

# Praktikum Elektrotechnik für die Studiengänge Fahrzeugtechnik und Produktionstechnik

## Versuch Analoge Grundsaltungen / OPV

### 1 Allgemeine Hinweise

Die Aufgaben zur Versuchsvorbereitung sind vor dem Versuchstermin von jedem Praktikums-  
teilnehmer **als Hausaufgaben schriftlich** auszuführen. Sie sind Bestandteil des Protokolls und  
werden in die Bewertung des Versuches einbezogen. Ebenso **zur Vorbereitung** des Praktikums  
gehört, sich über **alle** Versuchsaufgaben zu informieren und diese soweit das möglich ist  
theoretisch vorzubereiten (Formeln, Diagramme, Tabellen, Literaturstudium).  
Jede Praktikumsgruppe fertigt ein Protokoll an, welches innerhalb von 2 Wochen abzugeben ist.

Bei der Versuchsdurchführung sind die Messschaltungen mit Hilfe der am Versuchsplatz  
vorliegenden Versuchsanordnung (Analog-Board siehe Anlage) aufzubauen. Dazu werden die  
Bauelemente durch Verbindungskabel bzw. -brücken mit dem Versuchsaufbau verbunden oder  
gebrückt und die Messgeräte angeschlossen.

Der Versuchsaufbau enthält verschiedene Schaltungen, die durch eine Nummer gekennzeichnet  
sind. Bei der Versuchsdurchführung sind die einzelnen Aufgaben unbedingt mit der in der  
Anleitung genannten Schaltungskennzeichnung durchzuführen.

Beachten Sie:

- Auf- und Abbau der Messschaltungen und alle Veränderungen an der Messschaltung dürfen  
nur im spannungslosen Zustand vorgenommen werden (Netzschalter).
- Die Polarität der unsymmetrischen (einseitig geerdeten) elektronischen Messgeräte ist zu  
beachten.

Die Berechnungen, Erläuterungen und das Ausfüllen der Diagramme sollten möglichst direkt in  
den entsprechenden Textabschnitten der Anleitung erfolgen.

Die Schaltung und wichtige Kennwerte des verwendeten Operationsverstärkers finden Sie in der  
Anlage.

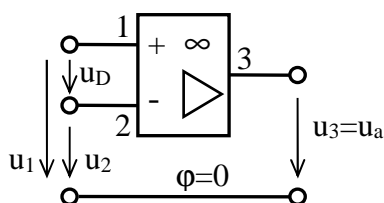
Informieren Sie sich auch über die Verwendung und Funktionsweise von Funktionsgeneratoren  
und Oszilloskopen (z.B.: <http://de.wikipedia.org/wiki/...>)!

## 2 Grundlagen und Vorbereitungsaufgaben

### 2.1 Einführung

Operationsverstärker (Abk. OPV bzw. OpAmp) sind analoge integrierte Schaltkreise (IC), die universell einsetzbare mehrstufige Signalverstärker enthalten. Diese Verstärker sind als Differenzverstärker ausgeführt. Das heißt, der OPV besitzt zwei Signaleingänge, einen invertierenden und einen nicht invertierenden Eingang. Verstärkt wird die Differenzspannung, d.h. das Potential am Ausgang ist im linearen Bereich proportional der Potentialdifferenz zwischen beiden Eingängen. Dadurch ergeben sich vielfältige Möglichkeiten, das Verhalten des OPV allein durch die äußere Beschaltung zu definieren. Dies macht ihn zu einem universellen und häufig eingesetzten Bauelement in der analogen Signalverarbeitung einschließlich der analogen Messtechnik. Im Anhang ist exemplarisch die innere Schaltung des OPV UA741 dargestellt. Aus Anwendersicht ist im Allgemeinen nur das äußere Verhalten interessant.

Schaltsymbol:



- 1 – nichtinvertierender Eingang
- 2 – invertierender Eingang
- 3 – Ausgang
- 4 – positive Betriebsspannung +U<sub>B</sub> (nicht dargestellt)
- 5 – negative Betriebsspannung -U<sub>B</sub> (nicht dargestellt)

### 2.2 Der ideale Operationsverstärker

Zur vereinfachten Betrachtung ist es sinnvoll, bei bestimmten Eigenschaften Idealisierungen vorzunehmen, die aber den realen Eigenschaften sehr nahekommen.

#### a) Verstärkung $v$

Ohne äußere Beschaltung ergibt sich die sogenannte Leerlaufverstärkung, die sehr große Werte annehmen kann:

$$\text{Leerlaufverstärkung: } v_L = \frac{u_a}{u_D} = \frac{u_a}{(u_1 - u_2)} = 10^4 \dots 10^7$$

Bei einem idealen OPV wird eine unendlich große Leerlaufverstärkung angenommen. Für den praktischen Einsatz als Verstärker ist die Leerlaufverstärkung i.a. zu hoch. Hier nutzt man die Möglichkeit, durch die äußere Beschaltung eine niedrigere, dafür aber genau definierte Verstärkung  $v$  zu realisieren.

#### b) Eingangswiderstand $R_e$

Bei realen OPV liegt der Eingangswiderstand je nach verwendeter Technologie im Megaohm- bzw. Gigaohm-Bereich. Das bedeutet, die an den beiden Eingängen fließenden Ströme und die für die Ansteuerung benötigte Leistung sind äußerst gering.

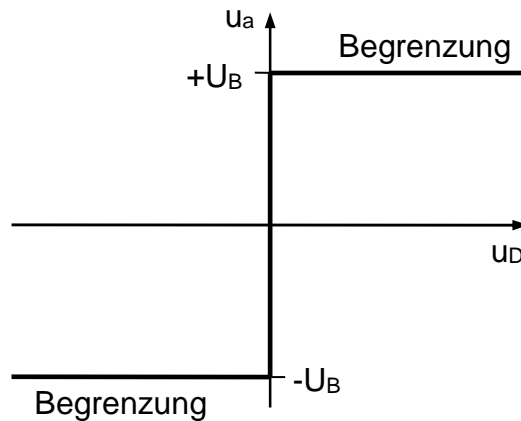
Bei einem idealen OPV wird ein unendlich großer Eingangswiderstand angenommen. D.h., es fließt kein Eingangsstrom und es wird keine Leistung am Eingang benötigt.

#### c) Ausgangswiderstand $R_a$

Der Ausgangswiderstand eines realen OPV ist sehr gering. Das heißt, dass sich die Ausgangsspannung in Abhängigkeit des Ausgangsstromes relativ wenig ändert. Bei einem idealen OPV wird ein Ausgangswiderstand von Null unterstellt. In diesem Fall kann der OPV ausgangsseitig wie eine ideale Spannungsquelle betrachtet werden. Die Ansteuerung nachfolgender Baugruppen ist damit i.a. problemlos möglich.

d) *Begrenzung der Ausgangsspannung  $u_a$*

Da OPV symmetrische Bauelemente sind, benötigen sie auch eine symmetrische Betriebsspannung. Im Gegensatz zu unsymmetrischen Spannungsquellen, bei denen ein Pol das Bezugspotential  $\varphi_0 = 0$  führt, haben hier die beiden Pole gegenüber  $\varphi_0$  positives bzw. negatives Potential, z.B.  $U_B = \pm 15$  V. Das hat zur Folge, dass sich auch die Ausgangsspannung  $u_a$  nur in diesem Bereich verändern kann. Bei idealisierter Betrachtung des OPV wird angenommen, dass  $u_a$  die Werte von  $U_B$  erreichen kann und  $-U_B \leq u_a \leq +U_B$  gilt. Das führt zu folgender Kennlinie  $u_a = f(u_D)$  des idealen OPV:



Bei einem realen OPV erreicht  $u_a$  auf Grund innerer Spannungsabfälle nicht den Wert der Betriebsspannung. Der maximale Wert ist aus dem Datenblatt als Parameter „Output Voltage Swing“ entnehmbar.

### 2.3 Schaltungen mit Operationsverstärkern

Um die Vielzahl von OPV-Schaltungen systematisch zu betrachten, ist eine Einteilung nach der Art der Rückkopplung sinnvoll. Wir unterscheiden folgende Gruppen:

a) *Schaltungen ohne Rückkopplung (natürliches Verhalten)*

Als Beispiel sei hier der Komparator (Vergleicher) genannt, der zum Vergleich von Soll- und Ist-Werten von Signalen verwendet werden kann.

b) *Schaltungen mit Rückkopplung auf den invertierenden Eingang (Gegenkopplung)*

Mit dieser negativen Rückkopplung „bremst“ sich der OPV quasi selbst aus, d.h. durch die äußere Beschaltung wird die Verstärkung auf einen definierten endlichen Wert festgelegt. Die Kennlinie  $u_a = f(u_e)$  ist im linearen Bereich eine Gerade, deren Anstieg der Verstärkung entspricht. Beispiele für diese Rückkopplungsart sind Verstärker-, Filter- und Addier-Schaltungen. Bei diesen Anwendungen ist sicherzustellen, dass die Ausgangsspannung nicht in den Bereich der Begrenzung kommt, da sonst das lineare Verhalten gestört wird.

Invertierender Verstärker: Schaltung siehe Versuch 3.1

Die Verstärkung berechnet sich hier nach der Gleichung

$$v = \frac{u_a}{u_e} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Nichtinvertierender Verstärker: Schaltung siehe Versuch 3.2

Die Verstärkung berechnet sich hier nach der Gleichung

$$v = \frac{u_a}{u_e} = \frac{R_2}{R_1} + 1$$

Spannungsfolger: Schaltung siehe Versuch 3.3

Diese Schaltung ist ein Sonderfall des nichtinvertierenden Verstärkers.  $R_2$  wurde entfernt und durch einen Kurzschluss ersetzt. Somit gilt  $R_2 = 0$ . Der Widerstand  $R_1$  wurde ebenfalls entfernt, aber nicht ersetzt. Somit gilt  $R_1 \rightarrow \infty$ . Daraus ergibt sich für den Spannungsfolger die Verstärkung  $\boxed{v = 1}$  oder  $u_a = u_e$ , woraus auch der Name Spannungsfolger resultiert.

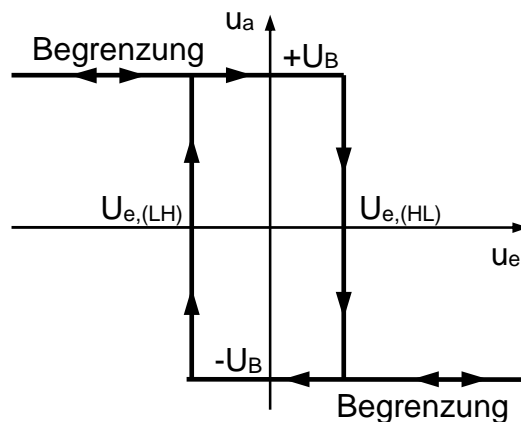
Wozu dient nun eine Schaltung, die den Wert der Spannung nicht verändert, also gerade NICHT verstärkt? Auf diese Art und Weise wird ein Impedanzwandler realisiert. (Die Impedanz  $Z$  ist eine Verallgemeinerung des Widerstandes in der Wechselstromtechnik.) Hier wird ein hoher Widerstand der Eingangsseite auf einen niedrigen Widerstand der Ausgangsseite gewandelt. Damit können z.B. in der Messtechnik zwei aufeinanderfolgende Schaltungsteile voneinander entkoppelt und damit eine unzulässige Rückwirkung vermieden werden.

c) *Schaltungen mit Rückkopplung auf den nichtinvertierenden Eingang (Mitkopplung)*

Bei dieser positiven Rückkopplung wird die ohnehin schon hohe Leerlaufverstärkung noch größer. Dadurch ist es nicht mehr möglich, den OPV im linearen Bereich zu betreiben. Stabile Betriebszustände stellen sich nur noch an der oberen und unteren Begrenzung ein, zwischen denen in Abhängigkeit der Eingangsspannung und der äußeren Beschaltung umgeschaltet wird.

Schmitt-Trigger: Schaltung siehe Versuch 3.4

Diese Schaltung wird auch „Komparator mit Hysterese“ genannt. Im Gegensatz zum einfachen Komparator nach a) ist hier die Referenzspannung (im vorliegenden Fall am nichtinvertierenden Eingang) über den Spannungsteiler  $R_1, R_2$  von der Ausgangsspannung abhängig. Folglich ist die Umschaltspannung abhängig von der Richtung, in der die Kennlinie durchlaufen wird (siehe Skizze).



## 2.4 Frequenzabhängigkeit der Verstärkung (Frequenzgang)

Um die Stabilität von Verstärkerschaltungen bei höheren Frequenzen zu gewährleisten, ist eine interne Frequenzkompensation notwendig. Dadurch wird ab bestimmten Frequenzen die Verstärkung reduziert. Im Diagramm lässt sich diese Abhängigkeit  $v(f)$  besonders günstig darstellen, wenn sowohl die Verstärkung  $v$  als auch die Frequenz  $f$  im dekadischen Logarithmus skaliert und aufgetragen werden (doppelt logarithmische Darstellung, siehe Anlage). Alternativ kann die Verstärkung auch als Spannungs-Übertragungsmaß  $g_u$  dargestellt werden. Für diese logarithmische Größe gilt die Definition

$$g_u / \text{dB} = 20 \cdot \lg(v) = 20 \cdot \lg\left(\frac{u_a}{u_e}\right)$$

### *Bandbreite des Frequenzganges*

Für alle Schaltungen, deren Verstärkung (oder Dämpfung) frequenzabhängig ist, lässt sich eine sogenannte Bandbreite  $B$  definieren. Das ist die Breite des Bereiches, in dem eine „gute“ Übertragung realisiert werden kann. Da der Übergang zur „schlechten“ Übertragung fließend ist, muss diese Grenze definiert werden. Daraus ergibt sich das Kriterium für die Lage der unteren und oberen Grenzfrequenz  $f_u$  und  $f_o$ . Bei diesen Frequenzen gilt

$$v(f) = \frac{v_{\max}}{\sqrt{2}} \approx 0,71 \cdot v_{\max}$$

Das heißt, als Grenzfrequenzen sind die Frequenzen definiert, bei denen die Verstärkung noch ca. 71% des Maximalwertes beträgt. Frage: Wie groß ist diese Verringerung in dB ausgedrückt?

Die Bandbreite berechnet sich dann aus

$$B = f_o - f_u$$

Da beim OPV für niedrige Frequenzen die Verstärkung konstant ist, gilt hier  $f_u = 0$  und die Bandbreite ist identisch mit der oberen Grenzfrequenz.

### *Verstärkungs-Bandbreiten-Produkt*

Die beim OPV notwendige Frequenzkompensation wird meist so eingestellt, dass das Produkt aus Verstärkung und Bandbreite konstant ist. Das heißt, bei hoher Verstärkung ist die nutzbare Bandbreite des Verstärkers geringer und umgekehrt. Grafisch kommt dies in der doppelt-logarithmischen Darstellung durch eine Gerade zum Ausdruck, die mit 20 dB/Frequenzdekade abfällt. Das Verstärkungs-Bandbreiten-Produkt (engl. Gain Bandwidth Product) GBP ist ein wichtiger Parameter des OPV, der dem Datenblatt entnommen werden kann.

## 2.5 Vorbereitungsaufgaben

### *Aufgabe 1: dB-Umrechnung*

In der Tabelle sind wichtige Spannungs-Übertragungsverhältnisse zusammengestellt. Vervollständigen Sie die Tabelle.

v	0,01			0,5	0,71				10	20	
g <sub>u</sub>		-26 dB	-20 dB			0 dB	3 dB	6 dB			40 dB

### *Aufgabe 2: Frequenzgang*

Skizzieren Sie den Frequenzgang eines OPV. Tragen Sie in das Diagramm die untere und die obere Grenzfrequenz sowie die Bandbreite ein.

### *Aufgabe 3: Verstärkungs-Bandbreiten-Produkt*

- Wie groß ist das GBP des im Praktikum eingesetzten OPV  $\mu$ A741 (siehe Anlage)?
- Die OPV-Schaltung soll eine Spannungsverstärkung von 100 aufweisen. Wie groß ist dann die obere Grenzfrequenz?
- Bereiten Sie das doppelt logarithmische Diagramm vor (s. Anhang), indem Sie das GBP als Gerade einzeichnen.

### *Aufgabe 4: Invertierender und nichtinvertierender Verstärker*

Bereiten Sie die Messaufgaben 3.1 und 3.2 vor, indem Sie die Werte, die Sie ohne Messung ermitteln können, ergänzen (Formeln für Verstärkung, Zahlenwerte für  $R_2$  und  $V_{\text{berechnet}}$ )

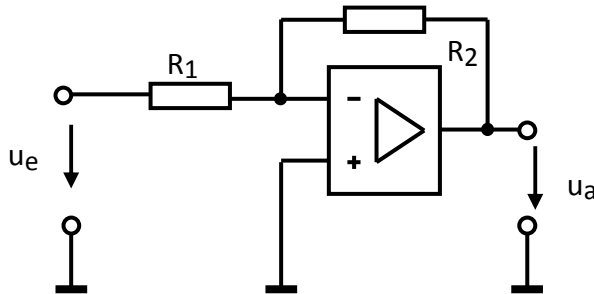
### *Aufgabe 5: Schmitt-Trigger*

Berechnen Sie für die Versuchsaufgabe 3.4 die Umschaltsschwellen  $U_{e(HL)}$  und  $U_{e(LH)}$ . Skizzieren Sie die von Ihnen erwarteten Signalverläufe am Eingang ( $U_e$ ) und am Ausgang ( $U_a$ ) des Schmitt-Triggers. Beachten Sie dabei besonders die zeitlichen Zusammenhänge (Umschaltzeitpunkte).

### 3 Versuchsaufgaben

**grundsätzlicher Hinweis:**  
Inbetriebnahme Ihrer  
Messschaltungen zunächst bei  
„mittleren“ Frequenzen (ca. 1kHz)

#### 3.1 Invertierender Verstärker



Schaltung 2  
verwenden

$V(R_1, R_2) =$

(1) Messen Sie die Spannungsverstärkung  $V_U$  des invertierenden Verstärkers in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$  im Bereich von 30 Hz bis 50 kHz.

Stellen Sie den Frequenzgang in doppeltlogarithmischem Maßstab dar (s. Anlage).

Dimensionieren Sie mittels  $R_1$  und  $R_2$  unterschiedliche Verstärkungen.

a)  $V = -100$  ,  $R_2 =$  ..... ,  $R_1 = 10 \text{ K}\Omega$  ,  $u_e = 50 \text{ mV}$

b)  $V = -1$  ,  $R_2 =$  ..... ,  $R_1 = 10 \text{ K}\Omega$  ,  $u_e = 500 \text{ mV}$

(2) Erhöhen Sie unter den Bedingungen von Aufgabe (1) b) die Eingangsspannung auf  $u_e \geq 2 \text{ V}$

und beobachten Sie die Signalform der Ausgangsspannung bei  $f = 100 \text{ Hz}$  und  $f = 50 \text{ kHz}$ .

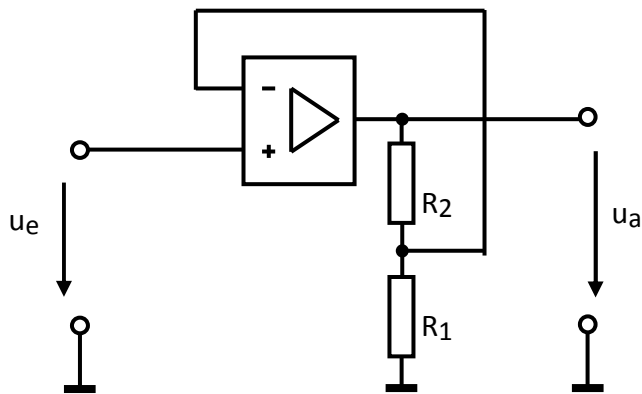
**Hinweis:**

Entfernen Sie bei Bedarf den Abschlusswiderstand ( $50\Omega$  zur „Anpassung“) im System, um den Generator im „Leerlauf“ zu betreiben.

Um welchen Faktor erhöht sich dadurch die Generatorspannung?

Nennen Sie den Grund für die auftretenden nichtlinearen Verzerrungen:

### 3.2 Nichtinvertierender Verstärker



Schaltung 2  
verwenden

$V(R_1, R_2) =$

(1) Realisieren Sie einen nichtinvertierenden Verstärker mit zwei unterschiedlichen äußeren Beschaltungswiderständen.

a)  $R_2 = 1 \text{ M}\Omega$  ,  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$  ,  $u_e = 50 \text{ mV}$

b)  $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$  ,  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$  ,  $u_e = 1 \text{ V}$

Bestimmen Sie rechnerisch und messtechnisch die Spannungsverstärkung  $V$  bei  $f = 1 \text{ kHz}$

a)  $V_{\text{berechnet}} = \text{-----} =$  ,  $V_{\text{gemessen}} = \text{-----} =$

b)  $V_{\text{berechnet}} = \text{-----} =$  ,  $V_{\text{gemessen}} = \text{-----} =$

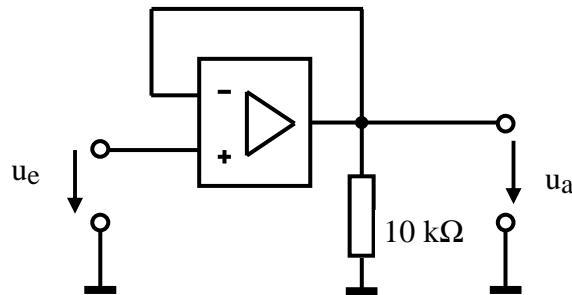
(2) Bestimmen Sie für Aufgabe (1) b) die Aussteuerungsgrenze für  $f = 1 \text{ kHz}$  und  $f = 50 \text{ kHz}$  durch oszilloskopische Beobachtung der Ausgangsspannung.

$u_{\text{emax } 1\text{kHz}} =$

$u_{\text{emax } 50\text{kHz}} =$



### 3.3 Spannungsfolger (Impedanzwandler)



**Schaltung 1  
verwenden**

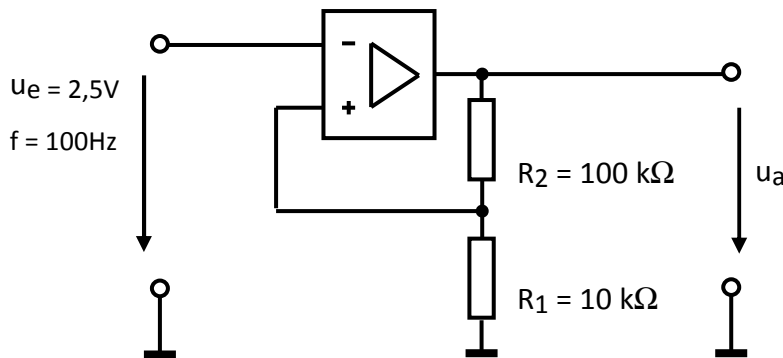
Messen Sie die Ausgangsspannung als Funktion der Eingangsspannung bei zwei unterschiedlichen Signalfrequenzen und tragen Sie die Ergebnisse in ein lineares Diagramm  $u_a = f(u_e)$  ein.

- a)  $f = 200 \text{ Hz}$        $u_e = 50 \text{ mV} \dots 5 \text{ V}$
- b)  $f = 70 \text{ kHz}$        $u_e = 50 \text{ mV} \dots 5 \text{ V}$

**Hinweis:**

Beachten Sie wieder die Möglichkeit zur vorübergehenden Aufhebung der „Anpassung“ bei Bedarf höherer  $u_e$ !

### 3.4 Schmitt-Trigger



**Schaltung 6  
verwenden**

*Hinweis:  
Betriebsspannung  
des OPV: +/- 15V*

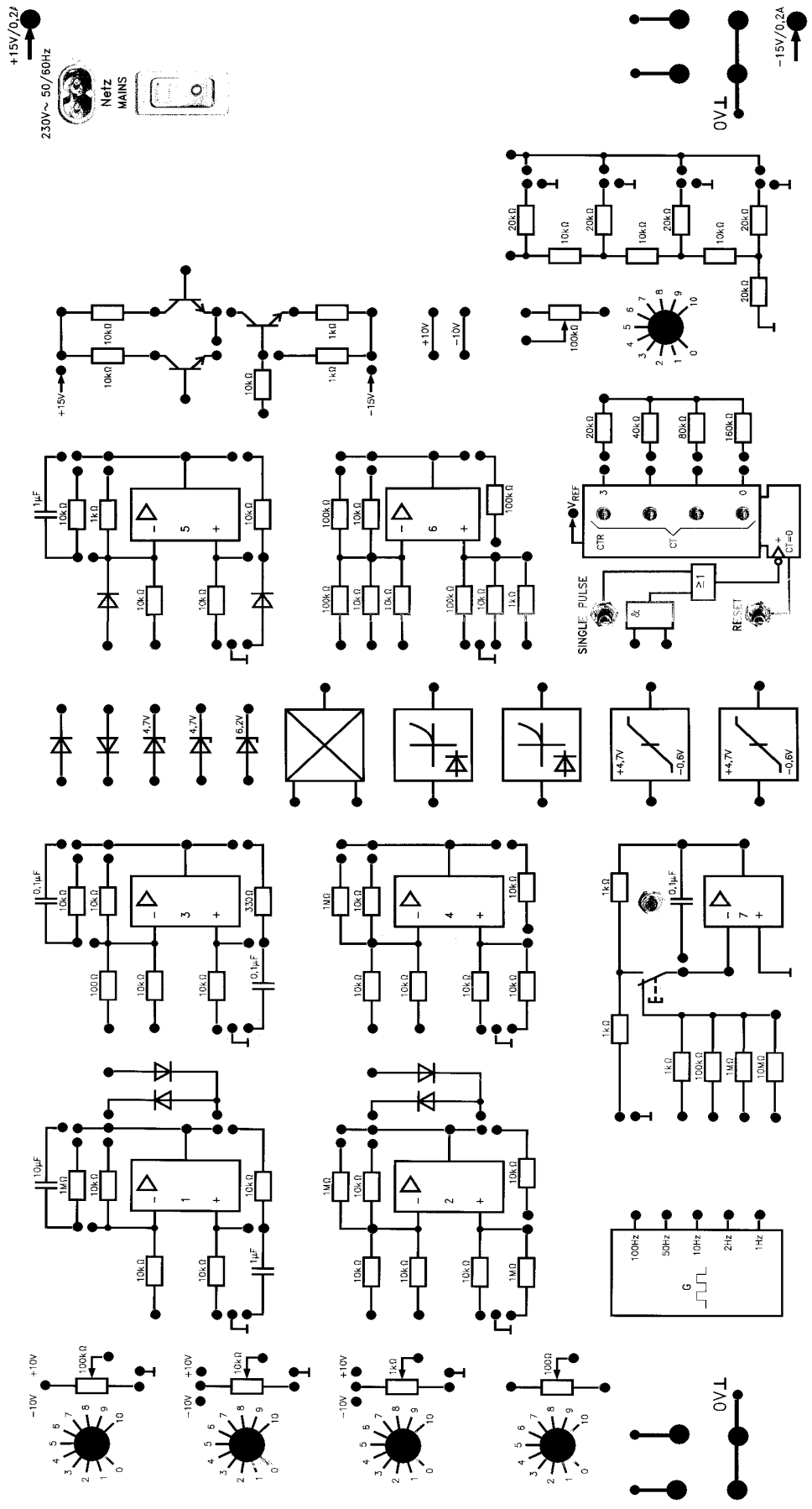
Ermitteln Sie oszilloskopisch die Umschaltpunkte  $U_{a(HL)}$  und  $U_{a(LH)}$  des Schmitt-Triggers und messen Sie jeweils die Eingangsspannung  $u_e$  zu diesen Zeitpunkten.

$U_{e(HL)} =$

$U_{e(LH)} =$

# Anlage 1: Layout Messplatz

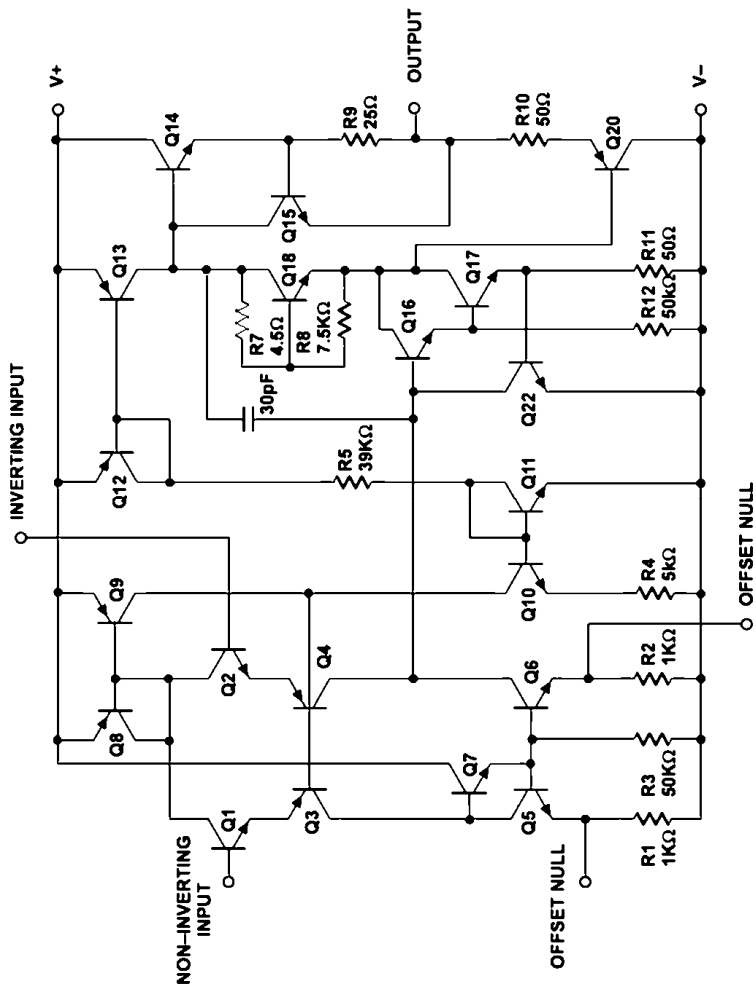


**ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

$V_{CC} = \pm 15V$ ,  $T_{amb} = +25^{\circ}C$  (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit
$V_{io}$	Input Offset Voltage ( $R_S \leq 10k\Omega$ ) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		1	5 6	mV
$I_{io}$	Input Offset Current $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		2	30 70	nA
$I_{ib}$	Input Bias Current $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		10	100 200	nA
$A_{vd}$	Large Signal Voltage Gain ( $V_o = \pm 10V, R_L = 2k\Omega$ ) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	50 25	200		V/mV
SVR	Supply Voltage Rejection Ratio ( $R_S \leq 10k\Omega$ ) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	77 77	90		dB
$I_{CC}$	Supply Current, no load $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		1.7	2.8 3.3	mA

$V_{icm}$	Input Common Mode Voltage Range $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	$\pm 12$ $\pm 12$			V
CMR	Common Mode Rejection Ratio ( $R_S \leq 10k\Omega$ ) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	70 70	90		dB
$I_{os}$	Output short Circuit Current	10	25	40	mA
$\pm V_{opp}$	Output Voltage Swinging $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		14 13		V
SR	Slew Rate $V_i = \pm 10V, R_L = 2k\Omega, C_L = 100pF$ , unity Gain	0.25	0.5		V/ $\mu s$
$t_r$	Rise Time $V_i = \pm 20mV, R_L = 2k\Omega, C_L = 100pF$ , unity Gain		0.3		$\mu s$
$K_{ov}$	Overshoot $V_i = 20mV, R_L = 2k\Omega, C_L = 100pF$ , unity Gain		5		%
$R_i$	Input Resistance	0.3	2		M $\Omega$
GBP	Gain Bandwidth Product $V_i = 10mV, R_L = 2k\Omega, C_L = 100pF, f = 100kHz$	0.7	1		MHz
THD	Total Harmonic Distortion $f = 1kHz, A_v = 20dB, R_L = 2k\Omega, V_o = 2V_{pp}, C_L = 100pF, T_{amb} = +25^{\circ}C$		0.06		%
$e_n$	Equivalent Input Noise Voltage $f = 1kHz, R_S = 100\Omega$		23		$\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$



**ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS**

Symbol	Parameter	UA741M	UA741I	UA741C	Unit
$V_{CC}$	Supply voltage		$\pm 22$		V
$V_{id}$	Differential Input Voltage		$\pm 30$		V
$V_i$	Input Voltage		$\pm 15$		V
$P_{tot}$	Power Dissipation <sup>1)</sup>	500	Infinite		mW
$T_{oper}$	Operating Free-air Temperature Range	-55 to +125	-40 to +105	0 to +70	$^{\circ}C$
$T_{sig}$	Storage Temperature Range		-65 to +150		$^{\circ}C$

1. Power dissipation must be considered to ensure maximum junction temperature ( $T_j$ ) is not exceeded.

