

Versuch 64: Operationsverstärker

Physikalisches Institut

Albert-Ludwigs-Universität
Freiburg

Physiklabor für Anfänger*innen

eingereicht von:



Gruppe 14 & 15
Datum: 21.03.2018

Inhaltsverzeichnis

1	Versuchsbeschreibung	3
1.1	Ziel des Versuchs	3
1.2	Physikalische Grundlagen	3
1.3	Versuchsaufbau	4
1.4	Versuchsdurchführung	5
1.4.1	Spannungsfolger	6
2	Auswertung	7
3	Zusammenfassung und Diskussion	13
4	Abbildungen	14
5	Tabellen	14
6	Literatur	14
7	Anhang	15
7.1	Tabellen	15
7.2	Messdaten	18

1 Versuchsbeschreibung

1.1 Ziel des Versuchs

Ziel des Versuchs ist die Untersuchung der Funktionsweise eines Operationsverstärkers, indem zuerst die Verstärkung für eine Rückkopplung mit Widerstand und mit zusätzlichem Kondensator verfolgt wird. Anschließend wird die Eignung des Verstärkers als Integrator untersucht sowie durch das Aufbauen eines Spannungsverfolgers die Ausgangsspannung und das Sättigungsverhalten betrachtet.

1.2 Physikalische Grundlagen

Ein Operationsverstärker ist ein durch Gleichspannung betriebener Verstärker von Spannungen, der zur präzisen Verstärkung von kleinen Wechsel- oder Gleichspannungen dient. Er besitzt dabei zwei Eingänge und einen Ausgang, wobei die Ausgangsspannung U_A zur Differenz der beiden Eingangsspannungen $U_+ - U_-$ proportional:

$$U_A = A_0 \cdot (U_+ - U_-), \quad (1.1)$$

wobei der mit + gekennzeichnete Eingang durch die gleichphasige Verstärkung als nicht-invertierend und der mit - dargestellte als invertierend bezeichnet wird, da das Signal dort gegenphasig verstärkt wird.

Der Operationsverstärker wird dabei an die Masse angeschlossen und zusätzlich mit einer dagegen positiven ($+U_V$) und negativen ($-U_V$) Spannung über ein Netzgerät versorgt.

Anwendung als invertierender Verstärker

Zur Verwendung als invertierender Verstärker muss der Operationsverstärker in einen bestimmten Schaltkreis eingebaut werden, wobei der nicht-invertierende Anschluss auf Masse gelegt wird, sodass jede davon abweichende Spannung am invertierenden Eingang zu einer stark ansteigenden Ausgangsspannung führt. Die Schaltung kann Abbildung 1 im Versuchsaufbau eingesehen werden.

Da für zu große oder zu kleine Spannungen an U_- der positive oder negative Sättigungsbereich erreicht wird, an dem keine sinnvolle Verstärkung mehr möglich ist, sorgt eine Gegenkopplung mit einem Widerstand R_2 dafür, dass jede Veränderung der Spannung U_A zu einer Änderung der dafür verantwortlichen Spannung U_- führt. Dies wird Gegenkopplung genannt.

Das Verhältnis zwischen Ausgangs- und Eingangsspannung wird über die beiden Widerstände R_1 und R_2 bestimmt:

$$U_A = -\frac{R_2}{R_1} U_E = -G U_E, \quad (1.2)$$

wobei G die Verstärkung des Signals ist. Die Verstärkung ist somit gegeben durch

$$G = -\frac{U_A}{U_E}. \quad (1.3)$$

Anstelle eines einfachen Widerstands R_2 können auch komplexe Widerstände verwendet werden, indem beispielsweise ein Kondensator (hier C_2) parallel zur R_2 geschaltet wird. Der zusätzliche Kondensator sorgt dafür, dass sowohl die Verstärkung als auch die Phasenlage frequenzabhängig wird, wobei hier im Gegensatz zum Transistorverstärker die Verstärkung für kleine Frequenzen größer ist. Diese Anwendung eines Operationsverstärkers wird Integrator genannt.

Für den theoretischen Verlauf der Verstärkung bei der Verwendung des komplexen Widerstands

Z_2 mit C_2 und R_2 wird zunächst die Impedanz der Parallelschaltung aus R_2 und dem Kondensator C_2 berechnet:

$$\begin{aligned} \frac{1}{Z} &= \frac{1}{R_2} + \omega C_2 \\ \Rightarrow Z &= \frac{R_2}{1 + i\omega C_2 R_2} = \frac{R}{1 + (\omega C_2 R_2)^2} - i \frac{\omega C_2 R_2}{1 + (\omega C_2 R_2)^2} \\ \Rightarrow |Z| &= \sqrt{Re^2 + Im^2} = \sqrt{\frac{R_2^2}{1 + (\omega C_2 R_2)^2}} \end{aligned} \quad (1.4)$$

Verzichtet man in der Schaltung auf die Widerstände, erhält man einen Spannungsfolger. Dieser hat eine Verstärkung von 1, da in diesem Fall die Ausgangsspannung der Eingangsspannung direkt folgt. Zur Untersuchung des Sättigungsverhalten werden wieder zusätzliche Widerstände eingebracht, deren Position in Abbildung 2 im Versuchsaufbau zu sehen ist.

Die Einbringung eines zusätzlichen Widerstands R_A hinter den Ausgang des Operationsverstärkers sorgt für eine Erhöhung des effektiven Ausgangswiderstands des Operationsverstärkers, was zu deutlicheren Ergebnissen führt. Durch diesen zusätzlichen Widerstand lässt sich in Kombination mit dem eingebrachten Potentiometer die Spannung am Ausgang des Operationsverstärkers und somit auch U_- am invertierenden Eingang des Verstärkers regeln. Damit lässt sich die Sättigung, also dadurch auch der Arbeitsbereich des Operationsverstärkers, verändern.

1.3 Versuchsaufbau

Auf einem Steckbrett wird zunächst aus einem Operationsverstärker, unterschiedlichen Widerständen, einem Kondensator, Brücken und Kabeln eine Schaltung für den invertierbaren Verstärker abgebaut. Der Aufbau kann in Abbildung 1 nachvollzogen werden.

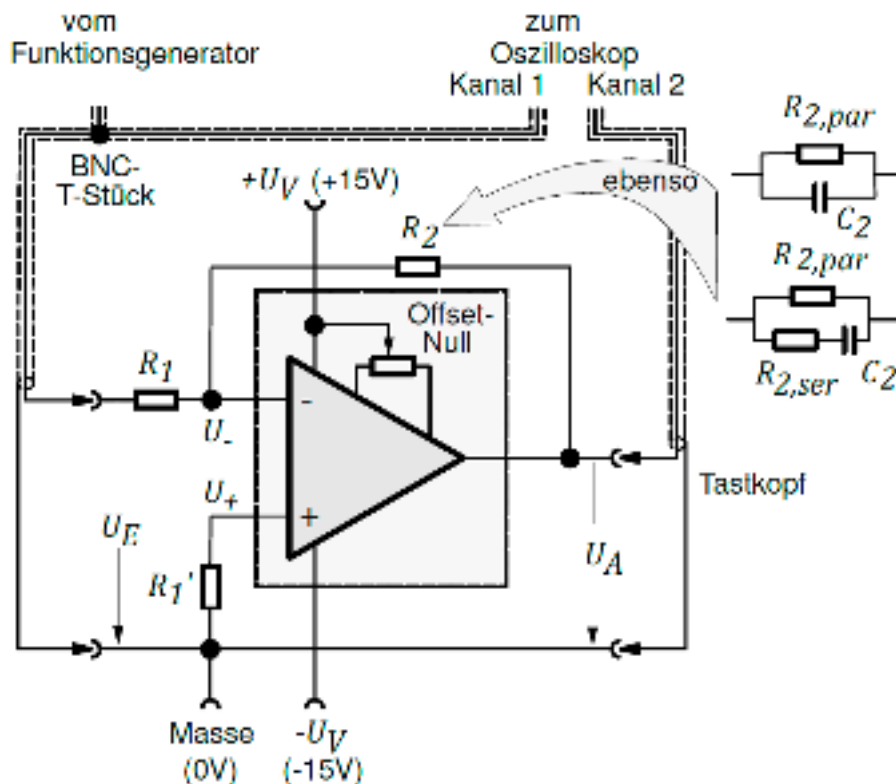


Abb. 1: Versuchsaufbau für den invertierten Verstärker

Der Operationsverstärker wird dabei durch ein Netzgerät mit einer Spannung versorgt. Durch den Funktionsgenerator wird ein Signal angelegt, das durch den Operationsverstärker verstärkt wird und am Ausgang des Verstärkers durch das Oszilloskop mithilfe des Tastkops abgegriffen wird. Das Signal des Funktionsgenerators wird dabei zusätzlich direkt an das Oszilloskop geleitet.

Für das Erhalten eines Integrators wird zusätzlich ein Kondensator parallel zu R_2 geschaltet.

Um den Spannungsverfolger zu erhalten, wird die Schaltung neu aufgebaut, wobei hier verschiedene Widerstände und mehrere Digitalmultimeter verwendet werden. Der Aufbau ist in Abbildung 2 zu sehen.

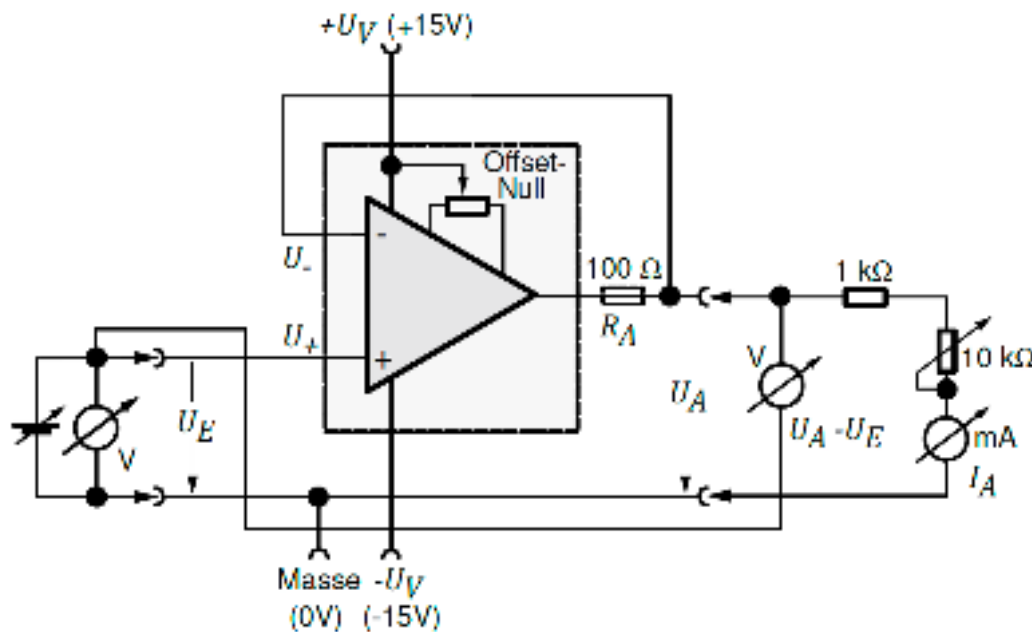


Abb. 2: Versuchsaufbau für den Spannungsfolger

1.4 Versuchsdurchführung

Invertierender Verstärker

Zunächst wurde die Schaltung nach Abbildung 1 aufgebaut, wobei die verwendeten Widerstände die Werte $R_1 = R'_1 = 4,7\text{k}\Omega$ sowie $R_2 = 470\text{k}\Omega$ haben.

Anschließend musste der Nullabgleich durchgeführt werden, um den Offset auf 0 einzustellen. Dazu wurden beide Eingänge des Operationsverstärkers an Masse gelegt und kein Signal durch den Funktionsgenerators angelegt. Lediglich das Netzgerät wurde zur Spannungsversorgung des Verstärkers verwendet. Außerdem musste der Rückkopplungswiderstand R_2 entfernt werden. Über den Drehknopf am Operationsverstärker wurde der Offset nun so eingestellt, dass am Oszilloskop keine Schwingung sondern lediglich eine Gerade angezeigt wurde.

Als Nächstes wurden die entfernten Teile wieder eingebaut und der Funktionsgenerator wieder angeschlossen. Dort wurde ein sinusförmiges Signal mit einer Amplitude von $U_0 = 60\text{mV}$ eingestellt. Für verschiedene Frequenzen in einem Bereich von $\nu = 100\text{Hz}$ bis $\nu = 100\text{kHz}$ wurde die Amplitude des verstärkten Signals in Kästchen mit am Oszilloskop eingestellter Empfindlichkeit notiert.

Dasselbe wurde nach Einbau eines Kondensators, der parallel zu R_2 geschaltet wird und eine Kapazität von $C_2 = 2,2\text{nF}$ hat, analog durchgeführt. Dabei wurde eine Amplitude von $U_0 = 10\text{mV}$ gewählt und in einem Bereich von 20Hz bis 100kHz gemessen, wobei pro Dekade drei Messpunkte aufgenommen wurden.

Integrator

Um den Integrator zu erhalten, wird der hier von vorherigen Versuchsteil schon eingebaute Kondensator C_2 und Widerstand R_2 als Rückkopplungswiderstand verwendet. Anstatt eines sinusförmigen Signals wird hier allerdings ein Rechtecksignal am Funktionsgenerator eingestellt. Auch hier wird analog zu vorher die Frequenz verändert, was in einem Bereich von $0,1\text{kHz}$ bis 100kHz geschieht, und die zugehörige Amplitude abgelesen.

1.4.1 Spannungsfolger

Im letzten Versuchsteil wird die Schaltung so aufgebaut, dass man einen Spannungsverfolger erhält. Dies geschieht wie in Abbildung 2 dargestellt. Statt des Funktionsgenerator wird hier eine regelbare Gleichspannungsquelle verwendet und es wird mit Digitalmultimetern und nicht mehr über das Oszilloskop gemessen.

Auch hier muss zuerst der Nullabgleich durchgeführt werden, wobei die Widerstände entfernt, die Gleichspannungsquelle entfernt und die beiden Eingänge des Operationsverstärkers an Masse gelegt werden. Der Offset wird so verstellt, dass die gemessene Spannung $U_A - U_E$ 0 ist.

Anschließend wird der Funktionsgenerator wieder angeschlossen. Für unterschiedliche am Gleichspannungsgerät eingestellte Spannungen ist die Spannung U_E sowie die Spannungsdifferenz $U_A - U_E$ mit Digitalmultimetern zu messen. Dabei wird von 0V bis 12V eine Schrittweite von 3V gewählt und anschließend in kleineren Schritten bis 15V vorgegangen.

Zuletzt wird zur Untersuchung des Sättigungsverhalten ein Widerstand R_A mit $R_A = 100\Omega$ direkt hinter den Ausgang des Operationsverstärkers eingebaut

2 Auswertung

Alle Messergebnisse sind im Anhang zu finden.

Linearer Verstärker

Die am Oszilloskop gemessenen Werte von U_{ss} werden in die einfache Amplitude U und in Volt umgerechnet, indem sie mit der am Oszilloskop eingestellten Empfindlichkeit multipliziert und dann halbiert werden werden (siehe Tabelle 2). Die Verstärkung berechnet sich über (1.3)

$$|G| = \frac{U_E}{U_A}$$

und der theoretisch erwartete Wert durch

$$G = \frac{R_2}{R_1} = \frac{470\text{ k}\Omega}{4,7\text{ k}\Omega} = 100.$$

Die Fehler auf U berechnen sich durch

$$s_U = \frac{U_{ss}}{2} \cdot \frac{1}{10} \text{div},$$

wobei es sich bei 1/10div um den Ablesefehler vom Oszilloskop handelt, und der Fehler auf die Verstärkung durch

$$s_G = G \cdot \frac{s_U}{U},$$

da U_A eine vernachlässigbar geringe Unsicherheit hat. Die Verstärkung G und G_{theo} werden gegen die Frequenz ν aufgetragen, zu sehen in Abbildung 3.

Man sieht, dass die Verstärkung für hohe Frequenzen ab ca. 10 kHz nicht mehr Konstant bleibt.

Frequenzabhängiger Verstärker

Hier ist nun zusätzlich zum Widerstand R_2 ein Kondensator C_2 parallel geschaltet. Daher muss nun für die theoretische Verstärkung die gesamte Impedanz dieses R - C -Glieds bestimmt werden (siehe Gleichung 1.4): Die Werte sind im Anhang in Tabelle 3 zu finden. G und G_{theo} werden hierbei wieder gegen die Frequenz aufgetragen, zu sehen in Abbildung 4.

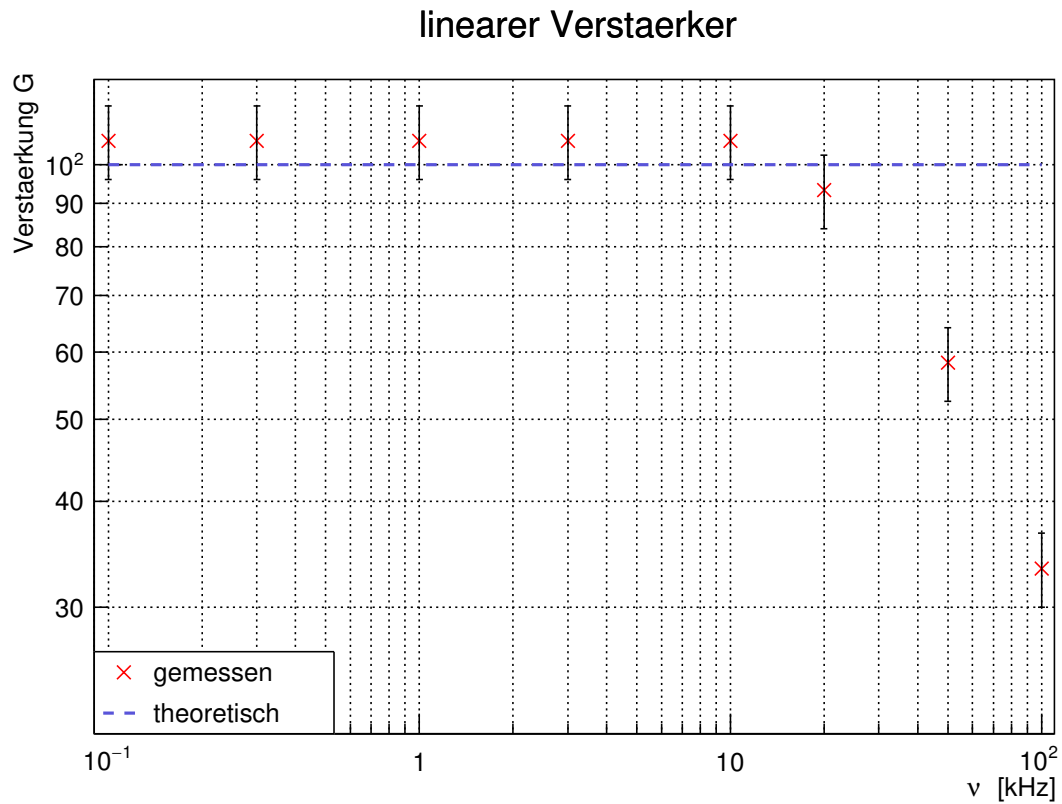


Abb. 3: linearer Verstärker

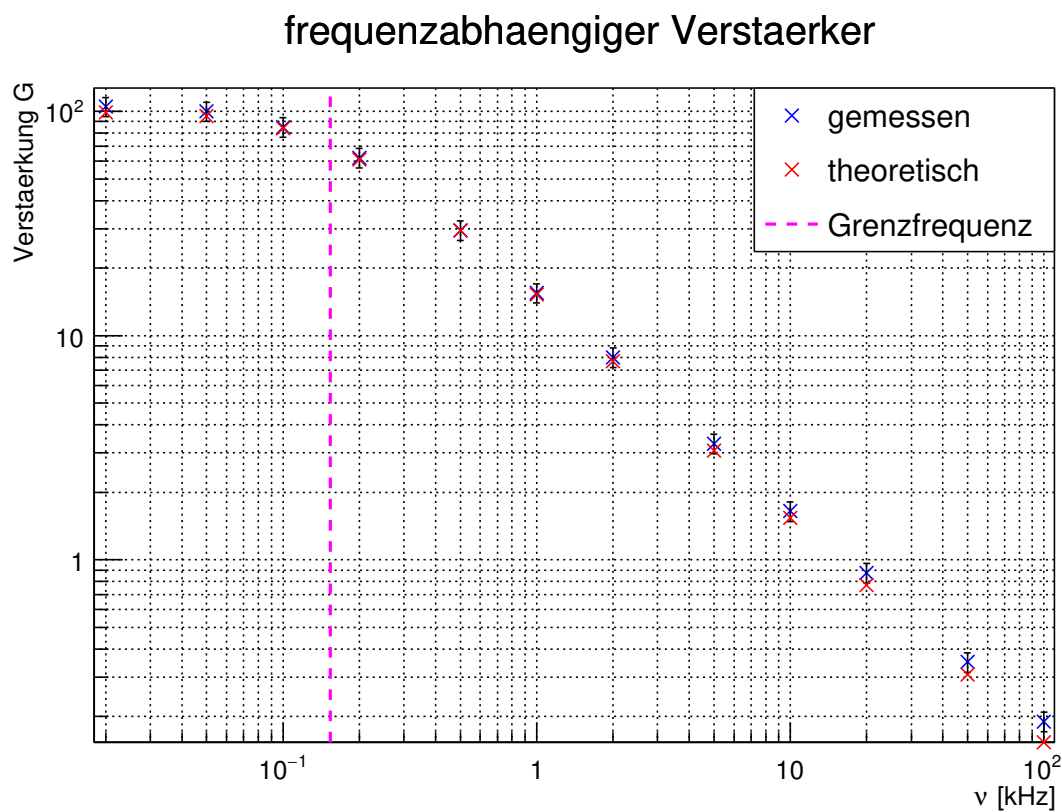


Abb. 4: Verstärkung des frequenzabhängigen Verstärkers. In blau sind die aus den Messergebnissen berechneten Werte zu sehen, in rot die theoretisch berechneten. In pink ist die für die Parallelschaltung aus R_2 und C_2 berechnete Grenzfrequenz zu sehen.

Die Zeitkonstante τ des R - C -Glieds berechnet sich über

$$\tau = R_2 \cdot C_2 = 0,001304\text{s}$$

und damit errechnet sich die Grenzfrequenz ν_{grenz} zu

$$\nu_{\text{grenz}} = \frac{1}{\tau} = 154\text{Hz},$$

wobei dieser Wert auch in Grafik 4 als Linie eingezeichnet ist.

Nun werden noch zwei Grenzfälle für die Rückkopplungsimpedanz Z_2 betrachtet, einmal für eine gegen 0 gehende Frequenz und einmal für eine unendlich große Frequenz:

$$\begin{aligned} \omega \rightarrow \infty : |Z| \approx 0 &\rightarrow G = \frac{|Z|}{R_1} = 0 \\ \omega \rightarrow 0 : |Z| \approx R_2 &\rightarrow G = \frac{|Z|}{R_1} = \frac{R_2}{R_1} = 100 \end{aligned}$$

Die Verstärkung für die gegen unendlich tendierende Frequenz geht somit gegen 0, während sie sich für eine gegen 0 gehende Frequenz der maximalen theoretisch bestimmten Verstärkung annähert, die sich durch die verwendeten Widerstände ergibt.

Dies kann auch bei Betrachtung von Abbildung 4 beobachtet werden.

Integrator

Die in diesem Versuchsteil am Oszilloskop abgelesene Amplitude wird zusammen mit der jeweils eingestellten Frequenz in ein Diagramm eingetragen, wobei die Amplitude über die Frequenz aufgetragen wird. Dies kann in Abbildung 5 eingesehen werden.

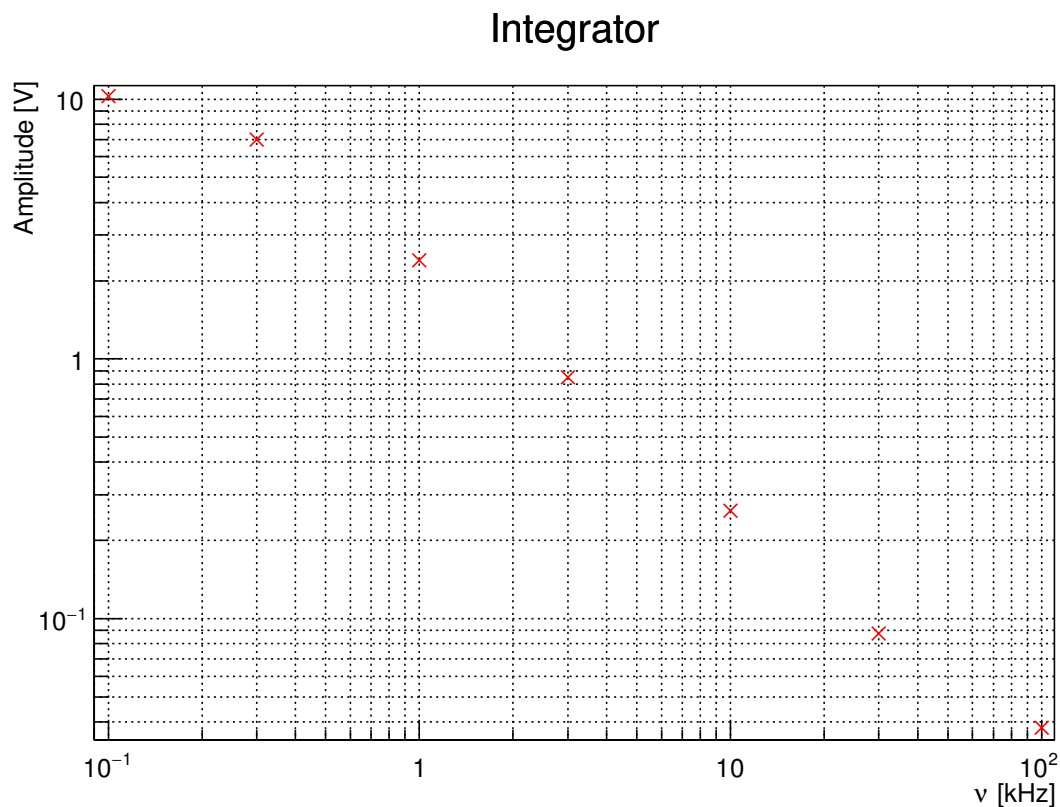


Abb. 5: Auftragung der gemessenen Amplitude bei bestimmter Frequenz

Bei der Messung war anhand der Form der am Oszilloskop angezeigten Kurve für die unterschiedlichen eingestellten Frequenzen zu erkennen, dass die Schaltung als Integrator ab einer relativ hohen Frequenz von ca. 3 kHz wie erwartet funktioniert.

Theoretisch sollte dies schon ab einer Frequenz von 154 Hz möglich sein, was aus dem zuvor berechneten Kehrwert der Zeitkonstante τ folgt, der der Grenzfrequenz entspricht. Bei niedrigen Frequenzen unter und im Bereich der Grenzfrequenz hatte das Signal allerdings eher das charakteristische Aussehen des Auf- und Entladevorgangs eines Kondensators. Mit zunehmender Frequenz wurde die Kurve mehr 'Haifischflossen'-artig, bis sie ab ca. 3 kHz die gewünschte Dreiecksform annimmt. Es handelt sich dabei um einen dreieckigen Verlauf, da die eingehende Spannung eine Rechteckspannung ist und es sich bei der durch den Integrator dargestellten Signalform um das integrierte Eingangssignal handelt. Dieses ist im Fall einer angelegten Rechteckspannung gerade ein Dreiecksverlauf.

Bei niedrigen Frequenzen sieht man also den Ent- und Ladevorgang des Kondensators und bei hohen tritt der erwartete Verlauf auf, da dort die Spannungspulse sehr viel kürzer sind, als τ . Anhand von $\tau = R \cdot C$ bzw. dem Kehrwert davon kann man erkennen, dass ein größerer Widerstand dafür sorgen würde, dass der Integrator besser beziehungsweise für kleinere Frequenzen funktioniert.

Spannungsfolger

Anhand der gemessenen Werte der Eingangsspannung U_E und denen der Spannungsdifferenz $U_A - U_E$, lassen sich die Werte der Ausgangsspannung U_A berechnen (siehe Tabelle 5). Die Eingangsspannung wird gegen die Ausgangsspannung in Abbildung 6 eingetragen. Es lässt sich dabei gut der lineare Zusammenhang zwischen den beiden Spannungen erkennen, bis der Sättigungsbereich bei ca. $U_E = 13,30 \text{ V}$ erreicht wird. Anhand der Grafik lässt sich die Sättigungsspannung ablesen. Sie beträgt

$$U_{\text{sätt}} = (13,27 \pm 0,01) \text{ V},$$

wobei 0,01 V der Ablesefehler ist. In Abbildung 6 ist sie als gestrichelte Linie eingezeichnet.

Sättigungsverhalten

Für drei verschiedene Widerstände, die über eine Veränderung des Widerstands des Potentiometers veränderbar sind, werden wieder die U_E - und U_A -Werte in ein Diagramm eingetragen (siehe Abbildung 7). Die verwendeten Widerstandswerte sind dabei 1 k Ω , ca. 6 k Ω und 11 k Ω .

Spannungsfolger

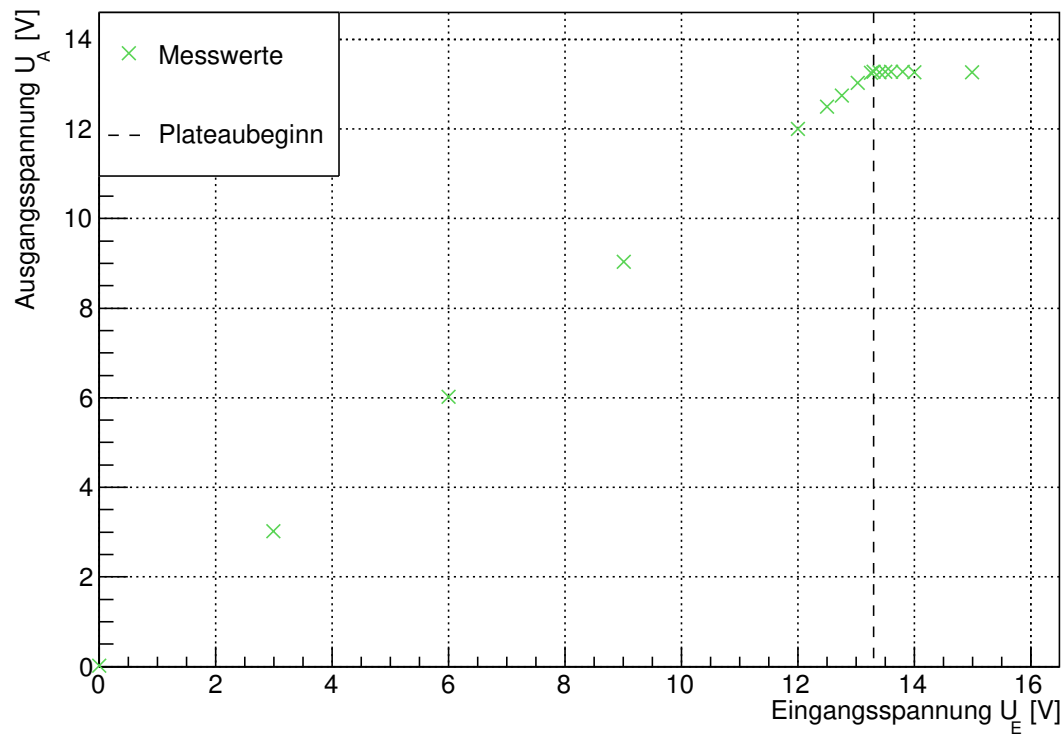


Abb. 6: Kennlinie des Spannungsfolgers mit als gestrichelte Linie eingezeichneter Sättigungsspannung

Spannungsfolger fuer versch. Widerstaende

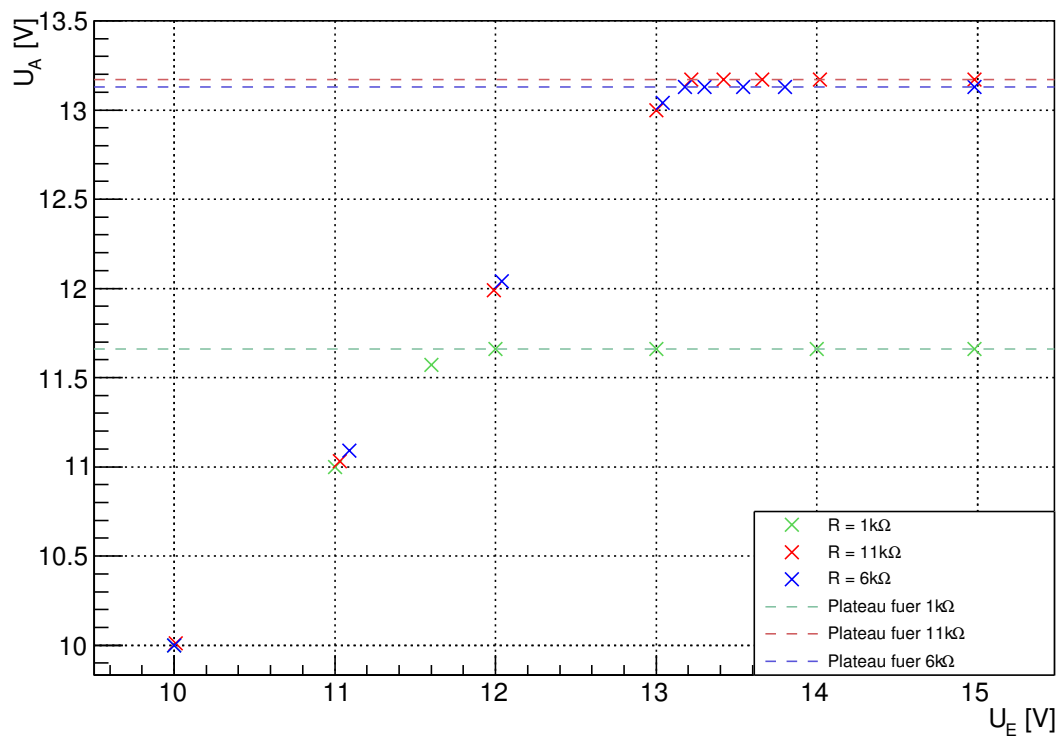


Abb. 7: Spannungsfolger für verschiedene Widerstände

Die unterschiedlichen Widerstände erhaltenen Sättigungsspannungen und -stromstärken können Tabelle 1

	Sättigungsspannung [V]	Sättigungsstrom [mA]
1 k Ω	$11,66 \pm 0,01$	11,63
6 k Ω	$13,17 \pm 0,01$	1,10
11 k Ω	$13,13 \pm 0,01$	0,81
ohne Widerstand	$13,27 \pm 0,01$	0,00

Tab. 1: Sättigungsspannung und -strom

Auf den Sättigungsstrom hätte man nun immer einen statistischen Ablesefehler von einem halben Digit, dieser ist allerdings vernachlässigbar gering und wird daher für die restliche Auswertung vernachlässigt.

Anschließend werden die Sättigungsspannungen gegen die Sättigungsströme aufgetragen, was in Abbildung 8 zu sehen ist.

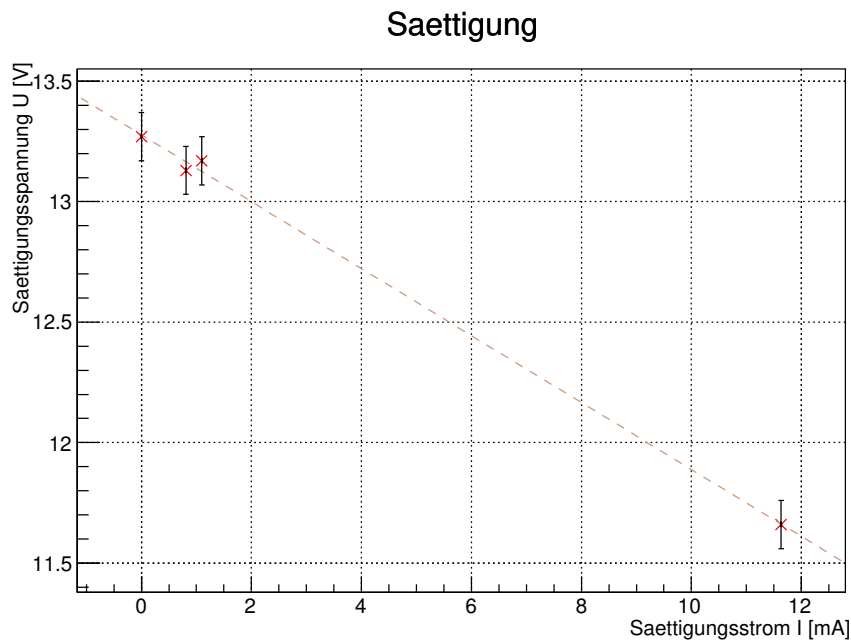


Abb. 8: Ermittlung des dynamischen Ausgangswiderstandes r_{A0} durch lineare Regression. Die Ausgleichsgerade ist dabei als gestrichelte Linie eingezeichnet.

Mittels PyROOT wird die Geradengleichung der Ausgleichsgeraden ermittelt, die als Linie eingezeichnet wird. Der so bestimmte Betrag der Steigung entspricht dem dynamischen Ausgangswiderstand r_{A0} . Dieser hat den Wert

$$r_{A0} = (139 \pm 10) \Omega.$$

3 Zusammenfassung und Diskussion

Linearer Verstärker

Die theoretisch ermittelte Verstärkung hat den Wert

$$\boxed{G = 100} . \quad (3.1)$$

Aus den Messergebnissen lässt sich beobachten, dass die aus den Messwerten berechnete Verstärkung mit der theoretischen bis zu einer Frequenz von ca. 10 kHz übereinstimmt. Für höhere Frequenzen nimmt die Verstärkung immer weiter ab und geht gegen 0, was auch dem erwarteten Verlauf entspricht.

Frequenzabhängiger Verstärker

Die in diesem Versuchsteil aus den Messergebnissen ermittelte Verstärkung stimmt gut mit der theoretischen überein. Lediglich für sehr hohe Frequenzen ab ca. 11 kHz stimmen die beiden Verläufe nicht mehr innerhalb einer 1σ Umgebung überein.

Die berechnete Zeitkonstante des Aufbaus hat den Wert

$$\boxed{\tau = 0,001304\text{s}} , \quad (3.2)$$

wodurch sich eine Grenzfrequenz von

$$\boxed{\nu_{\text{grenz}} = 154\text{Hz}} \quad (3.3)$$

ergibt.

Des Weiteren ist in Grafik 4 das Abknicken der Kurven nach Erreichen der Grenzfrequenz von 154 Hz zu erkennen.

Zusätzlich lassen sich die erwarteten Grenzwerte des Verlaufs bestätigen. Für gegen 0 tendierende Frequenzen geht die Verstärkung gegen den theoretisch berechneten Wert, der über die Widerstände bestimmt werden kann und in diesem Fall $G = 100$ ist. Für gegen unendlich gehende Frequenzen wird die Verstärkung immer kleiner und geht gegen 0.

Integrator

Bei der Messung mit dem Integrator konnte beobachtet werden, dass dieser ab einer Frequenz von ca. 3 kHz den erwarteten Verlauf zeigt. Dieser ist für eine angelegte Rechteckspannung eine dreieckige Signalform, da der Integrator das integrierte Signal der Eingangsspannung zeigt. Eine Erhöhung des parallel geschalteten Widerstands würde dabei die Funktionalität auch für kleinere Frequenzen verbessern.

Spannungsfolger

Anhand der graphisch bestimmten Sättigungsspannungen für die verschiedenen Widerständen und deren Sättigungsströme konnte durch lineare Regression der dynamische Ausgangswiderstand bestimmt werden, der den Wert

$$\boxed{r_{A0} = (139 \pm 10)\Omega}$$

hat.

Der Fehler dieses Widerstands hätte verringert werden können, indem statt Verwendung des Widerstands von $6\text{k}\Omega$ ein Widerstandswert gewählt worden wäre, für den der gemessene Strom größer ist. Da dieser hier sehr nah an den Stromstärken der anderen Messreihen liegt, fehlen Messpunkte im mittleren Bereich. Durch die Wahl eines anderen Widerstands hätte dies erreicht werden können und die lineare Regression hätte genauere Ergebnisse geliefert.

4 Abbildungen

1	Versuchsaufbau für den invertierten Verstärker	4
2	Versuchsaufbau für den Spannungsfolger	5
3	linearer Verstärker	8
4	Verstärkung des frequenzabhängigen Verstärkers. In blau sind die aus den Messergebnissen berechneten Werte zu sehen, in rot die theoretisch berechneten. In pink ist die für die Parallelschaltung aus R_2 und C_2 berechnete Grenzfrequenz zu sehen.	8
5	Auftragung der gemessenen Amplitude bei bestimmter Frequenz	9
6	Kennlinie des Spannungsfolgers mit als gestrichelte Linie eingezeichneter Sättigungsspannung	11
7	Spannungsfolger für verschiedene Widerstände	11
8	Ermittlung des dynamischen Ausgangswiderstandes r_{A0} durch lineare Regression. Die Ausgleichsgerade ist dabei als gestrichelte Linie eingezeichnet.	12

5 Tabellen

1	Sättigungsspannung und -strom	12
2	invertierter Verstärker	15
3	frequenzabhängiger Verstärker	15
4	Integrator	15
5	Spannungsfolger	16
6	Widerstand $1\text{ k}\Omega$	16
7	Widerstand $6\text{ k}\Omega$	16
8	Widerstand $11\text{ k}\Omega$	17

6 Literatur

- [Phy2A] *Physiklabor für Anfänger*innen Teil 2; Teil A Hinweise und Versuchsanleitungen*, Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- [Phy2B] *Physiklabor für Anfänger*innen Teil 2; Teil B Physikalische Grundlagen*, Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

7 Anhang

7.1 Tabellen

ν [kHz]	U_{ss} [div]	div [V]	U_{ss} [V]	U [V]	s_U [V]	s_G	G	G_{theo}
0,1	6,4	2	12,8	6,4	0,6	11	107	100
0,3	6,4	2	12,8	6,4	0,6	11	107	100
1	6,4	2	12,8	6,4	0,6	11	107	100
3	6,4	2	12,8	6,4	0,6	11	107	100
10	6,4	2	12,8	6,4	0,6	11	107	100
20	5,6	2	11,2	5,6	0,6	9	93	100
50	3,5	2	7	3,5	0,4	6	58	100
100	2	2	4	2	0,2	3	33	100

Tab. 2: invertierter Verstärker

ν [kHz]	U_{ss} [div]	div [V]	U_{ss} [V]	U [V]	s_U [V]	G	s_G	$ Z_2 $	G_{theo}
0,02	4,2	5	21	10,5	1,1	105	11	466082	99,17
0,05	4	5	20	10,0	1,0	100	10	447007	95,11
0,1	3,4	5	17	8,5	0,9	85	9	394126	83,86
0,2	6,2	2	12,4	6,2	0,6	62	6	286652	60,99
0,5	5,9	1	5,9	3,0	0,3	30	3	138282	29,42
1	6,2	0,5	3,1	1,6	0,2	16	2	71501	15,21
2	3,2	0,5	1,6	0,80	0,08	8,0	0,8	36065	7,67
5	3,3	0,2	0,66	0,33	0,03	3,3	0,3	14462	3,08
10	3,3	0,1	0,33	0,17	0,02	1,7	0,2	7233	1,54
20	3,5	0,05	0,175	0,088	0,009	0,88	0,09	3617	0,77
50	3,5	0,02	0,07	0,035	0,004	0,35	0,04	1447	0,31
100	1,9	0,02	0,038	0,019	0,002	0,19	0,02	723	0,15

Tab. 3: frequenzabhängiger Verstärker

ν [kHz]	U_{ss} [div]	div [V]	U_{ss} [V]	U [V]
0,1	4,1	5	20,5	10,25
0,3	2,8	5	14	7
1	4,8	1	4,8	2,4
3	3,4	0,5	1,7	0,85
10	2,6	0,2	0,52	0,26
30	3,5	0,05	0,175	0,0875
100	3,8	0,02	0,076	0,038

Tab. 4: Integrator

U_E [V]	$U_A - U_E$ [V]	U_A [V]
0,00	0,0222	0,0222
2,99	0,0253	3,0153
6,00	0,0261	6,0261
9,01	0,0283	9,0383
12,00	0,0046	12,0046
13,03	0,0000	13,03
14,00	-0,736	13,264
14,99	-1,723	13,267
12,50	0,000	12,5
12,75	0,000	12,75
13,25	0,000	13,25
13,30	-0,026	13,27
13,40	-0,130	13,27
13,50	-0,227	13,27
13,60	-0,325	13,28
13,80	-0,528	13,27

Tab. 5: Spannungsfolger

U_E [V]	$U_A - U_E$ [V]	I_A [mA]	U_A [V]
10,00	0,00	9,98	10,00
11,00	0,00	10,98	11,00
11,60	-0,03	11,63	11,57
12,00	-0,34	11,63	11,66
13,00	-1,34	11,63	11,66
14,00	-2,34	11,63	11,66
14,98	-3,32	11,63	11,66

Tab. 6: Widerstand $1\text{k}\Omega$

U_E [V]	$U_A - U_E$ [V]	I_A [mA]	U_A [V]
10,00	0,00	0,84	10,00
11,09	0,00	0,93	11,09
12,04	0,00	1,01	12,04
13,04	0,00	1,09	13,04
13,18	-0,05	1,10	13,13
13,30	-0,17	1,10	13,13
13,54	-0,41	1,10	13,13
13,80	-0,67	1,10	13,13
14,98	-1,85	1,10	13,13

Tab. 7: Widerstand $6\text{k}\Omega$

U_E [V]	$U_A - U_E$ [V]	I_A [mA]	U_A [V]
10,01	0,00	0,61	10,01
11,03	0,00	0,67	11,03
11,99	0,00	0,73	11,99
13,00	0,00	0,79	13,00
13,22	-0,05	0,81	13,17
13,42	-0,25	0,81	13,17
13,66	-0,49	0,81	13,17
14,02	-0,85	0,81	13,17
14,98	-1,81	0,81	13,17

Tab. 8: Widerstand 11 k Ω

7.2 Messdaten

Versuch 64

24.03.18

Invertierender Verstärker

4. bis Verstärker Amplitude $\frac{100}{200\text{mV}}$ (Spitze-zu-Spitze)

Frequenz / kHz	Amplitude SS / kHz	Messbereich / $\frac{V}{\text{div}}$
0,1	6,4	2V
0,3	6,6	2V
1	6,6	2V
3	6,4	2V
10	6,4	2V
20	5,6	2V
50	3,5	2V
100	2	2V

Frequenzfeld Verstärker	Amplitude $\frac{100}{200\text{mV}}$	Messbereich $\frac{1}{\text{div}}$
Frequenz / kHz	Amplitude / V	
0,02	4,2	5V
0,05	4	5V
0,1	3,4	5V
0,2	6,2	2V
0,5	5,9	1V
1	6,2	500mV
2	3,2	500mV
5	3,3	200mV
10	3,3	100mV
20	3,5	50mV
50	3,5	20mV
100	1,9	20mV

Integration

ν [kHz]	Amplitude u_s [V]	Form	Amplitude U_{eff} [V]
0,1	4,1		5V
0,3	2,8		5V
1	4,2		1V
3	3,4		500mV
10	2,6		200mV
30	3,5		50mV
100	2,7 3,8		20mV

Spannungsteiler

U_{eff} [V]	$U_A - U_B$ [mV]
0,05	20,2
2,99	25,3
6,00	26,1
9,01	28,3
12,00	4,6
13,03	0
14,00	-0,736
11,99	-1,713
12,50	0
12,55	0
13,25	0
13,30	-0,026
13,40	-0,038

0,5% Wertemerkmal

$U_A - U_B$ Messbereich 20mV

U_B Messbereich 20

Abgleichwert 2V

U_{eff} [V]	$U_A - U_B$ [V]
13,50	-0,227
13,60	-0,335
13,80	-0,528

U_E / V	$U_A - U_E / V$	I_A / mA	Widerstand - der - R_{A-E}
+10.00	0.00	9.98	Messbereich $I_A = 20 mA$ $U_E = 20V$ $U_A - U_E = 20V$
+1.00	0.00	10.98	
+1.6	0.03	+1.63	
+2.00	-0.03	+1.63	
+3.00	-0.03	+1.63	
+1.0	-2.31	+1.63	
+1.55	-3.30	+1.63	

Widerstand: $+1.63 \Omega$

U_E / V	$U_A - U_E / V$	I_A / mA
+0.01	0.00	0.61
+1.23	0.00	0.67
+1.39	0.00	0.73
+3.00	0.00	0.79
+3.21	+0.05	0.81
+3.42	-0.20	0.81
+3.66	-0.49	0.81
+4.02	-0.85	0.81
+4.98	-1.81	0.81

Widerstand: $ra = 6.2$

U_E / V	$U_A - U_E / V$	I_A / mA
+1.60	0.00	0.84
+1.09	0.00	0.93
+2.04	0.00	1.01
+3.01	0.00	1.09
+3.18	-0.05	1.10
+3.30	-0.17	1.10
+3.54	-0.40	1.10
+3.80	-0.67	1.10
+4.98	-1.85	1.10

Unsicherheit:

$$I_A = (0.81 \pm 0.01 \text{ V.A.} + 1 \text{ digit})$$

$$\left. \begin{matrix} U_E \\ U_A - U_E \end{matrix} \right\} = (0.57 \pm 0.01 \text{ V.A.} + 1 \text{ digit}) \quad (\text{für } 20 \text{ mV und } 20 \text{ V geth})$$

IT 01.3.14
F. K.