

**Versuch 5**

Operationsverstärker  
 Pulsweiten – Modulation (PWM)

Name			
Matrikelnummer			

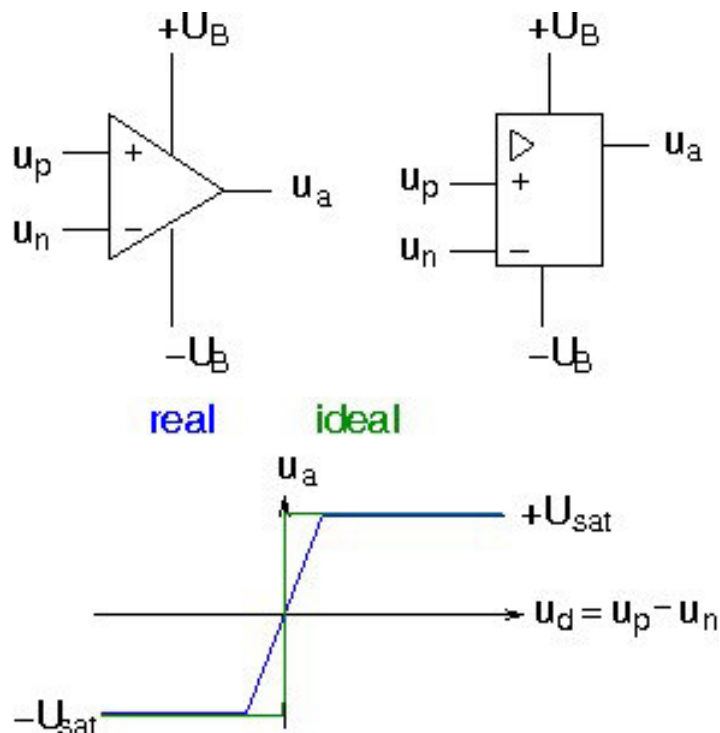
**Verwendete Geräte:**

Digitalmultimeter Agilent U1241A  
 Funktionsgenerator Töllner 7402  
 Steckbrett GL-36  
 Oszilloskop Tektronix TBS 1072B  
 Netzteil Power Supply GPS 3303

**Laborversuch Operationsverstärker**

**5.1 Grundlagen Operationsverstärker**

Ein Operationsverstärker (englisch: operational amplifier, abgekürzt: Op) ist eine in einem Bauelement integrierte Verstärkerschaltung mit sehr hoher Verstärkung.



Verschiedene Schaltzeichen sind gebräuchlich: das Bild zeigt links die Darstellung nach alter Norm, rechts nach neuer Norm. Zum Betrieb eines Op's ist eine symmetrische Versorgungsspannung  $\pm U_B$  nötig, welche aus Gründen der Übersicht in Schaltplänen aber oft nicht dargestellt wird. Der Op verstärkt die Differenzspannung

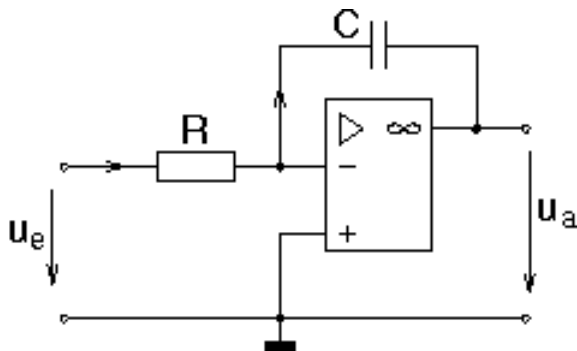
$u_d$  zwischen dem nichtinvertierenden Eingang (+ Eingang) und dem invertierenden Eingang (- Eingang), seine Ausgangsspannung ist  $u_a = V_u \cdot u_d$ . Der Verstärkungsfaktor  $V_u$  liegt bei Werten von  $10^4 - 10^6$ . Allerdings kann der Op am Ausgang höchstens die Sättigungsspannung  $\pm U_{sat}$  liefern, die ca. 1–2 V kleiner als die Versorgungsspannung  $U_B$  ist. Sobald der Betrag der Differenzeingangsspannung größer als  $U_{sat} / V_u$  wird, verlässt der Op daher den linearen Arbeitsbereich und geht in Sättigung (s. Bild).

Für die Berechnung von Operationsverstärkerschaltungen setzt man vereinfachend  $V_u \rightarrow \infty$ , ebenso kann der Differenzeingangswiderstand zwischen + und –Eingang als unendlich hoch angenommen werden. Daraus ergeben sich zwei Folgerungen:

1. Die Eingangsströme  $i_p, i_n$  sind Null.
2. Die Differenzeingangsspannung  $u_d$  ist Null, wenn der Op im linearen Bereich arbeitet.

### 5.1.1 Integrierer

Der Betrieb eines Op im linearen Arbeitsbereich kann schaltungstechnisch erzwungen werden, indem man das Ausgangssignal gegenkoppelt, d.h. auf den invertierenden Eingang (- Eingang) zurückführt. In der abgebildeten Schaltung erfolgt die Gegenkopplung über einen Kondensator.



Analyse der Schaltung:

Gegenkopplung

$$\Rightarrow u_d = 0 \Rightarrow i_R = u_e / R,$$

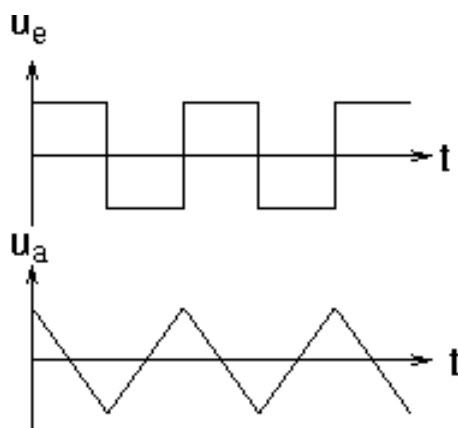
$$i_R = i_C \text{ (weil Op-Eingangsstrom)}$$

$$i_n = 0),$$

$$u_a = -u_C = -\frac{1}{C} \int i_C dt = -\frac{1}{RC} \int u_e dt$$

Am Ausgang erscheint die integrierte Eingangsspannung. Das Produkt aus Widerstand und Kapazität hat den Charakter einer Zeitkonstanten:

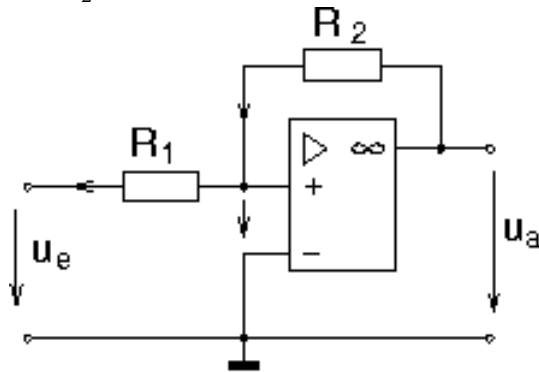
$$T_i = RC$$



Das Bild zeigt die Ausgangsspannung eines Integrierers bei rechteckförmiger Spannung am Eingang. Die Ausgangsspannung zu Beginn  $u_a(t=0)$  hängt vom Ladezustand des Kondensators beim Einschalten ab.

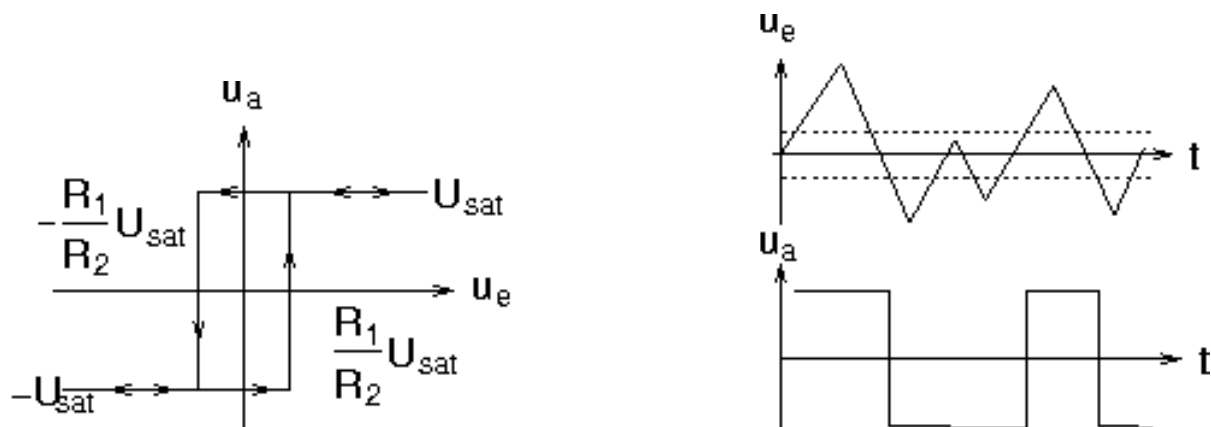
### 5.1.2 Nichtinvertierender Schmitt-Trigger

Der Betrieb eines Op im Sättigungsbereich kann schaltungstechnisch erzwungen werden, indem man das Ausgangssignal mitkoppelt, d.h. auf den nichtinvertierenden Eingang (+ Eingang) zurückführt. In der abgebildeten Schaltung erfolgt die Mitkopp- lung über den Widerstand  $R_2$ .



Die Ausgangsspannung  $u_a$  kann nur zwei Werte annehmen, entweder  $+U_{sat}$  oder  $-U_{sat}$ . Zwischen diesen beiden Werten schaltet sie, wenn am Differenzeingang des Op keine Spannung abfällt ( $u_d = 0$ ). Dann ist  $i_{R2} = u_a / R_2$  und  $u_e = -R_1 \cdot i_{R1}$ . Da der Op-Eingangsstrom  $i_p = 0$  ist, müssen die Ströme durch die Widerstände gleich sein, und es folgt die Beziehung für die Schaltpunkte:

$$u_e = -\frac{R_1}{R_2} u_a = \mp \frac{R_1}{R_2} U_{sat}$$



Das Bild zeigt die Ein-/Ausgangskennlinie der Schaltung, die unter dem Namen „nichtinvertierender Schmitt-Trigger“ bekannt ist. Rechts ist die Reaktion auf ein beliebiges Eingangssignal dargestellt. Die Schaltung schaltet nur dann auf  $+U_{sat}$ , wenn die positive Schaltschwelle am Eingang erreicht ist. Sie schaltet nur dann auf  $-U_{sat}$ , wenn die negative Schaltschwelle am Eingang erreicht ist.

## 5.2 Integrierer

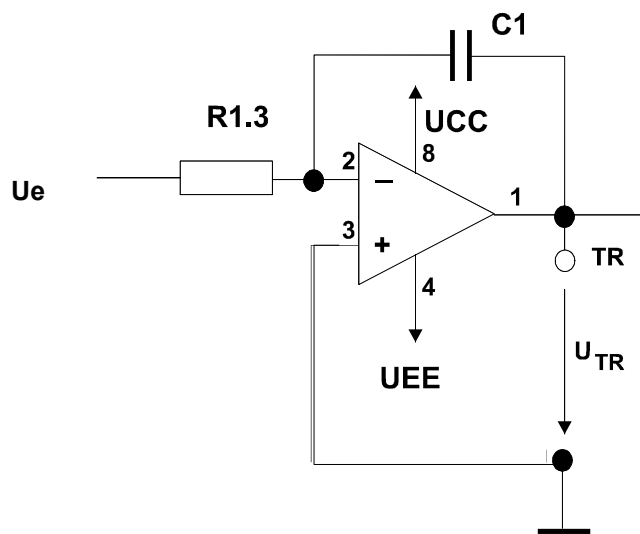


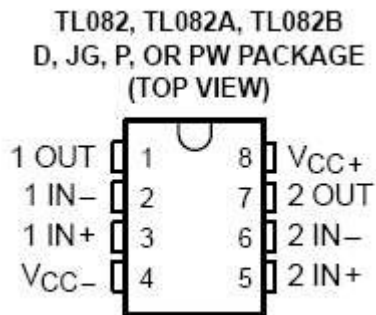
Abbildung 1 Integrierer

Versorgungsspannungen (aus Netzteil):  
 $U_{CC} = +15V$   $U_{EE} = -15V$

Werte der verwendeten Bauteile:  
 $R_{1.3} = 10k\Omega$ ,  $C_1 = 10nF$

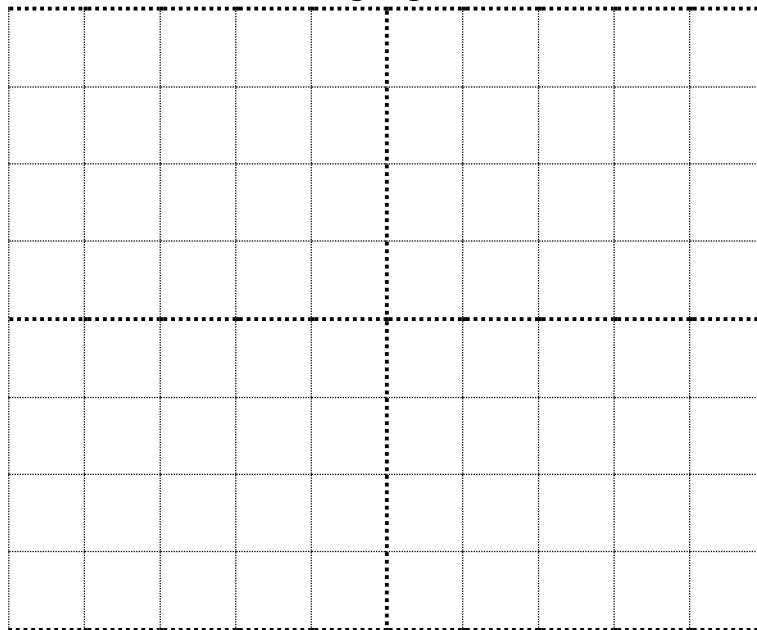
OP:

TL082 dual op amp (d.h. zwei Operationsverstärker sind in einem Gehäuse integriert).

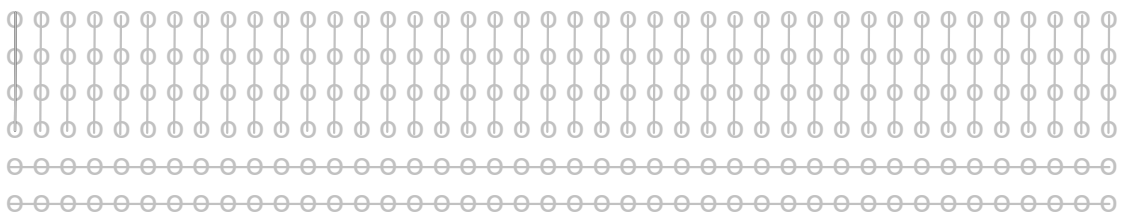
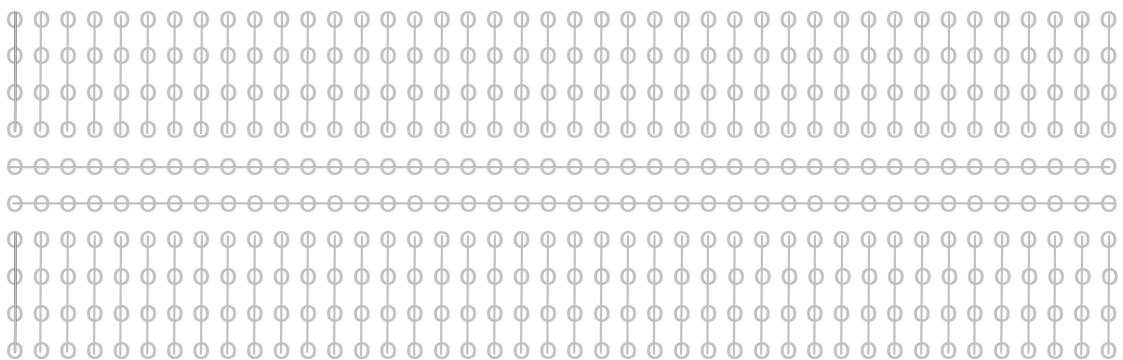
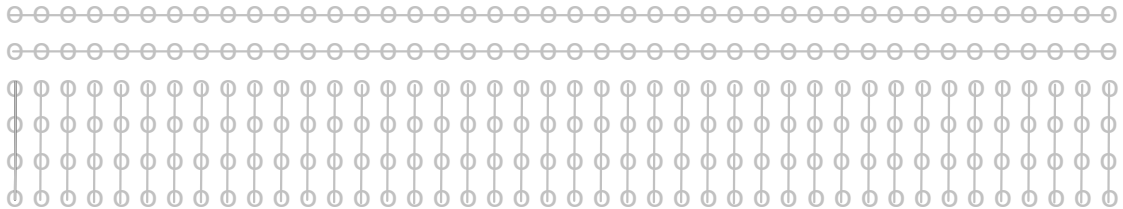


1. Errechnen Sie aus den gegebenen Werten die Zeitkonstante  $T_i$  des Integrierers.
2. Annahme: der Kondensator ist zu Beginn ungeladen. Am Eingang liegt eine Spannung  $u_e = +15V$  an. Wie lange dauert es, bis die Ausgangsspannung  $u_{Tr} = -10V$  ist? Dokumentieren Sie Ihre Berechnung.
3. Skizzieren Sie grob die Spannungsverläufe, welche Sie am Ausgang TR erwarten, wenn Sie am Eingang  $U_e$  ein bipolares Rechtecksignal anlegen.

**Ausgang TR:**



- Zeichnen Sie in einem schematischen Übersichtsplan, wie Sie Widerstände, Kondensator und OP auf dem Steckbrett anordnen und zur Schaltung verbinden. In Ihrer Zeichnung müssen alle Bezeichnungen und einzelnen Werte der Widerstände sowie des Kondensators erkennbar sein.



- Bauen Sie die Schaltung auf das Steckbrett auf.
- Die Versorgungsspannung darf erst eingeschaltet werden, wenn die Schaltung von einem Betreuer überprüft wurde.
- Schließen Sie den Kanal 1 am Oszilloskop an Ue an und den Kanal 2 an TR.
- Schließen Sie am Eingang Ue den Funktionsgenerator an. Einstellung auf Rechteck (bipolar) mit einer Frequenz von 3kHz und einer Spannung von 15 V (Amplitude). Schalten Sie das Netzteil zu.

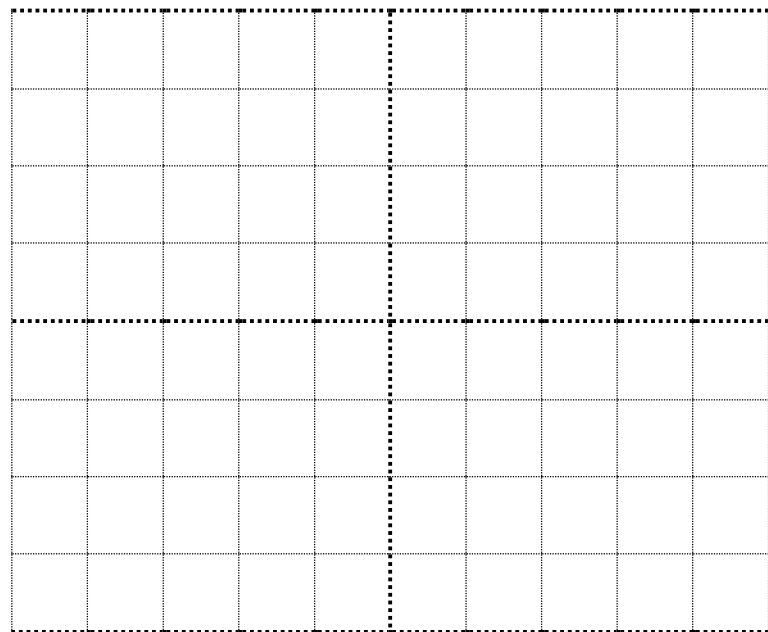
9. Skizzieren Sie das Schirmbild des Oszilloskopes für C1 mit 10nF. Kennzeichnen Sie die Linienzüge mit E bzw. TR. Geben Sie die von Ihnen verwendeten Oszilloskopeinstellungen an.

**C1 = 10nF, f=3KHz**

Kanal 1:  $\frac{Volt}{DIV} = \dots\dots\dots$

Kanal 2:  $\frac{Volt}{DIV} = \dots\dots\dots$

Zeitbasis:  $\frac{T}{DIV} = \dots\dots\dots$



10. Vergleichen Sie Ihre Messung mit der Rechnung aus Teilaufgabe 2. und der Prognose aus Teilaufgabe 3. Erklären Sie ihr Ergebnis.

### 5.3 Schmitt-Trigger

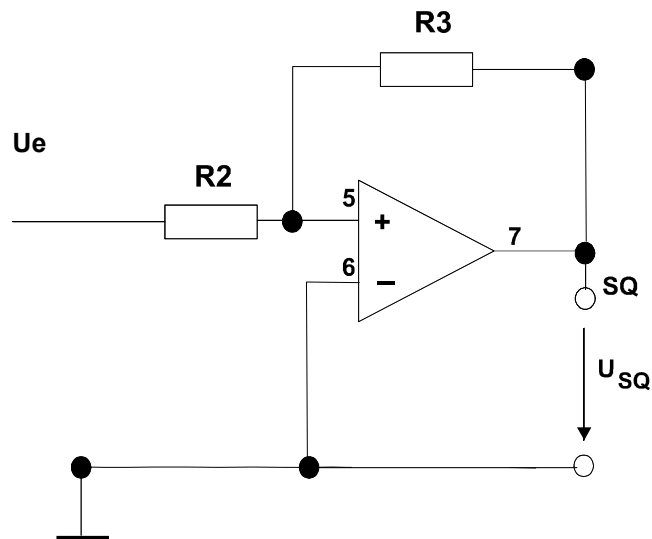


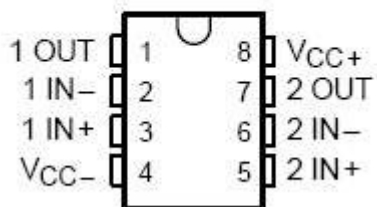
Abbildung 2 Schmitt -Trigger

Versorgungsspannungen (aus Netzteil):  
 $U_{CC} = + 15V$   $U_{EE} = - 15V$

Werte der verwendeten Bauteile:  
 $R2 = 20k\Omega$ ,  $R3 = 27 k\Omega$

OP: TL082 dual op amp.

TL082, TL082A, TL082B  
 D, JG, P, OR PW PACKAGE  
 (TOP VIEW)

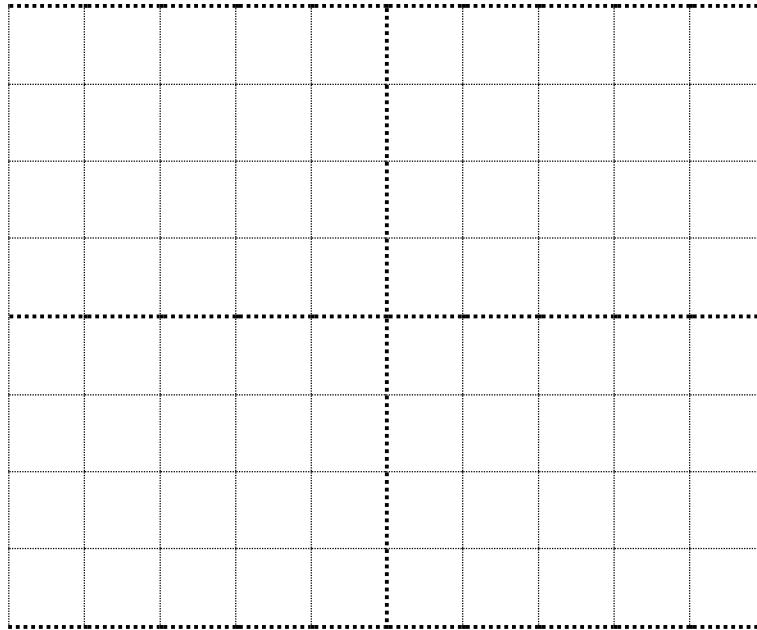


11. Berechnen Sie anhand der gegebenen Werte die Schaltpunkte.

12. Skizzieren Sie grob die Spannungsverläufe, welche Sie am Ausgang SQ erwarten, wenn Sie an Ue ein Dreieckssignal anlegen, dessen Amplitude gerade die Schaltpunkte erreicht.



### Ausgang SQ:



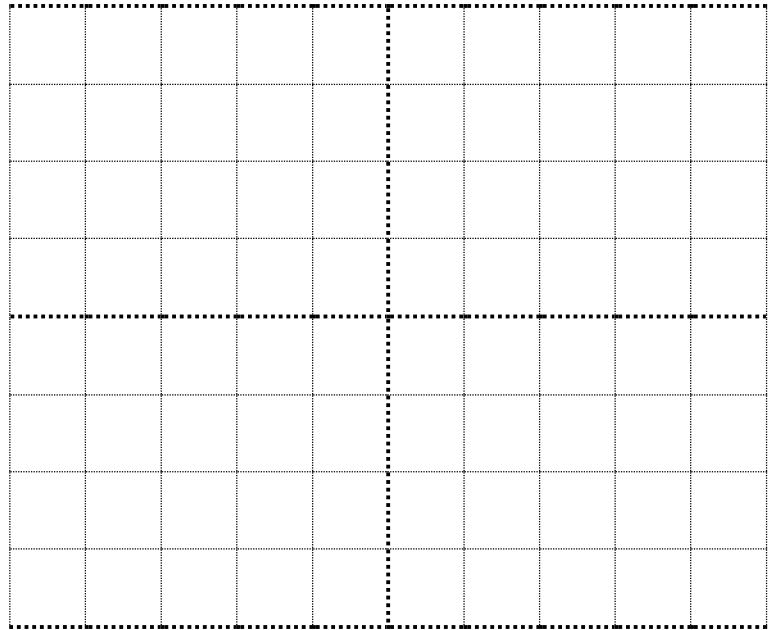
13. Ergänzen Sie in dem schematischen Übersichtsplan auf Seite 6, wie Sie die weiteren Bauelemente auf dem Steckbrett anordnen und zur Schaltung verbinden. Nutzen Sie eine andere Farbe, um den Schmitt-Trigger von der zuvor aufgebauten Schaltung zu unterscheiden. In Ihrer Zeichnung müssen alle Bezeichnungen und einzelnen Werte der Bauelemente erkennbar sein.
14. Erweitern Sie die Schaltung auf dem Steckbrett. Der zuvor aufgebaute Integrierer soll NICHT abgebaut werden.
15. Die Versorgungsspannung darf erst eingeschaltet werden, wenn die Schaltung von einem Betreuer überprüft wurde.
16. Schließen Sie den Kanal 1 am Oszilloskop an  $U_e$  an und den Kanal 2 an SQ.
17. Schließen Sie am Eingang  $U_e$  den Funktionsgenerator an. Einstellung auf Dreieck mit einer Frequenz von 1kHz und einer Spannung von 12 V (Amplitude).  
Schalten Sie das Netzteil zu.
18. Skizzieren Sie das Schirmbild des Oszilloskopes für 12V (Amplitude). Kennzeichnen Sie die Linienzüge mit E bzw. SQ. Geben Sie die von Ihnen verwendeten Oszilloskopeinstellungen an.

**Ue = 12V(Amplitude), f=1kHz**

Kanal 1:  $\frac{Volt}{DIV} = \dots\dots\dots$

Kanal 2:  $\frac{Volt}{DIV} = \dots\dots\dots$

Zeitbasis:  $\frac{T}{DIV} = \dots\dots\dots$

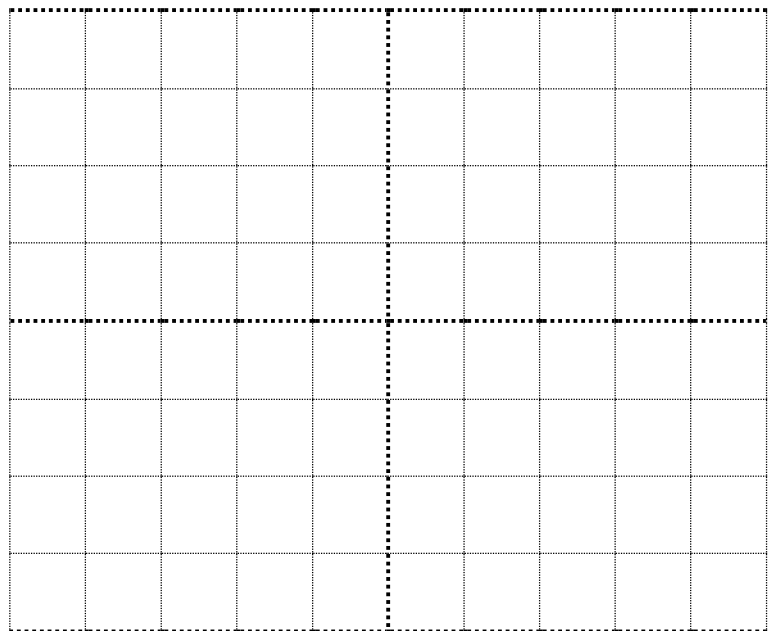


**Ue = 10V(Amplitude), f=1kHz**

Kanal 1:  $\frac{Volt}{DIV} = \dots\dots\dots$

Kanal 2:  $\frac{Volt}{DIV} = \dots\dots\dots$

Zeitbasis:  $\frac{T}{DIV} = \dots\dots\dots$



19. Skizzieren Sie das Schirmbild des Oszilloskopes für 10V (Amplitude). Kennzeichnen Sie die Linienzüge mit SQ bzw. E. Geben Sie die von Ihnen verwendeten Oszilloskopeinstellungen an.
20. Vergleichen Sie Ihre Messungen mit der Rechnung aus Teilaufgabe 11. und der Prognose aus 12. Erläutern Sie die Ergebnisse.

## 5.4 Dreieck-Rechteck-Generator mit Operationsverstärker

Schaltungsaufbau:

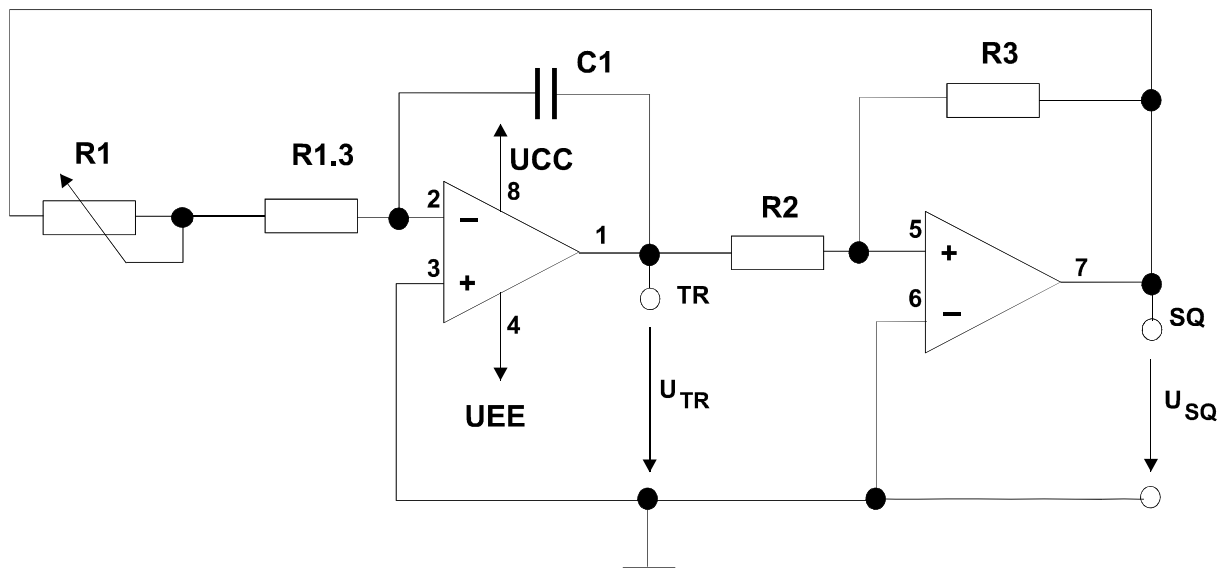


Abbildung 3 Variation der Frequenz

Versorgungsspannungen (aus Netzteil):  
 $U_{CC} = +15V$   $U_{EE} = -15V$

Werte der verwendeten Bauteile:  
 $R1 = 220k\Omega$ ,  $R1.3 = 10k\Omega$ ,  $R2 = 20k\Omega$ ,  $R3 = 27k\Omega$ ,  $C1 = 10nF$

21. Ergänzen Sie in dem schematischen Übersichtsplan auf Seite 6, wie Sie die weiteren Bauelemente auf dem Steckbrett anordnen und zur Schaltung verbinden. Nutzen Sie eine andere Farbe, um die aktuellen Erweiterungen von den zuvor aufgebauten Schaltungen zu unterscheiden.
22. Bauen Sie die Schaltung auf das Steckbrett auf.
23. Die Versorgungsspannung darf erst eingeschaltet werden, wenn die Schaltung von einem Betreuer überprüft wurde.
24. R1 ist ein Potentiometer mit 220kΩ. Stellen Sie dieses auf den Wert 220kΩ ein.
25. Schließen Sie den Kanal 1 des Oszilloskops an TR und den Kanal 2 an SQ an. Schalten Sie das Netzteil zu.
26. Versuchen Sie nun mit Ihrer Schaltung eine minimale und eine maximale Frequenz zu erzeugen, indem Sie das Potentiometer R1 auf linken und auf rechten Anschlag drehen. Führen Sie diesen Versuch mit zwei Kapazitätswerten durch: **C1 = 10nF** und **C1=1nF**.  
Tragen Sie die gemessenen Frequenz-Werte in folgende Tabelle ein.

R1 [kΩ]	C1 [nF]	f min [kHz]	f max [kHz]
220kΩ	10nF		
220kΩ	1nF		

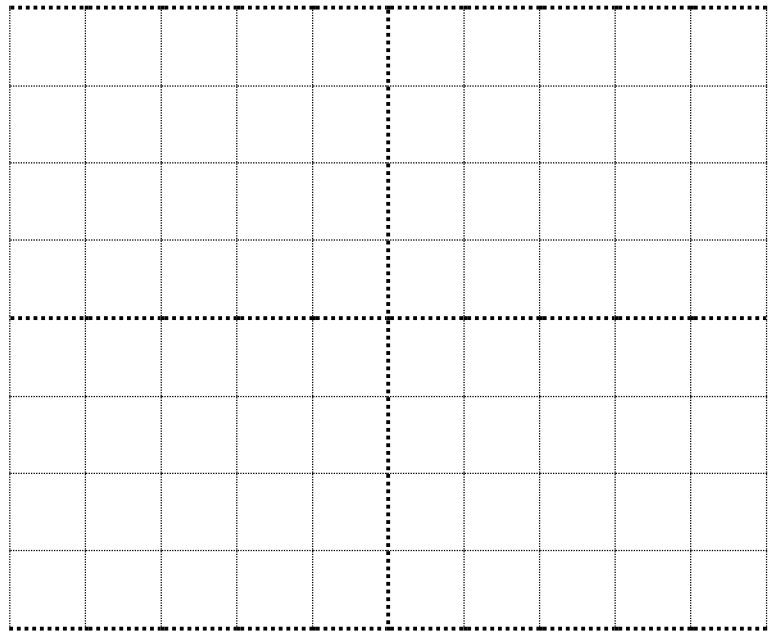
27. Skizzieren Sie das Schirmbild des Oszilloskopes jeweils bei minimaler und maximaler Frequenz für folgende Kapazitätswerte von C1: 10nF, 1 nF. Kennzeichnen Sie die Linienzüge mit TR bzw. SQ. Geben Sie die von Ihnen verwendeten Oszilloskopeinstellungen an.

**$C1 = 10nF, f=f_{min}$**

Kanal 1:  $\frac{Volt}{DIV} = \dots\dots\dots$

Kanal 2:  $\frac{Volt}{DIV} = \dots\dots\dots$

Zeitbasis:  $\frac{T}{DIV} = \dots\dots\dots$

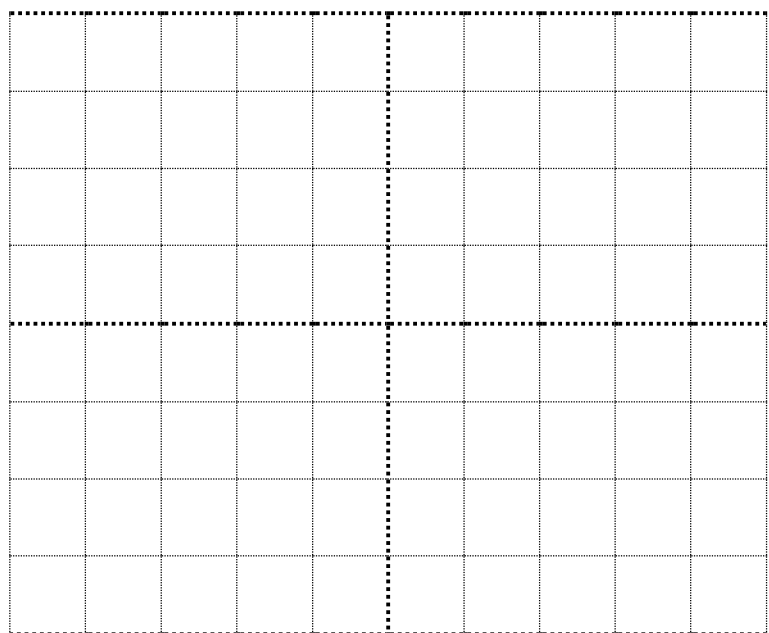


**$C1 = 10nF, f= f_{max}$**

Kanal 1:  $\frac{Volt}{DIV} = \dots\dots\dots$

Kanal 2:  $\frac{Volt}{DIV} = \dots\dots\dots$

Zeitbasis:  $\frac{T}{DIV} = \dots\dots\dots$

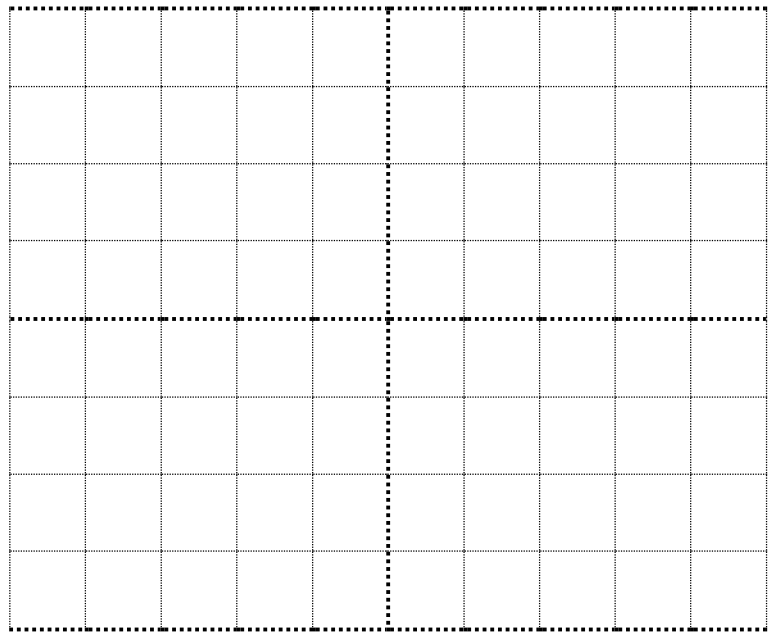


**C1 = 1nF, f=fmin**

Kanal 1:  $\frac{Volt}{DIV} = \dots\dots\dots$

Kanal 2:  $\frac{Volt}{DIV} = \dots\dots\dots$

Zeitbasis:  $\frac{T}{DIV} = \dots\dots\dots$

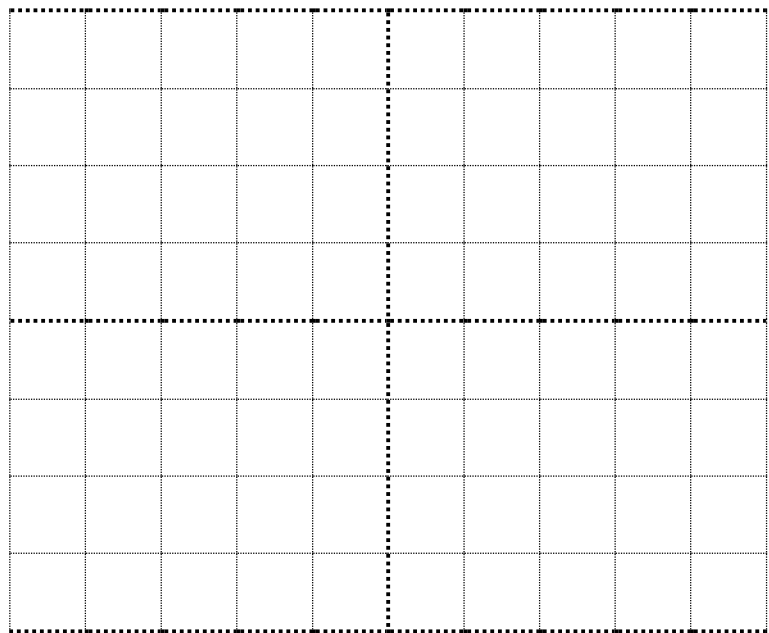


**C1 = 1nF, f=fmax**

Kanal 1:  $\frac{Volt}{DIV} = \dots\dots\dots$

Kanal 2:  $\frac{Volt}{DIV} = \dots\dots\dots$

Zeitbasis:  $\frac{T}{DIV} = \dots\dots\dots$



28. Erklären Sie in einigen Sätzen die Funktionsweise dieser Schaltung.

29. Warum ist es sinnvoll, zur Variation der Frequenz R1 als Potentiometer auszuführen und nicht R2 oder R3?

### 5.4.1 Dreieck-Rechteck-Generator: Variation der Ausgangsspannungen

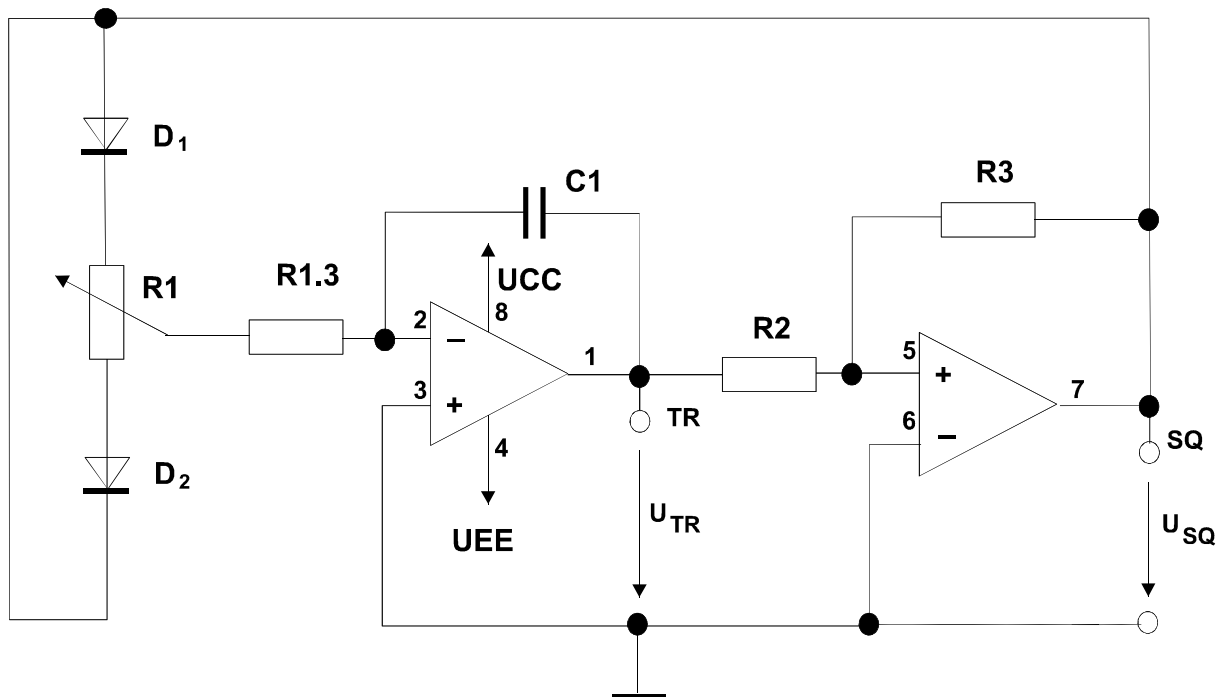


Abbildung 4 Variation der Symmetrie

1. Bauen Sie die Schaltung auf das Steckbrett auf.
2. Die Versorgungsspannung darf erst eingeschaltet werden, wenn die Schaltung von einem Betreuer überprüft wurde.
3. Schließen Sie den Kanal 1 des Oszilloskops an TR und den Kanal 2 an SQ an.
4. Über R1 ist das Tastverhältnis einstellbar. Führen Sie die Messung durch für das minimale und das maximale Tastverhältnis sowie die Mittelstellung des Tastverhältnisses mit den Kapazitäten  $C1 = 10\text{nF}$  und  $C1 = 1\text{nF}$ . Skizzieren Sie jeweils den Oszilloskopschirm.

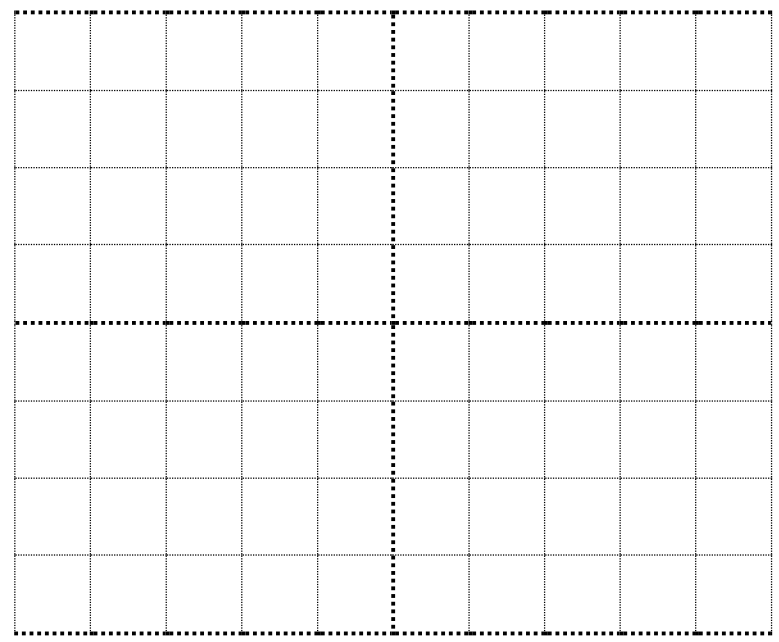


**C1 = 10nF, Tastverhältnis minimal**

Kanal 1:  $\frac{Volt}{DIV} = \dots\dots\dots$

Kanal 2:  $\frac{Volt}{DIV} = \dots\dots\dots$

Zeitbasis:  $\frac{T}{DIV} = \dots\dots\dots$

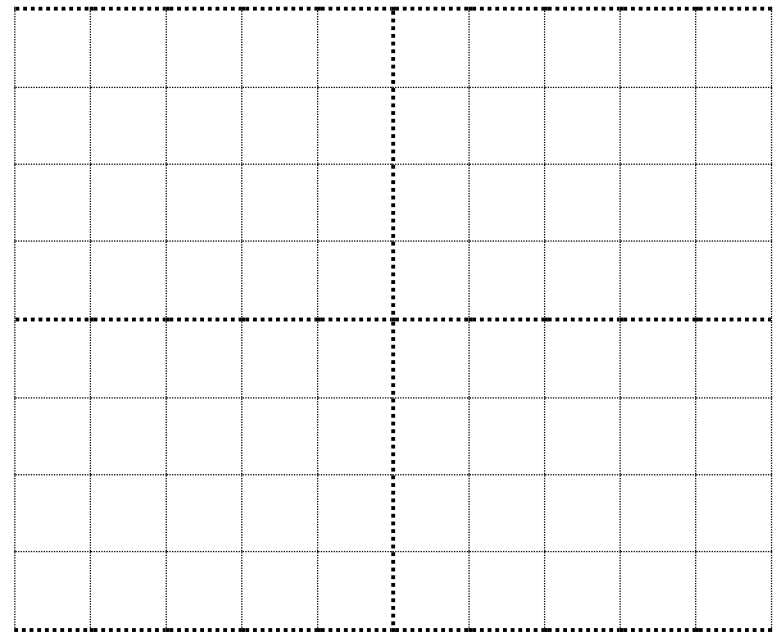


**C1 = 10nF, Tastverhältnis maximal**

Kanal 1:  $\frac{Volt}{DIV} = \dots\dots\dots$

Kanal 2:  $\frac{Volt}{DIV} = \dots\dots\dots$

Zeitbasis:  $\frac{T}{DIV} = \dots\dots\dots$

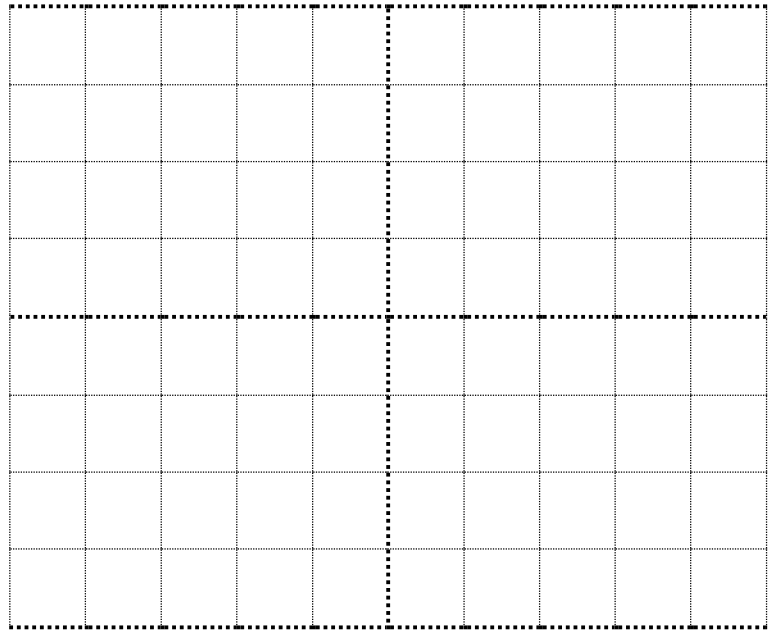


**C1 = 10nF, Mittelstellung**

Kanal 1:  $\frac{V_{olt}}{DIV} = \dots\dots\dots$

Kanal 2:  $\frac{V_{olt}}{DIV} = \dots\dots\dots$

Zeitbasis:  $\frac{T}{DIV} = \dots\dots\dots$

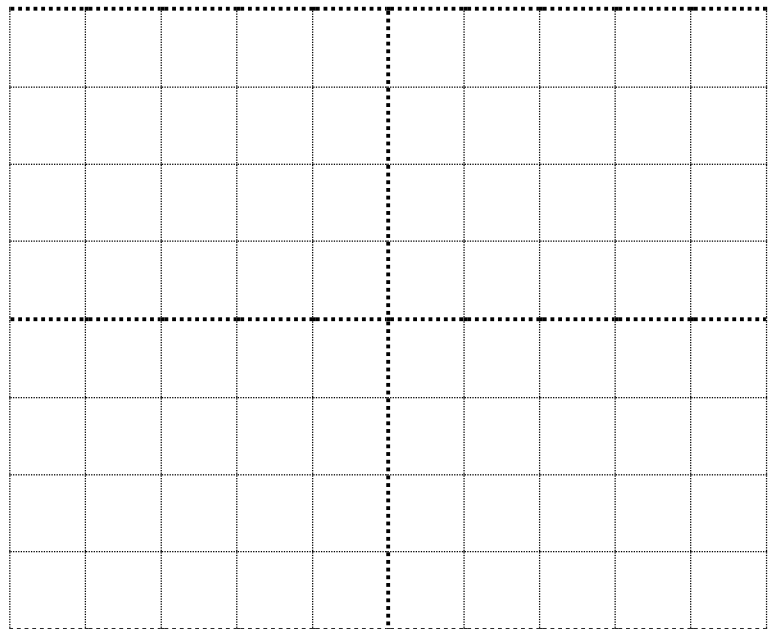


**C1 = 1nF. Tastverhältnis minimal**

Kanal 1:  $\frac{V_{olt}}{DIV} = \dots\dots\dots$

Kanal 2:  $\frac{V_{olt}}{DIV} = \dots\dots\dots$

Zeitbasis:  $\frac{T}{DIV} = \dots\dots\dots$

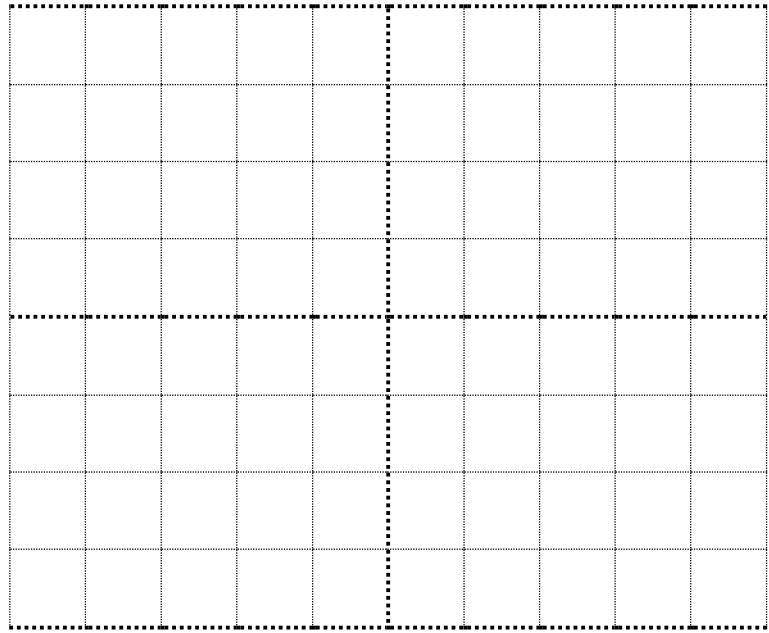


### C1 = 1nF, Tastverhältnis maximal

Kanal 1:  $\frac{Volt}{DIV} = \dots\dots\dots$

Kanal 2:  $\frac{Volt}{DIV} = \dots\dots\dots$

Zeitbasis:  $\frac{T}{DIV} = \dots\dots\dots$

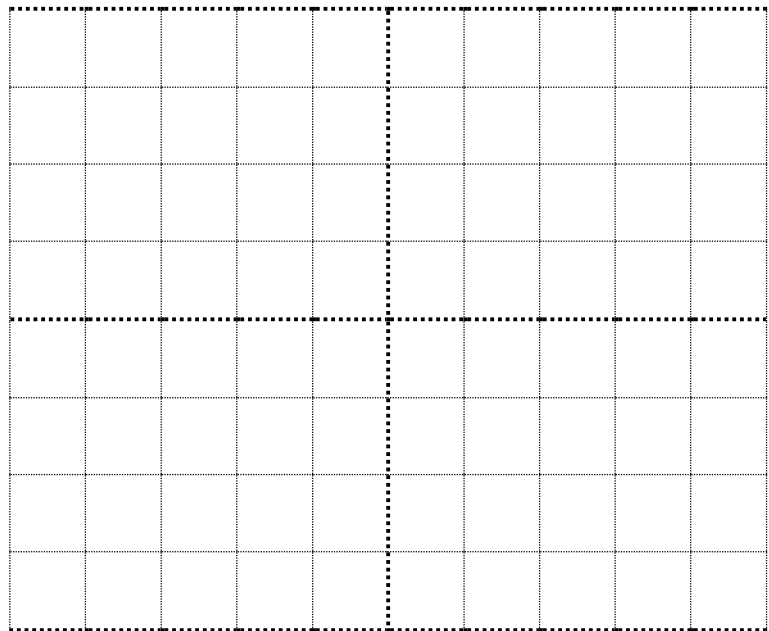


### C1 = 1nF, Mittelstellung

Kanal 1:  $\frac{Volt}{DIV} = \dots\dots\dots$

Kanal 2:  $\frac{Volt}{DIV} = \dots\dots\dots$

Zeitbasis:  $\frac{T}{DIV} = \dots\dots\dots$



6. Erklären Sie in einigen Sätzen die Funktionsweise dieser Schaltung.

### 5.4.2 Pulsweiten – Modulation (PWM)

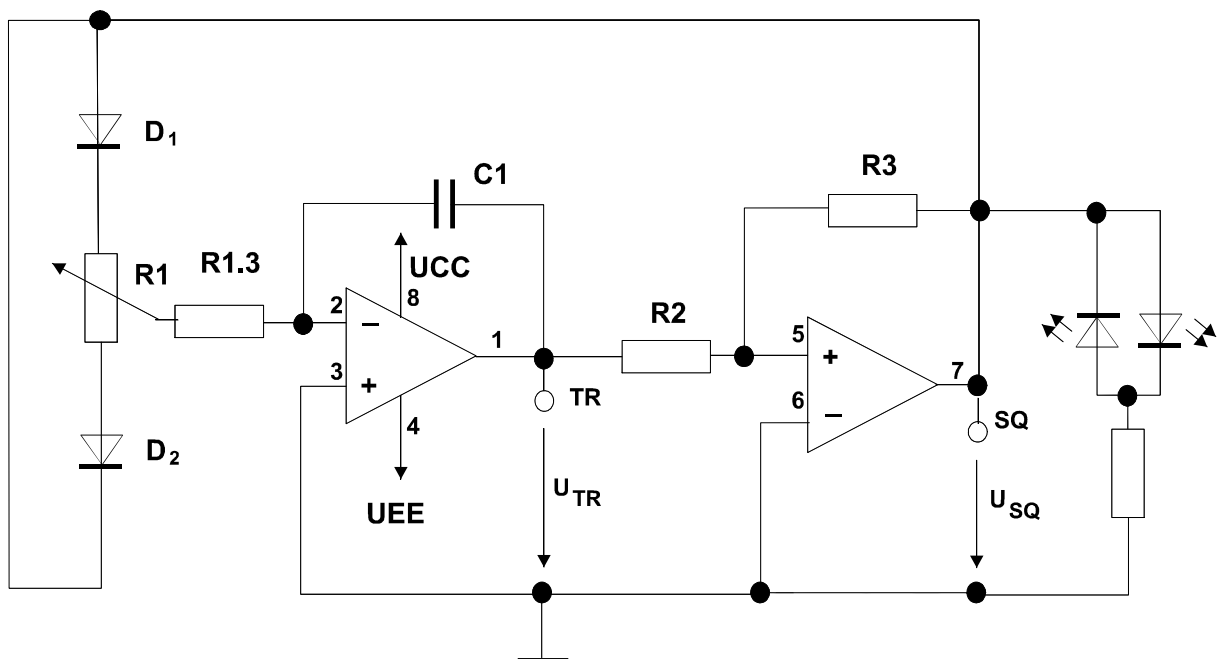


Abbildung 5 Pulsweiten - Modulation

1. Bauen Sie die Schaltung auf das Steckbrett auf. Schalten Sie dazu zwei LEDs antiparallel. Welchen Wert muss der Vorwiderstand für die LEDs haben?
2. Die Versorgungsspannung darf erst eingeschaltet werden, wenn die Schaltung von einem Betreuer überprüft wurde.
3. Verwenden Sie die Schaltungsvariante mit **C1 = 10nF**.
4. Variieren Sie das Tastverhältnis und dokumentieren Sie das Ergebnis.

5. Welche Vorteile hat diese Art der Helligkeitsregelung? Nennen Sie Anwendungen.

6. Wie müsste die Schaltung aufgebaut werden, wenn nur eine LED helligkeitsgesteuert betrieben werden soll?

### 5.4.3 Pulsweiten – Modulation (PWM) mit Leistungsteil und Motor

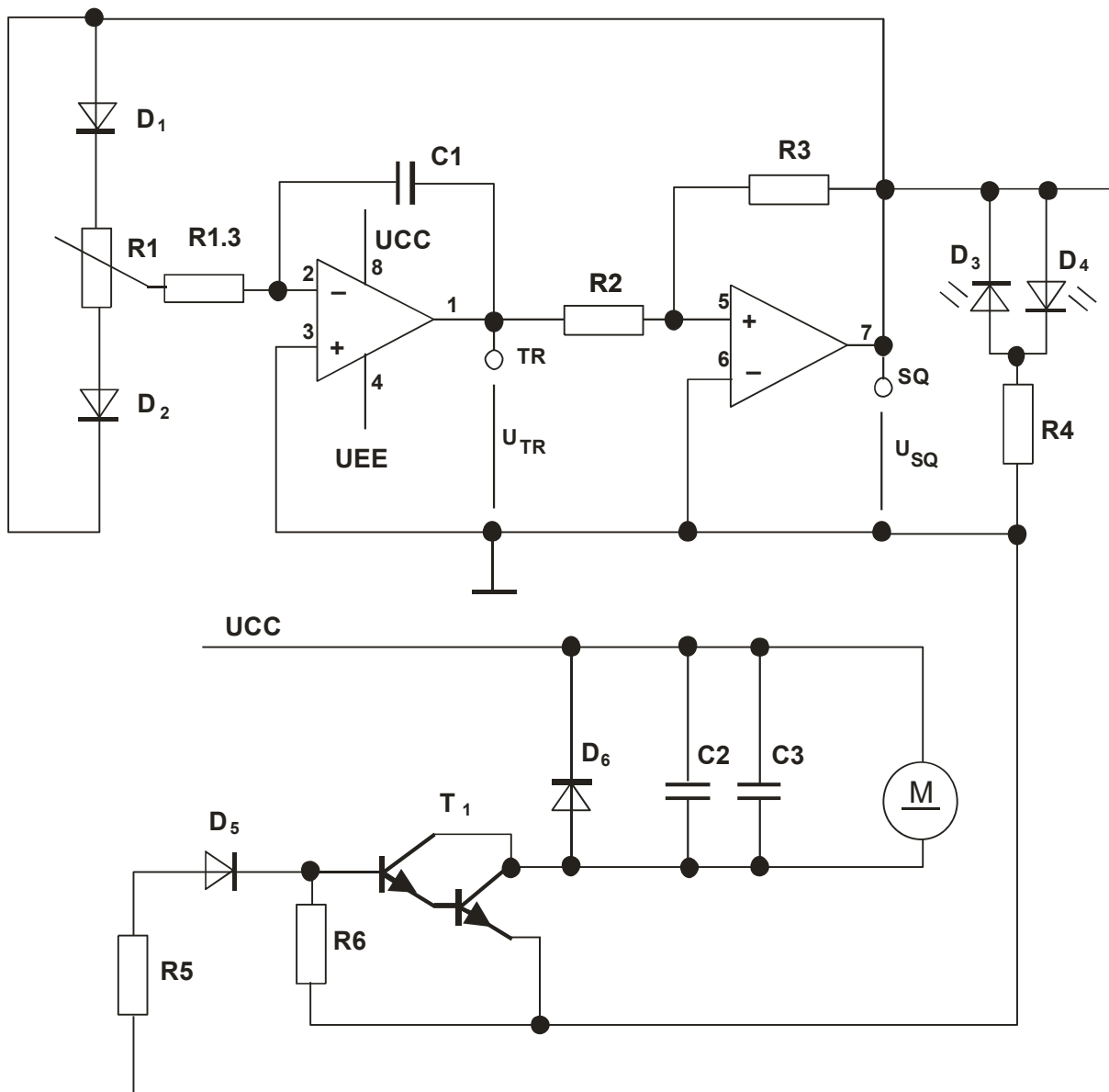


Abbildung 6 PWM mit Motor

Bauteile und Werte:  $R_5 = 3,3\text{k}\Omega$ ,  $R_6 = 10\text{k}\Omega$ ,  $C_2 = 0,1\mu\text{F}$ ,  $C_3 = 1\mu\text{F}$ , T1 BCX53C D1, D2, D5 = 1N4148 D6 = 1N4005P

1. Bauen Sie die Schaltung auf.
2. Die Versorgungsspannung darf erst eingeschaltet werden, wenn die Schaltung von einem Betreuer überprüft wurde.
3. Testen Sie die Schaltung.

4. Erklären Sie in einigen Sätzen die Funktionsweise dieser Schaltung. Wie nennt man den Transistor T1? Welchem Zweck dient die Diode D6? Weshalb sind die Kondensatoren C2, C3 eingebaut?

5. Nennen Sie Anwendungen.