

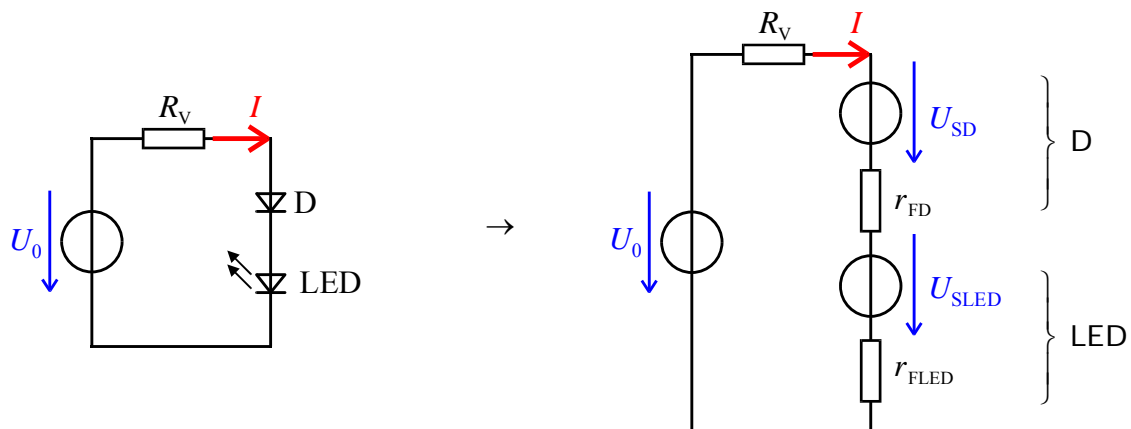
# Lösungsübersicht EL SS 2006

Die Lösungen sind z.T. ausführlicher kommentiert und diskutiert als es während einer Klausur möglich ist.

## 1. Diodenandordnung

[18]

### 1.1 Vorwiderstand $R_V$ in allgemeiner Berechnung



Der Nach dem Einfügen der Ersatzschaltungen von Diode (D) und Lichtemitterdiode (LED) sowie der Indizierung der Ersatzschaltungselemente der Dioden mit „D“ bzw. „LED“ erhält man eine lineare Schaltung, auf die der Maschensatz angewendet wird und sich der Strom

$$I = \frac{U_0 - U_{SD} - U_{SLED}}{R_V + r_{FD} + r_{FLED}}$$

ergibt. Umstellung der Gleichung nach  $R_V$  liefert den analytischen Ausdruck des gesuchten Widerstands  $R_V$ :

$$I(R_V + r_{FD} + r_{FLED}) = U_0 - U_{SD} - U_{SLED}$$

$$R_V = \frac{U_0 - U_{SD} - U_{SLED}}{I} - r_{FD} - r_{FLED}$$

### 1.2 Vorwiderstand $R_V$ für $U_0 = 5 \text{ V}$

$$R_V = \frac{5 \text{ V} - 0,7 \text{ V} - 2,5 \text{ V}}{0,01 \text{ A}} - 1 \Omega - 2 \Omega = 177 \Omega \quad \Rightarrow \quad R_V = 177 \Omega$$

### 1.3 Leistung im Vorwiderstand $R_V$

$$P_V = I^2 R_V = (0,01 \text{ A})^2 \cdot 177 \text{ } \Omega = 17,7 \text{ mW}$$

Die zulässige Leistung des Vorwiderstands  $R_V$  muss mindestens 17,7 mW betragen.

## 2.

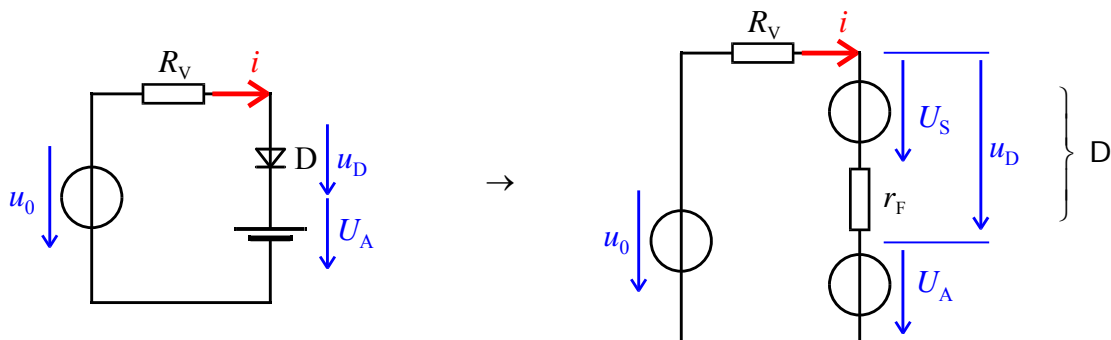
## Ladegerät

[18]

### 2.1 Aufgabe der Diode D

Die Diode wirkt als Gleichrichter: wenn die Klemmenspannung der Diode größer als  $U_S = 0,68 \text{ V}$  ist, fließt ein Ladestrom (es gilt die Ersatzschaltung  $U_S = 0,68 \text{ V}$  und  $r_F = 5,8 \text{ } \Omega$ ). Für Diodenspannungen kleiner als  $U_S = 0,68 \text{ V}$  fließt kein Strom ( $i = 0$ ).

### 2.2 Vorwiderstand $R_V$ für maximalen Ladestrom $i_{\max} = 50 \text{ mA}$



Der Nach dem Einfügen der Ersatzschaltung der Diode D erhält man eine lineare Schaltung für  $u_D > U_S$ . Gleichzeitig mit Maximalwert der Quellspannung, also dem Amplitudenwert  $\hat{u}_0 = \sqrt{2} \cdot \tilde{u}_0 = 16,97 \text{ V}$  tritt der Maximalwert des Ladestroms

$$i_{\max} = \frac{\hat{u}_0 - U_S - U_A}{R_V + r_F}$$

auf. Umstellung der Gleichung nach  $R_V$  liefert den gesuchten Widerstand  $R_V$ :

$$i_{\max} (R_V + r_F) = \hat{u}_0 - U_S - U_A \quad \Rightarrow \quad R_V = \frac{\hat{u}_0 - U_S - U_A}{i_{\max}} - r_F$$

$$R_V = \frac{16,97 \text{ V} - 0,68 \text{ V} - 9 \text{ V}}{0,05 \text{ A}} - 5,8 \text{ } \Omega = 140,0 \text{ } \Omega$$

### 2.3 Leistungsauslegung $P_V$ für den Vorwiderstand $R_V$

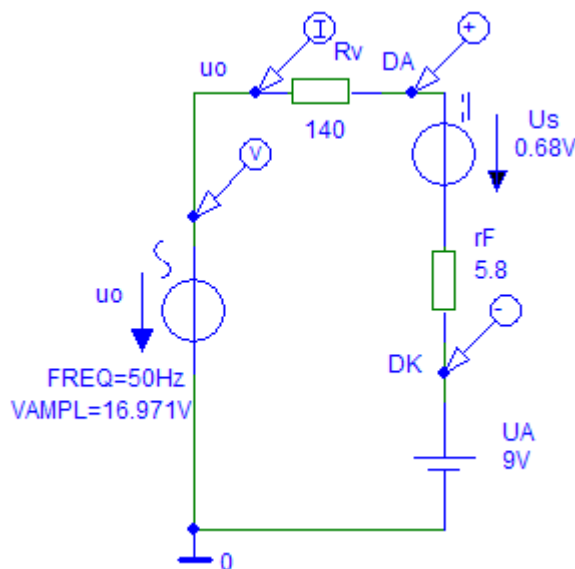
Der Strom durch den Vorwiderstand  $R_V$  ist zeitabhängig (positive Halbwelle). Sein Maximalwert  $i_{\max} = 50 \text{ mA}$  kann zur Abschätzung der Leistung näherungsweise herangezogen werden: wenn  $R_V$  für die maximale Momentanleistung  $p_{V\max}$  ausgelegt ist, dann ist man auf der sicheren Seite:

$$P_V \approx p_{V\max} = i_{\max}^2 R_V = (0,05 \text{ A})^2 \cdot 140 \Omega = 0,35 \text{ W}$$

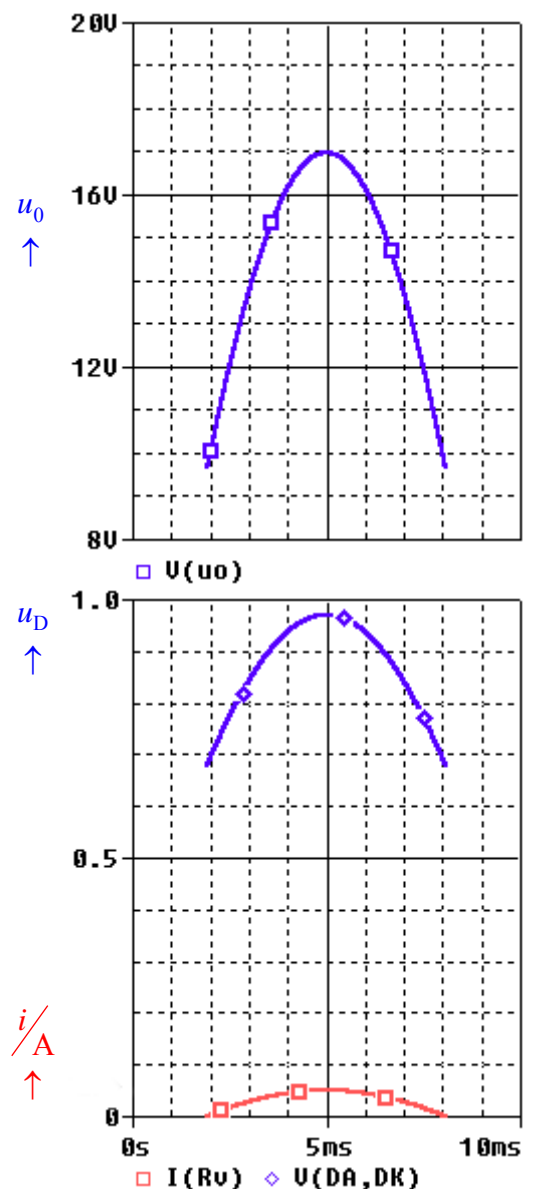
Für  $R_V = 140,0 \Omega$  ist die Festlegung der zulässigen Leistung  $P_V = 0,35 \text{ W}$  ausreichend.

### Schaltungssimulation mit PSpice

Zur Demonstration des Verhaltens der gegebenen Schaltung wird eine Quelle VSIN mit  $\hat{u}_0 = 16,97 \text{ V}$  und  $f = 50 \text{ Hz}$  angenommen:  $u_0 = 16,97 \text{ V} \cdot \sin \omega t$ . Wenn der Spannungsabfall über der Diode  $U_S = 0,68 \text{ V}$  überschreitet, was im Zeitbereich  $1,932 \text{ ms} \leq t \leq 8,068 \text{ ms}$  zutrifft, gilt die abgebildete Schaltung ↓ mit den



rechts abgebildeten Zeitverläufen. Das Strommaximum tritt erwartungsgemäß während der positiven Halbwelle von  $u_0$  auf und beträgt  $0,05 \text{ A}$  (DA = Anode, DK = Katode – siehe Skript EL 432, S. 58).



### 3. Direkt gekoppelter Transistorverstärker

[22]

#### 3.1 Transistor-Grundschtaltung

Es liegt eine direkt gekoppelte **Emitterschaltung 2** vor.

„Emitterschaltung“, weil die Eingangsspannung  $u_e$  zwischen dem Basis-Anschluss sowie dem Masse-Anschluss und die Ausgangsspannung  $u_a$  zwischen dem Kollektor-Anschluss und dem Masse-Anschluss wirkt.

„Emitterschaltung 2“, wegen des Vorhandenseins der Stromgegenkopplung mit  $R_E$  (und wenn wirksam, wegen  $R_E + r_Z$ ).

„Direkt gekoppelt“ wird die Emitterschaltung genannt, weil Ein- und Ausgang gleichstrommäßig (= galvanisch, also ohne Koppelkondensatoren) ausgelegt sind.

#### 3.2 Widerstand $R_E$ , damit sich ein Kollektorstrom $I_{CA} = 1,66 \text{ mA}$ einstellt

Mit den Parametern  $U_Z = 16 \text{ V}$  und  $r_Z = 0 \Omega$  ergibt sich die abgebildete Schaltung der direkt gekoppelten Emitterschaltung 2.

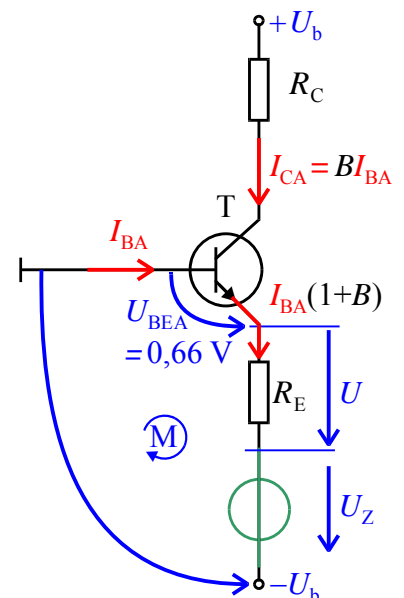
Der Maschensatz (M) der Eingangsmasche liefert den für den Kollektorstrom bestimmenden Widerstand  $R_E$ :

$$U_b = U_{BEA} + U + U_Z \quad \text{mit} \quad I_{BA} = \frac{I_{CA}}{B} \quad \text{und} \\ U = \frac{(1+B)}{B} I_{CA} R_E$$

$$U_b = U_{BEA} + \frac{(1+B)}{B} I_{CA} R_E + U_Z$$

$$R_E = \frac{B(U_b - U_{BEA} - U_Z)}{(1+B)I_{CA}}$$

$$R_E = \frac{173 \cdot (20 \text{ V} - 0,66 \text{ V} - 16 \text{ V})}{(1+173) \cdot 1,66 \text{ mA}} = 2,00 \text{ k}\Omega$$



**3.3** In der Z-Diode umgesetzte Leistung

$$P_Z = U_Z \frac{(1+B)}{B} I_{CA} \rightarrow P_Z = 16 \text{ V} \cdot \frac{(1+173)}{173} \cdot 1,66 \text{ mA} = 26,71 \text{ mW}$$

**3.4** Kollektorwiderstand  $R_C$  für Leerlaufspannungsverstärkungsmaß  $G_v = 10 \text{ dB}$ 

Der Kollektorwiderstand  $R_C$  wird mit dem Betrag der Spannungsverstärkung  $v_u$  wie folgt berechnet:

$$v_u = \frac{R_C}{R_E} \rightarrow R_C = v_u R_E \quad \text{mit, } v_u = 10^{\frac{10}{20}} = 3,162$$

$$R_C = 3,162 \cdot 2,000 \text{ k}\Omega = 6,32 \text{ k}\Omega \quad \text{Probe: } G_v = 20 \lg \frac{6,32 \text{ k}\Omega}{2,00 \text{ k}\Omega} = 10,0 \text{ dB}$$

**3.5** Differenzieller Z-Diodenwiderstand  $r_Z$ , damit sich das Leerlaufspannungsverstärkungsmaß um nicht mehr als  $0,1 \text{ dB}$  ändert.

Mit dem Z-Diodenwiderstand  $r_Z$  wird die Spannungsverstärkung  $v_u$  um den Faktor  $\lambda$  kleiner  $v_{u\_mit\_rZ} = \lambda v_{u\_ohne\_rZ}$ :

$$\Delta G_v = 0,1 \text{ dB} \rightarrow \lambda = 10^{\frac{\Delta G_v / \text{dB}}{20}} = 10^{\frac{-0,1}{20}} = 0,98855$$

$$(R_E + r_{Z \max}) = \frac{R_E}{\lambda}, \quad v_{u\_mit\_rZ} = \frac{R_C}{R_E / \lambda}$$

$$r_{Z \max} = R_E \left( \frac{1}{\lambda} - 1 \right) = 23,2 \text{ }\Omega$$

Wenn  $r_{Z \max} = 23,2 \text{ }\Omega$  nicht überschritten wird, dann ändert (verringert) sich die Leerlaufspannungsverstärkungsmaß um nicht mehr als  $0,1 \text{ dB}$ .

## 4. Verstärkerschaltung mit Operationsverstärker [28]

### 4.1 Operationsverstärker-Grundschialtung. Haupteigenschaften dieser Grundschialtung

*Grundschialtung:* Nicht invertierender Verstärker mit Operationsverstärker. Eingangsspannung liegt am nicht invertierenden OP-Eingang an.

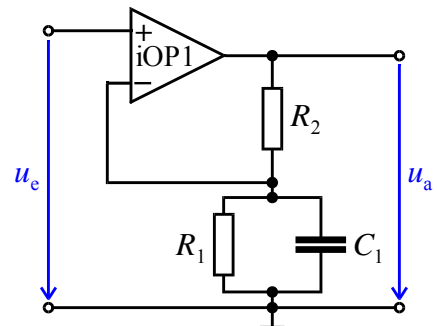
*Haupteigenschaften:* Hoher Eingangswiderstand (Elektrometerverstärker), niedriger Ausgangswiderstand, Spannungsverstärkung gemäß  $v_u = 1 + \underline{Z}_2 / \underline{Z}_1$ .

### 4.2 Frequenzabhängige Spannungsverstärkung $v_u = \underline{u}_a / \underline{u}_e$ (*allgemein*)

$$v_u = 1 + \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1} \quad \text{oder} \quad v_u = 1 + \underline{Z}_2 \underline{Y}_1$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 \quad \text{und} \quad \underline{Y}_1 = \frac{1}{R_1} + j\omega C_1$$

$$v_u = 1 + R_2 \left( \frac{1}{R_1} + j\omega C_1 \right) = 1 + \frac{R_2}{R_1} + j\omega C_1 R_2$$



Für die Aufgaben 4.3 bis 4.5 ist die Definition einer Grenzfrequenz  $f_g$  zweckmäßig:

$$v_u = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \left[ 1 + \frac{j\omega C_1 R_2}{\left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)} \right] = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \left[ 1 + j\omega C_1 \overbrace{\frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)}}^{= 1/\omega_g} \right] = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \left( 1 + j \frac{\omega}{\omega_g} \right)$$

$$v_u = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \left( 1 + j \frac{f}{f_g} \right) \quad \text{mit} \quad \frac{1}{\omega_g} = C_1 \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)} \quad \text{bzw.} \quad f_g = \frac{1}{2\pi C_1 \left( \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)}$$

*Anmerkung:* Die Grenzfrequenz  $f_g$  rührt her vom Zusammenwirken der Kapazität  $C_1$  mit der Parallelschaltung

$$R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

**4.3** Frequenzabhängiges Verstärkungsmaß  $G_v = 20 \lg(\hat{u}_a/\hat{u}_e)$  *allgemein*

$$|\underline{v}_u| = \left| \frac{u_a}{u_e} \right| = \frac{\hat{u}_a}{\hat{u}_e} = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \sqrt{1 + \left( \frac{f}{f_g} \right)^2} \quad G_v = 20 \lg \left[ \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \sqrt{1 + \left( \frac{f}{f_g} \right)^2} \right] \text{ dB}$$

**4.4** Frequenzabhängiger Phasengang  $\varphi_v$  *allgemein*

$$\varphi_v = \arctan \frac{\text{Im}\{\underline{v}_u\}}{\text{Re}\{\underline{v}_u\}} \quad \varphi_v = \arctan \frac{f}{f_g}$$

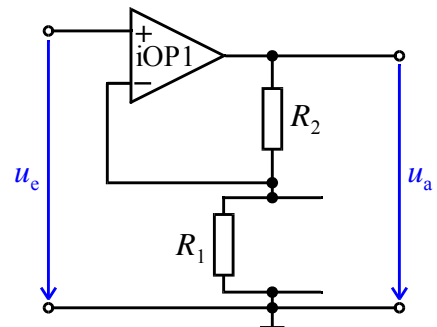
**4.5** Bestimmung von  $R_2$  damit das Verstärkungsmaß für Gleichspannung

$G_{v0} = 20 \lg(U_a/U_e)$  sechs Dezibel beträgt ( $R_1 = 47 \text{ k}\Omega$  und  $C_1 = 10 \text{ }\mu\text{F}$ )

$$v_{u0} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad \text{mit} \quad v_{u0} = 10^{\frac{G_{v0}/\text{dB}}{20}} = 10^{\frac{6}{20}} = 2,00$$

$$R_2 = R_1 (v_{u0} - 1)$$

$$R_2 = 47 \text{ k}\Omega (2 - 1) = 47 \text{ k}\Omega$$



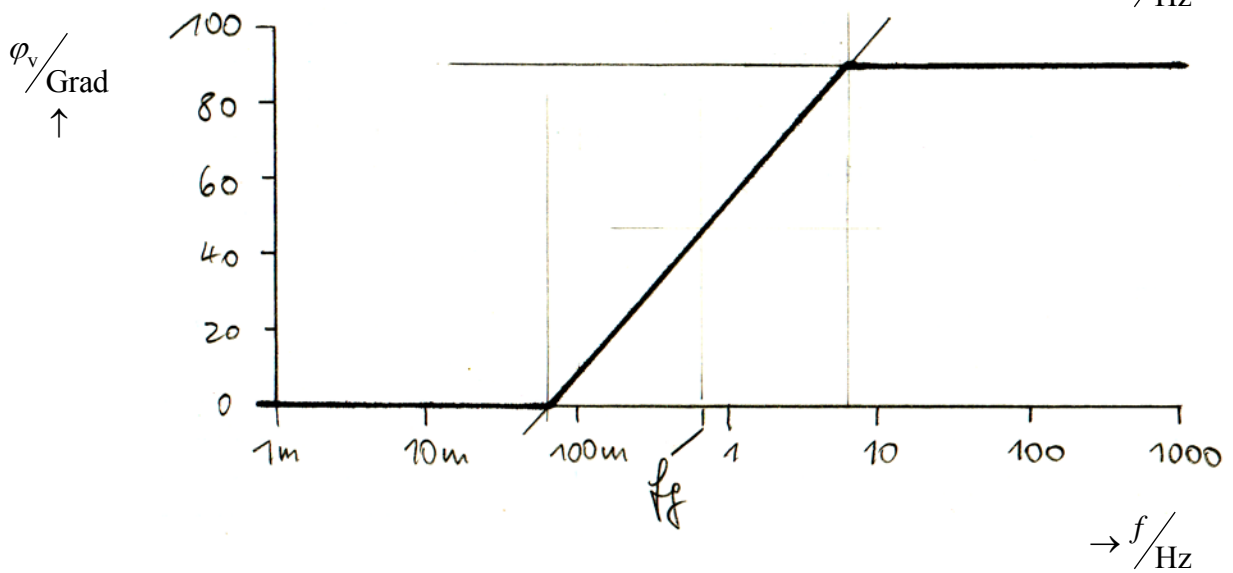
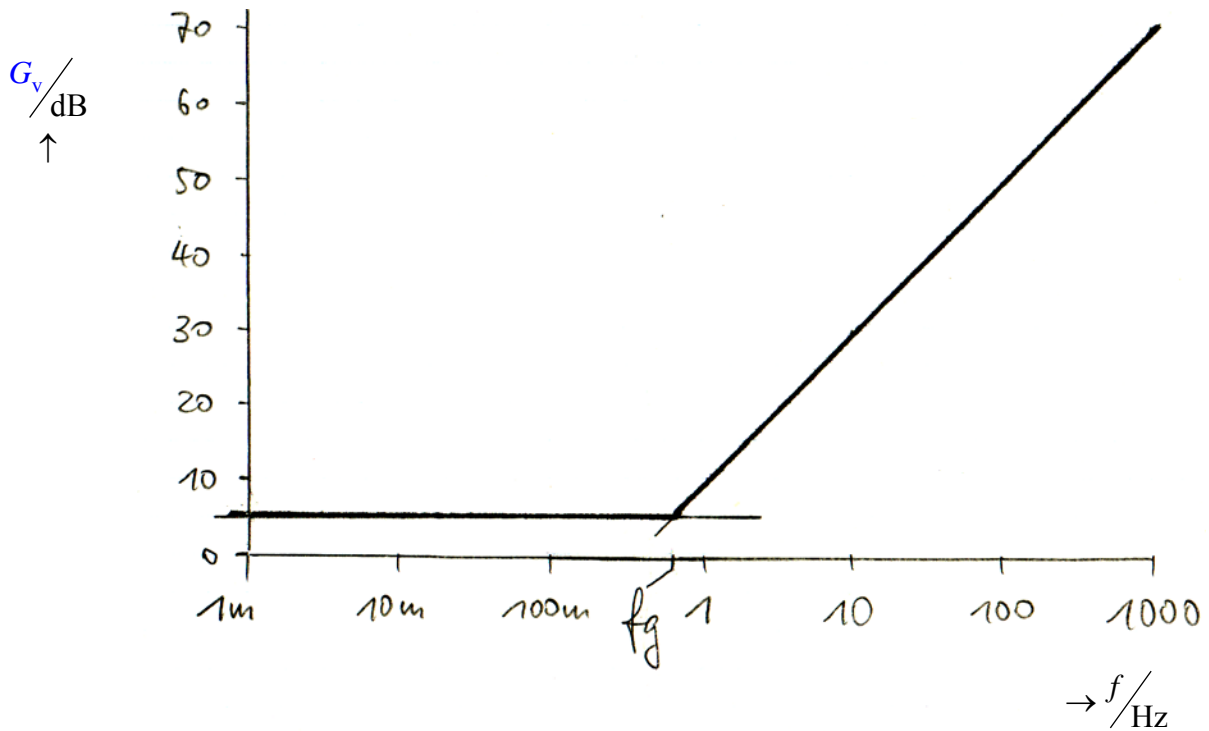
**4.6** Bode-Diagramm der Spannungsverstärkung für  $R_1 = R_2 = 47 \text{ k}\Omega$  und  $C_1 = 10 \text{ }\mu\text{F}$  für den Frequenzbereich  $1 \text{ mHz} \leq f \leq 1 \text{ kHz}$

**Amplitudengang** (Spannungsverstärkungsmaß  $G_v = 20 \lg(\hat{u}_a/\hat{u}_e)$  in dB)

$$G_v = 20 \lg \left[ 2 \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{f}{f_g} \right)^2} \right] \text{ dB} \quad \begin{cases} = 6 \text{ dB} & f \ll f_g \\ = 9 \text{ dB} & f = f_g \\ = 20 \lg \left( 2 \cdot \frac{f}{f_g} \right) \text{ dB} & f \gg f_g \end{cases} \quad f_g = 0,6773 \text{ Hz}$$

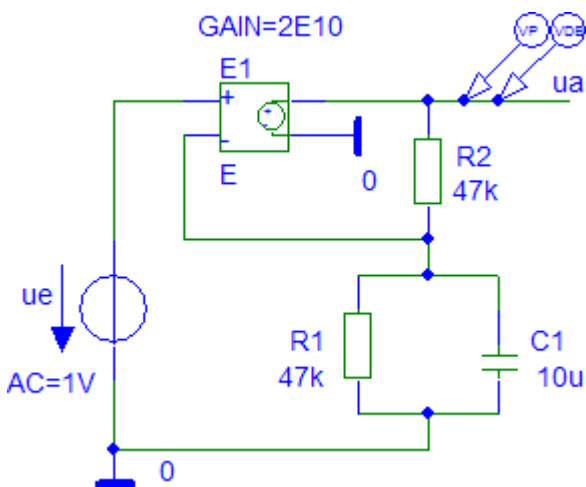
### Phasengang

$$\varphi_v / \text{Grad} = \frac{180}{\pi} \arctan \frac{f}{f_g} \begin{cases} = 0 & f \ll f_g \\ = 45 & f = f_g \\ = 90 & f \gg f_g \end{cases} \quad f_g = 0,6773 \text{ Hz}$$



## Schaltungssimulation mit PSpice

Zur Messung des Bode-Diagramms der gegebenen Schaltung wird der ideale Operationsverstärker (iOP1) mit der spannungsgesteuerten Spannungsquelle E ( $A_D = 2 \cdot 10^{10}$ ) realisiert ↓



Der Amplitudengang weist weit unterhalb der Grenzfrequenz  $f_g = 0,6773$  Hz die Gleichspannungsverstärkung 6 dB auf. In diesem Frequenzbereich ist die Phasendrehung null.

Weit oberhalb der Grenzfrequenz  $f_g = 0,6773$  Hz zeigen Amplituden- und Phasengang differenzierendes Verhalten (Flankensteilheit +20 dB/Dek, Phasendrehung +90 Grad).

