung in W mit dem Lichtgleichwert 683 lm/W multipliziert. Bei anderen Wellenlängen ist zusätzlich mit der relativen Empfindlichkeit der Augen zu multiplizieren (**Bild 1**).

Beispiel 1: Lichtgrößen berechnen

Eine Leuchtdiode LD 30 strahlt bei einer Leistungszufuhr von 100 mW eine Leistung von 0,8 mW bei einer mittleren Wellenlänge von 660 nm ab. Berechnen Sie a) Lichtstrom in lm, b) Lichtausbeute η_v .

Lösung:

a) Aus **Bild 1**: $s_v = 0,09$

$$\begin{aligned}\Phi_v &= P \cdot K \cdot s_v \\ &= 0,8 \text{ mW} \cdot 683 \text{ lm/W} \cdot 0,09 \\ &= \mathbf{0,492 \text{ lm}}\end{aligned}$$

$$\text{b) } \eta_v = \frac{\Phi_v}{P_{\text{auf}}} = \frac{0,0492 \text{ lm}}{100 \text{ mW}} = \mathbf{0,492 \text{ lm/W}}$$

Beleuchtungsstärke ist der Quotient Lichtstrom durch senkrecht beleuchtete Fläche. Die Einheit der Beleuchtungsstärke ist das Lux (lx).

Die Beleuchtungsstärke E ist die Ausgangsgröße für die lichttechnische Anlagenplanung.

Beispiel 2: Lichtstrom berechnen

Ein Fotowiderstand RPY 18 hat ein Lichteinlassfenster von $1,5 \text{ mm}^2$ und eine höchstzulässige Beleuchtungsstärke von 50000 lx. Berechnen Sie den höchstzulässigen Lichtstrom.

Lösung:

$$\begin{aligned}E_v &= \frac{\Phi_v}{A} \Rightarrow \Phi_v = E_v \cdot A = 50000 \text{ lx} \cdot 1,5 \text{ mm}^2 \\ &= 0,075 \text{ lx m}^2 = \mathbf{0,075 \text{ lm}}\end{aligned}$$

Lichtstärke ist der in eine bestimmte Richtung von einer Lichtquelle ausgestrahlte Lichtstrom. Die Einheit der Lichtstärke ist das Candela (cd).

Die Lichtstärke I_v ist eine Basisgröße.

$[\Phi_v] = \text{Im}$; $K = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$	$\Phi_v = P \cdot K \cdot s_v$
$[E_v] = \frac{\text{Im}}{\text{m}^2} = \text{lx}$	$E_v = \frac{\Phi_v}{A}$
Basisgröße	$L_v = \frac{I_v}{A_v}$
$[I_v] = \text{cd}$	
$[\eta] = \frac{\text{Im}}{\text{W}}$	$\eta = \frac{\phi}{P_{\text{auf}}}$
Φ_v Lichtstrom (ϕ griech. Großbuchstabe Phi) P Strahlungsleistung P_{auf} Leistungsaufnahme K Lichtgleichwert s_v relative Empfindlichkeit der Augen E_v Beleuchtungsstärke A beleuchtete Fläche L_v Leuchtdichte I_v Lichtstärke A_v leuchtende sichtbare Fläche v von <i>visuell</i> = das Sehen betreffend (von <i>visum</i> = Gesehenes) η Lichtausbeute (η griech. Kleinbuchstabe Eta)	

Tabelle 1: Einheiten der Lichttechnik

Einheit	Bedeutung	Erklärung
Lumen (lm)	Licht, Lichtquelle	Einheit des Lichtstromes Φ_v
Lux (lx)	Licht, Helligkeit	Einheit der Beleuchtungsstärke E_v
Candela (cd)	Kerze	Einheit der Lichtstärke I_v

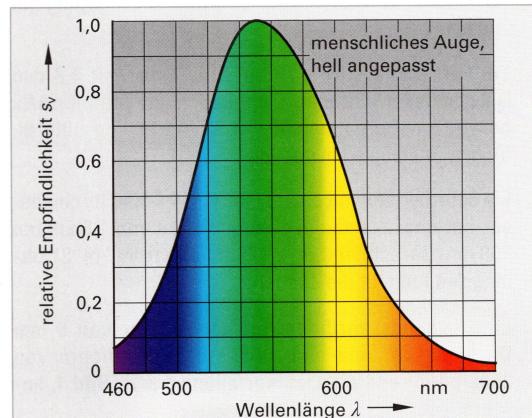


Bild 1: Empfindlichkeit des menschlichen Auges



Man entnimmt die Lichtstärke von Lichtquellen den Lichtstärkeverteilungskurven (**Bild 1**). Die Angaben beziehen sich auf Lichtquellen mit einem Lichtstrom von 1000 lm.

Bei manchen Bauelementen wird für die Leuchtdichte auch die amerikanische Einheit Foot-Lambert¹ (ftla) verwendet.

Beispiel 1: Lichtgrößen berechnen

Bei einer Leuchtstofflampe mit Lichtverteilung **Bild 1**, rechte Kennlinie, ist die Länge 1500 mm, der Durchmesser 26 mm, der Lichtstrom 4800 lm. Berechnen Sie a) sichtbare Fläche, b) Lichtstärke für Bezugsrichtung 0°, c) Leuchtdichte.

Lösung:

$$\begin{aligned} \text{a) } A_v &= l \cdot b \\ &= 1500 \text{ mm} \cdot 26 \text{ mm} = 39000 \text{ mm}^2 \\ &= 0,039 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

b) Aus **Bild 1** für $\alpha = 0^\circ$ abgelesen:

$$I_v = 150 \text{ cd bei } \phi_v = 1000 \text{ lm}$$

$$I_v = \frac{150 \text{ cd}}{1000 \text{ lm}} \cdot 4800 \text{ lm} = 720 \text{ cd}$$

$$\text{c) } L_v = \frac{I_v}{A_v} = \frac{720 \text{ cd}}{0,039 \text{ m}^2} = 18460 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2} = 1,85 \frac{\text{cd}}{\text{cm}^2}$$

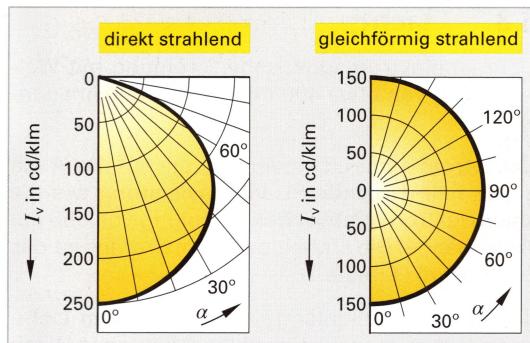


Bild 1: Lichtstärkeverteilungskurven von Lichtquellen pro 1000 lm

Leuchtdichte ist die Lichtstärke in einer Richtung geteilt durch die sichtbare Fläche.

Umrechnung der Leuchtdichtheiteinheiten:

$$0,292 \text{ ftla} = 1 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$$

$$1 \frac{\text{cd}}{\text{cm}^2} = 10000 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$$

Aufgaben zu 6.3

1. Beim Fototransistor BPX 25 ist die Empfindlichkeit angegeben zu $s = 2,5 \mu\text{A/lx}$. Das Fenster hat eine wirksame Fläche von 13 mm^2 . Berechnen Sie a) Lichtstrom bei 1 Lux, b) Empfindlichkeit in mA/lm.
2. Das fotoelektrische Steuerelement BPX 28 (bestehend aus Fotoelement, 2 Dioden, 1 Transistor) hat eine Linse mit einem Durchmesser von 6 mm. Berechnen Sie für 1500 lx a) Lichtstrom, b) Strahlungsleistung bei 700 nm.
3. Ein Fotoelement BPX 79 hat eine Linse mit 4,8 mm Durchmesser und eine Empfindlichkeit von 30 nA/lx bei 750 nm. Berechnen Sie a) Lichtstrom bei 1000 lx, b) Empfindlichkeit in mA/lm.
4. Ein Photthyristor mit einer Linse von 4,8 mm Durchmesser hat eine Zündbeleuchtungsstärke von $1,5 \text{ klx}$ bei 700 nm. Berechnen Sie a) Zündlichtstrom, b) Strahlungsleistung für die Zündung.
5. Eine Lumineszenzdiode hat ein Fenster von 6 mm Durchmesser und eine höchste Leuchtdichte von 2535 cd/m^2 und die Lichtverteilungskurve **Bild 1**, lin-
- ke Kennlinie. Berechnen Sie für 0° Bezugsrichtung a) Lichtstärke, b) Lichtstrom, c) Strahlungsleistung bei 660 nm.
6. Eine Leuchtstofflampe mit Lichtstärkeverteilungskurve **Bild 1**, rechte Kennlinie, hat eine größte Leuchtdichte von $1,6 \text{ cd/cm}^2$ und eine leuchtende sichtbare Fläche von 390 cm^2 . Die Leistungsaufnahme ist 67 W. Berechnen Sie für $\alpha = 0^\circ$ a) Lichtstärke, b) Lichtstrom, c) Lichtausbeute in lm/W, d) Leuchtdichte in Foot-Lambert.
7. Eine Fotozelle hat eine wirksame Kathodenfläche von $2,1 \text{ cm}^2$ und bei 700 nm eine Empfindlichkeit von $130 \mu\text{A/lm}$. Berechnen Sie a) Lichtstrom bei 1500 lx, b) Empfindlichkeit in nA/lx, c) Strahlungsleistung in mW bei $6,5 \mu\text{A}$ Kathodenstrom und 700 nm Wellenlänge.
8. Ein Fernsehbildschirm hat eine mittlere Leuchtdichte von $0,3 \text{ cd/cm}^2$ in Bezugsrichtung 0° bei einer Schirmgröße von $38 \text{ cm} \times 29 \text{ cm}$. Die Leistungsaufnahme ist 90 W. Die Lichtstärkeverteilungskurve entspricht **Bild 1**, linke Kennlinie. Berechnen Sie a) Lichtstärke, b) Lichtstrom, c) Lichtausbeute in lm/W.

¹ Johann Heinrich Lambert, 1728 bis 1777



6.4 Schaltungen mit fotoelektronischen Bauelementen

Alle hier zu berechnenden Schaltungen stellen eine Reihenschaltung aus fotoelektronischem Bauelement und Wirkwiderstand dar. Die Berechnungen erfolgen mit dem Ohm'schen Gesetz und den Kirchhoff'schen Regeln.

Aufgaben zu 6.4

1. Ein Fotowiderstand mit Kennlinie **Bild 1** liegt in Reihe mit einem Vorwiderstand $R_v = 3,9 \text{ k}\Omega$ an einer Gleichspannung von 12 V. Wie groß sind jeweils bei den Beleuchtungsstärken $E_{v1} = 20 \text{ lx}$ und $E_{v2} = 1000 \text{ lx}$ die Spannung am Vorwiderstand und die Stromstärke?

2. Ermitteln Sie für die Brückenschaltung **Bild 2**

- die Beleuchtungsstärke, bei der die Brücke abgeglichen ist,
- die Spannung U_{Br} bei $E_{v1} = 1 \text{ klx}$ und bei $E_{v2} = 90 \text{ lx}$. Der verwendete Fotowiderstand besitzt die Kennlinie **Bild 1**.

3. Eine Photodiode liegt über einem $120\text{-k}\Omega$ -Widerstand in Sperrrichtung an einer Gleichspannung von 15 V. Ermitteln Sie

- Fotostrom I_p und Sperrspannung U_R an der Diode, wenn die Spannung am Widerstand 9,6 V beträgt,
- Spannung am Widerstand und Sperrspannung an der Diode, wenn der Fotostrom $45 \mu\text{A}$ betragen soll.

4. Ermitteln Sie für die Schaltung **Bild 3** zur Übertragung eines NF-Signals mit einem Optokoppler

- den Durchlassstrom I_F , wenn die Durchlassspannung der LED 1,52 V beträgt,
- den Kollektorstrom I_C und die Spannung U_{CE} des Phototransistors,
- den Gleichstrom-Übertragungsfaktor $CTR = I_C/I_F$ in Prozent. Der Optokoppler besitzt die Kennlinien **Bild 4** (Lösungshinweis: Arbeitsgerade erforderlich).

5. Ein Fotoelement hat bei Beleuchtung eine Leerlaufspannung von 400 mV und einen Kurzschlussstrom von $50 \mu\text{A}$. Berechnen Sie

- den Innenwiderstand des Fotoelementes,
- Leistungsabgabe, Klemmenspannung und Stromstärke bei Leistungsanpassung.

6. Eine LED soll bei einem Durchlassstrom von 10 mA an einer Gleichspannung von 5 V angeschlossen werden. Berechnen Sie den notwendigen Vorwiderstand und seine Leistungsaufnahme, wenn die Durchlassspannung der LED 1,8 V beträgt.

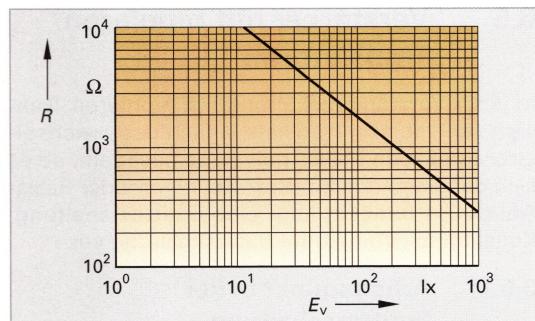


Bild 1: Kennlinie eines Fotowiderstandes

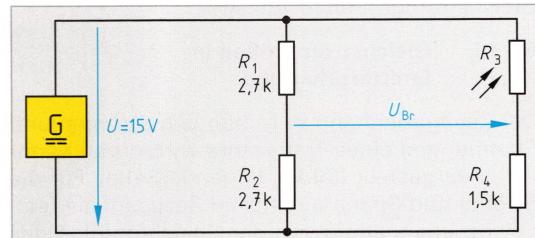


Bild 2: Brückenschaltung mit Fotowiderstand

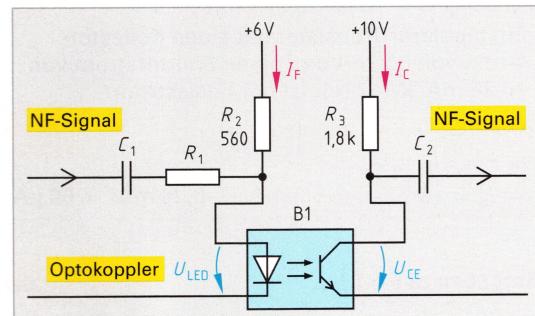


Bild 3: Übertragung eines NF-Signals mit einem Optokoppler

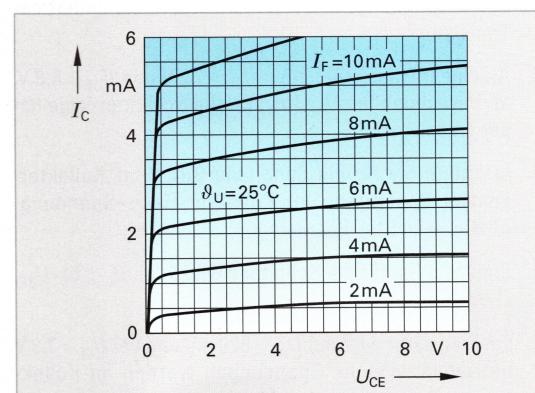


Bild 4: Kennlinien eines Optokopplers



6.5 Verstärker mit bipolaren Transistoren

In jeder Verstärkerschaltung mit bipolaren Transistoren ist ein Transistoranschluss wechselstrommäßig an Masse gelegt. Je nachdem, ob es sich dabei um den Emitter-, Kollektor- oder Basis-Anschluss handelt, liegt eine Emitterschaltung, Kollektorschaltung oder Basisschaltung vor.

6.5.1 Arbeitspunkt in der Emitterschaltung

Der Arbeitspunkt des Transistors wird durch die Gleichstromgrößen festgelegt.

6.5.1.1 Gleichstromgrößen in Emitterschaltung

Der Zusammenhang zwischen den Strömen und Spannungen eines Transistors wird durch Kennlinien dargestellt (**Bild 1**, folgende Seite). Für die Ströme und Spannungen sind Bezugspfeile festgelegt, unabhängig von der Schichtenfolge des Transistors (**Bild 1**).

Beispiel 1: Basisstrom berechnen

Ein bipolarer Transistor hat einen Kollektorstrom von 6,2 mA und einen Emitterstrom von -6,26 mA. Wie groß ist der Basisstrom?

Lösung:

$$\begin{aligned} I_B + I_C + I_E &= 0 \\ \Rightarrow I_B &= -I_C - I_E = -6,2 \text{ mA} - (-6,26 \text{ mA}) = 60 \mu\text{A} \end{aligned}$$

Aufgaben zu 6.5.1.1

- Ein Transistor wird mit einer Kollektor-Emitter-Spannung von 9 V und mit einer Basis-Emitter-Spannung von 600 mV betrieben. a) Wie groß ist die Kollektor-Basis-Spannung? b) Welche Schichtenfolge hat der Transistor?
- An einem Transistor liegen $U_{CE} = 7,2 \text{ V}$ und $U_{CB} = 6,8 \text{ V}$. a) Berechnen Sie U_{BE} . b) Welche Schichtenfolge hat der Transistor?
- Ermitteln Sie für die Schaltung **Bild 2** a) Kollektor-Emitter-Spannung, b) Kollektor-Basis-Spannung, c) Basis-Emitter-Spannung.
- Ermitteln Sie für die Schaltung **Bild 3** a) U_{CE} , b) U_{BE} , c) U_{CB} .
- Ein Transistor wird mit $U_{BE} = 620 \text{ mV}$ und bei $U_{CE} = 7,3 \text{ V}$ betrieben. Welche Spannungen werden an Kollektor und Basis gegenüber Masse gemessen, wenn der Emitter gegenüber Masse 0,95 V hat?

$$I_B + I_C + I_E = 0$$

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

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

$$P_- \approx U_{CE} \cdot I_C$$

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

I_B Basisstrom

I_C Kollektorstrom

I_E Emitterstrom

U_{CE} Kollektor-Emitter-Spannung

U_{BE} Basis-Emitter-Spannung

U_{CB} Kollektor-Basis-Spannung

P_- Gleichstromleistung

B Gleichstromverhältnis

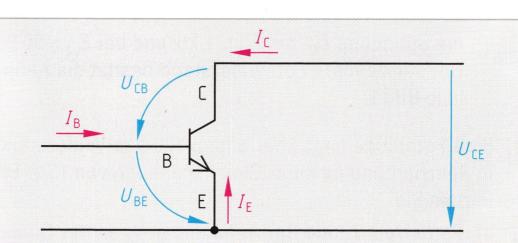


Bild 1: Bezugspfeile beim bipolaren Transistor

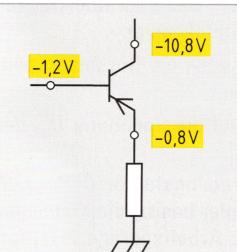


Bild 2: Schaltungsteil mit PNP-Transistor

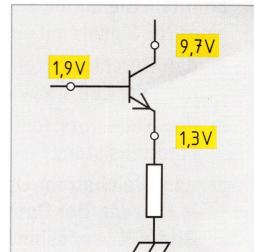


Bild 3: Schaltungsteil mit NPN-Transistor

- An einem Transistor liegt $U_{CE} = 7,6 \text{ V}$. Zwischen Emitter und Masse liegen 1,2 V, zwischen Basis und Masse 1,8 V. Berechnen Sie a) Spannung am Kollektor gegenüber Masse, b) Basis-Emitter-Spannung, c) Kollektor-Basis-Spannung.

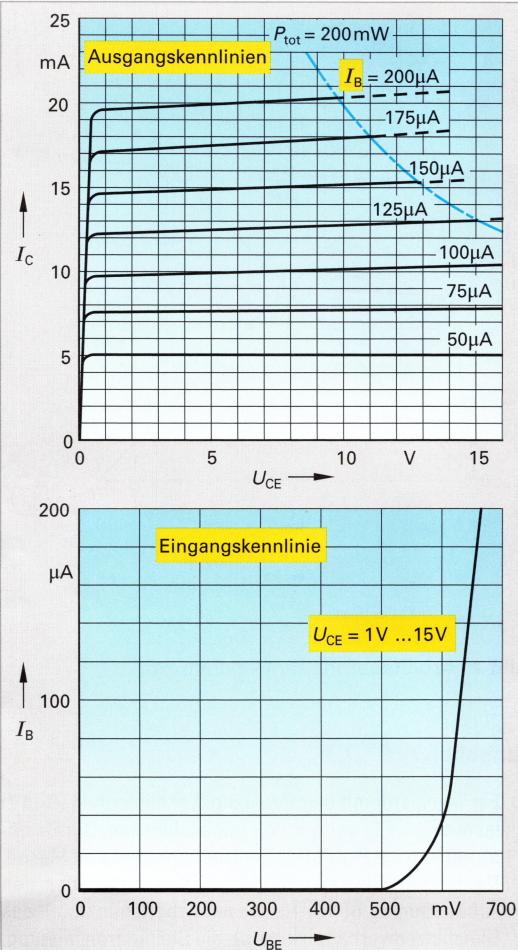


Bild 1: Transistorkennlinien

7. In einem Transistor beträgt der Basisstrom $120 \mu\text{A}$ und der Kollektorstrom 3 mA . Berechnen Sie den Emitterstrom.
8. Ermitteln Sie die Gleichstromleistung, die ein Transistor aufnimmt, wenn $U_{CE} = 6,8 \text{ V}$ und $I_C = 2,7 \text{ mA}$ sind.
9. In einem Transistorhandbuch ist bei einem Transistor für $U_{CE} = 6 \text{ V}$ und $I_C = 50 \text{ mA}$ das Gleichstromverhältnis mit 120 angegeben. Berechnen Sie a) aufgenommene Gleichstromleistung, b) Basisstrom, c) Emitterstrom.
10. In einem PNP-Transistor sind $I_E = 2 \text{ mA}$, $I_B = -22 \mu\text{A}$, $P = 12 \text{ mW}$. Ermitteln Sie a) I_C , b) B , c) U_{CE} .
11. Bestimmen Sie aus den Kennlinien Bild 1 für $I_B = 150 \mu\text{A}$ und $U_{CE} = 7 \text{ V}$ a) U_{BE} , b) I_C , c) B , d) P .

6.5.1.2 Basisspannungsteiler und Stabilisierung des Arbeitspunktes

Die Basis-Emitter-Vorspannung wird meist über einen Spannungsteiler aus der Betriebsspannung entnommen. In der Emitterschaltung kann der Arbeitspunkt durch einen Emitterwiderstand R_E stabilisiert werden (Bild 1, folgende Seite).

Bei $\vartheta_j \uparrow \Rightarrow I_C \uparrow \Rightarrow U_{RE} \uparrow \Rightarrow U_{BE} \downarrow \Rightarrow I_C \downarrow \Rightarrow I_C$ bleibt fast konstant, d.h. der Arbeitspunkt ist stabilisiert.

Ohne Emitterwiderstand ist $U_{R2} = U_{BE}$, da $U_{RE} = 0 \text{ V}$ ist. Eine Stabilisierung findet hier nicht statt.

$q = \frac{I_q}{I_B}$	$R_2 = \frac{U_{R2}}{I_q}$	$R_1 = \frac{U_b - U_{R2}}{I_B + I_q}$
$R_E = \frac{U_{RE}}{I_B + I_C}$	$R_C = \frac{R_C}{m}$	$U_{R2} = U_{BE} + U_{RE}$
Für $I_B \ll I_C$:		
$R_E \approx \frac{U_{RE}}{I_C}$	$U_{RE} \approx \frac{U_{RC}}{m}$	

q	Querstromverhältnis ($q \approx 2$ bis 10)
I_q	Querstrom ($I_q = q \cdot I_B$)
I_B	Basisstrom
R_1, R_2	Widerstände des Basisspannungsteilers
U_{R2}	Spannungsfall an R_2
U_b	Betriebsspannung
R_E	Emitterwiderstand
R_C	Kollektowiderstand
m	Widerstandsverhältnis ($m \approx 5$ bis 10)
U_{BE}	Basis-Emitter-Spannung
U_{RE}	Spannungsfall an R_E
I_C	Kollektorstrom
U_{RC}	Spannungsfall an R_C

Beispiel 1: Basisspannungsteiler berechnen

Ein Transistor in Schaltung Bild 1, folgende Seite, braucht für einen Basisstrom von $0,5 \text{ mA}$ eine Basis-Emitter-Spannung von $0,6 \text{ V}$. Der Spannungsfall an R_E soll 2 V betragen. Berechnen Sie für $q = 2$ den Spannungsteilerwiderstand R_2 .

Lösung:

$$U_{R2} = U_{BE} + U_{RE} = 0,6 \text{ V} + 2 \text{ V} = 2,6 \text{ V}$$

$$R_2 = \frac{U_{R2}}{I_q} = \frac{U_{R2}}{q \cdot I_B} = \frac{2,6 \text{ V}}{2 \cdot 0,5 \text{ mA}} = 2,6 \text{ k}\Omega$$



Aufgaben zu 6.5.1.2

- Ein Verstärker **Bild 1** hat $U_b = 9 \text{ V}$, $R_C = 1,8 \text{ k}\Omega$, $m = 6$, $I_C = 2,8 \text{ mA}$. Berechnen Sie a) R_E , b) U_{RC} , c) U_{RE} , d) U_{RC}/U_{RE} .
- Ein Transistor in Schaltung **Bild 1** hat den Arbeitspunkt $U_{CE} = 12 \text{ V}$, $I_C = 58 \text{ mA}$, $I_B = 0,3 \text{ mA}$, $U_{BE} = 0,75 \text{ V}$. Die Betriebsspannung beträgt 24 V, $q = 2$ und $R_C/R_E = 7$. Berechnen Sie a) U_{RC} , b) U_{RE} , c) R_C , d) R_E , e) R_2 , f) R_1 .
- Von Schaltung **Bild 1** sind bekannt: $U_b = 12 \text{ V}$, $q = 3$, $m = 5$, $U_{CE} = 3,7 \text{ V}$, $U_{BE} = 700 \text{ mV}$, $I_B = 5 \text{ mA}$, $B = 78$. Ermitteln Sie a) I_C , b) U_{RC} , c) U_{RE} , d) R_C , e) R_E , f) R_2 , g) R_1 , h) die aus dem Netzgerät aufgenommene Gleichstromleistung.

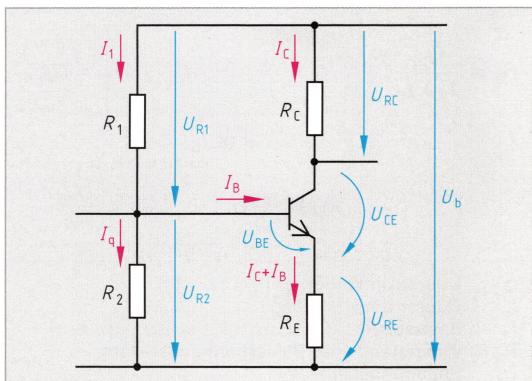


Bild 1: Emitterorschaltung

6.5.1.3 Arbeitsgerade für Gleichstrom

Zur Ermittlung der Gleichstromgrößen und des Arbeitspunktes einer Emitterorschaltung wird in das Ausgangskennlinienfeld die Arbeitsgerade für Gleichstrom (**Bild 2**) eingezeichnet. Die Gerade hat den Schnittpunkt mit der waagerechten Achse bei $U_{CE} = U_b$ und mit der senkrechten Achse bei $I_C = U_b/(R_C + R_E)$. Im Schnittpunkt mit der Ausgangskennlinie des Transistors liegt dann der Arbeitspunkt (AP).

Eine Veränderung des Basisstromes bewirkt eine Verschiebung des AP entlang der Arbeitsgeraden. Der Transistor wirkt wie ein durch I_B gesteuerter Widerstand. Der statische Ausgangswiderstand R_{CE} gilt für die Gleichgrößen in einem Arbeitspunkt. Der dynamische Widerstand r_{CE} gilt für Wechselgrößen.

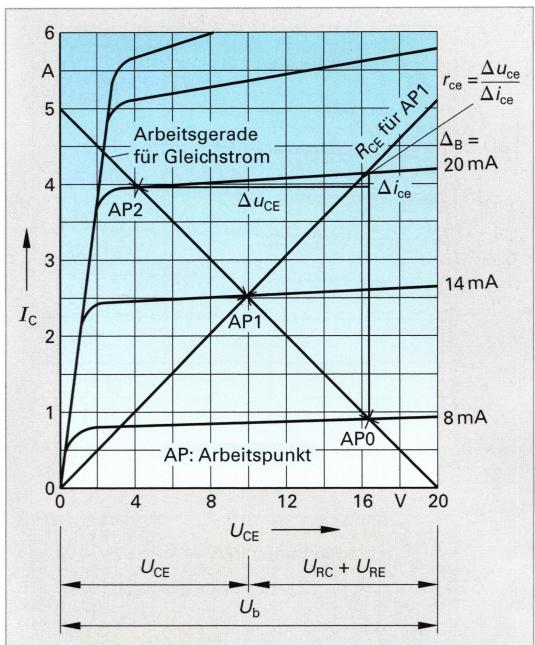


Bild 2: Arbeitsgerade für Gleichstrom

Aufgaben zu 6.5.1.3

- Ein Transistor mit dem Ausgangskennlinienfeld (**Bild 2**) ist mit $R_C = 4 \Omega$ an $U_b = 12 \text{ V}$ angeschlossen. Der Basisstrom beträgt 8 mA. Der Emitter liegt direkt an Masse. Bestimmen Sie a) mithilfe der Arbeitsgeraden den Arbeitspunkt, b) R_{CE} für diesen Arbeitspunkt, c) das Gleichstromverhältnis und d) die Gleichstromleistung.
- Ein Transistor wird mit einem Kollektorwiderstand wie in **Bild 2** dargestellt im Arbeitspunkt AP1 betrieben. Ermitteln Sie a) die Betriebsspannung U_b , b) den Kollektorwiderstand und c) das Gleichstromverhältnis.
- Eine Glühlampe mit der Aufschrift 12 V/72 W ist über $U_b = 12 \text{ V}$ an den Kollektor eines NPN-Transistors angeschlossen. Das Ausgangskennlinienfeld entspricht **Bild 2**. Der Emitter liegt direkt an Masse. Der Widerstand der Glühlampe wird als konstant angenommen. Bestimmen Sie den Spannungsfall an der Glühlampe, die Kollektor-Emitter-Spannung und den Kollektorstrom für a) $I_B = 8 \text{ mA}$, b) $I_B = 14 \text{ mA}$ und c) $I_B = 20 \text{ mA}$.
- Ein Transistor mit dem Ausgangskennlinienfeld (**Bild 2**) wird mit Kollektorwiderstand R_C an $U_b = 16 \text{ V}$ betrieben. Der Emitter liegt direkt auf Masse. Die Arbeitsgerade schneidet die y-Achse bei $I_C = 6 \text{ A}$. Bestimmen Sie a) R_C , b) U_{CE} und I_C für den Arbeitspunkt des Transistors bei einem Basisstrom von $I_B = 8 \text{ mA}$.



6.6 Kippschaltungen

6.6.1 Transistoren als elektronische Schalter

Man verwendet als elektronische Schalter bipolare Transistoren, IG-Feldeffekttransistoren und IGB-Transistoren (von Insulated Gate Bipolar Transistor). Es gibt die Grundschaltungen Reihenbetrieb und Parallelbetrieb (**Bild 1**). Die Bemessung erfolgt jeweils für den ungünstigsten Betriebsfall, daher die Indizes min und max.

Aufgaben zu 6.6.1

- Von einer Transistorschaltstufe im Reihenbetrieb (**Bild 1**) sind folgende Daten bekannt: $U_b = 15 \text{ V} \pm 10\%$, $U_{BE} = 0,6 \text{ V}$ bis $0,7 \text{ V}$, $B_{min} = 80$, $I_{Cmax} = 15 \text{ mA}$, $U_{CEmin} = 0,15 \text{ V}$, $\ddot{u} = 5$, $U_{emin} = 13 \text{ V}$. Berechnen Sie a) R_{Lmin} , b) R_{vmax} .
- Bei einer Transistorschaltstufe im Reihenbetrieb (**Bild 1**) betragen $B_{min} = 92$, $R_{Lmin} = 1,8 \text{ k}\Omega$, $U_e = 10,8 \text{ V}$... 12 V , $U_{BEmax} = 0,7 \text{ V}$, $U_{CEmin} = 0,18 \text{ V}$, $\ddot{u} = 3$ und $R_{vmax} = 51 \text{ k}\Omega$. Berechnen Sie a) U_{bmax} , b) I_{Cmax} , c) I_{Bmax} .
- Ein Schalttransistor im Reihenbetrieb mit einer Leuchtdiode ($U_F = 1,5 \text{ V}$, $I_F = 18 \text{ mA}$) und einem Strombegrenzungswiderstand R_L als Last wird von einem Inverter in TTL-Technik angesteuert. Der H-Pegel am Ausgang des Inverters liegt bei $U_{QH} = U_e = 3,3 \text{ V}$, und der Ausgangsstrom beträgt dann $I_{QH} = I_e = 0,4 \text{ mA}$. Der Schalttransistor hat bei $U_b = 5 \text{ V}$ eine $U_{CE} = 0,2 \text{ V}$ und eine $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$. Berechnen Sie a) den Strombegrenzungswiderstand, b) den Übersteuerungsfaktor bei $B = 200$, c) den Basisvorwiderstand.
- Ein Schalttransistor im Reihenbetrieb mit einem Relais ($R_L = 60 \Omega$) als Last wird von einem Inverter ($U_{QH} = U_e = 2,4 \text{ V}$, $I_{QH} = I_e = 0,4 \text{ mA}$) angesteuert. Weitere Angaben: $U_b = 5 \text{ V}$, $B = 60$, $U_{CE} = 0,2 \text{ V}$, $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$, $\ddot{u} = 4$. Berechnen Sie a) den Basisstrom, b) den Basisvorwiderstand, c) den notwendigen Widerstand R_L (Pull-up-Widerstand) von der $+U_b$ -Leitung zum Ausgang des Inverters.
- Bei einem elektronischen Schalter im Parallelbetrieb (**Bild 1**) gelten folgende Angaben: $U_{bmax} = 5 \text{ V}$, $U_{CEmin} = 0,2 \text{ V}$, $U_{BEmax} = 0,65 \text{ V}$, $B = 70$ bis 90 , $\ddot{u} = 4$, $U_e = 4,7 \text{ V}$ bis 5 V , $I_{Lmin} = 0,45 \text{ mA}$, $I_{Cmax} = 3 \text{ mA}$. Ermitteln Sie a) R_{Cmin} , b) R_{Lmax} , c) R_{vmax} .
- Ein digitales Verknüpfungselement in TTL-Technik (Eingangsgrößen $U_{EL} = U_{CEmin} = 0,45 \text{ V}$, $I_{EL} = I_{Lmin} = -1,35 \text{ mA}$) wird von einem Transistor im Parallelbetrieb angesteuert. Weitere Angaben: $B_{min} = 72$, $U_{BE} = 0,6 \text{ V} \pm 10\%$, $U_b = 15 \text{ V} \pm 10\%$, $R_C = 10 \text{ k}\Omega \pm 5\%$, $U_e = 12 \text{ V} \pm 10\%$, $\ddot{u} = 5$. Wie groß darf der Vorwiderstand höchstens sein?

Reihenbetrieb:

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

Parallelbetrieb:

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

Für beide Schaltungen:

$$R_V = \frac{U_e - U_{BE}}{I_{BÜ}}$$

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

$$I_{BÜ} = \ddot{u} \cdot I_B$$

$$\ddot{u} = 2 \text{ bis } 5$$

Für B den kleinsten Wert, d.h. B_{min} einsetzen.
Von $U_{emin} < U_e < U_{emax}$ den kleinsten Wert wählen.

I_B Basisstrom

$I_{BÜ}$ übersteuerter Basisstrom

I_C Kollektorstrom

I_L Laststrom (bei Reihenbetrieb $I_L = 0 \text{ A}$)

B Gleichstromverhältnis

\ddot{u} Übersteuerungsfaktor

R_C Kollektorwiderstand

R_V Basisvorwiderstand

R_L Lastwiderstand

U_e Eingangsspannung für durchgeschalteten Transistor

U_{BE} Basis-Emitter-Spannung für durchgeschalteten Transistor

U_b Betriebsspannung

U_{CE} Kollektor-Emitter-Spannung für durchgeschalteten Transistor ($= U_{CESat}$)

min Index für Mindestwert

max Index für Höchstwert

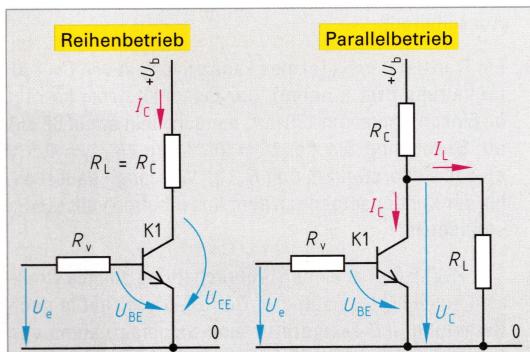


Bild 1: Grundschaltungen vom Transistor als elektronischer Schalter



6.6.2 Schalten bei Ohm'scher, induktiver und kapazitiver Last

Schaltet ein Transistor einen Wirkwiderstand, so darf die Widerstandsgerade oberhalb der Leistungshyperbel verlaufen, wenn die Arbeitspunkte unterhalb der Leistungshyperbel liegen und die Schaltzeit kurz ist (**Bild 1, oben**).

Eine induktive Last verzögert beim Einschalten den Stromanstieg. Beim Ausschalten entsteht eine Spannungsüberhöhung. Eine Freilaufdiode parallel zur Induktivität verhindert eine Zerstörung des Transistors. Sie verlängert aber z.B. bei einem Relais die Abfallzeit (**Bild 1, Mitte**).

Die Freilaufdiode sollte den Betriebsstrom der induktiven Last aushalten.

Kapazitive Last hat beim Einschalten eine Stromüberhöhung zur Folge. Die Stromüberhöhung kann z.B. durch einen in Reihe geschalteten Wirkwiderstand R_1 verringert werden (**Bild 1, unten**).

Eine kapazitive Last stellt beim Einschalten anfänglich einen Kurzschluss dar.

Aufgaben zu 6.6.2

- Ein Transistor schaltet jeweils für 100 ms eine ohmsche Last (**Bild 1, oben**) von 220Ω bei $U_b = 20 \text{ V}$ mit einer Schaltfrequenz von 5 Hz. Die maximale Verlustleistung des Transistors ist $P_{\text{tot}} = 300 \text{ mW}$. Berechnen Sie a) den Kollektorstrom im eingeschalteten Zustand bei $U_{\text{CESat}} = 0,5 \text{ V}$, b) die mittlere Verlustleistung.
- Eine Spule mit $L = 10 \text{ mH}$ und $R_1 = 500 \Omega$ wird durch einen Transistor geschaltet (**Bild 1, Mitte**). a) Wie groß ist der Spulenstrom im eingeschalteten Zustand bei $U_b = 12 \text{ V}$? b) Hat eine Freilaufdiode mit $I_{\text{Fmax}} = 30 \text{ A}$ und $P_{\text{tot}} = 3 \text{ W}$ die nötige Impulsstromfestigkeit beim Ausschalten?
- Ein Transistor schaltet eine kapazitive Last von $C = 1 \mu\text{F}$ (**Schaltung Bild 1, unten**). Der Einschaltstrom beträgt im Einschaltmoment 130 mA, danach sinkt er auf 65 mA ab. Berechnen Sie bei $U_b = 20 \text{ V}$ und $U_{\text{CESat}} = 0,5 \text{ V}$ a) den Widerstand R_1 und R_2 . b) Wie lange dauert es, bis der Kondensator nach dem Ausschalten vollständig entladen ist?
- Das PWM-Signal einer Steuerschaltung soll die Drehzahl eines Motors steuern. Der DC-Motor hat je nach Belastung und Temperatur eine Stromaufnahme von 1 A bis 2,5 A bei $U_b = 13,8 \text{ V}$. Unter welchen Impulsbedingungen kann eine Diode 1 N 400x mit den Kenndaten nach **Bild 2** verwendet werden?

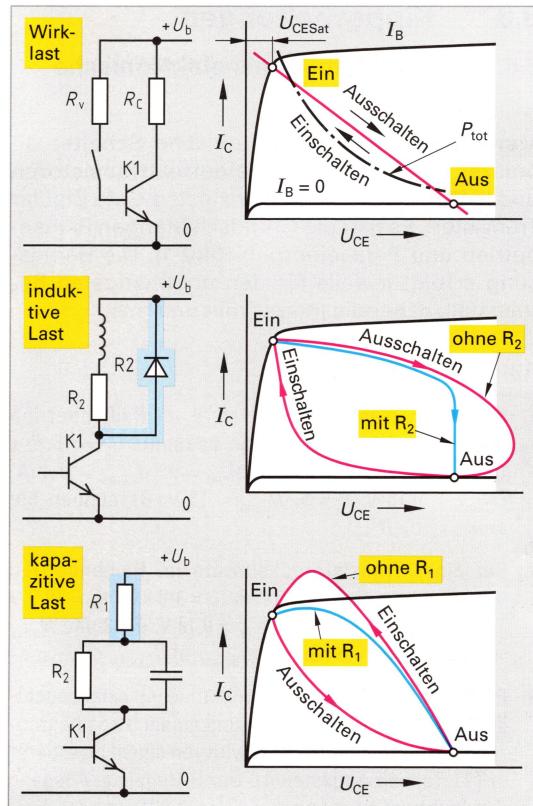


Bild 1: Schaltverhalten eines Transistors

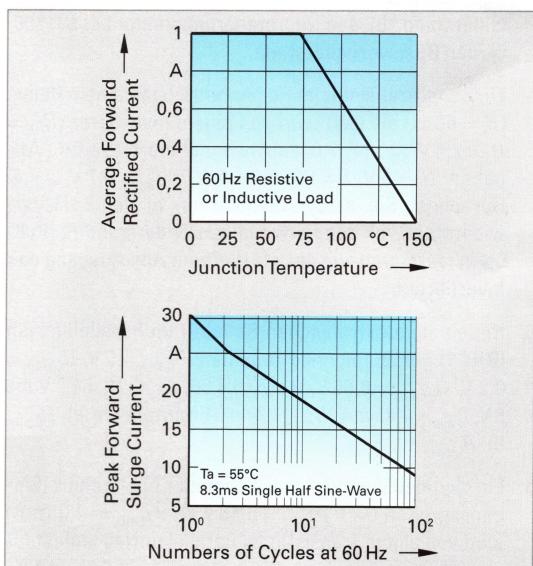
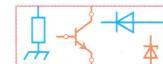


Bild 2: Datenblatt-Auszug der Dioden 1N4001 – 1N4007



6.7 Verstärker mit Feldeffekttransistoren

Je nachdem, ob Source, Drain oder Gate wechselstrommäßig gemeinsam für Eingang und Ausgang verwendet werden, spricht man von einer Sourceschaltung, Drainschaltung oder Gateschaltung.

6.7.1 Gleichstromgrößen von FET in Sourceschaltung

Der Zusammenhang zwischen dem Drainstrom I_D und der Drain-Source-Spannung U_{DS} bzw. der Gate-Source-Spannung U_{GS} wird durch Kennlinien dargestellt (**Bild 1**, folgende Seite). Für Strom und Spannungen sind Bezugspfeile festgelegt (**Bild 1**).

Der Drain-Source-Kurzschlussstrom I_{DSS} ist der bei konstanter Spannung U_{DS} von Drain nach Source fließende Strom, wenn $U_{GS} = 0$ V ist. Die Abschnürspannung $U_{GS(OFF)}$ ist die Gate-Source-Spannung U_{GS} , bei der bei konstanter Spannung U_{DS} der Kanal zwischen Drain und Source abgeschnürt wird (**Bild 1**, folgende Seite). Der Kanal ist dann gesperrt. Die Drain-Source-Sättigungsspannung U_{DSsat} ist die Spannung U_{DS} , bei der die Ausgangskennlinien vom Linearbereich in den Abschnürbereich übergehen.

Aufgaben zu 6.7.1

- Ein Feldeffekttransistor wird mit einer Drain-Source-Spannung von 12 V betrieben. Der Drainstrom beträgt 4 mA. Wie groß ist die Gleichstromleistung des FET?
- Ein FET nimmt eine Gleichstromleistung von 40 mW auf, wenn der Drainstrom 3,5 mA beträgt. Zu berechnen ist die Drain-Source-Spannung.
- Ein FET wird mit einer Drain-Source-Spannung von 24 V betrieben. Die Gleichstromleistung beträgt 132 mW. Wie groß ist der Drainstrom?
- Bei einem J-FET beträgt bei $-U_{GS} = 14$ V der Gate-Source-Reststrom -2 nA. Wie groß ist der Eingangs-widerstand des FET?
- Ein Isolierschicht-FET hat einen Eingangswiderstand von $0,1 \cdot 10^{15} \Omega$. Wie groß ist bei $U_{GS} = -2$ V der Gate-Source-Reststrom?
- Bestimmen Sie aus den Kennlinien **Bild 1**, folgende Seite, a) $U_{GS(OFF)}$ und I_{DSS} für $U_{DS} = 10$ V, b) U_{DSsat} für $U_{GS} = -2$ V.

Bei $U_{DS} = 0$ V:

$$P_- = U_{DS} \cdot I_D$$

$$R_{GS} = \frac{U_{GS}}{I_{GSS}}$$

$$U_{DSsat} = U_{GS} - U_{GS(OFF)}$$

P_-	Gleichstromleistung
U_{DS}	Drain-Source-Spannung
I_D	Drainstrom
U_{DSsat}	Drain-Source-Sättigungsspannung
U_{GS}	Gate-Source-Spannung
$U_{GS(OFF)}$	Abschnürspannung
R_{GS}	Eingangswiderstand des FET
I_{GSS}	Gate-Source-Reststrom für $U_{DS} = 0$ V

6

Beispiel 1: Drainstrom I_D berechnen

An einem FET liegt die Spannung $U_{DS} = 8$ V. Bei welchem Drainstrom beträgt die Gleichstromleistung 44 mW?

Lösung:

$$P = U_{DS} \cdot I_D \Rightarrow I_D = \frac{P}{U_{DS}} = \frac{44 \text{ mW}}{8 \text{ V}} = 5,5 \text{ mA}$$

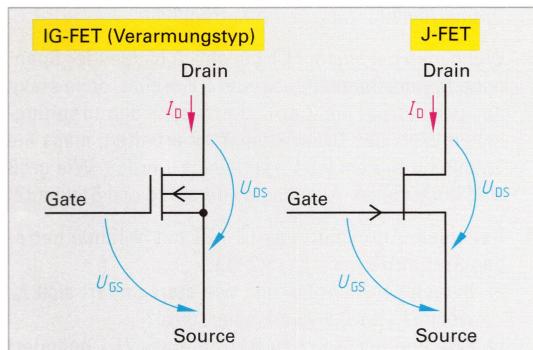


Bild 1: Bezugspfeile beim FET

- Ermitteln Sie aus den Ausgangskennlinien **Bild 1**, folgende Seite, a) U_{DSsat} und $U_{GS(OFF)}$ für $-U_{GS} = 3$ V, b) I_{DSS} bei $U_{DS} = 6$ V.
- Ermitteln Sie mithilfe der Kennlinien **Bild 1**, folgende Seite, $U_{GS(OFF)}$, U_{GS} , wenn $U_{DSsat} = 2$ V beträgt, R_{GS} für $I_{GSS} = -4$ nA und P_- für $U_{DS} = 15$ V.
- Bestimmen Sie mithilfe der Kennlinien **Bild 1**, folgende Seite, $U_{GS(OFF)}$, U_{DSsat} für $-U_{GS} = 1$ V, I_{GSS} für $R_{GS} = 10 \text{ T}\Omega$ sowie P_- für $U_{DS} = 10$ V.



6.7.2 Wechselstromgrößen von FET in Sourceschaltung

Die Steilheit S und der differenzielle Ausgangswiderstand r_{DS} bestimmt man aus den Änderungen ΔI_D , ΔU_{GS} und ΔU_{DS} , die aus den Kennlinien **Bild 1** entnommen werden können.

Beispiel 1: Drainstromänderung berechnen

Ein FET hat die Steilheit $3,6 \text{ mA/V}$. Welche Drainstromänderung entsteht bei konstanter Spannung U_{DS} , wenn eine Gate-Source-Spannungsänderung von $2,5 \text{ V}$ erfolgt?

Lösung:

$$S = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}}$$

$$\Rightarrow \Delta I_D = S \cdot \Delta U_{GS} = 3,6 \text{ mA/V} \cdot 2,5 \text{ V} = 9 \text{ mA}$$

Aufgaben zu 6.7.2

- Wenn bei einem FET bei gleich bleibender Spannung U_{DS} die Spannung U_{GS} um $0,3 \text{ V}$ erhöht wird, steigt die Stromstärke I_D um $1,2 \text{ mA}$. Wie groß ist die Steilheit?
- Ein Feldeffekttransistor hat die Steilheit $S = 8,3 \text{ mA/V}$. Welche Gate-Source-Spannungsänderung ist bei gleich bleibender Spannung U_{DS} erforderlich, damit die Drainstromänderung 12 mA beträgt?
- Wenn man bei einem FET bei gleich bleibender Spannung U_{GS} die Spannung U_{DS} um 4 V erhöht, dann steigt der Drainstrom um 2 mA . Um wieder den ursprünglichen Wert des Drainstromes zu erhalten, muss die Spannung U_{GS} um $0,3 \text{ V}$ verkleinert werden. Wie groß sind Kurzschluss-Ausgangswiderstand und Steilheit?
- Bei einem Anreicherungs-IG-FET mit N-Kanal betragen $S = 5 \text{ mA/V}$ und $r_{DS} = 5,2 \text{ k}\Omega$.
 - In welcher Richtung und wie stark ändert sich I_D , wenn U_{GS} um $0,5 \text{ V}$ verkleinert wird?
 - Wie und um welchen Betrag muss U_{DS} geändert werden, damit der Drainstrom wieder seinen ursprünglichen Wert erreicht?
- Bestimmen Sie aus den Kennlinien **Bild 1** für $-U_{GS} = 2 \text{ V}$ und $U_{DS} = 10 \text{ V}$ den Drainstrom und die Steilheit.
- Ermitteln Sie aus den Kennlinien **Bild 1** für $I_D = 8 \text{ mA}$ und $U_{GS} = -1 \text{ V}$ die Spannung U_{DS} und den Kurzschluss-Ausgangswiderstand.
- Ein Feldeffekttransistor mit den Kennlinien **Bild 1** wird im Arbeitspunkt $U_{DS} = 15 \text{ V}$ und $I_D = 8,5 \text{ mA}$ betrieben. Zeichnen Sie
 - den Arbeitspunkt in das Kennlinienfeld ein und bestimmen Sie
 - Gate-Source-Spannung
 - Steilheit und
 - differenzieller Ausgangswiderstand.

Bei $U_{DS} = \text{konstant}$: Bei $U_{GS} = \text{konstant}$:

$$S = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}}$$

$$r_{DS} \approx \frac{\Delta U_{DS}}{\Delta I_D}$$

S	Steilheit
r_{DS}	differenzieller Ausgangswiderstand
ΔI_D	Drainstromänderung
ΔU_{GS}	Gate-Source-Spannungsänderung
ΔU_{DS}	Drain-Source-Spannungsänderung

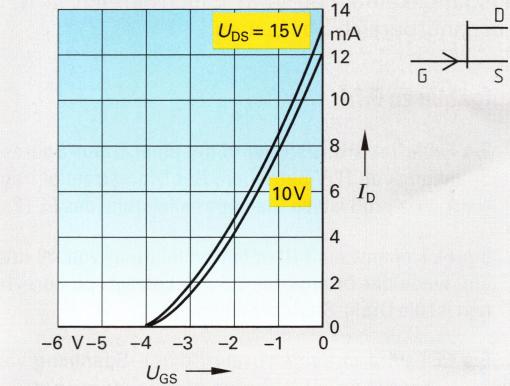
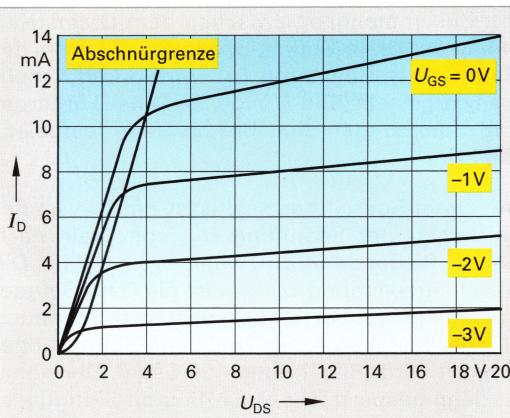


Bild 1: Kennlinien eines J-FET mit N-Kanal

- Ein Feldeffekttransistor mit der Kennlinie **Bild 1** wird im Arbeitspunkt $U_{DS} = 10 \text{ V}$ und $I_D = 4,5 \text{ mA}$ betrieben. Zeichnen Sie
 - den Arbeitspunkt in das Kennlinienfeld ein und bestimmen Sie
 - Gate-Source-Spannung
 - Steilheit und
 - differenzieller Ausgangswiderstand.



6.7.3 Analogschalter mit FET

Feldeffekttransistoren sind steuerbare Widerstände und werden oft als Analogschalter eingesetzt (**Bild 1**). Die Spannung U_{GS} steuert den Widerstand des Drain-Source-Kanals R_{DS} . Im Schaltzustand ON (ein) ist R_{DS} niederohmig und somit leitend. Im Schaltzustand OFF (aus) ist R_{DS} hochohmig und sperrt.

6.7.3.1 Analogschalter mit J-FET

In **Bild 1a** ist der N-Kanal-J-FET leitend bei $U_{GS} > 0$ V. Der Gate-Strom bei $U_{GS} > 0$ V wirkt sich auf die Schaltungseigenschaften aus. Abhilfe schafft eine zusätzliche Diode am Gate (**Bild 1b**). Diese sperrt sobald $U_1 < U_{St}$ und verhindert somit, dass $U_{GS} > 0$ V werden kann.

Beispiel 1: Steuerspannung berechnen

Für **Bild 1a** wird ein N-Kanal-J-FET mit den Kennlinien der vorhergehenden Seite, **Bild 1** eingesetzt. Die Eingangsspannung liegt zwischen 0 V und 12 V. Berechnen Sie U_{St} für das Ein- und Ausschalten.

Lösung:

$U_{GS(OFF)} = -4$ V aus Eingangskennlinie (**Bild 1**, vorhergehende Seite).

Zustand EIN:

$$U_{St} \geq U_1 \Rightarrow U_{St} \geq 12 \text{ V}$$

Zustand AUS:

$$U_{St(OFF)} \leq U_{GS(OFF)} + U_{1\min} = -4 \text{ V} + 0 \text{ V} = -4 \text{ V}$$

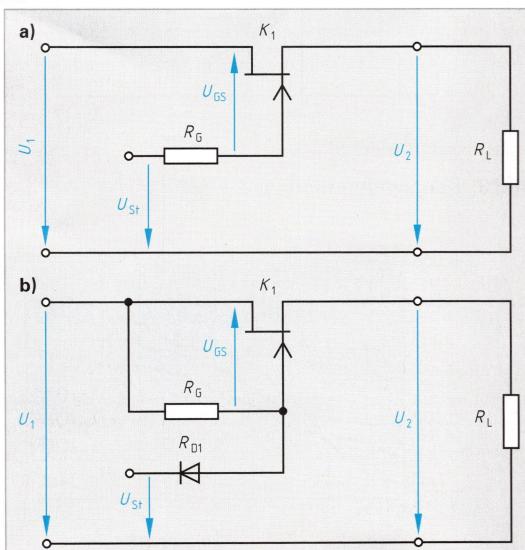


Bild 1: N-Kanal-FET als Analogschalter

ohne Diode:

$$U_{GS} = U_{St} - U_1$$

$$U_{St(OFF)} = U_{GS(OFF)} + U_{1\min}$$

mit Diode:

$$U_{St(OFF)} = U_{GS(OFF)} + U_{1\min} + U_F$$

Einschaltbedingung: $U_{St(ON)} \geq U_1$

U_{GS}	Gate-Source-Spannung
$U_{GS(OFF)}$	Gate-Source-Ausschaltspannung
U_{St}	Steuerspannung
$U_{St(OFF)}$	Ausschaltsteuerspannung
$U_{St(ON)}$	Einschaltsteuerspannung
U_1	Eingangsspannung
$U_{1\min}$	kleinste Eingangsspannung
U_F	Durchlassspannung

Aufgaben zu 6.7.3.1

- Ein N-Kanal-J-FET wird als Analogschalter eingesetzt (**Bild 1a**). Am Eingang liegt die Spannung $U_1 = 10$ V, $U_{GS(OFF)} = -4$ V. Berechnen Sie a) $U_{St(ON)}$, b) $U_{St(OFF)}$, c) I_D bei $U_{St} = 12$ V, $R_G = 100 \text{ k}\Omega$ und $U_F = 0,7$ V.
- An einem Analogschalter mit N-Kanal-FET (**Bild 1b**) werden folgende Werte gemessen: $U_1 = 5$ V, $U_{St} = 15$ V. a) Berechnen Sie U_{GS} . b) In welchem Zustand befindet sich der Schalter?
- Berechnen Sie mit den Werten von Aufgabe 2 U_{GS} für $U_{St} = 0$ V, $U_F = 0,7$ V, $U_{GS(OFF)} = -4$ V und $R_G = 100 \text{ k}\Omega$.
- An Schaltung **Bild 1b** werden die Signalverläufe **Bild 2** aufgenommen. Skizzieren Sie a) $u_2(t)$ und b) $u_{GS}(t)$.

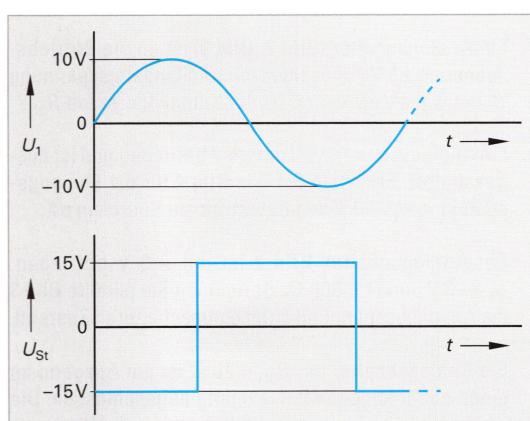


Bild 2: Eingangsspannung und Steuerspannung eines Analogschalters



6.7.3.2 Analogschalter mit IG-FET

Integrierte Analogschalter (**Bild 1**) bestehen aus einer oder mehreren Schalterzellen. Die Schalterzellen haben die Funktion eines Schließers, eines Öffners oder eines Wechselschalters. Werden die Ausgänge mehrerer Schließer zu einem Ausgang zusammengeführt und die Eingänge durch einen Adressdecoder angesteuert, bezeichnet man die Schaltung als Analog-Multiplexer. Diese werden verwendet z.B. in Datenerfassungseinheiten.

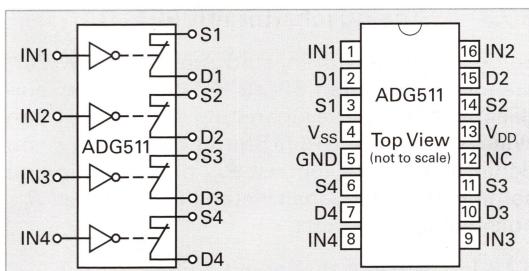


Bild 1: Integrierte Analogschalter

Eine Schalterzelle besteht aus einem N-Kanal-MOS-FET und einem P-Kanal-MOS-FET, die parallel geschaltet sind (**Bild 2**). Eine positive Gate-Spannung an K_1 und eine negative an das Gate von K_2 macht den Schalter leitend. Source und Drain sind die beiden Schalteranschlüsse. Im Schalter integrierte Pegelwandler ermöglichen die Ansteuerung mit z.B. TTL-Pegel (0 V und 5 V).

Zwei wichtige Eigenschaften der Analogschalter sind der Kanalwiderstand im leitenden Zustand R_{ON} und der Reststrom im sperrenden Zustand $I_{D(OFF)}$ und $I_{S(OFF)}$ (**Bild 3**). Beide sind abhängig von U_1 , der Betriebsspannung und der Temperatur.

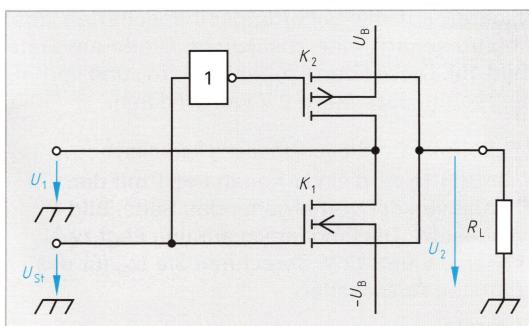


Bild 2: Analogschalter mit zwei komplementären CMOS-FET

Beispiel 1: Kanalwiderstand ermitteln

Ein Analogschalter wird mit ± 5 V betrieben.

An der Source liegt die Eingangsspannung mit 2,5 V. Ermitteln Sie aus **Bild 3** den Kanalwiderstand.

Lösung:

$$R_{ON} = 17 \Omega \text{ (aus Bild 3 abgelesen)}$$

Aufgaben zu 6.7.3.2

- Ein Analogschalter (**Bild 2**, **Bild 3**) ist an die Betriebsspannung ± 5 V angeschlossen. Die Eingangsspannung U_1 beträgt 4 V. Wie groß ist der Kanalwiderstand R_{ON} ?
- Ein Analogschalter wird mit ± 5 V betrieben und ist ausgeschaltet. Ermitteln Sie aus **Bild 4** für die Eingangsspannung $U_1 = -1$ V den Reststrom an Source in pA.
- Ein Analogschalter **Bild 2** ist mit ± 5 V betrieben. $U_1 = -3$ V und $R_L = 300 \Omega$. Berechnen Sie mithilfe **Bild 3** die Ausgangsspannung U_2 im eingeschalteten Zustand.
- Ein Analogschalter mit $R_{ON} = 20 \Omega$ ist am Ausgang an einen hochohmigen Messeingang angeschlossen. Die Kapazität des Messeingangs beträgt 15 nF. Wie lange muss die Einschaltzeit sein, damit die volle Eingangsspannung am Messeingang anliegt?

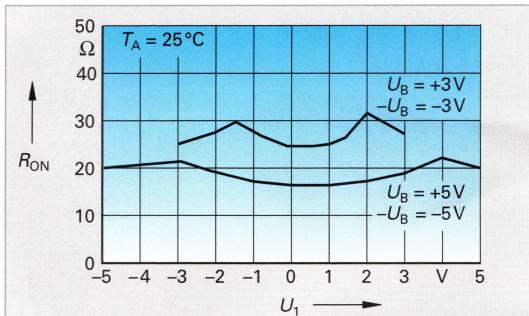


Bild 3: Kanalwiderstand

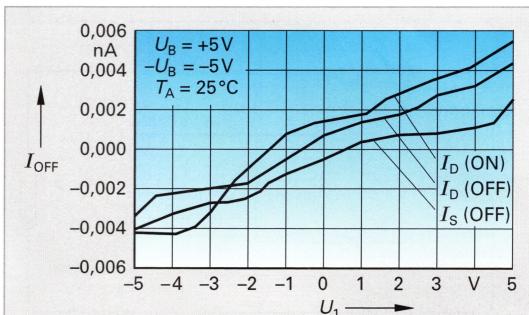


Bild 4: Reststrom

6.8 Leistungselektronik

6.8.1 IGBT

IGBT (von Insulated Gate Bipolar Transistor = bipolarer Transistor mit isolierter Steuerelektrode) ist eine Kombination aus IG-FET und bipolarem Transistor (**Bild 1**). Die Ansteuerung erfolgt durch eine Steuerspannung über den Anschluss-Gate fast leistungslos. Im Vergleich zum IG-FET ist die Leitfähigkeit und damit die Strombelastbarkeit dieser Bauelemente größer.

IGBTs gibt es einzeln und als Modul aus mehreren IGBTs (**Bild 1**). Integrierte Rückspeisedioden erlauben die Aufnahme von Strömen in Gegenrichtung. Bei Berechnung, z.B. der Verlustleistung, muss die Rückspeisediode mitberücksichtigt werden. Zur Schaltungsdimensionierung werden oft Software-Tools von den Halbleiterherstellern angeboten.

Aufgaben zu 6.8.1

- Ein IGBT-Modul (**Bild 1**) mit Rückspeisedioden hat die in **Tabelle 1** dargestellten Grenzwerte.
 - Ermitteln Sie aus der Tabelle die maximale Strombelastbarkeit des IGBT.
 - Welchen maximalen Strom kann der IGBT zurückspeisen?
- Ein IGBT wird mit einer Gate-Emitter-Spannung von 15 V angesteuert, dabei fließt ein Reststrom von 500 nA. Welche Verlustleistung ergibt sich bei Ansteuerung
 - mit Gleichstrom und
 - mit $f = 50 \text{ kHz}$ und einer Impulszeit von $t_i = 5 \mu\text{s}$
- Ein IGBT mit dem Ausgangskennlinienfeld **Bild 2** steuert eine ohmsche Last und wird mit einer Gate-Emitter-Spannung von 13 V angesteuert. Es fließt ein Kollektorstrom von 600 A.
 - Ermitteln Sie für diesen Arbeitspunkt die Kollektor-Emitter-Spannung.
 - Wie groß ist die Verlustleistung des IGBT ohne Ein- und Ausschaltverluste, wenn das Gate mit 30 kHz und einer Impulszeit $t_i = 10 \mu\text{s}$ angesteuert wird?
- Ein IGBT-Modul mit den Daten aus **Tabelle 1** wird bei 50°C Umgebungstemperatur ohne zusätzliche Kühlung betrieben. Die Gesamtverlustleistung beträgt 2000 W. Der thermische Widerstand ist mit max. $R_{\text{th}ju} = 0,012 \text{ K/W}$ angegeben. Überprüfen Sie, ob die Betriebsbedingungen im zulässigen Bereich liegen.

Simulator für diskrete IGBTs:
www.infineon.com

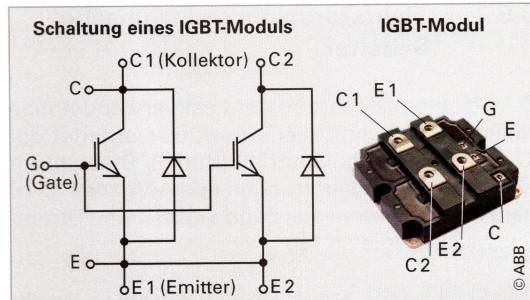


Bild 1: IGBT-Modul mit zwei IGBTs

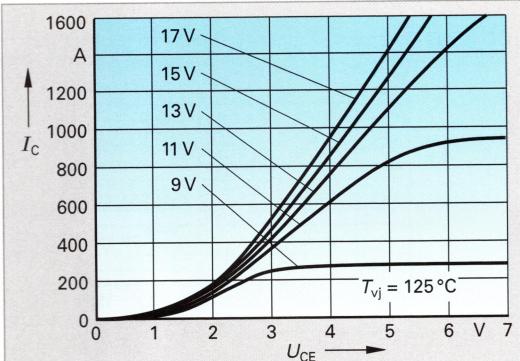
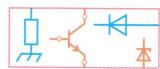


Bild 2: Ausgangskennlinienfeld eines IGBT

Tabelle 1: Grenzwerte eines IGBT-Moduls (Auszug)

Kenn- und Grenzwerte	Größe	Bedingungen	Min	Max
Kollektor-Emitter-Spannung	U_{CES}	$U_{GE} = 0 \text{ V}, \vartheta_j \geq 25^\circ\text{C}$		3300 V
DC Kollektorstrom	I_C	$\vartheta_G = 80^\circ\text{C}$		800 A
kurzzeitiger Kollektorstrom	I_{CM}	$t_p = 1 \text{ ms}, \vartheta_G = 80^\circ\text{C}$		1600 A
Gate-Emitter-Spannung	U_{GES}		-20 V	20 V
Gesamtverlustleistung	P_{tot}	$\vartheta_G = 25^\circ\text{C}, \text{je Schaltzyklus (IGBT)}$		7700 W
DC Vorwärtsstrom	I_F			800 A
kurzzeitiger Vorwärtsstrom	I_{FRM}			1600 A
Sperrschichttemperatur	ϑ_j			150 °C
Gehäusetemperatur	ϑ_G			125 °C



6.8.2 Thyristoren als elektronische Schalter

Zur Leistungssteuerung der Last verwendet man meist die Anschnittsteuerung. hier arbeitet der Thyristor im Einpulsbetrieb (**Bild 1**). Dies gilt für alle folgenden Erläuterungen und Aufgaben. Deshalb ist die Summe aus Zündwinkel α und Stromflusswinkel λ gleich 180° .

Der Formfaktor F des Thyristorstromes ist abhängig von der Größe des Stromflusswinkels λ (**Bild 2**).

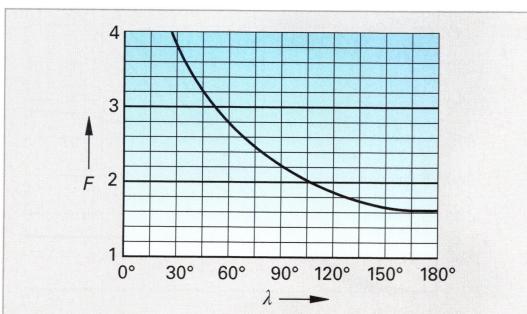


Bild 2: Formfaktor des Thyristorstromes in Abhängigkeit des Stromflusswinkels λ bei Einpulsbetrieb

Der Dauergrenzstrom im Datenblatt des Thyristors ist der arithmetische Mittelwert des Vorwärtsstromes bei einem Zündwinkel $\alpha = 0^\circ$.

Aufgaben zu 6.8.2

- Bei einer Anschnittsteuerschaltung beträgt der Dauergrenzstrom des Thyristors 1 A und der Stromflusswinkel $\lambda = 180^\circ$. Ermitteln Sie a) den Formfaktor mithilfe von **Bild 2**, b) den Effektivwert des Vorwärtsstromes, c) die Vorwärtsverlustleistung im Thyristor.
- In einer Anschnittsteuerschaltung beträgt der Effektivwert des Vorwärtsstromes 6 A. Der Zündwinkel hat 90° . Wie groß sind a) der Formfaktor nach **Bild 2**, b) der arithmetische Mittelwert des Vorwärtsstromes, c) die Vorwärtsverlustleistung des Thyristors?
- Ein Thyristor hat nach Datenblatt einen Dauergrenzstrom von 5 A. Der Stromflusswinkel beträgt 30° . Ermitteln Sie a) den Maximalwert des Vorwärtstromes, b) den arithmetischen Mittelwert des Vorwärtsstromes, c) den Formfaktor mithilfe von **Bild 2**, d) den Effektivwert des Vorwärtsstromes, e) die Vorwärtsverlustleistung im Thyristor.

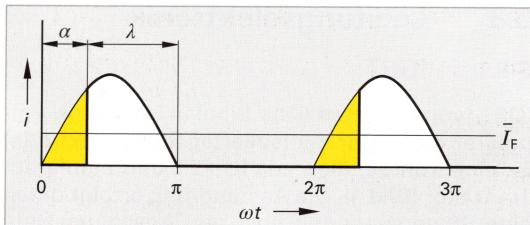


Bild 1: Anschnittsteuerung mit Thyristor im Einpulsbetrieb

$$\alpha + \lambda = 180^\circ$$

$$P_F = U_S \cdot I_F + I_F^2 \cdot r_F$$

$$F = \frac{I_F}{\bar{I}_F}$$

$$I_F = \frac{\hat{I}_F}{2\pi} \cdot (1 + \cos \alpha)$$

F Formfaktor

\bar{I}_F arithmetisches Mittelwert des Vorwärtsstromes

\hat{I}_F Maximalwert des Vorwärtsstromes

I_F Effektivwert des Vorwärtsstromes

P_F Vorwärtsverlustleistung des Thyristors

r_F differenzialer Vorwärtswiderstand ($r_F \approx 80 \text{ m}\Omega$)

U_S Schleusenspannung ($U_S \approx 1 \text{ V}$)

α Zündwinkel in Grad

λ Stromflusswinkel



6.8.3 Gesteuerte Stromrichter

Stromsteller. Die Einstellung eines Wechselstromes kann mit der **Vielperiodensteuerung** (Schwingungspaketsteuerung, Impulspaketsteuerung, **Bild 1**) oder mit der **Anschnittsteuerung** (**Bild 2**) erfolgen. Bei Gleichstrom ist die Einstellung des Stromes durch Pulse möglich (**Bild 1**).

Die **ideelle Ausgangsspannung** U_{i2} ist die Ausgangsspannung eines Stromrichters ohne Spannungsfall an den Bauelementen. Die gleichgerichtete Ausgangsspannung U_2 ist um den Spannungsfall kleiner als U_{i2} . Der Spannungsfall ist dabei umso größer, je mehr Dioden bzw. Thyristoren für denselben Strom in Reihe geschaltet sind, z.B. bei Brückenschaltungen mindestens zwei.

Gesteuerte Gleichrichter. Die mittlere ideelle Gleichspannung ohne Zündwinkel U_{di} hängt von der Eingangsspannung U_1 und der Pulszahl ab (**Tabelle 1**). Die mittlere ideelle Gleichspannung mit Zündwinkel U_{dia} ist bei einem kleinen Zündwinkel größer als bei einem großen Zündwinkel (**Bild 2**).

Bei der Anschnittsteuerung ist die Blindleistung proportional zum Steuerwinkel.

Beispiel 1: Ausgangsspannung berechnen

Bei einer Wechselspannung von 230 V erfolgt in Schaltung B2 mit Widerstandslast eine Anschnittsteuerung mit einem Zündwinkel von 90°. Wie groß ist die Ausgangsspannung?

Lösung:

Nach Tabelle 1 ist $U_{di}/U_1 = 0,9$

$$\Rightarrow U_{di} = U_1 \cdot 0,9 = 230 \text{ V} \cdot 0,9 = 207 \text{ V}$$

$$U_{dia} = \frac{U_{di}}{2} (1 + \cos \alpha) = \frac{207 \text{ V}}{2} (1 + \cos 90^\circ) = 103,5 \text{ V}$$

Tabelle 1: Ideelle Gleichspannungen von Stromrichterschaltungen ohne Zündverzögerung und ohne Glättung

Schaltung	Pulszahl	U_{di}/U_1
E1C	1	0,45
M2C	2	0,45
M3C	3	0,676
B2C	2	$0,9(R_L); 1,25(Z_L)$
B6C	6	1,35

(R_L) bei Widerstandslast (Z_L) bei induktiver Last mit Freilaufdiode

Bei Impulspaketsteuerung oder Gleichstromstellung:

$$P_{RL} = \frac{t_i}{t_i + t_p} \cdot \frac{U_1^2}{R_L}$$

$$U = U_1 \cdot \frac{t_i}{t_i + t_p}$$

Bei Anschnittsteuerung und Last-Wirkwiderstand:

$$U_{i2} = U_1 \cdot \sqrt{1 + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi} - \frac{\alpha}{180^\circ}}$$

Bei Pulzzahlen 1 oder 2:

$$U_{dia} = \frac{U_{di}}{2} \cdot (1 + \cos \alpha)$$

P_{RL} Leistung des Lastwiderstandes

t_i Impulsdauer; t_p Pausendauer

U_1 Eingangsspannung; R_L Lastwiderstand

U Ausgangsspannung (Effektivwert)

U_{i2} ideelle Ausgangsspannung (Effektivwert)

α Zündwinkel

U_{dia} arithmetischer Mittelwert der ideellen Gleichspannung bei Ansteuerung

U_{di} arithmetischer Mittelwert der ideellen Gleichspannung bei $\alpha = 0$

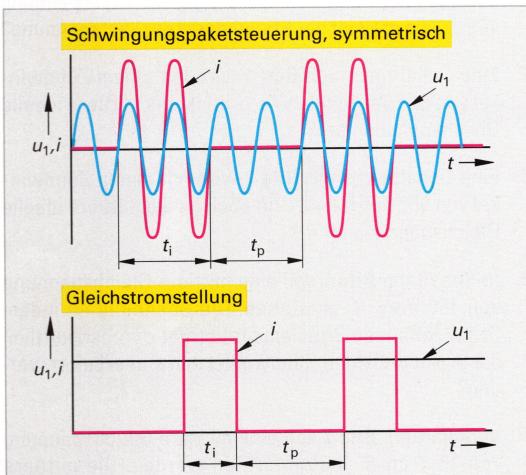


Bild 1: Stromstellung durch Pulse bei Widerstandslast

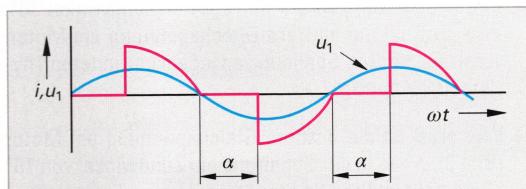


Bild 2: Anschnittsteuerung bei Wechselspannung



Aufgaben zu 6.8.3

- Bei einer Impulspaketsteuerung werden an einer Spannung von 50 Hz 230 V jeweils von einem Stellglied 80 Perioden durchgelassen und 120 Perioden gesperrt. Wie groß ist der Effektivwert der Lastspannung?
- Bei einem Gleichstromsteller betragen die Anschlussspannung 110 V und der Tastgrad 0,4. Wie groß sind bei einer Pulsperiodendauer von 50 ms a) Impulsdauer und Pausendauer, b) Lastspannung?
- Ein Dimmer ist an AC 230 V angeschlossen und wird bei Widerstandslast mit einem Zündwinkel von 60° betrieben. Wie groß ist die ideelle Ausgangsspannung?
- Ein Universalmotor wird an 50 Hz 230 V mit Anschnittsteuerung betrieben, der Zündwinkel ist für die niedrigste Spannung 150° . Wie groß ist dann die ideelle Ausgangsspannung, wenn annähernd ein Last-Wirkwiderstand vorliegt?
- Ein Gleichstromsteller ist an 110 V angeschlossen und wird mit einer Pulsfrequenz von 5 Hz getaktet. Die Ausgangsspannung soll 60 V betragen. Wie groß müssen Impulsdauer und Pausendauer sein?
- Bei einer Impulspaketsteuerung mit Widerstandslast betragen der Tastgrad 0,2 und die Anschlussspannung 400 V. Wie groß ist der Effektivwert der Lastspannung?
- Eine Schaltung nach Bild 1 wird mit einem Zündwinkel von 60° betrieben. Wie groß ist die mittlere ideelle Gleichspannung an R_L ?
- Eine Schaltung nach Bild 2 wird mit einem Zündwinkel von 90° betrieben. Wie hoch ist die mittlere ideelle Gleichspannung an R_L ?
- In Schaltung Bild 1 soll eine mittlere Gleichspannung von 150 V an R_L entstehen. Die Spannung an jedem Strom leitenden Bauelement beträgt durchschnittlich 0,9 V. Mit welchem Zündwinkel muss gearbeitet werden?
- In Schaltung Bild 2 soll eine mittlere Gleichspannung von 16 V an R_L hervorgerufen werden. Die mittlere Spannung an jedem gezündeten Thyristor beträgt 0,9 V. Wie groß muss der Zündwinkel sein?
- In der Schaltung Bild 3 beträgt der Zündwinkel 30° . Wie groß ist die mittlere Gleichspannung am Motor, wenn die mittlere Spannung an jedem gezündeten Thyristor 0,8 V beträgt?
- Wie groß ist die mittlere Gleichspannung am Motor (Bild 3), wenn in der Schaltung ein Zündwinkel von 70° eingestellt ist? Die Spannung an den gezündeten Thyristoren kann vernachlässigt werden.

Tastgrad:

$$T = t_i + t_p$$

$$g = t_i/T$$

 g Tastgrad T Pulsperiodendauer t_i Impulsdauer t_p Pausendauer

Bei Sechspuls-Brückenschaltung mit Wirklast:

$$\alpha < 60^\circ$$

$$60^\circ < \alpha < 120^\circ$$

$$U_{di\alpha} = U_{di} \cdot \cos \alpha$$

$$U_{di\alpha} = U_{di} \cdot [1 + \cos(\alpha + 60^\circ)]$$

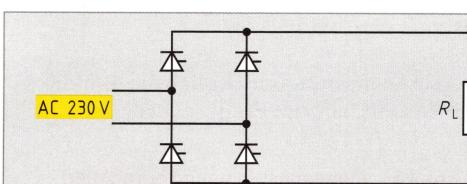
 α Zündwinkel $U_{di\alpha}$ arithmetischer Mittelwert der ideellen Gleichspannung bei Ansteuerung U_{di} arithmetischer Mittelwert der ideellen Gleichspannung bei $\alpha = 0$ 

Bild 1: Lastwiderstand an Schaltung B2H

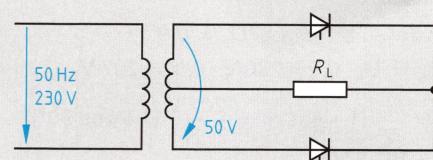


Bild 2: Lastwiderstand an Schaltung M2C

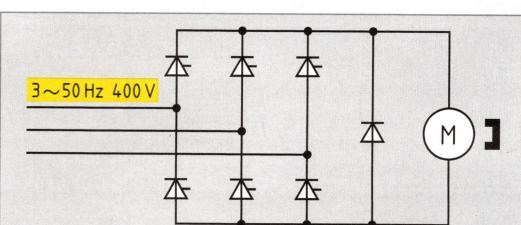


Bild 3: Motor an Schaltung B6CF



6.9 Operationsverstärker

6.9.1 Eingangsschaltung des Operationsverstärkers

Operationsverstärker **Bild 1** verwenden eine Differenzverstärkerstufe **Bild 2**, die die Eingangsdifferenzspannung U_1 verstärkt.

Beispiel 1: Kollektorstrom berechnen

In einer Schaltung nach **Bild 2** sind $I_{C3} = 10 \text{ mA}$ und $I_{C1} = 6 \text{ mA}$. Wie groß ist I_{C2} ?

Lösung:

$$I_{C3} \approx I_{C1} + I_{C2} \Rightarrow I_{C2} \approx I_{C3} - I_{C1} = 10 \text{ mA} - 6 \text{ mA} = 4 \text{ mA}$$

Aufgaben zu 6.9.1

1. In einer Differenzverstärkerstufe nach **Bild 2** mit $R_{C1} = R_{C2} = 1,5 \text{ k}\Omega$ fließt $I_{C3} = 6 \text{ mA}$. Durch Vergrößern der Eingangsdifferenzspannung U_1 steigt I_{C1} von $3,5 \text{ mA}$ auf $4,0 \text{ mA}$. Wie ändern sich dadurch a) I_{C2} , b) U_2 ?
2. In einer Schaltung nach **Bild 2** mit $R_{C1} = R_{C2} = R_C = 1,2 \text{ k}\Omega$ beträgt $I_{C3} = 8 \text{ mA}$. Durch Verkleinern der Spannung U_1 geht I_{C1} von $5,5 \text{ mA}$ auf $3,5 \text{ mA}$ zurück. Wie ändern sich dadurch a) I_{C2} , b) U_2 ?
3. Bei einem Differenzverstärker nach **Bild 2** mit $R_{C1} = R_{C2} = R_C = 2,2 \text{ k}\Omega$ wird U_1 um $\Delta U_1 = -200 \text{ mV}$ geändert; dadurch nimmt U_2 um $\Delta U_2 = 5,0 \text{ V}$ zu. Berechnen Sie a) den Spannungsverstärkungsfaktor V_u , b) die Änderung ΔI_{C1} .
4. Eine Verstärkerstufe nach **Bild 2** mit $R_{C1} = R_{C2} = R_C = 4,7 \text{ k}\Omega$ hat den Spannungsverstärkungsfaktor $V_u = 40$. a) Welche Änderung der Eingangsdifferenzspannung bewirkt die Änderung der Ausgangsdifferenzspannung um $\Delta U_2 = -8,0 \text{ V}$? b) Wie groß ist die Änderung ΔI_{C1} des Kollektorstromes von K1?
5. Bei einer Differenzverstärkerstufe nach **Bild 2** haben die Kollektorwiderstände R_{C1} und R_{C2} jeweils $2,7 \text{ k}\Omega$. Für die Konstantstromquelle mit K3 gilt $U_{BE} = 0,70 \text{ V}$, $R_4 = 1,2 \text{ k}\Omega$ und $U_Z = 5,1 \text{ V}$. Die Eingangsdifferenzspannung U_1 ist so groß, dass K1 durchgesteuert ist und K2 gesperrt ist. Wie groß sind für diese Aussteuerung a) der Kollektorstrom von K1, b) der Kollektorstrom von K2, c) die Ausgangsdifferenzspannung U_2 ?
6. Bei einer Schaltung nach **Bild 2** mit $R_{C1} = R_{C2} = 3,3 \text{ k}\Omega$ soll an R_{C2} höchstens die Spannung $U_{RC2max} = 10 \text{ V}$ entstehen. Berechnen Sie für diesen Fall a) I_{C2} ; b) I_{C1} ; c) I_{C3} ; d) R_4 für $U_2 = 5,1 \text{ V}$ und $U_{BE} = 0,70 \text{ V}$.

$I_{C3} = I_{C1} + I_{C2}$	$I_{C3} \approx \frac{U_Z - U_{BE}}{R_5}$
$\Delta U_2 = -V_u \cdot \Delta U_1$	$U_2 = R_C \cdot (I_{C2} - I_{C1})$
Für $R_{C1} = R_{C2} = R_C$:	
$U_2 \approx R_C \cdot (I_{C3} - 2 \cdot I_{C1})$	$\Delta U_2 = -2 \cdot R_C \cdot I_{C1}$
I_{C1}, I_{C2}, I_{C3}	Kollektorströme
U_Z	Z-Spannung
U_{BE}	Basis-Emitter-Spannung von K3
R_4	Emitterwiderstand von K3
R_C, R_{C1}, R_{C2}	Kollektorwiderstände
V_u	Spannungsverstärkungsfaktor
U_1, U_2	Differenzspannungen
$\Delta I_{C1}, \Delta U_1, \Delta U_2$	Änderungen der Größen

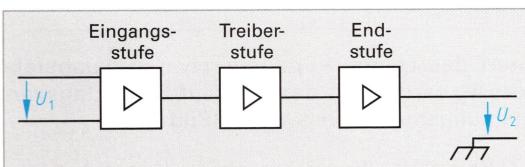


Bild 1: Übersichtsschaltplan eines Operationsverstärkers

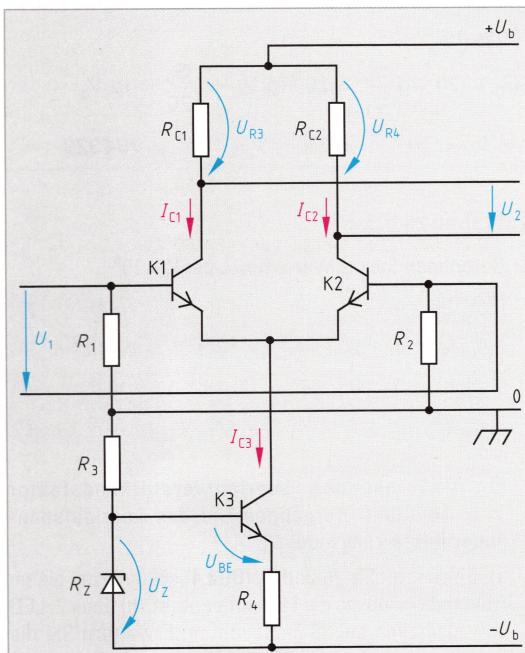
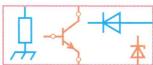


Bild 2: Differenzverstärkerstufe



6.9.2 Verstärkung ohne Gegenkopplung

Operationsverstärker (OPV) haben die Kenngrößen Leerlaufverstärkungsfaktor V_0 , Eingangswiderstand R_e und Ausgangswiderstand R_a (**Bild 1**).

Operationsverstärker ohne Gegenkopplung heißen Komparator (**Bild 2**). Die Ausgangsspannung U_a lässt sich mit V_0 und U_1 berechnen.

■ Beispiel 1: Ausgangsspannung berechnen

Berechnen Sie für einen OPV mit $V_0 = 10^6$ und $U_b = \pm 15 \text{ V}$ die Ausgangsspannung U_a für a) $U_{e1} = 2 \text{ V}$, $U_{e2} = 3 \text{ V}$ und b) $U_{e1} = 4 \text{ V}$, $U_{e2} = -1 \text{ V}$.

Lösung:

- $U_1 = U_{e1} - U_{e2} = 2 \text{ V} - 3 \text{ V} = -1 \text{ V}$
 $U_b = -V_0 \cdot U_1 = -10^6 \cdot (-1 \text{ V}) = 10^6 \text{ V}$
 $\Rightarrow U_a = 15 \text{ V}$
- $U_1 = U_{e1} - U_{e2} = 4 \text{ V} - (-1 \text{ V}) = 5 \text{ V}$
 $U_b = -V_0 \cdot U_1 = -10^6 \cdot (5 \text{ V}) = -5 \cdot 10^6 \text{ V}$
 $\Rightarrow U_a = -15 \text{ V}$

Statt des Leerlauf-Spannungsverstärkungsfaktors V_0 wird meist das Leerlauf-Spannungsverstärkungsmaß G_0 verwendet (**Bild 3**).

■ Beispiel 2: Verstärkungsfaktor V_0 berechnen

Ein Operationsverstärker hat ein Leerlauf-Spannungsverstärkungsmaß von 118 dB. Wie groß ist der Leerlauf-Spannungsverstärkungsfaktor?

Lösung:

$$G_0 = 20 \cdot \lg \frac{U_a}{U_1} = 20 \cdot \lg V_0 \Rightarrow \frac{G_0}{20} = \lg V_0$$

$$\Rightarrow V_0 = 10^{\frac{G_0}{20}} = 10^{118/20} = 10^{5,9} = 794328$$

Aufgaben zu 6.9.2

- Berechnen Sie die Werte für U_a bei $V_0 = 10^6$

U_{e1}/V	0	2	-4	$10 \cdot 10^{-6}$	-4	2
U_{e2}/V	0	2	-4	0	$-4 + 10^{-6}$	3
U_1/V	0	0	0	$10 \cdot 10^{-6}$	10^{-6}	-1
U_a/V	?	?	?	?	?	?

- Ein OPV hat den Leerlaufverstärkungsfaktor $V_0 = 1600000$. Berechnen Sie das Leerlaufspannungsverstärkungsmaß G_0 .
- a) Bemessen Sie R_1 und R_2 (**Bild 4**) so, dass bei einem Abstand von 60 cm die LED aufleuchtet. b) Eine 2. LED soll zusätzlich bei 30 cm leuchten. Erweitern Sie die Schaltung mit einem 2. OPV und berechnen Sie dessen Spannungsteiler.

$U_1 = U_{e1} - U_{e2}$	$U_a = -V_0 \cdot U_1$
$G_0 = 20 \lg \frac{U_a}{U_1} \text{ dB}$	$G_0 = 20 \lg V_0 \text{ dB}$
G_0 Leerlaufspannungsverstärkungsmaß in dB V_0 Leerlaufspannungsverstärkungsfaktor U_1 Spannung zwischen invertierendem und nicht invertierendem Eingang U_a, U_{e1}, U_{e2} Spannungen: a Ausgang, e Eingang	

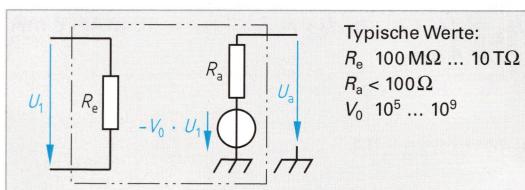


Bild 1: Ersatzschaltung eines OPV und Kenngrößen

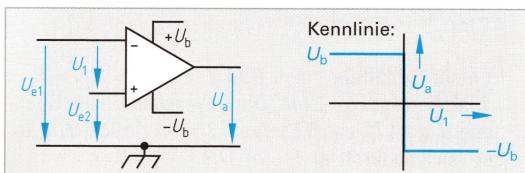


Bild 2: Komparator und Übertragungskennlinie

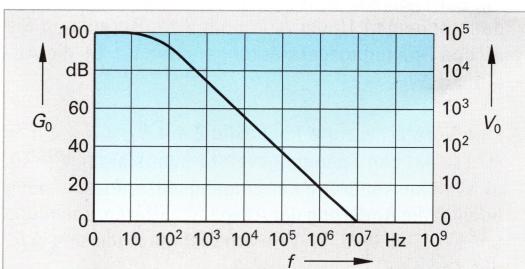


Bild 3: Frequenzverhalten bei Leerlaufverstärkung

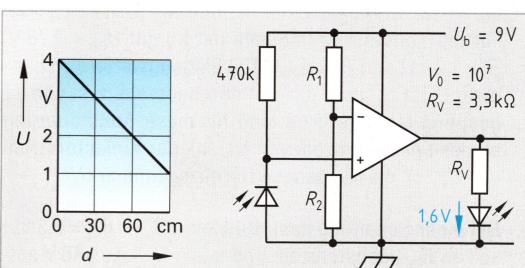


Bild 4: Abstandsanzeige mit Sensor



6.9.3 Komparatoren

Komparatoren sind Schalter. Sie vergleichen (lat. comparare) die Spannungen an den OP-Eingängen (**Bild 1**). Der Eingang mit dem höheren Potenzial bestimmt die Ausgangspolarität. Da bei Komparatoren immer Rail-to-Rail-Operationsverstärker eingesetzt werden, liegt am Ausgang immer der volle Wert einer der beiden Betriebsspannungen, 0 V oder U_b .

Aufgaben zu 6.9.3

- Der Komparator **Bild 1** liegt an $U_b = 12 \text{ V}$. Der OP hat den Eingangswiderstand $1 \text{ G}\Omega$ und die Leerlaufverstärkung 10^6 . Es sind $R_1 = R_2 = 47 \text{ k}\Omega$. a) Berechnen Sie den Schwellwert U_s und begründen Sie, warum der Spannungsteiler unbelastet ist. b) Wie groß ist U_D für $u_e > U_s$? c) Die Spannung u_e steigt in 3 s von 0 V auf 9 V linear an und sinkt dann in 1,5 s linear auf 0 V. Zeichnen Sie u_e und u_a in Abhängigkeit von der Zeit für den genannten Zeitbereich.
- Der Komparator **Bild 2** liegt an $U_b = 5 \text{ V}$. Sein Spannungsteiler hat die Widerstände $R_1 = 180 \text{ k}\Omega$ und $R_2 = 120 \text{ k}\Omega$. a) Berechnen Sie den Schwellwert U_s , b) Die Spannung u_e ist eine gleichgerichtete Sinusspannung mit $\hat{U}_e = 4 \text{ V}$ und $f = 1 \text{ kHz}$. Stellen Sie u_e und u_a für eine Dauer von 3 Perioden von u_e grafisch dar.
- Die Schaltung in **Bild 3** verhindert ein lautes Knacken beim Einschalten des Verstärkers. a) Beschreiben Sie die Funktionsweise der Schaltung. b) Wie viele Sekunden nach dem Betätigen von S wird der Lautsprecher eingeschaltet?
- Ein 5 V-Controller benötigt ein Netzteil, dessen Ausgangsspannung zwischen 4,5 V und 5,5 V liegen muss. a) Entwerfen Sie eine Schaltung mit den Komparatoren aus **Bild 1** und **Bild 2**, die die Ausgangsspannung aus **Bild 4** erzeugt. Eine grüne 2-mA-Leuchtdiode leuchtet auf, wenn das Spannungsfenster eingehalten wird. b) Dimensionieren Sie alle notwendigen Widerstände (Bereich bis $100 \text{ k}\Omega$) $U_b = 9 \text{ V}$.

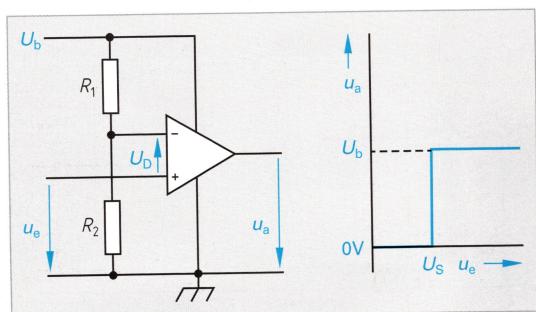


Bild 1: Nicht invertierender Komparator

Schaltschwelle:

$$U_s = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_b$$

$$U_D = \frac{U_a}{V_0}$$

Nicht invertierender
Komparator:

$$u_a = \begin{cases} 0 & \text{für } u_e < U_s \\ U_b & \text{für } u_e > U_s \end{cases}$$

Invertierender
Komparator:

$$u_a = \begin{cases} U_b & \text{für } u_e > U_s \\ 0 & \text{für } u_e < U_s \end{cases}$$

U_s Schwellwert

U_b Betriebsspannung

U_D Spannung an den OP-Eingängen

u_e Eingangsspannung

u_a Ausgangsspannung

V_0 Leerlaufverstärkung des OPs

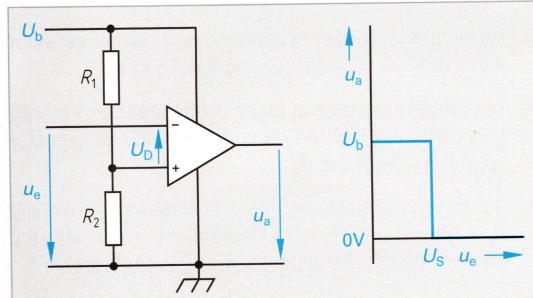


Bild 2: Invertierender Komparator

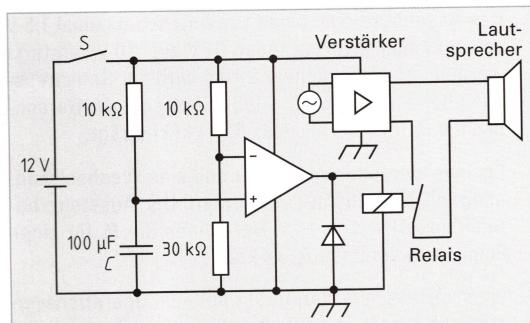


Bild 3: Lautsprechereinschaltung

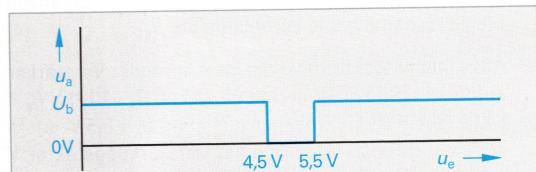


Bild 4: Spannung des Fensterkomparators



6.9.4 Invertierender Verstärker

Beim invertierenden Verstärker (Umkehrverstärker) ist die Polarität der Ausgangsspannung im Vorzeichen geändert. Er kann auch als P-Regler eingesetzt werden (siehe **Kapitel 13**).

Nachfolgend verwendete Formeln im **Kapitel 6 Operationsverstärker** gelten für beschaltete Operationsverstärker, wenn $I_1 = 0$ und $U_1 = 0$ sind (**Bild 1**).

■ ■ Beispiel 1: Ausgangsspannung berechnen

In einer Schaltung nach **Bild 1** ist $U_e = -1 \text{ V}$, $U_a = 10 \text{ V}$. Berechnen Sie R_e für $R_K = 100 \text{ k}\Omega$.

Lösung:

$$U_a = -R_K/R_e \cdot U_e \Rightarrow R_e = -U_e/U_a \cdot R_K$$

$$R_e = -(-1 \text{ V})/10 \text{ V} \cdot 100 \text{ k}\Omega = 10 \text{ k}\Omega$$

Aufgaben zu 6.9.4

- Welchen Spannungsverstärkungsfaktor hat ein OPV nach **Bild 1** mit $R_e = 10 \text{ k}\Omega$ und $R_K = 150 \text{ k}\Omega$?
- Berechnen Sie den Spannungsverstärkungsfaktor eines OPV mit $R_K = 220 \text{ k}\Omega$ und $R_e = 1,5 \text{ k}\Omega$.
- Die Eingangsspannung eines invertierenden Verstärkers (OPV) mit $R_K = 100 \text{ k}\Omega$ und $R_e = 10 \text{ k}\Omega$ beträgt $U_e = 1,2 \text{ V}$. Berechnen Sie U_a .
- Die Ausgangsspannung eines invertierenden OPV mit $R_K = 200 \text{ k}\Omega$ und $R_e = 10 \text{ k}\Omega$ soll nicht größer als $+6 \text{ V}$ werden. Welche Eingangsspannung ist zulässig?
- Der Aussteuerbereich einer Operationsverstärkerschaltung beträgt $U_a = \pm 12 \text{ V}$, die Eingangsspannung $U_e = 1 \text{ V}$. Berechnen Sie R_K für $R_e = 6,8 \text{ k}\Omega$.
- Das Ausgangssignal eines Sensors mit maximal $1,5 \text{ V}$ soll mit einem invertierenden OPV auf -10 V verstärkt werden. a) Mit welchem Strom wird der Sensorsignal belastet, wenn $R_e = 100 \Omega$ beträgt? b) Berechnen Sie R_K für den Fall, dass $R_e = 1 \text{ k}\Omega$ beträgt.
- Ein invertierender Verstärker soll eine Wechselspannung mit $\hat{U}_e = 400 \text{ mV}$ verstärken. Der Aussteuerbereich des OPV ist $\pm 12 \text{ V}$. Berechnen Sie R_K für einen Eingangswiderstand $R_e = 4 \text{ k}\Omega$.
- Ein invertierender Verstärker mit dem Operationsverstärker K2 mit $V = 10$ (**Bild 2**) soll mit einer Zusatzschaltung so ergänzt werden, dass der Eingangswiderstand $R_{e1} = 100 \text{ k}\Omega$ wird und bei gleicher Ausgangsspannung U_a diese das gleiche Vorzeichen wie U_e hat. Ergänzen Sie die Schaltung und berechnen Sie R_{K1} .
- Aus einem Steckbrett ist ein invertierender Verstärker aufgebaut (**Bild 3**). Widerstandswerte: $R_e = 10 \text{ k}\Omega$, $R_K = 5 \text{ k}\Omega$, $R_p = 200 \text{ k}\Omega$, Eingangsspannung $U_e = 0,5 \text{ V}$. a) In welchen Bereich lässt sich der Verstärkungsfaktor V einstellen? b) Berechnen Sie die minimale und die maximale Ausgangsspannung U_a .

Für $V \ll V_0$:

$$U_a = -\frac{R_K}{R_e} U_e$$

$$V = -\frac{R_K}{R_e}$$

$$f_c \approx \frac{f_D}{V}$$

$$I_e = \frac{U_e}{R_e}$$

V_0 Leerlaufspannungsverstärkungsfaktor

V Spannungsverstärkungsfaktor

R_K Gegenkopplungswiderstand

R_e Eingangswiderstand

f_c Grenzfrequenz

f_D Durchtrittsfrequenz

U_a Ausgangsspannung

U_e Eingangsspannung

I_e Eingangsstrom

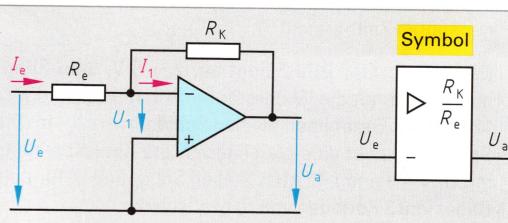


Bild 1: Invertierender Verstärker

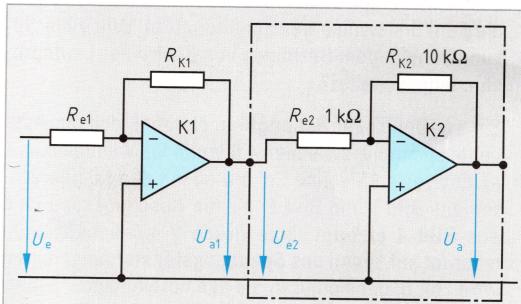


Bild 2: Invertierende Verstärkerschaltung

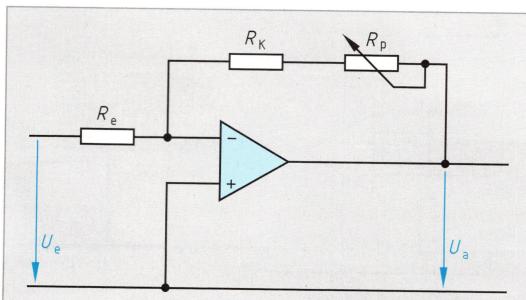


Bild 3: Invertierende Verstärkerschaltung analysieren