

Physiklabor für Anfänger*innen
Ferienpraktikum im Wintersemester 2018/19

Versuch 64: Operationsverstärker

(durchgeführt am 01.04.2019 bei Pascal Wunderlin)

Marlene Heinrich, Yann Stoll

4. April 2019

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel des Versuchs	1
2	Versuchsaufbau und Durchführung	1
2.1	Messung des Frequenzgangs (linearer Verstärker)	1
2.2	Messung des Frequenzgangs (frequenzabhängiger Verstärker)	2
2.3	Integrator	2
2.4	Differentiator	2
2.5	Spannungsfolger	2
2.6	Sättigungsverhalten	3
3	Physikalische Zusammenhänge	3
4	Auswertung und Fehleranalyse	4
4.1	Messung des Frequenzgangs	4
4.2	Integrator	6
4.3	Differentiator	7
4.4	Spannungsfolger	8
4.5	Sättigungsverhalten	9
5	Diskussion der Ergebnisse	12
5.1	Messung des Frequenzgangs	12
5.2	Integrator	13
5.3	Differentiator	13
5.4	Spannungsfolger	13
5.5	Sättigungsverhalten	13

1 Ziel des Versuchs

In diesem Versuch werden die Funktion und die Eigenschaften des Operationsverstärkers untersucht. Desweiteren werden die unterschiedlichen Wirkungsweisen des OPV in unterschiedlichen Schaltungen betrachtet.

2 Versuchsaufbau und Durchführung

Der Versuch zum Operationsverstärker ist in unterschiedliche Versuchsteile gegliedert, welche im Folgenden einzeln beschrieben werden.

Zu Beginn des Versuchs wurde die Schaltung aus Abb. 1 aufgebaut und ein Nullabgleich durchgeführt. Hierzu wurden die beiden Eingänge des Operationsverstärkers über die Eingangswiderstände an Masse gelegt. Mit Hilfe des am Verstärker montierten Reglers wurde dann die Ausgangsspannung auf 0 V justiert.

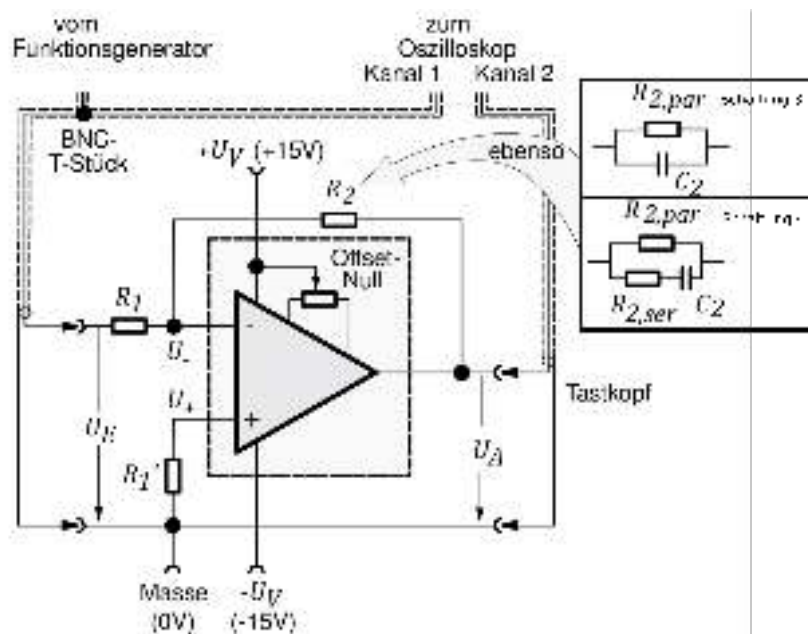


Abbildung 1: Schaltungsaufbau des invertierenden Verstärkers [Quelle 1]

2.1 Messung des Frequenzgangs (linearer Verstärker)

Zur Messung des Frequenzgangs eines linearen Verstärkers wurde, unter Verwendung der Schaltung aus Abb. 1, eine sinusförmige Eingangsspannung mit einer Peak-to-Peak-Spannung von 0,02 V angelegt, die Peak-to-Peak-Spannung wurde dabei am Frequenzgenerator abgelesen. Die Versorgungsspannung betrug $U_V = 15 \text{ V}$. Nun wurde für unterschiedliche Frequenzen ν die Ein- und Ausgangsspannung mit Hilfe eines Oszilloskops gemessen. Dies wurde jeweils für einen ohmschen Rückkopplungswiderstand von $R_2 = 47 \text{ k}\Omega$ und $R_2 = 470 \text{ k}\Omega$ durchgeführt, wobei die Widerstände $R_1 = R_1' = 4,7 \text{ k}\Omega$ entsprechen.

2.2 Messung des Frequenzgangs (frequenzabhängiger Verstärker)

Diese Messung erfolgt analog zur Vorhergegangenen, mit dem Unterschied, dass an Stelle des Rückkopplungswiderstands R_2 die, für Schaltung 3 relevante Impedanz (Siehe oben rechts in Abb. 1) mit $C_2 = 2,2 \text{ nF}$ und $R_{2,\text{par.}} = 470 \text{ k}\Omega$, eingesetzt wird. Der Vorgang wird mit der anderen Impedanz aus Abb. 1, mit $R_{2,\text{ser.}} = 47 \text{ k}\Omega$ für Schaltung 4 wiederholt.

2.3 Integrator

In diesem Versuchsteil wurde wieder Schaltung 3 (Siehe Abb. 1) verwendet. Es wurde für verschiedene Frequenzen eine Rechteckspannung am Funktionsgenerator erzeugt und als Eingangsspannung mit einer Peak-to-Peak-Spannung von $0,02 \text{ V}$ angelegt. Nun wurde besonders der Kurvenverlauf des Ausgangssignals für verschiedene Frequenzen beobachtet und dokumentiert. AnschlieSSend wurde dasselbe nochmal durchgeführt, mit dem Unterschied, dass an die Impedanz Z_2 noch ein Widerstand $R = 47 \text{ k}\Omega$ parallel geschaltet wurde. Es wurden auch die Amplituden der Ausgangsspannung gemessen.

2.4 Differentiator

Die Differentiatorschaltung erhält man, wenn nun R_1 durch einen Kondensator mit $C = 10 \text{ nF}$ ersetzt wird. Als Rückkopplungswiderstand wurde ein einzelner Widerstand $R = 4,7 \text{ k}\Omega$ eingebaut. Es wurden die Ausgangssignale für ein rechteck- und ein dreieckförmiges Eingangssignal beobachtet und dokumentiert.

2.5 Spannungsfolger

Die in diesem Versuchsteil zu verwendende Schaltung ist in Abb. 2 dargestellt.

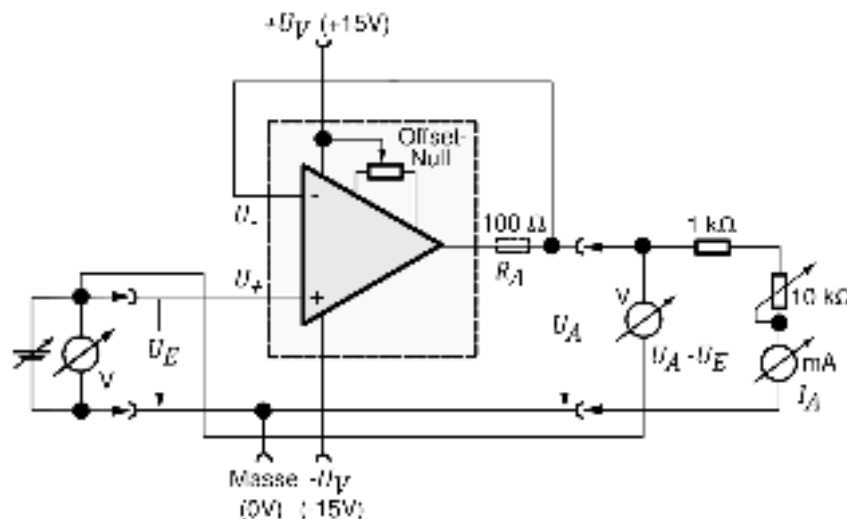


Abbildung 2: Schaltbild des Spannungsfolgers [Quelle 1]

Um die Kennlinie aufzunehmen wird eine regelbare Gleichspannungsquelle mit dem Eingang der Schaltung verbunden. Es wird die Ausgangsspannung für verschiedene Eingangsspannungen zwischen -15 V und 15 V gemessen. Um von dem negativen Messbereich in der positiven zu wechseln wird das Netzgerät umgepolt.

2.6 Sättigungsverhalten

Um das Sättigungsverhalten zu untersuchen, wurde der zusätzliche Widerstand $R_A = 100\ \Omega$ in die Schaltung eingebaut. Es wurde für 3 unterschiedliche Einstellungen des regelbaren Lastwiderstands die Sättigungsspannung für verschiedene Ausgangsströme gemessen.

3 Physikalische Zusammenhänge

Bei einem **invertierenden Operationsverstärker** berechnet sich die Verstärkung über

$$V = \frac{Z_{\text{ges}}}{R_1} \quad ,$$

wobei es sich bei Z um die Gesamtimpedanz zwischen Ausgang und negativem Eingang handelt. Für einen einfachen Widerstand ergibt sich also

$$V_R = \frac{R_2}{R_1} \quad ,$$

für Schaltungen aus Widerständen und Kondensator wird die Impedanz mit den bekannten Regeln berechnet.

Eine weitere Schaltungsmöglichkeit eines Operationsverstärkers ist der **Differentiator**. Dieser gibt als Ausgangssignal die, gegebenenfalls um einen Vorfaktor veränderte, Ableitung des Eingangssignals aus. Es lässt sich dann schreiben

$$U_A(t) = -R_2 \cdot C \cdot \frac{dU_E}{dt} \quad .$$

Der **Integrator** ist das Gegenstück zum Differentiator und gibt, ebenfalls um einen Vorfaktor verändert, das Integral des Eingangssignal aus. Für den Integrator schreibt man

$$U_A(t) = -\frac{1}{R_1 C} \int U_E(t) dt \quad .$$

Ein **Spannungsfolger** wird durch einen nicht-invertierenden Operationsverstärker mit Verstärkung 1 realisiert. Seine Ausgangsspannung folgt der Eingangsspannung, diese Schaltung dient also nicht zur Veränderung der Spannung, sondern wird zum Beispiel als Impedanzwandler eingesetzt.

4 Auswertung und Fehleranalyse

Im Folgenden werden die aufgenommenen Messdaten und Beobachtungen ausgewertet. Es ist darauf hinzuweisen, dass die in Abschnitt 4.2 und Abschnitt 4.3 dargestellten Oszilloskopbilder nicht zur Auswertung der Amplitude gedacht sind, da Ein- und Ausgangssignal unter Umständen unterschiedlichen Skalen unterliegen, sie dienen lediglich zur Anschauung der Signalform und sollen auch als solche behandelt werden.

4.1 Messung des Frequenzgangs

Die Messung des Frequenzgangs wurde für vier unterschiedliche Schaltungen nach der Schaltung aus Abb. 1 durchgeführt und die Verstärkung gegen die Frequenz aufgetragen. Die Verstärkung berechnet sich über

$$V = \frac{U_{\text{aus}}}{U_{\text{ein}}} \text{ mit}$$

$$s_V = \sqrt{\left(\frac{sU_{\text{aus}}}{U_{\text{ein}}}\right)^2 + \left(\frac{sU_{\text{ein}} \cdot U_{\text{aus}}}{U_{\text{ein}}^2}\right)^2} \quad .$$

Als Fehler auf Eingangs- und Ausgangsspannung wurde 2-digits gewählt und darauf geachtet, in welcher Grössenordnung gemessen wurde und der Fehler jeweils auf die Anzahl von Stellen angepasst und für alle Messpunkte in Volt ausgegeben. Die Verstärkung in Abhängigkeit von der Frequenz wurde dann für alle Schaltungen in einem Plot (Abb. 3) dargestellt.

Für Schaltung drei und vier wurde auSSerdem noch der theoretische Verlauf (in Abb. 3 ebenfalls eingezeichnet) berechnet. Allgemein ergibt sich die Verstärkung aus den gegebenen Werten über

$$V = \frac{Z_{\text{ges}}}{R_1} \quad .$$

Es gilt also die Gesamtimpedanz der Schaltung zu berechnen, um aus dieser die Verstärkung herzuleiten. Beim ersten Verlauf, also Schaltung 3, handelt es sich um eine einfache Parallelschaltung von Widerstand und Kondensator. Man rechnet also

$$\frac{1}{Z_3} = \frac{1}{R_2} + i\omega C$$

$$\Rightarrow V = \frac{1}{R_1} \frac{1}{\frac{1}{R_2} + i\omega C}$$

$$\Rightarrow |V_3| = \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega C R_2)^2}} \quad .$$

Der Betrag muss hier gebildet werden, da es sich bei Impedanzen um komplexe Grössen handelt, die Verstärkung aber reell ist.

Für Schaltung 4, also eine Kombination aus Reihen- und Parallelschaltung ist das Vorgehen analog. Man erhält

$$\frac{1}{Z_4} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_{\text{ser}} + \frac{1}{i\omega C}}$$

$$\Rightarrow |V_4| = \frac{1}{R_1} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_2} + \frac{R_{\text{ser}}}{R_{\text{ser}}^2 + \frac{1}{(\omega C)^2}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega C R_{\text{ser}}^2 + \frac{1}{\omega C}}\right)^2}} \quad .$$

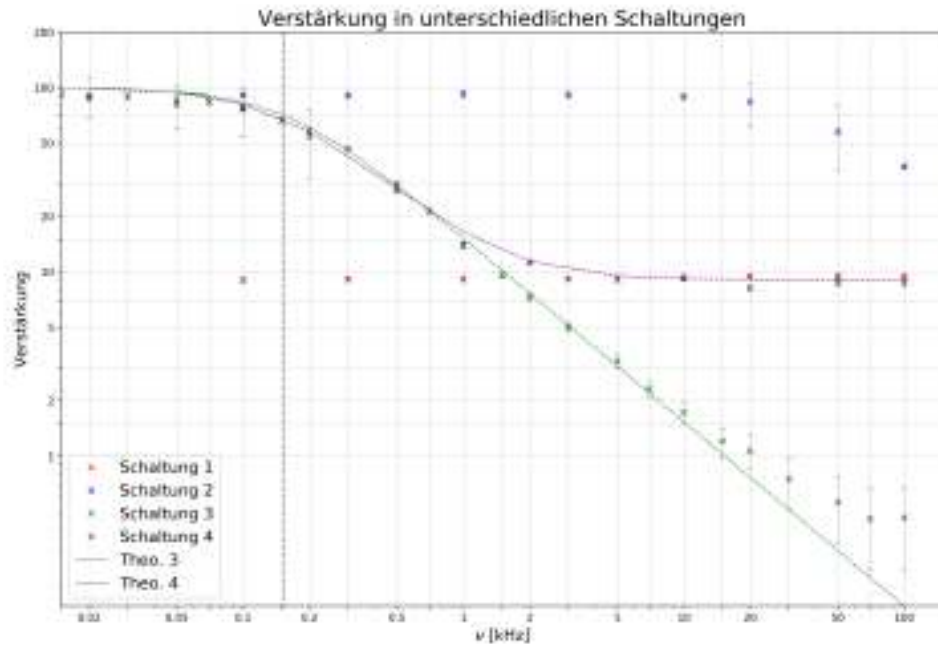


Abbildung 3: Verstärkung in Abhängigkeit von der Frequenz. Schaltung 1 mit $R_2 = 47 \text{ k}\Omega$, Schaltung 2 mit $R_2 = 470 \text{ k}\Omega$, Schaltung 3 mit $R_2 = 470 \text{ k}\Omega$ parallel zu $C = 2,2 \text{ nF}$ und Schaltung 4 mit $R_2 = 470 \text{ k}\Omega$ parallel zu $C = 2,2 \text{ nF}$ und $R_{\text{ser}} = 47 \text{ k}\Omega$. Die theoretischen Verläufe sind grün und lila gestrichelt eingezeichnet. In grau gestrichelt ist die theoretische Grenzfrequenz für Schaltung 3 markiert. Zur näheren Analyse groSS im Anhang zu finden.

AuSSerdem wurde für Schaltung 3 noch die Grenzfrequenz ν_{grenz} berechnet. Dafür nutzt man

$$\nu_{\text{grenz}} = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{2\pi CR_2} \quad .$$

Man erhält für Grenzfrequenz und Zeitkonstante

$$\tau_3 = 1,034 \text{ ms}$$

$$\nu_3 = 154 \text{ Hz} \quad .$$

Die Grenzfrequenz wurde ebenfalls in Abb. 3 gekennzeichnet.

Des Weiteren wurde für Schaltung 3 noch die Rückkopplungsimpedanz für die Grenzfälle $\nu \gg \nu_{\text{grenz}}$ und $\nu \ll \nu_{\text{grenz}}$ bestimmt:

$$\nu \gg \nu_{\text{grenz}} \implies Z_3 \rightarrow 0 \implies |V_3| \rightarrow 0$$

$$\nu \ll \nu_{\text{grenz}} \implies Z_3 \rightarrow R_2 \implies |V_3| \rightarrow \frac{R_2}{R_1} \quad .$$

4.2 Integrator

Zur qualitativen Untersuchung der Integratorschaltung wurde die Form, sowie die Amplitude des Ausgangssignals gemessen bzw. dokumentiert. Sowohl für die Parallelschaltung aus einem Kondensator $C = 2,2\text{ nF}$ und einem Widerstand $R = 470\text{ k}\Omega$ als Rückkopplungswiderstand, als auch für die Schaltung mit dem, zusätzlich dazu parallelgeschalteten Widerstand $R = 47\text{ k}\Omega$, veränderte sich die Form des Ausgangssignals nach dem in Abb. 4 dargestellten Schema.

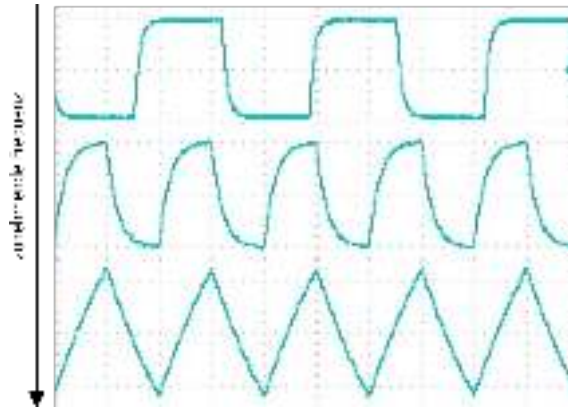


Abbildung 4: Verlauf der Ausgangsspannung für zunehmende Frequenzen, die Verläufe wurden während des Versuchs mit dem Oszilloskop aufgenommen

Zunächst weist das Ausgangssignal den, für die Kondensatorladung typischen, Verlauf auf, es ist jedoch deutlich zu erkennen, dass die Form des Ausgangssignal für ausreichend große Frequenzen gegen die erwartete Dreiecksfunktion geht. Ein weiteres Indiz für die erfolgreiche Integration des Eingangssignals ist die Lage signifikanter Stellen. Wie in Abb. 5 zu sehen, liegen die Extrema des Ausgangssignals auf den Nullstellen des Eingangssignals. Eine weitere Übereinstimmung mit der Theorie ist das umgekehrte Vorzeichen des Integrals im Ausgangssignal, was sich mit unserer Messung (Siehe Abb. 5) deckt.

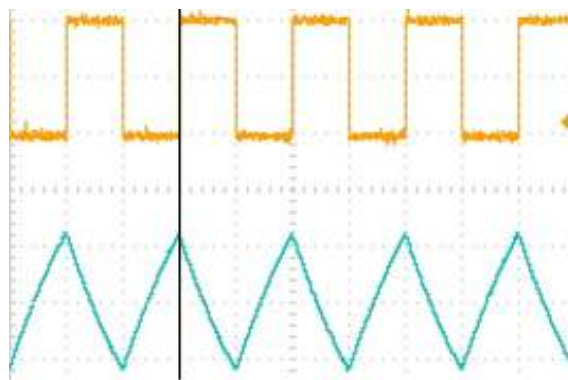


Abbildung 5: Signifikante Stellen von Aus- und Eingangssignal, rechteckige Eingangsspannung in orange und dreieckige Ausgangsspannung in blau

Der Übergang zur Dreiecksfunktion geschieht für die beiden Schaltungen jedoch unterschiedlich schnell. Während die erste Schaltung bereits bei $\nu = 1\text{ kHz}$ zu einem dreieckigen Ausgangssignal führt, ist das Ausgangssignal bei der Schaltung mit dem zusätzlichen Widerstand erst bei $\nu = 10\text{ kHz}$ wirklich dreieckig.

4.3 Differentiator

In diesem Versuchsteil wurde mit Hilfe eines Kondensators $C = 10 \text{ nF}$ an Stelle des Widerstands R_1 und einem $R = 4,7 \text{ k}\Omega$ Widerstand als Rückkopplungswiderstand eine Differentiatorschaltung aufgebaut. Um die Wirkungsweise der Schaltung qualitativ zu untersuchen, wurde zunächst eine Rechteckspannung angeschlossen. Das Eingangssignal (orange) und das beobachtete Ausgangssignal (blau) sind in Abb. 6 dargestellt.

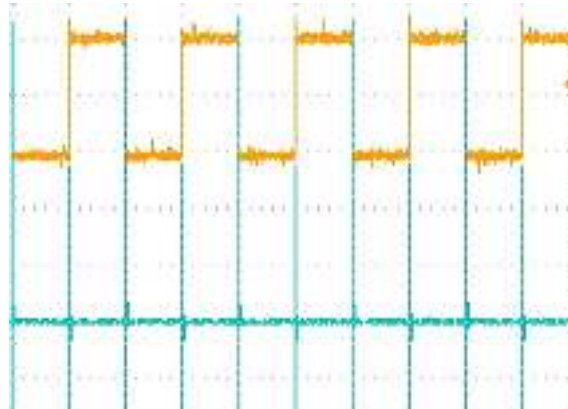


Abbildung 6: Ein- und Ausgangssignal bei der Differentiatorschaltung, Rechteckspannung am Eingang (orange) und differentierte Spannung mit Peaks als Ausgangssignal (blau)

Die Signale aus Abb. 6 lassen vermuten, dass der Differentiator, wie erwartet, die zeitliche Ableitung des Eingangssignal als Ausgangssignal liefert. Es sind an den Wendestellen der Rechteckspannung scharfe Peaks in der Ausgangsspannung zu sehen, welche jedoch nicht, wie theoretisch zu erwarten wäre, unendlich hoch sind. Ein leichter zu differenzierendes Signal ist das Dreieckssignal, denn das Ausgangssignal sollte dann einem Rechteckverlauf folgen. Die Beobachtung beim Anlegen einer Dreiecksspannung ist in Abb. 7 zu sehen und entspricht den Erwartungen.

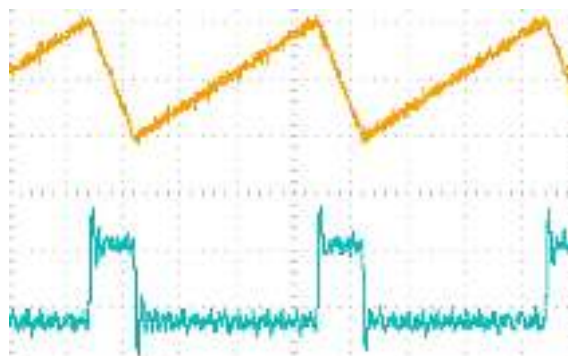


Abbildung 7: Spannungsverläufe bei der Differentiatorschaltung, dreieckiges Eingangssignal (orange) und differentiertes Signal am Ausgang (blau)

Analog zur Integratorschaltung wird auch hier das Vorzeichen der Ableitung des Ausgangssignal umgedreht, was mit der Messung in Abb. 7 übereinstimmt.

4.4 Spannungsfolger

Mit Abb. 2 wurden Eingangsspannung und die Differenz von Eingangs- und Ausgangsspannung eines Spannungsfolgers gemessen. Die Ausgangsspannung erhält man also durch

$$U_a = U_{ae} + U_e \text{ mit } s_{U_a} = \sqrt{s_{U_{ae}}^2 + s_{U_e}^2} \quad .$$

Es wurden beide Äste der Kennlinie, also für positive und negative Spannungen gemessen, aber vergessen das Multimeter umzudrehen, daher mussten für den negativen Ast die Vorzeichen geändert werden. Die Ausgangsspannungen wurden dann gegen die Eingangsspannungen aufgetragen und das Beginn der Plateaus ist in Abb. 8 markiert. Die Kennlinie zwischen den Plateaus zeigt einen, den Erwartungen entsprechenden, linearen Verlauf.

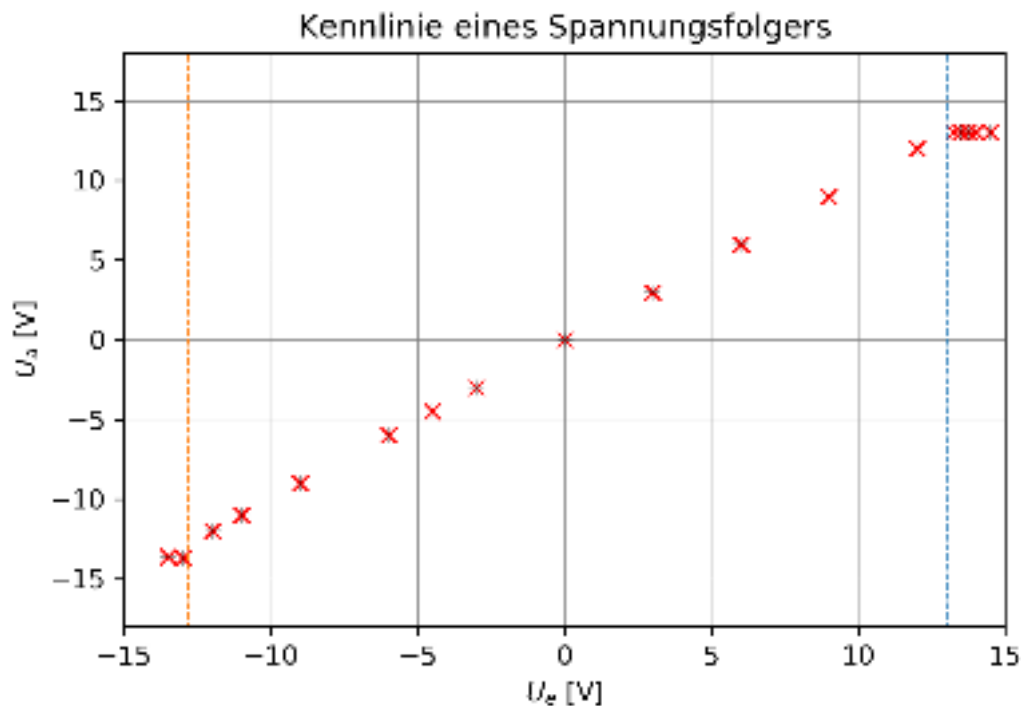


Abbildung 8: Verhalten von Ausgangs- und Eingangsspannung bei einem Spannungsfolger. Die Sättigungsbereiche sind durch zwei gestrichelte Linien abgegrenzt. Ebenfall groSS im Anhang zu finden.

4.5 Sättigungsverhalten

Im letzten Teil des Versuchs wurde, ebenfalls mit der Schaltung des Spannungsfolgers nach Abb. 2, die Eingangsspannung und die Eingangs- Ausgangsdifferenz für vier unterschiedliche Werte des verstellbaren Widerstands gemessen. Für alle Messreihen wurde jeweils die Ausgangsspannung aus den Daten berechnet und gegen die Eingangsspannung aufgetragen.

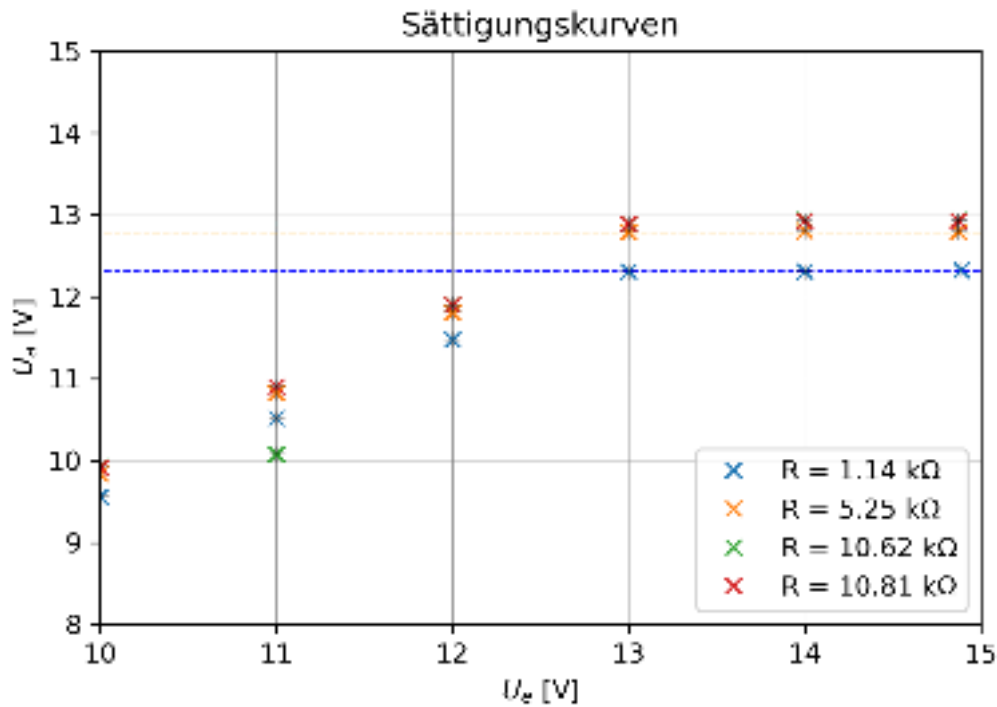


Abbildung 9: Ausgangsspannung als Funktion der Eingangsspannung. Die Sättigungsspannungen sind durch gestrichelte Linien markiert. Vergrößert im Anhang

Der Plot in Abb. 9 wurde graphisch ausgewertet und der Anfang des Plateaus ermittelt. Die zugehörigen Sättigungsspannungen, wurden, um einen möglichst genauen Wert zu erhalten, den Messdaten entnommen. Die, so ermittelten und graphisch bestätigten Sättigungsspannungen wurden nun für jeden Widerstand einzeln gegen den, im Versuch gemessenen, dazugehörigen Ausgangsstrom I_A aufgetragen. Dabei entsteht in Abb. 10 nur ein Messpunkt für $R = 10,81 \Omega$ und $R = 10,62 \Omega$, da die Daten zu nah aneinander liegen und im Sättigungsbereich die selben Werte liefern (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Ermittelte Sättigungsspannungen und Ströme für unterschiedlich eingestellte Regelwiderstände R . Die Werte wurden den Grafiken Abb. 9 und Abb. 8 entnommen.

R [k Ω]	U_S [V]	I_S [mA]
0	$13,043 \pm 0,003$	0
1.14	$12,310 \pm 0,003$	5.65 ± 0.02
5.25	$12,794 \pm 0,003$	2.06 ± 0.02
10.62 und 10.81	$12,890 \pm 0,003$	1.10 ± 0.02

Für den Fehler auf die Spannung wurde der, bereits in Abschnitt 4.4 berechnete Fehler auf die Ausgangsspannung verwendet, der Fehler auf den Strom ergibt sich aus dem geschätzten digit-Fehler.

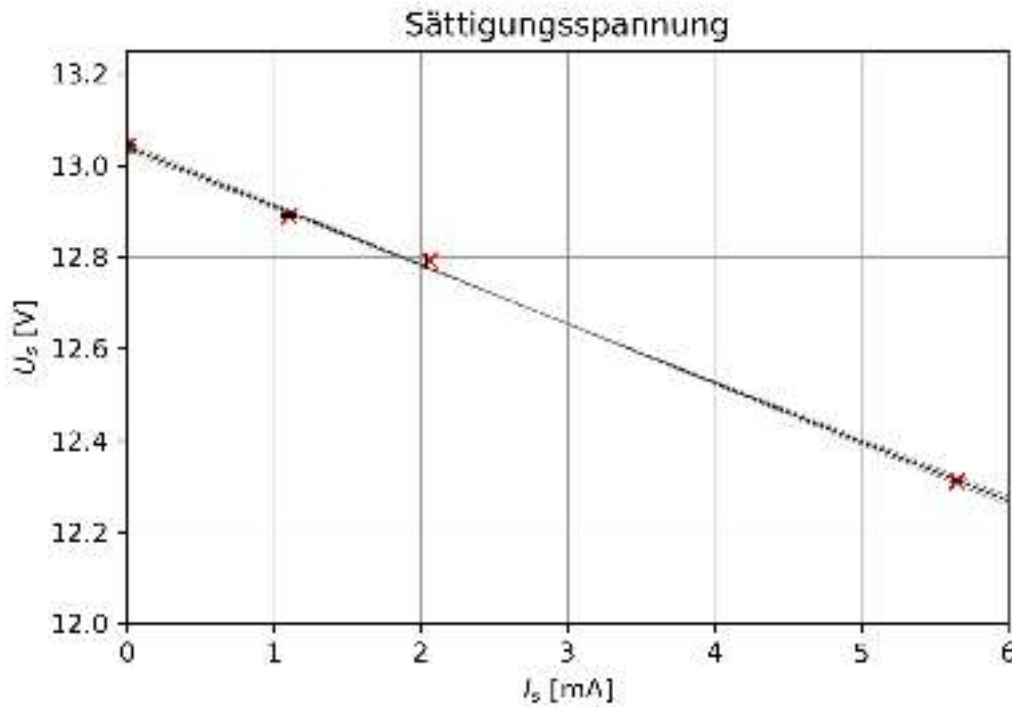


Abbildung 10: Sättigungsspannung als Funktion des Ausgangsstroms, es wurde eine analytische lineare Regression zu Bestimmung der Steigung durchgeführt. Die lineare Ausgleichsgerade ist durchgezogen, die Fehlergeraden gestrichelt dargestellt. Vergrößert im Anhang

In Abb. 10 und auch in Tabelle 1 ist ein Messpunkt dargestellt, der nicht aus der Auswertung von Abb. 9 folgt, dieser wurde aus der Messreihe zur "Kennlinie eines Spannungsfolgers" entnommen. Es handelt sich bei dem Messpunkt um die Ausgangsspannung im Plateau, daher die Sättigungsspannung, aufgetragen gegen einen Ausgangsstrom von 0 A.

Mit den Daten aus Abb. 10 wurde eine lineare Regression durchgeführt, um die Steigung zu bestimmen, die dem negativen des dynamischen Ausgangswiderstands r_{A0} entspricht. Die lineare Regression wurde in Python mit

$$a = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$b = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

für $y = a + bx$

durchgeführt und die Fehler mit

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)]^2}$$
$$s_a = s \cdot \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}}$$
$$s_b = s \cdot \sqrt{\frac{n}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}}$$

bestimmt.

Man erhält für die Steigung der linearen Ausgleichsgerade

$$b = -0.128(-0,129 \pm 0,003) \frac{\text{V}}{\text{mA}} = (-129 \pm 3) \frac{\text{V}}{\text{A}}$$
$$\Rightarrow r_{A0} = (129 \pm 3) \Omega \quad ,$$

wobei der Fehler für r_{A0} direkt aus der linearen Regression übernommen wurde.

5 Diskussion der Ergebnisse

5.1 Messung des Frequenzgangs

Alle Ergebnisse der Messung des Frequenzgangs für die Schaltungen 1 bis 4 sind in Abb. 3, welche auch vergrößert im Anhang einzusehen ist, dargestellt.

Betrachtet man die Verläufe für Schaltung 1 & 2 so fällt auf, dass die Verstärkung V für Schaltung 1 bei ca. 9 und für Schaltung 2 bei ca. 90 liegt. Dieser Befund deckt sich bis auf eine, vermutlich systematische Abweichung relativ gut mit den theoretischen Werten von $V_1 = 10$ und $V_2 = 100$. Außerdem lässt sich feststellen, dass für Schaltung 2 die Verstärkung wie erwartet für hohe Frequenzen zusammenbricht.

Die selben Schlüsse bezüglich der systematischen Abweichung lassen sich aus den Ergebnissen für Schaltung 3 & 4 ziehen, betrachtet man die Plateaus für kleine Frequenzen, so liegen alle Messpunkte unterhalb der theoretischen Verläufe. Es ist jedoch gut zu sehen, dass die Messungen sich trotz der Abweichung gut mit den theoretischen Verläufen decken.

Auch die Übereinstimmung der Verläufe für Schaltung 3 und 4 mit dem von Schaltung 2 entspricht für kleine Frequenzen den Erwartungen, da die Impedanz des Kondensators für kleine Frequenzen nahezu nicht mehr beiträgt. Bildet man außerdem den Limes $\omega \rightarrow \infty$ für die Verstärkung V_4 (Formel in Abschnitt 4.1) der Schaltung 4 so erhält man

$$V_4 \rightarrow \frac{R_2 R_{\text{ser}}}{R_1 (R_{\text{ser}} + R_2)} = 9.1 \quad ,$$

was sich mit dem experimentellen Befund deckt.

Diese Beobachtungen legen die Richtigkeit der theoretischen Grundlagen nahe.

Betrachtet man den Verlauf für Schaltung 3, so sieht man, dass sich die Messung für große Frequenzen scheinbar einem Plateau annähert und sich somit vom theoretischen Verlauf entfernt. Dies könnte mit der nicht Berücksichtigung der Leitungswiderstände erklärbar sein. Aber auch eine inhärente Eigenschaft des OPV-Bauteils könnte der Grund für diese Abweichung sein.

In Abb. 3 ist außerdem die Grenzfrequenz für Schaltung 3 von

$$\nu_{\text{grenz}} = 154 \text{ Hz} \quad ,$$

welche wir aus dem Wert

$$\tau_3 = 1,034 \text{ ms}$$

berechnet haben, eingezeichnet. Wie zu erwarten war, liegt diese relativ genau auf dem Punkt, an dem der Verlauf von Schaltung 3 nach unten abknickt und nicht weiter dem Verlauf von Schaltung 2 entspricht.

5.2 Integrator

In der qualitativen Auswertung der Beobachtungen beim Integrator sind folgende Gesetzmäßigkeiten beobachtet worden:

Die Form des Ausgangssignal ist von der Frequenz abhängig, was mit den Lade- und Entladevorgängen des Kondensators begründet werden kann.

Ist die Frequenz des Eingangssignal hoch genug so stellt sich der erwartete Verlauf des Ausgangssignals ein.

Was auSSerdem zu beobachten war, ist dass das Vorzeichen des Integrals der Eingangsfrequenz umgedreht ist, was mit der theoretischen Vorhersage übereinstimmt. AuSSerdem ist festzustellen, dass das Einsetzen des erwarteten Verlaufs mit einem geringeren Widerstand später stattfindet.

5.3 Differentiator

In der Auswertung zum Differentiator stellten wir fest, dass das Ausgangssignal der negativen Ableitung der Eingangsfrequenz entspricht, was sich mit der theoretischen Voraussage deckt.

Die Rechteckfunktion konnte nicht genau differenziert werden, was allerdings auch nicht wirklich überraschend ist. Die Differenzierung der Dreiecksfunktion gelang allerdings wie erwartet.

5.4 Spannungsfolger

In der Auswertung zum Spannungsfolger wurden die Ausgangsspannungen gegen die Eingangsspannungen aufgetragen. Es war festzustellen, dass zwischen den Grenzbereichen ein linearer Verlauf entsteht, was sich mit den Erwartungen aus den theoretischen Grundlagen deckt. AuSSerdem ist im positiven Bereich eine Sättigung deutlich zu beobachten und auch im negativen Bereich lässt sich ein Plateau erahnen, an dieser Stelle würden mehr Messdaten eine eindeutigere Aussage liefern.

5.5 Sättigungsverhalten

Aus einer Auftragung der Ausgangsspannungen gegen die Eingangsspannungen wurde die Sättigungsspannung für unterschiedliche Widerstände bestimmt. Man erhält folgende Werte für die Sättigung:

Tabelle 2: Ermittelte Sättigungsspannungen und Ströme

R [k Ω]	U_S [V]	I_S [mA]
0	$13,043 \pm 0,003$	0
1.14	$12,310 \pm 0,003$	5.65 ± 0.02
5.25	$12,794 \pm 0,003$	2.06 ± 0.02
10.62 und 10.81	$12,890 \pm 0,003$	1.10 ± 0.02

Die Sättigungsspannungen wurden gegen den dazugehörigen Strom aufgetragen und es wurde mit Hilfe einer Linearen Regression der dynamische Ausgangswiderstand

$$r_{A0} = (129 \pm 3) \Omega$$

bestimmt. Zu beachten ist an dieser Stelle allerdings, dass der geringe Fehler nicht aus unglaublich genauen Messungen, sondern einer linearen Regression durch vier Messpunkte stammt. Die vier genutzten Messpunkte hatten also einen ziemlich linearen Verlauf, um eine wirkliche Aussage über den Zusammenhang treffen zu können müsste man allerdings weitere Messungen durchführen.

Abbildungsverzeichnis

1	Schaltungsaufbau des invertierenden Verstärkers [Quelle 1]	1
2	Schaltbild des Spannungsfolgers [Quelle 1]	2
3	Verstärkung in Abhängigkeit von der Frequenz	5
4	Verlauf der Ausgangsspannung für zunehmende Frequenzen	6
5	Signifikante Stellen von Aus- und Eingangssignal	6
6	Ein- und Ausgangssignal bei der Differentiatorschaltung	7
7	Spannungsverläufe bei der Differentiatorschaltung	7
8	Verhalten von Ausgangs- und Eingangsspannung bei einem Spannungsfolger	8
9	Ausgangsspannung als Funktion der Eingangsspannung	9
10	Sättigungsspannung als Funktion des Ausgangsstroms	10

Tabellenverzeichnis

1	Ermittelte Sättigungsspannungen und Ströme	9
---	--	---

Literatur

[Quelle 1] *"Versuchsanleitungen zum Physiklabor für Anfänger*innen, Teil 2"* Stand 02/2019.

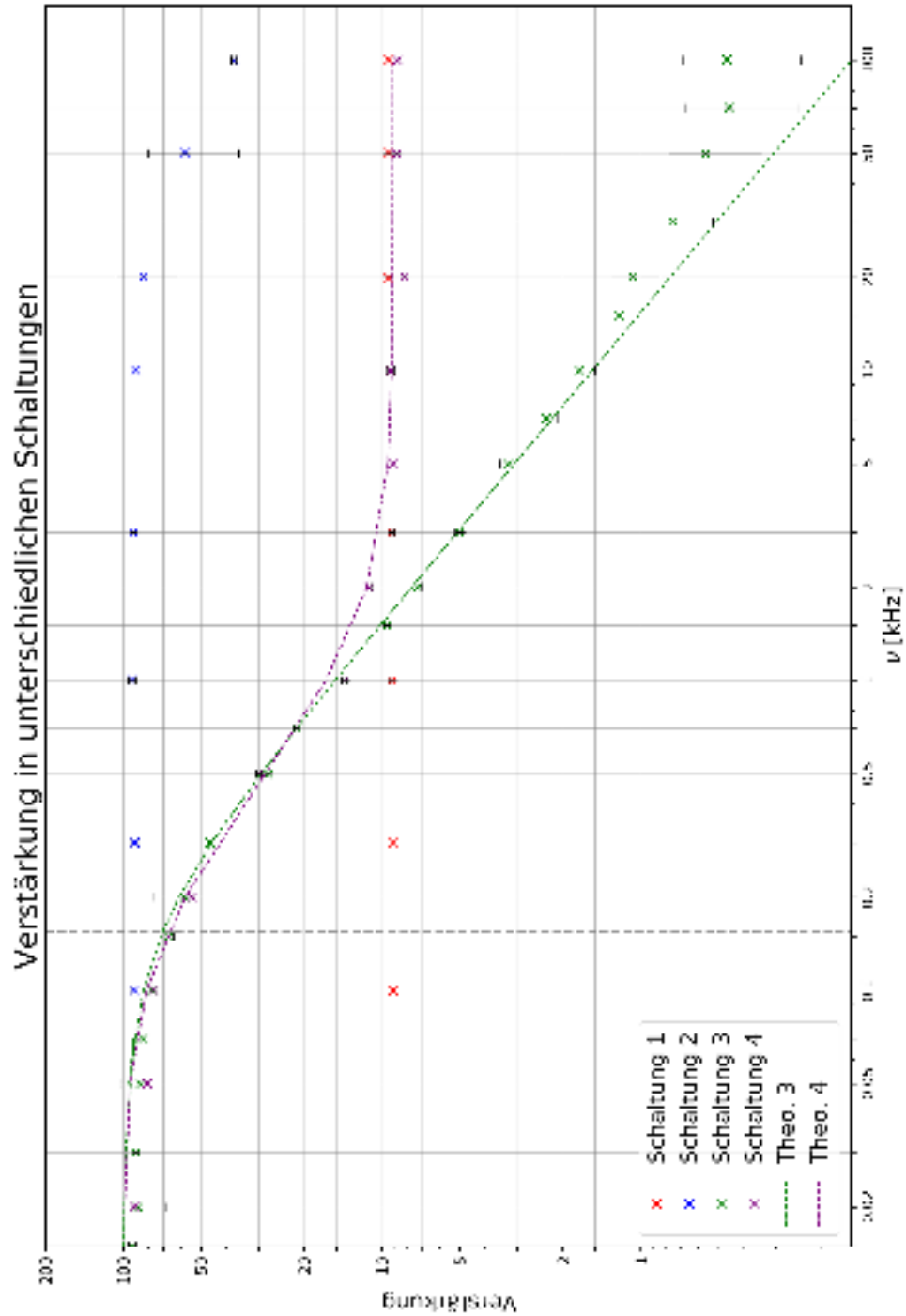


Abbildung 11: Verstärkung in Abhängigkeit von der Frequenz. Schaltung 1 mit $R_2 = 47 \text{ k}\Omega$, Schaltung 2 mit $R_2 = 470 \text{ k}\Omega$, Schaltung 3 mit $R_2 = 470 \text{ k}\Omega$ parallel zu $C = 2,2 \text{ nF}$ und Schaltung 4 mit $R_2 = 470 \text{ k}\Omega$ parallel zu $C = 2,2 \text{ nF}$ und $R_{\text{ser}} = 47 \text{ k}\Omega$. In grau gestrichelt ist die theoretische Grenzfrequenz Impedanz Schaltung 3 markiert.

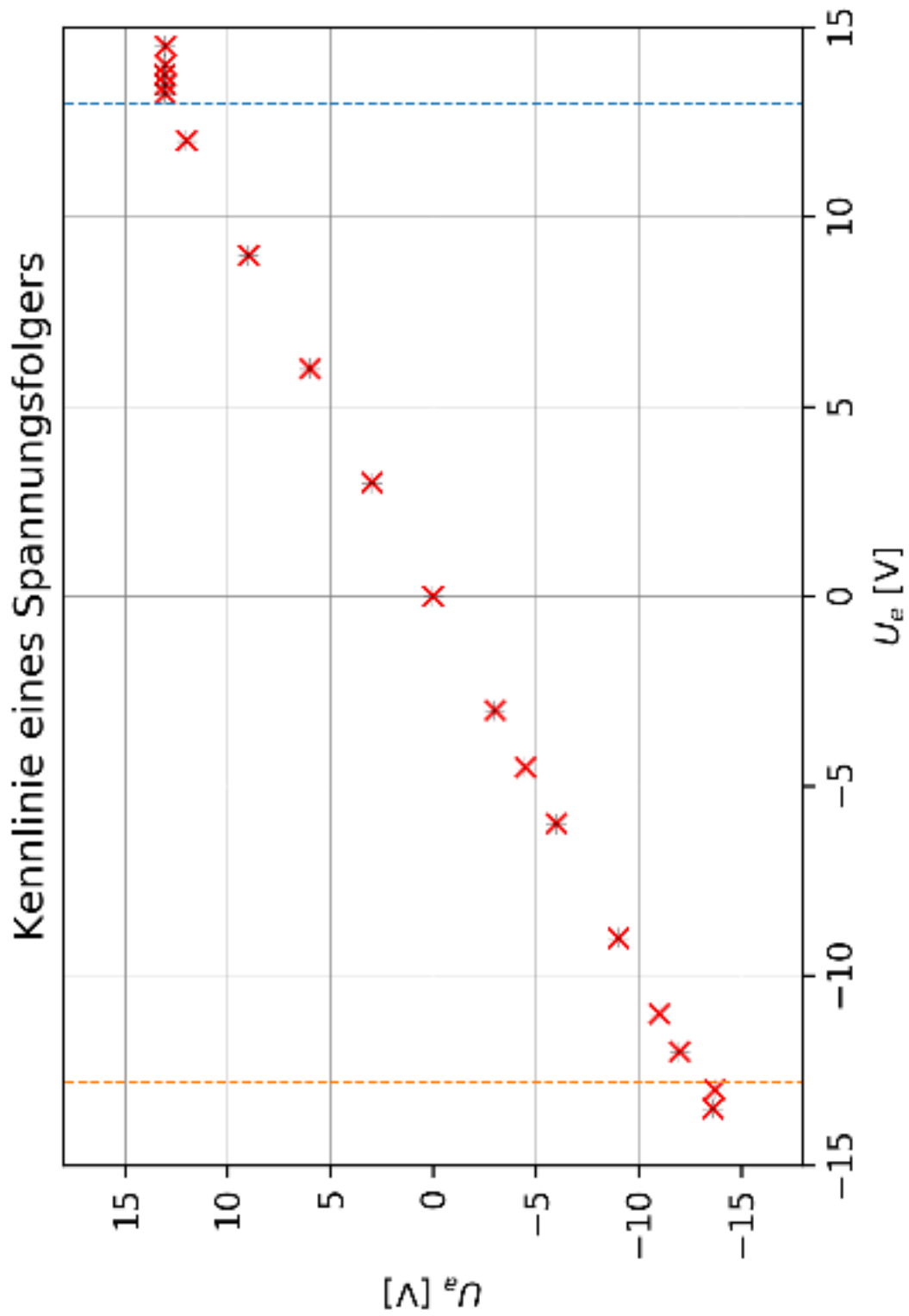


Abbildung 12: Verhalten von Ausgangs- und Eingangsspannung bei einem Spannungsfolger

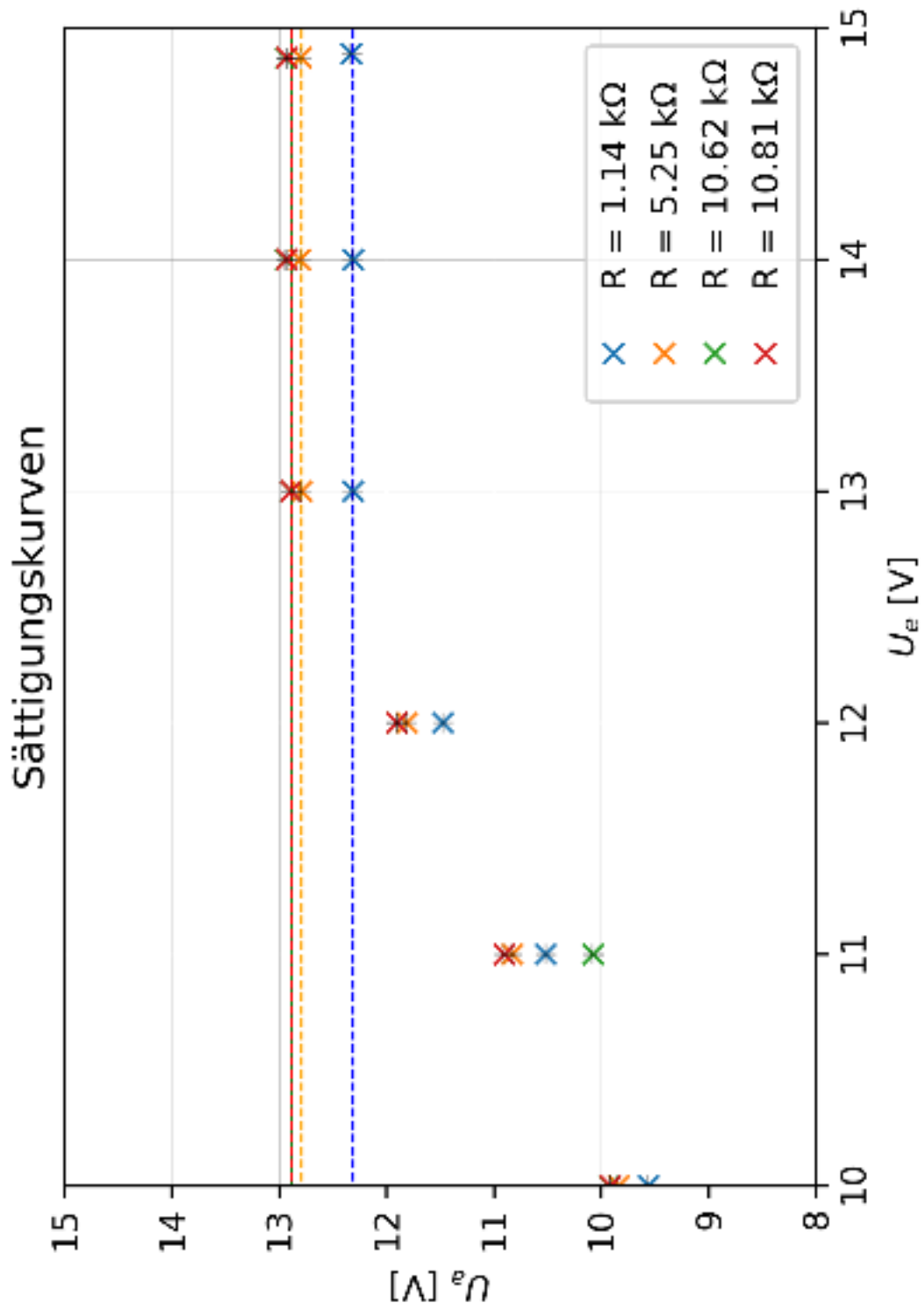


Abbildung 13: Ausgangsspannung als Funktion der Eingangsspannung

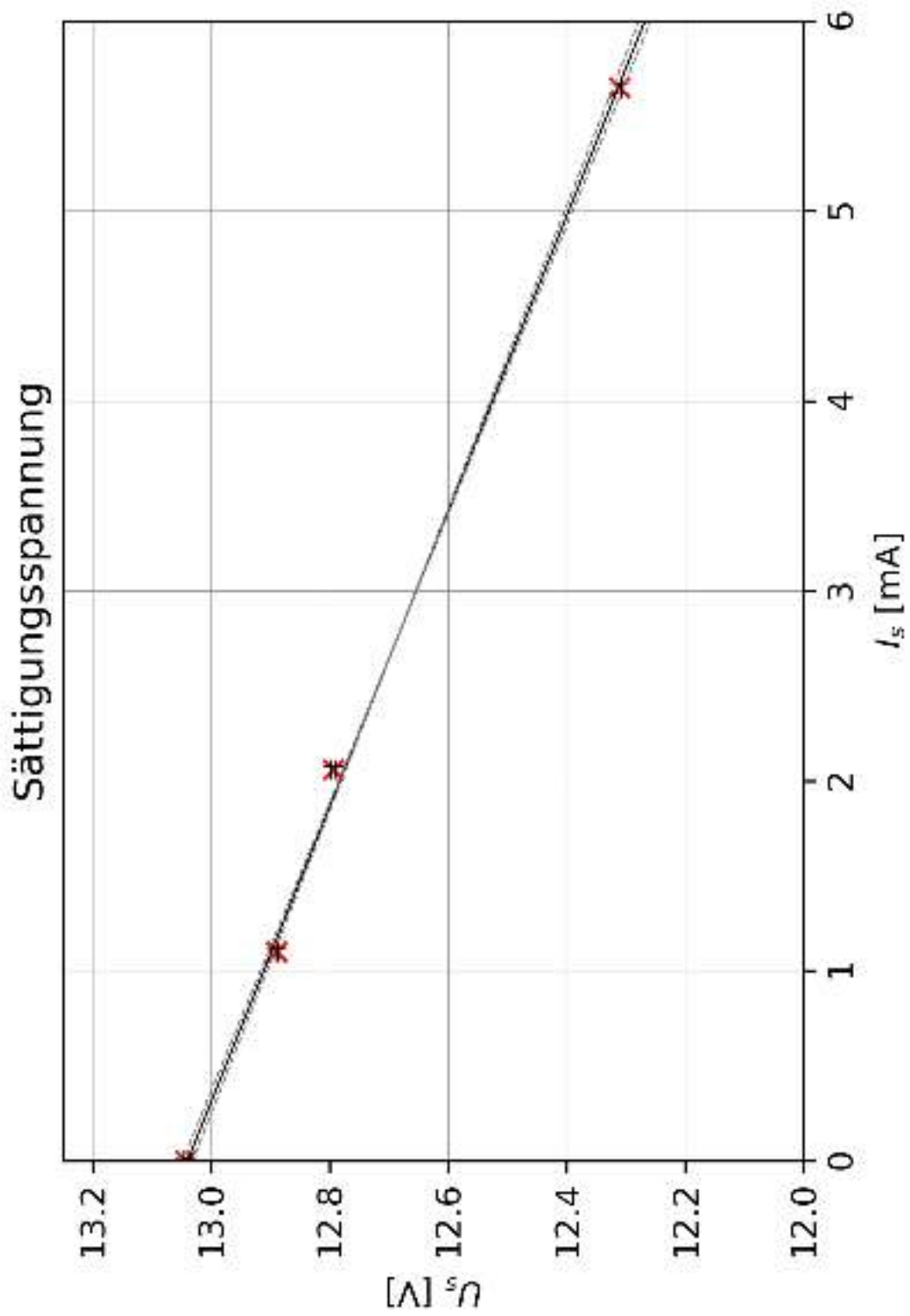


Abbildung 14: Sättigungsspannung als Funktion des Ausgangsstroms