

**Der Operationsverstärker**  
nichtlineare Schaltungen

Studiengang: <u>KMT</u>	Datum: <u>29.11.2011</u>
Set: <u>5.09</u> Platz: <u>4</u>	<u>1.7</u>
Teilnehmer: <u>Michael Goldbuch, Jürgen Döflinger</u>	<u>30.11.11</u> <u>Dalme</u>

**Zielstellung**

- Kennenlernen der Eigenschaften von Komparator und Schmitt-Trigger
- Bestimmung der Unterschiede beider Schaltungen

**1. Begriffe und Formelzeichen**

Komparator, Schmitt-Trigger, Referenzspannung, Tastverhältnis, Speicherzeit, Anstiegszeit, Abfallzeit, Triggerpunkt, Schalthysterese

$t_d, t_r, t_f, U_{eein}, U_{eaus}$

**2. Versuchsvorbereitung**

- 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.
- Entwerfen Sie das Schaltbild eines invertierenden Komparators. Bei entsprechender Aussteuerung liefert er am Ausgang Rechteckimpulse. Durch eine Referenzspannung kann dieser Impuls im Tastverhältnis geändert werden. Die Sättigungsspannung am Ausgang beträgt  $\pm 12$  V. Entwerfen Sie die Funktion  $U_a=f(t)$  für die Tastverhältnisse ( $t_{ein};t_{aus}$ ) 1:4, 1:1 und 4:1. Zeichnen Sie zwei Perioden mit  $T=2$  ms im Maßstab 0,4 ms/cm und 4 V/cm. Bestimmen Sie grafisch den Gleichspannungsanteil am Ausgang. Zeichnen Sie diesen als Funktion  $U=f(t)$  in die Diagramme ein.
- Machen Sie sich mit dem Prinzip der Pulslängenmodulation vertraut. Am invertierenden Eingang eines Komparators liegt eine positive Sägezahnspannung und am nichtinvertierenden Eingang eine veränderbare Gleichspannung. Zeichnen Sie das Diagramm der Sägezahnspannung mit zwei willkürlich eingezeichneten Gleichspannungen und darunter zeitgleich das Diagramm der Ausgangsspannung. Diskutieren Sie das Ergebnis. Entwerfen Sie eine Meßschaltung für eine Pulslängenmodulation. Dabei sollen die Eingangs- und die Ausgangsspannung am Oszilloskop dargestellt werden.
- Entwerfen Sie das Schaltbild eines nichtinvertierenden Schmitt-Triggers. Tragen Sie alle interessierenden elektrischen Größen ein. Leiten Sie die Gleichungen zur Berechnung der Ein- und Ausschaltspannung und für die Hysterese her. Diskutieren Sie den Einfluß der Widerstandskombination auf die Spannungen. Bei einem Schmitt-Trigger betragen  $U_{amax}=+10$  V und  $U_{amin}=-10$  V. Das Verhältnis  $R1:R2$  beträgt 1:10. Berechnen Sie  $\Delta U_e$ ,  $U_{eein}$  und  $U_{eaus}$  für  $U_{ref}=(-3$  V; 0 V; +2 V). Stellen Sie die Funktionen  $U_a=f(U_e)$  für alle drei Referenzspannungen in einem Diagramm dar.
- Entwerfen Sie eine Meßschaltung zur Ermittlung der statischen Größen eines nichtinvertierenden Schmitt-Triggers. Erzeugen Sie die Eingangsspannung und die Referenzspannung durch je einen

einstellbaren Spannungsteiler aus der Betriebsspannung. Gemessen werden sollen die Eingangs-, Referenz- und Ausgangsspannung.

Ergänzen Sie das Schaltbild für eine Ansteuerung mit sinusförmiger Wechselspannung, wobei die Eingangs- und Ausgangsspannung auf dem Oszilloskop abgebildet werden sollen.

Zeichnen Sie die Funktion  $U_e=f(t)$  einer sinusförmigen Eingangsspannung und zeitgleich darunter die Ausgangsspannung des Schmitt-Triggers für  $U_{ref}=0$  V.

### 3. Versuchsdurchführung und -auswertung

#### 3.0. Vorbemerkung

Zur Spannungsversorgung der Operationsverstärker stellen Sie eine Betriebsspannung von  $\pm 12$  V ein.

#### 3.1. Pulslängenmodulation mit Komparator

Bauen Sie den Komparator nach Ihrem Entwurf aus Punkt 2.3. auf. Steuern Sie diesen mit einer positiven Sägezahnspannung mit  $U=1$  V<sub>SS</sub> und  $f=500$  Hz an. Stellen Sie mit Hilfe der Referenzspannung das Tastverhältnis ( $t_{ein}:t_{aus}$ ) der Ausgangsspannung auf 1:1 ein. Bilden Sie die Eingangs- und Ausgangsspannung auf dem Oszilloskop ab und plotten Sie die Darstellung. Wie groß ist bei dieser Einstellung der Gleichnungsmittelwert der Ausgangsspannung? Kennzeichnen Sie den Wert in der geplotteten Darstellung. Begründen Sie eine eventuelle Abweichung vom erwarteten Wert.

Verändern Sie die Referenzspannung so, daß das Tastverhältnis der Ausgangsspannung 1:4 beträgt und plotten Sie auch diese Darstellung. Bestimmen und kennzeichnen Sie auch für diesen Fall den Mittelwert der Ausgangsspannung. Diskutieren Sie die Unterschiede zwischen beiden Einstellungen.

Nehmen Sie Meßwerte zur Darstellung der Funktion  $U_a=f(U_{ref})$  (Gleichanteil der Ausgangsspannung) für den Bereich  $-U_{asat} \leq U_a \leq +U_{asat}$  auf. Wiederholen Sie die Messung für  $U_{off} = -0,5$  V (DC-Anteil der Sägezahnspannung) und stellen Sie beide Funktionen in einem Diagramm dar. Erläutern Sie die Unterschiede zwischen beiden Funktionen.

#### 3.2. Schmitt-Trigger, statische Untersuchung

Bauen Sie die Schaltung des Schmitt-Triggers nach Ihrem Entwurf aus Punkt 2.5. mit  $U_{ref}=0$  V auf. Ermitteln Sie die Funktionen  $U_a=f(U_e)$  für folgende Widerstandskombinationen (R2 als Rückkopplungswiderstand):

- a)  $R1=10$  k $\Omega$ ;  $R2=10$  k $\Omega$
- b)  $R1=10$  k $\Omega$ ;  $R2=100$  k $\Omega$ .

Stellen Sie die Funktionen in einem geeigneten Diagramm dar. Ermitteln Sie jeweils grafisch die Hysteresespannung  $\Delta U_e$ .

Stellen Sie für die Widerstandskombination b) die Funktionen  $U_a=f(U_e)$  für die Referenzspannungen  $U_{ref}=-3$  V und  $U_{ref}=+2$  V in dem Diagramm dar. Diskutieren Sie die Darstellung und vergleichen Sie diese mit den im Punkt 2.4. berechneten Werten.

### 3.3. Anwendungbeispiele nichtlinearer Schaltungen

#### 3.3.1. Signalformung

Nichtlineare Schaltungen können u.a. dazu verwendet werden, gestörte Signale wie sie z.B. bei der Datenübertragung auftreten können, wieder zu formen. Dazu ist im Funktionsgenerator unter der Kurvenform ARB, Speicherplatz 1, eine gestörte Rechteckspannung abgelegt. Stellen Sie für diese Kurvenform eine Frequenz von 200 Hz und eine Amplitude von  $5 V_{SS}$  ein.

Wählen Sie eine geeignete Schaltung, mit der aus dem gestörten Signal wieder eine rechteckförmige Spannung mit einer Frequenz von 200 Hz geformt wird. Skizzieren Sie die von Ihnen gewählte Schaltung und notieren Sie die eingestellten Parameter. Begründen Sie die Auswahl der Schaltung.

#### 3.3.2. Lichtschranke

Bauen Sie die Schaltung nach Bild 1 auf. Der optimale Abstand zwischen Fototransistor und Lampe ist das jeweils mittlere Loch zweier benachbarter Steckfelder. Betreiben Sie den OV zunächst als Komparator, indem Sie den Widerstand R2 entfernen.

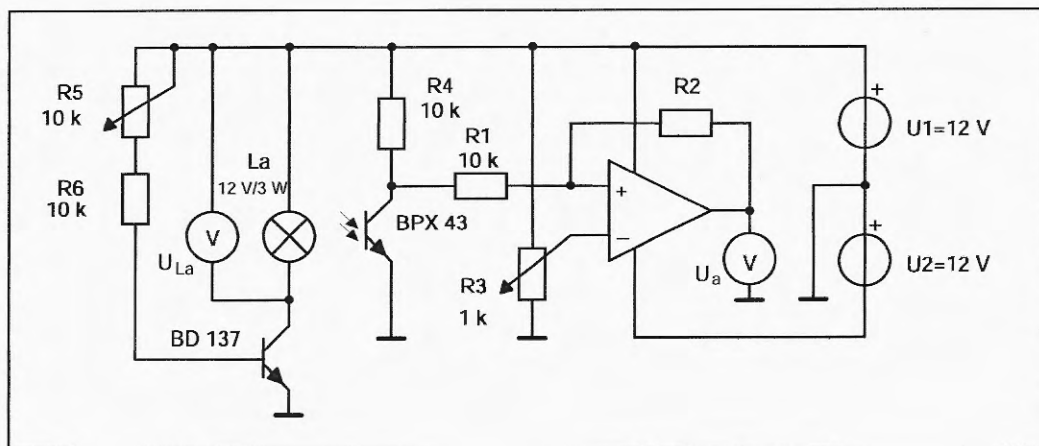
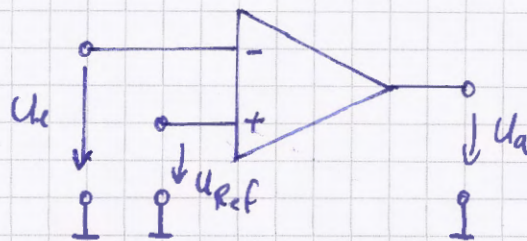
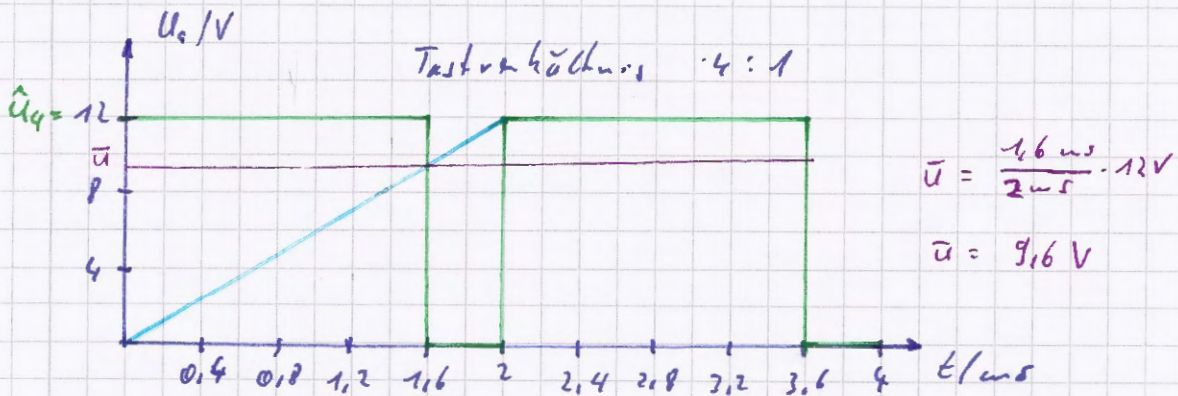
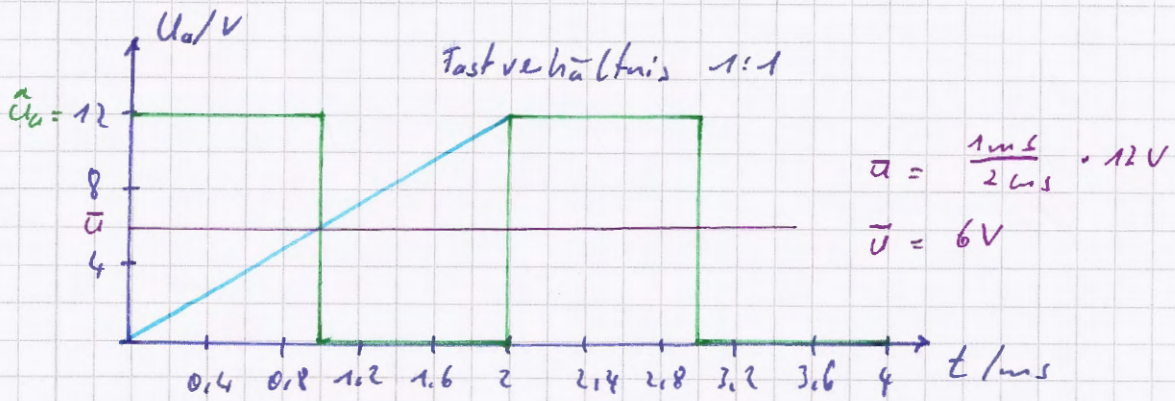
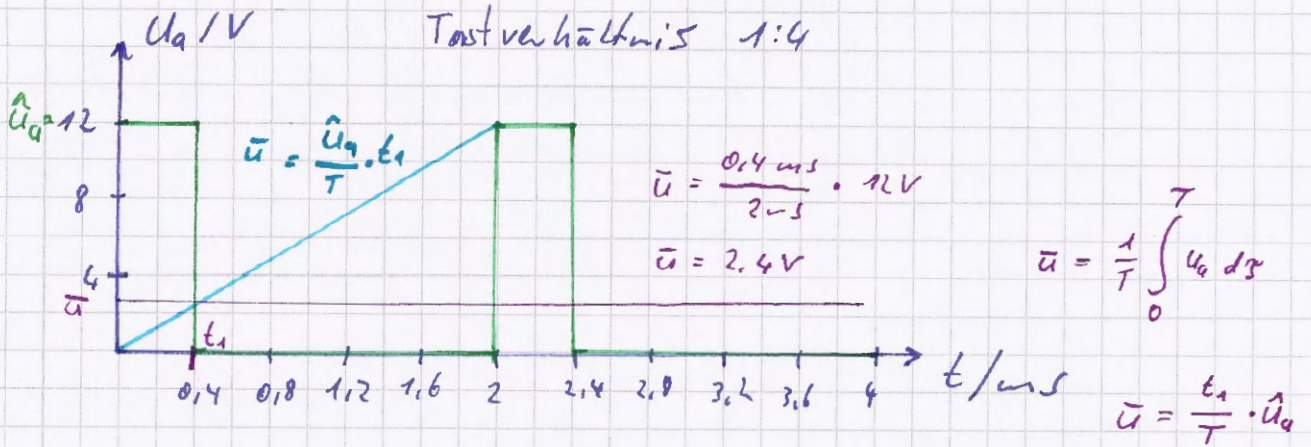


Bild 1: Meßschaltung zum Komparator und Schmitt-Trigger

Stellen Sie mit R3 am invertierenden Eingang des OV eine Referenzspannung von +5 V ein. Bestimmen Sie die Lampenspannung, bei der die Ausgangsspannung auf den jeweils anderen Maximalwert schaltet. Wiederholen Sie die Messung für den Betrieb als Schmitt-Trigger mit  $R2=51 k\Omega$  und  $R2=100 k\Omega$ . Stellen Sie die Meßwerte tabellarisch zusammen und erläutern Sie deren praktische Bedeutung.

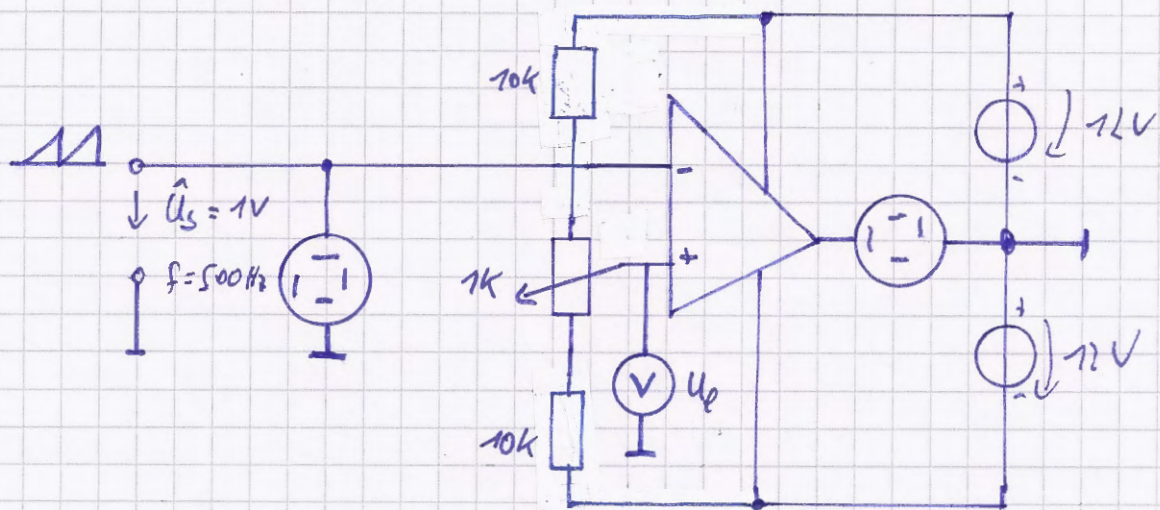
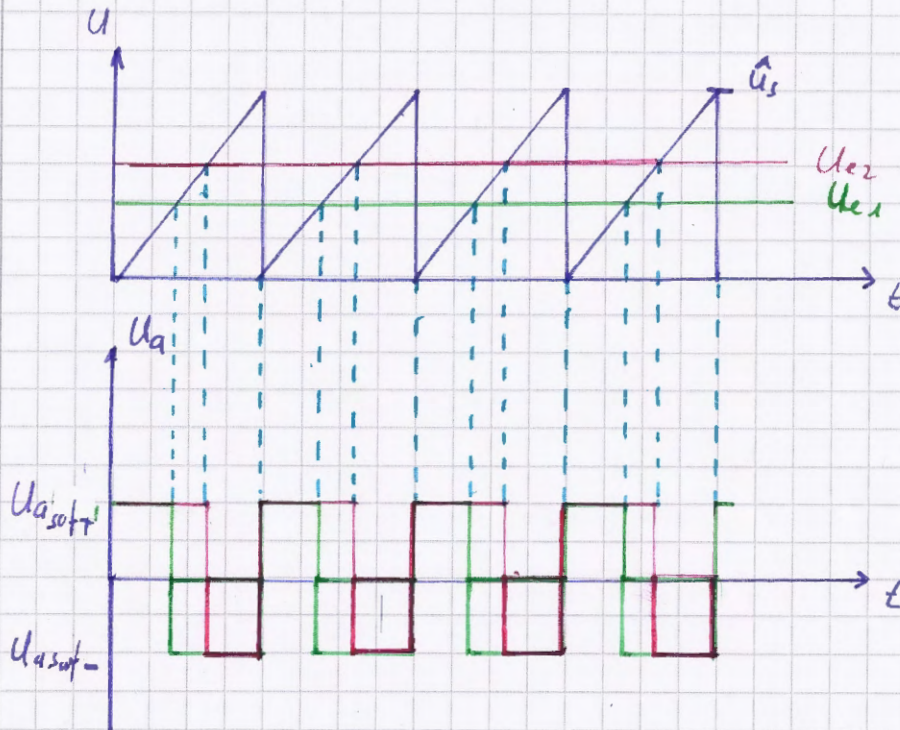
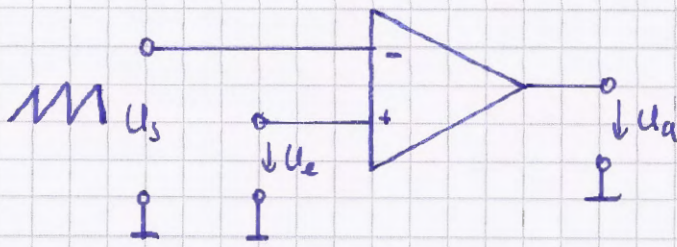


2.2.





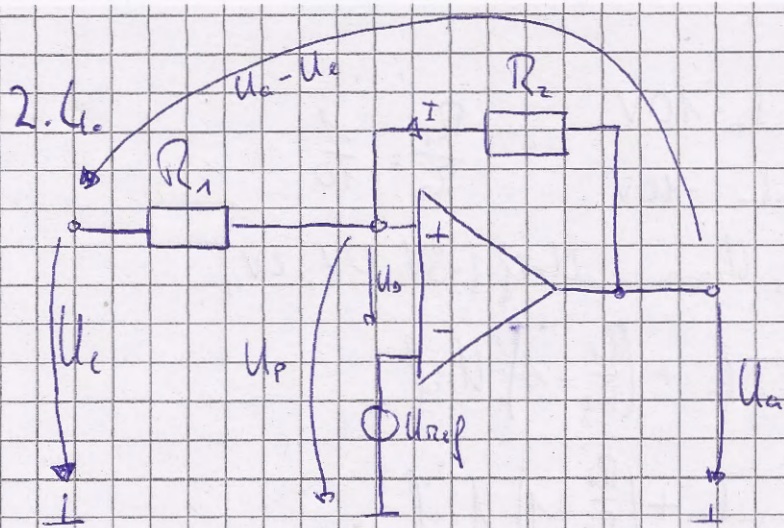
2.3.



$$U_e = \frac{\hat{U}_s}{T} t \quad U_e \left( \frac{T}{2} \right) = \frac{\hat{U}_s}{T} \frac{T}{2} = \frac{\hat{U}_s}{2}$$

Bei Testverhältnis 1:1 ist  $U_e$  auf  $\frac{\hat{U}_s}{2}$  einzustellen  
 $\rightarrow U_e = 0,5V \quad U_e(1:4) = \frac{\hat{U}_s}{4}$





## Nichtinvertierendes Schmitt-Trigger

$U_{ein} > U_{aus}$   
 Beim Einschalten  $U_{sat-}$  auf  $U_{sat+}$

$$I = \frac{U_a - U_e}{R_1 + R_2}$$

$$-U_e - I R_1 + U_p = 0$$

$$U_p = U_e + I R_1$$

$$U_p = U_e + \frac{U_a - U_e}{R_1 + R_2} R_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_a + \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_e \quad | \quad U_a = U_{ref}$$

Einschaltspannung:  $U_{sat-} \rightarrow U_{sat+}$  / für  $U_e = U_{ein}$

Rel für  $U_p = U_a = U_{ref}$

$$U_{ref} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{sat-} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{ein}$$

$$U_{ein} = -\frac{R_1}{R_2} U_{sat-} + \frac{R_1 + R_2}{R_2} U_{ref}$$

in gleiches  
 Weite für Ausschaltspannung:  $U_{aus} = -\frac{R_1}{R_2} U_{sat+} + \frac{R_1 + R_2}{R_2} U_{ref}$

$$\text{Hysterese: } \Delta U_e = U_{ein} - U_{aus} = \frac{R_1}{R_2} (U_{sat+} - U_{sat-})$$

Erhöht sich die Widerstandskombination  $\frac{R_1}{R_2}$  dann wird  $U_{ein}$  größer und  $U_{aus}$  kleiner.  $\rightarrow$  bei  $\frac{R_1}{R_2} \uparrow$  um  $\Delta U_e \uparrow$



geg  $U_{\text{amax}} = U_{\text{asat}+} = 10\text{V}$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{1}{10}$$

$U_{\text{amin}} = U_{\text{asat}-} = -10\text{V}$

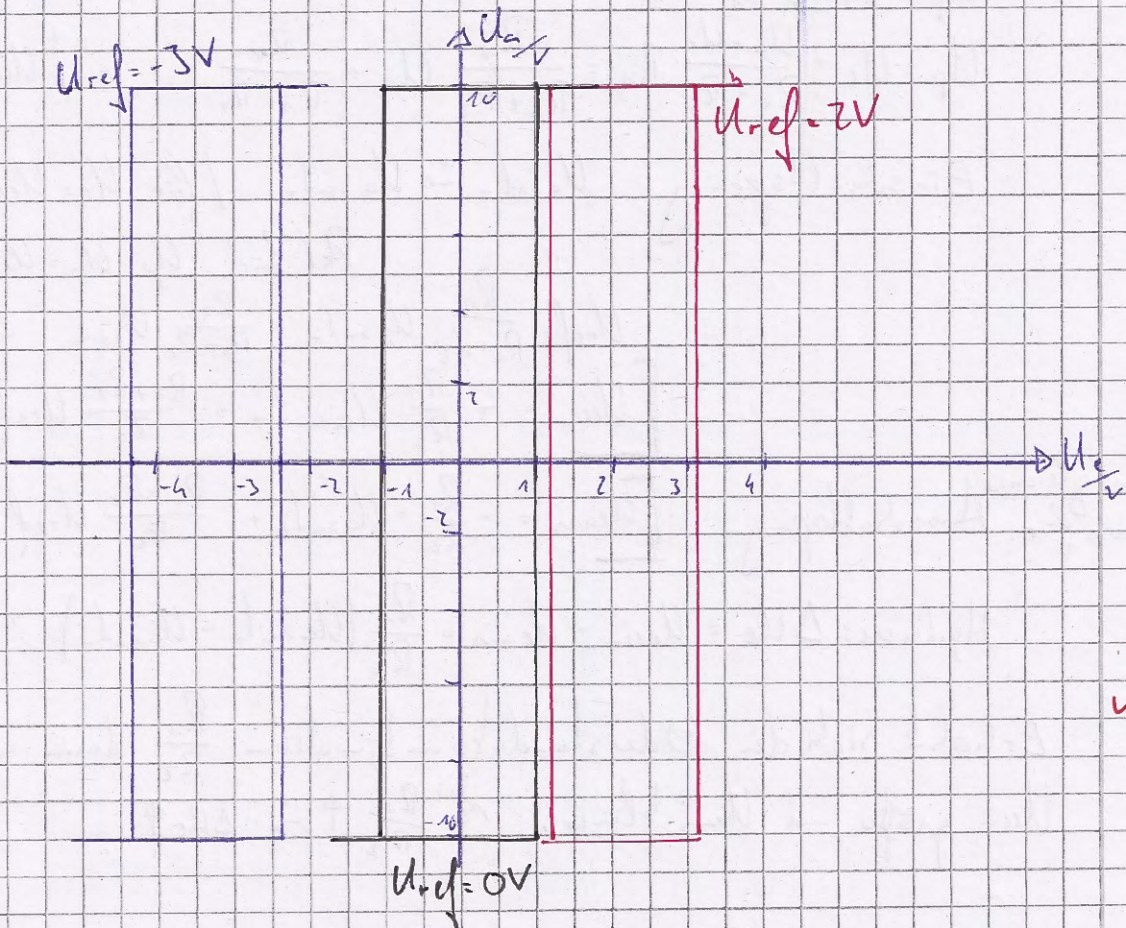
ges  $\Delta U_e$ ,  $U_{\text{ein}}$ ,  $U_{\text{aus}}$   $U_{\text{ref}} = (-3\text{V}; 0\text{V}; 2\text{V})$

$$U_{\text{ein}} = -\frac{R_1}{R_2} U_{\text{asat}-} + \left(\frac{R_1}{R_2} + 1\right) U_{\text{ref}}$$

$$U_{\text{aus}} = -\frac{R_1}{R_2} U_{\text{asat}+} + \left(\frac{R_1}{R_2} + 1\right) U_{\text{ref}}$$

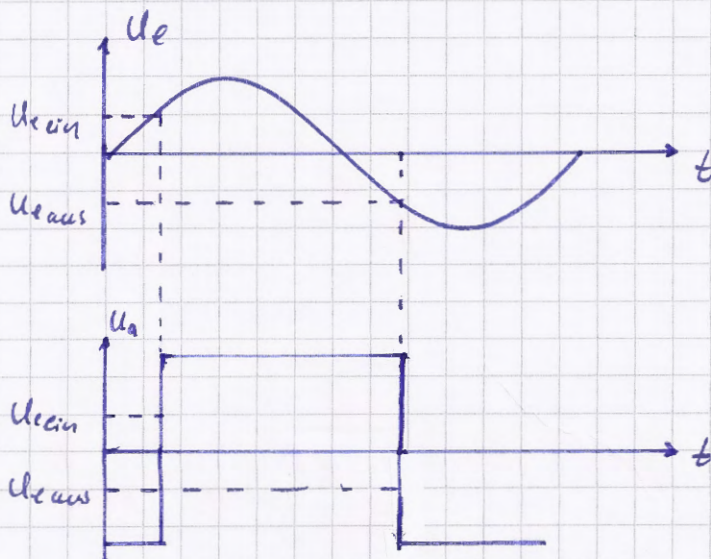
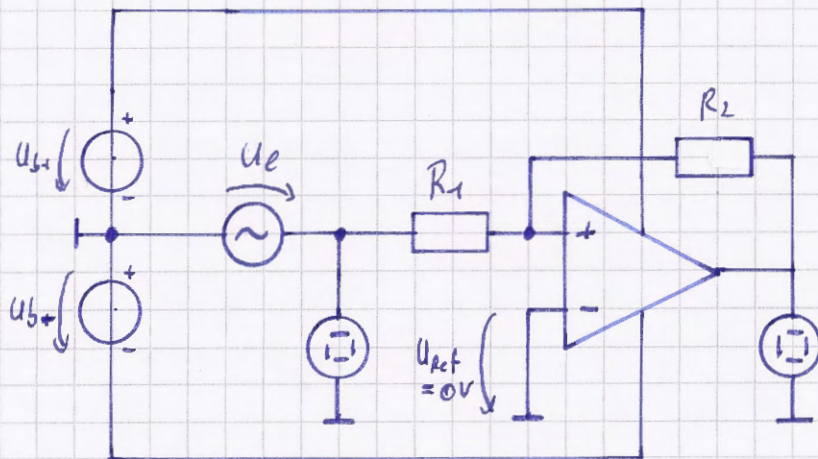
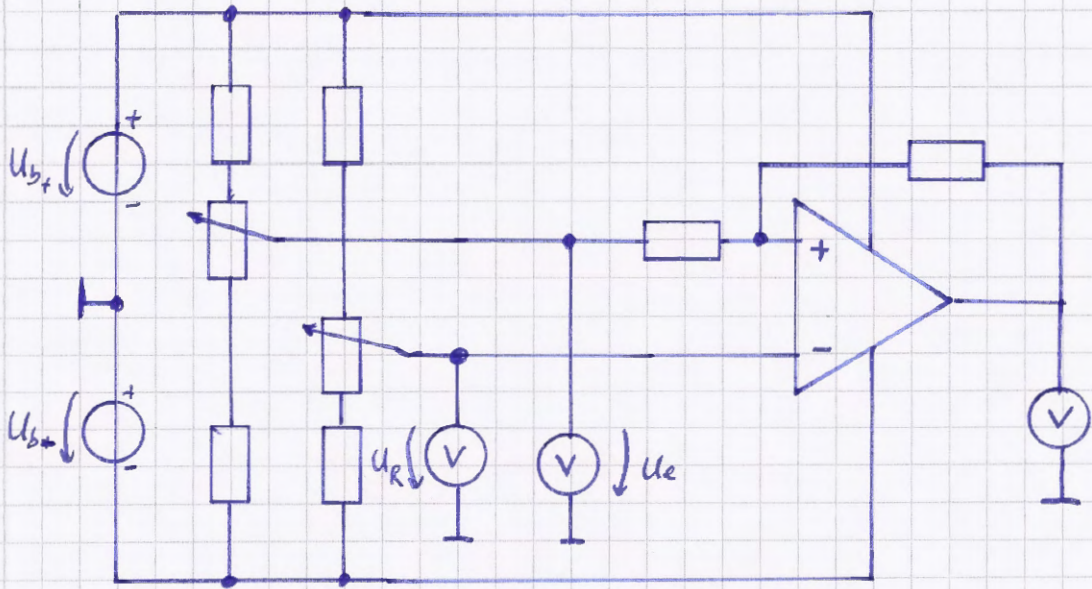
$$\Delta U_e = U_{\text{ein}} - U_{\text{aus}}$$

$U_{\text{ref}} = -3\text{V}$	$U_{\text{ref}} = 0\text{V}$	$U_{\text{ref}} = 2\text{V}$
$U_{\text{ein}} = -2,3\text{V}$	$U_{\text{ein}} = 1\text{V}$	$U_{\text{ein}} = 3,2\text{V}$
$U_{\text{aus}} = -4,3\text{V}$	$U_{\text{aus}} = -1\text{V}$	$U_{\text{aus}} = 1,2\text{V}$
$\Delta U_e = 2\text{V}$	$\Delta U_e = 2\text{V}$	$\Delta U_e = 2\text{V}$ ✓





2.5.



$$U_{e_{min}} = \frac{R_1}{R_2} U_{a_{max}}$$

$$U_{e_{max}} = -\frac{R_1}{R_2} U_{a_{min}}$$



3.1.

 $U_{\text{off}} = 0V$ 

$U_{\text{ref}}$	$U_a$
0V	-9,3V
0,055V	-8,0V
104mV	-4,0V
125mV	-3,0V
150mV	-2,0V
173mV	-1,0V
198mV	0,0V
222mV	1,0V
247mV	2,0V
270mV	3,0V
295mV	4,0V
318mV	5,0V
342mV	6,0V
367mV	7,0V
392mV	8,0V
415mV	9,0V
439mV	10,0V
464mV	11,0V
485mV	11,4V

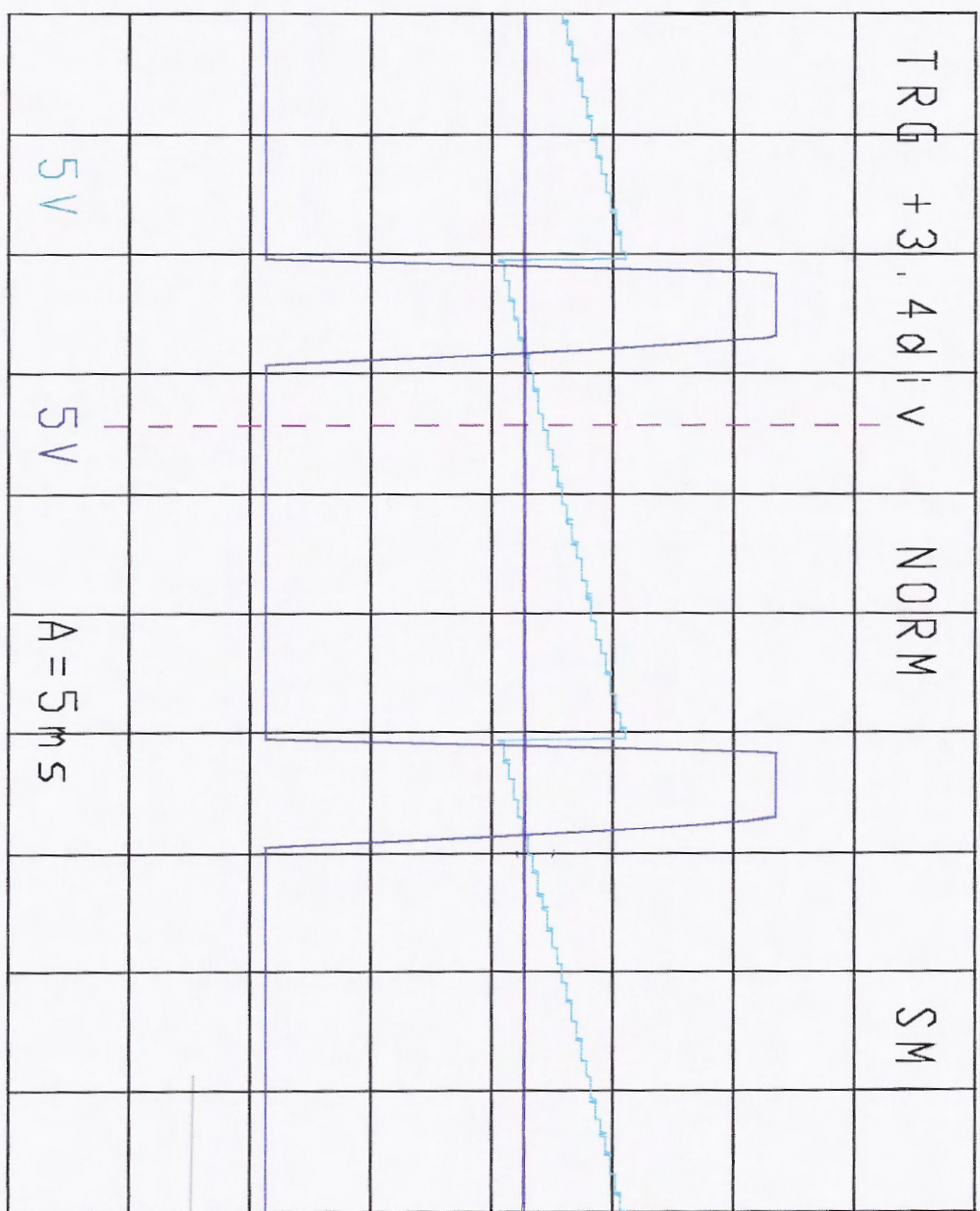
#

 $U_{\text{off}} = -0,5V$ 

$U_{\text{ref}}$	$U_a$
-0,5V	-9,3V
-0,488V	-9,0V
-0,450V	-6,0V
-405mV	-4,0V
-0,281V	-3,0V
-0,357V	-2,0V
-0,333V	-1,0V
-0,308V	0,0V
-0,285V	1,0V
-0,260V	2,0V
-0,236V	3,0V
-0,188V	5,0V
-0,139V	7,0V
-0,091V	9,0V
-0,066V	10,0V
-0,012V	11,4V

3.1 Messung der Ausgangsspannung  
für Lastverhältnis 1:4 ?





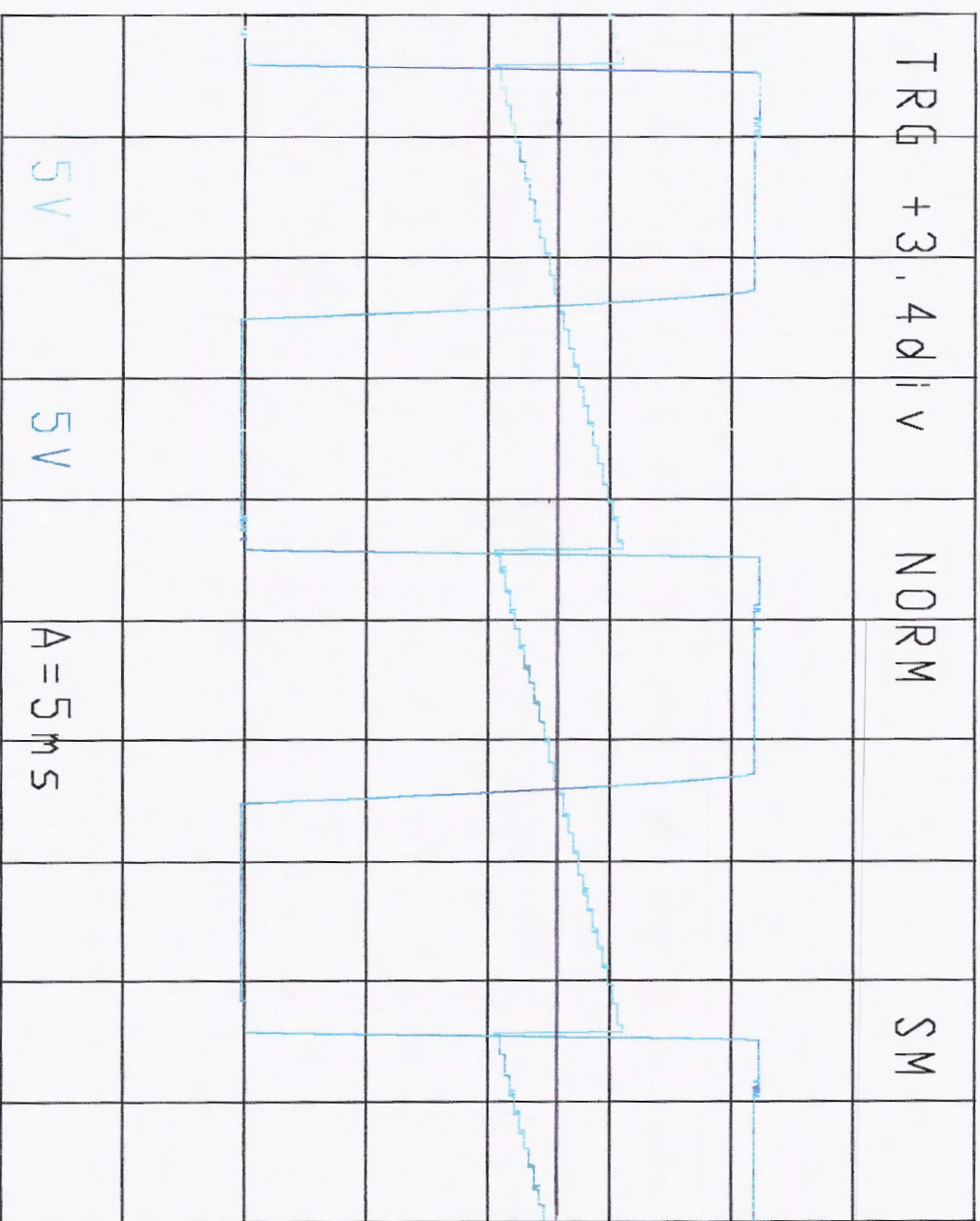
Spannungswert  
= 1.5 V

f.

Da Unterschiede der  
beide Einstellun-  
gen es verändert  
sind. Repose-  
spannung es  
den Gleichspannungswert







→ Gleichspannungswert  
= 2,5 V

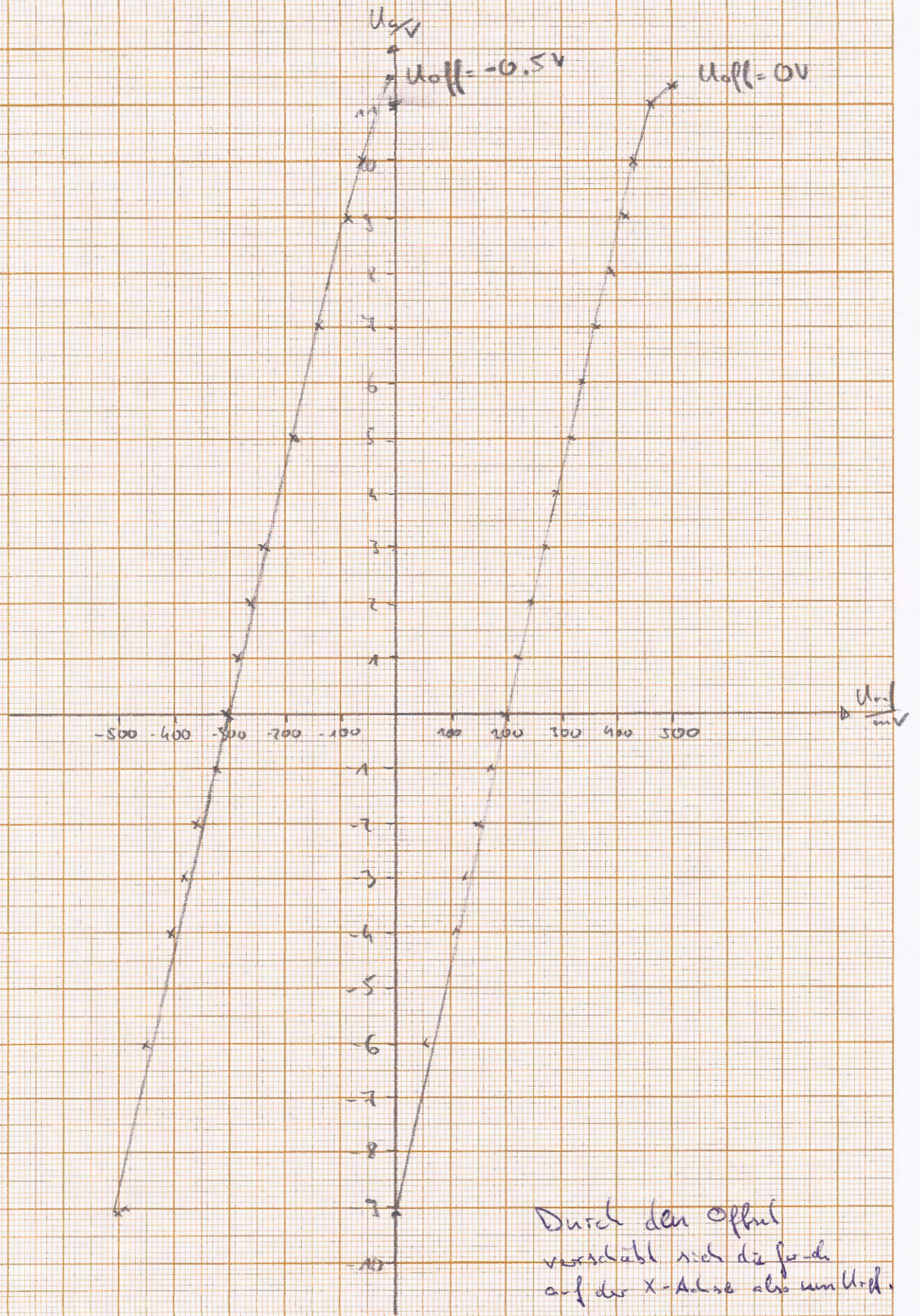
Eine eventuelle Abschwächung wurde bei der Messung durch den Steuerschalter abgelesen. Durch diese sind die Fehler nicht (optisch) sichtbar.





3.1

© Perle





I.2.

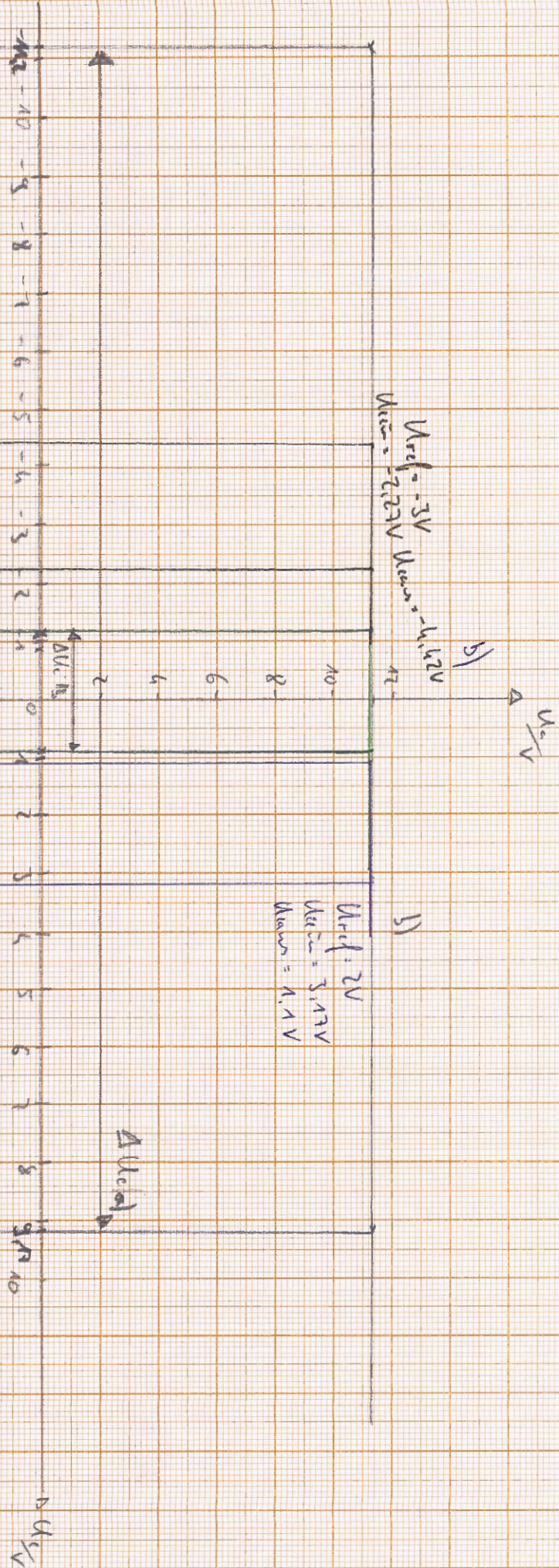
Wie in der Vorlesung beschrieben wird bei Erhöhung des Widerstandsverhältnisses  $\frac{R_1}{R_2}$   $U_{ref}$  größer und  $U_{sat}$  kleiner. Dies kann man gut an den beiden Hysteresen bei  $U_{ref}=0$  erkennen. Bei einem Verhältnis  $\frac{R_1}{R_2}=1$  sind die Hysteresen deutlich größer als bei  $\frac{R_1}{R_2}=\frac{1}{10}$ . Ebenso verhält es sich mit  $\Delta U_c$ . Dieses ist um den Faktor  $\approx 10$  größer. Zurückzuführen ist dies auf das Widerstandsverhältnis.

Im Vergleich der Messwerte mit den errechneten Werten fallen kleine Unterschiede auf. Die lassen u.a. auf untersch. Sättigungsspannungen zurückzuführen. So wurde bei der Berechnung  $U_{sat} = \pm 10V$  angenommen.

In der Durchführung wurden jedoch Sättigungsspannungen von  $U_{sat+} = 11,6V$  und  $U_{sat-} = -9,3V$  festgestellt.

Da sich beide Werte betragsmäßig ähnlich ändern ist  $\Delta U_c$  gemessen und berechnet ungefähr gleich.





b)  $U_{ref} = -3$  V  $U_{mean} = -1.5$  V  
 $U_{ref} = -2.22$  V

b)  $U_{ref} = 2$  V  
 $U_{ref} = 3.17$  V  
 $U_{mean} = 1.1$  V

a)  $U_{ref} = 0$   
 $\frac{U_1}{a_1} = 1$

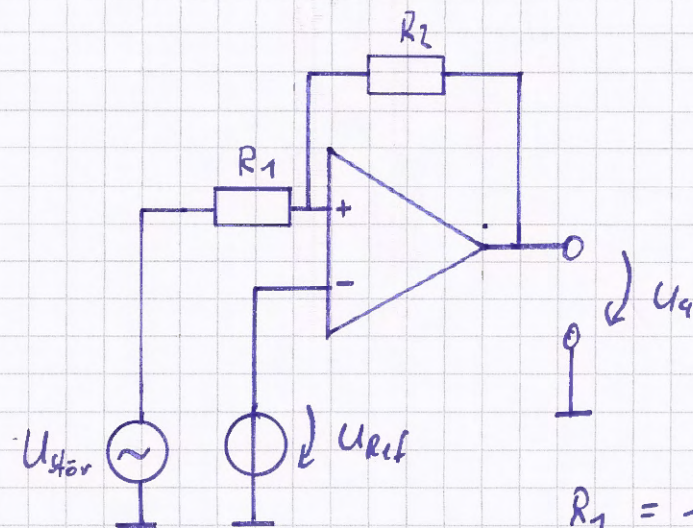
a)  $\Delta U_1 = U_{ref} - U_{mean} = 1.5$  V  
 $= 0.17 \cdot 1.1 - 1 = 1.1$  V  
 $= 2.08$  V

b)  $\Delta U_1 = 0.18$  V





### 2.2.1.



$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega$$

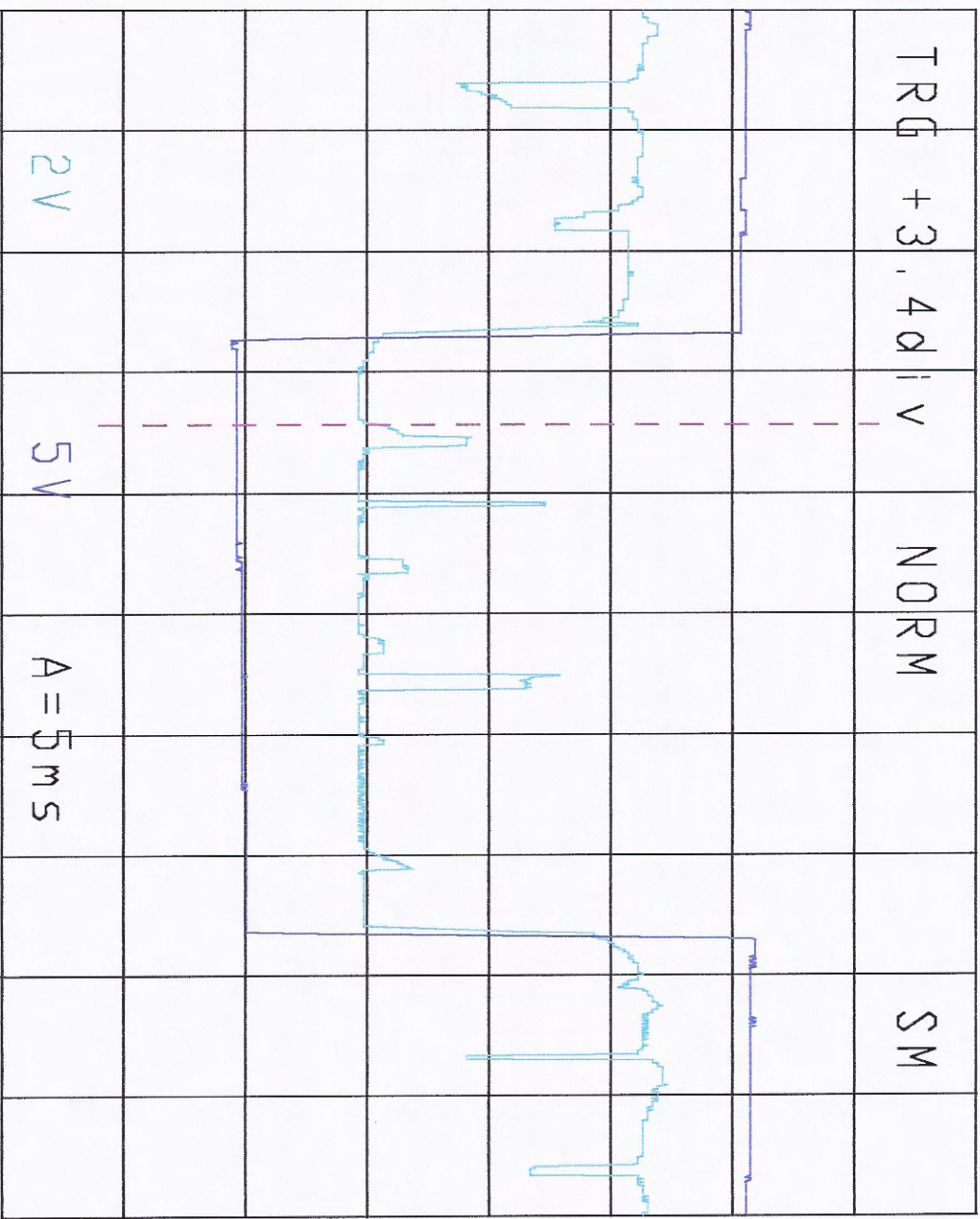
$$R_2 = 100 \text{ k}\Omega$$

$$U_{ref} = 2,06 \text{ V}$$

Als Schaltung wurde ein Schmitt-Trigger gewählt. Die jeweiligen Störungen im eigentlich neg. und pos. Bereich überschreiten den Mittelwert und schließen damit einen Komparator aus. Unterschiedliche Werte für den Wechsel also unterschiedliche Werte für  $U_{ein}$  und  $U_{aus}$  sind notwendig. Aus diesem Grund wurde der Schmitt-Trigger gewählt und die oben dargelegten Werte eingestellt. ✓



3.3.1.



✓



3.3.7.	$U_c$ Sprung von U <sub>sat-</sub> auf U <sub>sat+</sub>	$U_c$ Sprung von U <sub>sat-</sub> auf U <sub>sat+</sub>
Komparator	3,82V	3,79V
Schmitt 51k	4,06V	2,48V
Schmitt 100k	4,1V	3,5V

Eine Anwendung findet diese Schaltung, und somit sei auch die praktische Bedeutung, als Lichtdrucker. Unterschiedliche Lichtverhältnisse werden als Auslösegrundlage für z.B. ein Ein- und Ausschalten benutzt. Bei einem Komparator hätte man bei kleinen Schwankungen um den Wechsellast eine immer wieder auftretende Änderung von Ein- und Ausschalten. Dies kann umgekehrt durch einen Schmitt-Trigger und damit einhergehende unterschiedliche Ein- und Ausschaltspannungen.