TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Der Bipolar-Transistor und die Emitterschaltung

Gruppe B412

Patrick Christ und Daniel Biedermann

16.10.2009

1. INHALTSVERZEICHNIS

2. AUFGABE 1

Heute hat Jojo Praktikum, heute lernt er den Transistor kennen. Um die Größen r_{BE} und C_{BE}, r_{CE} und C_{CE} und r_{BC} und C_{BC} aus dem Kleinsignal-Ersatzschaltbild mit parasitären Elementen nach Abbildung 15(a)zu bestimmen, nimmt er ein Multimeter, schließt es nacheinander zwischen den Klemmen BE, BC und CE an, misst Widerstand und Kapazität und trägt die Ergebnisse in eine Tabelle ein. Was halten sie von Jojos Vorgehen?

Die Methode von Jojo klingt im Prinzip nicht schlecht. Er lässt allerdings einige wichtige Punkte außer acht:

i) Um nützliche Werte für die gesuchten Größen zu erhalten muss zunächst sichergestellt sein, dass der Transistor sich am Arbeitspunkt befindet.

ii) Ist dies geschehen, muss man zudem noch die Widerstände und die Kapazitäten aus der Schaltung entfernen bevor man ihren Wert misst. Ansonsten würde ein falscher Wert im Multimeter angezeigt.

Werden diese zwei Punkt eingehalten steht der Messung von Jojo nichts mehr im Weg.

3. AUFGABE 2

Ermitteln Sie die Kleinsignalgrößen S, r_{BE} und r_{CE} für den vorliegenden Transistor. Bestimmen Sie die differentiellen Widerstände r_{BE} und r_{CE} durch geeignete Tangenten an gemessenen Kennlinien.

(a) *Stellen Sie den Arbeitswiderstand der Emitterschaltung nach Abbildung 18(a) mit $R_C = 10k\Omega$ ein. Nehmen Sie dazu für das Eingangssignal eine Frequenz von $5{,}5\ kHz$. Maximieren sie die Amplitude der Ausgangsspannung u_a, indem Sie am Potentiometer R_{21} drehen. Wie groß ist der Widerstand R_{21} im Arbeitspunkt? Messen Sie R_{21}, während er noch in der Emitterschaltung nach 18(a) eingebaut ist, und außerhalb der Schaltung. Geben Sie für R_{21} den sinnvolleren Wert an. Überlegen Sie, wie Sie den Widerstand R_C bestimmen können.*

Dieser Teil der Aufgabe zwei wurde zusammen in der Gruppe bearbeitet. Die Ergebnisse waren:

1. Der Arbeitspunkt der Schaltung liegt bei ca. $U_{BE} = 595\ mV$

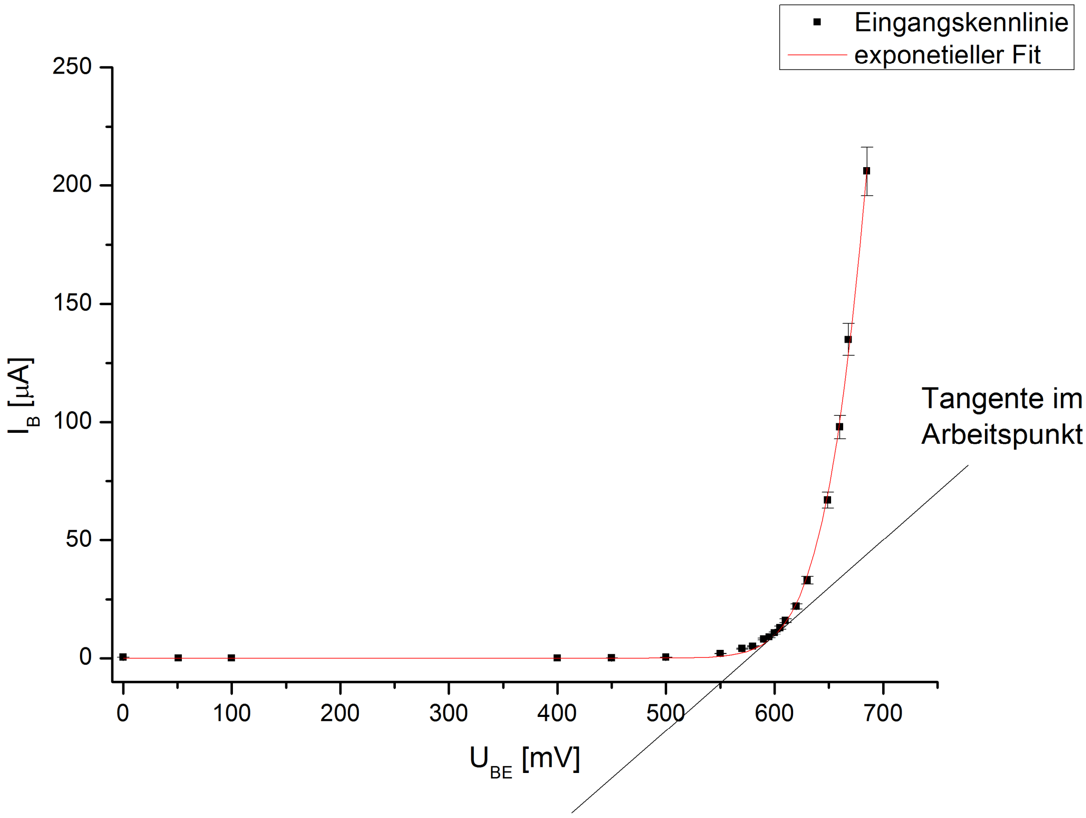
2. Der Widerstand kann nicht in der Schaltung gemessen werden, da durch die Last welche am Widerstand abfällt der Wert stark verfälscht wird.
3. Als Wert für R_{21} hat sich 7,02 $k\Omega$ ergeben.
4. R_C kann bestimmt werden, indem man den Widerstand aus der Schaltung entfernt und ihn anschließend mit einem Multimeter misst.

(b) *Messen Sie U_{BE}, U_{CE} und I_C für $R_C = 1\ k\Omega$, $R_C = 5\ k\Omega$, $R_C = 10\ k\Omega$. Die U_{BE} sollten sich kaum voneinander unterscheiden. Berechnen Sie gegebenenfalls ein mittleres U_{BE}. Fassen Sie die Ergebnisse in einer Tabelle zusammen.*

$R_C\ [k\Omega]$	1	5	10
$I_C\ [\mu A]$	697	695	696
$U_{BE}\ [mV]$	595	595	595
$U_{CE}\ [V]$	7,58	4,89	1,57

(c) *Bestimmung vonr_{BE}: Nehmen Sie für den Transistor eine Eingangskennlinie, insbesondere in der Nähe des Arbeitspunktes von des Arbeitspunktes von U_{BE} auf: $I_B = f(U_{BE})|_{U_{CE}}$. Benutzen Sie dazu die Schaltung nach Abbildung 17(a). Wählen Sie Werte in der Nähe des Arbeitspunktes von U_{BE} so, daß sie eine Tangente einzeichnen können. Stellen Sie als Parameter den Wert von U_{CE} ein, den Sie in Teilaufgabe 2b für $R_C = 5\ k\Omega$ bestimmt haben.*

U_{BE} in mV	I_B in µA
0	0
51	0
100	0
400	0
450	0,1
500	0,4
550	1,9
570	4
580	5
590	8
595	9
600	10,7
605	13
610	16
620	22
630	33
649	67
660	98
668	135
685	206



GRAPH 1: EINGANGSKENNLINIE MIT TANGENTE AM ARBEITPUNKT

Die Steigung der Tangente ergibt sich aus der Ableitung des exponentiellen Fit am Arbeitspunkt (595 mV).

Aus dem Diagramm kann man nun r_{BE} ablesen, da sein Inverses genau der Tangentensteigung im Arbeitspunkt ist. Dieser Zusammenhang folgt aus dem Skript mit Formel:

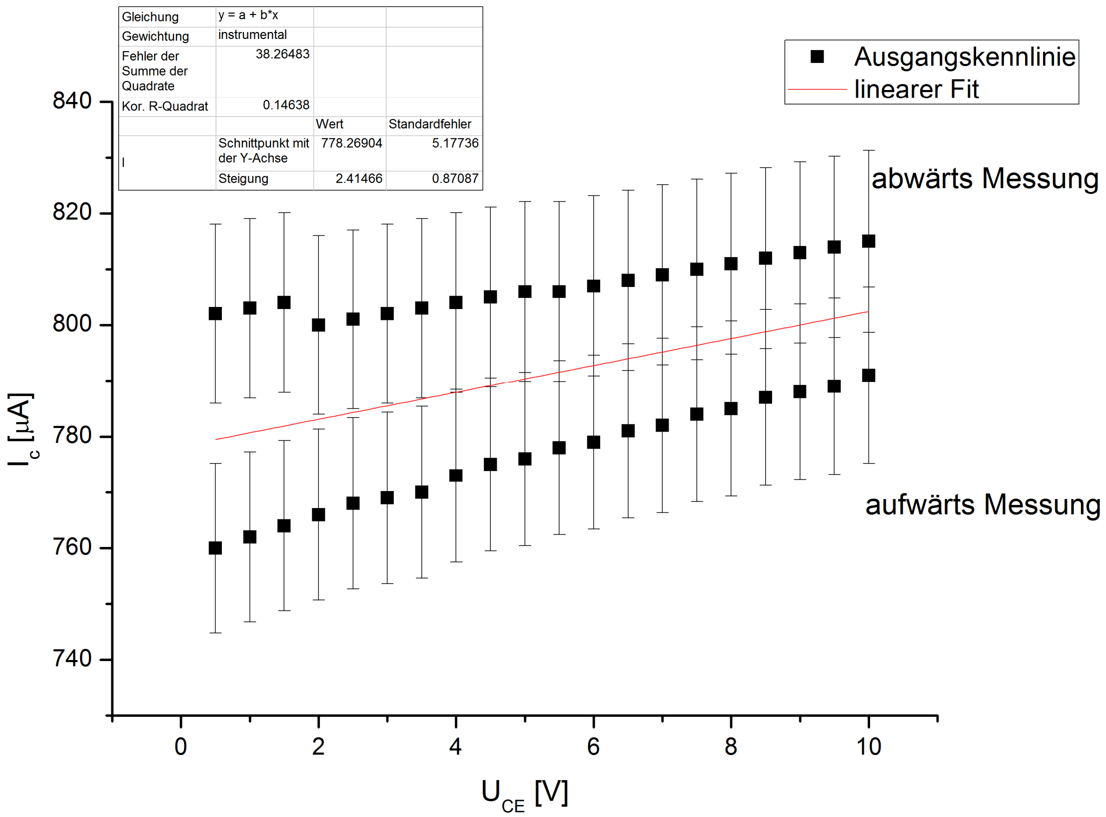
$$\frac{1}{r_{BE}} = \frac{\partial I_B}{\partial U_{BE}}\Big|_{U_{CE}} \quad (1)$$

Dadurch ergibt sich für $r_{BE} = 3{,}70\ k\Omega$

Aufwärtsmessung		**Abwärtsmessung**	
$\boldsymbol{U_{CE}}$ **in V**	I_C in μA	U_{CE} in V	I_C in μA
0	175	0	628
0,5	760	0,5	802
1	762	1	803
1,5	764	1,5	804
2	766	2	800
2,5	768	2,5	801
3	769	3	802
3,5	770	3,5	803
4	773	4	804
4,5	775	4,5	805
5	776	5	806

5,5	778	5,5	806
6	779	6	807
6,5	781	6,5	808
7	782	7	809
7,5	784	7,5	810
8	785	8	811
8,5	787	8,5	812
9	788	9	813
9,5	789	9,5	814
10	791	10	815

(d) *Bestimmung von r_{CE}: Nehmen Sie für den Transistor eine Ausgangskennlinie, insbesondere in der Nähe des Arbeitspunktes von U_{CE} aus Teilaufgabe 2b, auf: $I_B = f(U_{CE})|_{U_{BE}}$. Benutzen Sie dazu die Schaltung nach Abbildung 17(b). Wählen Sie Werte in der Nähe des Arbeitspunktes von U_{CE} so, daß sie eine Tangente einzeichnen können. Variieren Sie den Widerstand des Potentiometers R_{21} und die Ausgangsspannung des Netzgerätes, um U_{CE} zu verändern. Stellen Sie für U_{BE} den (mittleren) Wert aus Teilaufgabe 2b ein, und Halten Sie ihn konstant.*



GRAPH 2: AUSGANGSKENNLINIE MIT LINEAREN FIT

Auch hier kann man nun der Widerstand ablesen, da sein Inverses der Steigung der Tangente im Arbeitspunkt entspricht.

$$\frac{1}{r_{CE}} = \frac{\partial I_C}{\partial U_{CE}}|_{U_{BE}} \tag{2}$$

Dadurch ergibt sich für $r_{CE} = 414\ k\Omega$

(e) *Berechnen sie die Steilheit aus der Beziehung $S = \frac{qI_C}{kT}$ für $R_C = 1\ k\Omega$, $R_C = 5\ k\Omega$ und $R_C = 10\ k\Omega$. Geben sie für Frage 2 aus Abschnitt 5*

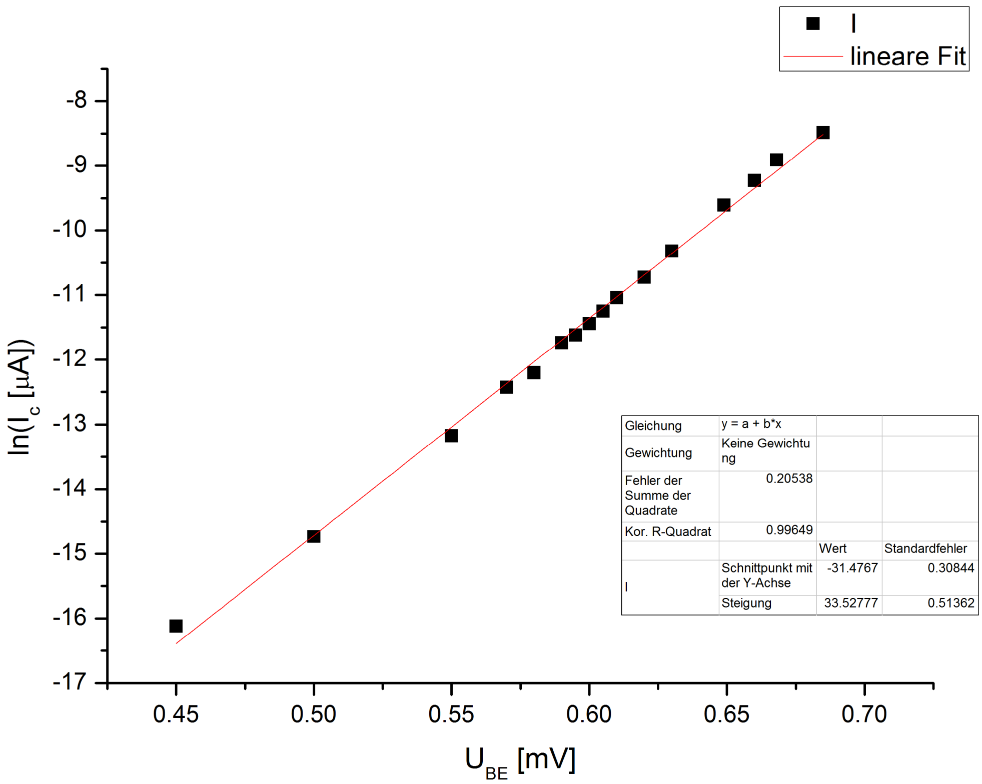
i. Eine allgemeine Antwort

ii. Eine Antwort unter Berücksichtigung der von ihnen gemessenen Werte

Der exponentielle Zusammenhang zwischen I_B und der Spannung U_{BE} aus der Formel:

$$I_B = qAn_i^2\left(\frac{D_E}{L_E N_E} + \frac{D_B W}{2L_B^2 N_B}\right)\cdot\left(\exp\left(\frac{qU_{BE}}{k\cdot T}\right) - 1\right) + qAn_i^2\left(\frac{D_C}{L_C N_C} + \frac{D_B W}{2L_B^2 N_B}\right)\cdot\left(\exp\left(\frac{qU_{CB}}{k\cdot T}\right) - 1\right); U_{CB} \approx 0 \tag{3}$$

Trägt man nun also die Eingangskennlinie ($I_B = f(U_{BE})|_{U_{CE}}$) halblogarithmisch auf und lässt sich eine Ausgleichsgerade plotten. So kann man die Steigung a der Ausgleichgeraden gleich $\frac{q}{k\cdot T}$ setzten und somit T errechnen.



GRAPH 3: LOGARITHMISCHE AUFTRAGUNG DES STROMS GGÜ. DER SPANNUNG ZUR BESTIMMUNG VON T

$$T = \frac{q}{a\cdot k_B} = 346{,}2\ k; a = 33{,}52 \tag{4}$$

Daraus folgt für die Steilheit in allen drei Fällen:

$$S = 23{,}3\ \frac{1}{k\Omega}$$

Frage 2

Es können y-Parameter in h-Parameter und h-Parameter in y-Parameter umgerechnet werden. Es ist $h_{11} = \frac{1}{y_{11}}$, $h_{12} = -\frac{y_{12}}{y_{11}}$, $h_{21} = \frac{y_{21}}{y_{11}}$ und $h_{22} = \frac{y_{11} \cdot y_{22} - y_{21} \cdot y_{12}}{y_{11}}$, umgekehrt $y_{11} = \frac{1}{h_{11}}$, $y_{12} = -\frac{h_{12}}{h_{11}}$, $y_{21} = \frac{h_{21}}{h_{11}}$ und $y_{22} = \frac{h_{11} \cdot h_{22} - h_{21} \cdot h_{12}}{h_{11}}$. Überführen Sie Gleichung (18) in eine h-Parameter Darstellung. Vernachlässigen Sie in einem Zweiten Schritt S_r und vergleichen Sie das Ergebnis mit Abbildung 7(b). Welche Beziehung besteht zwischen der Steilheit S und der differentiellen Stromverstärkung β.

Gleichung (18) lautet:

$$\begin{pmatrix} i_b \\ i_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{r_{BE}} & S_r \\ S & \frac{1}{r_{CE}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{BE} \\ u_{CE} \end{pmatrix} \tag{5}$$

Dieses System kann man schreiben als:

$$\begin{pmatrix} i_b \\ i_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{BE} \\ u_{CE} \end{pmatrix} \tag{6}$$

Wendet man nun die Beziehungen aus der Angabe an so folgt:

$$\begin{pmatrix} u_{BE} \\ i_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_b \\ u_{CE} \end{pmatrix} \tag{7}$$

mit

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{BE} & -S_r \cdot r_{BE} \\ S \cdot r_{BE} & \frac{1}{r_{CE}} - S_r \cdot S \cdot r_{CE} \end{pmatrix} \tag{8}$$

Setzt man nun S_r gleich null und multipliziert die Gleichung (7) aus ergibt sich:

$$u_{BE} = r_{BE} \cdot i_b \tag{9}$$

$$i_c = S \cdot r_{BE} \cdot i_b + \frac{u_{CE}}{r_{CE}} \tag{10}$$

Aus Abbildung 7(b) ergeben sich folgende Formeln:

$$u_{BE} = h_{BE} \cdot i_b \tag{11}$$

$$i_c = h_{fe} \cdot i_b + h_{CE} \cdot u_{CE} \tag{12}$$

Daraus ergibt sich:

$$h_{BE} = r_{BE} = \frac{u_{BE}}{i_b} = h_{11} \tag{13}$$

$$h_{fe} = S \cdot r_{BE} = h_{21} \tag{14}$$

$$h_{CE} = \frac{1}{r_{CE}} = h_{22}\ (mit\ S_r = 0) \tag{15}$$

Der Zusammenhang mit der differentiellen Stromverstärkung β ergibt sich aus der Formel:

$$S \cdot (u_e - u_{RE}) = S \cdot u_{BE} = \beta \cdot i_b \quad (16)$$

Daraus folgt für β:

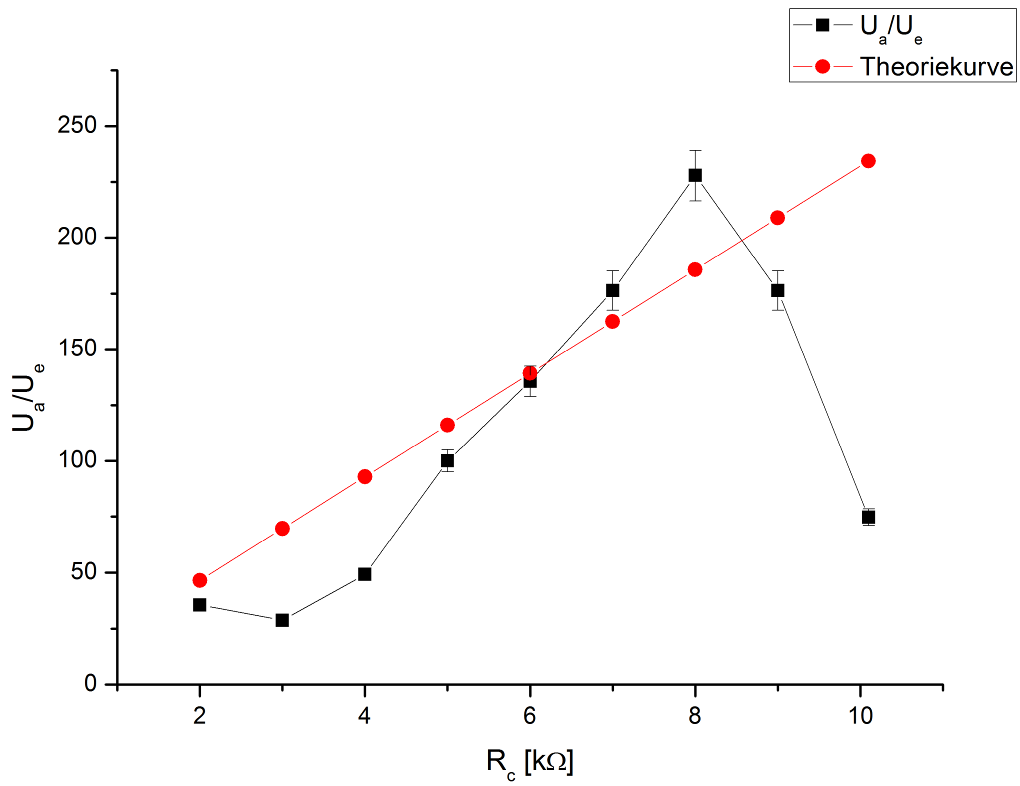
$$\beta = S \cdot r_{BE} \quad (17)$$

➔ $\beta = 86{,}2$

4. AUFGABE 3

Bestimmen Sie die Verstärkung der Emitterschaltung unter verschiedenen Bedingungen. Schließen Sie als Eingangsspannung u_e den Frequenzgenerator an. Stellen Sie eine Frequenz von 5,5 kHz ein. Messen Sie mit dem Oszilloskop die Amplitude des Eingangssignals $\hat{u}_e$ und die Amplitude des Ausgangssignals $\hat{u}_a$. Variieren Sie R_C von $1\ k\Omega$ bis zu $10\ k\Omega$. Tragen Sie das Verhältnis von Eingangs- zu Ausgangsamplitude $\frac{\hat{u}_a}{\hat{u}_e}$ als Funktion von R_C graphisch auf.

a) Graph mit Schaltung nach Abbildung 18 (a)

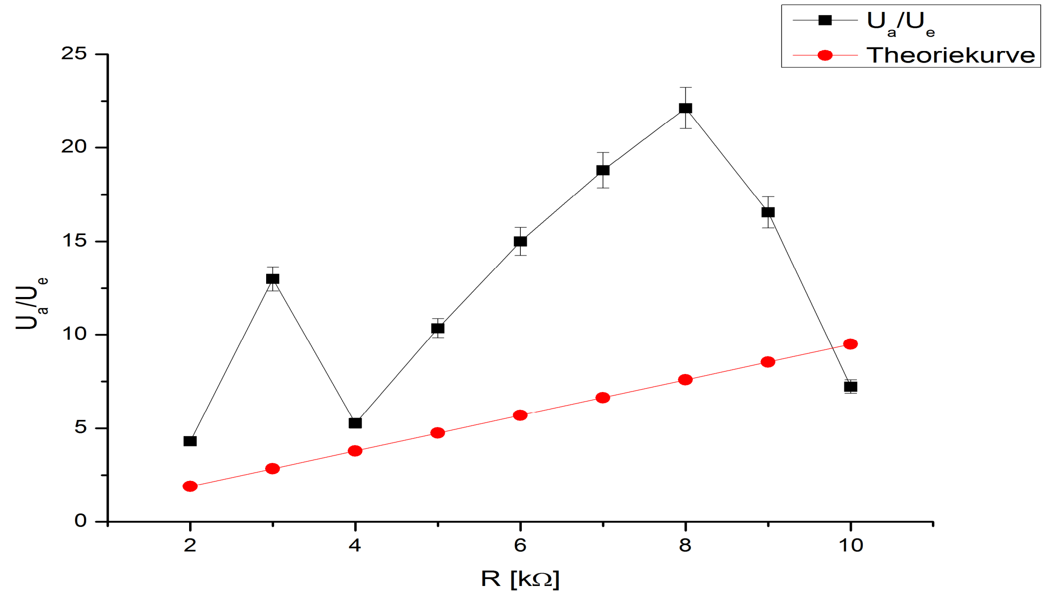


GRAPH 4: EXPERIMENTELLE UND THEORETISCHE WERTE MIT MESSAUFBAU 18A

Für die Berechnung der theoretischen Werte wurde folgende Formel benutzt:

$$A = \frac{dU_a}{dU_e} = S \frac{1}{\left(\frac{1}{R_C} + \frac{1}{r_{CE}}\right)} \quad (18)$$

b) Graph mit Schaltung nach Abbildung 18 (b), ohne C_E

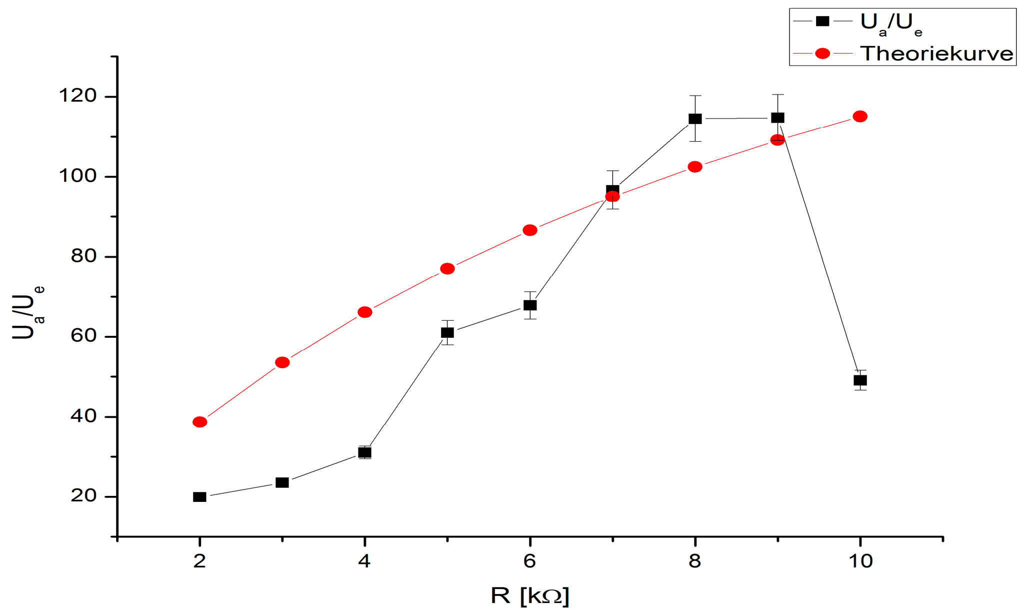


GRAPH 5: EXPERIMENTELLE UND THEORETISCHE WERTE MIT MESSAUFBAU 18B

Für die Berechnung der theoretischen Werte wurde folgende Formel benutzt:

$$A = \frac{dU_a}{dU_e} = \frac{\beta R_C}{r_{BE} + (1+\beta) R_E} \tag{19}$$

c) Graph mit Schaltung nach Abbildung 19, mit C_E und mit R_L



GRAPH 6: EXPERIMENTELLE UND THEORETISCHE WERTE MIT MESSAUFBAU 19

Für die Berechnung der theoretischen Werte wurde folgende Formel benutzt:

$$A = \frac{dU_a}{dU_e} = S \frac{1}{\left(\frac{1}{R_C} + \frac{1}{r_{CE}} + \frac{1}{R_L}\right)} \tag{20}$$

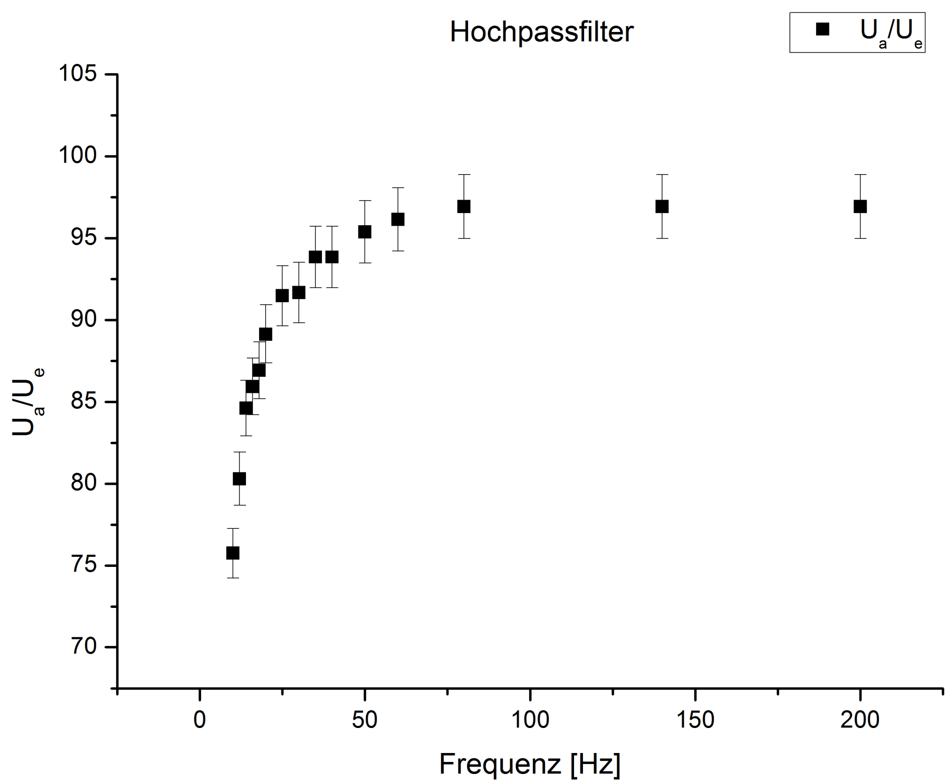
Im ersten Aufbau wird eine sehr große Verstärkung erzielt. Beim zweiten Aufbau ist die Verstärkung sehr gering, sie ist ca. gleich $\frac{R_C}{1\,k\Omega}$. Beim dritten Aufbau wird wieder eine deutliche Verstärkung erzielt, jedoch ist sie geringer wie ohne R_L. Außerdem scheint der Graph bei höherem R_C nicht mehr linear anzusteigen, sondern abzuflachen.

Leider unterscheiden sich unsere Ergebnisse stark von der Theoriekurve. Höchstwahrscheinlich war ein systematischer Fehler, durch defekte Kabelverbindungen Ursache für die großen Schwankungen. Während des Versuches wurden einige defekte Kabel ersetzt.

5. AUFGABE 4

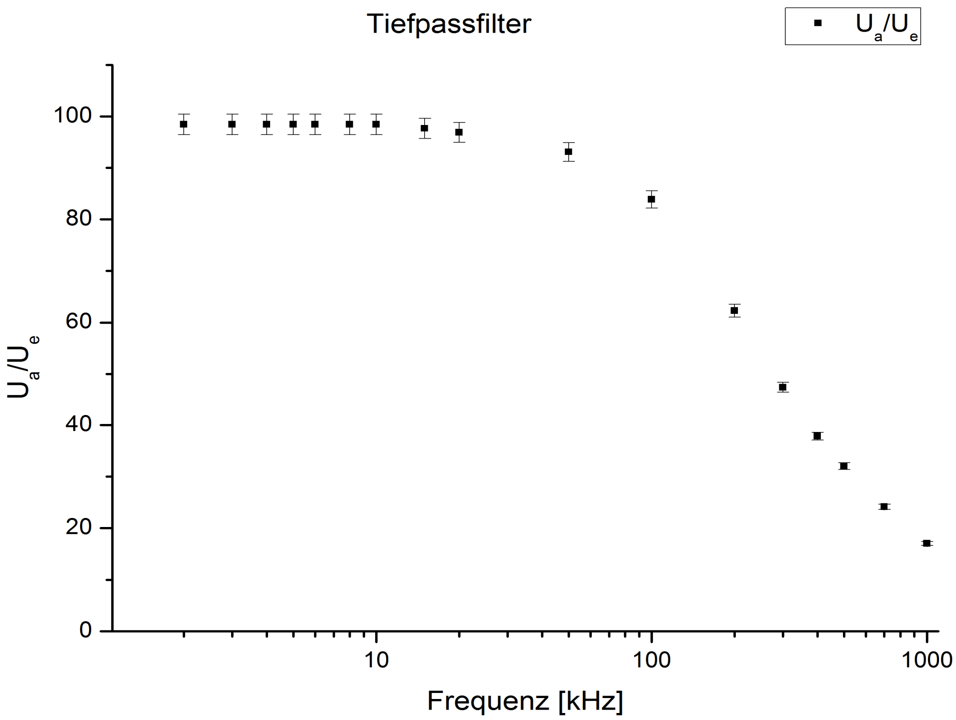
Die Frequnez der Eingangsspannung werde variiert; es sollen Amplituden- und Phasengang der Emitterschaltung aufgenommen werden. Nehmen Sie dazu die Schaltung nach Abbildung 19 mit $R_C = 10\,k\Omega$. Stellen Sie als Frequenzen Werte zwischen 6 Hz und 1 MHz ein. Messen Sie mit dem Oszilloskop die Amplitude des Eingangssignals u_e und die Amplitude des Ausgangssignals u_a. Bestimmen Sie den Phasenwinkel zwischen Eingangs- und Ausgangssignal:

Für Frequenzen unter 200 Hz verhält sich die Emitterschaltung wie ein Hochpassfilter:



GRAPH 7: AMPLITUDE AUSGANG GGÜ. FREQUENZ. HOCHPASSFILTER

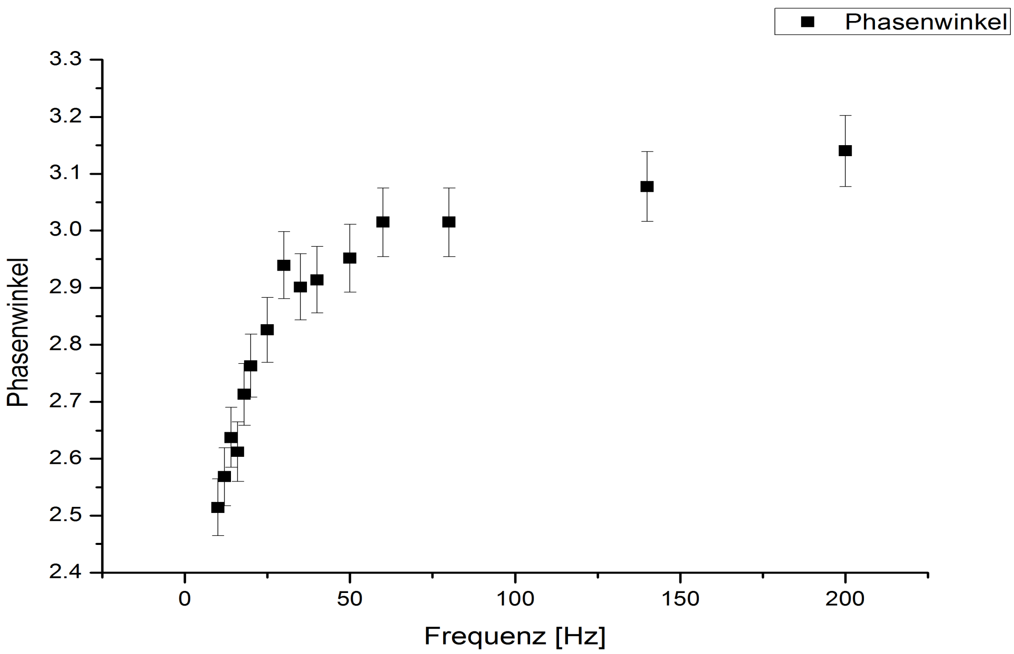
Für Frequenzen zwischen 1 kHz und 1000 kHz verhält sich die Schaltung wie ein Tiefpassfilter:



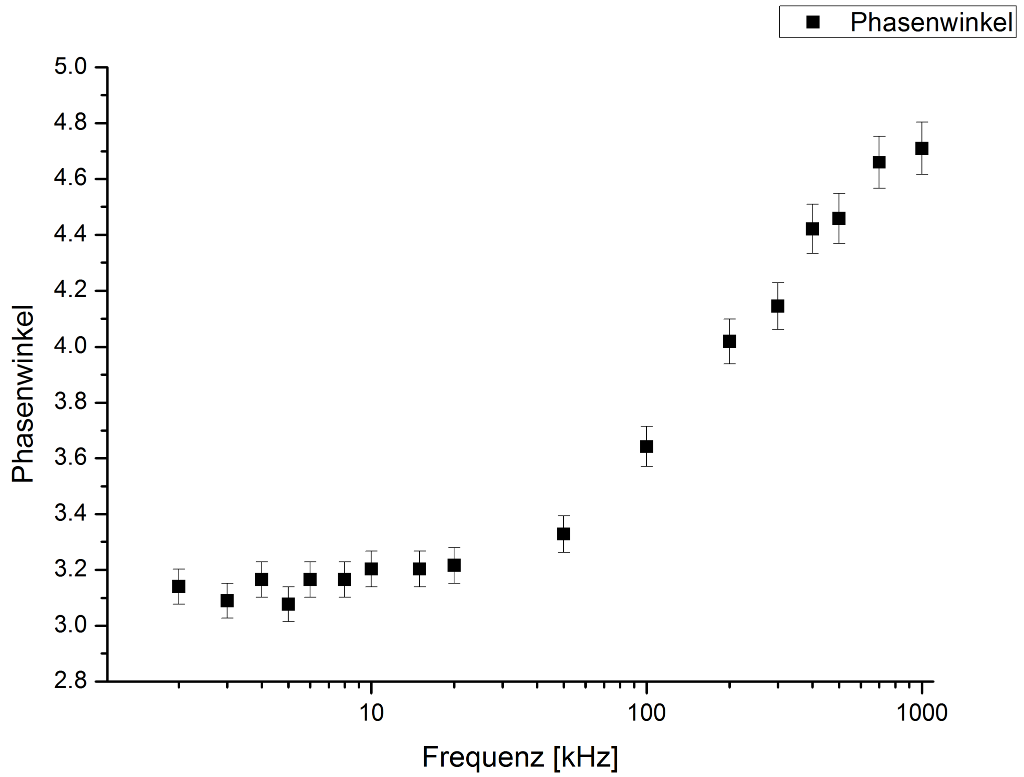
GRAPH 8: AMPLITUDE GGÜ. FREQUENZ. TIEFPASSFILTER

Im Frequenzbereich von 1 kHz bis 10 kHz wird jedes eingehende Signal gleich verstärkt, in diesem Fall um den Faktor 100.

Der Phasenwinkel zwischen Eingangs- und Ausgangssignal ist in folgendem Diagramm dargestellt:



GRAPH 9: PHASENGANG GGÜ. FREQUENZ



GRAPH 10: PHASENGANG GGÜ. FREQUENZ

Den Amplituden- und Phasengang kann man auch mit einer Lissajousfigur darstellen. Dazu ist folgende Formel notwendig:

$$\frac{y_1}{y_2} = \sin\varphi \tag{21}$$

In dieser Gleichung beschreibt y_1 den Schnitt der Lissajousfigur mit der y-Achse und y_2 den maximalen y-Wert.

Dies wird anhand einiger Beispiele im Folgenden gezeigt:

Abbildung 1: 1kHz

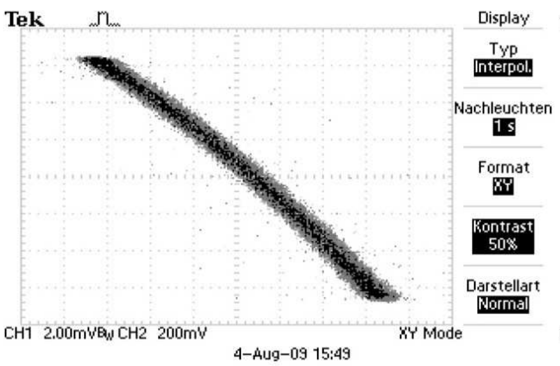


Abbildung 2: 18Hz

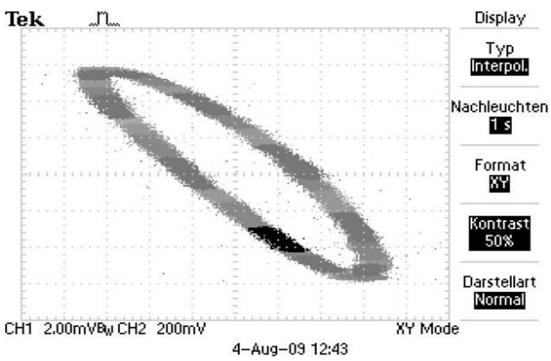
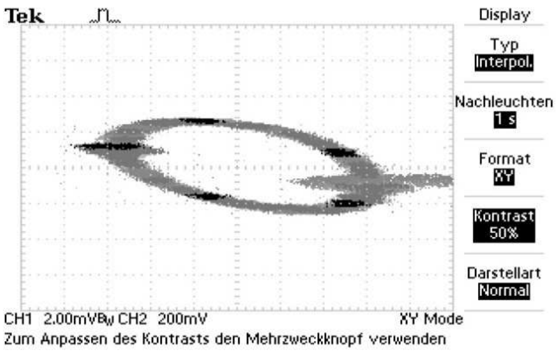


Abbildung 3: 400 kHz



Aus den Darstellungen ergibt sich:

Abbildung	1	2	3
Phasenwinkel φ	$0°/180°$	$27°/153°$	$58°/122°$

Für die Berechnung der Eckfrequenz benötigt man folgende Formel:

$$\omega_1 = \frac{1}{\left(R_g + \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{r_{BE}} + \frac{1}{r_M}\right)^{-1}\right) \cdot C_e} = 222\ Hz \qquad (22)$$

$$\rightarrow \quad f_{Eckfrequenz} = 35\ Hz$$

$$mit: R_g = 0; R_1 = 7{,}02\ k\Omega; R_2 = 100\ \Omega; r_{BE} = 3{,}7\ k\Omega; r_M = 47\ k\Omega; C_e = 47 \mu F$$

Diese Frequenz stimmt nicht mit der experimentell bestimmten Frequenz überein.

$$\omega_2 = \frac{1}{\left(R_L + \left(\frac{1}{r'_{BC}} + \frac{1}{r_{CE}} + \frac{1}{R_C}\right)^{-1}\right) \cdot C_a} = 0{,}508\ Hz \qquad (23)$$

$$mit: \ R_L = 10\ k\Omega; r'_{BC} \to \infty; r_{CE} = 414\ k\Omega; R_C = 10\ k\Omega; C_a = 100\ \mu F$$

$$\rightarrow \quad f_{Eckfrequenz} = 0{,}10\ Hz$$

Diese Frequenz ist viel zu gering, es muss sich also ein großer Fehler bei der Messung eingeschlichen haben.

Frage 4

a) Stellen Sie für das Netzwerk aus Abbildung 5 die Übertragungsfunktion $H(Z_1, Z_2) = \frac{U_a}{U_e}$ auf. Verifizieren Sie Gleichung (13). Verifizieren Sie weiter Gleichung (15), indem Sie die in Aufgabe 2 angegebene Beziehung zur Hilfe nehmen.

Das Aufstellen der Gleichungen für Abbildung 5 liefert:

$$U_e = I_e \cdot Z_1 + I_2 \cdot Z_2 \qquad (24)$$

$$U_a = I_2 \cdot Z_2 \qquad (25)$$

$$H(Z_1, Z_2) = \frac{U_a}{U_e} = \frac{I_2 \cdot Z_2}{I_e \cdot Z_1 + I_2 \cdot Z_2} = \frac{1}{\frac{I_e \cdot Z_1}{I_2 \cdot Z_2} - 1} \qquad (26)$$

Die einzige Unbekannte stellt noch I_2 dar, durch die Kirchhoffsche Knotenregel ergibt sich:

$$I_2 = I_a + I_e \qquad (27)$$

Nun sollen Gleichung (13) und (15) aus dem Skript verifiziert werden:

(13):

$$\begin{pmatrix} I_e \\ I_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{Z_1} & -\frac{1}{Z_1} \\ -\frac{1}{Z_1} & \frac{1}{Z_1}+\frac{1}{Z_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_e \\ U_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_e \\ U_a \end{pmatrix} \tag{28}$$

(15):

$$\begin{pmatrix} U_e \\ I_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_1 & 1 \\ -1 & \frac{1}{z_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_e \\ U_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_e \\ U_a \end{pmatrix} \tag{29}$$

Um die beiden Formeln zu verifizieren reicht es nur eine zu beweisen, da die 2. Sofort aus der Beziehung in Frage 2 für die Umrechnung von y-Parametern in h-Parametern folgt.

Test:

$h_{11} = \frac{1}{y_{11}} = Z_1$ → stimmt

$h_{12} = -\frac{y_{12}}{y_{11}} = 1$ → stimmt

$h_{21} = \frac{y_{21}}{y_{11}} = -1$ → stimmt

$h_{22} = \frac{y_{11} \cdot y_{22} - y_{21} \cdot y_{12}}{y_{11}} = \frac{1}{Z_2}$ → stimmt

Folglich muss wirklich nur eine Verifiziert werden, welche ist dabei egal.

Formel (29) liefert:

$$U_e = Z_1 \cdot I_e + U_a \tag{30}$$

$$I_a = -I_e + \frac{U_a}{Z_2} \tag{31}$$

Unsere Beziehung für Abbildung 5 liefert für diese Größen:

$$U_e = I_e \cdot Z_1 + (I_a + I_e) \cdot Z_2 \tag{32}$$

$$U_a = (I_a + I_e) \cdot Z_2 \tag{33}$$

Löst man Gleichung (33) nach $(I_a + I_e)$ und setzt sie in die erste ein ergibt sich:

$U_e = I_e \cdot Z_1 + U_a$ → dies entspricht der Beziehung aus Formel (30)

Löst man wiederum die 2. Gleichung nach I_a auf ergibt sich:

$I_a = \frac{U_a}{Z_2} - I_e$ → dies entspricht der Beziehung aus Formel (31)

Folglich sind Formel (28) und (29) aus dem Skript verifiziert.

b) Eine der Impedanzen des Netzwerks aus Abbildung 5 sei ein Widerstand R, eine ein Kondensator C. Je nachdem, welche Impedanz welche Rolle einnimmt, verwandelt sich das Netzwerk in einen Hoch- oder Tiefpaß. Geben sie die Impedanzen Z_1 und Z_2 für den Fall an, daß aus dem Netzwerk aus

Abbildung 5 ein Hochpaß wird, geben Sie die Impedanzen Z_1 und Z_2 für den Fall an, daß aus dem Netzwerk ein Tiefpaß wird. Wie lautet jeweils die Übertragungsfunktion $H(j\omega)$?

Nun soll Abbildung 5 so verändert werden, sodass ein Hochpass- bzw. ein Tiefpassfilter entsteht.

Hochpass

Für die Impedanz von Z_1 muss $Z_1 = \frac{1}{j\omega C}$ gelten, die für Z_2 muss folglich $Z_2 = R$ lauten.

Daraus ergibt sich die Übertragungsfunktion: (dabei ist weiterhin $I_2 = I_a + I_e$)

$$H(j\omega) = \frac{I_2 \cdot R}{\frac{I_e}{j\omega C} + I_2 \cdot R} = \frac{1}{\frac{I_e}{j\omega C \cdot I_2 \cdot R} + 1} \tag{34}$$

Tiefpass

Hierbei muss Z_1 und Z_2 genau ausgetauscht werden, das heißt die neue Impedanz von Z_1 ist R und die von Z_2 ist $\frac{1}{j\omega C}$.

Daraus ergibt sich die Übertragungsfunktion: (dabei ist weiterhin $I_2 = I_a + I_e$)

$$H(j\omega) = \frac{I_2 \cdot \frac{1}{j\omega C}}{I_2 \cdot \frac{1}{j\omega C} + I_e \cdot R} = \frac{1}{\frac{I_e \cdot R \cdot j\omega C}{I_2} + 1} \tag{35}$$