

V51

# Operationsverstärker

Sophie Bork	Michael Windau
sophie.bork@gmx.de	michael.windau@tu-dortmund.de

Durchführung: 06.01.20

Abgabe: 05.02.20

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
2.1 Schaltungen mit Operationsverstärkern . . . . .	4
2.1.1 Invertierender-Linearverstärker . . . . .	4
2.1.2 Umkehr-Integrator . . . . .	6
2.1.3 Invertierender-Differenzierer . . . . .	6
2.1.4 Nicht-Invertierender-Schmitt-Trigger . . . . .	7
2.1.5 Signalgenerator . . . . .	7
2.1.6 Variierende-Amplituden . . . . .	8
<b>3 Durchführung</b>	<b>8</b>
3.1 Invertierender-Linearverstärker . . . . .	8
3.2 Integrator und Differentiator . . . . .	9
3.3 Schmitt-Trigger . . . . .	9
3.4 Signalgenerator . . . . .	9
3.5 Variierende Amplitude . . . . .	9
<b>4 Auswertung</b>	<b>9</b>
4.1 Invertierender Linearverstärker . . . . .	9
4.1.1 Messwerte . . . . .	9
4.1.2 Frequenzabhängigkeit der Ausgangsspannung . . . . .	9
4.1.3 Frequenzabhängigkeit der Phase zwischen Ein- und Ausgangsspannung . . . . .	15
4.2 Umkehrintegrator . . . . .	16
4.3 Differenzierer . . . . .	17
4.4 Nicht-Invertierender Schmitt-Trigger . . . . .	17
4.5 Signalgenerator . . . . .	21
4.6 Variierende Amplituden . . . . .	21
<b>5 Diskussion</b>	<b>22</b>
<b>Literatur</b>	<b>23</b>

## 1 Zielsetzung

Ziel dieses Versuches ist es die Funktionsweise und Vorteile eines Operationsverstärkers kennenzulernen. Dafür werden verschiedene Schaltungen mit Operationsverstärkern aufgebaut und betrachtet.

## 2 Theorie

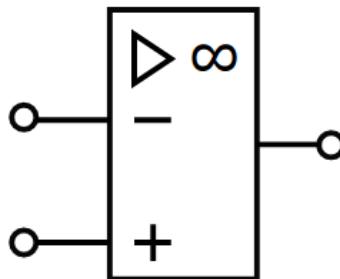
Bei einem Operationsverstärker (OPV) handelt es sich um einen gleichstromgekoppelten Differenzverstärker. Das Schaltsymbol eines OPV ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Verstärkung der Differenz zwischen den beiden Eingangssignalen ergibt sich aus der Proportionalität zur Ausgangsspannung  $U_A$ :

$$U_A = V(U_P - U_N) \quad (1)$$

Wie in Abbildung 2 zu sehen, ist diese Proportionalität nur für

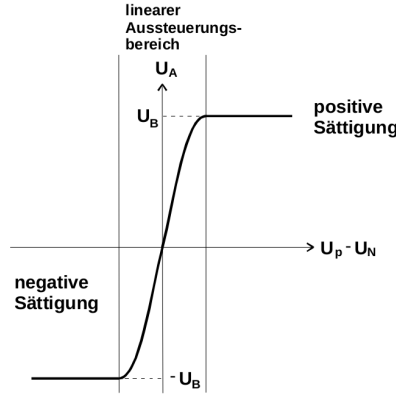
$$-U_B < U_A < U_B \quad (2)$$

gültig. Dieser Bereich wird als Aussteuerungsbereich bezeichnet. Verlässt die Ausgangsspannung dieses Intervall, ergibt sich eine Sättigung und  $U_A$  läuft gegen  $\pm U_B$ .



**Abbildung 1:** Das Schaltsymbol für einen Operationsverstärker [2].

Die Ausgangsspannung  $U_A$  ist in Phase mit  $U_P$  der als nicht-invertierender Eingang ("++-Eingang) bezeichnet wird und Gegenphasig mit  $U_N$ , der invertierende Eingang (Eingang). Zur Veranschaulichung von Schaltungen mit OPV, wird die Idee eines idealen OPV eingeführt. Dieser ideale OPV hat im Gegensatz zum realen OPV folgende Eigenschaften: Eine unendlich hohe Leerlaufverstärkung  $V_{id} = \infty$ , unendliche hohe Widerstände an den Eingängen, sowie einen Ausgangswiderstand von  $r_a = 0$ .



**Abbildung 2:** Die Kennlinie eines Operationsverstärkers [1].

Bei einem realen OPV treten diverse Effekte auf, die in einem idealen OPV nicht existent sind. Einer dieser Effekte ist die Gleichtaktverstärkung

$$V_{Gl} = \frac{\Delta U_A}{\Delta U_{Gl}}, \quad (3)$$

die auftritt wenn die gleiche Spannung  $U_{Gl}$  an den Eingängen liegt. Zusätzlich treten aufgrund der endlichen Eingangswiderstände ein Eingangsruhestrom

$$I_B = \frac{1}{2}(I_P + I_N) \quad (4)$$

und ein Offsetstrom

$$I_0 = I_P - I_N, U_P = U_N = 0 \quad (5)$$

auf. Zuletzt tritt bei einem realen OPV eine nicht verschwindende Ausgangsspannung auf wenn die Eingangsspannungen gleich 0 gesetzt werden. Es wird der Begriff der Offsetspannung  $U_0$  eingeführt

$$U_0 = U_P - U_N, \quad (6)$$

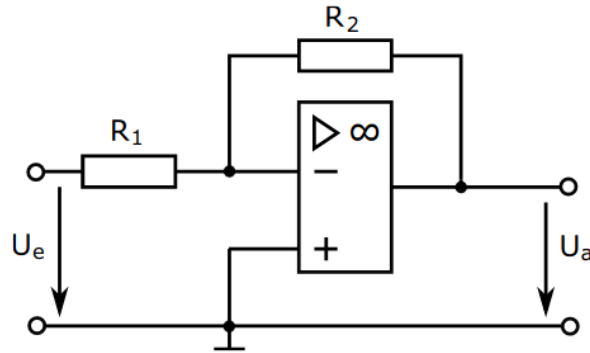
welche die benötigte Differenz angibt damit  $U_A$  verschwindet. Die Betrachtung des realen OPV geschieht durch Korrekturrechnungen an den Schaltungen mit einem idealen OPV.

## 2.1 Schaltungen mit Operationsverstärkern

### 2.1.1 Invertierender-Linearverstärker

Um einen Operationsverstärker als Linearverstärker zu verwenden, wird ein Gegenkopplungszweig wie in Abb. 3 verwendet.

Es wird ein Teil der Ausgangsspannung auf den invertierenden Eingang gegeben. Dies führt zu einer Vergrößerung des Aussteuerungsbereich, wodurch auch höhere Eingangsspannungen verwendet werden können ohne das eine Sättigung auftritt. Zudem

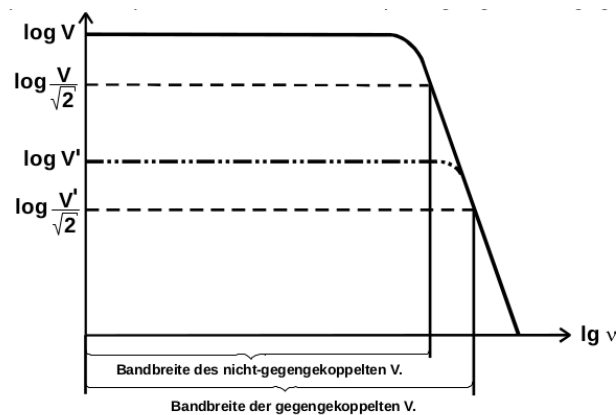


**Abbildung 3:** Die Schaltung für einen Invertierenden-Linearverstärker [2].

erhöht die Verwendung einer Gegenkopplung die Stabilität der Verstärkung auf Kosten des Verstärkungsgrades. Für die Verstärkung  $V'$  ergibt sich:

$$V' = \frac{1}{V} + \frac{R_1}{R_2}. \quad (7)$$

Dabei steht  $V$  für die Leerlaufverstärkung des Operationsverstärkers. Zuletzt führt eine Gegenkopplung zu einer Vergrößerung des Frequenzbandes, welches über den OPV übertragen werden kann (Abb. 4).



**Abbildung 4:** Die Frequenzgänge eines Linearverstärkers [1].

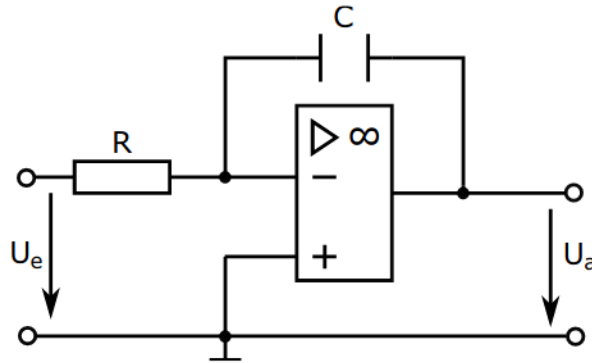
Diese Vergrößerung entspricht dabei einen Faktor

$$g = \frac{V}{V'}. \quad (8)$$

Das Produkt aus Bandbreite und Verstärkung entspricht der Transitfrequenz, bei welcher die Verstärkung unabhängig von der Gegenkopplung auf den Wert 1 abfällt.

### 2.1.2 Umkehr-Integrator

Wird anstelle des einfachen Widerstandes in der Rückkopplung ein Kondensator eingebaut, ergibt sich die Schaltung in Abb. 5.

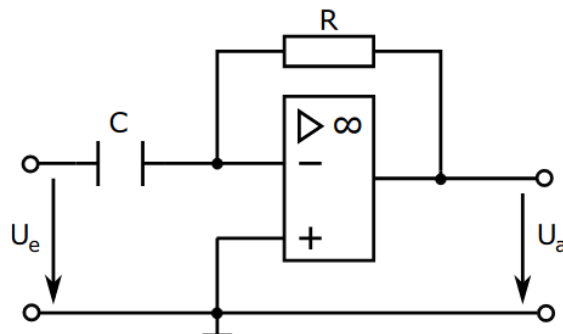


**Abbildung 5:** Die Schaltung für einen Umkehr-Integrator [2].

Dies führt zu einer Integration der Eingangsspannung. Als Beispiel würde sich aus einer Eingangsspannung  $U_1 = U_0 \sin(\omega t)$ , die Ausgangsspannung  $U_A = \frac{U_0}{\omega RC} \cos(\omega t)$  ergeben. Im Falle einer Sinusspannung würde daher die Ausgangsspannung mit  $1/\omega$  abfallen.

### 2.1.3 Invertierender-Differenzierer

Ein tauschen des Widerstandes und Kondensators im Umkehr-Integrator führt zu der Schaltung in Abb. 6. Dies wird als Invertierender-Differenzierer bezeichnet.

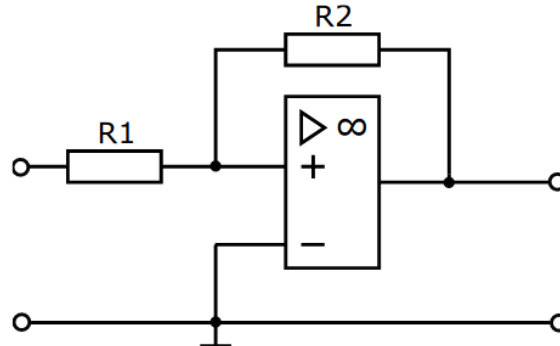


**Abbildung 6:** Die Schaltung für einen Invertierenden-Differenzierer [2].

Diese Schaltung hat die Eigenschaft ein Eingangssignal zu differenzieren. Ein Eingangssignal der Form  $U_1 = U_0 \sin(\omega t)$  ergibt daher eine Ausgangsspannung  $U_A = -\omega RC U_0 \cos(\omega t)$ , die proportional zu  $\omega$  ist.

### 2.1.4 Nicht-Invertierender-Schmitt-Trigger

Eine weitere Schaltmöglichkeit mit einem OPV ist der Schmitt-Trigger, wie in Abb. 7 dargestellt.

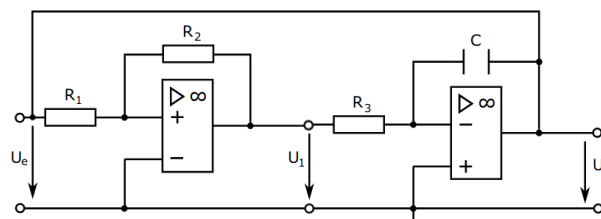


**Abbildung 7:** Die Schaltung für einen Nicht-Invertierenden-Schmitt-Trigger [2].

Es wird durch die Mittkopplung ein Teil von  $U_A$  auf die Eingangsspannung an den nicht-invertierenden Eingang gegeben. Dies führt dazu dass eine Vergrößerung der Ausgangsspannung eine Vergrößerung der Eingangsspannung hervorruft, wodurch wiederum die Ausgangsspannung größer wird. Die Schaltung zeigt dadurch ein instabiles Verhalten. Es ergibt sich eine Hystereseschaltung, in der  $U_A$  auf den Wert  $+U_B$  für  $U_1 \geq \frac{R_1}{R_2}U_B$  und  $-U_B$  für  $U_1 \leq -\frac{R_1}{R_2}U_B$  springt.

### 2.1.5 Signalgenerator

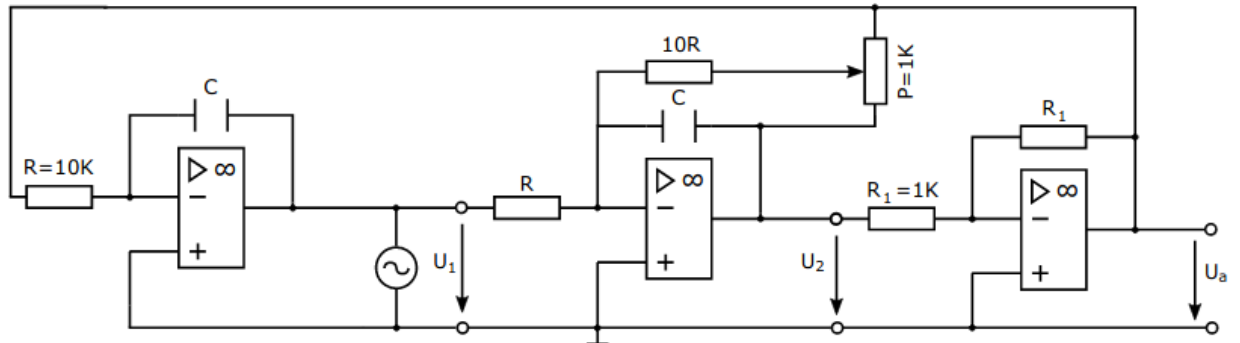
Eine Zusammenschaltung von Schmitt-Trigger und Umkehr-Integrator wie in Abb. 8, erschafft eine Möglichkeit Rechteck- und Dreiecksspannung zu generieren. Dafür wird die Schalteigenschaft des Schmitt-Triggers sowie die Integration des Ausgangssignal durch den Umkehr-Integrator verwendet. Die so erzeugten Signale sind in ihrer Frequenz von der Integratorkonstante und dem Teilverhältnisse des Mitkopplungszeuges abhängig.



**Abbildung 8:** Die Schaltung für einen Signalgenerator [2].

### 2.1.6 Variierende-Amplituden

Durch die in Abb. 9 dargestellte Schaltung lassen sich Sinusschwingungen mit zeitlich veränderlicher Amplitude generieren.



**Abbildung 9:** Die Schaltung für einen Variierende-Amplitude [2].

Aus der Schaltung lässt sich für die Ausgangsspannung folgende Differentialgleichung herleiten:

$$\frac{d^2 U_A}{dt^2} - \frac{\eta dU_A}{10RCdt} + \frac{U_A}{(RC)^2} = 0 \quad (9)$$

Dabei steht  $\eta$  für die Dämpfung ( $\eta < 0$ ) beziehungsweise Enddämpfung ( $\eta > 0$ ) des Systems. Der Gleichung genügt die Lösung

$$U_A(t) = U_0 \exp\left(\frac{\eta t}{20RC}\right) \sin\left(\frac{t}{RC}\right) \quad (10)$$

Es ergibt sich eine Schwingungsdauer von

$$T = 2\pi RC. \quad (11)$$

Die Abklingsdauer, das heißt die Zeit bis die Amplitude auf den e-ten Teil gefallen ist, wird durch

$$\tau = \frac{20RC}{|\eta|} \quad (12)$$

beschrieben.

## 3 Durchführung

### 3.1 Invertierender-Linearverstärker

Zunächst wird die Schaltung des Linearverstärkers aus Abbildung 3 auf einem Steckbrett aufgebaut. Es wird für 4 verschiedene Widerstandskombinationen der Verstärkungsfaktor und die Phase in Abhängigkeit der Frequenz aufgezeichnet.



## 3.2 Integrator und Differentiator

Als nächstes wird die Schaltung aus Abbildung 5 des Integrators und Differentiators (Abbildung 6) aufgebaut. Es gilt für eine Sinusspannung den Verstärkungsfaktor in Abhängigkeit von der Frequenz zu messen, um die gewählte Zeitkonstante zu überprüfen. Anschließend wird die Integration- beziehungsweise Differentiationsfunktion der Schaltungen für Sinus-, Dreieck- und Rechteckspannungen verifiziert.

## 3.3 Schmitt-Trigger

Es wird die Schaltung aus Abbildung 7 für einen Schmitt-Trigger aufgebaut und für eine Sinusspannung langsam die Amplitude solange erhöht, bis das Signal anfängt zu kippen. Die Hysteresekurve wird auf einem Oszilloskop sichtbar gemacht und abgespeichert.

## 3.4 Signalgenerator

Die Schaltung wird zu der Schaltung aus Abbildung 8 für einen Signalgenerator ergänzt. Es wird mit einer Sinusspannung als Eingangssignal eine Dreiecksspannung erzeugt und deren Amplitude und Frequenz gemessen.

## 3.5 Variierende Amplitude

Zuletzt wird die Schaltung aus Abbildung 9 für die variierende Amplitude aufgebaut. Es wird eine gedämpfte Schwingung im Schwingkreis erzeugt, indem eine Rechteckspannung auf die Schaltung mit negativem  $\eta$  gegeben wird. Anschließend wird eine Schwingung für positives  $\eta$  erzeugt. Es ergibt sich eine charakteristische Frequenz, welche gemessen wird.

# 4 Auswertung

## 4.1 Invertierender Linearverstärker

### 4.1.1 Messwerte

Es werden vier Messreihen mit unterschiedlichen Widerstandsverhältnissen und Eingangsspannungen, welche in Tabelle 1 zu finden sind, vorgenommen. Die Phasen- und Ausgangsspannungswerte mit zugehöriger Frequenz für die jeweiligen Messreihen sind in den Tabellen 2 bis 5 eingetragen.

### 4.1.2 Frequenzabhängigkeit der Ausgangsspannung

In Abb. 10 ist für jede Messreihe das Verhältnis  $V'$  aus Aus- und Eingangsspannung in einem doppelt logarithmischen Diagramm gegen die Frequenz aufgetragen. Es wird der Wert des Plateaus durch Mittelung aller Plateauwerte gewonnen. Die abfallende Flanke in jedem Diagramm wird mithilfe einer Potenzfunktion der Form

$$V' = a \cdot \left( \frac{\nu}{\text{kHz}} \right)^b \quad (13)$$

**Tabelle 1:** Eingangsspannungen und Widerstandsverhältnisse der vier Messreihen für den invertierenden Linearverstärker.

Messreihe	$U_e/\text{mV}$	$R_1/\text{k}\Omega$	$R_N/\text{k}\Omega$	$\frac{R_N}{R_1}$
1	110	1,00	10,00	10,00
2	310	1,00	33,10	33,10
3	310	10,00	33,10	3,31
4	310	33,10	98,00	2,96

**Tabelle 2:** Erhobene Daten der ersten Messreihe für den invertierenden Linearverstärker mit Widerstandsverhältnis 10 und Eingangsspannung 110 mV.

Frequenz/kHz	Phase/ $^\circ$	Ausgangsspannung/V
0,99	177,0	0,87
2,00	178,7	0,88
2,99	178,0	0,88
4,00	180,6	0,88
5,00	179,6	0,88
5,99	177,6	0,88
6,99	179,3	0,88
7,99	177,8	0,88
8,99	179,0	0,88
10,02	177,0	0,88
10,99	175,0	0,88
12,01	177,0	0,87
12,99	173,0	0,87
15,99	173,0	0,87
19,97	171,0	0,87
50,00	156,0	0,81
60,10	154,0	0,80
79,60	142,0	0,73
89,90	140,0	0,70
151,00	120,0	0,53
202,00	110,0	0,44
298,00	90,0	0,31
400,00	100,0	0,24
500,00	90,0	0,20
600,00	70,0	0,17
690,00	80,0	0,15
780,00	70,0	0,13
890,00	50,0	0,12

**Tabelle 3:** Erhobene Daten der zweiten Messreihe für den invertierenden Linearverstärker mit Widerstandsverhältnis 33,1 und Eingangsspannung 310 mV.

Frequenz/kHz	Phase/°	Ausgangsspannung/V
1,00	175,1	9,77
2,00	178,9	9,77
3,00	178,3	9,73
4,00	173,6	9,73
5,00	170,9	9,69
5,99	167,7	9,61
6,99	166,0	9,57
7,99	163,5	9,45
8,99	154,0	9,33
20,03	111,0	6,03
30,00	87,0	3,78
40,10	91,0	2,97
50,20	90,0	2,65
60,10	95,0	2,33
79,60	89,0	1,85
100,00	90,0	1,53
120,00	90,0	1,33
198,00	80,0	0,84
250,00	90,0	0,72
300,00	60,0	0,60
500,00	70,0	0,36

**Tabelle 4:** Erhobene Daten der dritten Messreihe für den invertierenden Linearverstärker mit Widerstandsverhältnis 3,31 und Eingangsspannung 310 mV.

Frequenz/kHz	Phase/°	Ausgangsspannung/V
1,00	176,8	1,13
2,00	174,0	1,13
2,99	172,9	1,13
3,99	174,6	1,13
4,98	175,3	1,13
6,03	176,4	1,13
8,01	177,0	1,13
10,01	181,0	1,13
20,16	179,0	1,13
29,90	177,0	1,13
40,10	172,0	1,13
59,50	170,0	1,13
100,00	160,0	1,09
202,00	120,0	0,84
250,00	120,0	0,68
291,00	100,0	0,60
400,00	120,0	0,44
500,00	100,0	0,40

**Tabelle 5:** Erhobene Daten der vierten Messreihe für den invertierenden Linearverstärker mit Widerstandsverhältnis 2,96 und Eingangsspannung 310 mV.

Frequenz/kHz	Phase/°	Ausgangsspannung/V
0,99	175,9	1,01
1,99	177,3	1,01
4,99	171,1	1,05
7,00	172,4	1,01
9,93	172,0	1,05
12,03	176,0	1,01
19,94	178,0	1,05
30,20	178,0	1,05
49,80	184,0	1,09
101,00	160,0	1,05
151,00	140,0	0,96
202,00	130,0	0,84
240,00	100,0	0,72
360,00	90,0	0,52
460,00	80,0	0,44
540,00	90,0	0,36
630,00	40,0	0,32

gefittet. Das Plateau bzw. die Fitparameter für jede Messreihe sind in Tabelle 6 zu finden.

**Tabelle 6:** Plateau und Fitparameter für verschiedene Widerstandsverhältnisse in der Schaltung des invertierenden Linearverstärkers.

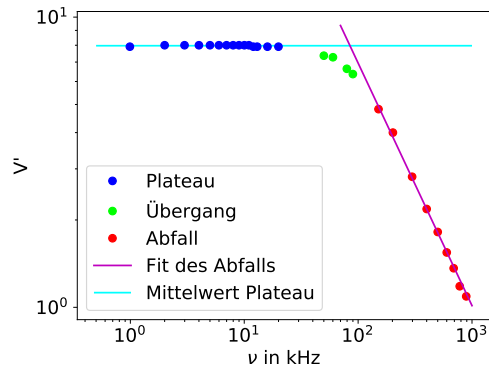
Widerstandsverhältnis	Plateauwert	$a$	$b$
10	$7,97 \pm 0,04$	$326 \pm 31$	$-0,84 \pm 0,02$
33,1	$31,41 \pm 0,09$	$168 \pm 12$	$-0,77 \pm 0,02$
3,31	$3,65 \pm 0,00$	$200 \pm 82$	$-0,81 \pm 0,07$
2,96	$3,32 \pm 0,06$	$214 \pm 40$	$-0,82 \pm 0,03$

Aus diesen Fitparametern und dem Plateau  $P$  kann nun die Grenzfrequenz

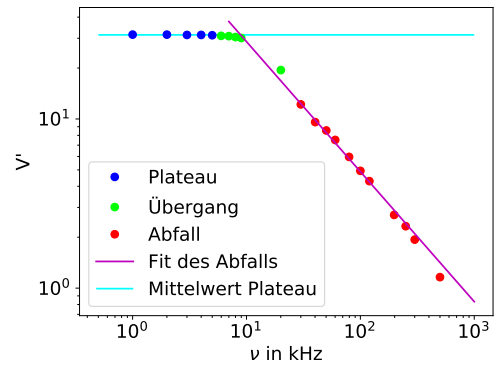
$$\nu_{Grenz} = \left( \frac{P}{\sqrt{2}a} \right)^{\frac{1}{b}},$$

die Leerlaufverstärkung

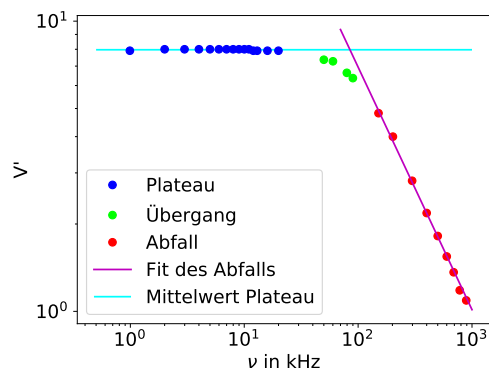
$$V = \frac{P \cdot R_N}{R_N + R_1 \cdot P}$$



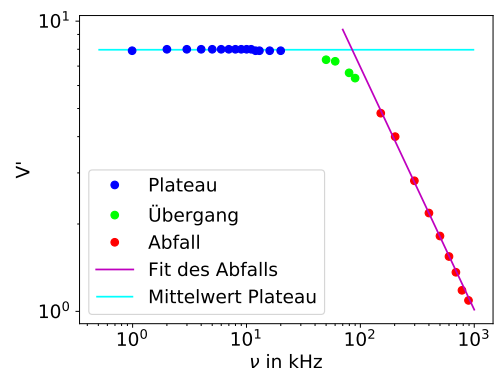
(a) Widerstandsverhältnis 10.



(b) Widerstandsverhältnis 33,1.



(c) Widerstandsverhältnis 3,31.



(d) Widerstandsverhältnis 2,96.

**Abbildung 10:** Zusammenhang zwischen Frequenz und Verstärkung für verschiedene Widerstandsverhältnisse.

und das Bandbreitenprodukt

$$B = V' \cdot \nu_{Grenz}$$

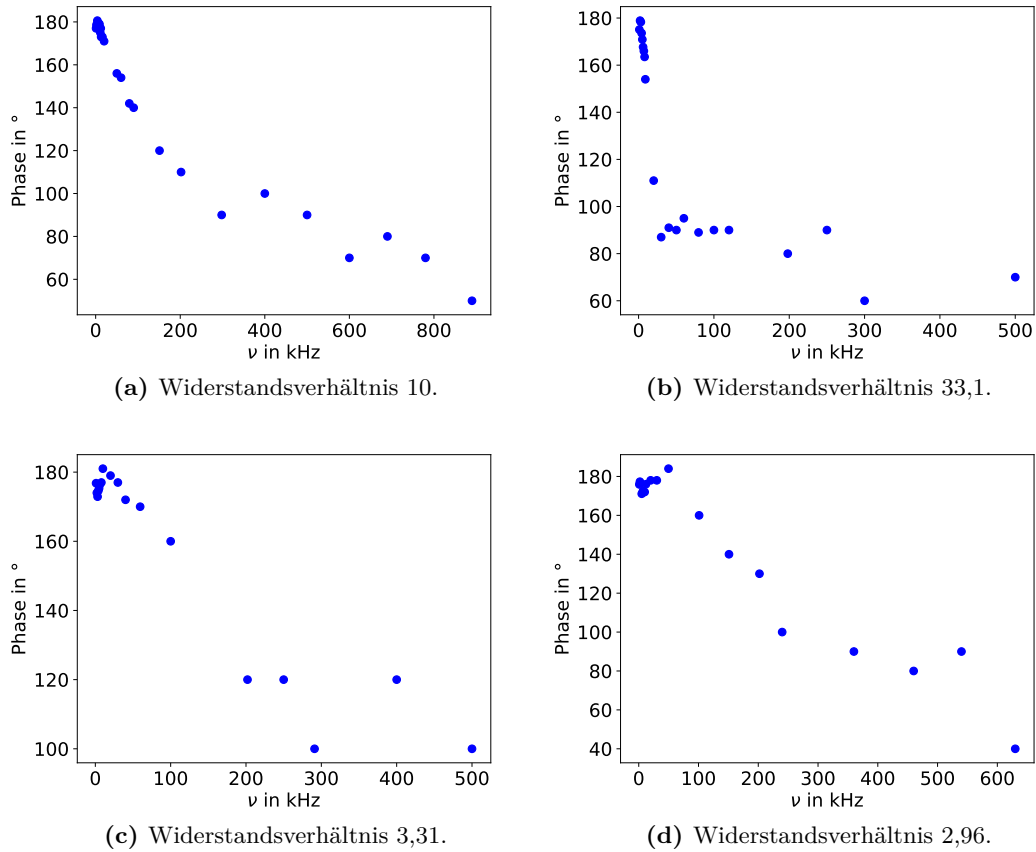
errechnet werden. Für die vier Messreihen sind die Werte in Tabelle 7 angegeben.

**Tabelle 7:** Grenzfrequenz, Leerlaufverstärkung und Bandbreitenprodukt für die jeweiligen Widerstandsverhältnisse des invertierenden Linearverstärkers.

Widerstandsverhältnis	$\nu_{Grenz}/\text{kHz}$	$V$	$B/\text{kHz}$
10	128,38	4,44	1023
33,1	13,92	16,11	437
3,31	204,16	0,28	744
2,96	238,01	0,31	791

#### 4.1.3 Frequenzabhängigkeit der Phase zwischen Ein- und Ausgangsspannung

Für die vier Messreihen wird die Abhängigkeit der Phase zwischen Ein- und Ausgangsspannung von der Frequenz in Abb. 11 graphisch dargestellt. Dabei fällt der Phasenunterschied mit steigender Frequenz von  $180^\circ$  auf Werte zwischen  $40^\circ$  und  $100^\circ$  ab. Dieses Verhalten erinnert an einen Tiefpass.



**Abbildung 11:** Frequenzabhängigkeit der Phase für verschiedene Widerstandsverhältnisse beim invertierenden Linearverstärker.

## 4.2 Umkehrintegrator

In Abb. 12 sind die Werte für Ausgangsspannung in einem doppelt logarithmischen Diagramm gegen die Frequenz aufgetragen. Sie werden in einem ausgewählten Bereich mit einer Potenzfunktion gefittet, deren Parameter sich zu

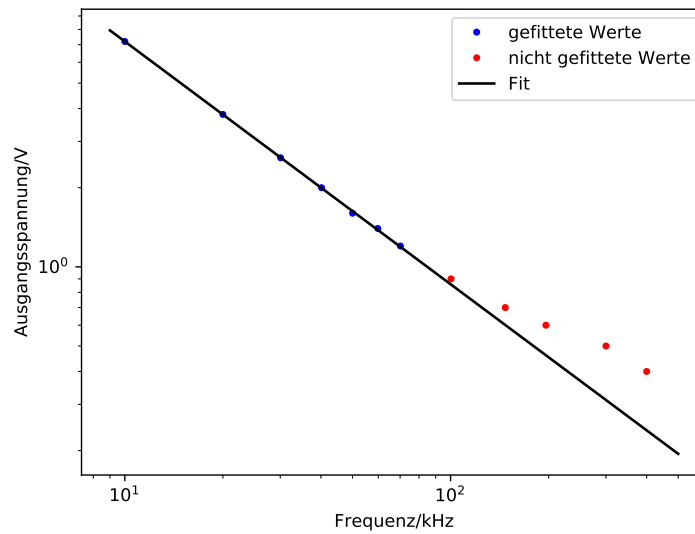
$$a = (60,3 \pm 0,5) \text{ V}$$

$$b = (-0,923 \pm 0,003) \frac{\text{V}}{\text{kHz}}$$

ergeben. Der Fit bestätigt, dass beim Integrator die Ausgangsspannung mit der Frequenz abnimmt.

Beispielhaft sind in Abb. 13 drei Ausgangsspannungen (grün) mit ihren jeweiligen integrierten Spannungen (gelb) zu sehen. Es wird deutlich dass dabei eine Sinusspannung





**Abbildung 12:** Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Frequenz beim Umkehrintegrator mit  $R = 33,1 \text{ k}\Omega$  und  $C = 0,015 \text{ nF}$ .

zu einem Cosinus, eine Dreiecksspannung zu einem Sinus und eine Rechteckspannung zu einer Dreiecksspannung wird.

### 4.3 Differenzierer

Für den Differenzierer wird ebenfalls die Ausgangsspannung doppelt logarithmisch gegen die Frequenz geplottet (Abb. 14).

Die im ausgewählten Bereich aus dem Fit ermittelten Parameter sind

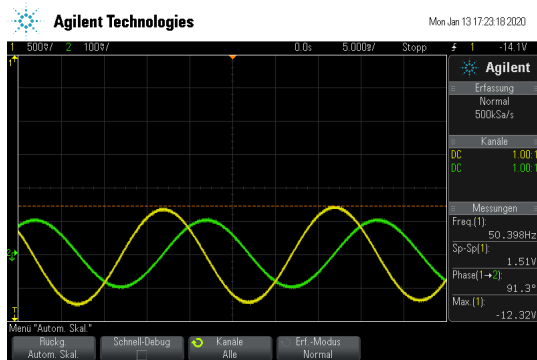
$$a = (1,76 \pm 0,05) \text{ mV}$$

$$b = (0,972 \pm 0,005) \frac{\text{mV}}{\text{kHz}}.$$

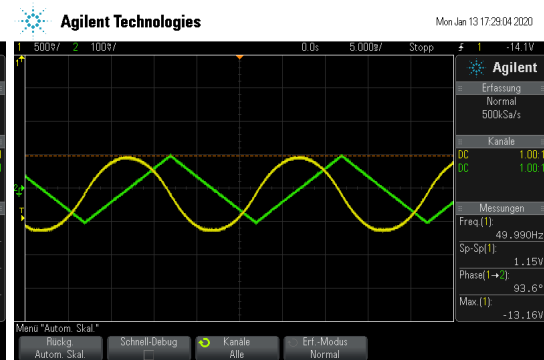
Hier bestätigt sich der Anstieg der Ausgangsspannung mit wachsender Frequenz für den Differenzierer. Die drei Spannungsformen Sinus, Rechteck und Dreieck werden durch den Differenzierer geleitet und mit den jeweiligen Ausgangsspannungen in Form von Cosinus, Delta-Peaks und Rechteckspannung dargestellt (siehe Abb. 15).

### 4.4 Nicht-Invertierender Schmitt-Trigger

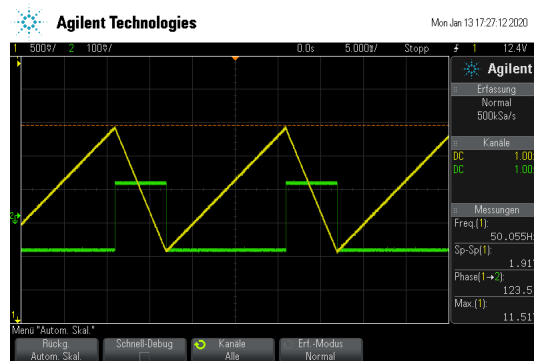
In Abbildung 16 ist das sinusförmige Eingangssignal sowie das Ausgangssignal der nicht-invertierenden Schmitt-Trigger-Schaltung zu sehen. Daraus kann eine Schalthysterese von 160 mV abgelesen werden.



(a) Sinus und Integration (Cosinus).

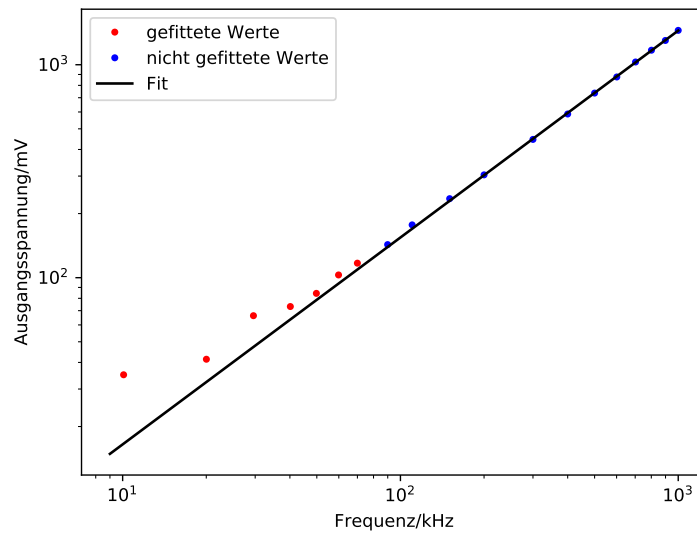


(b) Dreieck und Integration (Sinus).

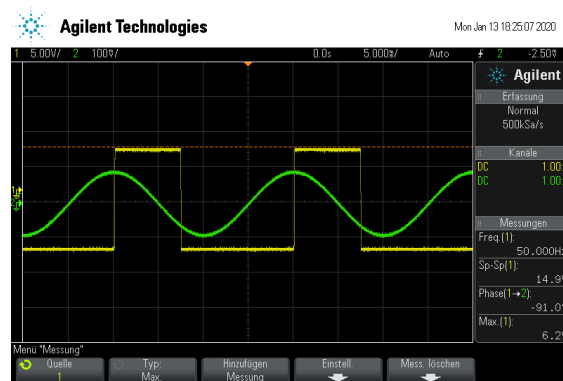


(c) Rechteck und Integration (Dreieck).

**Abbildung 13:** Verschiedene Ausgangsspannungen (grün) mit jeweiliger Integration (gelb) für den Umkehrintegrator.



**Abbildung 14:** Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Frequenz beim Differenzierer mit  $R = 33,1 \text{ k}\Omega$  und  $C = 0,015 \text{ nF}$ .

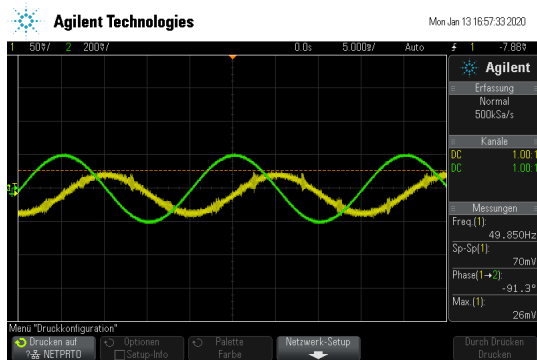


**Abbildung 16:** Abbildung des Scheitelwerts des nicht-invertierenden Schmitt-Triggers, wobei die Eingangsspannung grün und die Ausgangsspannung gelb ist.

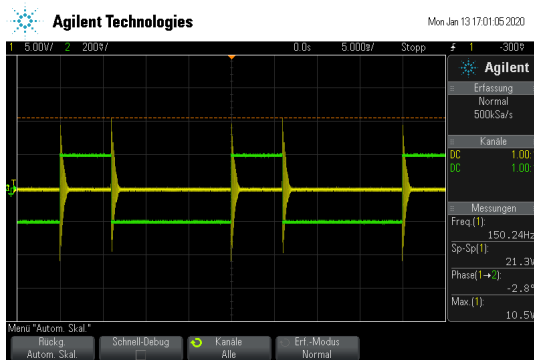
Wenn die Schalthysterese mithilfe der Formel

$$U_{\text{Hys}} = 2 \frac{R_1}{R_2} U_B$$

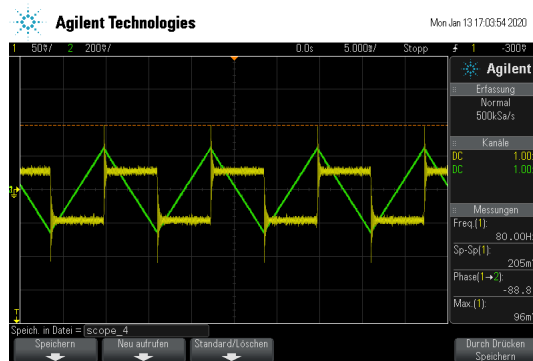
berechnet wird, ergibt sich eine Schalthysterese von 3 V für die notierten Parameter  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$  und  $U_B = 15 \text{ V}$ . Diese ist viel größer als die tatsächlich gemessene (160 mV), weshalb davon auszugehen ist, dass die Größenordnung eines Parameters falsch notiert wurde.



(a) Sinus und Ableitung (Cosinus).



(b) Rechteck und Ableitung (Delta-Peaks).

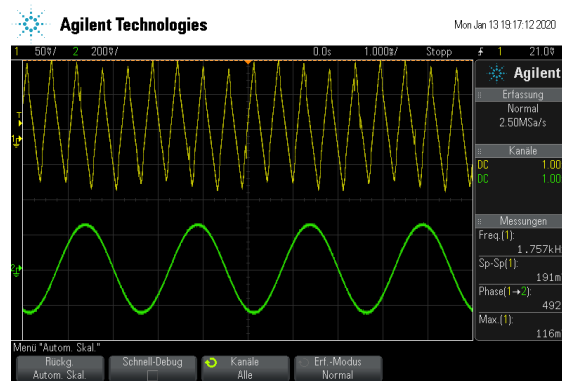


(c) Dreieck und Ableitung (Rechteck).

**Abbildung 15:** Verschiedene Eingangsspannungen (grün) mit jeweiliger Ableitung (gelb) für den Differenzierer.

## 4.5 Signalgenerator

Das mit dem Signalgenerator erzeugte Signal sowie das sinusförmige Eingangssignal sind in Abb. 17 zu erkennen. Die Amplitude des Dreieckssignals kann zu 95,5 mV abgelesen werden. Die Frequenz liegt bei 1,757 kHz.



**Abbildung 17:** Abbildung des Eingangssignals (grün) und Ausgangssignals (gelb) des Signalgenerators.

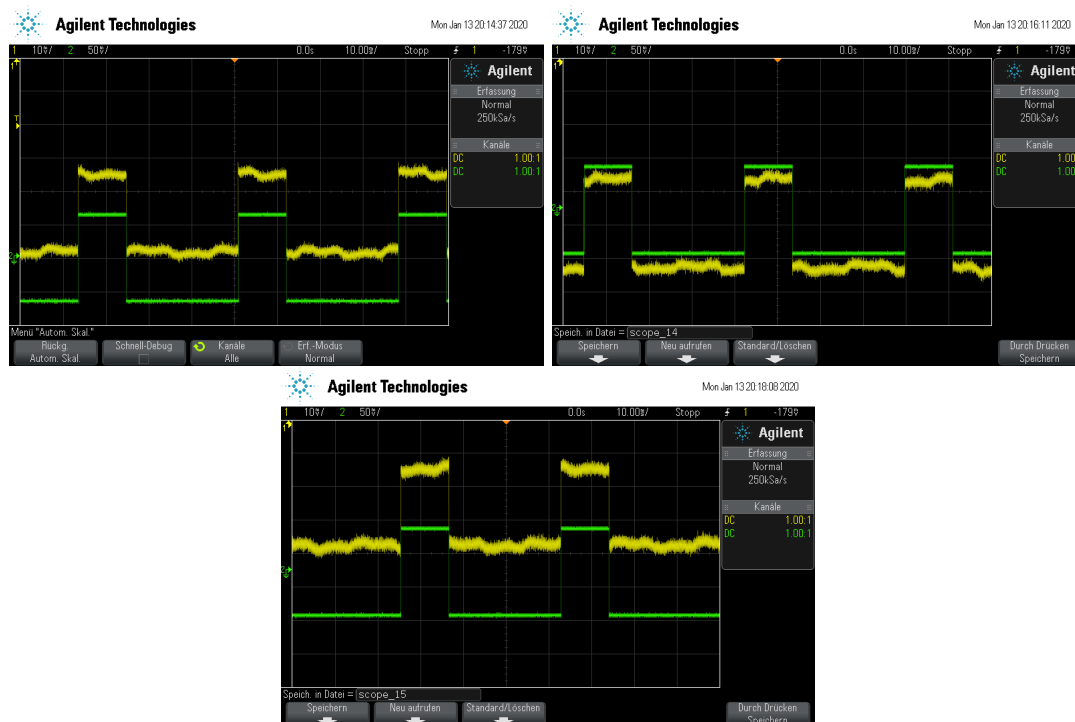
Die theoretische Frequenz lässt sich über

$$\nu_{theo} = \frac{R_2}{4CR_1R_3}$$

zu 1,025 kHz berechnen, wobei die Werte  $R_1 = R_3 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$  und  $C = 975 \text{ nF}$  eingesetzt werden.

## 4.6 Variierende Amplituden

Die Bilder, die für die Schaltung mit variierenden Amplituden aufgenommen werden, sind in Abb. 18 zu sehen. Es ist zu erkennen, dass die eintreffende reine Rechteckspannung in eine Rechteckspannung mit Oszillationen umgewandelt wird.



**Abbildung 18:** Aufgenommene Bilder zur Schaltung der variierenden Amplituden.

Allerdings sollte die Schaltung bei richtiger Funktionsweise keine Rechteckspannung mit Oszillationsanteil, sondern eine reine gedämpfte oder verstärkte Sinusspannung ausgeben. Da dies nicht der Fall ist, ist vermutlich eines der Bauteile falsch eingebaut worden.

## 5 Diskussion

In der Schaltung des invertierenden Linearverstärkers zeigen die Messwerte für alle Widerstandsverhältnisse einen erwarteten Verlauf mit drei Teilen: Plateau, Übergang und Abfall. Der Mittelwert des Bandbreitenprodukts liegt bei 748,75 kHz. Für die Widerstandsverhältnisse 10, 33,1, 3,31 und 2,96 ergeben sich prozentuale Abweichungen von 36,6 %, 41,6 %, 0,6 % und 5,6 % vom Mittelwert. Die Phasenbeziehung zwischen Ein- und Ausgangsspannung fällt mit steigender Frequenz tiefpassartig ab. Beim Umkehrintegrator und -differentiator sind die erwarteten Ausgangsspannungsbilder für alle eingestellten Eingangsspannungen auf dem Oszilloskop zu sehen. Die Proportionalität zwischen Frequenz und Ausgangsspannung ist auch für beide Schaltungen so, wie zuvor angenommen: Der Integrator liefert eine Spannung, die Antiproportional zur Frequenz ist, was aus dem Fitparameter  $b = -0,923$  hervorgeht, welcher um 7,7 % vom erwarteten Parameter  $b = -1$  abweicht. Der Differentiator sollte eine zur Frequenz proportionale Spannung ausgeben mit  $b = 1$ . Der gemessene Parameter  $b = 0,972$  weicht um 2,8 % vom erwarteten ab. Beim nicht-invertierenden Schmitt-Trigger ist die beobachtete Schalthysterese viel kleiner als die zuvor errechnete. Dies ist im Rahmen normaler Fehler nicht zu erklären,

weshalb vermutlich die Größenordnung eines Bauteils oder der Ausgangsspannung falsch notiert wurde. Die Frequenz des Signalgenerators liegt in der gleichen Größenordnung wie die theoretisch berechnete. Allerdings beträgt die Abweichung trotzdem 71%. Die letzte Messung stimmt nicht mit den Erwartungen überein, da hier ein sinusförmiger Verlauf zu sehen sein sollte, allerdings nur eine Schwingung innerhalb der Plateaus des Dreiecks zu erkennen ist. Dies spricht dafür, dass die Schaltung richtige Elemente enthält, welche eine Schwingung erzeugen, aber dass auch irgendwo ein Fehler vorliegen muss, da der Rechtecksanteil erhalten bleibt.

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *Alte Versuchsanleitung zu Versuch Nr. 51 Operationsverstärker*. 2019.
- [2] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zu Versuch Nr. 51 Operationsverstärker*. 2019.