

**Der Operationsverstärker**  
logarithmischer Verstärker, Exponentialverstärker, NIC, Gyrator

Studiengang: KMT

Datum: 08.05.2012

Set: 6.08 Platz: 4

Teilnehmer: Michael Goldbush, Jürgen Döffinger

1,0 / Rm

**Zielstellung**

- Funktion und Eigenschaften von elektronisch erzeugten negativen Widerständen und Impedanztransformationsschaltungen mit Anwendungsbeispielen

**1. Begriffe und Formelzeichen**

Logarithmischer Verstärker, exponentieller Verstärker, NIC, INIC, UNIC, Gyrator,  
Zweipoltheorie, Innenwiderstand einer Quelle  $r_i$ ,  $r_a$ ,  
LC-Schwingkreise, Schwingfrequenz, Dämpfung und Güte von Reihen- und Parallelschwingkreis,  
logarithmisches Dekrement, Dämpfungsgrad, RL-Tiefpass, RL-Hochpass

**2. Versuchsvorbereitung**

- 2.1. Wiederholen Sie die Vorlesung zu den o.g. Themen. Machen Sie sich mit den in Punkt 1. angegebenen Begriffen und Formelzeichen vertraut. Machen Sie sich die Zusammenhänge zwischen den angegebenen Größen klar.
- 2.2. Berechnen Sie für den LC-Reihenschwingkreis im Bild 4 den Dämpfungsgrad und beurteilen Sie die zu erwartende Form der Ausgangsspannung für eine rechteckförmige Eingangsspannung mit  $f_e \ll f_0$ . Berechnen Sie die Eigenfrequenz  $f_0$  des Schwingkreises.
- 2.3. Leiten Sie die Gleichung zur Berechnung der Induktivität am Ausgang des Gyrtors im Bild 5 her und berechnen Sie die Eigenfrequenz des Parallelschwingkreises aus C1 und L.

Leiten Sie die Gleichung zur Berechnung des Verlustwiderstandes des Parallelschwingkreises her, wenn dessen gedämpfte Schwingung durch die Periodendauer T und die logarithmisch abnehmenden, benachbarten Amplituden  $\hat{u}_1$  und  $\hat{u}_2$  (logarithmisches Dekrement) beschrieben wird.

- 2.4. Bereiten Sie auf Papier mit einfachlogarithmischer Teilung ein Diagramm zur Darstellung der Meßwerte vor. Es empfiehlt sich folgender Maßstab:

zu Punkt 3.1.:  $U_{a1}$ :  $-0,6 \text{ V} \leq U_a \leq -0,45 \text{ V}$  10 mV/cm \*  
 $U_e$ :  $0,1 \text{ V} \leq U_e \leq 100 \text{ V}$  5 cm/Dekade

(\* oder handelsübliches Papier mit mindestens der angegebenen Anzahl von Dekaden)

### 3. Versuchsdurchführung

#### 3.0. Vorbemerkung

Alle Schaltungen in diesem Versuch werden mit einer bipolaren Betriebsspannung von  $U_{SS} = \pm 12\text{ V}$  betrieben.

#### 3.1. Logarithmischer und exponentieller Verstärker mit Operationsverstärker

Bauen Sie die Schaltung nach Bild 1 auf. Für R1 wählen Sie ein Wendelpotentiometer.

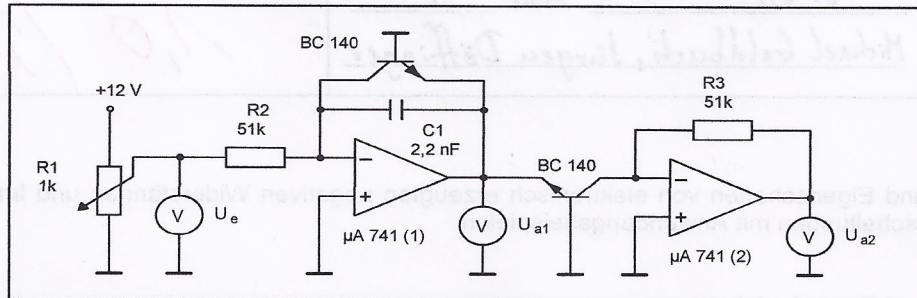


Bild 1: Logarithmischer- und Exponentialverstärker

Nehmen Sie Meßwerte zur Darstellung der Kennlinien  $U_{a1} = f(U_e)$  und  $U_{a2} = f(U_e)$  auf. Die Eingangsspannung sollte im Bereich von  $0 \leq U_e \leq 1\text{ V}$  in Schritten von 0,2 V und im Bereich  $1 \leq U_e \leq 12\text{ V}$  in Schritten von 2 V geändert werden.

Stellen Sie die Meßwerte  $U_{a2} = f(U_e)$  in einem geeigneten Diagramm dar. Welche Funktion müßte sich ergeben? Schätzen Sie aus der grafischen Darstellung den Fehler gegenüber dem theoretischen Verlauf ab. Erläutern Sie die hauptsächlichen Fehlerursachen.

Stellen Sie die Meßwerte  $U_{a1} = f(U_e)$  in der logarithmischen Darstellung des vorbereiteten Diagramms dar. Welchen Verlauf muß diese Funktion besitzen, um den Verstärker als logarithmischen Verstärker zu beurteilen?

#### 3.2. NIC und Gyrator

##### 3.2.1. Spannungsquelle mit NIC

Bauen Sie die Schaltung einer Spannungsquelle mit NIC nach Bild 2 auf. Als Spannungsquelle für die Eingangsspannung benutzen Sie den Funktionsgenerator.

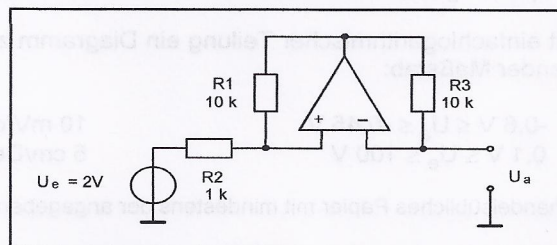


Bild 2: Spannungsquelle mit NIC

Bestimmen Sie den Ersatz-Innenwiderstand der Spannungsquelle mit NIC. Messen und notieren Sie die Ausgangsspannung für verschiedene Lastwiderstände  $R_L = (10\text{ k}\Omega; 20\text{ k}\Omega; 51\text{ k}\Omega)$ .

##### 3.2.2. Kompensation des Leitungswiderstandes

Für die Kompensation des Leitungswiderstandes einer Leitung muß der negative Innenwiderstand der Spannungsquelle gleich dem Leitungswiderstand werden. Zur Simulation des Leitungswiderstandes setzen Sie entsprechend Bild 3 einen einstellbaren Widerstand R4 (Widerstandsdekade) in die Schaltung ein, den Sie auf den ermittelten Innenwiderstand einstellen.

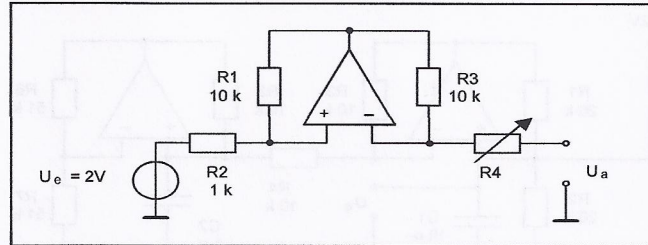


Bild 3: Kompensation des Leitungswiderstandes

Bestimmen Sie wieder den Ersatz-Innenwiderstand der Spannungsquelle (incl. R4) und messen Sie die Ausgangsspannung wie in Punkt 3.2.1. für verschiedene Lastwiderstände  $R_L$ . Vergleichen Sie die Meßwerte.

### 3.2.3. NIC zur Entdämpfung von Schwingkreisen

[ Funktionsgenerator: Units  $\rightarrow$  Amplitude/Offset ]

Bauen Sie zunächst den passiven LC-Reihenschwingkreis mit R4/L1/C1 aus Bild 4 auf. Legen Sie eine rechteckförmige Spannung mit  $U = 2V_{SS}$  und  $f = 500$  Hz an. Vergleichen Sie die Ausgangsspannung mit Ihren Überlegungen aus Punkt 2.2.

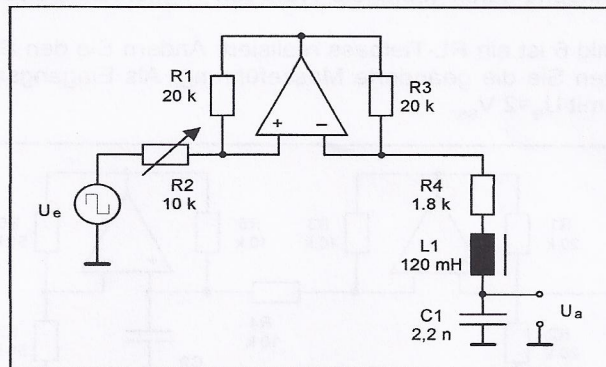


Bild 4: entdämpfter Reihenschwingkreis mit NIC

Erweitern Sie die Schaltung mit dem NIC. Stellen Sie bei gleicher Eingangsspannung R2 so ein, daß der Schwingkreis entdämpft wird. Welche Bedingung muß für diesen Fall für R2 gelten? Bestimmen Sie die Eigenfrequenz des Schwingkreises, den Gesamtverlustwiderstand von Spule und Kondensator des Schwingkreises und die genaue Induktivität der Spule.

### 3.2.4. Gyrator

Bauen Sie die Schaltung des Gyrators nach Bild 5 auf.

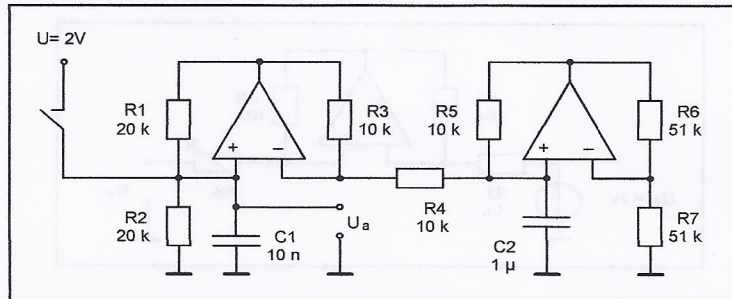


Bild 5: Parallelschwingkreis mit Gyrator

Durch Betätigung des Schalters regen Sie den Schwingkreis zu einer gedämpften Schwingung an. Stellen Sie etwa drei Perioden dieser Schwingung am Oszilloskop dar. Plotten Sie die Darstellung und tragen Sie in die Darstellung alle zur Berechnung des Verlustwiderstandes relevanten Meßwerte ein. Berechnen Sie die Dämpfung, die Induktivität und den Verlustwiderstand des Schwingkreises.

Hinweis zur Einstellung des Oszilloskopes:

- Einstellung auf Digitalbetrieb
- Trigger-Mode: NORM
- Triggerzeitpunkt am linken Bildrand
- Abbildung der Schwingung durch geeignete Wahl von Triggerflanke und Triggerpegel

In der Schaltung nach Bild 6 ist ein RL-Tiefpass realisiert. Ändern Sie den Schaltungsaufbau nach Bild 5 entsprechend. Beachten Sie die geänderte Masseführung. Als Eingangsspannung wählen Sie eine sinusförmige Spannung mit  $U_e = 2 V_{SS}$ .

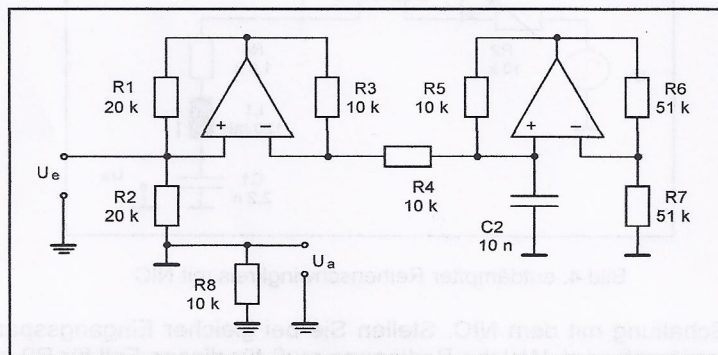
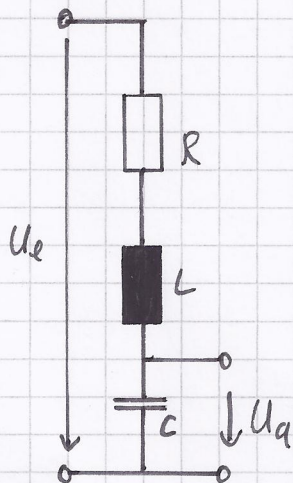


Bild 6: RL-Tiefpass mit Gyrator

Bestimmen Sie die Grenzfrequenz des Tiefpasses und vergleichen Sie den Wert mit dem, der sich theoretisch ergeben müßte.

2.2.



$$R = 1,8 \text{ k}\Omega$$

$$C = 2,2 \text{ nF}$$

$$L = 120 \text{ mH}$$

Bedingung für Resonanz  $\rightarrow \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$

daraus folgt:

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC} \quad | \quad \omega_0 = 2\pi f_0$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{120 \text{ mH} \cdot 2,2 \text{ nF}}}$$

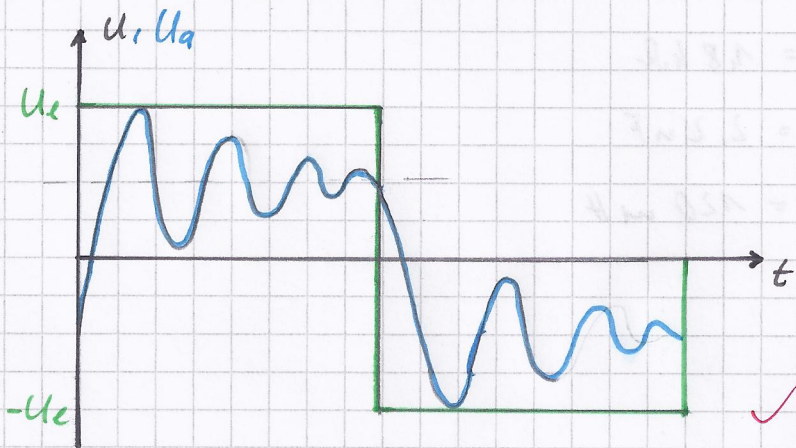
$$\underline{\underline{f_0 \approx 9,8 \text{ kHz}}} \quad \checkmark$$

$$D = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{1,8 \text{ k}\Omega}{2} \cdot \sqrt{\frac{2,2 \text{ nF}}{120 \text{ mH}}}$$

$$\underline{\underline{D \approx 0,122}} \quad \checkmark$$

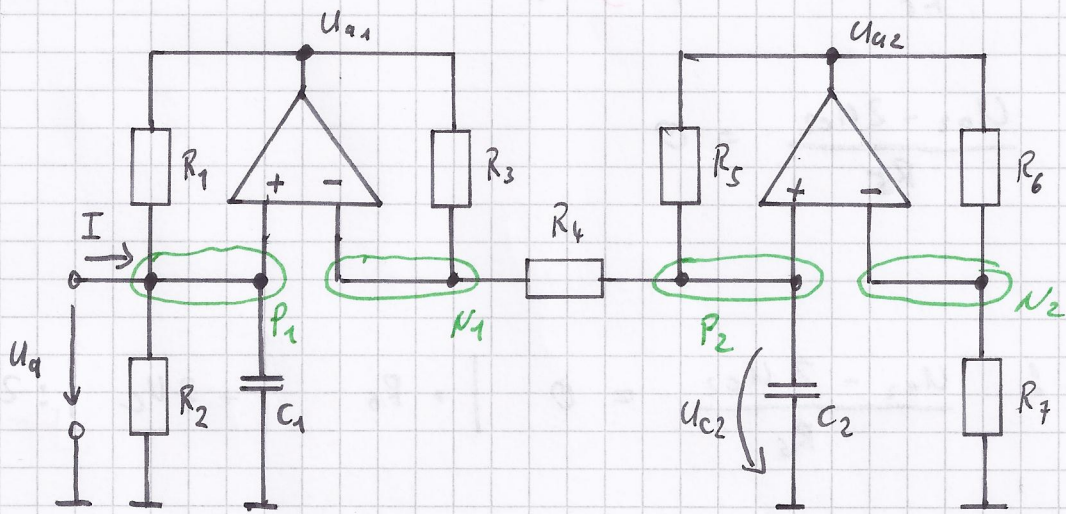
Es ergibt sich eine Eigenfrequenz  $f_0$  von  $9,8 \text{ kHz}$  und ein Dämpfungsgrad  $D$  von  $0,122$ . ✓

Zu erwartender Spannungsverlauf:



(gedämpfte Schwingung entsprechend  $D = 0,122$ )

2.3.



$$P_1: \quad I - \frac{U_a}{R_2} + \frac{U_{a1} - U_a}{R_1} = 0 \quad \left| \quad R_1 = R_2 \right.$$

$$I - \frac{2U_a + U_{a1}}{R_1} = 0$$

$$N_1: \quad \frac{U_{a1} - U_a}{R_3} + \frac{U_{c2} - U_a}{R_4} = 0 \quad \left| \quad R_3 = R_4 \right.$$

$$\frac{U_{a1} + U_{c2} - 2U_a}{R_3} = 0$$

$$P_2: \quad \frac{U_a - U_{c2}}{R_4} + \frac{U_{a2} - U_{c2}}{R_5} - \frac{U_{c2}}{j\omega C_2} = 0 \quad \left| \quad R_4 = R_5 = R_3 \right.$$

$$\frac{U_a + U_{a2} - 2U_{c2}}{R_3} - j\omega C_2 U_{c2} = 0$$

$$N_2: \frac{U_{a2} - U_{c2}}{R_6} - \frac{U_c}{R_7} \quad | \quad R_6 = R_7$$

$$\frac{U_{a2} - 2U_{c2}}{R_6} = 0$$

$$N_2' : \frac{U_{a2} - 2U_{c2}}{R_6} = 0 \quad | \cdot R_6 \quad | + 2U_c$$

$$U_{a2} = 2U_{c2}$$

$$P_2' : \frac{U_a + U_{a2} - 2U_{c2}}{R_3} - j\omega C_2 U_{c2} = 0 \quad | \cdot R_3$$

$$U_a + U_{a2} - 2U_{c2} - j\omega C_2 R_3 U_{c2} = 0 \quad | -U_{a2} \quad | \cdot (-1)$$

$$U_{a2} = -U_a + 2U_{c2} + j\omega C_2 R_3 U_{c2}$$

$$I = N_2' = P_2' : 2U_{c2} = -U_a + 2U_{c2} + j\omega C_2 R_3 U_{c2} \quad | -2U_{c2}$$

$$0 = -U_a + j\omega C_2 R_3 U_{c2} \quad | + U_a \quad | : j\omega C_2 R_3$$

$$U_{c2} = \frac{U_a}{j\omega C_2 R_3}$$



$$P_1': \quad I - \frac{2U_a + U_{a1}}{R_1} = 0 \quad | \cdot R_1 \quad | - U_{a1} \quad | \cdot (-1)$$

$$U_{a1} = -IR_1 + 2U_a$$

$$N_1': \quad \frac{U_{a1} + U_{c2} - 2U_a}{R_3} = 0 \quad | \cdot R_3 \quad | - U_{c2} \quad | + 2U_a$$

$$U_{a1} = 2U_a - U_{c2}$$

$$\underline{II} = P_1' = N_1': \quad -IR_1 + 2U_a = 2U_a - U_{c2} \quad | -2U_a \quad | \cdot (-1)$$

$$U_{c2} = IR_1$$

$$\underline{I} = \underline{II}: \quad IR_1 = \frac{U_a}{j\omega R_3 C_2} \quad | \cdot j\omega R_3 C_2 \quad | : I$$

$$\frac{U_a}{I} = j\omega R_1 R_3 C_2 \quad | Z = \frac{U_a}{I}$$

$$Z = j\omega R_1 R_3 C_2 \quad | R_1 R_3 C_2 = L$$

$$\underline{Z = j\omega L}$$

$$L = R_1 R_3 C_2 = 20 \text{ k}\Omega \cdot 10 \text{ k}\Omega \cdot 1 \mu\text{F}$$

$$\underline{L = 200 \Omega^2\text{F} = 200 \text{ H}} \quad \checkmark$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_1}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{200\text{H} \cdot 10\text{nF}}}$$

$$\underline{\underline{f_0 \approx 112,54 \text{ Hz}}} \quad \checkmark$$

Series-Sk!

$$\Delta = \ln\left(\frac{\hat{u}_1}{\hat{u}_2}\right) = \omega \cdot T \cdot D \quad \checkmark \quad \left| \quad D = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C_1}{L}} \quad \right. \quad \left. \right. f$$

$$\ln\left(\frac{\hat{u}_1}{\hat{u}_2}\right) = \omega T \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C_1}{L}} \quad \left| \quad : \omega T \sqrt{\frac{C_1}{L}} \quad \right| \cdot 2$$

$$R = \frac{2}{\omega} \cdot \sqrt{\frac{L}{C_1}} \frac{1}{T} \ln\left(\frac{\hat{u}_1}{\hat{u}_2}\right)$$

$$R = \frac{2}{2\pi \cdot 79,6 \text{ Hz}} \cdot \sqrt{\frac{200\text{H}}{10\text{nF}}} \cdot \frac{1}{T} \cdot \ln\left(\frac{\hat{u}_1}{\hat{u}_2}\right)$$

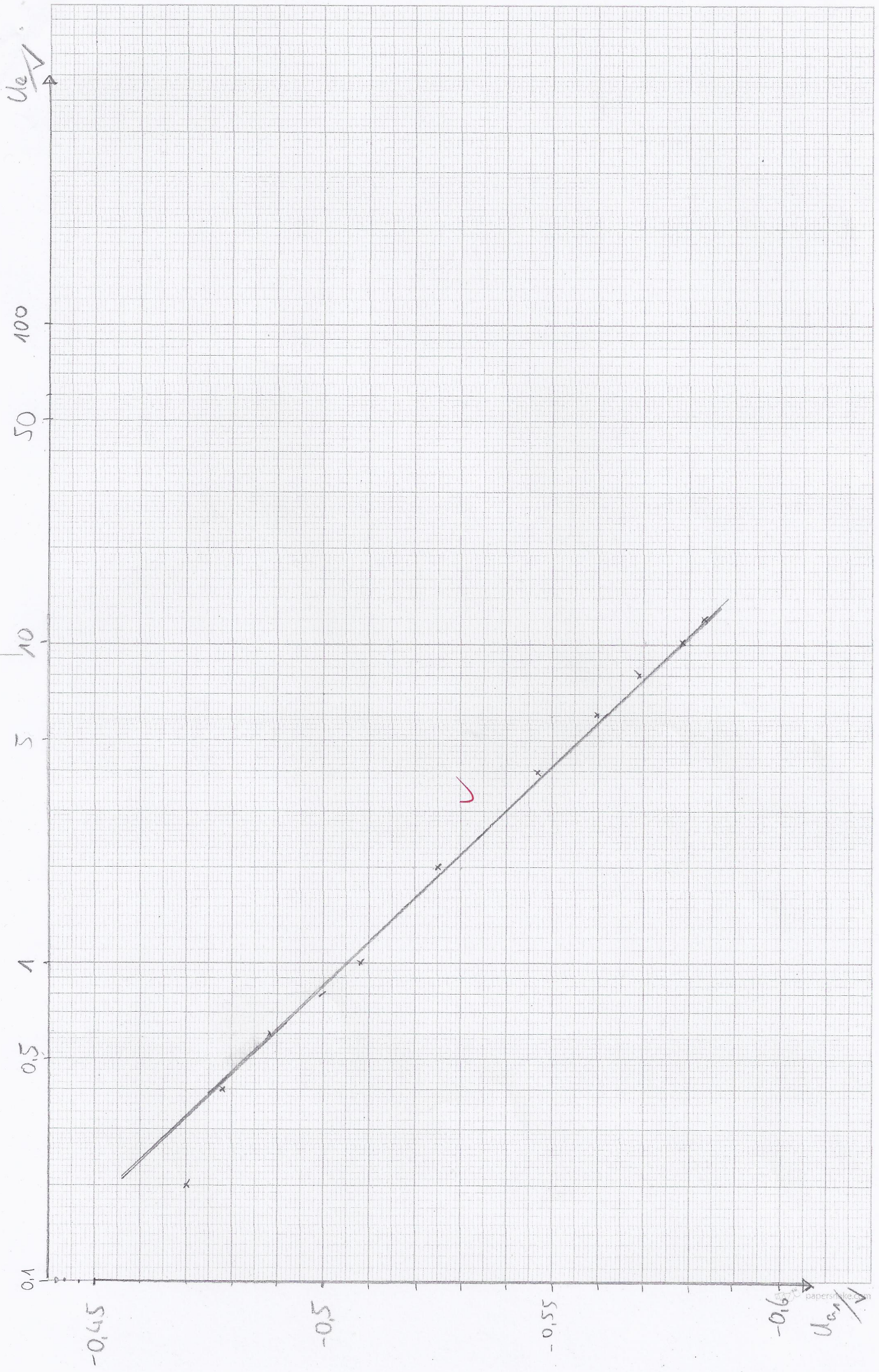
$$\underline{\underline{R = 800 \Omega \cdot \frac{1}{T} \cdot \ln\left(\frac{\hat{u}_1}{\hat{u}_2}\right)}} \quad f$$

3.1

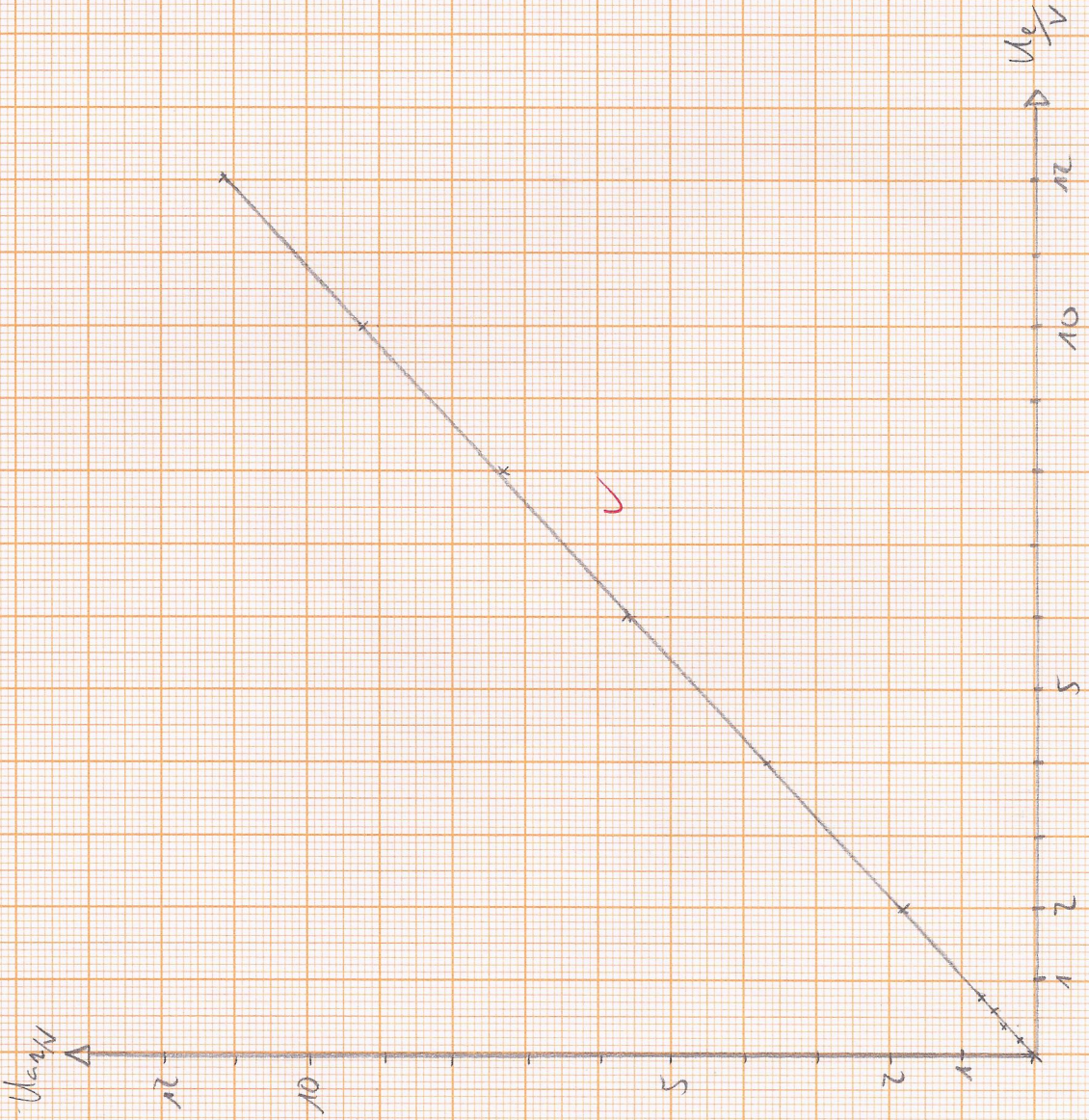
$U_e / V$	$U_{a1} / V$	$U_{a2} / V$
0	-0,3	0
0,2	-0,470	0,21
0,4	-0,478	0,42
0,6	-0,488	0,56
0,8	-0,500	0,74
1,0	-0,508	0,92
2,0	-0,525	1,85
4,0	-0,547	3,65
6,0	-0,560	5,54
8,0	-0,568	7,39
10,0	-0,577	9,26
12,0	-0,584	11,11

✓  
✓  
bei log. Divid. !  
Sowohl im Falle  $U_{a1}$  zu  $U_e$ , als auch bei  $U_{a2}$  zu  $U_e$  ist für die Funktionen eine Gerade zu erwarten. Denn  $U_{a2}$  sollte gleich  $U_e$  sein. So ist zwar eine Gerade zu erkennen, jedoch ist  $U_{a2}$  leicht niedriger. Diese Abweichungen lassen sich durch die ~~U<sub>a1</sub>~~ unterschiedlichen Kennlinien der Transistoren erklären. Gleiches gilt für  $U_{a1}$ . Auch hier sind kleine Unterschiede von der Vorüberlegung zu erwarten.

3.1.



3.1.



3.2.

$R_L / k\Omega$	$U_a / V$
10	2,24
20	2,12
51	2,05 ✓

$$R_i = - \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad \checkmark$$

$$R_i = - \frac{U_{a10k} - U_{a51k}}{\frac{U_{a10k}}{R_{L10k}} - \frac{U_{a51k}}{R_{L51k}}} = \frac{2,24V - 2,05V}{\frac{2,24V}{10k\Omega} - \frac{2,05V}{51k\Omega}}$$

$$\underline{\underline{R_i = -1034\Omega}} \quad \checkmark$$

$R_L / k\Omega$	$U_a / V$
10	2,0076
20	2,0078
51	2,0081 ✓

$$R_i = - \frac{U_{a10k} - U_{a51k}}{\frac{U_{a10k}}{R_{L10k}} - \frac{U_{a51k}}{R_{L51k}}} = - \frac{2,0081V - 2,0076V}{\frac{2,0081V}{10k\Omega} - \frac{2,0076V}{51k\Omega}}$$

$$\underline{\underline{R_i = -3\Omega}} \quad \checkmark \quad \approx 0!$$

Im Vergleich der Messwerte der Ausgangsspannung kann man erkennen dass nach der Kompensation die Differenz zwischen den Spannwerten viel kleiner ist. Die Kompensation besser funktioniert. Das errechnete  $R_i$  ist nach der Komp. wie erwartet deutlich (betragsmäßig) kleiner.

Das die Kompensation nicht zu einem gelassen Land sein mit  
 der Abweichung der Baulende erklären.

20,5	01
21,5	05
20,5	22

$$\frac{18}{12} = 1,5$$

$$\frac{V_{20,5} - V_{15,5}}{V_{20,5}} = \frac{11 - 10}{11} = \frac{1}{11}$$

$$\frac{18}{12} = 1,5$$

1800,5	01
1800,5	05
1800,5	22

$$\frac{V_{1800,5} - V_{1200,5}}{V_{1800,5}} = \frac{11 - 10}{11} = \frac{1}{11}$$

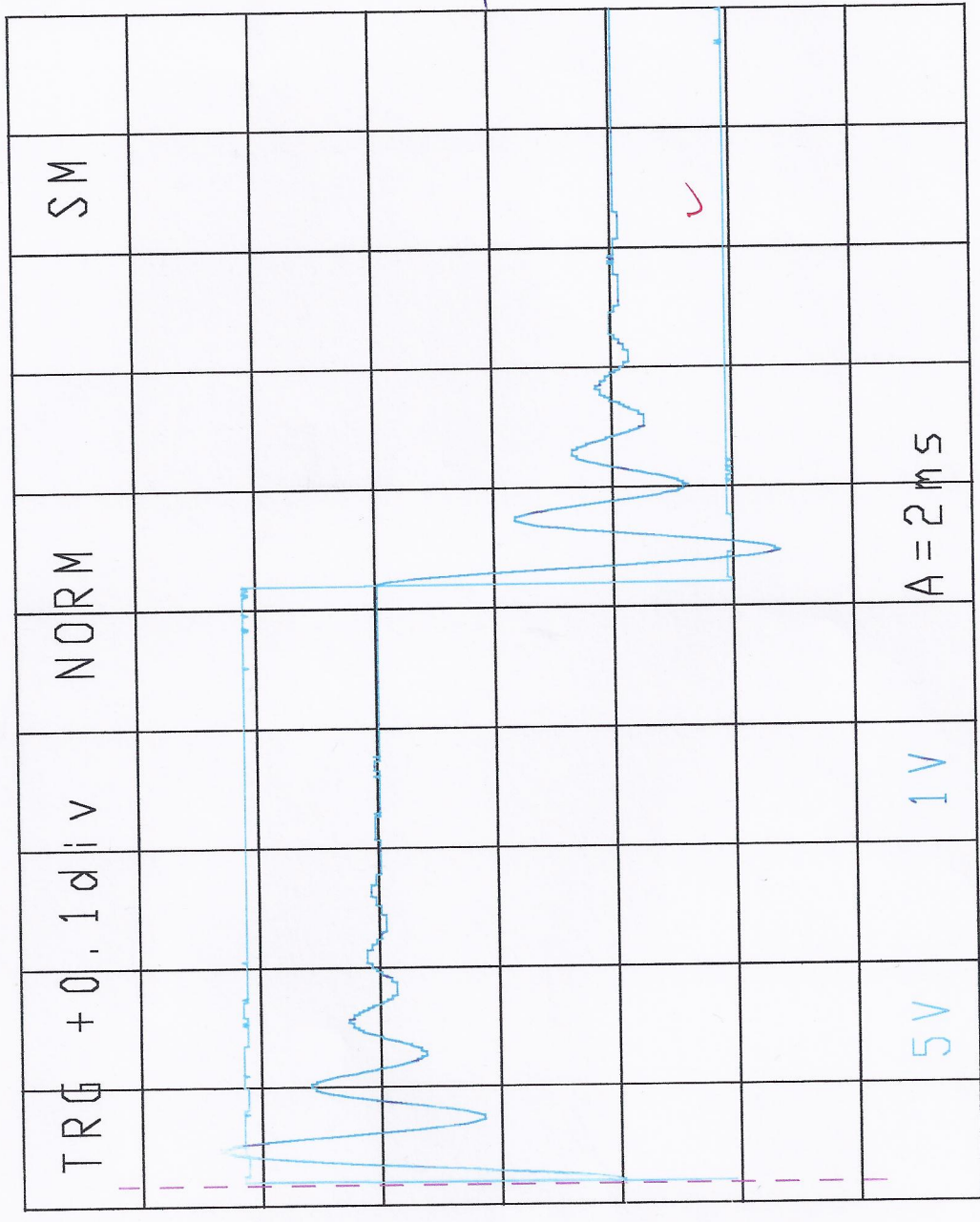
$$\frac{18}{12} = 1,5$$

und festgestellt ob...  
 die...  
 der...  
 der...  
 der...

# 3.2.3. LC-Reihenschwingkreis

Im Vergleich mit der Übertragung in der Vorbereitung lässt sich erkennen dass sich beide Bilder sehr ähneln.

Bei jeder Änderung der Eingangsspannung ändert sich die Ausgangsspannung und schwächt sich entsprechend mehr. (Nur das Übersetzungsverhältnis in der Vorbereitung nicht 0V betrachten.)





3.2.3.

mit NIC  
Bedingung bei Enddämpfungs:

$R_2$  und  $R_{\text{generato}}$  entsprechen  $R_u$  und Verlustwiderstand (LC)

$$\underline{R_2 + R_a = R_u + R_{\text{vic}}} \quad \checkmark$$

$$\begin{aligned} R_u &= 1,8 \text{ k}\Omega & R_a &= 50 \Omega \\ R_2 &= 1,824 \Omega \end{aligned}$$

$$R_{\text{vic}} = R_2 + R_a - R_u = 1,824 \Omega + 50 \Omega - 1,8 \text{ k}\Omega = \underline{70 \Omega = R_{\text{vic}}} \quad \checkmark$$

$$f_0 \text{ gemessen} = 9,174 \text{ kHz} \quad \checkmark$$

$$C_1 \text{ zur Sicherheit auch nochmal gemessen} = 2,13 \text{ nF}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}}$$

$$\sqrt{L_1 C_1} = \frac{1}{2\pi f_0}$$

$$L_1 = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C_1} = \frac{1}{4\pi^2 (9,174 \text{ kHz})^2 \cdot 2,13 \text{ nF}}$$

$$\underline{\underline{L_1 = 0,14 \text{ H}}} \quad \checkmark$$

3.2.6

$U_{N1} = 4,1 \text{ cm}$   
 $U_{N2} = 2,5 \text{ V}$

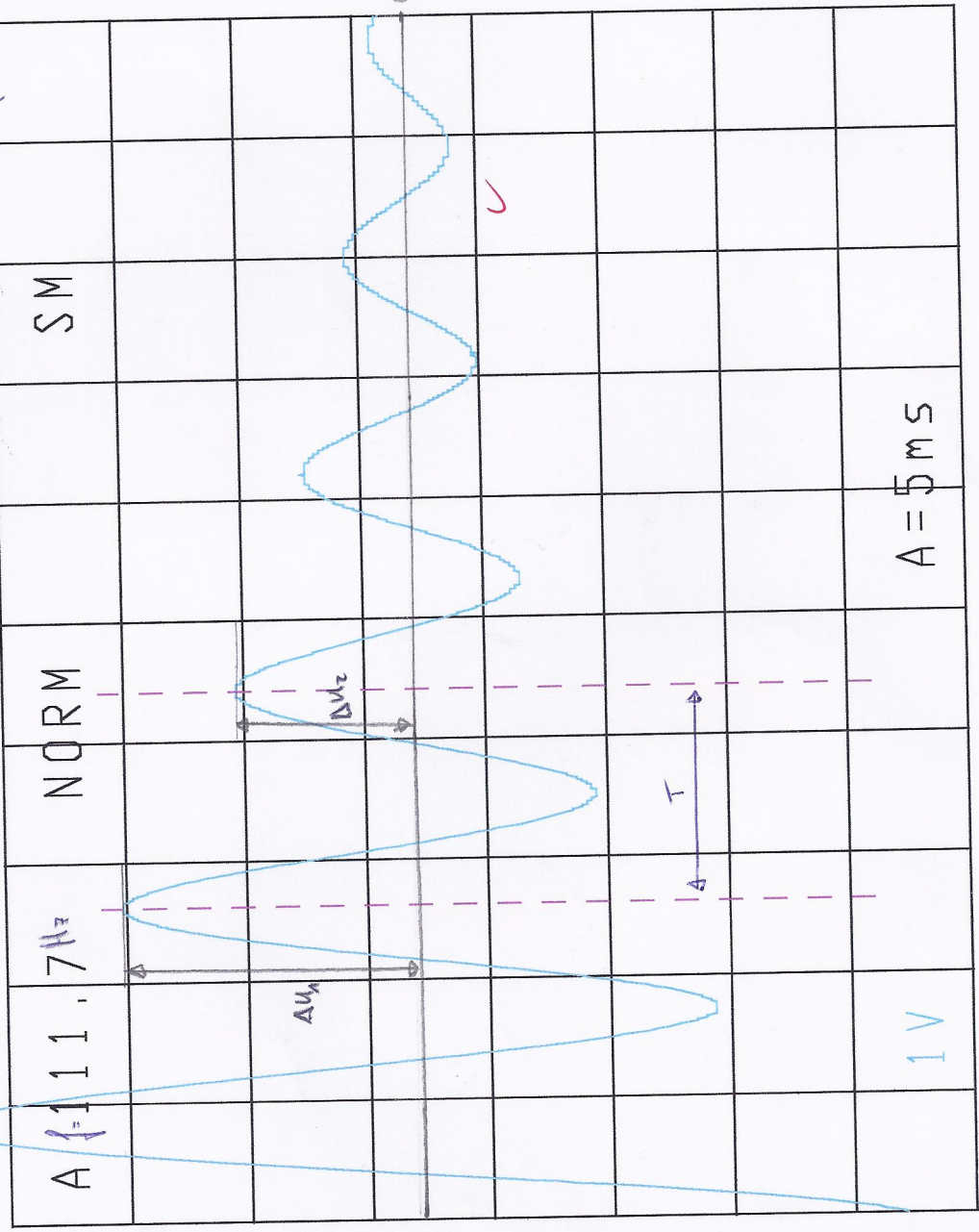
$f = 111,7 \text{ Hz}$

$U_2 = 2,45 \text{ cm}$   
 $U_{N2} = 1,69 \text{ V}$

$\Lambda = R_n \left( \frac{U_{in}}{U_{in}} \right) = 0,5175$   
 $\delta = \frac{\Delta U}{U} = \Lambda \cdot \beta = 57,8 \frac{1}{2}$   
 $R_v = \frac{1}{2 C_n \delta} = \frac{1}{2 \cdot 10^{-6} \cdot 57,8} = 865,054 \Omega = R_v$

$L = \frac{1}{4 \pi^2 \beta^2 C_n} = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot (57,8)^2 \cdot 10^{-6}} = 758 \text{ H}$   
 $203 \text{ H} = L$

$D = \frac{\delta}{\omega} = \frac{57,8 \text{ Hz}}{2 \pi \cdot 111,7 \text{ Hz}} = 0,08$



A = 5 mS

$1V = 1 \text{ DIV} = 1,64 \text{ cm}$   
 $\frac{xV}{x_{cm}} = \frac{1V}{1,64 \text{ cm}}$   
 $xV = \frac{x_{cm} \cdot 1V}{1,64 \text{ cm}}$

S. 2.4. TP

$$L = R_1 \cdot R_2 \cdot C_2$$

$$= 10k \Omega \cdot 20k \Omega \cdot 10 \mu F$$

$$= 2H$$

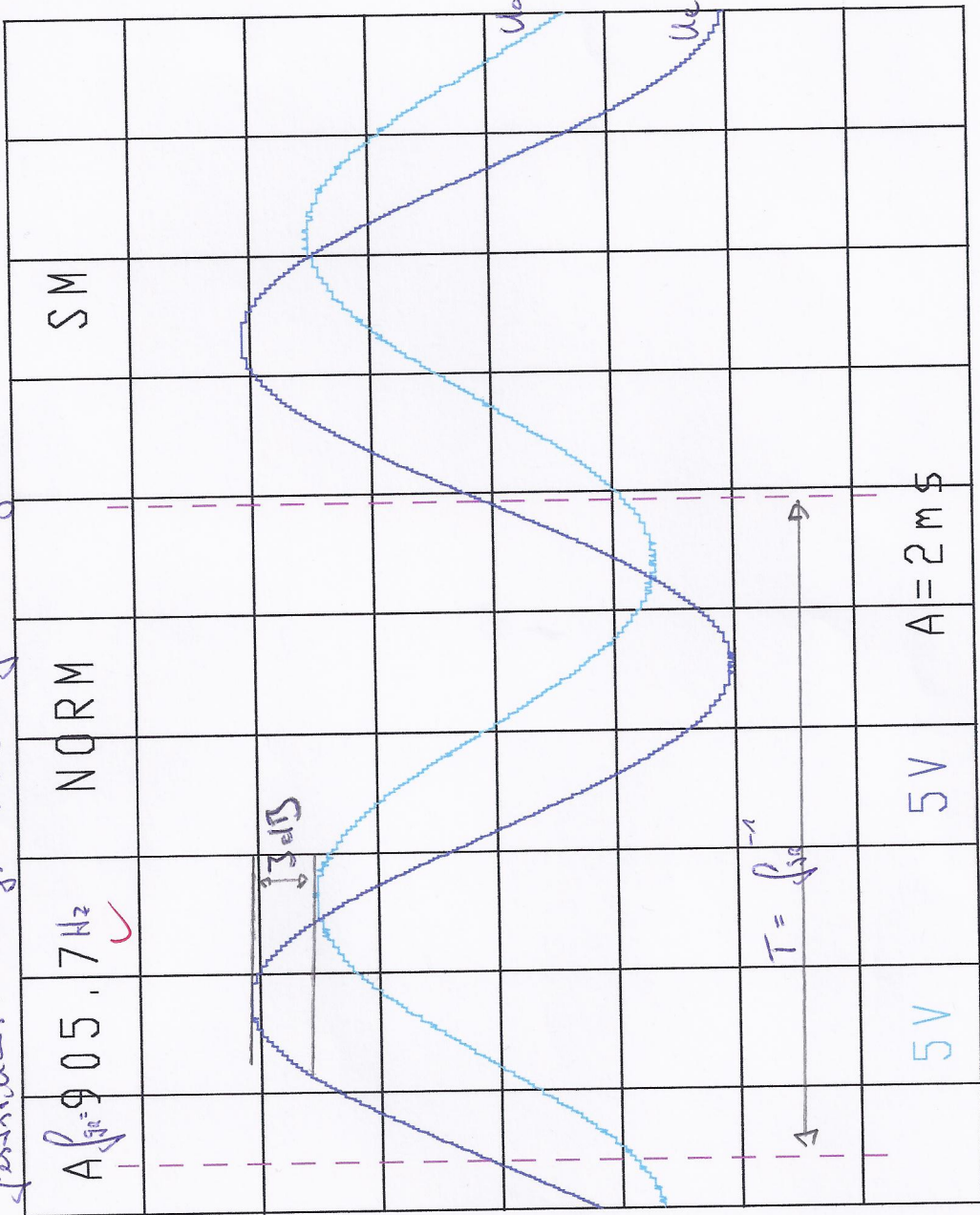
2 Hz!

$$f_{gr} = \frac{R}{2\pi L} = \frac{20k \Omega \cdot 10k \Omega}{2 \cdot \pi \cdot 20k \Omega \cdot 20k \Omega \cdot 10 \mu F} = 755,77 Hz$$

Im Vergleich des gemessenen und des errechneten Wertes für  $f_{gr}$  kann man sich Unterschiede festhalten. Erklärungsvorsuche laufe Richtung des Wertes und Eigenwertes des Widerstandes und des Kondensators, sowie

des L von 2H. 2

Abw. von 14%



5V

5V

A = 2ms