

Klausur DHBW-MaEp EL1 2016-12 Bayer MUSTERLÖSUNG r 1.3.0

DHBW Mannheim-Eppelheim · MA-TMT15AM2
EL1 Angewandte Elektronik 1 · Klausur 2016-12 Bayer

Matrikel-Nr.: _____
Blatt 1 / 10

Anzahl Blätter
inkl. Deckblatt, Anhang **10**



DHBW Mannheim, Außenstelle Eppelheim
MA-TMT15AM2 · EL1 Angewandte Elektronik 1
Klausur 2016-12 Bayer **09. Dezember 2016**

Dozent: Rainer Bayer, Dipl.-Ing. FH Elektronik

Name, Vorname: _____ Matrikel-Nummer: _____ auf jedem Blatt oben eintragen

Studienjahrgang: MA-TMT15AM Gruppe: _____ 2 Semester: _____

Hilfsmittel: Taschenrechner Zeit: 60 min

Bewertung: Punktzahl 100%: _____ Erreichte Punktzahl: _____

Datum / Signum: _____ Ergebnis: _____

Aufg.	Thema	Blatt	a)	b)	c)	d)	Summe	Anm.
1	Halbleiter: Leistungs-Derating, Kühlung	2-3	6	8	4		18	
2	BJT als Schalter (1)	4	2	4	7	7	20	
3	BJT als Schalter (2)	5	2	6	7		15	
4	BJT als Kleinsignal-Verstärker (1)	6-7	8	4	4	2	18	
5	BKT als Kleinsignal-Verstärker (2)	8	7	3			10	
.J.	Anhang: Formeln, E-Reihen IEC 60063	9-10						
Anmerkungen							81	

1 Halbleiter: Leistungs-Derating, Kühlung 18

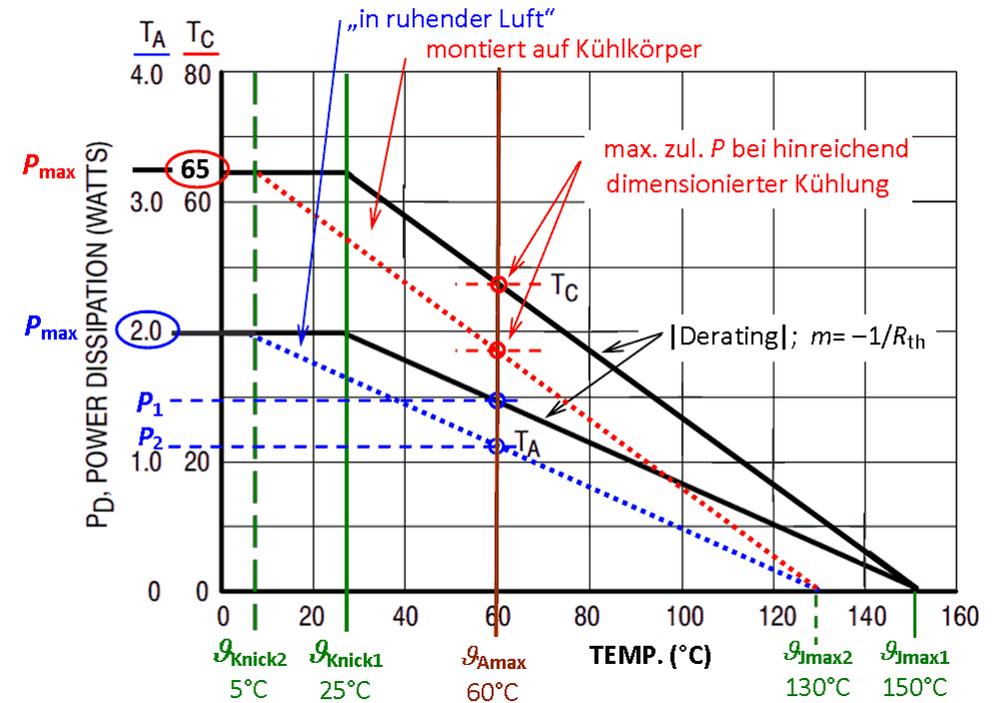


Abb. Lsg-1.1: Derating

Es liegt lineares Leistungs-Derating vor; Kennlinie T_C gilt bei Montage auf einem Kühlkörper; T_A bei Betrieb in ruhender Luft. Maßgebend für die Berechnungen ist die maximale Umgebungstemperatur $\vartheta_{Amax} = 60^\circ\text{C}$

$m \neq 0 \rightarrow$ betragsmäßig Derating in W/K; neg. Kehrwert von R_{th} in K/W;
 $m = 0 \rightarrow P_{max}$; Konstante.

Das Derating / der Wärmewiderstand R_{th} gilt im Bereich $\vartheta_{Knick} \leq \vartheta \leq \vartheta_{Jmax}$ und ist eine Bauteileigenschaft, d.h. eine Konstante.

Wird die zulässige maximale Sperrschichttemp. ϑ_{Jmax} reduziert, ändern sich P_{max} und R_{th} nicht (I). ϑ_{Knick} reduziert sich um den gleichen Betrag; das Temperaturgefälle $\vartheta_{Jmax} - \vartheta_{Knick}$ bleibt damit gleich (im Beispiel 125 K), was über die thermische Grundgleichung die gleiche Aussage wie (I) ist.

Grafisch entspricht dies einer Parallelverschiebung, s. Abb. Lsg-1.1.

1 Halbleiter: Leistungs-Derating, Kühlung (fortgesetzt 1)

a1) Abgelesen aus Abb. 1.1, Kurve T_A : $P_{\max} = 2 \text{ W}$ 6

$$(A) \quad \text{Derating} = \left| \frac{P_{\max} - 0}{\vartheta_{\text{Knick1}} - \vartheta_{\text{Jmax1}}} \right|$$

$$\text{Derating} = \left| \frac{2 \text{ W}}{(25 - 150)^\circ\text{C}} \right| = 16 \text{ mW/K}$$

$$P_1 = P_{\max} - 16 \text{ mW/K} \cdot (\vartheta_{\text{Amax}} - \vartheta_{\text{Knick1}})$$

$$\underline{P_1} = 2 \text{ W} - 16 \text{ mW/K} \cdot (60 - 25)\text{K} = (2 - 0,56)\text{W} = \underline{1,44 \text{ W}}$$

$$(B) \quad R_{\text{thJA}} = \frac{1}{\text{Derating}} = \frac{1}{16 \text{ mW/K}} = 62,5 \text{ K/W}$$

$$\text{oder} \quad R_{\text{thJA}} = \frac{\Delta\vartheta}{\Delta P} = \frac{\vartheta_{\text{J1}} - \vartheta_{\text{Knick1}}}{P_{\max}}$$

$$\underline{R_{\text{thJA}}} = \frac{(150 - 25)\text{K}}{2 \text{ W}} = 62,5 \text{ K/W}$$

$$\text{damit} \quad \underline{P_1} = \frac{\vartheta_{\text{J1}} - \vartheta_{\text{Amax}}}{R_{\text{thJA}}} = \frac{(150 - 60)\text{K}}{62,5 \text{ K/W}} = \underline{1,44 \text{ W}}$$

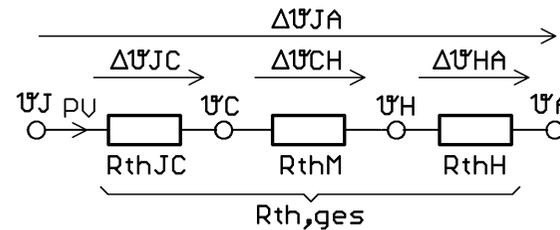
(C) grafisch aus Abb. Lsg-1.1: $\underline{P_1} = 1,44 \text{ W}$ a2) Wie a1), mit $\vartheta_{\text{J2}} = 130^\circ\text{C}$; $\vartheta_{\text{Knick2}} = 5^\circ\text{C}$

$$\text{z.Bsp.} \quad \underline{P_2} = \frac{\vartheta_{\text{J2}} - \vartheta_{\text{Amax}}}{R_{\text{thJA}}} = \frac{(130 - 60)\text{K}}{62,5 \text{ K/W}} = \underline{1,12 \text{ W}}$$

oder grafisch: Parallelverschiebung, s. Abb. Lsg-1.1

1 Halbleiter: Leistungs-Derating, Kühlung (fortgesetzt 2)

b1) 8

Abb. Lsg-1.2:
Vereinfachtes
Thermisches
Ersatz-
schaltbild[$R_{\text{thges}} = R_{\text{thJA}}$, hat aber einen anderen Zahlenwert als a)!]b2) Abgelesen aus Abb. 1.1, Kurve T_C : $P_{\max} = 65 \text{ W}$

$$\text{Derating} = \left| \frac{P_{\max} - 0}{\vartheta_{\text{Knick1}} - \vartheta_{\text{J1}}} \right| = \left| \frac{65 \text{ W}}{(25 - 150)} \right| = 520 \text{ mW/K}$$

$$\underline{R_{\text{thJC}}} = \frac{1}{\text{Derating}} = 1,92 \text{ K/W}$$

$$\text{oder} \quad \underline{R_{\text{thJC}}} = \frac{\vartheta_{\text{J1}} - \vartheta_{\text{Knick1}}}{\Delta P} = \frac{(150 - 25)\text{K}}{65 \text{ W}} = 1,92 \text{ K/W}$$

$$\underline{R_{\text{th,ges}}} = \frac{\vartheta_{\text{J2}} - \vartheta_{\text{Amax}}}{P_3} = \frac{(130 - 60)\text{K}}{23 \text{ W}} = 3,04 \text{ K/W}$$

$$R_{\text{thH}} = R_{\text{th,ges}} - R_{\text{thJC}} - R_{\text{thM}} = (3,04 - 1,92 - 0,37)\text{K/W}$$

$$\underline{R_{\text{thH}}} = 0,75 \text{ K/W}$$

Abgel. aus Abb. 1.2: $\underline{\ell_1} = 230 \text{ mm}$ (Achse beginnt bei 50 mm)

– weiter auf dem nächsten Blatt –

1 Halbleiter: Leistungs-Derating, Kühlung (fortgesetzt 3)

- c) R_{thH} aus Aufg. b) ist nun derjenige Wert, den der Kühlkörper *mit* 4 forciertem Kühlung (Lüfter) haben muss, damit die Länge reduziert werden kann:

$$\underline{R_{thH}(v) := 0,75 \text{ K/W}}$$

$R_{thH}(0)$ ist der Wert bei natürlicher Kühlung, d.h. Kühlkörper ohne Lüfter. Bei $\ell_2 = 100 \text{ mm}$. Abgelesen aus Abb. 1.2:

$$\underline{R_{thH}(0) = 1,25 \text{ K/W}}$$

Faktor für forcierte Kühlung:

$$\underline{a = \frac{R_{thH}(v)}{R_{thH}(0)} = \frac{0,75 \text{ K/W}}{1,25 \text{ K/W}} = 0,60}$$

Damit erhält man für die effektive Strömungsgeschwindigkeit aus Abb. 1.3:

$$\underline{v = 1,1 \text{ m/s}}$$

2 BJT als Schalter (1) 20

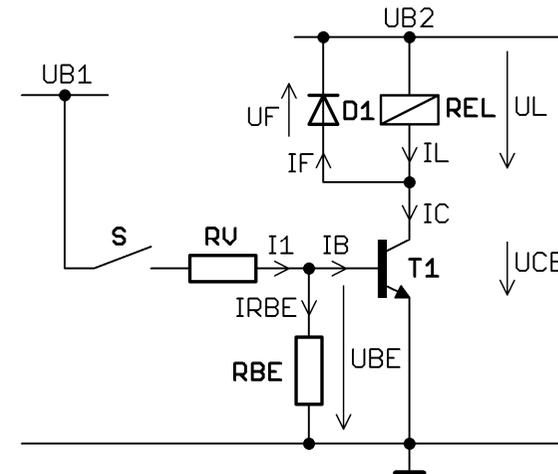


Abb. Lsg-2:
Modifizierte
Schaltung mit
Basisableitwiderstand
RBE und
Freilaufdiode DI

- a) BC817 ($U_{CEO} \ll U_{B2}$); 2
BC818: $U_{CEO} \cong U_{B2}$; „zu knapp“, s. auch Teilaufg. d4)
- b1) Siehe Abb. Lsg-2 4
- b2) Sicheres Sperren von T1 („Aus“) bei offenem Schalter S
- b3) Maßgebend ist $\underline{\vartheta_{amb,max} = +50^\circ\text{C}}$; $I_{CBO} = I_{RBE}$.

Diagramm $I_{CBO} = f(\vartheta_{amb})$ nicht gegeben, in Tab. 2 nur Angaben für $\vartheta_{amb} = +25^\circ\text{C}$ und $+125^\circ\text{C}$. Man wählt somit Worst-Case:

$$\underline{I_{CBOmax}(\vartheta_{amb} = +125^\circ\text{C}) = 5 \mu\text{A}}$$

$$\underline{RBE_{max} = 0,2 \text{ V} / |I_{CBOmax}(125^\circ\text{C})| = 0,2 \text{ V} / 5 \mu\text{A} = 40 \text{ k}\Omega}$$

- c) $\underline{I_{REL,Nenn} = P_{REL,Nenn} / U_{REL,Nenn} = 2,4 \text{ W} / 24 \text{ V} = 100 \text{ mA}}$ 7

$$I_C \cong I_{REL,Nenn} \quad (U_{B2} = U_{REL,Nenn}; U_{CEsat} \text{ vernachlässigt})$$

Aus Tab. 2: B : minimaler Wert für I_C im Bereich 100 mA

$$\rightarrow \underline{B_{min} = 250}$$

$$\underline{I_B^* = I_C / B_{min} = 100 \text{ mA} / 250 = 0,4 \text{ mA}}$$

2 BJT als Schalter (1)

(fortgesetzt)

$$I_B = m \cdot I_B^* = 2,5 \cdot 0,4 \text{ mA} = \underline{1 \text{ mA}}$$

$$I_{RBE} = U_{BEsat} / RBE = 0,7 \text{ V} / 12 \text{ k}\Omega = \underline{0,0583 \text{ mA}}$$

$$I_1 = I_B + I_{RBE} = (1 + 0,0583) \text{ mA} = \underline{1,06 \text{ mA}}$$

$$RV = (U_{B1} - U_{BEsat}) / I_1 = (3,3 - 0,7) \text{ V} / 1,06 \text{ mA} = \underline{2,45 \text{ k}\Omega}$$

$$RV_{E24} = \underline{2,40 \text{ k}\Omega}$$

Näherung mit $I_{RBE} \ll I_B \rightarrow I_1 \cong I_B = 1 \text{ mA}$:

$$RV \cong (U_{B1} - U_{BEsat}) / I_1 = (3,3 - 0,7) \text{ V} / 1 \text{ mA} = \underline{2,6 \text{ k}\Omega}$$

$$RV_{E24} = \underline{2,70 \text{ k}\Omega}$$

d1) REL: Ohmsch-induktive Last \rightarrow Ausschalten ($U_{CE(BR)}$)

d2) Siehe Abb. Lsg-2

d3) $I_{Fmax} = I_C$ im stationären „Ein“-Zustand

$$I_{Fmax} \cong I_{REL, Nenn} = \underline{100 \text{ mA}}$$

$$U_{Rmax} = U_{CE} \text{ im stationären „Aus“-Zustand} = U_{B2} = \underline{24 \text{ V}}$$

d4) Im Ausschaltmoment von T1 wird die Freilaufdiode D1 leitend („Ein“); bei Kleinleistungsdioden erreicht U_{Fmax} im stationären Zustand Werte von ca. 1 V bei I_F um 100 mA:

$$u_{CEoff, max} = U_{B2} + U_{Fmax} \cong (24 + 1) \text{ V} = \underline{25 \text{ V}}$$

Zu berücksichtigen ist ggf. die Spannungsüberhöhung u_{fr} (Forward Recovery Voltage) von D1 im Einschaltmoment (anstelle U_F); bei Kleinleistungsdioden erreicht sie Werte von ca. 2,5 V:

$$u_{CEoff, max} \cong \underline{26,5 \text{ V}}$$

Hinzu kommt die Abweichung von U_{B2} vom Nennwert nach oben (z.B. +10%); in der Praxis rechnet man hier mit aufgerundet

$$\underline{u_{CEoff, max} = 30 \text{ V}}$$

7

3 BJT als Schalter (2)

15

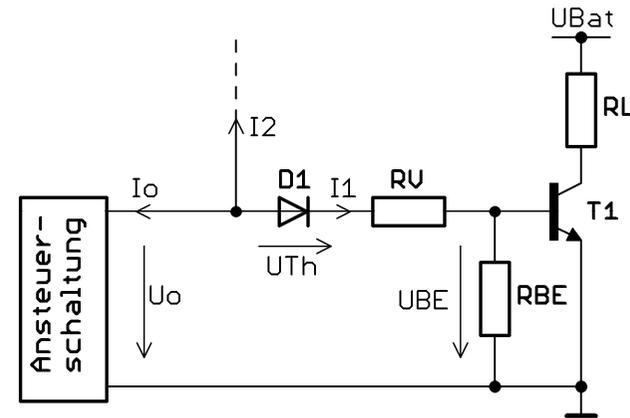


Abb. Lsg-3: Modifizierte Schaltung mit Diode D1 (U_{OLmax}) und Basisableitwiderstand RBE

a)

Pegel		U_O	I_O	I_1	I_2
L; Low	Senke	$U_{OL(max)}$	+	-	-
H; High	Quelle	$U_{OH(min)}$	-	+	+

2

$$\rightarrow \underline{I_{2L} = -1,0 \text{ mA}; I_{2H} = +0,5 \text{ mA}}$$

b1) U_O niedrig ($\rightarrow 0 \text{ V}$): $\underline{U_O = U_{OL} \hat{=} L(ow)}$ 6

b2) Knoten: $-I_O - I_1 - I_2 = 0 \rightarrow \underline{I_O = -(I_1 + I_2)}$

$$I_1 = 0; I_2 = -1,0 \text{ mA} \rightarrow \underline{I_{OL} = -(-1,0) \text{ mA} = +1,0 \text{ mA}}$$

aus Diagramm Abb. 3.1 links abgelesen: $\underline{U_{OLmax} = 0,40 \text{ V}}$

b3) Si-Trans.: $0,2 \text{ V} < U_{OLmax} < (0,2 \text{ V} + U_{Th, Diode})$; $U_{Th, Diode} = 0,5 \text{ V} \rightarrow$ eine Diode (D1) erforderlich; RBE vorhanden: Abb. Lsg-3

c1) U_O hoch ($\rightarrow 5 \text{ V}$): $\underline{U_O = U_{OH} \hat{=} H(igh)}$ 7

c2) $\underline{I_{OH} = -(+0,5 + 0,5) \text{ mA} = -1,0 \text{ mA}}$

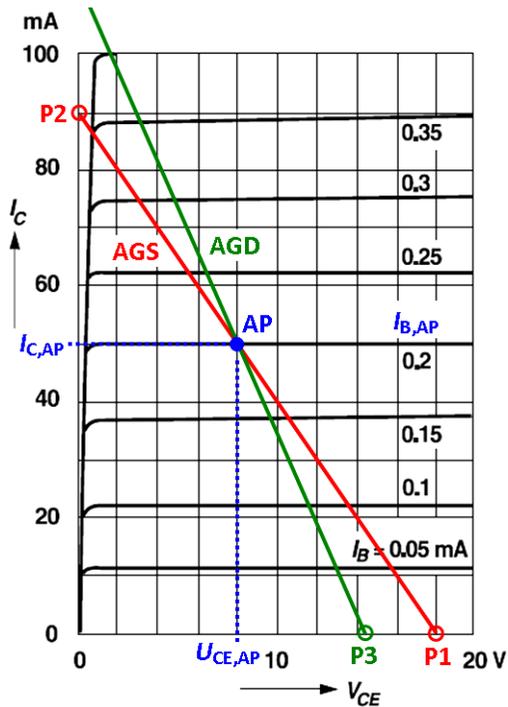
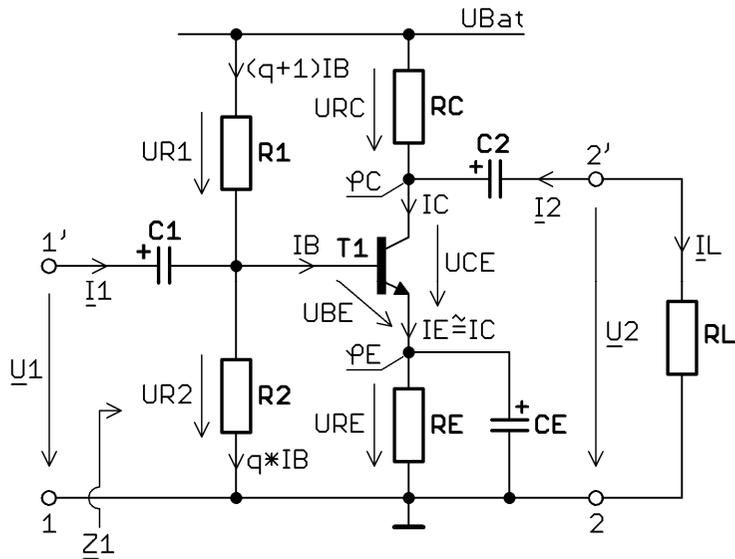
aus Diagramm Abb. 3.1 rechts abgelesen: $\underline{U_{OHmin} = 4,00 \text{ V}}$

c3) $RV = (U_{OHmin} - U_{BEsat} - U_{Th}) / I_1 = (4 - 0,7 - 0,5) \text{ V} / 0,5 \text{ mA}$

$$\underline{RV = 5,6 \text{ k}\Omega; RV_{E24} = 5,60 \text{ k}\Omega}$$

4 BJT als Kleinsignalverstärker (1)

18



oben: Abb. Lsg-4.1
Schaltung mit gepfeilten
Spannungen und Strömen;
C1 gepolt nach Aufg. d)

links: Abb. Lsg-4.2
Ausgangskennlinienfeld mit
Arbeitspunkt AP,
Arbeitsgerade statisch (AGS)
und dynamisch (AGD)

4 BJT als Kleinsignalverstärker (1)

(fortgesetzt 1)

a1) Emitterschaltung: Emittor liegt wechselstrommäßig für Ein- und Ausgangstor der Verstärkerschaltung (des Vierpols) auf gleichem Potenzial. [Ausführung hier: Emitterschaltung mit abschließlicher Gleichstrom-Gegenkopplung.]

a2) Gerade bestimmt durch $\underline{AP} = (8 \text{ V} \mid 50 \text{ mA})$ und $\underline{P1} = (U_{\text{Bat}} \mid 0) = (18 \text{ V} \mid 0)$; s. Abb. Lsg-4.1

a3) Gleichstromwiderstand $\underline{R_G} = \underline{RC} + \underline{RE} = -1 / m_{\text{AGS}}$

- abgelesen: Schnittpunkt $\underline{P2} = (0 \mid I_{\text{Cmax}}) = (0 \mid 90 \text{ mA})$

→ $\underline{R_G} = \underline{RC} + \underline{RE} = U_{\text{Bat}} / I_{\text{Cmax}} = \underline{200 \Omega}$

- I_{Cmax} kann über Geradengleichung auch berechnet werden:

$$\underline{I_{\text{Cmax}}} = \frac{U_{\text{CE,AP}} \cdot I_{\text{C,AP}}}{U_{\text{Bat}} - U_{\text{CE,AP}}} + I_{\text{C,AP}} = \frac{8 \text{ V} \cdot 50 \text{ mA}}{(18 - 8) \text{ V}} + 50 \text{ mA} = \underline{90 \text{ mA}}$$

$$\underline{U_{\text{RE,AP}}} = 0,15 \cdot U_{\text{Bat}} = \underline{2,7 \text{ V}}$$

$$\underline{RE} = U_{\text{RE,AP}} / I_{\text{C,AP}} = 2,7 \text{ V} / 50 \text{ mA} = \underline{54 \Omega}$$

$$\underline{RC} = U_{\text{RC,AP}} / I_{\text{C,AP}} = (U_{\text{Bat}} - U_{\text{CE,AP}} - U_{\text{RE,AP}}) / I_{\text{C,AP}} = (18 - 8 - 2,7) \text{ V} / 50 \text{ mA} = 7,3 \text{ V} / 50 \text{ mA} = \underline{146 \Omega}$$

oder einfacher: $\underline{RC} = R_G - RE = (200 - 54) \Omega = \underline{146 \Omega}$

b1) Abgelesen aus Ausgangskennlinie im AP: $\underline{I_{\text{B,AP}}} = \underline{0,2 \text{ mA}}$. 4

b2) $\underline{R2} = U_{\text{R2,AP}} / (m \cdot I_{\text{B,AP}}) = (U_{\text{BE,AP}} + U_{\text{RE,AP}}) / (m \cdot I_{\text{B,AP}})$

$$\underline{R2} = (0,7 + 2,7) \text{ V} / (5 \cdot 0,2) \text{ mA} = 3,4 \text{ V} / 1 \text{ mA} = \underline{3,4 \text{ k}\Omega}$$

$$\underline{R1} = (U_{\text{Bat}} - U_{\text{R2,AP}}) / [(m + 1) \cdot I_{\text{B,AP}}]$$

$$\underline{R1} = (18 - 3,4) \text{ V} / (6 \cdot 0,2 \text{ mA}) = 14,6 \text{ V} / 1,2 \text{ mA} = \underline{12,2 \text{ k}\Omega}$$

4 BJT als Kleinsignalverstärker (1) (fortgesetzt 2)

- c) Dynamischer Widerstand $R_D = RC \parallel RL = -1 / m_{AGD}$ 4
 $R_D = RC \parallel RL = 146 \Omega \parallel 1 \text{ k}\Omega = \underline{127 \Omega}$, s. Abb. Lsg-4.2

AGD geht hervor aus einer Drehung von AGS im AP ($\{U_{Bat}; RC; RE\}$ ändern sich nicht) im mathematisch negativen Sinn ($R_D < R_G \rightarrow |m_{AGD}| > |m_{AGS}|$). AGD ist damit eindeutig bestimmt.

Zum leichteren Einzeichnen empfiehlt sich ein weiterer Punkt, sinnvollerweise auf der U_{CE} -Achse (P3):

$$U_{CE}(I_C = 0) = I_{C,AP} \cdot R_D + U_{CE,AP} \rightarrow \underline{P3 = (14,4 \text{ V} \mid 0)}$$

- d) Siehe Abb. Lsg-4.1. Ohne Ansteuerung ist $u_1 \cong U_{Bat} / 2$ und T1 im AP (DC-Betrachtung) 2

C1 linke Platte: $\varphi_1 = \bar{u}_1 = U_{Bat} / 2 = 9 \text{ V}$;

rechte Platte: $\varphi_B = U_{BE,AP} + U_{RE,AP} = (0,7 + 2,4) \text{ V} = 3,4 \text{ V}$

$\varphi_1 > \varphi_B \rightarrow$ Pluspol linke Platte

C2: $\varphi_C > 0$ (RL gegen Masse) \rightarrow Pluspol linke Platte

CE: $\varphi_E > 0$ (CE gegen Masse) \rightarrow Pluspol obere Platte

5 BJT als Kleinsignalverstärker (2) 10

- a1) $r_{BE} \cong U_T / I_{B,AP}$. Raumtemperatur: $U_T = 26 \text{ mV} \rightarrow$ 7
 $r_{BE} \cong 26 \text{ mV} / 180 \mu\text{A} = \underline{144 \Omega}$

- a2) Ansatz über Verhältnis u_2 / u_1 :

$$i_B = u_1 / r_{BE} \rightarrow u_1 = i_B \cdot r_{BE} \quad (1)$$

$$u_2 = -i_C \cdot RC \parallel RL = -\beta \cdot i_B \cdot (RC \parallel RL) \quad (2)$$

$$(1) \text{ in } (2): v_u = -\beta \cdot \frac{RC \parallel RL}{r_{BE}} \quad (3)$$

$$|F_u(j\omega)| = |v_u| = \beta \cdot \frac{RC \parallel RL}{r_{BE}} = 275 \cdot \frac{(0,15 \parallel 1) \text{ k}\Omega}{0,144 \text{ k}\Omega}$$

$$|F_u(j\omega)| = 275 \cdot 0,906 = \underline{249}$$

$$\varphi(\omega) = -180^\circ \hat{=} -\pi \quad [\text{aus Minuszeichen in Gl. 3}]$$

(gilt innerhalb der Übertragungsbandbreite im hinreichenden Abstand zu den Grenzfrequenzen)

Ansatz über angenommene Spannung $u_1 = 1 \text{ V}$:

$$i_B = u_1 / r_{BE} = 1 \text{ V} / 144 \Omega = \underline{6,94 \text{ mA}}$$

$$u_2 = -275 \cdot (0,15 \parallel 1) \text{ k}\Omega = \underline{-249 \text{ V}} \quad \text{mit (2); theor. Rechenwert}$$

$$\frac{v_u}{u_1} = \frac{u_2}{u_1} = -\frac{249 \text{ V}}{1 \text{ V}} = \underline{-249}$$

daraus $|F(j\omega)| = |v_u|$ und $\varphi(\omega)$ wie oben

- b) $|F_u(j\omega)| \text{ (dB)} = 20 \cdot \lg |F_u(j\omega)| \text{ dB} = 20 \cdot \lg(249) \text{ dB}$ 3

$$\underline{\underline{|F_u(j\omega)| \text{ (dB)} = 20 \cdot 2,40 \text{ dB} = \underline{47,9 \text{ dB}}}}$$