DHBW-MaEp EL2 Klausur 2017/06 Bayer MUSTERLÖSUNG r1.1.0

DHBW-MaEp EL2 Bayer Klausur 2017/06

DHBW Mannheim-Eppelheim · MA-TMT15AM2
Angewandte Elektronik 2 · Klausur 2017/06 · Bayer

Matrikel-Nr.:

Blatt **1** / 8

Aufgabenblätter inkl. Deckblatt	**8**	**Anzahl Lösungsblätter**	

DHBW Duale Hochschule Baden-Württemberg Mannheim

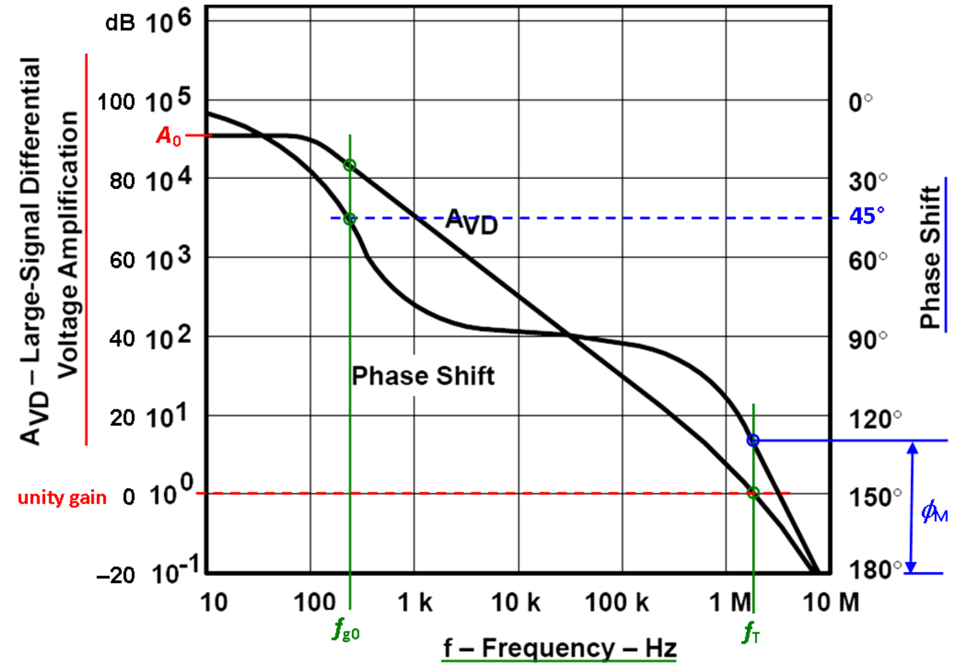
DHBW Mannheim, Außenstelle Eppelheim

Angewandte Elektronik 2
MA-TMT15AM2, EL2, Bayer **Klausur 2017/06**

Dozent	Rainer Bayer, Dipl.-Ing. FH Elektronik	**Datum**	21.06.2017
Matrikelnummer	auf jedem Blatt (Aufgaben und Lösungen) rechts oben eintragen		
Studienjahrgang	MA-TMT15AM **Gruppe** 2	**Semester**	
Hilfsmittel	Taschenrechner	**Zeit**	75 min
Bewertung	Punktzahl 100%	Erreichte Punktzahl	
	Datum, Signum	Ergebnis	

Aufg.	Thema	Blatt	a)	b)	c)	d)	e)	f)	Σ
1	OpAmp: unbeschaltet	2	2	3	3	3	5		16
2	OpAmp: Verstärker – Frequenzgang	3	4	4	4				12
3	OpAmp: *u*/*u*-Verstärker	4	6	6	4	2			18
4	OpAmp: Schaltunganalyse	5–6	2	4	4	4	2	2	18
5	FET: Kleinsignal-Verstärker	7–8	1	2	3	6	4	4	20
Anmerkungen									84

1 Unbeschalteter OpAmp 16



a) s. Abb.; $\left| A(0) = A_{vd0} = 10^{A(0)(\mathrm{dB})/20};\ A_0(\mathrm{dB}) = 20 \cdot \log(A_0)\ \mathrm{dB} \right|$ 2

b) abgelesen: $\underline{\underline{A(0)(\mathrm{dB}) \cong 91\ \mathrm{dB}}}$; $\underline{\underline{A(0) \cong 35.500}}$ 3

c) allgemein: $A(f_{g0}) = A(0)(\mathrm{dB}) - 3\ \mathrm{dB}$; 3
– weitgehend Dominanzpol-korr. OpAmp, da $A(f)$ nur *einen* „Knick" bis geringfügig unterhalb f_T (B_1, Unity Gain) hat;
– andere Argumentation: $f_{g0} << f_{g1}$ (s. Lsg. zu Afg. 2).
⇒ Am Präzisesten liest man ab bei $\varphi(\omega) = -45°$; im Diagramm: „Phase Shift" = 45° → $\underline{\underline{f_{g0} \cong 240\ \mathrm{Hz}}}$

d) $f_T \mathrel{\hat{=}} B_1$ (Unity Gain): $A(f_T) = 0\ \mathrm{dB} \mathrel{\hat{=}} 1$ → abgel.: $\underline{\underline{f_T \cong 1{,}87\ \mathrm{MHz}}}$ 3

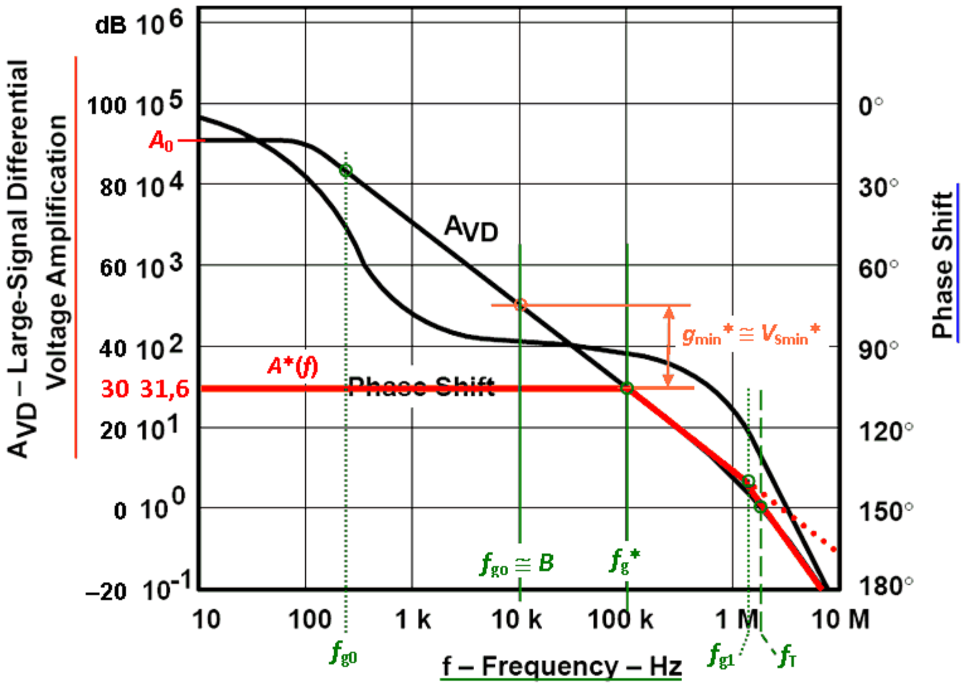
e) abgelesen: $\underline{\underline{\phi_M \cong 50°}}$ → OpAmp <u>ist</u> Unity-Gain-stable. 5

Begr.: theor. Grenze $\phi_M = 0°$, Praxis $\geq 45°$, was hier vorliegt

2 OpAmp: Verstärker – Frequenzgang 12

Spannungsgegenkopplung; der Verstärker hat das Verhalten eines TP 1. O. bis etwas unterhalb $f_T = B_1$ mit $A(0) = A_{vd0}$.

a) Amplitudengang: 4



b) abgel.: $\underline{\underline{v_{u,prog}}}\,(\text{dB}) = 30\ \text{dB} \;\rightarrow\; \underline{\underline{v_{u,prog} \cong 31{,}6}}$. 4

[Anmerkung: wegen $f_{g1} < f_T$ liefert der rechnerische Ansatz $GBP = A^* \cdot f_g^* = \text{const}$ mit $GBP = B_1 = f_T = 1{,}87$ MHz (aus Afg. 1) und $v_{u,prog} = 31{,}6$ die Näherung $f_g^* \cong 60$ kHz. Den Amplitudengang eines TP 1.O. oberhalb f_{g1} zeigt der gepunktete Teil von $A^*(f)$; für den rechnerischen Ansatz mit GBP müsste dieser Verlauf bis mindestens $f = f_T$ vorliegen]

2 OpAmp: Verstärker – Frequenzgang (fortgesetzt)

c) Bei f_g^* ist die Schleifenverstärkung V_S^* „erschöpft“. An der Stelle $f_{go} = 10$ kHz liest man für den Gegenkopplungsgrad g ab: 4

$$\underline{g_{min}{}^*(\text{dB}) \cong V_{Smin}{}^*(\text{dB})} = (50-30)\text{dB} = \underline{20\ \text{dB}} \mathrel{\hat=} \underline{10}$$

[Noch Verlauf TP 1.O. ($f_g^* << f_{g1}$); Lsg. folgt auch aus $f_{go} = f_g^* / 10$]

Es liegt Spannungsgegenkopplung vor: Z_1 und Z_2 der Schaltung werden um den Gegenkopplungsgrad $g = 10$ „verbessert“.

Z_1: Spannungs*eingang* (u_1; ideal: $Z_1 \rightarrow \infty$)

$$Z_1(\text{Schaltung}) = g \cdot Z_1(\text{OpAmp})$$

$$\underline{\underline{Z_{1min}(\text{Schaltung})}} = g_{min} \cdot r_i{}' = 10 \cdot 500\ \text{k}\Omega = \underline{\underline{5\ \text{M}\Omega}}$$

Z_2: Spannungs*ausgang* (u_2; ideal: $Z_2 \rightarrow 0$)

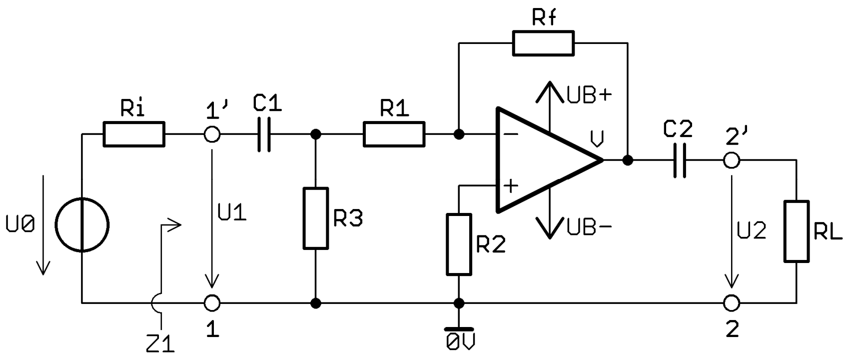
$$Z_2(\text{Schaltung}) = \frac{Z_2(\text{OpAmp})}{g}$$

$$\underline{\underline{Z_{2max}(\text{Schaltung})}} = \frac{r_o{}'}{g_{min}} = \frac{100\ \Omega}{10} = \underline{\underline{10\ \Omega}}$$

[Anm. zu Z_{2max}: Da f_g^* (durch die Wahl der Verstärkung) relativ nahe bei f_T sowie $f_{go} \cong B$ (Signalbandbreite) relativ nahe bei f_g^* liegt, ist der Zahlenwert nicht von besonderer Güte. Zum Vergleich: bei 1 kHz liegt er bei 1 Ω]

3 OpAmp: *u*/*u*-Verstärker **18**

a) 6



R1: $v_{u,prog}$; R2: Ruhestromkompensation (R2 = Rf || R1);
R3: Erniedrigung der Eingangsimpedanz (Z_1 = R1 || R3)

b) – R1: $v_{u,prog}$ 6

$$\underline{|v_{u,prog}|} = 10^{v_{u,prog}(dB)/20} = 10^{12/20} = \underline{4}$$

$$|v_{u,prog}| = \frac{Rf}{R1}$$

$$\underline{R1} = \frac{Rf}{|v_{u,prog}|} = \frac{10\ k\Omega}{4} = \underline{2{,}5\ k\Omega} \rightarrow \underline{\underline{R1_{E24} = 2{,}4\ k\Omega}}$$

– R2: Ruhestromkompensation:

$$\underline{R2} = Rf \parallel R1_{E24} = (10 \parallel 2{,}4)k\Omega = \underline{1{,}94\ k\Omega} \rightarrow$$

$$\underline{\underline{R2_{E24} = 2{,}0\ k\Omega}}$$

– R3: Eingangsimpedanz (mit R2 = 0):

$$Z_1 = R1_{E24} \parallel R3 = 1\ k\Omega \rightarrow \underline{R3 = 1{,}71\ k\Omega} \rightarrow \underline{\underline{R3_{E24} = 1{,}8\ k\Omega}}$$

c) Testsignal: $\hat{U}_0 = 1$ V; $R_i = 600\ \Omega$; $f_{Test} = 1$ kHz 4

$$\underline{f_M} = \sqrt{f_{gu} \cdot f_{go}} = \sqrt{20 \cdot 20 \cdot 10^3}\,Hz = \underline{632\ Hz \cong f_{Test}}$$

damit liegt f_{Test} im „flachen" Bereich der Übertragungsbandbreite

3 OpAmp: *u*/*u*-Verstärker (fortgesetzt)

$$\rightarrow \underline{v_u(f_{Test}) = v_{u,prog}}$$

$$\frac{\hat{U}_2}{\hat{U}_1} = |v_{u,prog}|;\quad \frac{\hat{U}_1}{\hat{U}_0} = \frac{Z_1}{R_i + Z_1}$$

$$\underline{\underline{\hat{U}_2}} = \hat{U}_0 \cdot \frac{Z_1}{R_i + Z_1} \cdot |v_{u,prog}| = 1\ V \cdot \frac{1\ k\Omega}{600\ \Omega + 1\ k\Omega} \cdot 4 = \underline{\underline{2{,}50\ V}}$$

d) Für symmetrische Aussteuerbarkeit ist die *betragsmäßig kleinere* Aussteuergrenze maßgebend: $|U_{amax}^*| = 12$ V; U_{amax} ist als Scheitelwert (Amplitudenwert) zu behandeln. 2

$$\underline{\hat{U}_{1\,max}} = \frac{|U_{amax}^*|}{|v_{u,prog,nom}|} = \frac{12\ V}{4} = \underline{3\ V}$$

$$\underline{\underline{U_{1eff,max}}} = \frac{\hat{U}_{1\,max}}{\sqrt{2}} = \underline{\underline{2{,}12\ V}} \quad \text{(harmon. Signal)}$$

[Anm.: In der Praxis ist zusätzlich zu prüfen, ob die Slew Rate des Op-Amps bei gegebener max. Frequenz hinreichend groß ist]

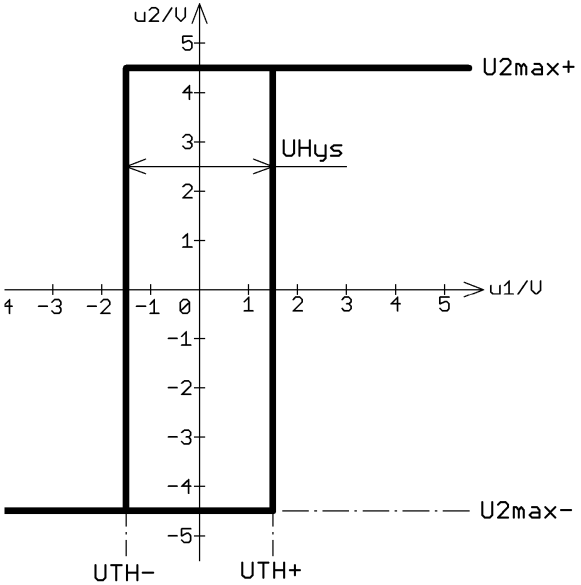
4 OpApp: Schaltungsanalyse 18

a) Nicht-invertierender Schmitt-Trigger (S.T.): 2
$u_2 = U_{2max+}$ wenn $u_1 > U_{TH+}$; $u_2 = U_{2max-}$ wenn $u_1 < U_{TH-}$

b) „Nicht-lineare" Schaltung: Mitkopplung → Pfad zwischen Op-Amp-Ausgang und nicht-invertierendem Eingang (P; „+"). Damit kommen nur die Schaltungen B, D infrage. Der S.T. kippt, wenn seine Differenz-Eingangsspannung u_{Dif} das Vorzeichen wechselt. 4

$u_1 > U_{TH+}$ erzeugt bei Schaltung B $u_{Dif} > 0$ und damit $u_2 = U_{2max+}$; entsprechend $u_1 < U_{TH-} \rightarrow U_{Dif} < 0 \rightarrow u_2 = U_{2max-} \rightarrow$ Schaltg. B

c) 4



$\underline{\underline{U_{2max+} = +4{,}5\text{ V}}}$

$\underline{\underline{U_{2max-} = -4{,}5\text{ V}}}$

$\underline{\underline{U_{TH+} = +1{,}5\text{ V}}}$

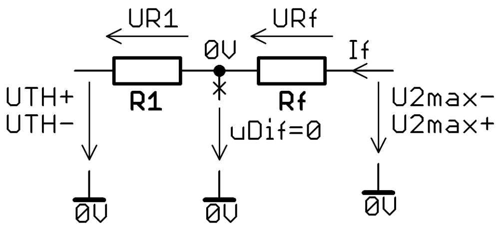
$\underline{\underline{U_{TH-} = -1{,}5\text{ V}}}$

$U_{Hys} =$

$U_{TH+} - U_{TH-}$

$\underline{\underline{U_{Hys} = 3\text{ V}}}$

d) 4



S.T. „kippt", wenn die Differenz-Eingangsspannung u_{Dif} das Vorzeichen wechselt $\leftrightarrow u_1 = U_{TH\pm}$. Man rechnet mit $u_{Dif} = 0$ sowie U_2 unmittelbar *vor* dem „Kippen".

$U_{Rf} = U_{2max}$; $U_{R1} = -U_{TH}$.

4 OpAmp: Schaltungsanalyse (fortgesetzt)

Die gegebene Übertragungskennlinie ist punktsymmetrisch zum Ursprung, sodass man auch mit den Beträgen $|U_{2max}|$ und $|U_{TH}|$ rechnen kann.

$$\frac{Rf}{R1} = \frac{U_{Rf}}{U_{R1}} = \frac{U_{2max-}}{-(U_{TH+})} = \frac{U_{2max+}}{-(U_{TH-})} = \frac{|U_{2max}|}{|U_{TH}|} = \frac{4{,}5\text{ V}}{1{,}5\text{ V}} = 3$$

$$\underline{\underline{Rf}} = 3 \cdot 10\text{ k}\Omega = \underline{\underline{30\text{ k}\Omega}}$$

e) u_1 ändert sich *inner*halb der Hysterese ($U_{TH-} \leq u_1 \leq U_{TH+}$) → es ist nur die Aussage möglich $\underline{\underline{u_2 = U_{2\,max\pm}}}$. 2

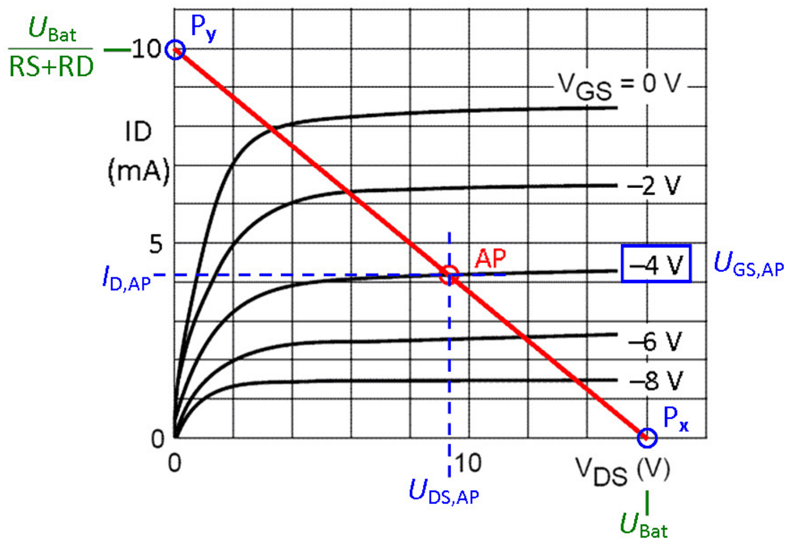
[Anm.: Ob U_{2max+} oder U_{2max-} am Ausgang ansteht, hängt von der „Vorgeschichte" ab, d.h. vom letzten Wert von u_1 *außer*halb der Hysterese]

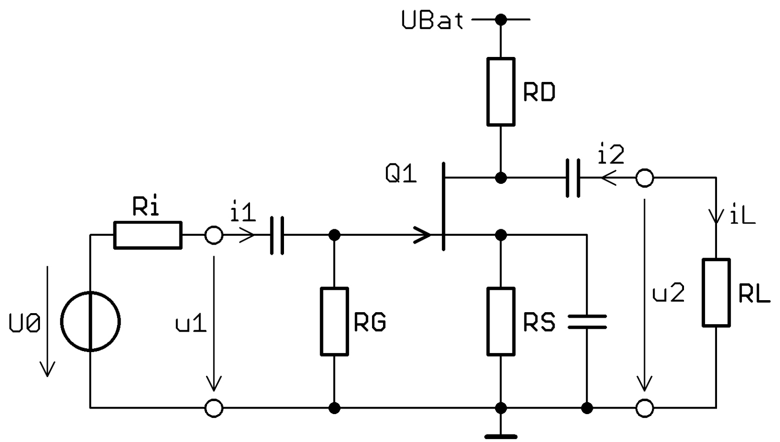
f) Slew-Rate, Anstiegsgeschwindigkeit 2

Formelzeichen: *sr*

Einheit in der Praxis: [*sr*] = V / µs

5 FET: Kleinsignal-Verstärker **20**





a) <u>n-Kanal JFET (Junction-FET / Sperrschicht-FET / pn-FET)</u> 1
(Depletion / Verarmungstyp / selbstleitend: trifft auf alle JFETs zu)

b) $$\underline{\underline{\mathrm{RGmax}}} = \left|\frac{U_{\mathrm{RG,AP}}}{I_{\mathrm{GSS}}}\right| = \left|\frac{10\ \mathrm{mV}}{-8\ \mathrm{nA}}\right| = \underline{\underline{1{,}25\ \mathrm{M\Omega}}}$$ 2

5 FET: Kleinsignal-Verstärker (fortgesetzt 1)

c) Abgel. aus Ausgangskennlinienfeld $U_{\mathrm{DS}} = f(I_{\mathrm{D}})$, Afg-Abb. 5.3: 3

$\mathrm{AP} = (U_{\mathrm{DS,AP}} \mid I_{\mathrm{D,AP}}) = \underline{\underline{(9{,}3\ \mathrm{V} \mid 4{,}2\ \mathrm{mA})}}$;

Parameter: $\underline{\underline{U_{\mathrm{GS,AP}} = -4\ \mathrm{V}}}$

d) Abgel. aus Ausgangskennlinenfeld $U_{\mathrm{DS}} = f(I_{\mathrm{D}})$, Afg-Abb. 5.3: 6

$$\mathrm{P_x} := (U_{\mathrm{Bat}} \mid 0) \rightarrow \underline{U_{\mathrm{Bat}} = 16\ \mathrm{V}};\ (\mathrm{RD}+\mathrm{RS}) = -1/(\Delta I_{\mathrm{D}}/\Delta U_{\mathrm{DS}})$$

$$\mathrm{P_y} := \left(0 \middle| \frac{U_{\mathrm{Bat}}}{\mathrm{RD}+\mathrm{RS}}\right) = (0 \mid 10\ \mathrm{mA}) \rightarrow \underline{\mathrm{RD}+\mathrm{RS}} = \frac{16\ \mathrm{V}}{10\ \mathrm{mA}} = \underline{1{,}6\ \mathrm{k\Omega}}$$

$$\text{Masche}: \ -U_{\mathrm{RG,AP}} + U_{\mathrm{GS,AP}} + U_{\mathrm{RS,AP}} = 0;\ \text{mit } U_{\mathrm{RG,AP}} \cong 0:$$

$$U_{\mathrm{RS,AP}} \cong -U_{\mathrm{GS,AP}} = -(-4\ \mathrm{V}) = 4\ \mathrm{V}$$

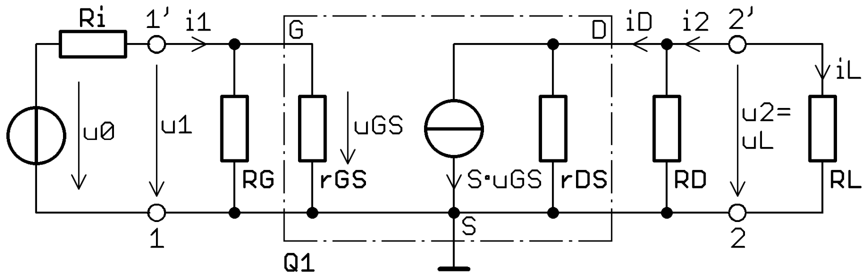
$$\underline{\underline{\mathrm{RS}}} = \frac{U_{\mathrm{RS,AP}}}{I_{\mathrm{D,AP}}} = \frac{4\ \mathrm{V}}{4{,}2\ \mathrm{mA}} = \underline{\underline{950\ \Omega}}$$

$$\underline{\underline{\mathrm{RD}}} = (\mathrm{RD}+\mathrm{RS}) - \mathrm{RS} = (1600 - 950)\Omega = \underline{\underline{650\ \Omega}}$$

$$\text{Probe: } \mathrm{RD} = \frac{U_{\mathrm{Bat}} - U_{\mathrm{DS,AP}} - U_{\mathrm{RS,AP}}}{I_{\mathrm{D,AP}}} = \frac{(16 - 9{,}3 - 4)\mathrm{V}}{4{,}2\ \mathrm{mA}}$$

$$\underline{\underline{\mathrm{RD}}} = \frac{2{,}7\ \mathrm{V}}{4{,}2\ \mathrm{mA}} = \underline{\underline{643\ \Omega}} \quad (\text{Abw.: Ableseungenauigkeit AP})$$

e) 4



– weiter auf dem nächsten Blatt –

5 FET: Kleinsignal-Verstärker (fortgesetzt 2)

f) Mit dem vervollständigten Kleinsignal-Ersatzschaltbild aus e): 4

$\underline{U}_2 = u_2 = -S \cdot u_{GS} \cdot (r_{DS} \parallel \mathrm{RD} \parallel \mathrm{RL})$; $\underline{U}_1 = u_1 = u_{GS}$;

$\rightarrow \underline{\underline{F}(\mathrm{j}\omega)} = \underline{U}_2 / \underline{U}_1 = \underline{-S \cdot (r_{DS} \parallel \mathrm{RD} \parallel \mathrm{RL})}$

Phase: $\underline{\underline{\varphi(\omega)}} = \varphi_{\underline{U}2,\underline{U}1} = \arctan\left(\underline{F}(\mathrm{j}\omega)\right) = \underline{\underline{-180° \mathrel{\widehat{=}} -\pi}}$

Betrag: $\underline{|\underline{F}(\mathrm{j}\omega)| = S \cdot (r_{DS} \parallel \mathrm{RD} \parallel \mathrm{RL})}$

Aus Afg-Tab. 5.1:

$\underline{S_{typ}} = |y_{fS,typ}| = \underline{6{,}5\ \mathrm{mS}}$

$\underline{r_{DS}} = 1/|y_{OS}| = 1/18\ \mu\mathrm{S} = \underline{55{,}6\ \mathrm{k\Omega}}$

$|\underline{F}(\mathrm{j}\omega)| = 6{,}5\ \mathrm{mS} \cdot (55{,}6\ \mathrm{k\Omega} \parallel 650\ \Omega \parallel 47\ \mathrm{k\Omega})$

$|\underline{F}(\mathrm{j}\omega)| \cong 6{,}5\ \mathrm{mS} \cdot \mathrm{RD} = 6{,}5\ \mathrm{mS} \cdot 650\ \Omega$

$\underline{\underline{|\underline{F}(\mathrm{j}\omega)| \cong 4{,}2}}$

$\underline{\underline{|\underline{F}(\mathrm{j}\omega)|\,(\mathrm{dB}) \cong 12{,}5\ \mathrm{dB}}}$