

V303

## **Der Lock-In-Verstärker**

Sonia Chander

sonia.chander@tu-dortmund.de

Jana Schlücking

jana.schluecking@tu-dortmund.de

Durchführung: 25.05.2021

Abgabe: 01.06.2021

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

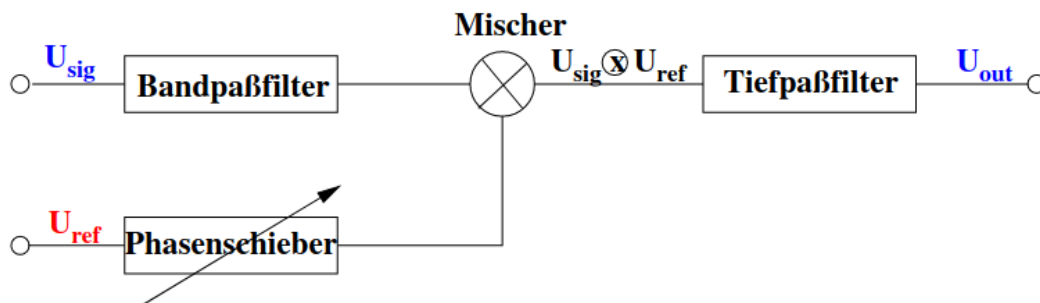
<b>1 Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
<b>3 Durchführung</b>	<b>5</b>
3.1 Messung ohne Rauschen . . . . .	5
3.2 Messung mit Rauschen . . . . .	6
3.3 Messung mit einer Photodiode . . . . .	6
<b>4 Auswertung</b>	<b>7</b>
4.1 Verifizierung der Funktionsweise eines Lock-In-Verstärkers . . . . .	7
4.2 Messung mit einer Photodiode . . . . .	12
<b>5 Diskussion</b>	<b>14</b>
<b>6 Anhang</b>	<b>14</b>
<b>Literatur</b>	<b>16</b>

## 1 Zielsetzung

In diesem Versuch wird die Funktionsweise des Lock-In-Verstärkers genauer betrachtet, welcher hilft stark verrauschte Signale zu messen. Dazu wird für unterschiedliche Phasenverschiebung zwischen Referenzspannung und Signalspannung die resultierende Spannung gemessen und aufgetragen, einmal für eine reine Sinusspannung und einmal für eine verrauschte Sinusspannung. Abschließend wird noch eine Leucht-Diode an den Lock-In Verstärker angeschlossen und auch die ausgehende Spannung gemessen.

## 2 Theorie

Der Lock-In-Verstärker ist ein Gerät, welches aus mehreren elektrischen Bauteilen besteht. Dieser wird genutzt, um Signale aus detektierten Daten mit viel Rauschen zu filtern und zu verstärken.



**Abbildung 1:** Der grobe schematische Aufbau eines Lock-In-Verstärkers.

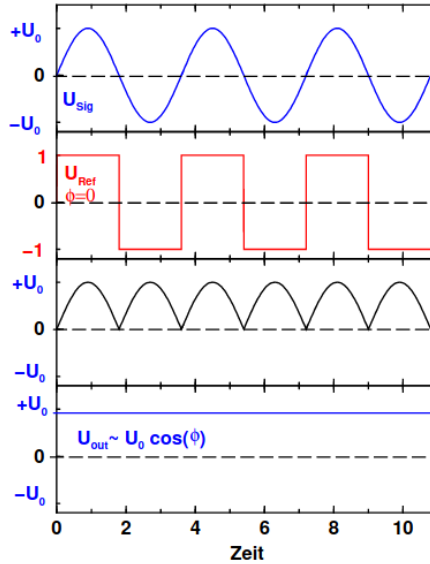
In der Abbildung 1 ist die grobe Funktionsweise eines Lock-In-Verstärkers zu sehen. Die Signalspannung wird zuerst durch einen Bandpass von Rauschanteilen höherer ( $\omega \gg \omega_{\text{ref}}$ ) und niedriger Frequenzen ( $\omega \ll \omega_{\text{ref}}$ ) bereinigt. Anschließend wird diese Spannung in einem Mischer mit einer Referenzspannung verstellbarer Phase multipliziert. Die Phasenlage der Referenzspannung ist mit dem Phasenschieber einstellbar. Dann wird das Mischsignal aus Signal- und Referenzspannung durch einen Tiefpass geschickt. Dort wird dieses Mischsignal über mehrere Perioden der Modulationsfrequenz integriert. Die Rauschbeiträge, die nicht synchron zur Modulationsfrequenz sind, werden so zum Großteil herausgemittelt. Die Spannung am Ausgang ist eine Gleichspannung, welche proportional zur Eingangsspannung und zum Kosinus der Phasenverschiebung zwischen Signal- und Referenzspannung ist.

$$U_{\text{out}} \propto U_0 \cdot \cos(\phi)$$

Im Gegensatz zu einem Bandpass, welcher Güten von  $Q = 1000$  erreicht, kann ein Lock-In-Verstärker Güten von  $Q = 100\,000$  erreichen. Dies liegt an dem Tiefpass, da bei einer großen Zeitkonstante  $\tau = RC$  die Bandbreite des Rauschens  $\Delta\nu = \frac{1}{\pi RC}$  beliebig klein gewählt werden kann.

Bei der Betrachtung einer sinusförmigen Signalspannung wird das Vorgehen nun einmal erläutert.

$$U_{\text{sig}} = U_0 \cdot \sin(\omega t)$$



**Abbildung 2:** Die Signalverläufe der verschiedenen Spannungen.[1]

In der Abbildung 2 ist oben die sinusförmige Signalspannung geplottet. Darunter befindet sich die Referenzspannung  $U_{\text{ref}}$ , welche in diesem Fall eine Rechteckspannung ist, jedoch hat sie die gleiche Frequenz wie die Signalspannung. Die dritte Kurve von oben zeigt das Produkt aus Signal- und Referenzspannung, welches im Mischer erzeugt wird. Die letzte aufgetragene Spannung ist die am Ausgang gemessene, welche wie erwartet eine Gleichspannung zeigt.

Die Rechteckspannung wird durch eine Fourierreihe angenähert. Diese setzt sich aus den ungeraden harmonischen Termen der Grundfrequenz zusammen.

$$U_{\text{ref}} = \frac{4}{\pi} \left( \sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \dots \right)$$

Dann berechnet sich das Produkt aus Signal- und Referenzspannung zu:

$$U_{\text{sig}} \times U_{\text{ref}} = \frac{2}{\pi} U_0 \left( 1 - \frac{2}{3} \cos(2\omega t) - \frac{2}{15} \cos(4\omega t) - \frac{2}{35} \cos(6\omega t) + \dots \right)$$

Dieses Produkt besteht aus den geraden Oberwellen der Grundfrequenz  $\omega$ . Mit dem Tiefpass werden diese Oberwellen dann unterdrückt, sodass eine Gleichspannung

$$U_{\text{out}} = \frac{2}{\pi} U_0, \quad (1)$$

die proportional zur Signalspannung ist, herauskommt. In diesem Fall ist  $\phi = 0$ , welches auch der Fall der maximalen Ausgangsspannung ist, jedoch gilt im Allgemeinen:

$$U_{\text{out}} = \frac{2}{\pi} \cos(\phi). \quad (2)$$

### 3 Durchführung

Für die Messungen steht ein Lock-In-Verstärker wie in Abbildung 3 zur Verfügung. Hier sind zur einzelnen Bedienung aller der Komponenten integriert. Oben ist ein Vorverstärker, ein Filter, der als Band-, Hoch- oder Tiefpass benutzt werden kann, und ein Amplituden-/Lock-In-Detektor eingebaut. In der unteren Hälfte ist links ein Noise-Generator, der zur Erzeugung des Rauschens dient, zu finden. Daneben gibt es einen Generator, die Phasenverschiebung und noch einen expliziten Tiefpass.

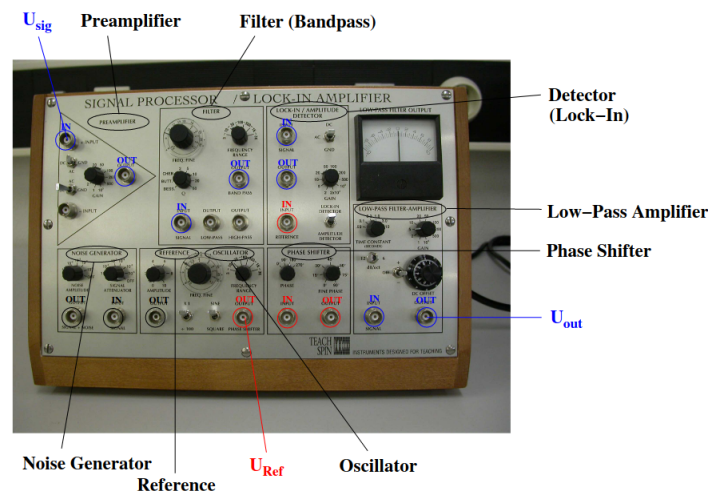


Abbildung 3: Der Lock-In-Verstärker. [1]

#### 3.1 Messung ohne Rauschen

Der Lock-In-Verstärker nach der Schaltung in Abbildung 4 wird aufgebaut, wobei der Noise-Generator überbrückt wird. Im Generator werden zwei Sinusspannungen mit einer Frequenz von ca 1 kHz und 10 mV erzeugt. Die Signalfrequenz wird durch den Vorverstärker in den Filter, welcher hier als Bandpass funktioniert, geleitet und schließlich in den Detektor geschickt. Die Referenzspannung geht über den Phasenschieber auch in den Detektor. Der Output aus dem Detektor wird über den Tiefpass geleitet und schließlich auf dem Oszilloskop aufgetragen.

Nun wird die Phase der Referenzspannung variiert und für verschiedene Phasenlage die Amplitude der Ausgangsspannung gemessen und der Verlauf der Kurve skizziert.

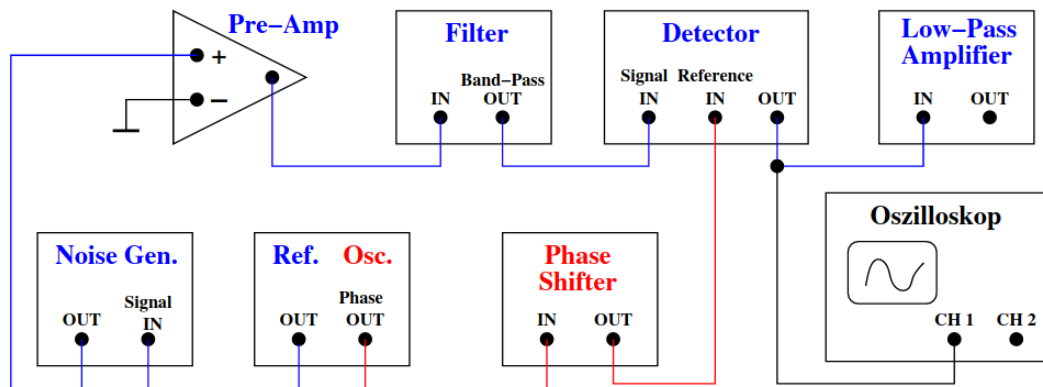


Abbildung 4: Der Schaltkreis zur Vermessung einer Sinusspannung mit und ohne Rauschen. [1]

### 3.2 Messung mit Rauschen

Hier wird die Schaltung analog zur Messung ohne Rauschen nach der Abbildung 4 aufgebaut. Jetzt wird die sinusförmige Signalspannung durch den Noise-Generator mit Rauschen der gleichen Größenordnung versehen, bevor sie in den Vorverstärker geht. Es ist zu beachten, dass im Noise-Generator auch ein Verstärker verbaut ist.

Es wird wieder die Amplitude der Ausgangsspannung für verschiedene Phasenlagen die Referenz- und Signalspannung gemessen und der Verlauf der Kurve skizziert.

### 3.3 Messung mit einer Photodiode

Nun wird eine Photodetektorschaltung wie in Abbildung 5 aufgebaut. Die Leuchtdiode wird mit einer Rechteckspannung von 500 Hz gespeist. Das Licht wird mit einer Photodiode gemessen, der Output der Diode ist die genutzte Signalspannung. Die Leuchtdiode sowie die Photodiode befinden sich auf einer optischen Bank. Die Referenzspannung hat eine Phasenverschiebung von  $360^\circ$ . Es wird die Amplitude der Ausgangsspannung für verschiedene Abstände  $r$  zwischen Leucht- und Photodiode gemessen.

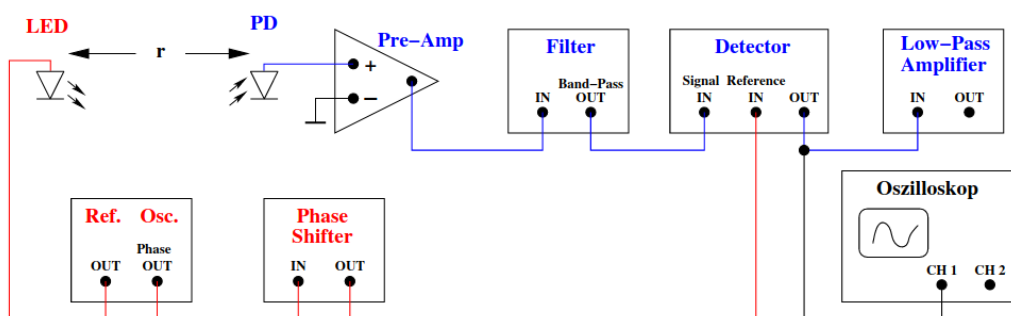


Abbildung 5: Dir Schaltung zur Messung mit einer Photodiode als Signalspannung. [1]

In der Abbildung 6 ist der Aufbau des Experimentes von der Messung mit der Sinusspannung mit und ohne Rauschen zu sehen. Auf dem Lock-In-Verstärker, welcher dem in Abbildung 3 gleicht, steht das Oszilloskop. In der Abbildung 7 ist die Photodiode (links) und die Leuchtdiode (rechts) auf einer optischen Bank zu sehen.

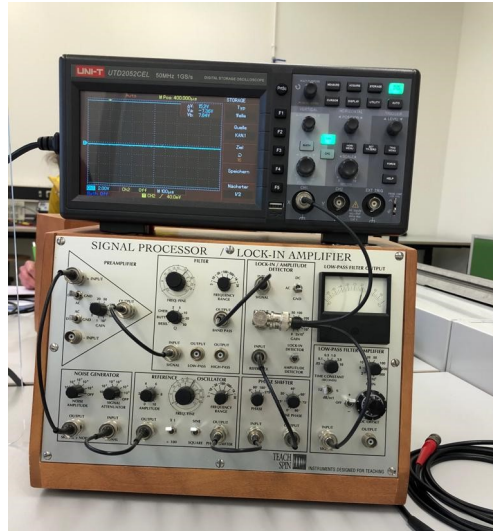


Abbildung 6: Der Originalaufbau, welcher im Experiment genutzt wird.

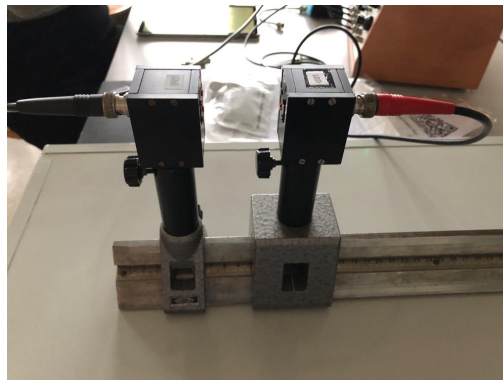


Abbildung 7: Die Leucht- und Photodiode auf einer optischen Bank.

## 4 Auswertung

### 4.1 Verifizierung der Funktionsweise eines Lock-In-Verstärkers

Die Spannungen werden für 7 Phasenverschiebungen in  $60^\circ$  Abständen aufgenommen. Die entsprechenden Bilder des Oszilloskop ohne Rauschen sind in Abbildung 10 zu finden, die mit in Abbildung 11. Die aufgenommenen Messwerte für die Untersuchung mit und ohne

Noise Generator sind in Tabelle 1 zu sehen. Für beide Messvorgänge werden die Werte in Diagrammen veranschaulicht (siehe Abbildung 8 und Abbildung 9) und mithilfe von python eine Ausgleichskurve nach Gleichung (2) bestimmt. Die zu ermittelnde Gleichung lautet:

$$U = a \cdot \cos(\phi + b) + c.$$

Durch die Ausgleichsrechnung folgt:

ohne Noise Generator:	$a_{\text{ohne}} = (10,66 \pm 2,02) \text{ V},$
	$b_{\text{ohne}} = -0.13 \pm 0.21,$
	$c_{\text{ohne}} = (-0,42 \pm 1,52) \text{ V},$
mit Noise Generator:	$a_{\text{mit}} = (7,18 \pm 0,75) \text{ V},$
	$b_{\text{mit}} = 0.18 \pm 0.12,$
	$c_{\text{mit}} = (-0,26 \pm 0,56) \text{ V}.$

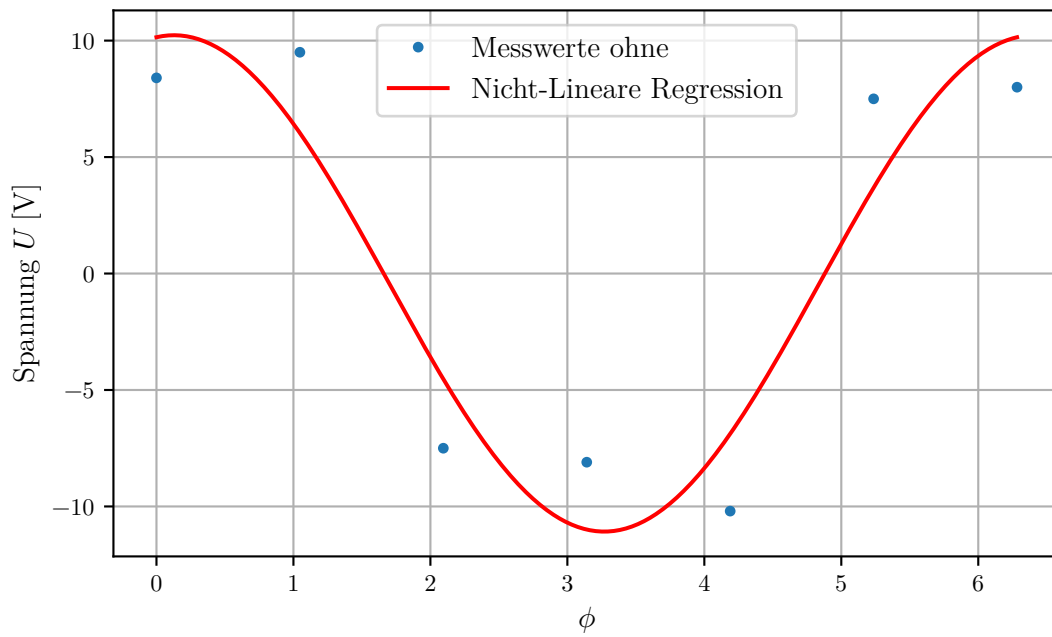
Nach Gleichung (1) gilt für  $a = \frac{2 \cdot U_0}{\pi}$ , somit ergeben sich für  $U_0$  folgende Werte:

ohne Noise Generator:	$U_{0,\text{ohne}} = (16,74 \pm 11,28) \text{ V},$
mit Noise Generator:	$U_{0,\text{mit}} = (3,17 \pm 1,18) \text{ V}.$

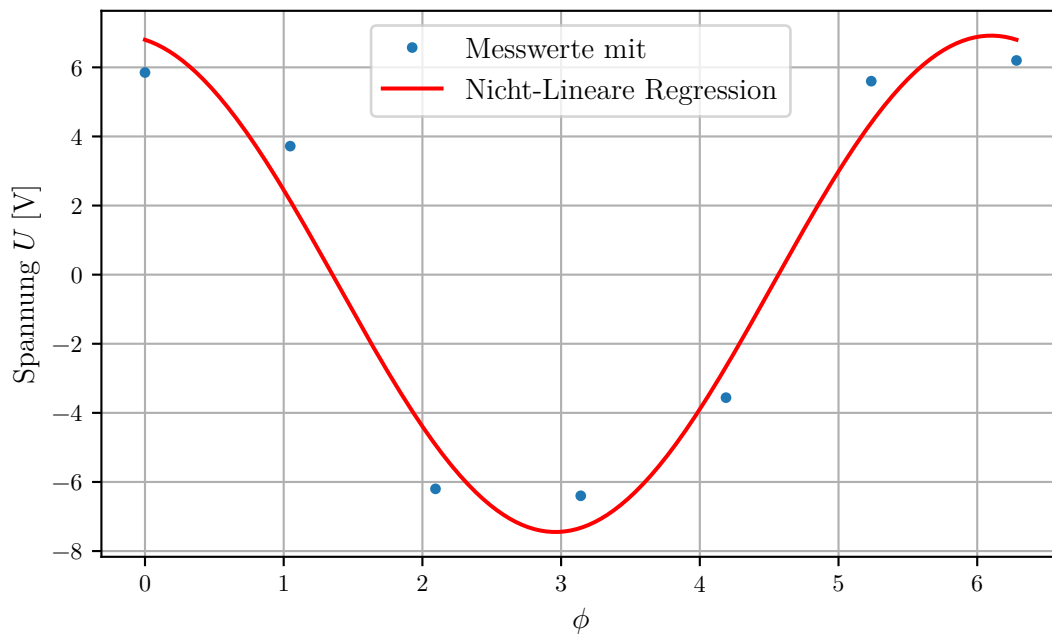
**Tabelle 1:** Die aufgenommenen Messergebnisse. Die Spannung in Abhängigkeit von der Phasenverschiebung  $\phi$ , mit und ohne Noise Generator.

$\Delta\phi/^\circ$	$U_{\text{ohne Noise}} / \text{V}$	$U_{\text{mit Noise}} / \text{V}$
0	8,4	5,85
60	9,5	3,72
120	7,5	6,2
180	8,1	6,4
240	10,2	3,56
300	7,5	5,6
360	8	6,2





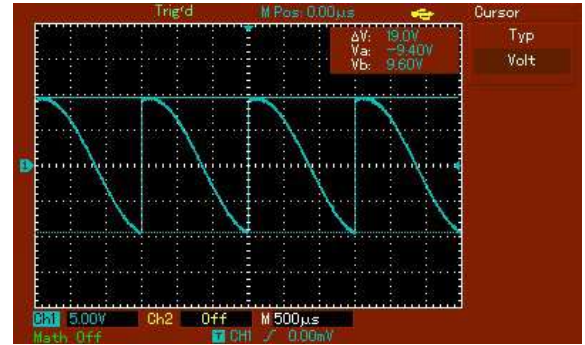
**Abbildung 8:** Die aufgenommenen Messwerte zum Versuchsdurchlauf ohne Noise Generator und die dazugehörige Ausgleichskurve.



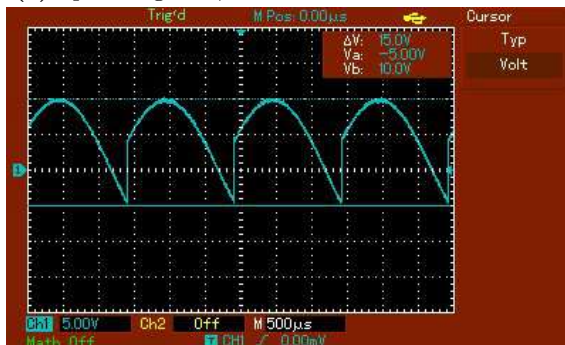
**Abbildung 9:** Die aufgenommenen Messwerte zum Versuchsdurchlauf mit Noise Generator und die dazugehörige Ausgleichskurve.



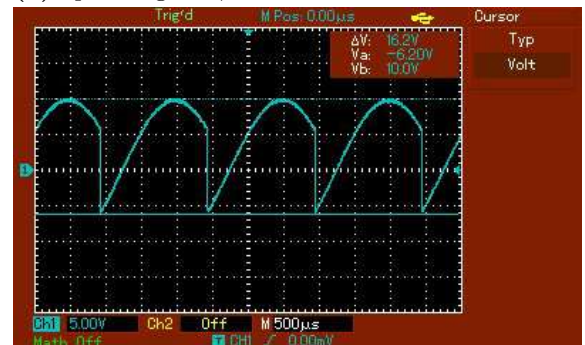
(a) Spannung bei  $\phi = 0^\circ$  ohne Rauschen.



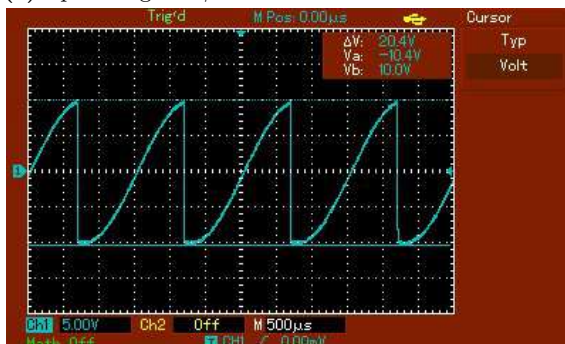
(b) Spannung bei  $\phi = 60^\circ$  ohne Rauschen.



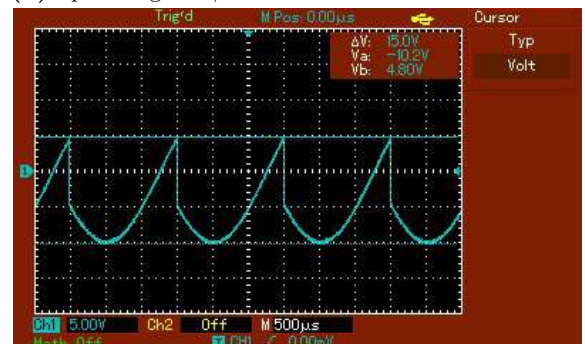
(c) Spannung bei  $\phi = 120^\circ$  ohne Rauschen.



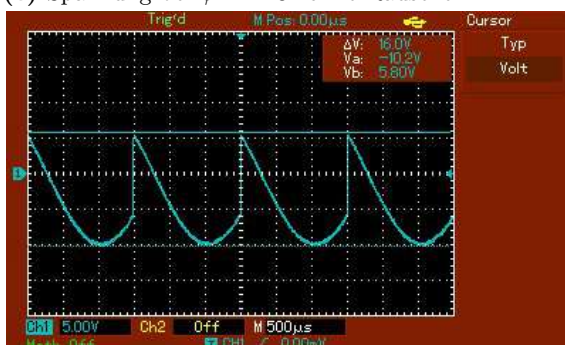
(d) Spannung bei  $\phi = 180^\circ$  ohne Rauschen.



(e) Spannung bei  $\phi = 240^\circ$  ohne Rauschen.

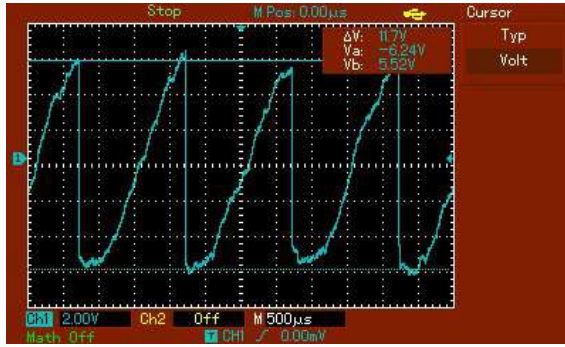


(f) Spannung bei  $\phi = 300^\circ$  ohne Rauschen.

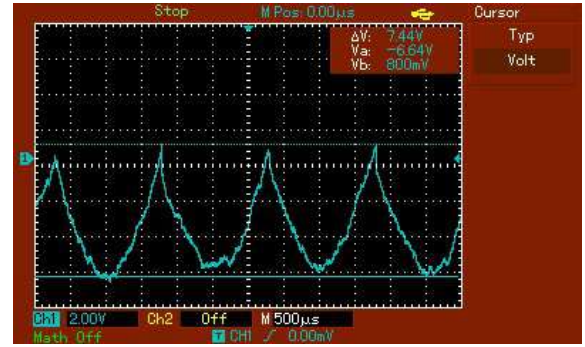


(g) Spannung bei  $\phi = 360^\circ$  ohne Rauschen.

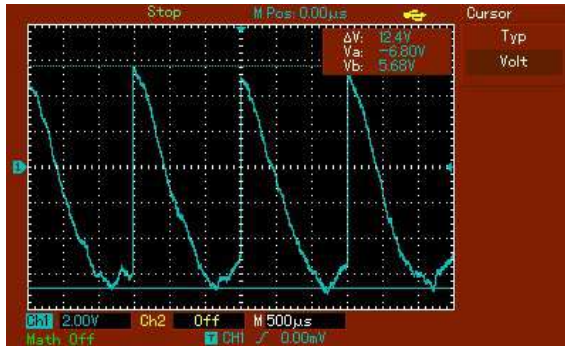
**Abbildung 10:** Die Spannungen bei verschiedenen Phasenverschiebungen  $\phi$  ohne Noise Generator.



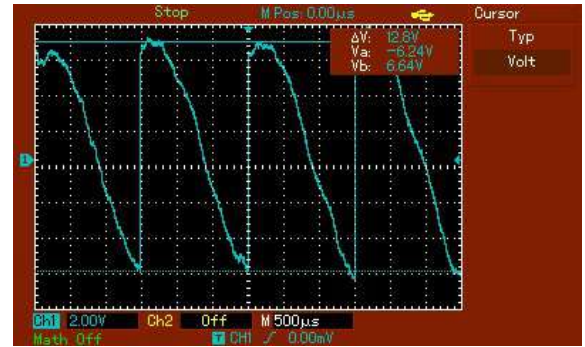
(a) Spannung bei  $\phi = 0^\circ$  mit Rauschen.



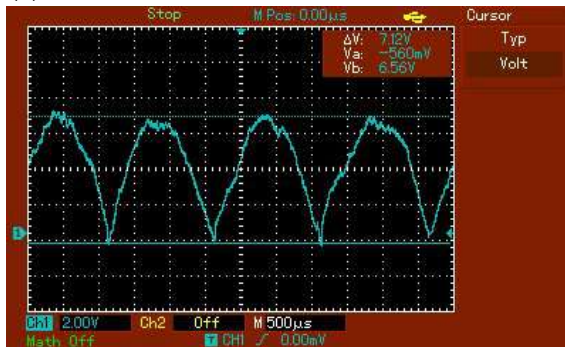
(b) Spannung bei  $\phi = 60^\circ$  mit Rauschen.



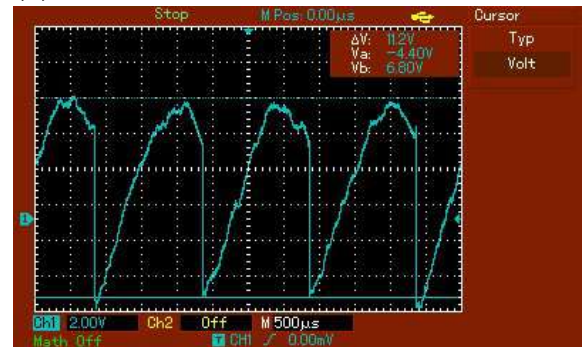
(c) Spannung bei  $\phi = 120^\circ$  mit Rauschen.



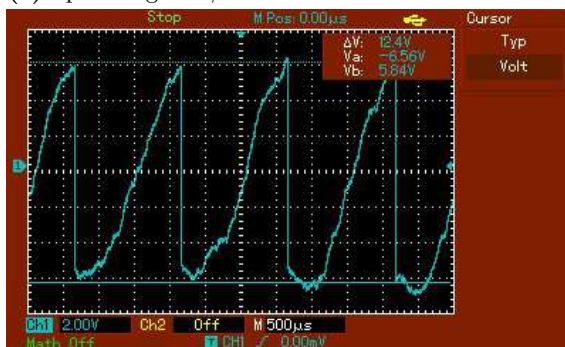
(d) Spannung bei  $\phi = 180^\circ$  mit Rauschen.



(e) Spannung bei  $\phi = 240^\circ$  mit Rauschen.



(f) Spannung bei  $\phi = 300^\circ$  mit Rauschen.



(g) Spannung bei  $\phi = 360^\circ$  mit Rauschen.

**Abbildung 11:** Die Spannungen bei verschiedenen Phasenverschiebungen  $\phi$  mit Noise Generator.

## 4.2 Messung mit einer Photodiode

Die aufgenommenen Messwerte sind in Tabelle 2 zu finden. Mithilfe von ipython wird eine Ausgleichsrechnung nach der Form:

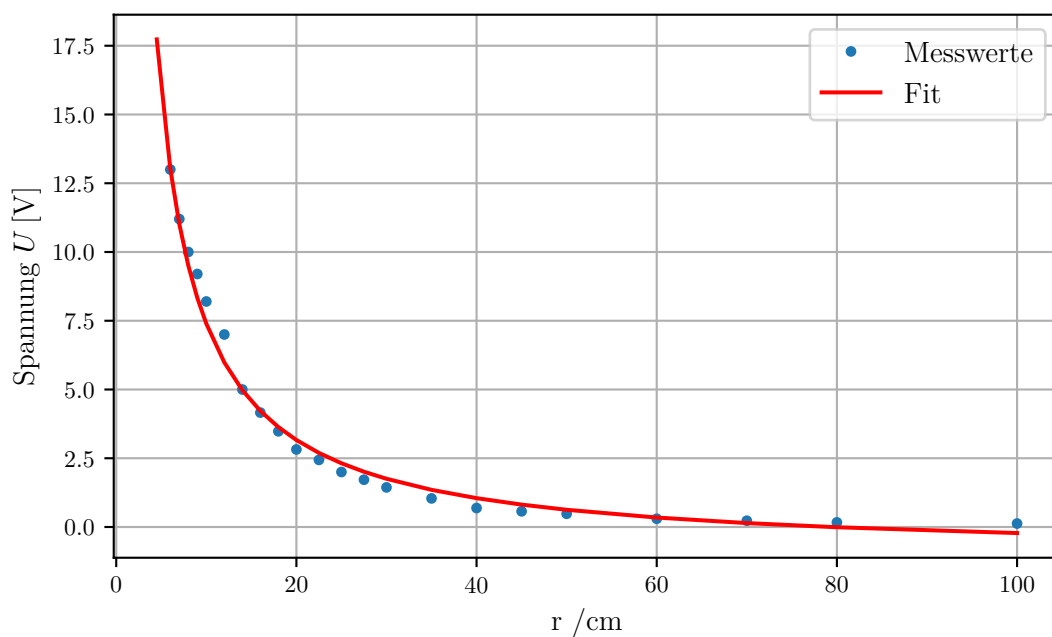
$$A = a \cdot \frac{1}{r} + b$$

durchgeführt. Dabei ergeben sich folgende Parameter:

$$a = (84.59 \pm 1.85)\text{V cm}$$

$$b = (-1.07 \pm 0.16)\text{V}$$

Die Messwerte und die dazugehörige Ausgleichskurve ist in Abbildung 12 zu sehen.



**Abbildung 12:** Die aufgenommenen Messwerte und die Ausgleichskurve.

Da die Spannung und somit die Intensität mit  $1/r$  abfällt, wurde ab einem Abstand von 40 cm eine Spannung im mV Bereich aufgenommen, eine genaue Nullspannung wurde nicht gemessen. Der größte aufgenommene Abstand beträgt 100 cm, die dazugehörige Spannung 126 mV.

**Tabelle 2:** Die aufgenommenen Messwerte. Die Spannung in Abhängigkeit vom Abstand  $r$  zwischen den beiden Dioden.

$r/\text{cm}$	$U/\text{V}$
4,5	16,6
6,0	13,0
7,0	11,2
8,0	10,0
9,0	9,2
10,0	8,2
12,0	7,0
14,0	5,0
16,0	4,16
18,0	3,48
20,0	2,82
22,5	2,44
25,0	2,0
27,5	1,72
30,0	1,44
35,0	1,04
40,0	0,69
45,0	0,57
50,0	0,480
60,0	0,300
70,0	0,228
80,0	0,168
100,0	0,126

## 5 Diskussion

Die Versuchsdurchführung verlief ohne größere Probleme. Einige Messwerte mussten zweimal aufgenommen werden, da das Oszilloskop nicht alle Spannungsverläufe gespeichert hat. Zunächst wurde eine Messung ohne Noise Generator durchgeführt, danach eine mit. Die Messwerte und die dazugehörige Ausgleichskurve stellen ein zufriedenstellendes Ergebnis dar, da sich die Werte in der Nähe der Kosinus-Funktion befinden. Für die Eingangsspannungen wurden folgende Werte ermittelt:

$$\begin{array}{ll} \text{ohne Noise Generator:} & U_{0,\text{ohne}} = (16,74 \pm 11,28) \text{ V}, \\ \text{mit Noise Generator:} & U_{0,\text{mit}} = (3,17 \pm 1,18) \text{ V}. \end{array}$$

Die eingestellte Eingangsspannung  $U_{\text{Ein}}$  betrug 10 mV, dadurch kann mit dem Verhältnis zwischen Ausgangsspannung und eingestellter Spannung der Verstärker bestimmt werden:

$$\frac{U_{0,\text{ohne}}}{U_{\text{Ein}}} = 1674 \qquad \frac{U_{0,\text{mit}}}{U_{\text{Ein}}} = 317.$$

Bei der Untersuchung mithilfe der Photodioden müssen die Lichtverhältnisse berücksichtigt werden. Die Deckenlampen wurden alle ausgeschaltet, dennoch kam genug Licht durch die Fenster herein. An diesen Umständen konnte nichts weiter geändert werden und hätten den Versuch stark beeinflussen können. Die Messwerte zeigen aber gute Ergebnisse. Die gewünschte  $1/r$  Abhängigkeit ist gut zu sehen. Da aber der Versuchsaufbau seine Grenzen hat und die Lichtverhältnisse auch nicht zu vernachlässigen sind, konnte kein Extremwert aufgenommen werden, bei der die zu aufnehmende Spannung gegen Null geht. Als maximaler Abstand und minimale Spannung wird somit  $r = 100 \text{ cm}$  mit  $U = 126 \text{ mV}$  aufgenommen.

## 6 Anhang



# V303 - Der Lock-in - Verstärker

$\Delta\phi [^\circ]$	ohne Noise Generator		mit Noise		Leucht - Diode	
	2A [V]		2A [V]		Abstand r [cm]	2 A [V]
0	16,8		11,7		4,5	33,2
30	17,6				6,0	26,0
60	19,0		7,44		7,0	22,4
90	17,8				8,0	20,0
120	15,0		12,4		9,0	18,4
150					10,0	16,8
180	16,2		12,8		12,0	14,0
210					14	10
240	20,4		7,12		16	8,32
270					18	6,96
300	15,0		11,2		20	5,84
330					22,5	4,88
360	16,0		12,4		25	4
					27,5	3,44
					30	2,88
					35	2,08
					40	1,38
					45	1,14
					50	960 mV
					60	600 mV
					70	456 mV
					80	336 mV
					100	252 mV

15

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuch V303: Der Lock-In-Verstärker*. 2021.