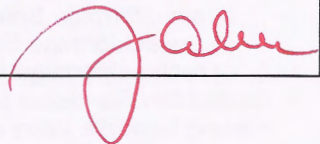


**Der Operationsverstärker**  
 Anwendung in analogen Rechenschaltungen

Studiengang: <u>          KITT          </u>	Datum: <u>          15.11.2011          </u>
Set: <u>          5.09          </u> Platz: <u>          4          </u>	<i>1.7</i>  <i>18.11.11</i>
Teilnehmer: <u>          Michael Goldbach, Jürgen Pöfänger          </u>	

**Zielstellung**

- Anwendungsbeispiele für den Einsatz von Operationsverstärkern als Addierer und Subtrahierer
- Entwurf und Dimensionierung entsprechender Schaltungen
- Bestimmung der Eigenschaften des Integrators mit realen Operationsverstärkern
- Kennenlernen der Eigenschaften eines 'realen' Differenzierers

**1. Begriffe und Formelzeichen**

Addierer, Subtrahierer, Integrierer, Differenzierer, Durchtrittsfrequenz, Frequenzgang

**2. Versuchsvorbereitung**

2.1. Wiederholen Sie den Vorlesungsabschnitt "Operationsverstärker", insbesondere die als Thema genannten Abschnitte. Machen Sie sich mit den in Punkt 1. genannten Begriffen vertraut. Wiederholen Sie die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Begriffen.

2.2. Dimensionieren Sie die Schaltung des invertierenden Addierers nach Bild 2 (Bauelemente mit Normwerten) für folgende Bedingungen:

- Verstärkung für Spannung  $U_{e1}$ : -2
- Verstärkung für Spannung  $U_{e2}$ : -10
- maximale / minimale Ausgangsspannung:  $U_a = \pm 9$  V
- $R_2 = 100$  k $\Omega$ .

Welchen Bereich darf eine Gleichspannung  $U_{e1}$  nicht überschreiten, wenn  $U_{e2}$  eine sinusförmige Spannung von 0,4 V<sub>eff</sub> ( $f \approx 1$  kHz) ist und der Ausgangsspannungsbereich nicht überschritten werden darf. Stellen Sie die Ausgangsspannung für den Maximalwert von  $U_{e1}$  maßstäblich als Zeitfunktion dar.

2.3. Entsprechend Bild 1 wird mit einer Open-Kollektorschaltung eine Glühlampe betrieben.

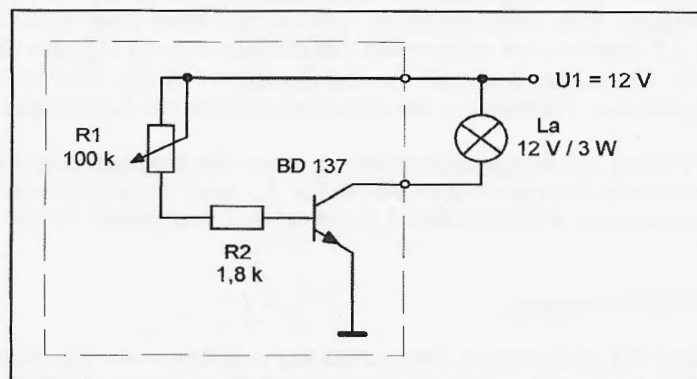


Bild 1: Lampensteuerung

Entwerfen Sie eine Schaltung, die eine dem Lampenstrom proportionale Ausgangsspannung mit dem Übertragungsfaktor  $20 \text{ V/A}$  liefert und unter Verwendung der vorhandenen Bauelemente (siehe Seite 4) einen möglichst geringen Einfluß auf die Schaltung hat. Dabei dürfen innerhalb des markierten Bereiches keine Schaltungsänderungen vorgenommen werden.

- 2.4. Stellen Sie qualitativ in einfachlogarithmischer Darstellung den Amplituden- und Phasengang des invertierenden Integrierers und invertierenden Differenzierers dar. Berechnen Sie die Durchtrittsfrequenzen für die Schaltungen nach Bild 3 und Bild 4. Kennzeichnen Sie in der qualitativen Darstellung des Amplitudenganges, wie sich die Durchtrittsfrequenz grafisch ermitteln läßt.
- 2.5. Leiten Sie die Form der Ausgangsspannung und die Phasenverschiebung eines invertierenden Integrierers und eines invertierenden Differenzierers für folgende Eingangsspannungen her:
- sinusförmige Spannung
  - dreieckförmige Spannung
  - rechteckförmige Spannung.
- Betrachten Sie dabei stetige Teilbereiche der Eingangsfunktion und führen Sie für diese die Differenzierung bzw. die Integration durch. Skizzieren Sie zeitgleich die Ein- und Ausgangsspannung.

### 3. Versuchsdurchführung und -auswertung

#### 3.1. Anwendung des OV als Addierer

Übertragen Sie die in Punkt 2.2. berechneten Widerstandswerte in die Schaltung im Bild 2. Ergänzen Sie die Schaltung durch einen Spannungsteiler, mit dem die Spannung  $U_{e1}$  aus den Betriebsspannungen  $U_1$  und  $U_2$  gewonnen wird und in dem berechneten Bereich einstellbar ist. Verwenden Sie die vorhandenen Bauelemente. Als Spannungsquelle für  $U_{e2}$  nutzen Sie einen Funktionsgenerator. Bauen Sie die Schaltung auf.

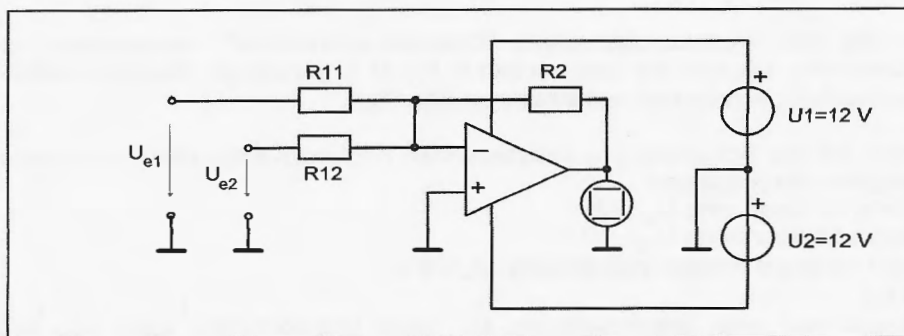


Bild 2: Addierschaltung

Stellen Sie die berechneten bzw. angegebenen Spannungswerte für  $U_{e1}$  und  $U_{e2}$  ein und überzeugen Sie sich von der Richtigkeit Ihrer Berechnungen. Stellen Sie etwa zwei Perioden der Ausgangsspannung bei der in Punkt 2.2 bestimmten maximalen Eingangsspannung  $U_{e1}$  am Oszilloskop dar und plotten Sie die Darstellung. Beachten Sie, daß Sie die Bezugslinien der Kurven richtig einstellen. Kennzeichnen Sie in der geplotteten Darstellung die einzelnen Anteile der Ausgangsspannung.

Beschreiben Sie den Verlauf der Ausgangsspannung, wenn Sie den berechneten Bereich für  $U_{e1}$  überschreiten. Welche minimalen und maximalen Werte für  $U_{e1}$  sind noch zulässig, damit der sinusförmige Verlauf der Ausgangsspannung erhalten bleibt? Notieren und begründen Sie die Werte.

#### 3.2. Anwendungsbeispiel Strommessung

Bauen Sie die im Punkt 2.3. entworfene Meßschaltung auf. Nehmen Sie Meßwerte für die Funktion  $U_a = f(I_{La})$  auf. Stellen Sie die Funktion in einem geeigneten Koordinatensystem dar und zeigen Sie daran, daß die Schaltung die Vorgaben erfüllt.

### 3.3. Integrierer

Bauen Sie die Schaltung nach Bild 3 auf. Kontrollieren Sie bei  $f=100\text{ Hz}$  die sinusförmige Form der Ausgangsspannung und korrigieren Sie eventuell die Offsetspannung. Bestimmen Sie den Amplituden- und Phasengang des Integrierers im Bereich  $100\text{ Hz} \leq f \leq 50\text{ kHz}$ . Tragen Sie die Meßwerte zum Amplitudengang möglichst in das Diagramm aus dem Versuch "Amplituden- und Phasenfrequenzgang des OV" ein und beschreiben Sie den Verlauf des Phasenganges.

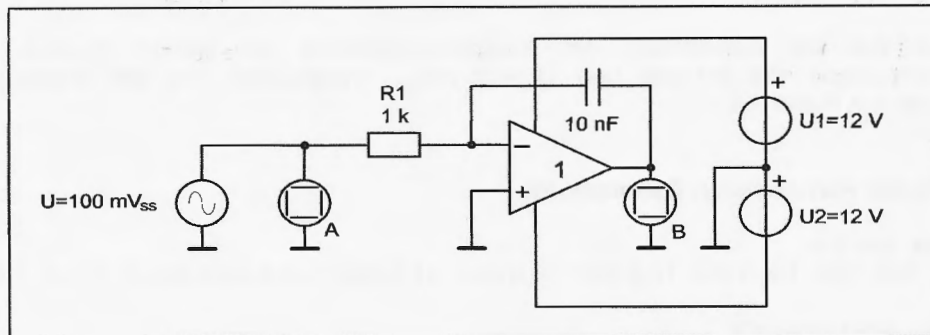


Bild 3: Meßschaltung zur Ermittlung von Amplituden- und Phasengang

Vergleichen Sie die gemessenen Werte mit der Darstellung aus Punkt 2.4. Begründen Sie Unterschiede in den Kurvenverläufen. Ermitteln Sie aus dem Diagramm die Durchtrittsfrequenz des Integrierers und vergleichen Sie den Wert mit der berechneten Durchtrittsfrequenz.

Untersuchen Sie die Kurvenform der Ausgangsspannung für die in Punkt 2.5. genannten Eingangsspannungen bei  $f=200\text{ Hz}$  und  $U_e=100\text{ mV}_{ss}$ . Vergleichen Sie die Ergebnisse mit den Überlegungen aus Punkt 2.5.

### 3.4. Differenzierer

Bauen Sie die Schaltung nach Bild 4 zunächst mit  $R_2=0\ \Omega$  auf. Bestimmen Sie den Amplituden- und Phasengang des Differenzierers. Tragen Sie die Meßwerte ebenfalls in die Diagramme aus dem Versuch "Amplituden- und Phasenfrequenzgang des OV" ein.

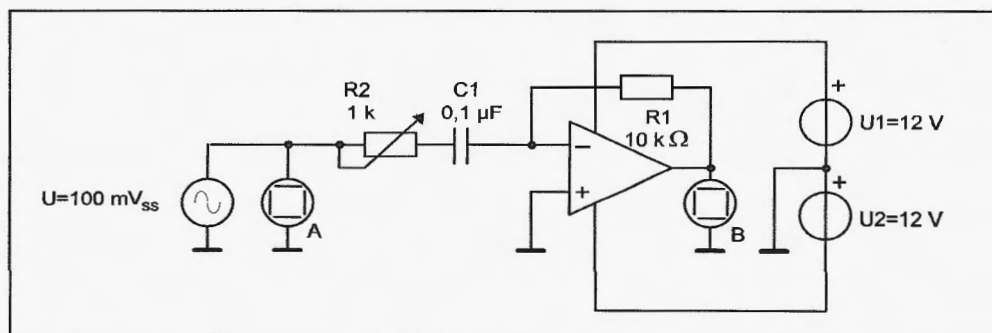


Bild 4: Meßschaltung des Differenzierers

Interpretieren Sie die Meßwerte, auch in Bezug zu den Meßwerten aus dem Versuch 'dynamisches Verhalten von OV'. Bestimmen Sie aus dem Diagramm die Durchtrittsfrequenz des Differenzierers und vergleichen Sie mit dem berechneten Wert der Durchtrittsfrequenz.

Setzen Sie R2 in die Schaltung und schalten Sie den Funktionsgenerator auf dreieckförmige Spannung um. Wählen Sie als Frequenz der Eingangsspannung  $f=1$  kHz. Bestimmen Sie den Widerstandswert, der zu einem annähernd idealen Verlauf der Ausgangsspannung führt. Erläutern Sie die Form der Ausgangsspannung, wenn Sie vom ermittelten Widerstandswert zu größeren und kleineren Werten hin abweichen.

Stellen Sie R2 auf den oben ermittelten Wert für den optimalen Spannungsverlauf ein. Ändern Sie das Tastverhältnis der dreieckförmigen Spannung auf 20 %. Stellen Sie die Ein- und Ausgangsspannung am Oszilloskop dar und plotten Sie die Darstellung. Begründen Sie den Verlauf der Ausgangsspannung.

Untersuchen Sie die Kurvenform der Ausgangsspannung für die in Punkt 2.5. genannten Eingangsspannungen bei  $f=1$  kHz und  $U_e=100$  mV<sub>ss</sub>. Vergleichen Sie die Ergebnisse mit den Überlegungen aus Punkt 2.5.

#### 4. Aufstellung der vorhandenen Bauelemente

Widerstände, fest [ $\Omega$ ]

10; 51 (2x); 100; 510; 1 k; 1,8 k; 10 k (3x); 20 k (2x); 51 k (3x); 100 k (3x); 220 k; 470 k; 1 M; 10 M

Widerstände, einstellbar [ $\Omega$ ]

1 k; 10 k; 100 k

Potentiometer [ $\Omega$ ]

220; 1 k (2x); 10 k; 100 k

Kondensatoren [F]

2,2 n (2x); 10 n (2x); 47 n (2x); 0,1  $\mu$  (2x); 1  $\mu$  (2x); 4,7  $\mu$  (2x); 220  $\mu$ ; 470  $\mu$

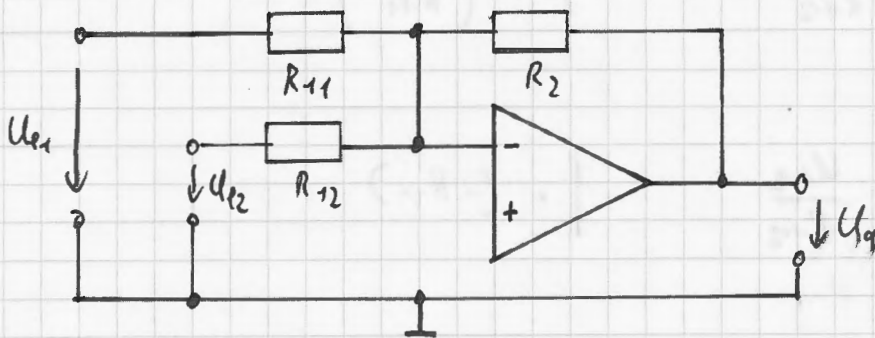
Operationsverstärker

$\mu$ A 741 (2x);



2.2.

geg:



$$U_a = \pm 9V$$

$$R_2 = 100k\Omega$$

ges:

a)  $R_{11}, R_{12}$

b)  $U_{e1\min}, U_{e1\max}$  bei  $U_{e2} = 0,4V_{eff}, f = 1kHz, U_{a1} = \pm 9V_{max}$

c) Funktionsgraph  $U_a(t)$  bei  $U_{e1\max}$  mit den berechneten Werten aus b).

Lösung:

$$a) A_1 = -\frac{R_2}{R_{11}} \quad ; \quad A_2 = -\frac{R_2}{R_{12}}$$

daraus folgt:

$$R_{11} = \frac{-R_2}{A_1} = \frac{-100k\Omega}{-2} \quad ; \quad R_{12} = \frac{-R_2}{A_2} = \frac{-100k\Omega}{-10}$$

$$\underline{\underline{R_{11} = 50k\Omega \approx 51k\Omega}}$$

$$\underline{\underline{R_{12} = 10k\Omega}} \quad \checkmark$$

b)

$$\frac{U_{a1}}{R_2} + \frac{U_{e1}}{R_{11}} + \frac{U_{e2}}{R_{12}} = 0 \quad \left| - \left( \frac{U_{e1}}{R_{11}} \right) \right.$$

$$-\frac{U_{e1}}{R_{11}} = \frac{U_a}{R_2} + \frac{U_{e2}}{R_{12}} \quad \left| \cdot (-R_{11}) \right.$$

$$U_{e1} = -R_{11} \cdot \left( \frac{U_a}{R_2} + \frac{U_{e2}}{R_{12}} \right)$$

Da bei negativen  $U_e$  ein positives  $U_a$ , aufgrund der Invertierung, rauskommt, ist für  $U_a = 9V$  und für  $U_{e2} = -\hat{U}_{e2}$  einzusetzen.

Daraus ergibt sich folgende Gleichung:

$$U_{e1 \text{ min}} = -R_{11} \left( \frac{U_a}{R_2} + \frac{-\hat{U}_{e2}}{R_{12}} \right) \quad \left| \hat{U}_{e2} = \sqrt{2} \cdot U_{e2 \text{ eff}} \right.$$

$$U_{e1 \text{ min}} = -R_{11} \left( \frac{U_a}{R_2} + \frac{-\sqrt{2} \cdot U_{e2 \text{ eff}}}{R_{12}} \right)$$

$$U_{e1 \text{ min}} = -51 \text{ k}\Omega \left( \frac{9V}{100 \text{ k}\Omega} + \frac{-\sqrt{2} \cdot 0,4 V_{\text{eff}}}{10 \text{ k}\Omega} \right)$$

$$\underline{\underline{U_{e1 \text{ min}} \approx -1,7V}} \quad \checkmark$$



Wiederum auf der Grundlage der Invertierung ergibt sich für  $U_{e1max}$  das  $U_a = -9V$  und  $\hat{U}_{e2} = \sqrt{2} U_{e2eff}$  einzusetzen sind.

$$U_{e1max} = -R_{11} \left( \frac{U_a}{R_2} + \frac{\sqrt{2} U_{e2eff}}{R_{12}} \right)$$

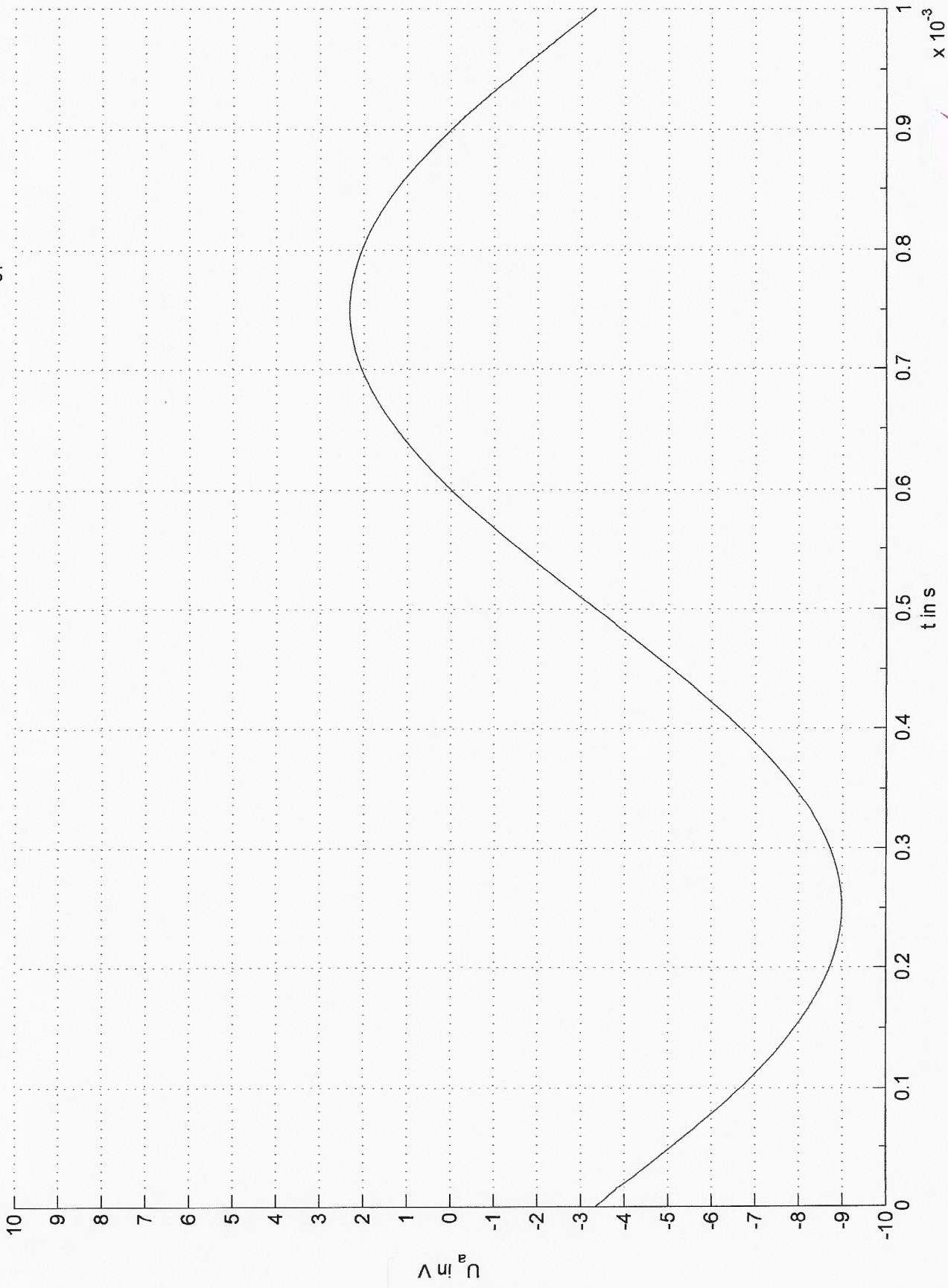
$$U_{e1max} = -51k\Omega \left( \frac{-9V}{100k\Omega} + \frac{\sqrt{2} \cdot 0,4V}{10k\Omega} \right)$$

$$\underline{\underline{U_{e1max} \approx 1,7V}}$$

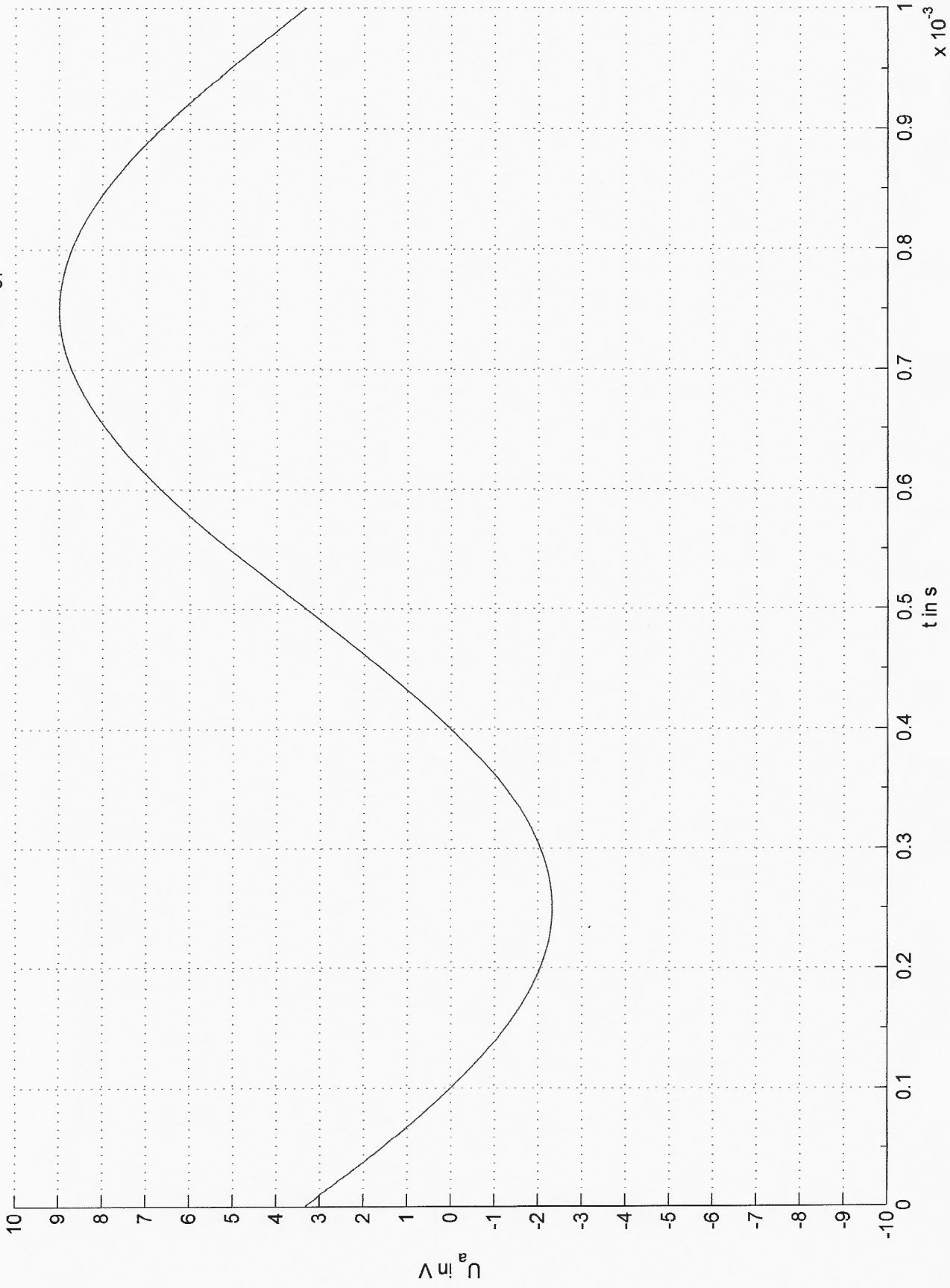
✓

- c) Mit Hilfe der beiden Graphen für die Funktionen  $U_a(t)$  kann man erkennen, dass die  $\pm 9V$  nicht überschritten werden.

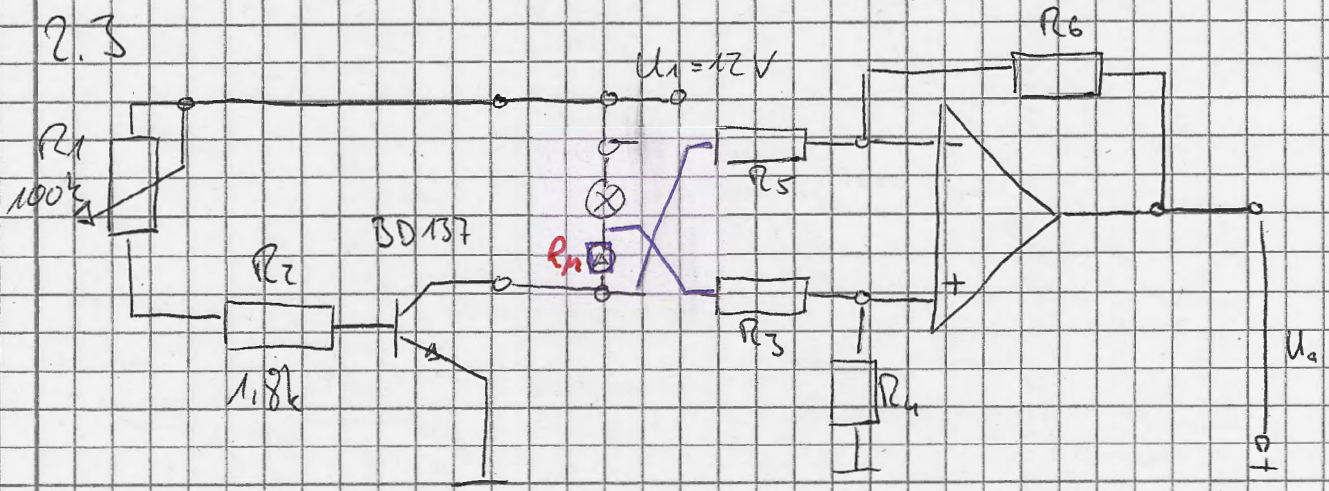
zeitlicher Verlauf der Ausgangsspannung bei maximaler Eingangsspannung  $U_{e1}$



zeitlicher Verlauf der Ausgangsspannung bei minimaler Eingangsspannung  $U_{e1}$







$$P_{La} = U_{La} \cdot I_{La}$$

$$3W = 12V \cdot I_{La} \rightarrow I_{La} = \frac{3W}{12V} = 0,25A$$

$$R_{La} = \frac{U_{La}}{I_{La}} = \frac{12V}{0,25A} = 48\Omega$$

$$\frac{U_a}{I_{La}} = 20 \frac{V}{A}$$

$$U_a = I_{La} \cdot 20 \frac{V}{A} = 0,25A \cdot 20 \frac{V}{A}$$

$$U_a = 5V$$

$$U_{c2} - U_{c1} = 12V \quad \frac{U_a}{U_{c2} - U_{c1}} = \frac{5V}{12V} \approx 0,42 = \checkmark$$

$V_1$ :

$$R_3 = R_4 \quad R_3 = 470k\Omega \quad R_4 \approx 200k\Omega$$

$$R_5 = R_6 \quad R_5 = 220k\Omega \quad R_6 \approx 82k\Omega$$

Bauteile: OPV:  $\mu A 741$   
 $R_3 = 470k\Omega$   $R_5 = 220k\Omega$   
 $R_4 = 100k\Omega + 100k\Omega$   
 $R_6 = 20k\Omega + 20k\Omega + 51k\Omega$

beide Kanäle müssen gleiche Verstärkung aufweisen.  
 z.B.  $R_5 = R_3 = 10k\Omega$   
 $R_6 = R_4 = 20k\Omega$   
 → oder einstellbarer Widerstand

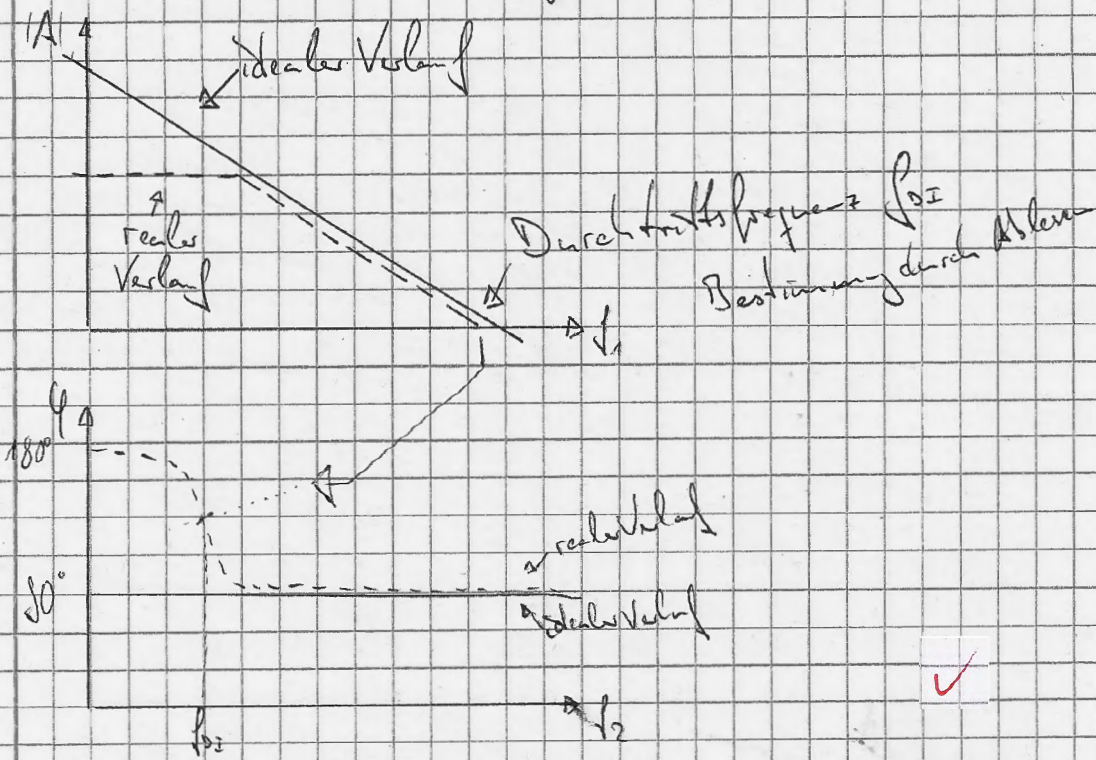
$V_2$ : Änderung zu  $V_1$ ?  
 $R_5 = 200k\Omega$   $R_4 \approx 84k\Omega$   
 ↑ über einstellbaren Widerstand / Potentiometer

für angegebenen Fall gilt:

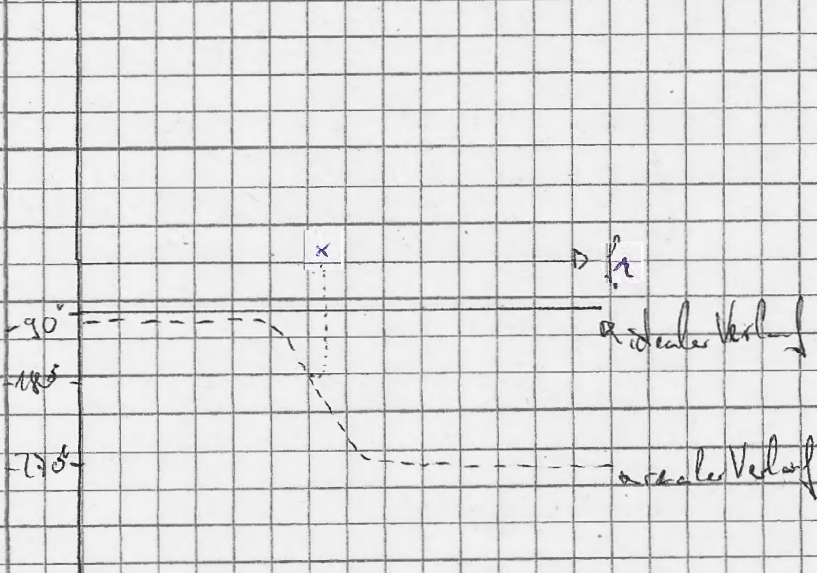
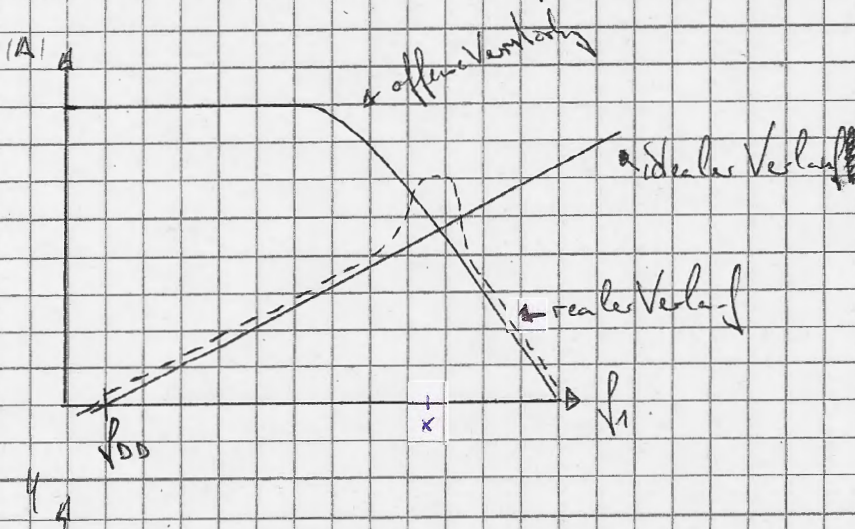
$$U_a = \frac{R_5}{R_6} (U_{c2} - U_{c1}) = \frac{R_5}{R_6} \cdot R_M \cdot I_{La}$$



2.4. # Invertierender Integrator



# Invertierender Differenzierer





2.4.

Bild 3:

$$\underline{A}(\omega) = \frac{U_a}{U_e} = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{\frac{1}{j\omega C}}{R_1} = -\frac{1}{j\omega C R_1}$$

$$\underline{A}(\omega) = j \frac{1}{\omega R_1 C} \Rightarrow |\underline{A}| = \frac{1}{\omega R_1 C}$$

$$|\underline{A}|_{f_{0,2}} = 1 \Rightarrow 1 = \frac{1}{2\pi f_{0,2} R_1 C} \Rightarrow f_{0,2} = \frac{1}{2\pi R_1 C} = \frac{1}{2\pi \cdot 16 \cdot 10^3 \cdot 10^{-8} \text{F}}$$

$$f_{0,2} \approx 16 \frac{1}{2} \text{ kHz} \checkmark \text{ bzw. } f_{0,2} = 15,91 \text{ kHz}$$

Bild 4:

$$\underline{A}(\omega) = \frac{U_a}{U_e} = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{R_1}{\frac{1}{j\omega C_1} + R_2} = -\frac{R_1}{-j\omega C_1 + R_2}$$

$$\underline{A}(\omega) = \frac{\frac{R_1}{R_2}}{j\omega C_1 R_2 + 1} = -\frac{\frac{R_1}{R_2} + j\omega C_1 R_1 R_2}{1 + \omega^2 C_1^2 R_2^2}$$

$$|\underline{A}(\omega)| = \sqrt{\left(\frac{\frac{R_1}{R_2}}{1 + \omega^2 C_1^2 R_2^2}\right)^2 + \left(\frac{\frac{R_1}{\omega C_1 R_2}}{1 + \omega^2 C_1^2 R_2^2}\right)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{\omega^2 C_1^2 R_1 R_2}{\omega^2 C_1^2 R_2^2 + 1}\right)^2 + \left(\frac{\omega C_1 R_1}{\omega^2 C_1^2 R_2^2 + 1}\right)^2}$$

$$= \sqrt{\frac{\omega^4 C_1^4 R_1^2 R_2^2}{\omega^4 C_1^4 R_2^4 + 2\omega^2 C_1^2 R_2^2 + 1} + \frac{\omega^2 C_1^2 R_1^2}{\omega^4 C_1^4 R_2^4 + 2\omega^2 C_1^2 R_2^2 + 1}}$$

$$= \sqrt{\frac{\omega^4 C_1^4 R_1^2 R_2^2 + \omega^2 C_1^2 R_1^2}{\omega^4 C_1^4 R_2^4 + 2\omega^2 C_1^2 R_2^2 + 1}}$$



$$|A(\omega_{00})| = 1$$

$$1 = \sqrt{\frac{\omega^4 C_1^4 R_1^2 R_2^2 + \omega^2 C_1^2 R_1^2}{\omega^4 C_1^4 R_2^4 + 2\omega^2 C_1^2 R_2^2 + 1}}$$

$$\omega^4 C_1^4 R_2^4 + 2\omega^2 C_1^2 R_2^2 + 1 = \omega^4 C_1^4 R_1^2 R_2^2 + \omega^2 C_1^2 R_1^2$$

$$\omega^4 C_1^4 R_2^4 + 2\omega^2 C_1^2 R_2^2 + 1 - \omega^4 C_1^4 R_1^2 R_2^2 - \omega^2 C_1^2 R_1^2 = 0$$

$$\omega^4 (C_1^4 R_2^4 - C_1^4 R_1^2 R_2^2) + \omega^2 (2C_1^2 R_2^2 - C_1^2 R_1^2) + 1 = 0$$

Fall  $R_2 = 0 \Omega$

$$\omega^4 (C_1^4 \cdot 0 - C_1^4 R_1^2 \cdot 0) + \omega^2 (2C_1^2 \cdot 0 - C_1^2 R_1^2) + 1 = 0$$

$$0 + \omega^2 (-C_1^2 R_1^2) = -1$$

$$\omega^2 = \frac{1}{C_1^2 R_1^2}$$

$$4\pi^2 \cdot f_{00}^2 = \frac{1}{C_1^2 R_1^2}$$

$$f_{00} = \sqrt{\frac{1}{4\pi^2 C_1^2 R_1^2}}$$

$$f_{00} = \frac{1}{2\pi C_1 R_1} = \frac{1}{2\pi \cdot 0,1 \mu\text{F} \cdot 10 \text{ k}\Omega}$$

$$f_{00} = \underline{\underline{160 \text{ Hz}}} = 159,1 \text{ Hz}$$

$$\text{Fall } R_2 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$\omega^4 (C_1^4 R_2^4 - C_1^4 R_1^2 R_2^2) + \omega^2 (2C_1^2 R_2^2 - C_1^2 R_1^2) + 1 = 0$$

$$\omega^4 ((0,1 \mu\text{F})^4 \cdot (1 \text{ k}\Omega)^4 - (0,1 \mu\text{F})^4 \cdot (10 \text{ k}\Omega)^2 \cdot (1 \text{ k}\Omega)^2) +$$

$$+ \omega^2 (2(0,1 \mu\text{F})^2 \cdot (1 \text{ k}\Omega)^2 - (0,1 \mu\text{F})^2 \cdot (10 \text{ k}\Omega)^2) + 1 = 0$$

$$\omega^4 (-9,9 \cdot 10^{-15}) + \omega^2 (-9,8 \cdot 10^{-7}) + 1 = 0$$

$$\omega^4 = x^2$$

$$-9,9 \cdot 10^{-15} x^2 - 9,8 \cdot 10^{-7} x + 1 = 0$$

$$x_1 = 1 \cdot 10^8 \rightarrow \omega^2 = x \rightarrow \omega = 1 \cdot 10^4$$

$$x_2 = -1 \cdot 10^8$$

$$2\pi f_{00} = 1 \cdot 10^3 \text{ Hz}$$

$$\underline{\underline{f_{00} \approx 160 \text{ Hz}}}$$



2.5.

Ausgangsspannung

a)

$$u_e(t) = \hat{u}_e \sin(\omega t)$$

$$u_a(t \geq 0) = -\frac{1}{RC} \int_0^t \hat{u}_e \sin(\omega \tilde{t}) d\tilde{t} + u_a(t=0) \quad | \quad u_a(t=0) = 0$$

$$u_a(t \geq 0) = -\frac{1}{RC} \cdot \hat{u}_e \int_0^t \sin(\omega \tilde{t}) d\tilde{t}$$

$$u_a(t \geq 0) = -\frac{1}{RC} \cdot \hat{u}_e \cdot \left[ -\frac{\cos(\omega \tilde{t})}{\omega} \right]_0^t$$

$$u_a(t \geq 0) = -\frac{1}{RC} \cdot \hat{u}_e \cdot \left[ -\frac{\cos(\omega t)}{\omega} - \underbrace{\frac{-\cos(\omega 0)}{\omega}}_{-\frac{1}{\omega}} \right]$$

$$u_a(t \geq 0) = -\frac{\hat{u}_e}{RC} \left( -\frac{\cos(\omega t)}{\omega} + \frac{1}{\omega} \right)$$

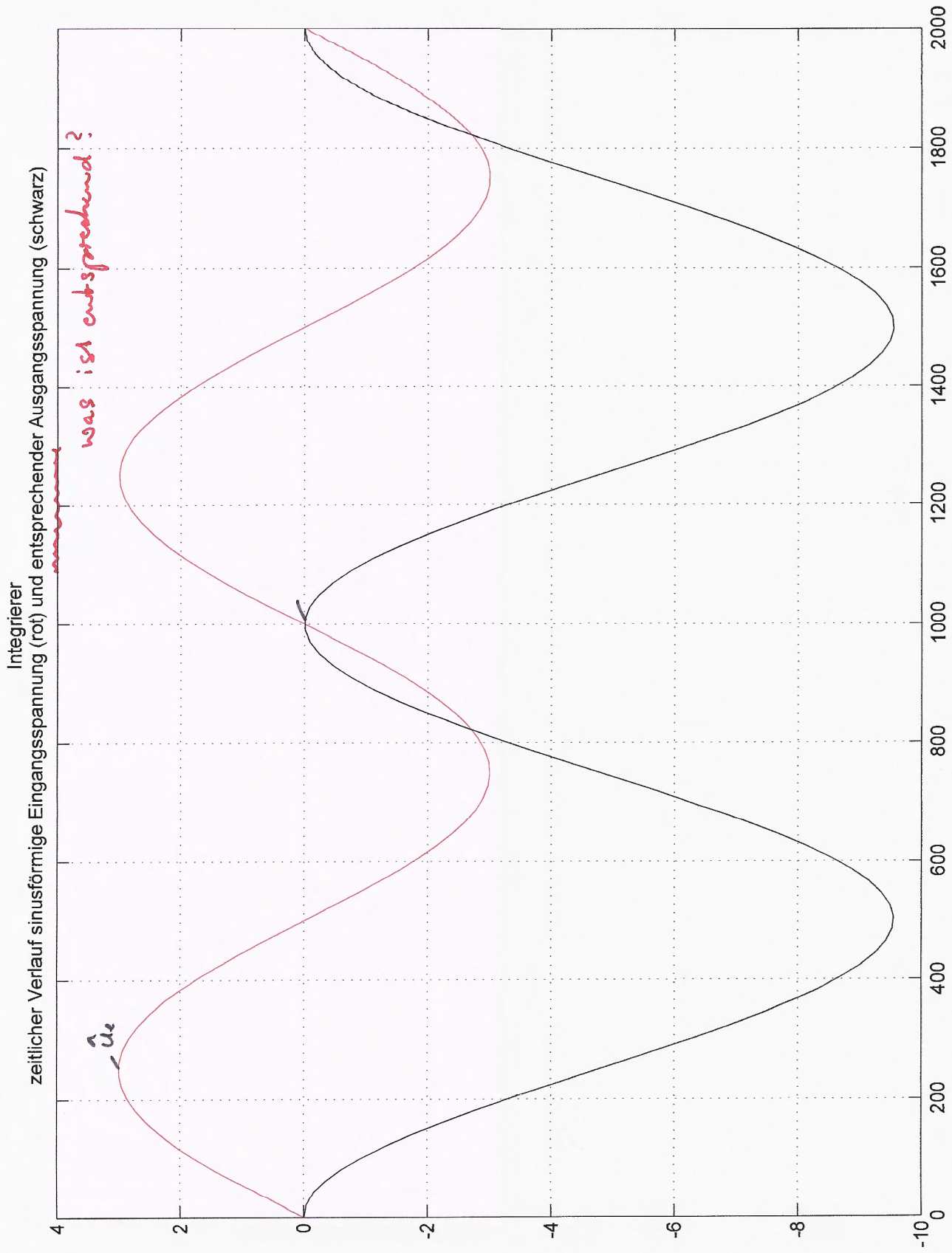
$$u_a(t \geq 0) = -\frac{\hat{u}_e}{RC} \left( \frac{1 - \cos(\omega t)}{\omega} \right)$$

$$u_a = -RC \frac{du_e(t)}{dt} = -RC \cdot \frac{d\hat{u}_e \sin(\omega t)}{dt}$$

$$u_a(t \geq 0) = -RC \hat{u}_e \cdot \frac{d\sin(\omega t)}{dt}$$

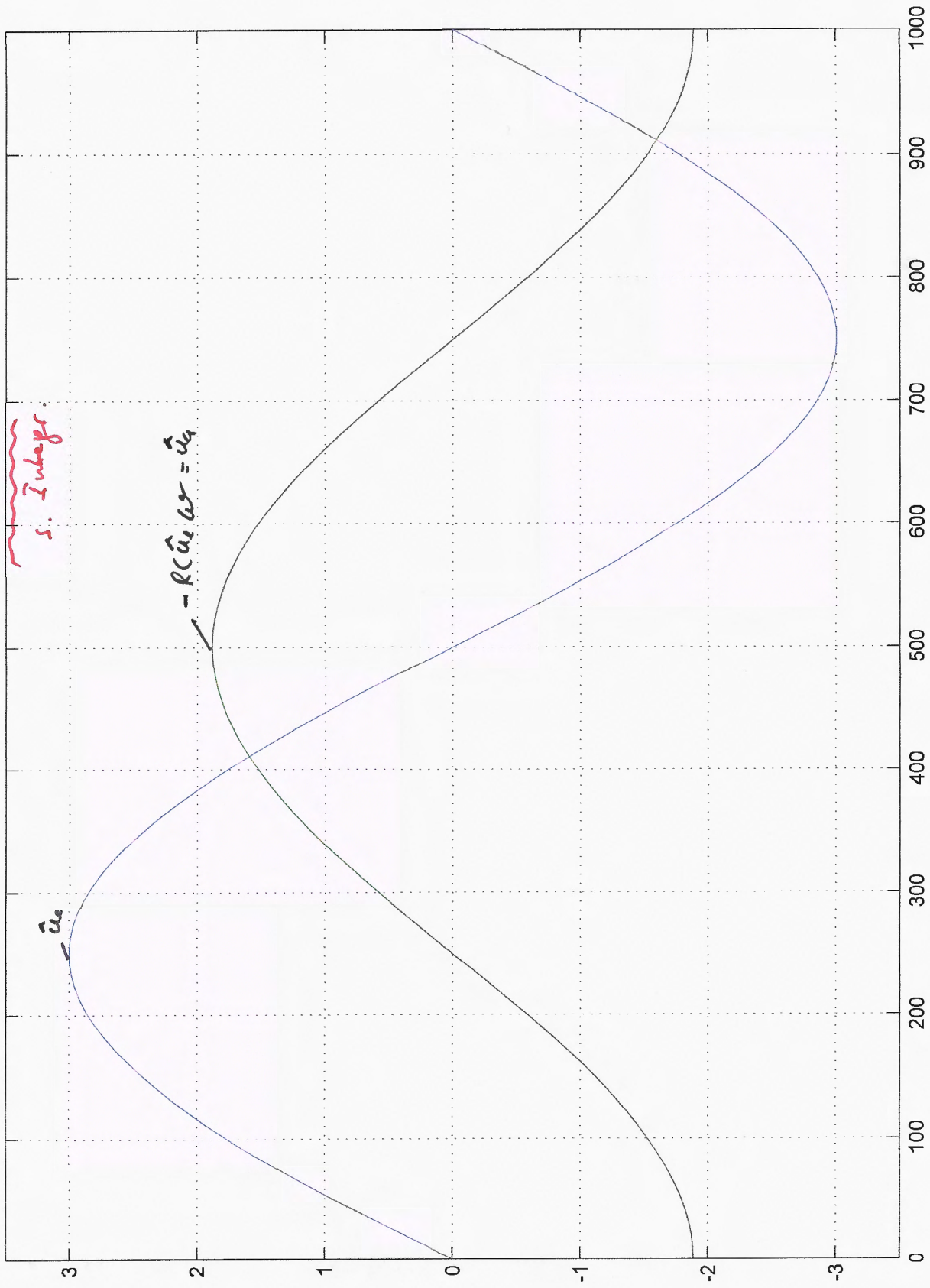
$$\underline{\underline{u_a(t \geq 0) = -RC \hat{u}_e \omega \cdot \cos(\omega t)}}$$





zeitlicher Verlauf sinusförmiger Eingangsspannung (blau) und entsprechenden Ausgangsspannung (grün)

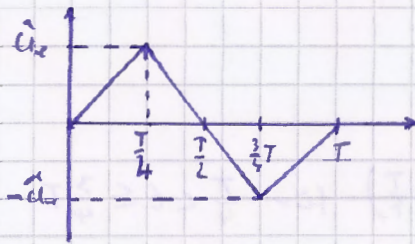
Differenzierer





2.5.

b)



$$u_{e1} = \frac{\hat{u}_e - 0}{\frac{T}{4} - 0} t + u = \frac{4\hat{u}_e}{T} t + u$$

$$u_{e1}(t=0) = 0 = \frac{4\hat{u}_e}{T} \cdot 0 + u \quad \leadsto \quad u = 0$$

$$\underline{u_{e1}(t) = \frac{4\hat{u}_e}{T} t \quad \text{für } 0 \leq t \leq \frac{T}{4}}$$

$$u_{e2}(t) = \frac{\hat{u}_e + \hat{u}_e}{\frac{T}{4} - \frac{3}{4}T} t + u = \frac{2\hat{u}_e}{-\frac{1}{2}T} t + u = -\frac{4\hat{u}_e}{T} t + u$$

$$u_{e2}(t = \frac{T}{2}) = 0 = -\frac{4\hat{u}_e}{T} \cdot \frac{T}{2} + u \quad \leadsto \quad u = 2\hat{u}_e$$

$$\underline{u_{e2}(t \geq 0) = -\frac{4\hat{u}_e}{T} t + 2\hat{u}_e \quad \text{für } \frac{T}{4} < t \leq \frac{3}{4}T}$$

$$u_{e3}(t \geq 0) = \frac{-\hat{u}_e - 0}{\frac{3}{4}T - \frac{1}{4}T} t + u = \frac{4\hat{u}_e}{T} t + u$$

$$u_{e3}(t = T) = 0 = \frac{4\hat{u}_e}{T} T + u \quad \leadsto \quad u = -4\hat{u}_e$$

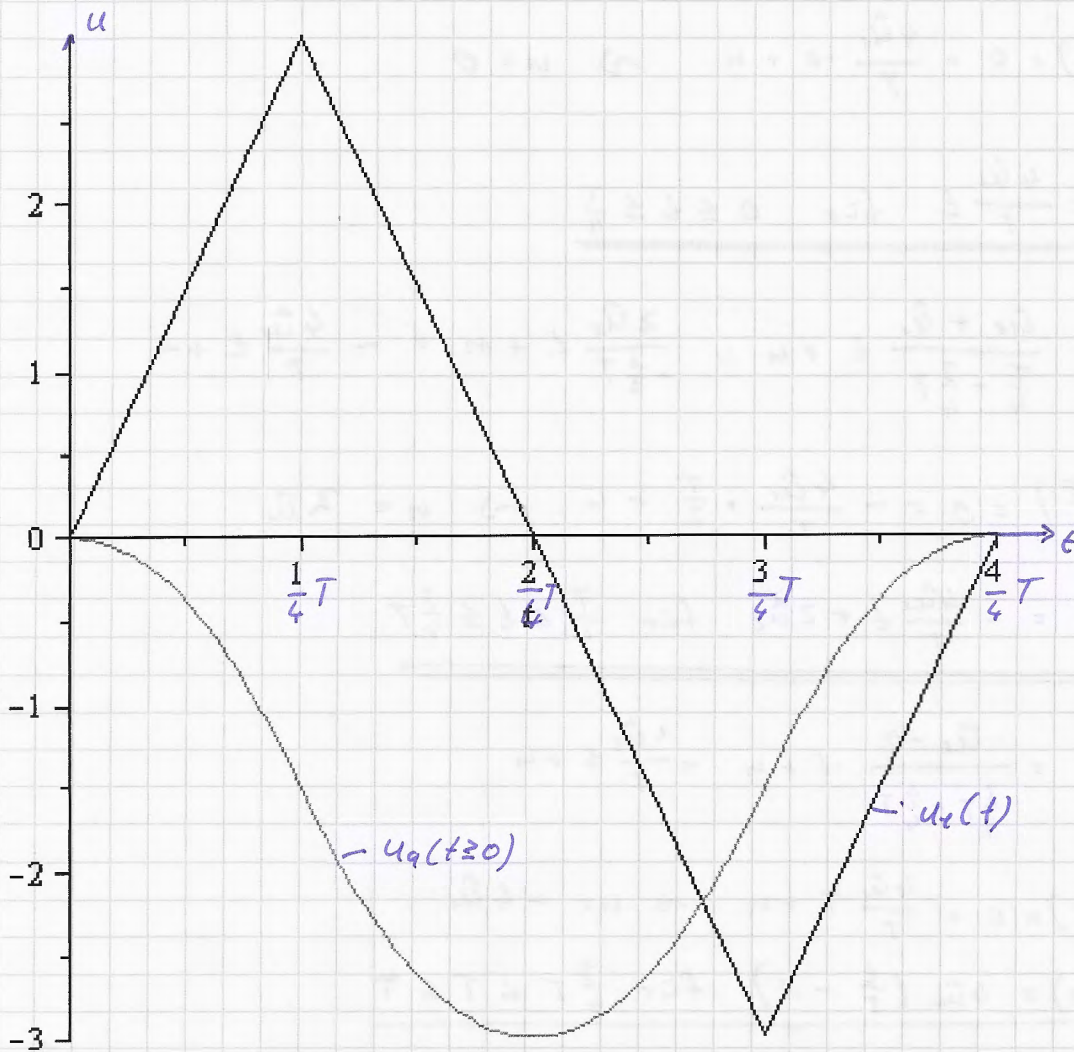
$$\underline{u_{e3}(t \geq 0) = 4\hat{u}_e \left(\frac{t}{T} - 1\right) \quad \text{für } \frac{3}{4}T < t \leq T}$$

$$u_e(t) = \begin{cases} \frac{4\hat{u}_e}{T} t & \text{für } 0 \leq t \leq \frac{T}{4} \\ -\frac{4\hat{u}_e}{T} t + 2\hat{u}_e & \text{für } \frac{T}{4} < t \leq \frac{3}{4}T \\ 4\hat{u}_e \left(\frac{t}{T} - 1\right) & \text{für } \frac{3}{4}T < t \leq T \end{cases}$$



Integrieren:

$$u_a(t \geq 0) = \begin{cases} \frac{2\hat{u}_e}{RCT} t^2 & \text{für } 0 \leq t \leq \frac{T}{4} \\ \frac{2\hat{u}_e}{RCT} t^2 - \frac{2\hat{u}_e}{RC} t + u_a(t = \frac{T}{4}) & \text{für } \frac{T}{4} < t \leq \frac{3}{4}T \\ -\frac{2\hat{u}_e}{RCT} t^2 + \frac{4\hat{u}_e}{RC} t + u_a(t = \frac{3}{4}T) & \text{für } \frac{3}{4}T < t \leq T \end{cases}$$

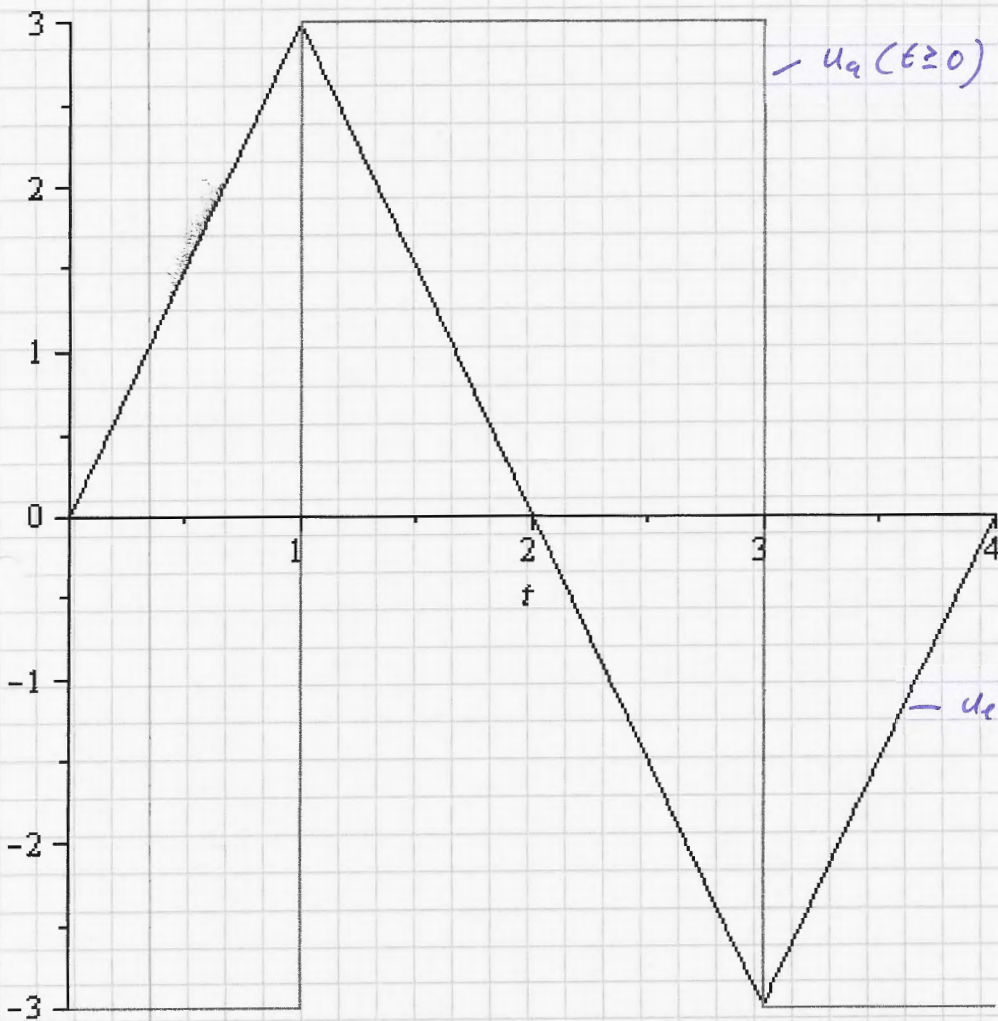




2.5.

b) Differenzier

$$u_q(t \geq 0) = \begin{cases} -\frac{4\hat{u}_e RC}{T} & \text{für } 0 \leq t \leq \frac{1}{4}T \\ \frac{4\hat{u}_e RC}{T} & \text{für } \frac{1}{4}T < t \leq \frac{3}{4}T \\ -\frac{4\hat{u}_e RC}{T} & \text{für } \frac{3}{4}T < t \leq T \end{cases}$$





2.5.

c)

$$u_e(t) = \begin{cases} \hat{u}_e & \text{für } 0 \leq t \leq T/2 \\ -\hat{u}_e & \text{für } T/2 < t \leq T \end{cases}$$

$$u_{a1}(t \geq 0) = -\frac{1}{RC} \int_0^t \hat{u}_e d\tilde{t} + u_a(t=0) \quad \left| \quad u_a(t=0) = 0 \right.$$

$$u_{a1}(t \geq 0) = -\frac{\hat{u}_e}{RC} \int_0^t d\tilde{t} = -\frac{\hat{u}_e}{RC} \left[ \tilde{t} \right]_0^t = -\frac{\hat{u}_e}{RC} (t-0)$$

$$u_{a1}(t \geq 0) = -\frac{\hat{u}_e}{RC} t$$

$$u_{a2}(t \geq 0) = -\frac{1}{RC} \int_0^t [-\hat{u}_e] d\tilde{t} + u_a(t = \frac{T}{2}) \quad \left| \quad u_a(t = \frac{T}{2}) = -\frac{\hat{u}_e}{RC} \cdot \frac{T}{2} \right.$$

$$u_{a2}(t \geq 0) = -\frac{-\hat{u}_e}{RC} \int_0^t d\tilde{t} + \frac{\hat{u}_e \cdot T}{RC \cdot 2} = \frac{\hat{u}_e}{RC} t - \frac{\hat{u}_e T}{2RC}$$

$$u_{a2}(t \geq 0) = \frac{\hat{u}_e}{RC} \left( t - \frac{T}{2} \right) \quad \text{aufgrund der Verschiebung}$$

um  $\frac{T}{2}$  ergibt sich folgendes:

$$u_{a2}(t \geq 0) = \frac{\hat{u}_e}{RC} \left[ t - \left( \frac{T}{2} + \frac{T}{2} \right) \right] = \frac{\hat{u}_e}{RC} (t - T)$$

$$u_a(t \geq 0) = \begin{cases} -\frac{\hat{u}_e}{RC} t & \text{für } 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \\ \frac{\hat{u}_e}{RC} (t - T) & \text{für } \frac{T}{2} < t \leq T \end{cases}$$

---

---

$$u_a(t \geq 0) = -RC \frac{du_e(t)}{dt} = 0$$

---

---

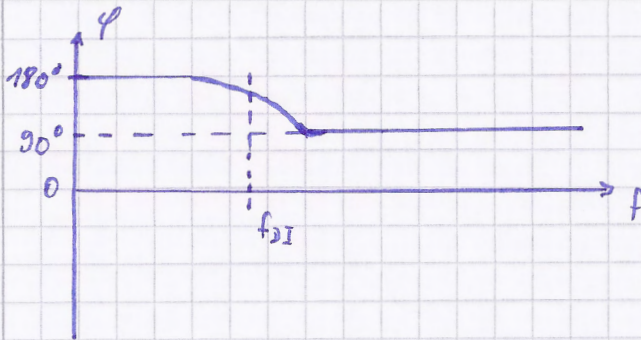




- $u_e(t)$
- $u_a(t)$  beim Integrieren ✓
- $u_d(t)$  beim Differenzieren

2.5.

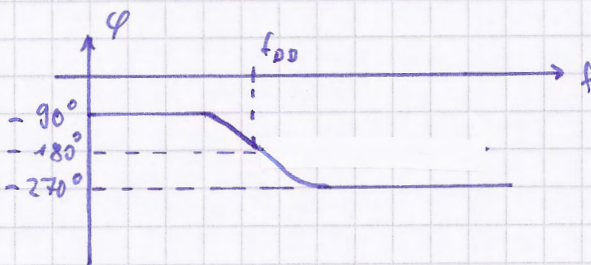
### Phasengang Integriertes



$$f_{0I} = \frac{1}{2\pi RC}$$



### Phasengang Differenziertes

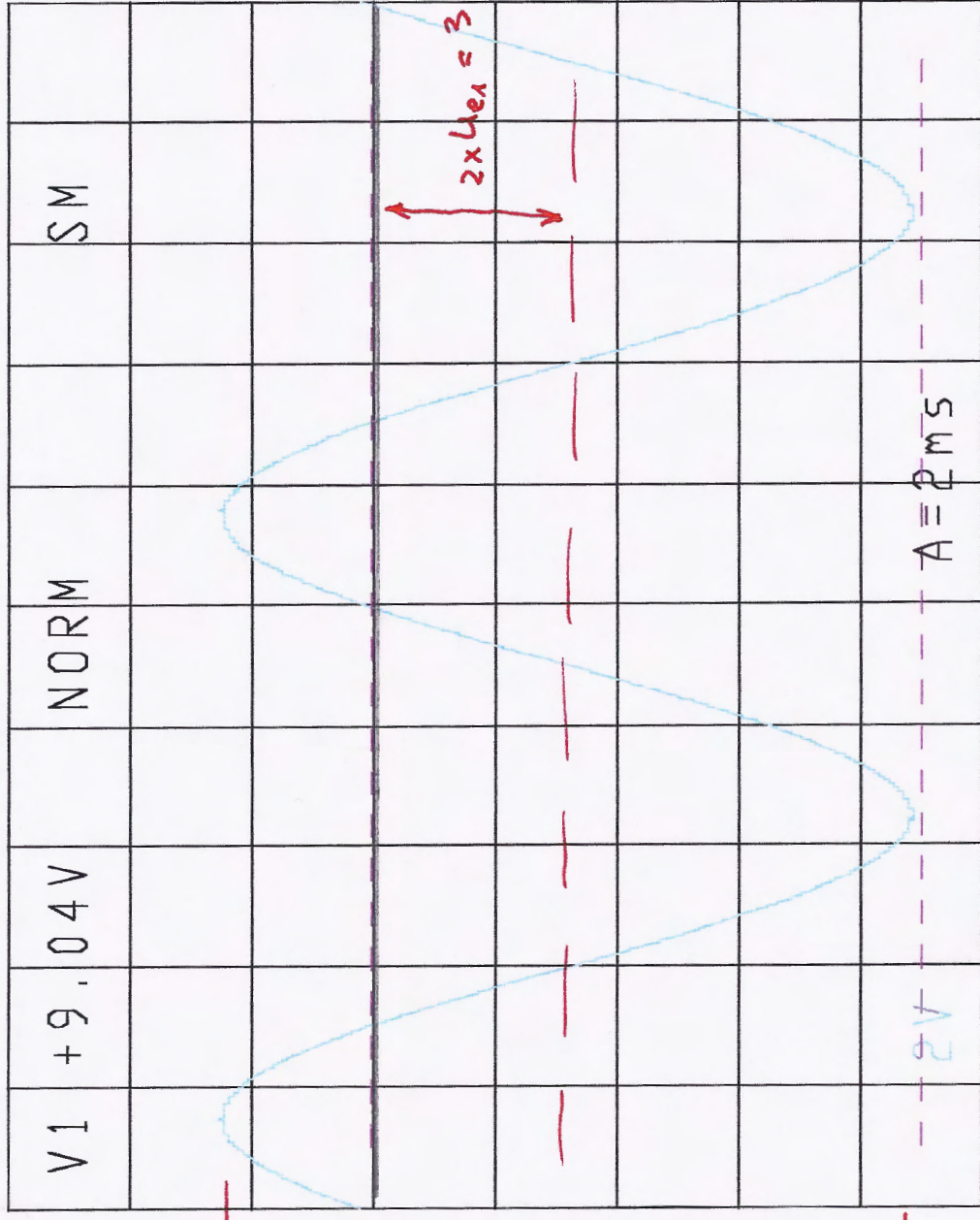


$$f_{0D} = \frac{1}{2\pi RC}$$





3.1.



$U_0 = 10 \times U_{k2} = 1.85V$

$\rightarrow 0 \text{ Linie } | \text{ ground}$

$2 \times U_{k1} = 3.44V$

$\rightarrow U_{k1} = 9V$

- Die Einzeldaten sind klar zu erkennen: Das Sinus und die Verschiebung durch die Steigung.
- Sollte der berechnete Bereich von  $U_{k1}$  überschritten werden würde die Sinus- und abgezeichnet.
- Da noch zuletzte Werte für  $U_{k1}$  liegen zwischen  $-2,96V$  und  $1,85V$ . In diesem Bereich USB keine Selbstgenügsamkeit ✓



3.3. Vergleich der Kurvenverläufe dem Integrator zugeordnet.  
Theoretischer Verlauf und der Verlauf der Messpunkte stimmen überein.  
Eine Abweichung tritt nur durch die Begrenzung des offenen Verstärkers  
in einem gewissen Bereich stellen die Werte jedoch schon = Abfall.

Durchtrittsfrequenz gemessen und errechnet stimmen annähernd  
überein.  $f_{\text{errechnet}} \approx 16 \text{ kHz}$   $f_{\text{gemessen}} \approx 15,8 \text{ kHz}$

Vergleich Kurvenform. Es lassen sich Übereinstimmungen in  
erhöhtem Frequenzbereich feststellen und damit die Vorüberlegung  
bestätigen.

Der Verlauf des Ausgangs  $\approx$  entspricht in etwa dem gedachten Wert  
aus der Vorüberlegung (Abb. 2.6) ✓

3.4. Beim Vergleich der Durchtrittsfrequenzen gemessen und  
errechnet erkennt man eine annähernde Ähnlichkeit. Werte  
der gemessenen Wert höher liegt:  $f_{\text{errechnet}} = 160 \text{ kHz}$   $f_{\text{gemessen}} = 145 \text{ kHz}$

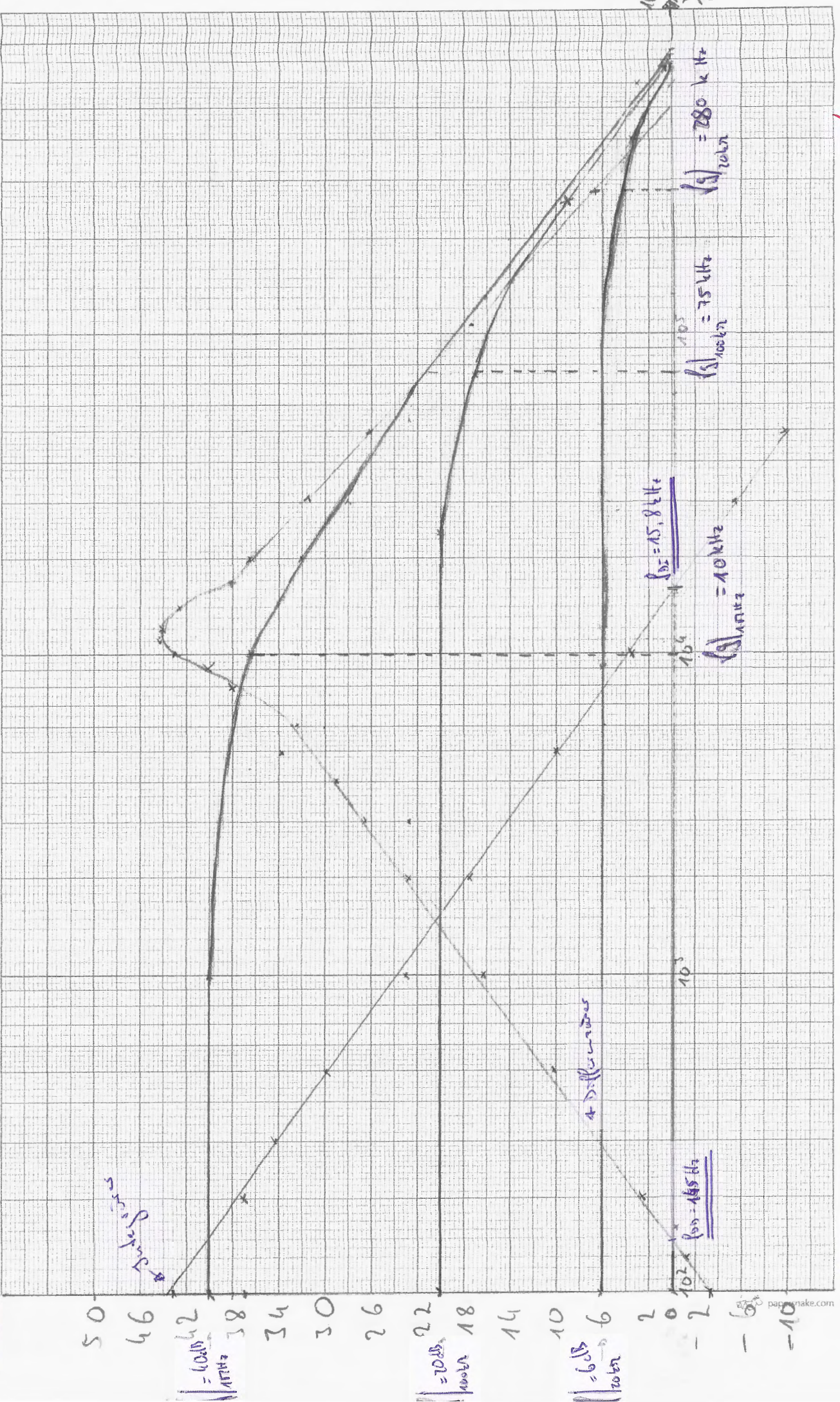
Im Vergleich mit den Messwerten aus dem "Versuch, dyn. Verhalten"  
erkent man eine annähernde Ähnlichkeit der Transitfrequenz  
des Verstärkers bei  $17 \text{ kHz}$  mit dem Schätzwert des Differenzers <sup>im d-plot-Verfahren</sup>, genau so wie  
 $f_{180^\circ} = \text{Frequenzgang}$

\*  $\Delta$ -Spang

Der Widerstandswert wurde mit  $148 \Omega$  ermittelt. Die Form ✓  
der Ausgangsspannung entspricht ~~einem~~ <sup>Resistor</sup> ~~einem~~ Rechteck,  
genauer ein symm. Rechteck mit  $\varphi = -90^\circ$ . Sollte  $R > 148 \Omega$   
sein runden sich die Ecken des Rechteckes ab  $\pi$ . Sollte  
 $R < 148 \Omega$  sein entsteht eine Überschwängung.



3.3.  
A/dB



$f_{(0.7)} = 0.67 \text{ kHz}$   
 $f_{(0.75)} = 0.72 \text{ kHz}$   
 $f_{(0.71)} = 0.75 \text{ kHz}$   
 $f_{(0.7)} = 0.71 \text{ kHz}$



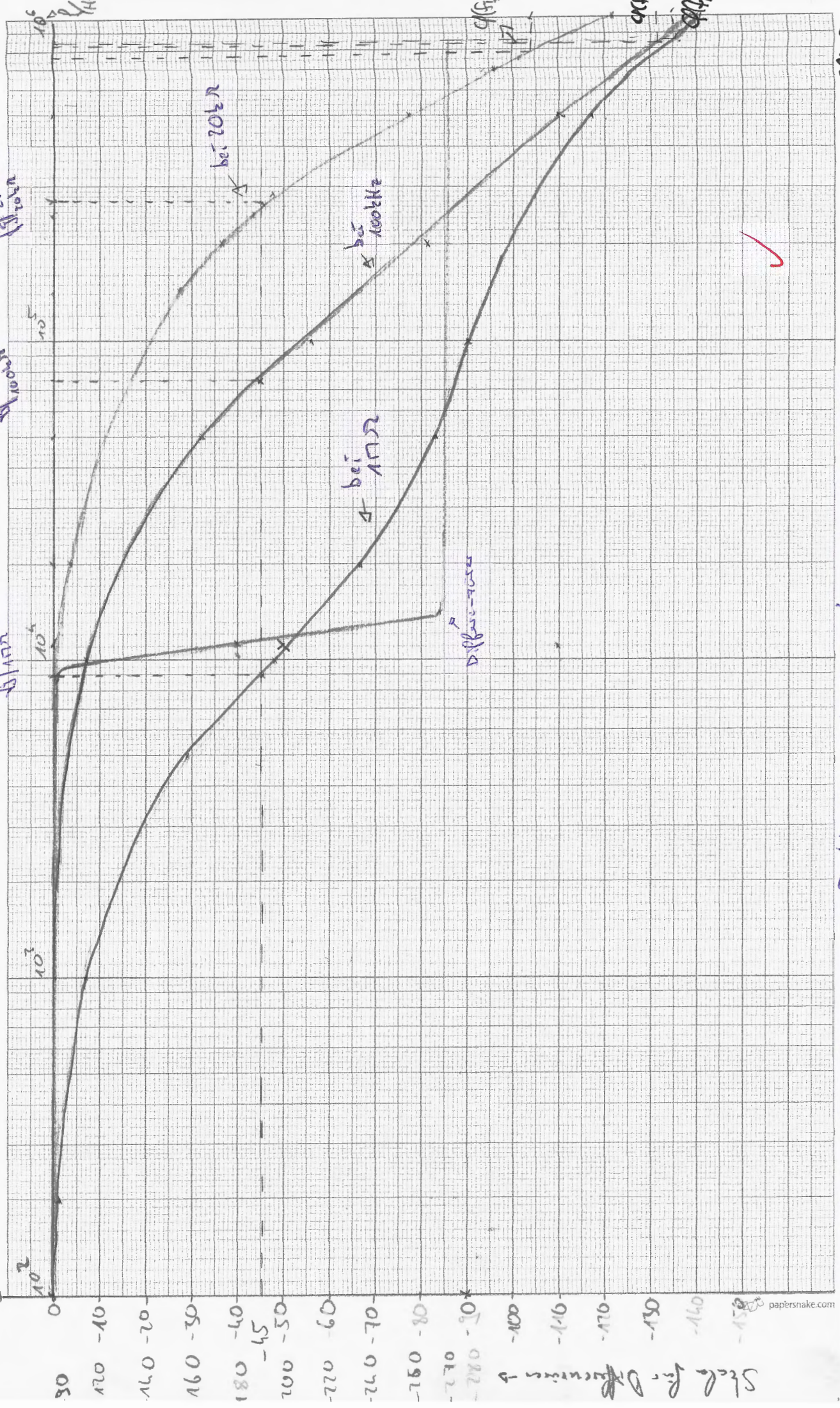


3. h.  $\varphi$

$\frac{1}{10} = 0.1$

$f = 75.4 \text{ kHz}$

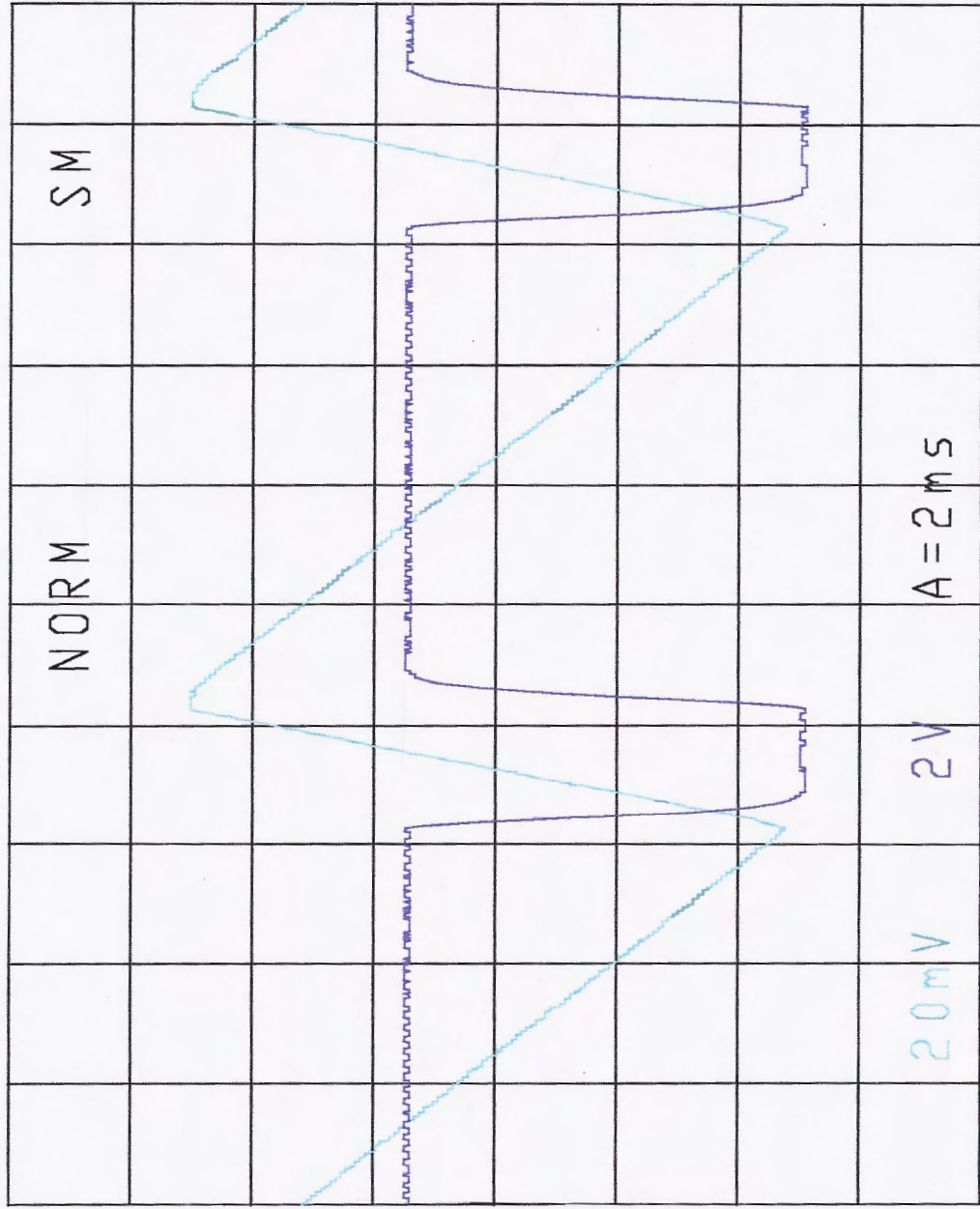
$f = 230.2 \text{ kHz}$



Des Vergleich der Frequenzen des Punktes 3.3. und 3.4. zeigt annähernde Gleichheit.  $\varphi(f_1) = -104^\circ$  ;  $\varphi(f_2) = -135^\circ$   
 $\varphi(f_1) = -131^\circ$  ;  $\varphi(f_2) = -135^\circ$

Skala für Diffusionsverzögerung





Es handelt sich um eine invertierende Differenzier. Ein negativer Anstieg wird als pos. Gerade dargestellt. Bei einem pos. Anstieg ist es umgekehrt. Der Flächenwechsel des Rechtecks fällt genau auf den Anstiegszeitwechsel des Dreiecks. Bei der Untersuchung der Kurvenform stellt man fest, dass sie mit der Vorbedingung übereinstimmen.

Änderung des Festverhältnisses  
 → unterschiedl.  
 Anstiegszeit der  
 Dreiecke spannung  
 bzw. unterschiedl.  
 Amplituden für  
 pos. u. neg. U<sub>A</sub>