

Facharbeit

Der Operationsverstärker:

Grundlagen und einfache
Anwendungsschaltungen



Fach:	Physik
Fachlehrer:	Herr Wilmes
Arbeitsbeginn:	02.02.04
Abgabetermin:	15.03.04
Verfasser:	Sebastian Holtkotte

Gliederung

1 Einleitung	Seite 3
1.1 Geschichte des Operationsverstärkers	Seite 3
2 Grundlagen des Operationsverstärkers	
2.1 Eigenschaften des Operationsverstärkers	Seite 4
2.2 Gegenkopplung	Seite 4
2.2.1 Spannungsfolger	Seite 4
2.2.2 Invertierende Verstärkung	Seite 5
2.2.2.1 Messung zum invertierenden Verstärker	Seite 6
2.2.2.2 Messauswertung zum invertierenden Verstärker ...	Seite 7
2.2.2.3 Offsetspannungskompensation	Seite 7
2.2.3 Nichtinvertierender Verstärker	Seite 8
2.2.3.1 Messung zum nichtinvertierenden Verstärker	Seite 9
2.3 Messung zum Frequenzgang	Seite 9
2.3.1 Auswertung der Messung zum Frequenzgang	Seite 10
3 Schaltungen mit dem Operationsverstärkers	
3.1 Komparator	Seite 10
3.1.1 Messung zum Komparator	Seite 11
3.2 Nichtinvertierender Schmitt-Trigger	Seite 11
3.2.1 Messung zum nichtinvertierenden Schmitt-Trigger	Seite 12
3.2.2 Auswertung der Messung zum Schmitt-Trigger	Seite 13
3.2.3 Anwendung des Schmitt-Triggers	Seite 14
4 Fazit	Seite 14
Anhang	
4.1 Literaturverzeichnis	Seite 16
4.2 Messungen	Seite 17

1 Einleitung

In der analogen Rechentechnik zählt der Operationsverstärker zu einem der wichtigsten Bauelemente, mit dem sich eine Vielzahl von mathematischen Operationen durchführen lassen. Es lassen sich neben Addition und Multiplikation auch sehr komplexe Schaltungen zum Differenzieren, Integrieren oder Logarithmieren mit Hilfe des Operationsverstärkers bewältigen.

Das Einsatzgebiet des Operationsverstärkers hat sich im Laufe der Zeit immer mehr erweitert und umfasst heute neben der Mess- und Regeltechnik auch die Raumfahrt- und Militärtechnik.

In dieser Facharbeit werden neben einfachen Schaltungen mit dem Operationsverstärker, die wesentlichen Grundlagen vom Operationsverstärker beschrieben und erklärt.

1.1 Geschichte des Operationsverstärkers

Eine sehr bedeutende Entdeckung machte H.S. Black im Jahre 1927, mit dem Prinzip der Gegenkopplung(siehe 2.2). In dieser Zeit gab es allerdings noch keine Operationsverstärker, sondern nur Trioden, die zur Verstärkung von Radio Signalen eingesetzt wurden.

Erstmals wurden Operationsverstärker während des 2. Weltkrieges gebaut und für Militärzwecke, wie zum Beispiel in der Luftabwehr, eingesetzt. Mit Hilfe der Erfindung von Transistoren im Jahre 1947 war es möglich Transistoren anstelle von Röhren beim Operationsverstärker zu benutzen. Von nun an reichte eine Versorgungsspannung von max. $\pm 20V$ gegenüber üblichen $\pm 110V$ bei Operationsverstärkern mit Röhrentechnik. Außerdem verkleinerten sich die Operationsverstärker auf 1/9 ihrer vorherigen Größe[3].

Nach Beseitigung von Temperaturproblemen kam der erste transistororientierte Operationsverstärker 1960 auf den Markt.

Im Jahre 1968 startete der kommerzielle Erfolg des Operationsverstärkers mit der Produktion des $\mu A741$. Sein Haupteinsatzgebiet befand sich in der Datenverarbeitung.

Im Laufe der Zeit wurden Operationsverstärker preiswerter und fanden immer mehr Einsatzmöglichkeiten. Heutzutage werden Operationsverstärker in fast allen komplizierten Schaltungen eingesetzt und können in Computern, Taschenrechnern oder kleinen Elektrogeräten wiedergefunden werden[9].

2 Grundlagen des Operationsverstärkers

2.1 Eigenschaften des Operationsverstärkers

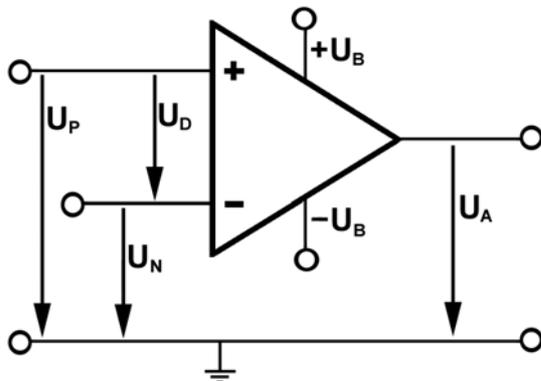


Abb. 1: Schaltsymbol des Operationsverstärkers

Das Schaltsymbol eines Operationsverstärkers ist in Abb. 1 dargestellt. Der Operationsverstärker besitzt einen invertierenden Eingang U_N , einen nicht-invertierenden Eingang U_P und jeweils 2 Anschlüsse für die Betriebsspannung U_B . Mit Hilfe des Operationsverstärkers lassen sich Eingangsspannungsdifferenzen U_D verstärkt ausgeben[5].

$$(1) \quad U_D = U_P - U_N$$

$$(2) \quad U_A = V_L \cdot U_D = V_L \cdot (U_P - U_N) \quad V_L = \text{Leerlaufverstärkung}$$

Die Leerlaufverstärkung liegt in der Größenordnung von 10^5 , solange es nicht zur Übersteuerung ($U_A = U_{\max}$ bzw. $U_A = U_{\min}$) des Operationsverstärkers kommt.

2.2 Gegenkopplung

Aufgrund der hohen Leerlaufverstärkung (10^5) führen bereits kleine Eingangsspannungsdifferenzen U_D zum Erreichen der maximalen Ausgangsspannung $U_{A\max}$, bzw. $U_{A\min}$. Um dieser raschen Übersteuerung des Operationsverstärkers entgegenzuwirken, leitet man daher einen Teil der Ausgangsspannung U_A auf den invertierenden Eingang U_N zurück. Diese Gegenkopplung wirkt der Eingangsspannungsdifferenz U_D entgegen, sodass sehr schnell eine stabile Ausgangsspannung U_A erreicht wird.

2.2.1 Spannungsfolger

Beim Spannungsfolger wird die Ausgangsspannung U_A des Operationsverstärkers direkt mit dem invertierenden Eingang U_N verbunden (Abb. 2).

Wenn man nun die Spannung U_P erhöht, wird U_P verstärkt an dem Ausgang U_A ausgegeben. Dies hat zur Folge, dass U_N größer wird als U_P und U_D nach Gleichung 1 negativ wird. Dadurch wird auch U_A negativ und der Vorgang beginnt von vorne.

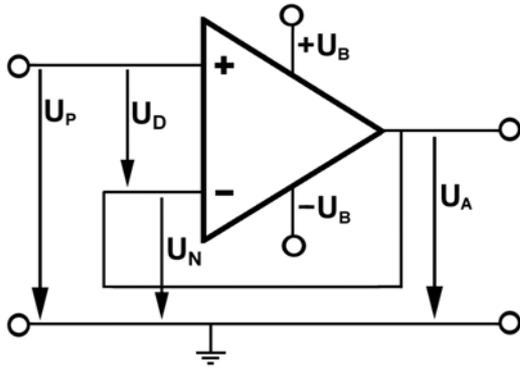


Abb. 2: Spannungsfolger

Eingangsspannung U_P [6].

$$(3) \quad V_G = \frac{U_A}{U_P} = 1$$

Die Richtigkeit dieser Gleichung lässt sich auch in der simulierten Messung zum Spannungsfolger auf Seite 17 erkennen: Die Ausgangsspannungskurve verläuft deckungsgleich mit der Eingangsspannungskurve.

Einsatz finden Spannungsfolger in Messinstrumenten(Voltmeter...), da aufgrund des hohen Innenwiderstandes vom Operationsverstärker kein Strom am Eingang fließt und der Operationsverstärker einen geringen Ausgangswiderstand besitzt.

2.2.2 Invertierende Verstärkung

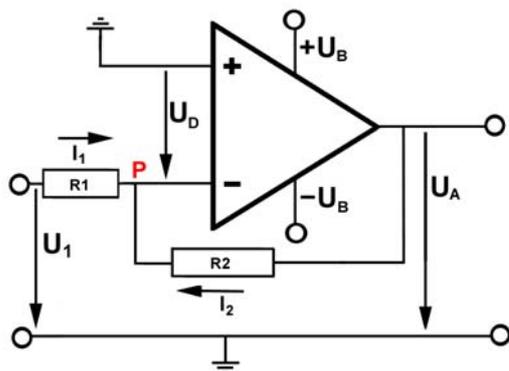


Abb. 3: Invertierende Verstärkung

Eine einfache Beschaltung mit Gegenkopplung bildet der „Invertierende Verstärker“ (Abb. 3). Dabei gelangt die zu verstärkende Spannung über einen Widerstand R_1 auf den invertierenden Eingang U_N des Operationsverstärkers. Die verstärkte Spannung U_A gelangt über den Widerstand R_2 ebenfalls auf den invertierenden Eingang U_N .

Aufgrund des hohen Eingangswiderstandes fließt fast kein Strom in den Operationsverstärker, so dass nach der Knotenregel folgendes für den Knoten P gilt:

$$(4) \quad I_1 + I_2 = 0$$

Außerdem gilt nach dem Ohmschen Gesetz:

$$(5) \quad I_1 = \frac{U_1}{R_1}$$

$$(6) \quad I_2 = \frac{U_A}{R_2}$$

Nach Einsetzen der Gleichungen 5 und 6 in die Gleichungen 4 und Auflösen nach U_A erhält man:

$$(7) \quad U_A = -U_1 \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

Für die Verstärkung V_G gilt:

$$(8) \quad U_A = U_1 \cdot V_G \Leftrightarrow V_G = \frac{U_A}{U_1} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Man sieht, dass die Verstärkung V_G nicht von der Leerlaufverstärkung V_L des Operationsverstärkers abhängt und sich über die beiden Widerstände R_1 und R_2 beliebig einstellen lässt, so dass U_{\max} und U_{\min} nicht erreicht werden[2].

2.2.2.1 Messung zum invertierenden Verstärker

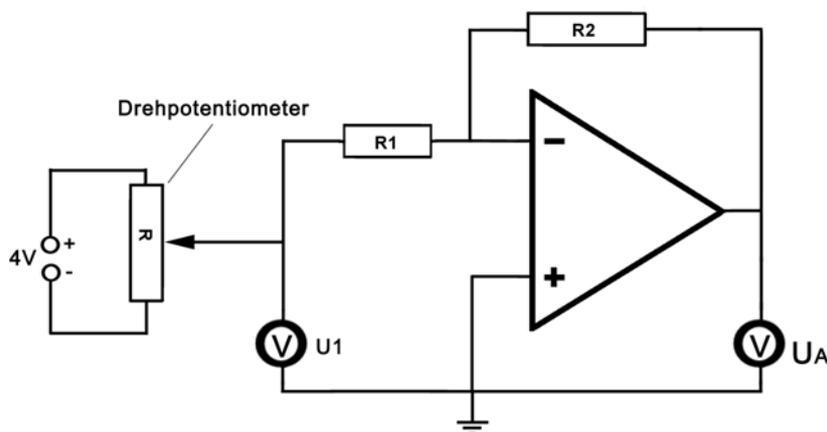


Abb. 4: Schaltung zur Invertierenden Verstärkung

Um die Ausgangsspannung U_A in Abhängigkeit von der Eingangsspannung U_1 beim invertierenden Verstärker zu messen, wurde die Schaltung in Abbildung 4 verwendet.

Ein Drehpotentiometer zwischen R_1 und der Spannungsquelle ermöglichte eine sehr feine Regelung der Eingangsspannung U_1 . Die Spannung konnte auf diese Weise in 0,01 Volt Abständen erhöht werden. Da die Ausgangsspannung U_A des Operationsverstärkers auf ungefähr $\pm 5,5$ Volt beschränkt war, konnten nur Messungen mit $|V_G| \leq 100$ vorgenommen werden (vgl. Gl.8). Wählte man die Verstärkung höher, kam es schnell zur Übersteuerung des Operationsverstärkers und man erhielt nur wenige Messwerte.

2.2.2.2 Messauswertung zum invertierenden Verstärker

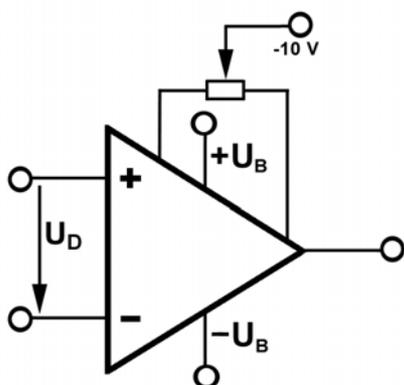
In der 1. Messung zum invertierenden Verstärker(S.19) lässt sich erkennen, dass die Ausgangsspannung U_A bei kleinen Eingangsspannungen U_1 linear von der Eingangsspannung U_1 abhängt(vgl. Gl.7). Diese Abhängigkeit besteht jedoch nur, wenn U_1 zwischen $-0,55\text{V}$ und $0,46\text{V}$ liegt. Darüber hinaus kommt es zur Übersteuerung des Operationsverstärkers.

Im Vergleich zur 2. Messung zum invertierenden Verstärker(S.19/S.20) lässt sich erkennen, dass bereits kleine Eingangsspannungen U_1 zum Erreichen von U_{\max} bzw. U_{\min} führen, bedingt durch die größere Verstärkung (1.Messung: $|V_G|=10$; 2.Messung: $|V_G|=100$).

Ein weiteres Problem beim Operationsverstärker, welches in der 2. Messung sichtbar wird, ist die Tatsache, dass die Kennlinie nicht durch den Koordinatenursprung geht(S.20). Es muss eine geringe Eingangsspannungsdifferenz U_D am invertierenden Eingang U_N anliegen, damit die Ausgangsspannung U_A Null ist. Diese Eingangsspannungsdifferenz nennt man Offsetspannung.

Die Offsetspannung ist auch verantwortlich dafür, dass $U_{B_{\max}} \neq -U_{B_{\min}}$ ist. In der Messung zum invertierenden Verstärker hat $U_{B_{\max}}$ ungefähr die Spannung $5,7\text{ V}$ und $U_{B_{\min}} -4,9\text{ V}$.

2.2.2.3 Offsetspannungskompensation



Um die fehlerhafte Ausgangsspannung U_A , bedingt durch die Offsetspannung zu minimieren, haben viele Operationsverstärker zwei Anschlüsse. Diese beiden Eingänge werden mit einem Potentiometer verbunden, welches so geregelt wird, dass bei $U_D=0$ die Ausgangsspannung U_A ebenfalls Null ist[1].

Bei Operationsverstärkern, die diese Anschlüsse nicht besitzen, kann das Problem der Offsetspannung beim invertierenden Verstärker gelöst werden, indem am nichtinvertierende Eingang U_P eine Spannung gelegt wird.

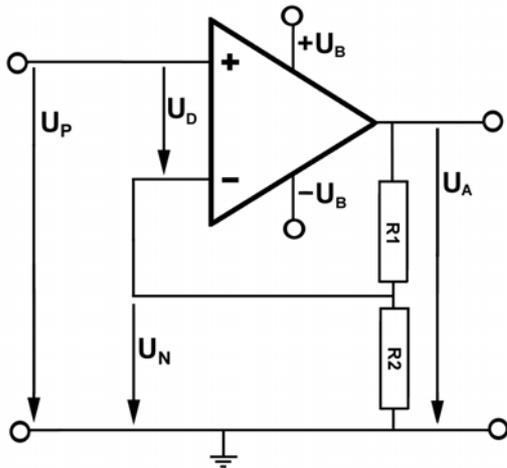


Abb. 5: Nichtinvertierender Verstärker

2.2.3 Nichtinvertierender Verstärker

Im Gegensatz zum invertierenden Verstärker gibt der nichtinvertierende Verstärker die Eingangsspannungsdifferenz U_D nicht gegenphasig, sondern phasengleich am Ausgang U_A aus.

Der Aufbau des nichtinvertierenden Verstärkers ist in Abbildung 5 aufgezeichnet. Die Ausgangsspannung U_A wird über einen Spannungsteiler zurückgekoppelt auf den invertierenden Eingang U_N . Für die Spannung U_N gilt[2]:

$$(9) \quad U_N = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_A$$

Für die Ausgangsspannung U_A gilt:

$$U_A = V_L \cdot (U_P - U_N) \quad \text{vgl. Gl.2}$$

Nach Einsetzen von Gleichung 9 ergibt sich:

$$(10) \quad U_A = V_L \cdot \left(U_P - U_A \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

Aufgelöst nach U_A ergibt sich folgende Formel:

$$\frac{U_A}{V_L} = U_P - U_A \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \Leftrightarrow \frac{1}{V_L} = \frac{U_P}{U_A} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \Leftrightarrow \frac{U_P}{U_A} = \frac{1}{V_L} + \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$(11) \quad U_A = U_P \cdot \frac{1}{\frac{1}{V_L} + \frac{R_2}{R_1 + R_2}}$$

Aufgrund der hohen Leerlaufverstärkung (V_L), die in einem Bereich von 10^5 liegt, lässt sich die Gleichung folgendermaßen darstellen ($\frac{1}{V_L} \approx 0$):

$$(12) \quad U_A \approx U_P \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

Für die Verstärkung V_G gilt:

$$(13) \quad V_G = \frac{U_A}{U_P} = \frac{U_P \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2}}{U_P} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

Die Verstärkung lässt sich wie beim invertierenden Verstärker über die beiden Widerstände einstellen. Aus Gleichung 13 lässt sich erkennen, dass die minimalste Verstärkung 1 ist, wenn $R_1 = 0$ oder $R_2 = \infty$. In diesem Fall, wäre die Schaltung identisch mit der Schaltung zum Spannungsfolger(2.2.1): Die Ausgangsspannung U_A wird komplett rückgekoppelt auf den invertierenden Eingang U_N , so dass $U_A=U_1$ ist (vgl. 2.2.1/Gl.3)[1].

2.2.3.1 Messung zum nichtinvertierenden Verstärker

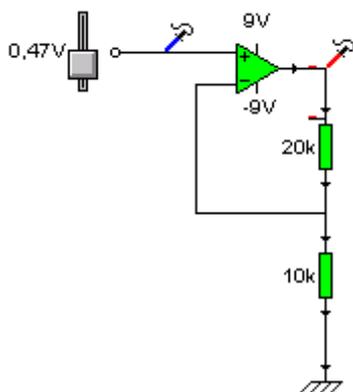


Abb.6: Nichtinvertierender Verstärker

5 Die Messung zum nichtinvertierenden Verstärker wurde, wie die Messung zum Spannungsfolger, mit dem Simulationsprogramm Crocodil Physics durchgeführt. R_1 war $20\text{ k}\Omega$ und R_2 $10\text{ k}\Omega$ (vgl. Abb. 6). Nach Gleichung 13 ist $V_G=3,0$. Die gemessene Spannungskurve ist auf Seite 21 zu sehen.

Die errechnete Verstärkung von 3,0 lässt sich mit Hilfe der Spannungskurve belegen: Zum Zeitpunkt $t=2\text{s}$ ist die Eingangsspannung U_1 ungefähr 2,1 V und die Ausgangsspannung U_A etwa 6,3 Volt. Die Ausgangsspannung U_A ist 3 mal so hoch wie die Eingangsspannung U_1 .

2.3 Messung zum Frequenzgang

In der folgenden Messung sollte untersucht werden, ob die Ausgangsspannung U_A von der Frequenz der Eingangsspannung U_1 beeinflusst wird. Hierfür wurde der in Abbildung 7 gezeichnete Aufbau verwendet. Der invertierende Verstärker diente als Gegenkopplung.

Da die Amplitude der Spannung vom Frequenzgenerator bei steigender Frequenz sich verringert, musste neben der Frequenz f und der Ausgangsspannungsamplitude \hat{U}_A auch die Eingangsspannungsamplitude \hat{U}_1 gemessen werden. Die eingestellte Verstärkung $|V_G|$ hatte den Wert 4,7.

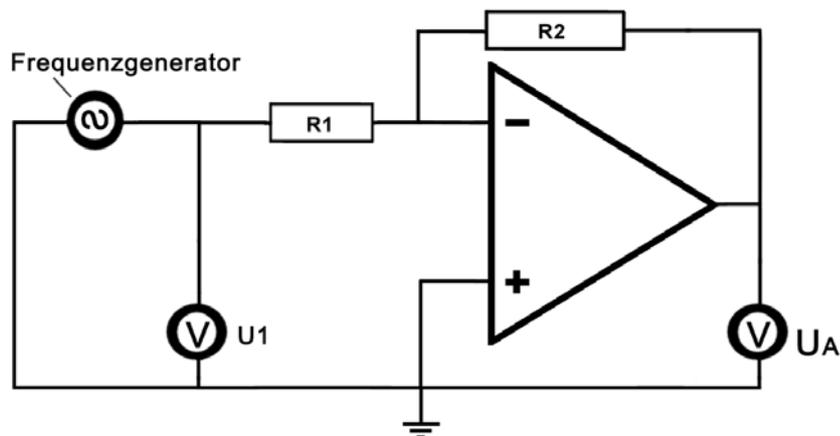


Abb. 7: Schaltung zur Frequenzgangmessung

2.3.1 Auswertung der Messung zum Frequenzgang

In der graphischen Auswertung zum Frequenzgang (S. 23) lässt sich erkennen, dass die Ausgangsspannung U_A erst bei Frequenzen oberhalb von 130 Hz beeinflusst wird. Bei höheren Frequenzen sinkt die Verstärkung $|V|$ stark ab und nähert sich dem Wert 0 an. Allerdings würde die Verstärkung $|V|$ erst bei $f = \infty$ auf Null absinken.

Diese Frequenzabhängigkeit des Operationsverstärkers hängt mit der begrenzten Slew Rate des Operationsverstärkers zusammen. Die Slew Rate ist die Änderungsgeschwindigkeit der Ausgangsspannung U_A .

Bei steigender Frequenz f muss der Operationsverstärker in einer immer kürzer werdenden Zeit die Ausgangsspannung von U_{Amax} auf U_{Amin} verändern. Diese Ausgangsspannungsänderung schafft der Operationsverstärker bis zu einer bestimmten Frequenz f_G . Bei höheren Frequenzen $f > 130$ Hz, ist der Operationsverstärker zu „langsam“ und es kommt zu einer kleineren Amplitude der Ausgangsspannung U_A , was eine Verminderung von $|V|$ zur Folge hat.

Die Frequenz f_G wird als Grenzfrequenz bezeichnet und hängt von der gewählten Gegenkopplung ab. Bei Gegenkopplungsbeschaltungen mit einer kleineren Verstärkung V_G steigt f_G , da \hat{U}_A geringer ist. Man spricht von einem konstanten Verstärkungs-Bandbreiten Produkt [7;1]:

$$(14) \quad V_G \cdot f_G = c \quad c = const. \quad [c] = Hz$$

3 Schaltungen mit dem Operationsverstärkers

3.1 Komparator

Das Wort Komparator kommt vom lateinischen Wort comparator und heißt übersetzt Vergleichler. Mit Hilfe dieser „Vergleicherschaltung“ werden 2 Spannungen (U_N und U_P) miteinander verglichen. Dabei wird der Operationsverstärker ohne äußere Beschaltung genutzt (Abb. 8).

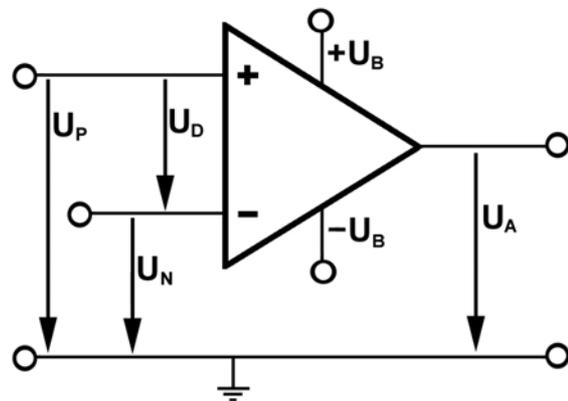


Abb. 8: Komparator

Aufgrund der fehlenden Gegenkopplung und der hohen Leerlaufverstärkung V_L , führen bereits minimale Eingangsspannungsdifferenzen U_D zur Übersteuerung.

3.1.1 Messung zum Komparator

Bei der simulierten Messung zum Komparator (S.24) wurde jeweils eine regelbare Spannungsquelle an die beiden Eingänge des Operationsverstärkers angeschlossen. Gemessen wurden die beiden Eingangsspannungen (U_P und U_N) und die Ausgangsspannung U_A .

Wie man im Diagramm erkennen kann, erreicht U_A den Wert U_{max} , wenn U_P eine größere Spannung hat als U_N (2. Abschnitt im Diagramm). Umgekehrt erreicht U_A die Spannung U_{min} , wenn $U_N > U_P$ ist (1. Abschnitt im Diagramm). Im 3. Abschnitt tritt der Fall ein, dass $U_P = U_N$ ist, was nach Gleichung 2 eine Ausgangsspannung U_A von 0 Volt zur Folge hat.

Es gibt also 3 Fälle beim Komparator:

1. Wenn $U_N > U_P$ ist $U_A = -U_{MAX}$.
2. Wenn $U_N < U_P$ ist $U_A = U_{MAX}$.
3. Wenn $U_N = U_P$ ist $U_A = 0V$.

Der 3. Fall, dass $U_A = 0$ Volt ist tritt in der Realität jedoch nicht auf, da schon minimale Eingangsspannungsdifferenzen U_D zur Übersteuerung des Operationsverstärkers führen.

Aus diesem Grund ist der Komparator eine von wenigen Operationsverstärkerschaltungen, die zu den digitalen Bauelementen gehören. Der Komparator erreicht 2 logische Schaltzustände: $U_A=U_{\min}$ oder $U_A=U_{\max}$ [1;4].

3.2 Nichtinvertierender Schmitt-Trigger

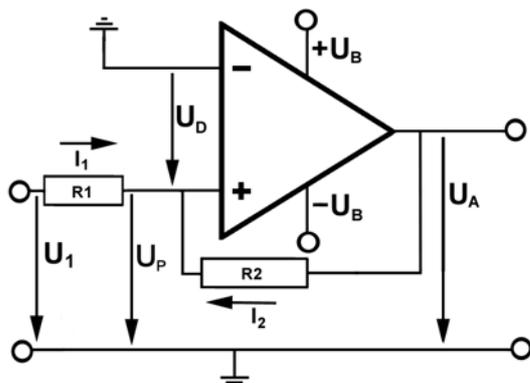


Abb. 9: Schmitt-Trigger

Aufgrund der hohen Leerlaufverstärkung V_L reagieren Komparatoren sehr empfindlich im Bereich des Umschaltpegels ($U_D=0$). Bereits kleine Störsignale können zu unerwünschten Schaltvorgängen beim Komparator führen. Um dieses Springen im Bereich des Umschaltpegels zu vermeiden, liegt beim Schmitt-Trigger eine Spannungsdifferenz

U_H zwischen Einschaltpegel und Ausschaltpegel[1].

Die Schaltung ist in Abbildung 9 zu sehen. Wenn $U_1 > 0$ ist, wird eine positive Eingangsspannungsdifferenz U_D erzeugt, die dazu führt, dass U_A ebenfalls positiv wird (Gl.2). Aufgrund der Rückführung von U_A auf den nichtinvertierenden Eingang (Mitkopplung) wächst U_D und somit auch U_A . Es wird also sehr schnell die Spannung U_{\max} am Ausgang des Operationsverstärkers erreicht. An der Ausgangsspannung U_A ändert sich erst etwas, wenn $U_P=0$ wird:

$$(15) \quad \frac{U_1}{R_1} = -\frac{U_{A\max}}{R_2}$$

Diese Eingangsspannung wird als U_{1aus} oder Ausschaltpegel bezeichnet, sie führt dazu, dass die Ausgangsspannung von $U_{A\max}$ auf $U_{A\min}$ absinkt.

$$(16) \quad U_{1aus} = -\frac{R_1}{R_2} \cdot U_{A\max}$$

Umgekehrt wird die Eingangsspannung, die dazu führt, dass U_A auf den Wert $U_{A\max}$ ansteigt als U_{1ein} oder Einschaltpegel bezeichnet.

$$(17) \quad U_{1ein} = -\frac{R_1}{R_2} \cdot U_{A\min}$$

Diese Gleichungen zeigen bereits, dass $U_{1ein} \neq U_{1aus}$ ist, solange $\frac{R_2}{R_1} \neq 0$ ist[1].

3.2.1 Messung zum nichtinvertierenden Schmitt-Trigger

In der folgenden Messung wird eine Kennlinie von einem nichtinvertierenden Schmitt-Trigger mit Hilfe eines XY-Schreibers aufgenommen. Dabei wird die Ausgangsspannungsquelle für U_A mit dem Y-Eingang und die Spannung U_1 mit dem X-Eingang des XY-Schreibers verbunden (vgl. Abb.6).

Die Eingangsspannung U_1 wurde mit Hilfe von 2 Spannungsquellen erzeugt. Dies hatte den Vorteil, dass man für U_1 nicht nur positive, sondern auch negative Spannungswerte bekam.

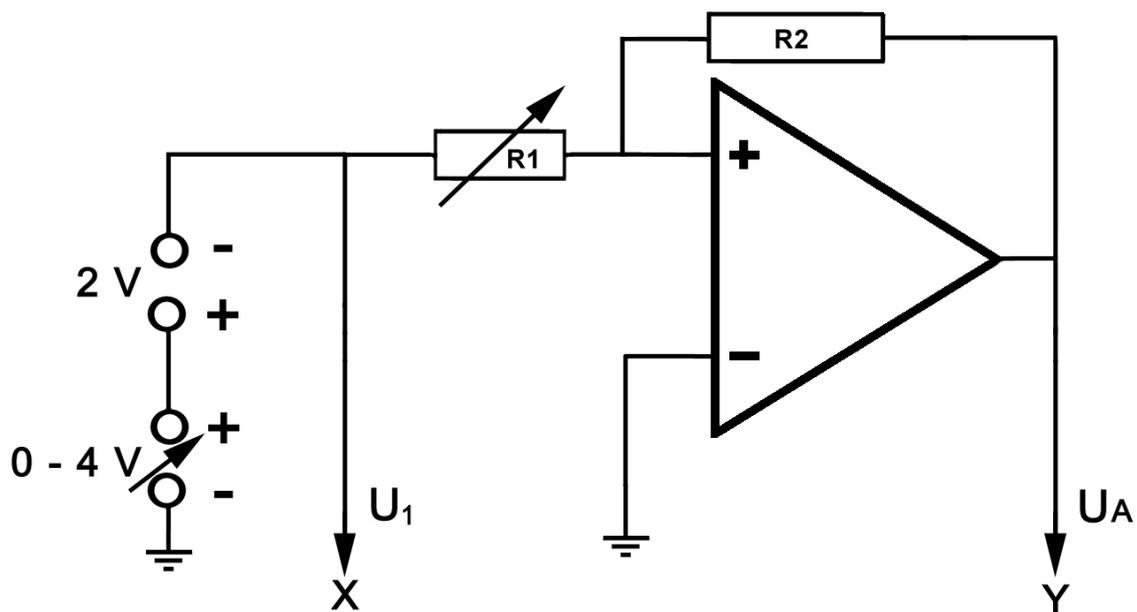


Abb. 6: Schaltung des Schmitt-Triggers

Des weiteren wurde für R_1 ein regelbarer Widerstand verwendet, um den Ein- und Ausschaltpegel besser abstimmen zu können.

3.2.2 Auswertung der Messung zum Schmitt-Trigger

In der 1. Messung zum Schmitt-Trigger war $R_1=135 \text{ k}\Omega$ und $R_2= 200 \text{ k}\Omega$. Der Verlauf der Kennlinie beim Schmitt-Trigger zeigt eine Hysteresiskurve (vgl. Seite 25). Dieser Kurvenverlauf lässt sich mit Hilfe der Spannungsdifferenz zwischen Einschalt- und Ausschaltpegel erklären (vgl. Gl.16 und Gl.17).

Der Einschaltpegel $U_{1\text{ein}}$ lag in der Messung bei ungefähr 3,70 Volt. Bei optimalen Bedingungen hätten Einschalt- und Ausschaltpegel betragsgleich sein sollen, allerdings ist $U_{1\text{aus}}=-3,10 \text{ V}$.

Die Hysteresespannung U_H ist die Differenz zwischen Ein- und Ausschaltpegel:

$$(18) \quad U_H = U_{1ein} - U_{1aus}$$

$$U_{H \text{ Gemes.}} = 3,70V - (-3,10V) = 6,80V$$

Um die Hysteresespannung rechnerisch zu bestimmen setzt man die Gleichungen 16 und 17 in die Gleichung 18 ein und erhält:

$$(19) \quad U_H = \frac{R_1}{R_2} \cdot (U_{Amax} - U_{Amin})$$

$$U_{H \text{ bere.}} = \frac{135k\Omega}{200k\Omega} \cdot (5,7V - (-4,9V)) = 7,16V$$

Für die Berechnung von U_H berech. wurden die Werte U_{Bmax} und U_{Bmin} aus der Messung zum invertierenden Verstärker auf Seite 18 übernommen. Der relative Fehler von ungefähr 5% zwischen U_H gemes. und U_H bere. lässt sich auf den Operationsverstärker(Offsetspannung) und die Widerstände zurückführen.

Die Steigung der Ausgangsspannung U_A vor dem Springen und direkt danach kommt wahrscheinlich durch einen Stromfluss zustande. Um diesen Effekt zu unterbinden wurden in der 2. Messung zum Schmitt-Trigger höhere Widerstandswerte für R_1 und R_2 verwendet.

In der 2. Messung wurde R_1 auf $2M \Omega$ und R_2 auf $3,5M \Omega$ erhöht(Seite 26). Nach den Gleichungen 16, 17 und 19 lassen sich folgende Spannungswerte berechnen:

$$U_{1aus} = -\frac{R_1}{R_2} \cdot U_{Amax} \approx -3,28V \quad \text{Gl.24}$$

$$U_{1ein} = -\frac{R_1}{R_2} \cdot U_{Amin} \approx 2,80V \quad \text{Gl.25}$$

$$U_H = U_{1ein} - U_{1aus} \approx 6,08V \quad \text{Gl.26}$$

} berechnet

Anhand der graphischen Auswertung bekommt man folgende Spannungswerte:

$$U_{1aus} = 6,2cm \cdot \frac{0,5V}{cm} = -3,10V$$

$$U_{1ein} = 4,7cm \cdot \frac{0,5V}{cm} = 2,35V$$

$$U_H = 10,8cm \cdot \frac{0,5V}{cm} = 5,40V$$

} graphisch bestimmt

Man sieht, dass die berechneten Werte mit den graphisch bestimmten Werten, abgesehen von U_{1ein} , weitgehend übereinstimmen.

Außerdem fällt im Vergleich zur 1. Messung auf, dass die Ausgangsspannung U_A vor und nach dem „Springen“ konstant ist. Die höheren Widerstandswerte haben den störenden Stromfluss aus Messung 1 unterbunden.

Die Tatsache, dass die Ausgangsspannung U_A beim Graphen nicht sofort von U_{Amax} auf U_{Amin} „springt“ hängt mit der begrenzten Schreibgeschwindigkeit des XY-Schreibers zusammen.

3.2.3 Anwendung des Schmitt-Triggers

Ein Anwendungsgebiet von Schmitt-Triggern ist die Umwandlung von Spannungen beliebiger Kurvenform in eine Rechteckspannung, vergleiche simulierte Messung auf Seite 27: Umwandlung von einer dreieckförmigen oder sinusförmigen Eingangsspannung U_1 in eine rechteckförmige Ausgangsspannung U_A . Diese Signalumwandlungen dient bei größeren Schaltungen zum Aufbereiten oder Verstärken von Signalen (z.B. DSL-Übertragung)[8].

Im täglichen Gebrauch findet man Schmitt-Trigger z.B. in Dämmerungsschaltern. Mit Hilfe des Schmitt-Triggers wird ein plötzliches Ab- oder Einschalten der Beleuchtung bei geringen Helligkeitsschwankungen verhindert.

4 Fazit

Als Ergebnis meiner Facharbeit lässt sich festhalten, dass die Verwendung des Operationsverstärker fast ausschließlich durch die äußere Beschaltung bestimmt wird. Eine kleine Leerlaufverstärkung V_L kann z.B. mit Hilfe einer geeigneten Gegenkopplung (vgl.2.2.2 und 2.2.3) den entsprechenden Anforderungen angepasst werden. Diese Eigenschaft begünstigten den Erfolg von Operationsverstärker im Gegensatz zu herkömmlichen Verstärkern, deren Eigenschaften durch ihren inneren Aufbau bestimmt sind.

Des weiteren zeigte sich, dass sich eine Vielzahl von Operationsverstärkerschaltungen mit der Hilfe von Basis-Formeln zum Operationsverstärker erklären lassen.

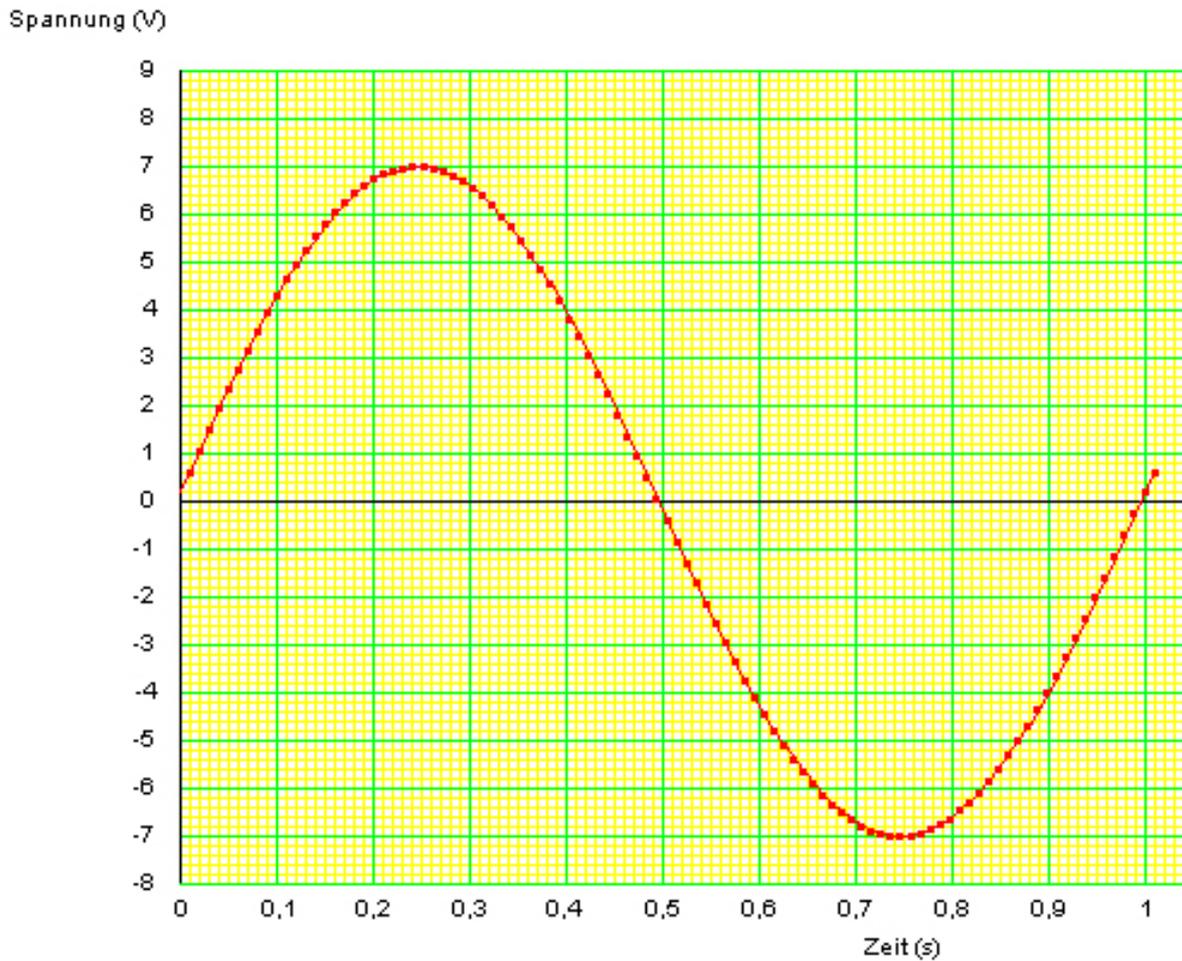
Meiner Ansicht nach trugen diese beiden Faktoren wesentlich zum Erfolg des Operationsverstärkers bei.

Literaturverzeichnis

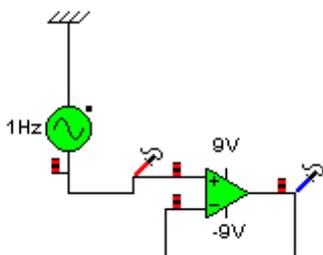
- [1] Bader, Heinz: Operationsverstärker Grundlagen und Anwendungen.
Neubilberg: Karamanolis Verlag, 1985.
- [2] Titze, Ulrich/Schenk, Christoph: Halbleiter-Schaltungstechnik, 5. Aufl..
Berlin: Springer-Verlag, 1980.
- [3] Blum, D./Bovermann, T.: Gedankengeschichte der Analogrechnergeräte
Gedankengeschichte der Informatik.
URL: <http://www.techfak.uni-bielefeld.de/ags/wbski/lehre/digiSA/Gedankengeschichte/Ausarbeitungen/1105.pdf>.
- [4] Leuthold, P.: Grundsaltungen mit Operationsverstärkern.
ETH Zürich – Institut für Kommunikationstechnik.
URL: <http://www.nari.ee.ethz.ch/teaching/PPS/PPS01/doc/Anl.OpAmp23.8.01.pdf>.
- [5] Kröncke: Operationsverstärker Grundlagen und Schaltungen, 3. Aufl..
Operationsverstärker 215 200.
- [6] Schmitz, Elmar B.: Grundlagen der Operationsverstärker... .
URL: <http://www.batronix.com/elektronik/know-how/op-amp.shtml>.
- [7] Ossietzky, Carl: Operationsverstärker.
Universität Oldenburg – Institut für Physik.
URL: <http://www.physik.uni-oldenburg.de/Docs/holo/apr/pdf/Operationsverstaerker.pdf>.
- [8] Schmitt-Trigger, das Elektronik-Kompendium.
URL: <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/bau/0209241.htm>.
- [9] Bombach, Rolf G.: Monolithische Operationsverstärker in der Praxis, oder was nicht im Elektronikbuch steht.
URL: <http://mypage.bluewin.ch/bombach/opamp.pdf>.

MESSUNG ZUM SPANNUNGSFOLGER

Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Eingangsspannung:



Schaltungsaufbau:



Benötigte Geräte:

- Signalgenerator (sinusförmige Spannung)
- 2 „Messfühler“
- Operationsverstärker

Legende:

$U_P =$ 

$U_A =$ 

Eingangsspannungskurve
überlagert Ausgangsspannungskurve.

Die Messung wurde am 13.2.04 mit dem Programm Crocodile Physics 1.7 durchgeführt.

Messdaten: Invertierende Verstärkung

1. Messung

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

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

$$V_G = -R_2/R_1 = -10$$

Nr.	U ₁ / V	U _A / V
1	-0,6	5,70
2	-0,59	5,70
3	-0,58	5,70
4	-0,57	5,60
5	-0,56	5,60
6	-0,55	5,50
7	-0,54	5,40
8	-0,53	5,30
9	-0,52	5,20
10	-0,51	5,10
11	-0,50	5,00
12	-0,49	4,90
13	-0,48	4,80
14	-0,47	4,70
15	-0,46	4,60
16	-0,45	4,50
17	-0,44	4,40
18	-0,40	4,00
19	-0,38	3,80
20	-0,36	3,60
21	-0,34	3,40
22	-0,33	3,30
23	-0,29	2,90
24	-0,26	2,60
25	-0,22	2,20
26	-0,18	1,80
27	-0,14	1,40
28	-0,10	1,00
29	-0,07	0,70
30	-0,02	0,20
31	-0,01	0,10
32	0,00	0,00
33	0,01	-0,10
34	0,05	-0,40
35	0,08	-0,75
36	0,09	-0,90
37	0,10	-1,00
38	0,12	-1,20
39	0,13	-1,30
40	0,17	-1,70

2. Messung

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

$$R_2 = 1 \text{ M Ohm}$$

$$V_G = -R_2/R_1 = -100$$

Nr.	U ₁ / V	U _A / V
41	0,19	-1,90
42	0,20	-1,95
43	0,26	-2,55
44	0,27	-2,60
45	0,30	-2,90
46	0,35	-3,50
47	0,38	-3,80
48	0,40	-4,00
49	0,43	-4,30
50	0,46	-4,55
51	0,47	-4,60
52	0,48	-4,70
53	0,49	-4,70
54	0,50	-4,80
55	0,51	-4,80
56	0,52	-4,80

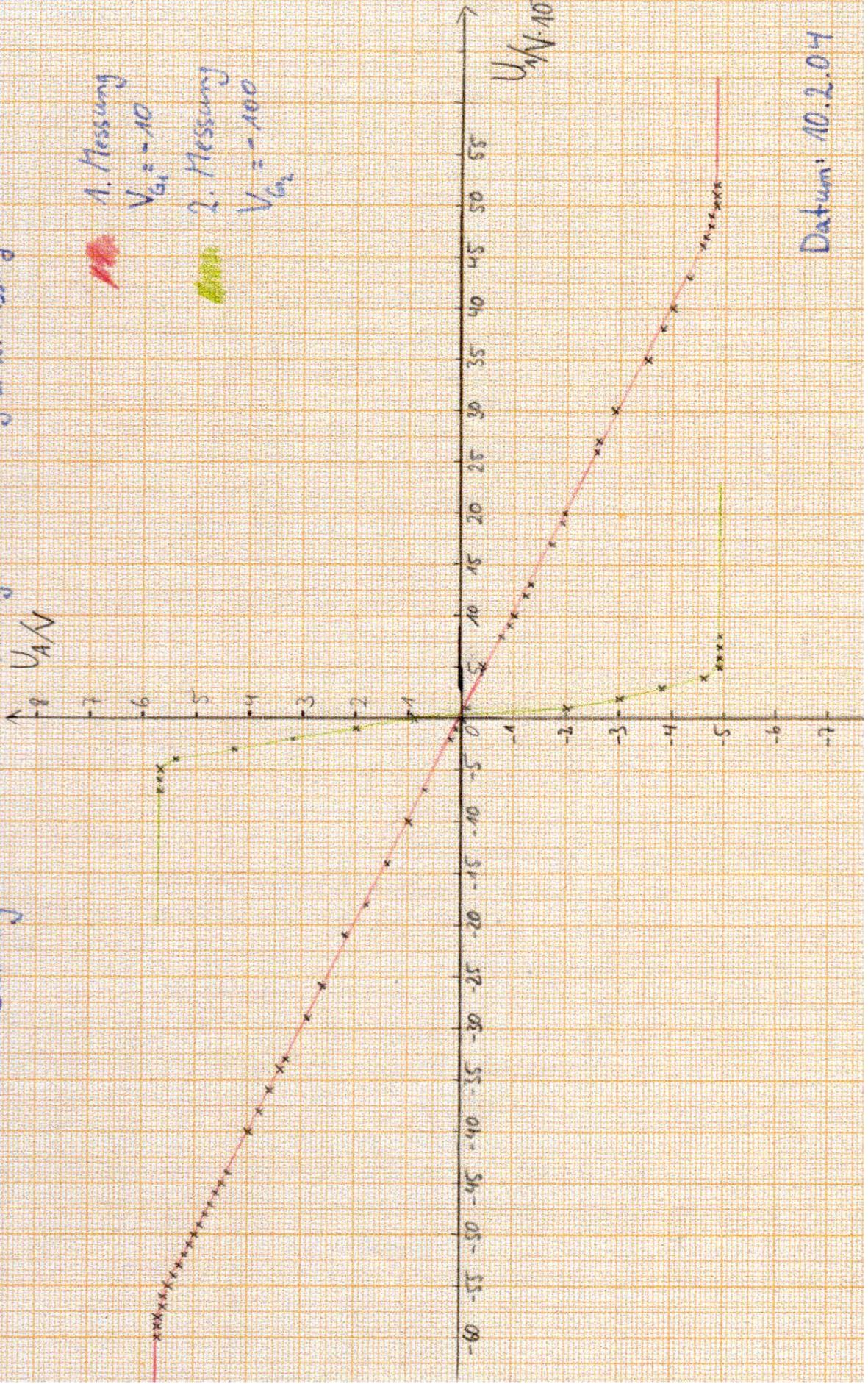
Nr.	U ₁ / V	U _A / V
1	-0,07	5,70
2	-0,06	5,70
3	-0,05	5,70
4	-0,04	5,40
5	-0,03	4,30
6	-0,02	3,20
7	-0,01	2,00
8	0,00	0,90
9	0,01	-2,00
10	0,02	-3,00
11	0,03	-3,80
12	0,04	-4,60
13	0,05	-4,90
14	0,06	-4,90
15	0,07	-4,90
16	0,08	-4,90

Benötigte Geräte:

- regelbare Spannungsquelle
- 2 Voltmeter
- Potentiometer
- Operationsverstärker
- 4 Widerstände

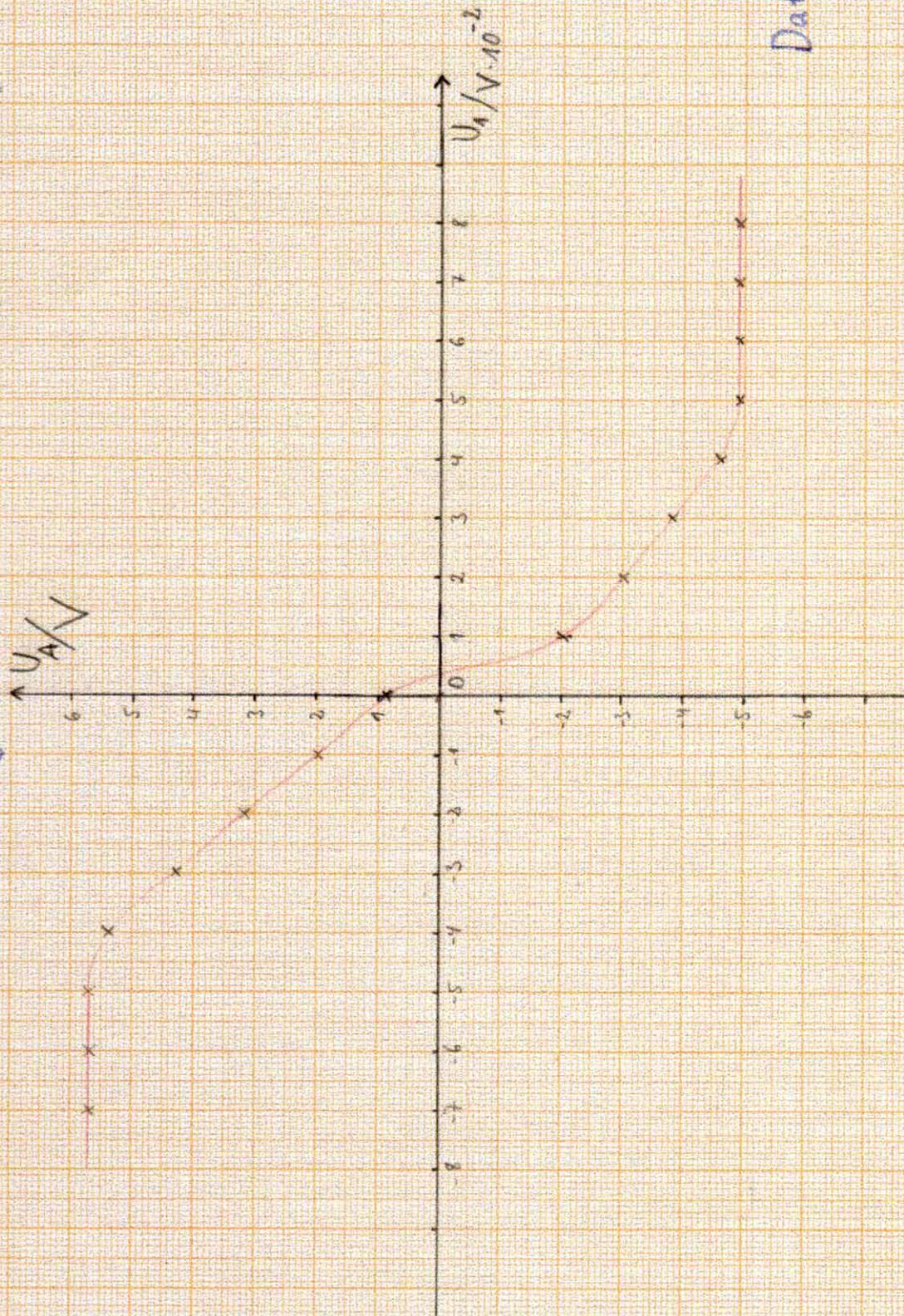
Die Messungen wurde am 10.2.04 durchgeführt

Auswertung: Invertierende Verstärkung / 1. Messung & 2. Messung



Datum: 10.2.04

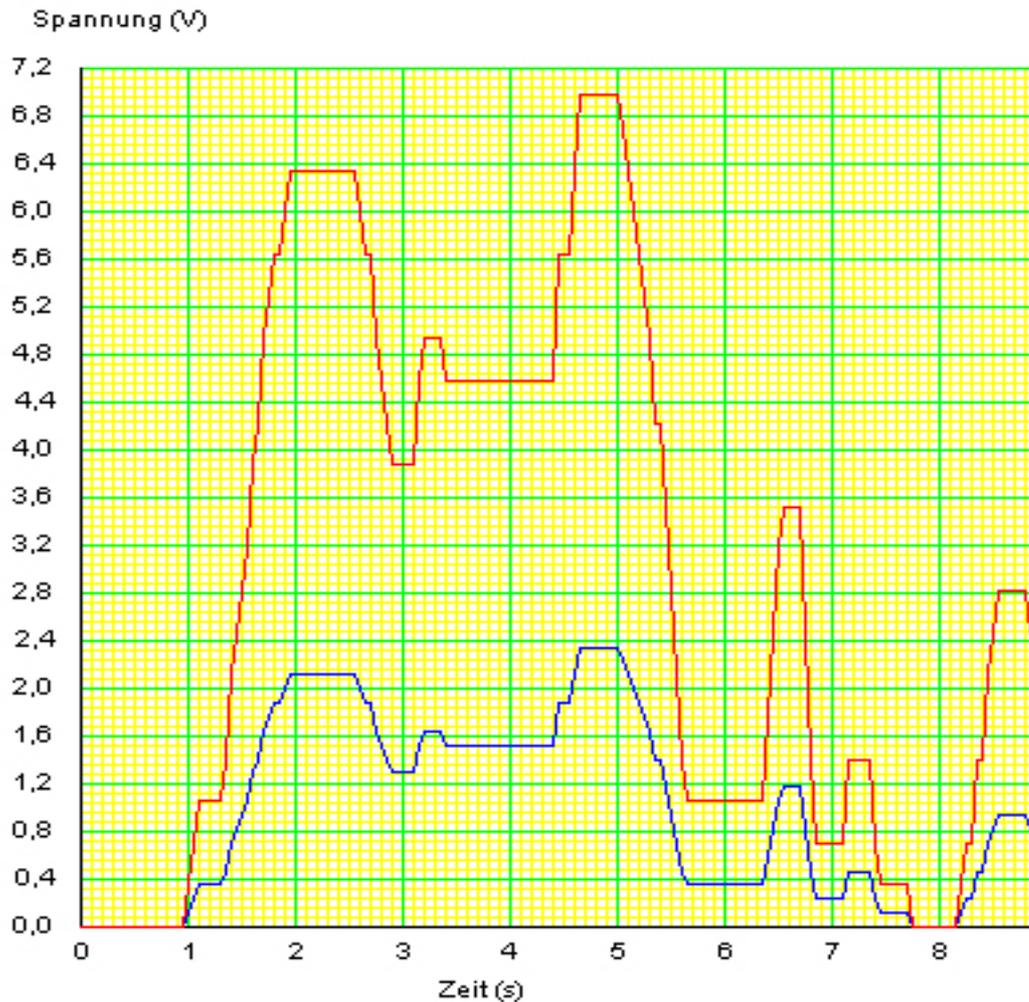
Auswertung: Invertierende Verstärkung / 2. Messung



Datum: 10.2.04

MESSUNG ZUM NICHTINVERTIERENDEN VERSTÄRKER

Spannungsverlauf

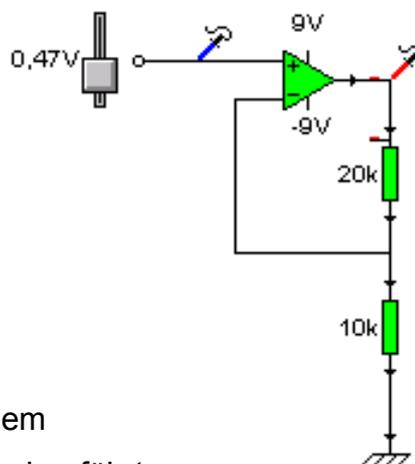


Legende:

$U_1 =$ █

$U_A =$ █

Schaltungsaufbau:



Benötigte Geräte:

- Spannungsquelle
- Operationsverstärker
- 2 Widerstände
- 2 Messfühler

Die Messung wurde am 3.3.04 mit dem Programm Crocodile Physics 1.7 durchgeführt.

Messdaten: Frequenzgang $V_G = -4,7$

$R_1 = 100 \text{ k Ohm}$

$R_2 = 470 \text{ k Ohm}$

$V_G = -R_2/R_1 = -4,7$

Bsp. Rechnung für $|V_G|$ von Nr.9:

$$|V_G| = \frac{\hat{U}_A}{\hat{U}_1}$$

$$|V_G| = \frac{2,50V}{0,70V} = 3,571$$

Nr.	f/kHz	\hat{U}_1/V	\hat{U}_A/V	$ V_G $
1	0,14	0,72	3,30	4,583
2	0,17	0,70	3,20	4,571
3	0,19	0,70	3,20	4,571
4	0,23	0,72	3,15	4,375
5	0,26	0,72	3,10	4,306
6	0,31	0,72	3,00	4,167
7	0,38	0,72	2,90	4,028
*8	0,45	0,72	2,70	3,750
9	0,59	0,70	2,50	3,571
10	0,71	0,70	2,25	3,214
11	0,74	0,70	2,30	3,286
12	0,78	0,70	2,15	3,071
13	0,89	0,70	2,00	2,857
14	1,04	0,70	1,80	2,571
15	1,14	0,70	1,70	2,429
16	1,25	0,70	1,60	2,286
17	1,39	0,68	1,40	2,059
18	1,61	0,68	1,30	1,912
19	1,79	0,68	1,20	1,765
20	2,08	0,68	1,10	1,618
21	2,78	0,68	0,80	1,176
22	3,13	0,68	0,70	1,029
23	5,26	0,66	0,42	0,636
24	6,67	0,66	0,34	0,515
25	8,33	0,64	0,28	0,438
26	10,00	0,62	0,22	0,355
27	11,76	0,60	0,18	0,300
28	13,33	0,58	0,16	0,276
29	16,67	0,54	0,14	0,259
30	20,00	0,48	0,12	0,250
31	22,22	0,46	0,11	0,239

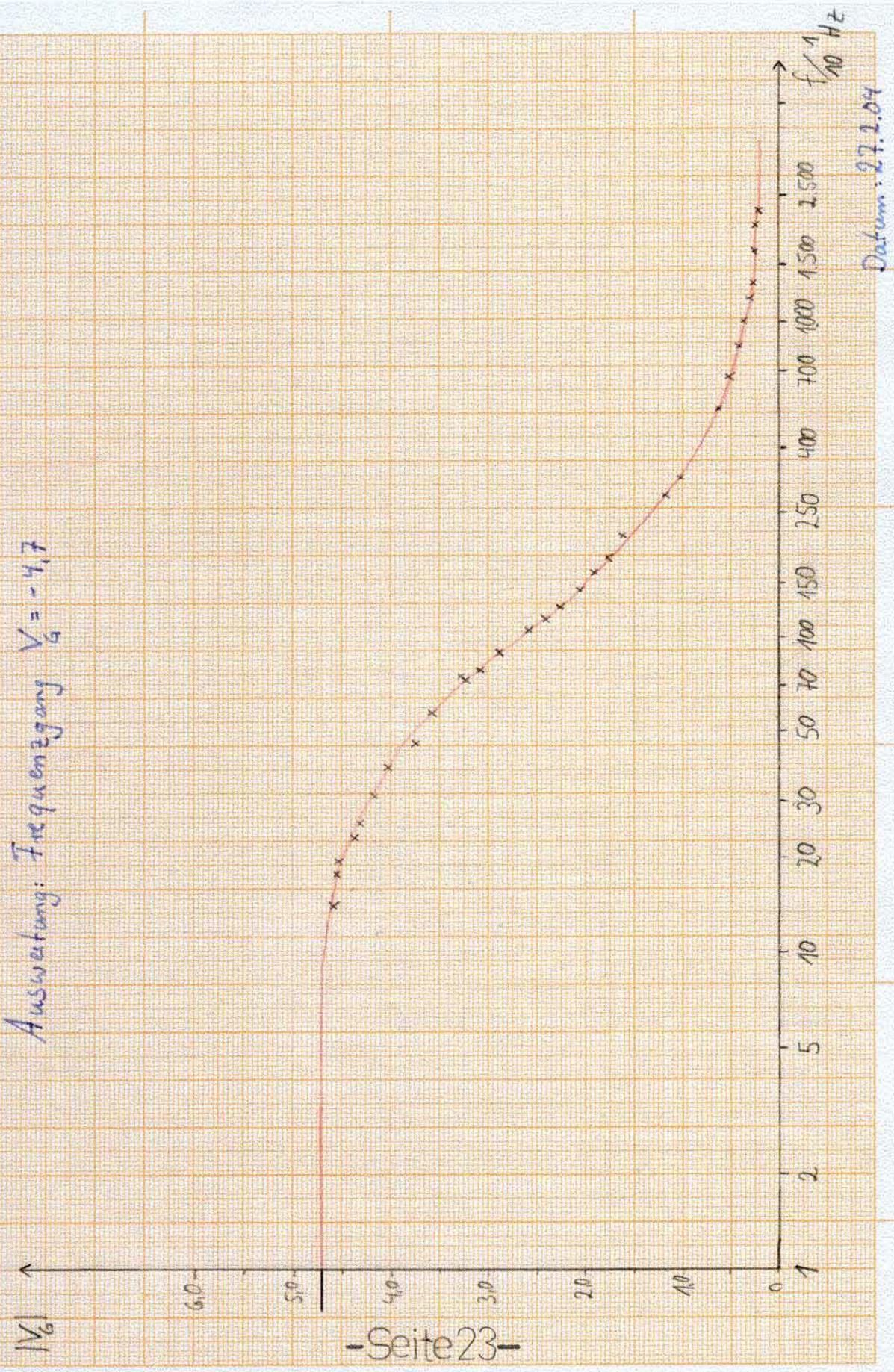
* = Messfehler, siehe graph.
Auswertung auf Seite 23

Benötigte Geräte:

- Frequenzgenerator
- Oszilloskop
- Operationsverstärker
- 2 Widerstände

Die Messung wurde am 27.2.04 durchgeführt.

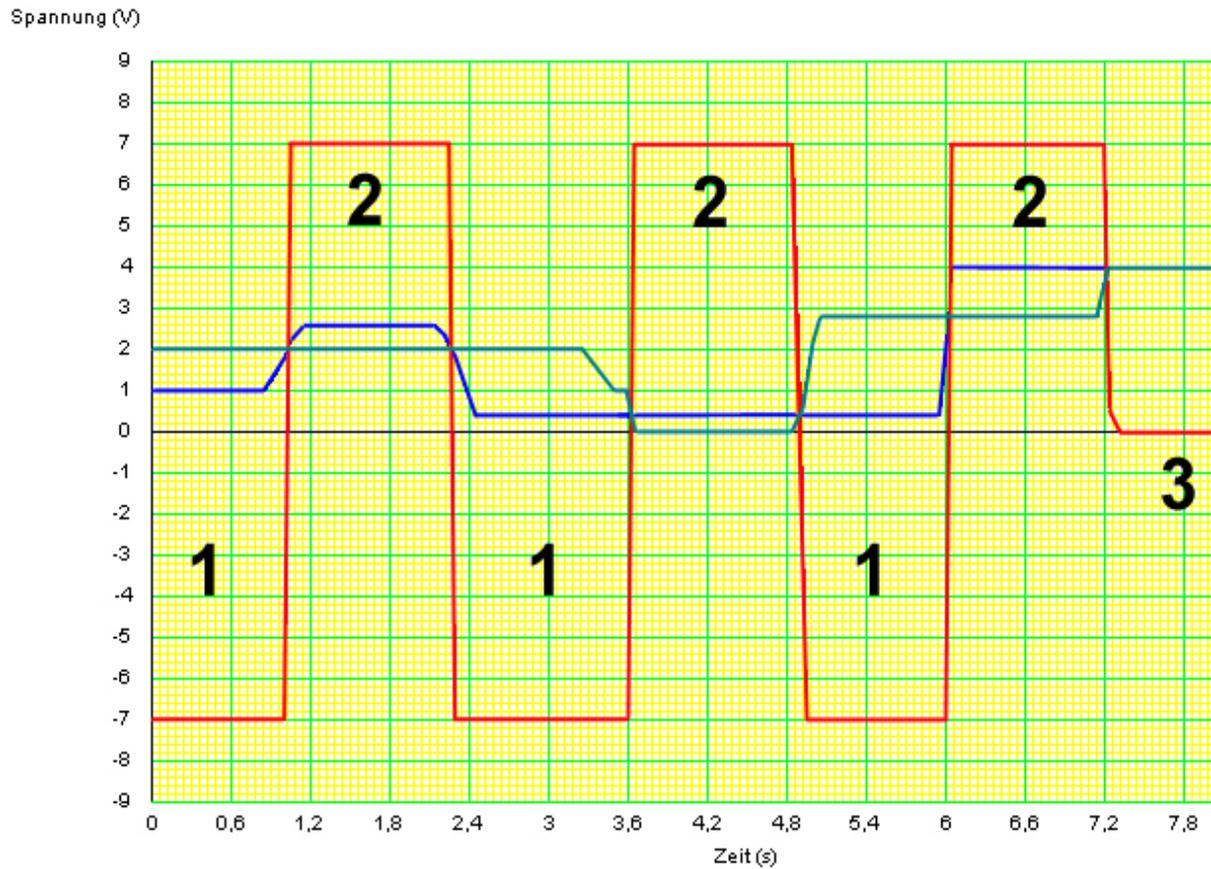
Auswertung: Frequenzgang $V_g = -4,7$



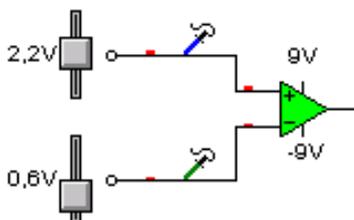
Datum: 27.1.04

Messung zum Komparator

Spannungsverlauf beim Komparator:



Komparatorschaltung:



Legende:

$U_P =$

$U_N =$

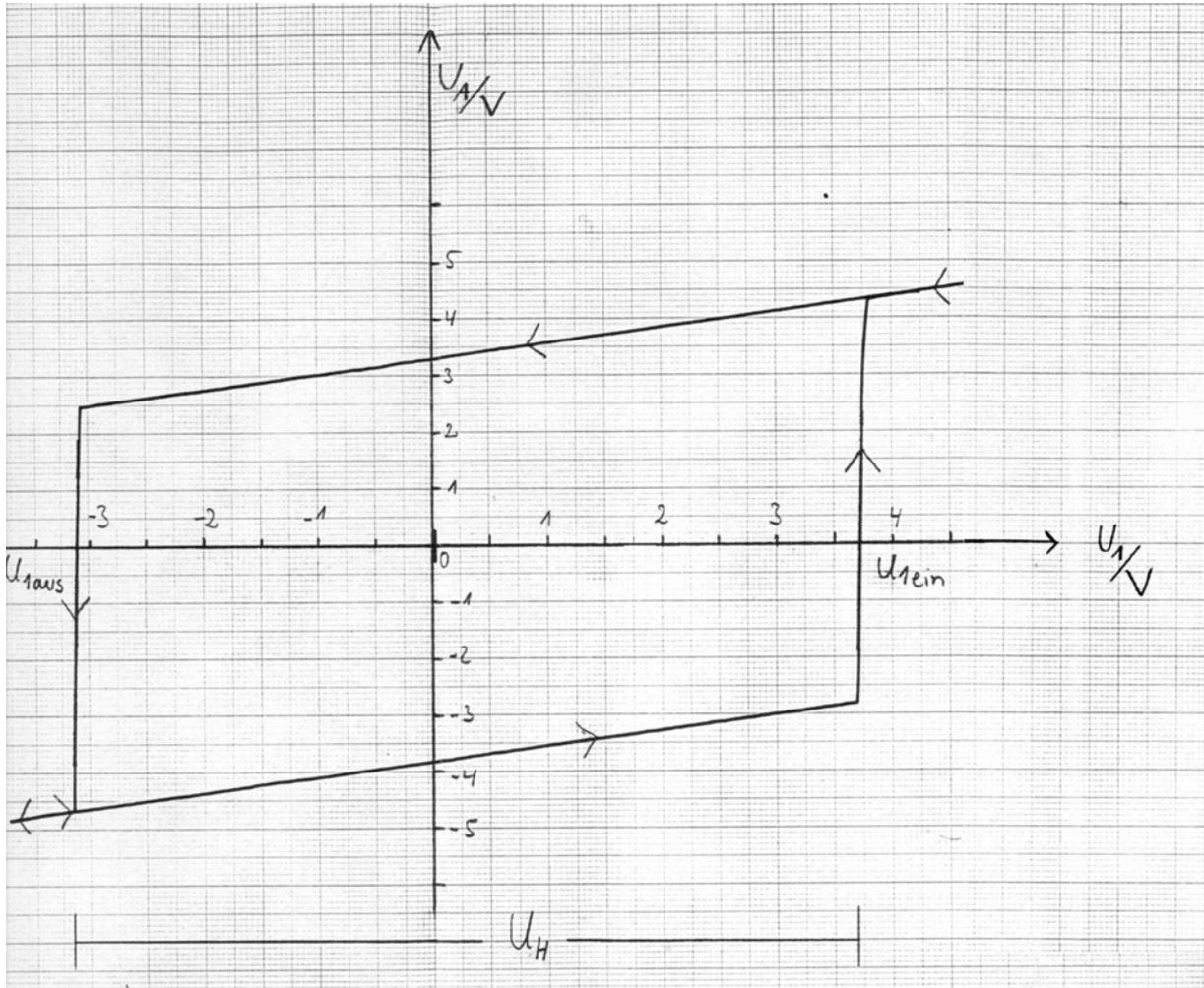
$U_A =$

Benötigte Geräte:

- 2 reg. Spannungsquellen
- 3 „Messfühler“
- Operationsverstärker

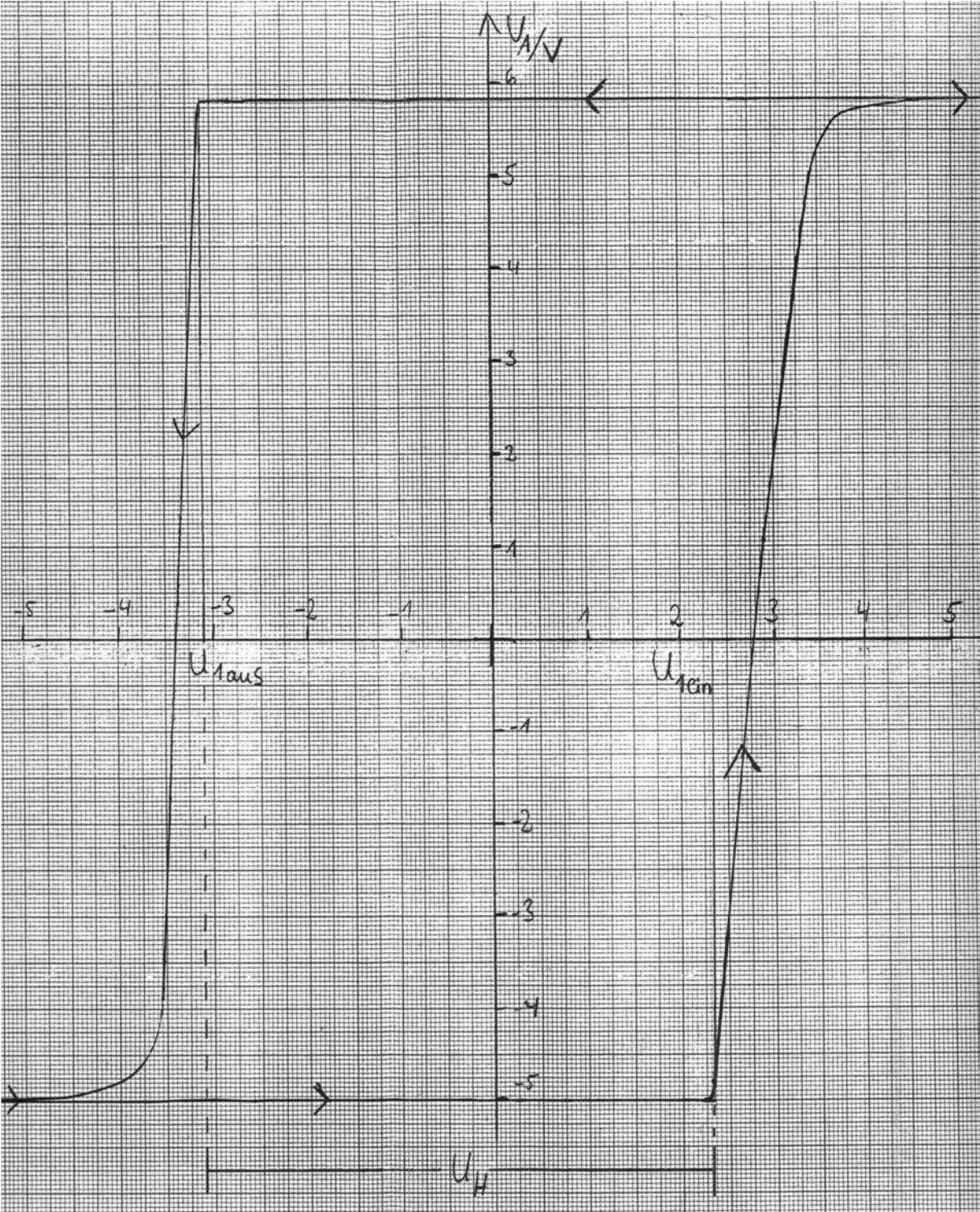
Die Messung wurde am 15.2.04 mit dem Programm Crocodile Physics 1.7 durchgeführt.

1. Messung zum Schmitt-Trigger



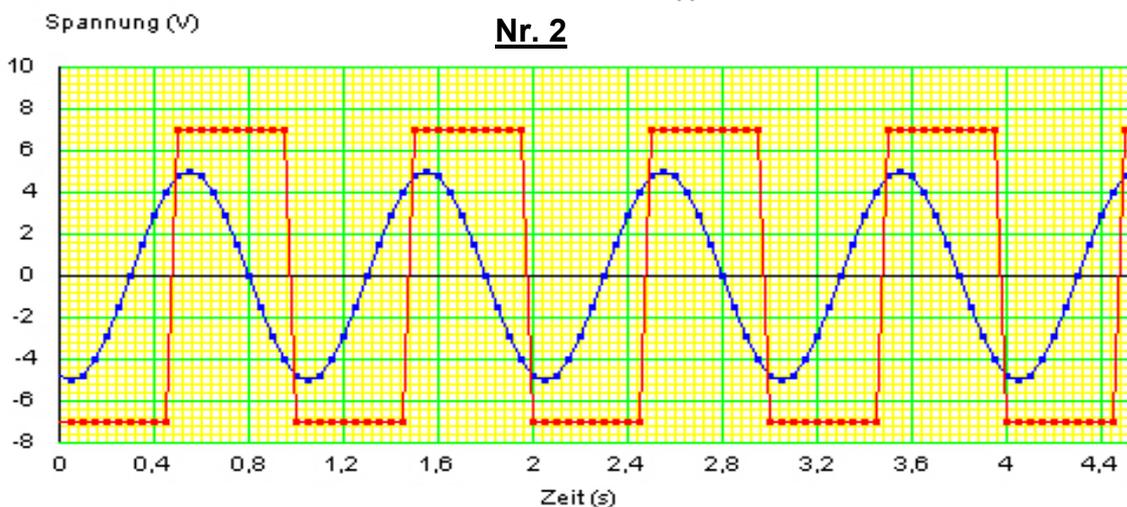
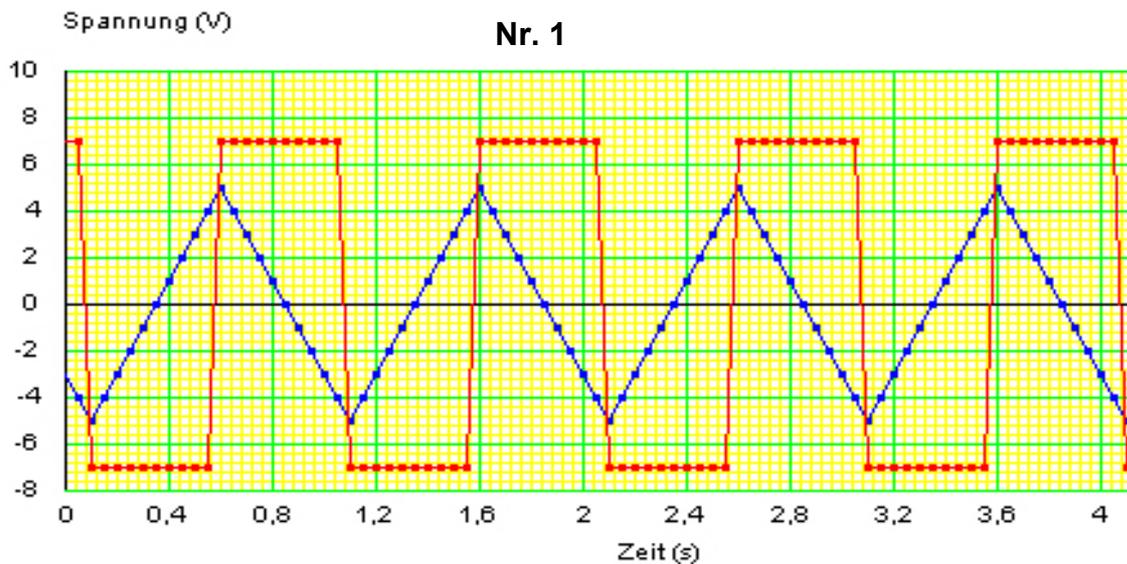
Die Messung wurde am 18.2.04 durchgeführt.

2. Messung zum Schmitt-Trigger



Die Messung wurde am 27.2.04 durchgeführt.

Umwandlung von Eingangsspannungen U_1 beliebiger Kurvenform in rechteckförmige Ausgangsspannungen U_A (Schmitt-Trigger)



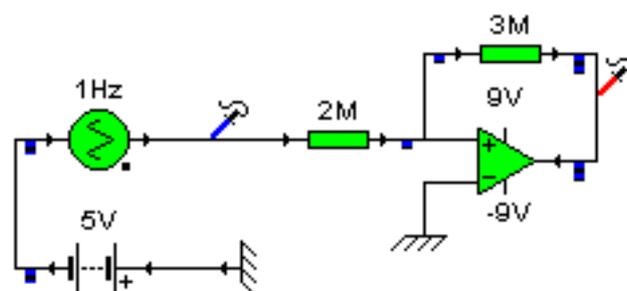
Legende:

$U_1 =$ █ $U_A =$ █

Benötigte Geräte:

- Signalgenerator
- 5V Batterie
- 2 Widerstände
- Operationsverstärker
- 2 „Messfühler“

Versuchsaufbau:



Die Messungen wurden mit dem Programm Crocodile Physics 1.7 am 1.3.04 durchgeführt.