

Elektrotechnik/Elektronik Praktikumsversuch Grundlagen Operationsverstärker

1. Aufbau, Eigenschaften und Kennwerte von Operationsverstärkern

1.1 Kennzeichnung des Operationsverstärkers

Bei diesem Versuch sollen Sie mit den grundlegenden Eigenschaften und Anwendungen von Operationsverstärkern vertraut gemacht werden. Als Operationsverstärker (OPV) bezeichnet man einen integrierten Analogverstärker, dessen Eingangsstufe als Differenzverstärker ausgebildet ist. Er ist für einen weiten Eingangsfrequenzbereich von Gleichstrom (0 Hz) bis zum Hochfrequenzbereich (einige MHz) einsetzbar.

Seine wichtigsten Eigenschaften sind:

- hohe Verstärkung der Differenzeingangsspannung
- hoher Eingangswiderstand
- große Bandbreite
- linearer Aussteuerbereich
- kleiner Ausgangswiderstand
- gute Stabilität

Die Verstärkung und die Arbeitsweise einer Operationsverstärkerschaltung werden hauptsächlich durch die elektrischen Eigenschaften der Rückkopplungsschaltung bestimmt, so daß OPVs sehr universell einsetzbar sind.

Das Schaltsymbol des OPVs mit der Definition der Spannungen zeigt Bild 1.1. Häufig wird dieses Symbol durch weitere Anschlüsse ergänzt, z.B. für die Frequenz- und Offsetkompensation oder die Betriebsspannung. Wichtig ist, daß OPVs bis auf spezielle Ausnahmen keinen Anschluß für das Bezugspotential (Masse) haben.

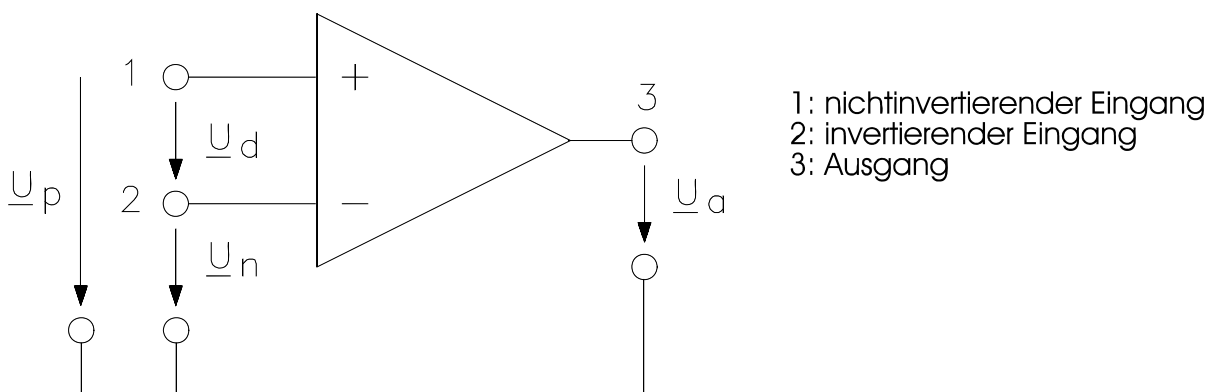


Bild 1.1: Schaltsymbol des OPVs mit und Definition der Spannungen

Der innere Aufbau eines OPV kann ganz grob in drei Stufen eingeteilt werden (s. Bild 1.2.): Eingangsdifferenzverstärker, Spannungsverstärkerstufe und Ausgangsstufe. Dieses Blockschaltbild ist meist durch weitere Stufen zu ergänzen, auf die hier aber nicht weiter eingegangen werden soll.

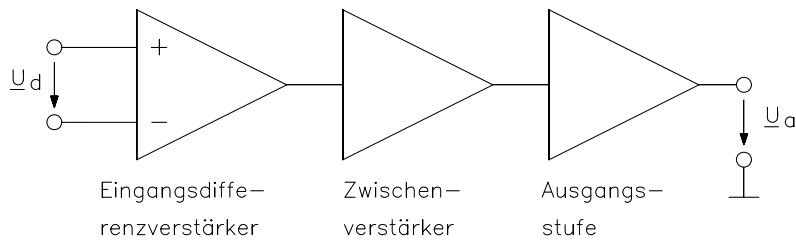


Bild 1.2.: Vereinfachtes Blockschaltbild des OPV

Entsprechend dem Differenzverstärkerprinzip erscheint die Spannungsdifferenz

$$(1.1.) \quad \underline{U}_d = \underline{U}_p - \underline{U}_n$$

mit der Spannungsverstärkung \underline{V} multipliziert am Ausgang.

$$(1.2.) \quad \underline{U}_a = \underline{V} \cdot \underline{U}_d = \underline{V} \cdot (\underline{U}_p - \underline{U}_n)$$

Dabei ist es prinzipiell gleichgültig, ob \underline{U}_d aus der Differenz zweier Spannungen gemäß Gleichung (1.1.) gebildet wird, oder ob ein Eingang auf Bezugspotential liegt und \underline{U}_d gleich der Eingangsspannung ist.

Zwischen dem Signal des invertierenden Eingangs und dem Ausgangssignal besteht eine Phasenverschiebung von 180° , d.h., die Signalspannungen ändern sich gegensinnig. Zwischen dem nichtinvertierenden Eingang und dem Ausgang besteht dagegen eine Phasenverschiebung von 0° , vgl. Gleichung (1.2.). Operationsverstärker werden so entworfen, daß sich bei $U_p = U_n = 0$ auch $U_A = 0$ ergibt. Um diesen Ruhearbeitspunkt zu garantieren, müssen in die Eingänge des OPVs kleine Gleichströme (I_p , I_n) fließen können (Basisströme bei Eingangsstufen mit Bipolartransistoren, Gateströme bei FET-Eingangsstufen). Es ist also in jedem Fall ein Gleichstromweg zum Bezugspotential zu sichern; ein OPV mit offenem Eingang arbeitet nicht!

Um eine Aussteuerung des OPVs in positiver und negativer Spannungsrichtung relativ zum Bezugspotential zu ermöglichen, benötigen diese eine positive und eine negative Betriebsspannung, deren Verbindungspunkt auf dem Bezugspotential (Masse) liegt (s. Bild 1.3.). Es ist auch Betrieb mit nur einer Versorgungsspannung möglich, wenn ein Bezugspotential geschaffen wird, das ca. bei $\frac{1}{2} \cdot U_B$ liegt.

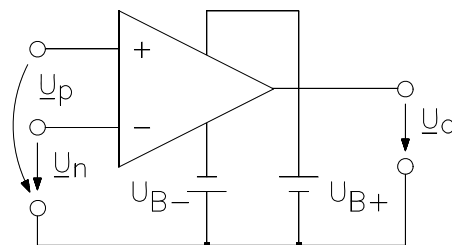


Bild 1.3.: Betriebsspannungen beim OPV

1.2. OPV mit Rückkopplung

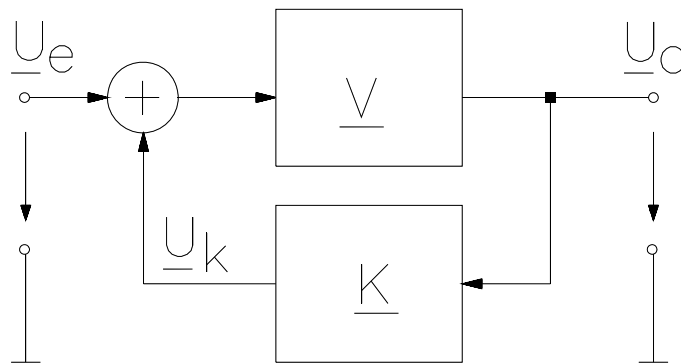


Bild 1.4.: Rückgekoppelte Verstärkerschaltung

OPVs werden fast ausschließlich in rückgekoppelten Schaltungen verwendet. Bild 1.4. zeigt das entsprechende Blockschaltbild. Die resultierende (geschlossene) Verstärkung der Gesamtschaltung folgt dabei aus Gleichung (1.3.).

$$(1.3.) \quad \underline{A}_U = \frac{\underline{U}_a}{\underline{U}_e} = \frac{\underline{V}}{1 - \underline{K} \cdot \underline{V}} \quad \begin{array}{l} \underline{K} \cdot \underline{V} < 0 : \text{Gegenkopplung} \\ \underline{K} \cdot \underline{V} > 0 : \text{Mitkopplung} \end{array}$$

Eine Rückkopplung ist demnach dann eine Mitkopplung, wenn \underline{V} positiv ist (\underline{K} wird im allg. positiv sein), d.h. vom Ausgang zum nichtinvertierenden Eingang rückgekoppelt wird. Eine Gegenkopplung liegt vor, wenn \underline{V} negativ ist, d.h., zum invertierenden Eingang zurückgekoppelt wird.

2. Praktische Schaltungen mit Operationsverstärkern

2.1. Der OPV als invertierender Verstärker

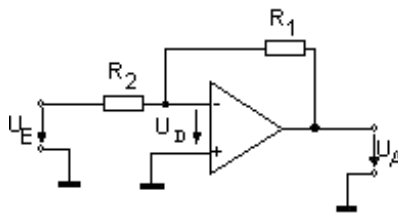


Bild 2.1.: invertierender Verstärker

In dieser Operationsverstärkerschaltung wird das Eingangssignal an den invertierenden Eingang gelegt. Bei steigendem Eingangssignal fällt das Ausgangssignal, d.h. die Phasenlage ist umgekehrt (=invertiert) zum Eingangssignal. Die Verbindung des Ausgangs mit dem invertierenden Eingang nennt man Gegenkopplung. Wie kann nun das Verhalten des gegengekoppelten OPVs in Abhängigkeit der Beschaltung vorherbestimmt werden? Ein gegengekoppelter OPV wird sein Ausgangssignal immer so einstellen, daß die Differenz von Spannung bzw. Strom an beiden Eingängen zu Null wird. Wenn der nichtinvertierende Eingang an Masse (= 0V) liegt, so kann auch die Spannung am invertierenden Eingang mit 0V angenommen werden. Gleiches gilt für den Strom: von 0V nach Masse fließt kein Strom,

also fließt auch in den invertierenden Eingang kein Strom. Nach der Kirchhoffschen Knotenregel muß dann am Knoten (R_2 - R_1 -invertierender Eingang) der Strom I_2 durch R_2 dem Strom I_1 durch R_1 entsprechen. Die Spannungsübersetzung G_V ergibt folgendermaßen:

$$2.1. \quad I_2 = U_E / R_2 = I_1 = -U_A / R_1$$

$$2.2. \quad U_E = R_2 \cdot I_2$$

$$2.3. \quad U_A = -R_1 \cdot I_1$$

$$2.4. \quad G_V = U_A / U_E = (-R_1 \cdot I_1) / (R_2 \cdot I_2) \\ = -R_1 / R_2, \text{ da } I_1 = I_2.$$

Der invertierende Verstärker erlaubt also sowohl Signalverstärkung ($R_1 > R_2$), Signalinvertierung ($R_1 = R_2$) als auch Signalabschwächung ($R_1 < R_2$). Zu beachten ist, daß der Innenwiderstand R_E der Quelle (die U_E liefert) zu R_2 addiert werden muß und somit in die Spannungsübersetzung eingeht. Dies kann aber bei entsprechender Wahl von R_2 ($R_2 \gg R_1$) vernachlässigt werden. Das Ausgangssignal ist in der Phase um 180° verschoben.

2.2. Der OPV als Komparator

2.2.1. Komparator

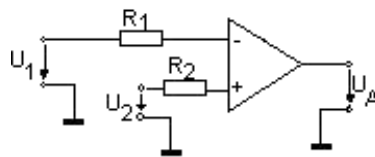


Bild 2.2.: Komparator

Der OPV arbeitet in dieser Schaltung als analoger Vergleicher. Die Eingangsspannung U_1 wird mit einer Referenzspannung U_2 verglichen. Die Ausgangsspannung nimmt nur Werte von $+U_B$ und $-U_B$ an.

$$2.5. \quad U_A = \begin{cases} +U_B & : U_1 < U_2 \\ -U_B & : U_1 > U_2 \end{cases}$$

Schaltungstechnisch problematisch ist der Fall, wenn U_1 ungefähr U_2 entspricht. Um dieses Problem zu lösen, verwendet man Komparatoren mit Hysterese.

2.2.2. Komparator mit Hysterese (Schmitt-Trigger)

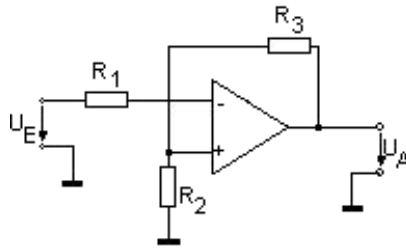


Bild 2.3.: Komparator mit Hysterese (Schmitt-Trigger)

Dieser Komparator ist ebenfalls ein analoger Vergleichler, der jedoch im Gegensatz zur vorhergehend beschriebenen Schaltung über den Rückkopplungswiderstand R_3 verfügt. Der Widerstand R_2 bildet zusammen mit R_3 einen Spannungsteiler, der, je nach Ausgangsspannung U_A , die Spannung am nichtinvertierenden Eingang des OPV vergrößert oder verkleinert. Diese Spannung kann nach Gleichung 2.6. bestimmt werden.

$$2.6. \quad U_{R2} = U_A \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3}$$

Dieser Spannungswert am nichtinvertierenden Eingang wird mit der Eingangsspannung verglichen und bestimmt die Umschaltswelle. Die Ausgangsspannungen ergeben sich zu:

$$2.7. \quad U_A = \begin{cases} +U_B & : U_E < U_{R2} \\ -U_B & : U_E > U_{R2} \end{cases}$$

Solange die Spannung am nichtinvertierenden Eingang positiver als die Spannung am invertierenden Eingang ist, liegt am Ausgang etwa $+U_B$ an. Wenn die Spannung am nichtinvertierenden Eingang kleiner als die Spannung am invertierenden Eingang wird (Berechnung nach 2.6.), kippt der Ausgang auf $-U_B$. Über die Rückkopplung R_3 ändert sich augenblicklich die Spannung am nichtinvertierenden Eingang. Damit ist sichergestellt, daß auch bei einem störungsbehafteten Eingangssignal der Komparator sicher in einen stabilen Zustand am Ausgang schaltet. Im umgekehrten Fall, wenn die Spannung am nichtinvertierenden Eingang kleiner als die Spannung am invertierenden Eingang ist, kippt der Ausgang auf $+U_B$, sobald die Spannung am nichtinvertierenden Eingang $-U_{R2}$ überschreitet. Damit erhöht sich auch sofort die Spannung am nichtinvertierenden Eingang, da über R_3 der Pegel angehoben wird. Während der einfache Komparator aus dem ersten Teil des Versuches nur einen Schaltpunkt hat, verfügt diese Variante über 2 Schaltpunkte ($\pm U_{R2}$), je nachdem, ob das Signal am nichtinvertierenden Eingang steigt oder fällt. Diese Spannungsdifferenz der Schaltpunkte nennt man Hysterese. Die Größe der Hysterese und damit die Spannung der Schaltpunkte wird durch den Spannungsteiler R_2R_3 bestimmt.

Zur Dimensionierung von R_2 geht man folgendermaßen vor: Das Ausgangssignal U_A sei positiv (im Versuch ca. $+6V$). Die Spannung U_{E+} am nichtinvertierenden Eingang ergibt sich aus der Größe des Signals am invertierenden Eingang zum gewünschten Schaltzeitpunkt (im Versuch: $0V$, da der Eingang auf Masse liegt, das Störsignal wird dabei nicht berücksichtigt). Die Spannung U_E am nichtinvertierenden Eingang entspricht der maximalen Spitzenspannung des Störsignals (im Versuch: $1V$, bei $\pm 1V = 2V$ Spitze-Spitze-Spannung). Mit der festgelegten Größe von R_1 berechnet sich der Strom durch R_1 zu:

$$2.8. \quad I = (U_A - U_{E+}) / R_1 = (1V - 0V) / 100k\Omega = 10\mu A$$

Dieser Strom fließt durch R2, da der nichtinvertierende Eingang keinen Strom aufnimmt oder abgibt. Aus der maximalen Ausgangsspannung U_A und dem Strom I errechnet sich nun R2 zu

$$2.9. \quad R_2 = (U_A - U_{E+}) / I = (6V - 1V) / 10\mu A = 500k\Omega$$

In der Praxis wählt man den nächstkleineren (handelsüblichen) Wert für R_2 (hier also 470k Ω), da nur dann nach dem Schalten des Komparators die Spannung am nichtinvertierenden Eingang sicher kleiner (bzw. größer, beim Schalten in umgekehrter Richtung) ist, als die Spannung am invertierenden Eingang. Diese Schaltung ist also in der Lage, einen definierten Ausgangszustand trotz störungsüberlagertem Eingangssignal anzunehmen.

2.3. Der OPV als Rechteckgenerator

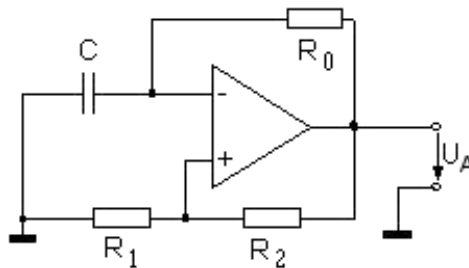


Bild 2.4.: astabiler Multivibrator

Aufgrund der Tatsache, daß wir keinen idealen OPV zur Verfügung haben, wird der Ausgang der Schaltung in Bild 2.4. im Einschaltmoment entweder positives oder negatives Potential führen. Bei unserer Betrachtung gehen wir davon aus, daß der Ausgang auf negativem Potential liegt. Über den Spannungsteiler R_1R_2 liegt dann ein Teil der Ausgangsspannung am nichtinvertierenden Eingang:

$$2.10. \quad U_{E+} = U_A \cdot R_1 / (R_2 + R_1)$$

Der Kondensator C lädt sich über R_0 auf die negative Spannung auf, die am invertierenden Eingang des OPV anliegt. Sobald diese Spannung nun negativer ist als die Spannung am nichtinvertierenden Eingang, kippt der Ausgang auf positives Potential. Damit ändert sich aber auch schlagartig die Polarität der Spannung am nichtinvertierenden Eingang. Der Kondensator C wird nun bis zum Erreichen dieser Spannung aufgeladen. Anschließend wechselt die Ausgangsspannung, der Vorgang setzt sich fort. Die Zeit, die je Lade- bzw. Entladevorgang vergeht, bestimmt die Frequenz des Oszillators. Sie läßt sich folgendermaßen errechnen (zur Vereinfachung gehen wir davon aus, daß $R_1 = R_2$ gilt):

$$2.11. \quad t = R_0 \cdot C \cdot \ln 3 \quad | \text{ bei } R_1 = R_2$$

Da für eine ganze Periode der Kondensator einmal positiv und einmal negativ aufgeladen wird, errechnet sich die Periodendauer des Ausgangssignals zu:

$$2.12. \quad \tau = 2 \cdot R_0 \cdot C \cdot \ln 3 \quad | \text{ bei } R_1 = R_2$$

Für $1/R_0 = 1/R_1 + 1/R_2$ gilt:

$$2.13. \quad f = \frac{1}{2 \cdot R_0 \cdot C \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{R_1}{R_2}\right)}$$

3. Versuchsaufbau

Zur Durchführung der Versuche wird eine universelle Experimentierschaltung nach /1/ verwendet. Diese gliedert sich in drei Teile: die Versorgungsspannungsaufbereitung, die Hilfsschaltung mit Rechteckgenerator und Dreieckgenerator und die eigentliche Testschaltung mit der Fassung für den zu testenden OPV (DUT = device under test). Die Außenbeschaltung des Operationsverstärkers kann durch Bestückung der Steckplätze BE1x, BE2x, BE3 und BE4x leicht dem jeweiligen Anwendungszweck angepaßt werden (das x steht für a, b, oder c, je nach Steckplatz). Am Ausgang A6 des DUT folgt eine bipolare Schaltstufe. Deren Ausgang ist über A7 zugänglich, gleichzeitig wird das Signal auch zu den Leuchtdioden LED₅₀, LED₅₁ und LED₅₂ geleitet. Diese Leuchtdioden zeigen den Pegel des Ausgangssignales des Operationsverstärkers an. Grün bedeutet $U_A > 0V$, rot $U_A < 0V$. Zusätzlich zeigt die Zweifarbleden Ausgangspegel an.

Die Bauelemente für die OPV-Außenbeschaltung sind entsprechend des jeweiligen Versuchsaufbaus im spannungslosen Zustand der Versuchsschaltung aufzustecken. Alle Bauelementebezeichnungen bei den Bestückungs- und Einstellvorschriften in der Versuchsanleitung beziehen sich auf die im Versuchsaufbau aufgedruckten Bezeichnungen.

4. Vorbereitungsaufgaben (schriftlich)

1. Überlegen Sie sich, welche wichtigen Kennwerte von Operationsverstärkern zu definieren sind und welche Werte diese annehmen sollten (gegen Null oder Unendlich).
2. Erläutern Sie, woran allgemein ein invertierender und ein nichtinvertierender Verstärker im Schaltbild zu erkennen sind.
3. Stellen Sie zusammen, woran ein Verstärker mit Gegenkopplung und woran ein Verstärker mit Mitkopplung im Schaltbild zu erkennen ist.
4. Finden Sie praktische Anwendungen einer Komparatorschaltung mit Hysterese.

5. Versuchsdurchführung

5.1. Der OPV als invertierender Verstärker

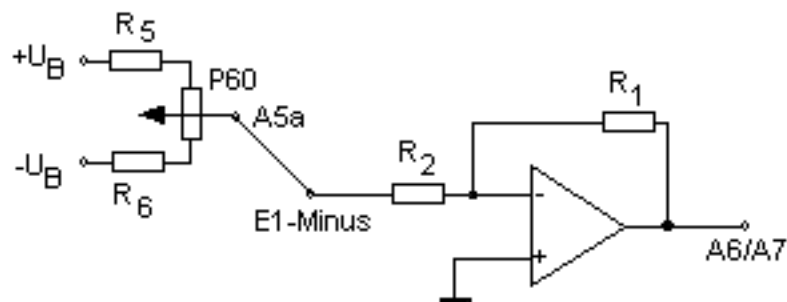


Bild 5.1.: Versuchsschaltung invertierender Verstärker

Bestückung des Boards: BE1a Widerstand R1, 220k Ω
 BE2a Widerstand R2, 100k Ω
 BE4a Drahtbrücke
 BE5 Widerstand R5, 10k Ω
 BE6 Widerstand R6, 10k Ω
 A5a mit E1-Minus verbinden

Voltmeter 1 (10V - Bereich) mit E1-Minus und Masse verbinden, Voltmeter 2 (10V - Bereich) mit A6 und Masse verbinden.

Drehen Sie das Potentiometer P60 in Mittelstellung (0V am invertierenden Eingang).

1. Ermitteln Sie rechnerisch die Spannungsverstärkung des OPV mit der angegebenen Außenbeschaltung entsprechend der Beziehungen in Gleichung 2.1.
2. Nehmen Sie die Übertragungskennlinie der Schaltung auf und stellen Sie diese grafisch dar. Verändern Sie dazu die Eingangsspannung des OPV an E1-Minus mit Hilfe des Potentiometers P60 von -5V bis +5V in Schritten zu 0,2V.
3. Berechnen Sie die Werte der Ausgangsspannung für die o.g. Eingangsspannungswerte und stellen sie die errechneten und die experimentell ermittelten Werte in einer Tabelle dar. Begründen Sie eventuelle Abweichungen.

5.2. Der OPV als Komparator

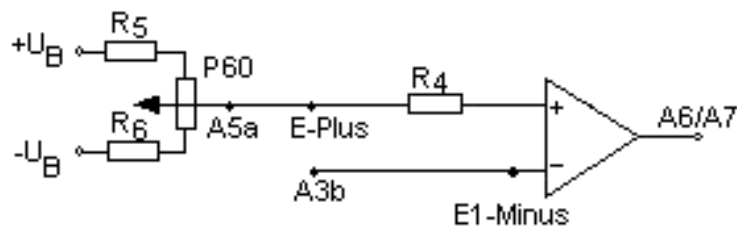


Bild 5.2.: Versuchsschaltung einfacher Komparator

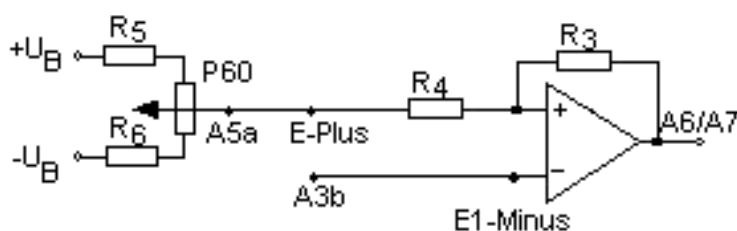


Bild 5.3.: Versuchsschaltung Komparator mit Hysterese

Bestückung des Boards: BE2a Drahtbrücke
 BE4b Widerstand R4, 100k Ω
 BE5 Widerstand R5, 2,2k Ω
 BE6 Widerstand R6, 2,2k Ω

R3 wird im ersten Versuchsteil noch nicht bestückt. P60 auf Rechtsanschlag (Spannung am nichtinvertierenden Eingang ist damit +UB), P30 auf Linksanschlag (Frequenz des eingebauten Rechteckgenerators $f \approx 1\text{kHz}$), E-Plus mit A5a verbinden, E1-Minus mit A3b verbinden (Rechtecksignal $f \approx 1\text{kHz}$, +/-1V an invertierenden Eingang legen). Voltmeter 1 (10V - Bereich) mit E-Plus und Masse verbinden. Oszilloskop an A6 und Masse schalten.

Die Spannung am invertierenden Eingang beträgt 0V, allerdings ist ihr ein Wechselspannungsanteil von +/- 1Volt überlagert. Die Spannung am nichtinvertierenden Eingang wird von P60 bestimmt. Nach Anlegen der Betriebsspannung geht der Ausgang A6 bzw. A7 an die positive Aussteuerungsgrenze, da die Spannung am nichtinvertierenden Eingang größer ist als die Spannung am invertierenden Eingang. Die grüne LED muß leuchten.

1. Drehen Sie P60 langsam in Richtung Linksanschlag (Verringerung der Spannung am nichtinvertierenden Eingang), bis beide LEDs zu leuchten beginnen. Notieren Sie sich die Spannung am nichtinvertierenden Eingang im Umschaltunkt.
2. Drehen Sie P60 weiter, bis die grüne LED verlischt und nur noch die rote LED leuchtet. Notieren Sie sich die Spannung am nichtinvertierenden Eingang im Umschaltunkt.
3. Vergleichen Sie die notierten Werte mit der Amplitude des an den Eingang E1-Minus gelegten Wechselspannungssignals. Erläutern Sie den Zusammenhang.
4. Ergänzen Sie die Schaltung durch Einbau des Widerstandes R3 (BE3, 470k Ω , Schaltung Bild 4.3.), vorher Betriebsspannung abschalten! Drehen Sie P60 wieder an den Rechtsanschlag und schalten Sie die Betriebsspannung zu.
5. Gehen Sie vor wie unter Punkt 1 und verfolgen Sie das Verhalten des Komparators. Tragen Sie die Spannung am nichtinvertierenden Eingang und den Zustand des Ausganges (rote oder grüne LED und zugehörige Spannung) in ein Diagramm ein.

5.3. Der OPV als Rechteckgenerator

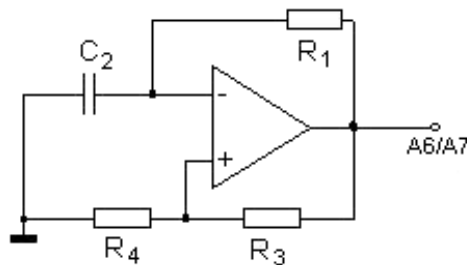


Bild 5.4.: Versuchsschaltung Rechteckgenerator

Bestückung des Boards:

BE1a	Widerstand R1, 680k Ω
BE2c	Kondensator C2, 1 μ F
BE3	Widerstand R3, 10k Ω
BE4a	Widerstand R4, 39k Ω

Oszillograf an A6 und Masse anschließen.

1. Ermitteln Sie rechnerisch die zu erwartende Oszillatorfrequenz der Schaltung.
2. Nehmen Sie die Ausgangssignalspannung mit Hilfe des Oszilloskops auf und stellen Sie diese danach grafisch über der Zeitachse dar, so daß mindestens 2 Schwingungsperioden sichtbar sind.
3. Vergleichen Sie die errechneten Werte mit den gemessenen. Geben Sie Gründe für eventuelle Abweichungen an.

6. Literatur

- /1/ Berka, H.: Versuche mit Operationsverstärkern, AATiS e.V., Praxisheft 7
- /2/ Herpy, M.: Analoge integrierte Schaltungen, Franzis-Verlag München 1978
- /3/ Dostál, J. : Operationsverstärker, Dr. Alfred Hüthig Verlag Heidelberg 1989
- /4/ Hirschmann, D.: Operationsverstärker, Franzis Verlag München 1990
- /5/ Nährmann, D.: Operationsverstärker-Praxis, Franzis Verlag München 1988
- /6/ Seifart, M.; Beikirch, H.: Analoge Schaltungen, Verlag Technik Berlin München 1998
- /7/ Tietze, U.; Schenk, Ch.: Halbleiter-Schaltungstechnik, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York 1999
- /8/ Köstner, R.; Möschwitzer, A.: Elektron. Schaltungstechnik - Analogschaltkreise, Akad. Verlagsgesellschaft Geest & Portig Leipzig 1987
- /9/ Bergtold, F.: Schaltungen mit Operationsverstärkern Bd.I, II, R. Oldenburg Verlag München Wien 1973
- /10/ Praktikumsversuchsanleitung Professur Elektronische Bauelementen (Prof. Ebest/Dr. Kühne)