

# **V303 - Der Lock-In-Verstärker**

Jan Herdieckerhoff  
jan.herdieckerhoff@tu-dortmund.de

Karina Overhoff  
karina.overhoff@tu-dortmund.de

Durchführung: 11.12.2018, Abgabe: 18.12.2018

TU Dortmund – Fakultät Physik

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Ziel</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
<b>3 Durchführung</b>	<b>4</b>
3.1 Lock-In-Verstärker . . . . .	4
3.2 Rauschunterdrückung mit Photodektorschaltung . . . . .	4
<b>4 Fehlerrechnung</b>	<b>5</b>
<b>5 Auswertung</b>	<b>5</b>
5.1 Überprüfung der Funktion eines phasenempfindlichen Gleichrichters . . .	5
5.2 Überprüfung der Funktion eines Lock-In-Verstärkers . . . . .	9
5.3 Überprüfung der Rauschunterdrückung des Lock-In-Verstärkers . . . . .	11
<b>6 Diskussion</b>	<b>13</b>
<b>Literatur</b>	<b>14</b>

## 1 Ziel

Die Funktionsweise eines Lock-In-Verstärkers soll kennengelernt und verstanden werden.

## 2 Theorie

Der Lock-In-Verstärker wird genutzt, um bestimmte Eigenschaften einer Signalspannung  $U_{Sig}$  zu bestimmen. Lock-In-Verstärker werden hauptsächlich zur Messung stark verrauschter Signale verwendet.

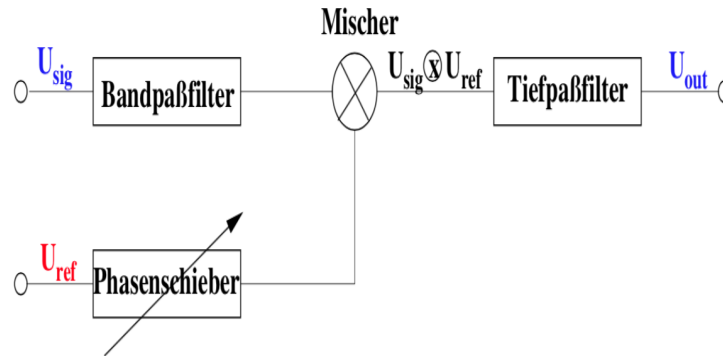


Abbildung 1: Aufbau eines Lock-In-Verstärkers. [1]

Hierzu wird das Signal mit einer Referenzfrequenz  $\omega_0$  moduliert. Dieses unter Umständen verrauschte Signal wird durch einen Bandpass von Rauschanteilen deutlich höherer oder niedrigerer Frequenzen als der Referenzfrequenz befreit. In einem sogenannten Mischer wird die Signalspannung  $U_{Sig}$  mit einem Referenzsignal  $U_{Ref}$ , das die Referenzfrequenz  $\omega_0$  hat, multipliziert.

Dieses neue Signal wird in einen Tiefpass eingespeist. Dieser hat die Eigenschaft, dass er das entstandene Mischsignal über mehrere Perioden der Modulationsfrequenz integriert. Die nicht zur Frequenz synchronisierten Rauschbeiträge werden sich dadurch herausmitteln, sodass eine zur Eingangsspannung  $U_{Sig}$  proportionale Gleichspannung  $U_{Out}$  gemessen werden kann.

Der Tiefpass entscheidet dabei über die Bandbreite des Restrauschens. Je größer die Zeitkonstante des Passes gewählt wird, desto kleiner wird die Bandbreite des Rauschens sein. Mit einem Lock-In-Verstärker kann man somit Güten, die weit über der Güte eines normalen Bandpasses liegen, erreichen.

Sind die Signal- und Referenzspannungen nicht in Phase, sondern haben eine Phasendifferenz  $\varphi$ , erhält man die folgende Ausgangsspannung:

$$U_{Out} = \frac{2}{\pi} U_0 \cos(\varphi + \delta). \quad (1)$$

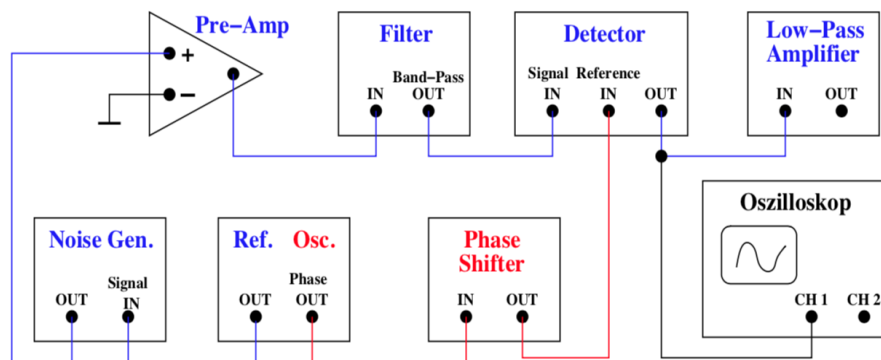
Diese erreicht somit ihr Maximum bei einer Phase von  $\varphi = 0$ .

## 3 Durchführung

### 3.1 Lock-In-Verstärker

Mit der Schaltung in Abb. 2 soll die Funktionsweise eines Lock-In-Verstärkers getestet werden. Es wird ein sinusförmiges Signal  $U_{Sig}$  von 1 kHz und 10 mV auf den Verstärker gegeben. Der Ausgang wird mit einem Referenzsignal, welches ein Sinussignal gleicher Frequenz ist, gemischt. Es werden Aufnahmen der Ausgangssignale für fünf verschiedene eingestellte Phasen gemacht.

Im nächsten Schritt wird ein Tiefpass, der das Ausgangssignal integriert, in den Schaltkreis eingebaut. Die Ausgangsspannungen werden für verschiedene Phasenverschiebungen gemessen. Es werden 13 Messwerte aufgenommen.

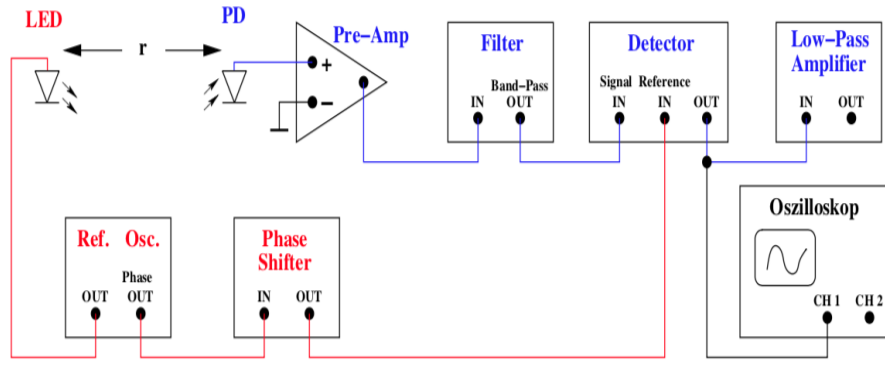


**Abbildung 2:** Aufbau eines Lock-In-Verstärkers mit Noise Generator. Für den Versuchsteil 3.1 wird der Noise Generator nicht in die Schaltung eingebaut. In Teil 3.1 wird der Noise Generator in die Schaltung integriert. [1]

Der Noise Generator wird in die Schaltung integriert (Abb. 2). Dieselben Messungen wie zuvor werden noch einmal mit einem Rauschsignal von der Größenordnung der Signalspannung durchgeführt.

### 3.2 Rauschunterdrückung mit Photodetektorschaltung

Im letzten Schritt wird eine Photodetektorschaltung wie in Abb. 3 gebaut. Die Leuchtdiode wird mit einer Rechteckspannung gespeist und mit einer Frequenz von 100 Hz zum Blinken gebracht. Mit einer Photodiode wird das ausgesendete Licht anschließend gemessen. Dabei wird die Lichtintensität als Funktion des Abstands  $r$  zwischen LED und Photodiode gemessen.



**Abbildung 3:** Aufbau einer Photodetektorschaltung zur Überprüfung der Rauschunterdrückung des Lock-In-Verstärkers. [1]

## 4 Fehlerrechnung

Der Mittelwert einer Stichprobe von  $N$  Werten wird durch

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

bestimmt.

Die Standardabweichung der Stichprobe wird berechnet mit:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}.$$

Der relative Fehler zwischen zwei Werten kann durch

$$\frac{a-b}{a}$$

bestimmt werden.

Für die Auswertung werden matplotlib [2], NumPy [5] und SciPy [3] benutzt.

## 5 Auswertung

Das sinusförmige Signal, das auf den Verstärker gegeben wird, hat eine Frequenz von 1 kHz und eine Spannung von 10 mV.

### 5.1 Überprüfung der Funktion eines phasenempfindlichen Gleichrichters

Die Aufnahmen der Ausgangssignale für fünf verschiedene Phasen sind im Folgenden abgebildet.

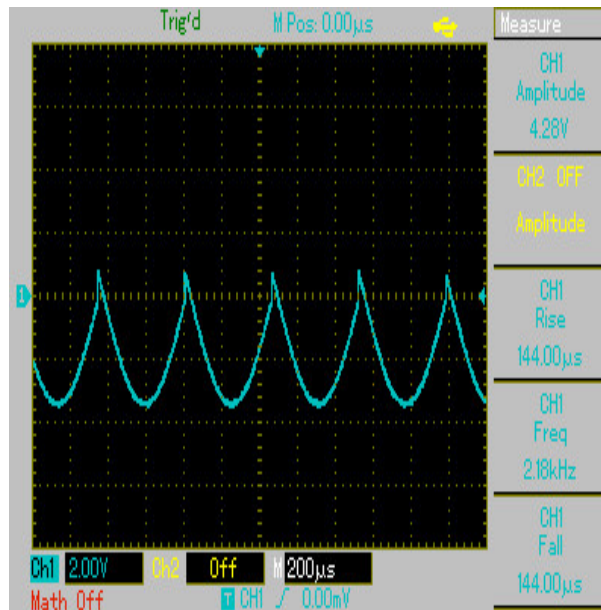


Abbildung 4: Ausgangsspannung bei einer Phase von  $\varphi = 0^\circ$ .

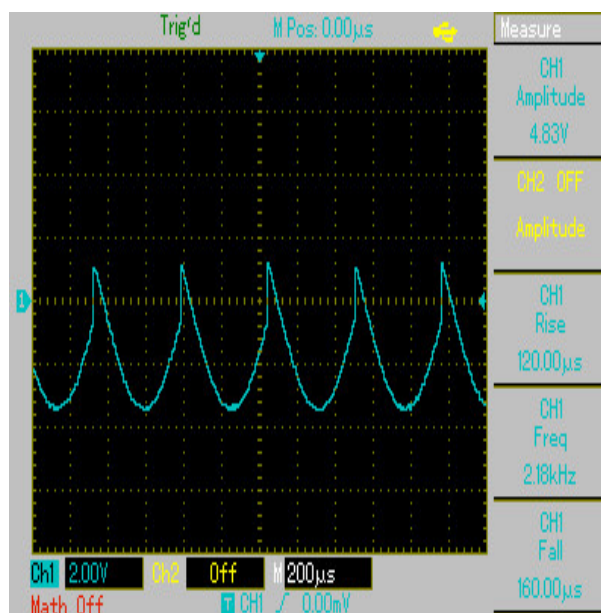


Abbildung 5: Ausgangsspannung bei einer Phase von  $\varphi = 15^\circ$ .

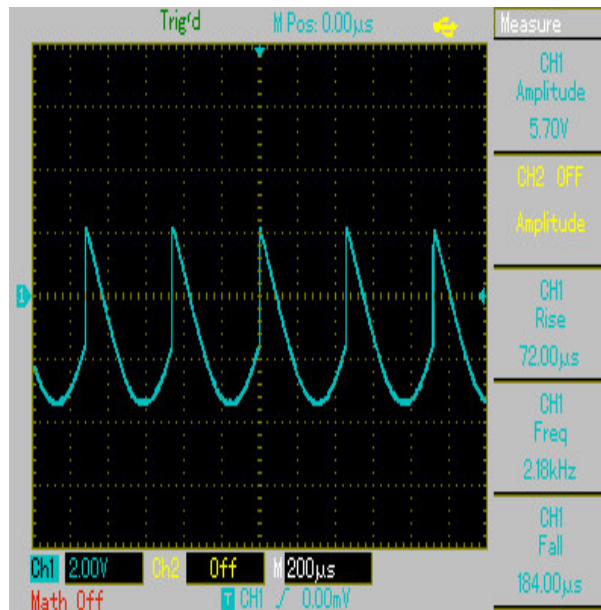


Abbildung 6: Ausgangsspannung bei einer Phase von  $\varphi = 30^\circ$ .

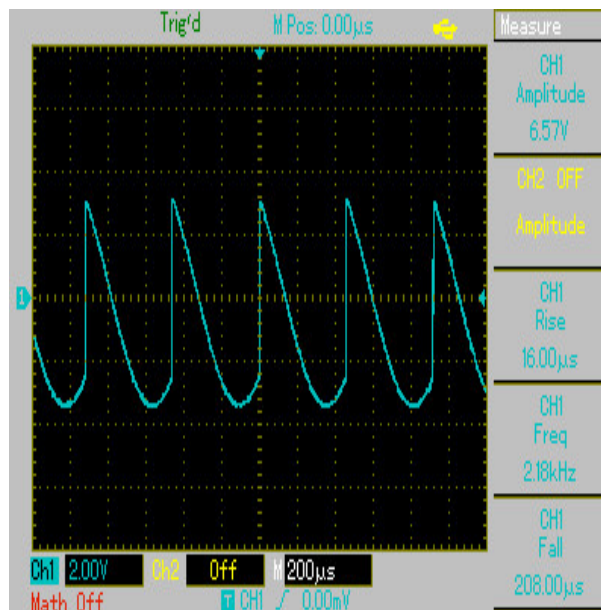
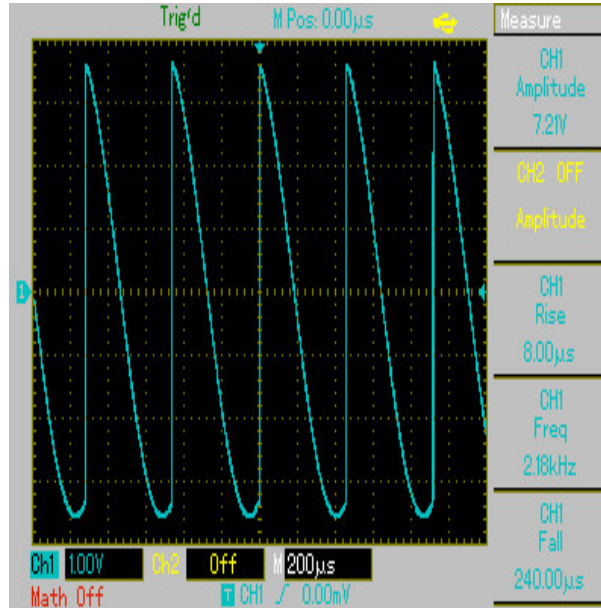


Abbildung 7: Ausgangsspannung bei einer Phase von  $\varphi = 45^\circ$ .



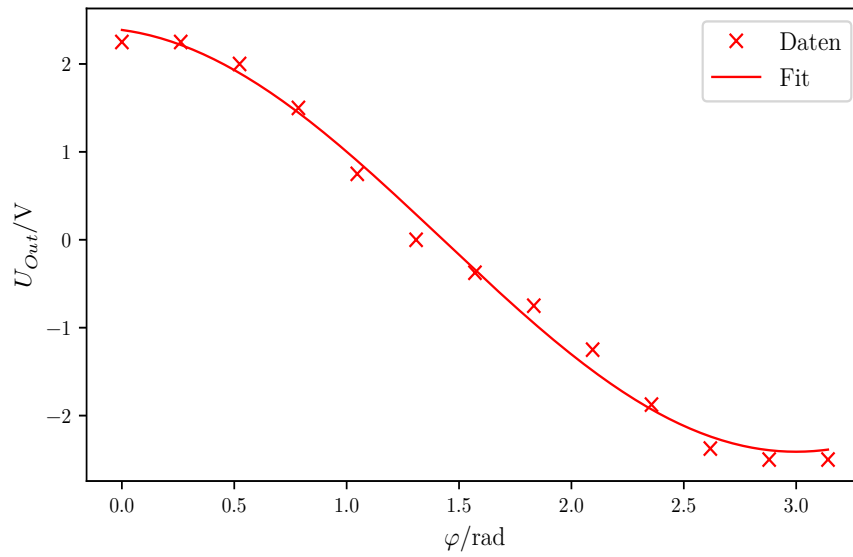
**Abbildung 8:** Ausgangsspannung bei einer Phase von  $\varphi = 60^\circ$ .

Die Werte der Amplitude der Ausgangsspannung  $U_{Out}$  in Abhängigkeit von der Phasenverschiebung  $\varphi$  zwischen der Signalspannung  $U_{Sig}$  und der Referenzspannung  $U_{Ref}$  sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Ausgangsspannung  $U_{Out}$  wird in Abb. 9 gegen die Phasenverschiebung  $\varphi$  aufgetragen.

**Tabelle 1:** Die Phasenverschiebung  $\varphi$  wird gegen die Werte der Ausgangsspannung  $U_{Out}$  aufgetragen.

$\varphi/\text{rad}$	$U_{Out}/\text{V}$
0,0	−2,3
0,3	−2,3
0,5	−2,0
0,8	−1,5
1,0	−0,8
1,3	0,0
1,6	0,4
1,8	0,8
2,1	1,3
2,4	1,9
2,6	2,4
2,9	2,5
3,1	2,5





**Abbildung 9:** Die Ausgangsspannung  $U_{Out}$  ist gegen die Phasenverschiebung  $\varphi$  aufgetragen. Diese Abbildung bezieht sich auf Versuchsteil 5.1 .

Der durch die Messung der Ausgangsspannung mit Gleichung (1) ermittelte Wert für die Signalspannung ist, anhand der Fitwerte bestimmt,

$$U_{0,sauber} = (3,75 \pm 0,17) \text{ V}.$$

Der direkt gemessene Wert für die Signalspannung ist

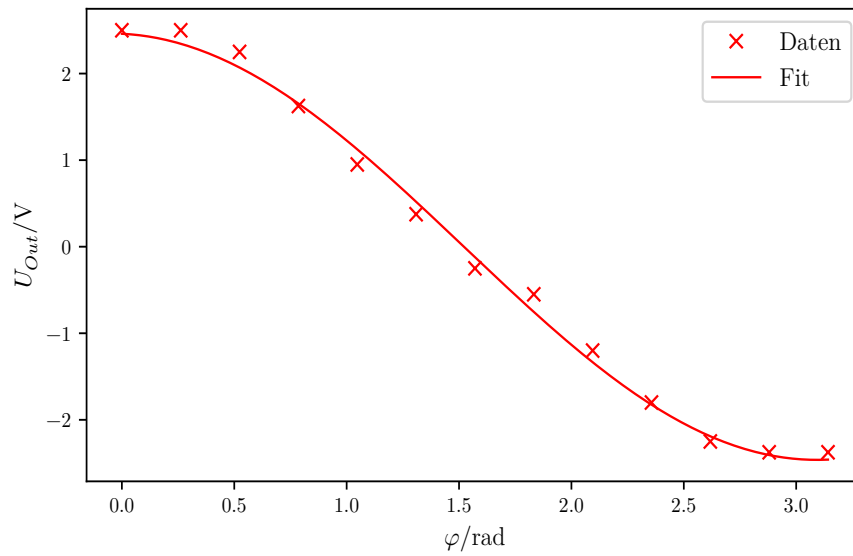
$$U_{0,direkt} = 3,28 \text{ V}.$$

## 5.2 Überprüfung der Funktion eines Lock-In-Verstärkers

In Tabelle 2 befinden sich die Werte der Amplitude der Ausgangsspannung  $U_{Out}$  in Abhängigkeit von der Phasenverschiebung  $\varphi$  zwischen der Signalspannung  $U_{Sig}$  und der Referenzspannung  $U_{Ref}$ . Die Werte der Ausgangsspannung  $U_{Out}$  wird gegen die Phasenverschiebung  $\varphi$  in Abb. 10 aufgetragen.

**Tabelle 2:** Die Phasenverschiebung  $\varphi$  wird gegen die Werte der Ausgangsspannung  $U_{Out}$  aufgetragen.

$\varphi/\text{rad}$	$U_{Out}/\text{V}$
0,0	2,5
0,3	2,5
0,5	2,3
0,8	1,6
1,0	1,0
1,3	0,4
1,6	-0,3
1,8	-0,6
2,1	-1,2
2,4	-1,8
2,6	-2,3
2,9	-2,4
3,1	-2,4



**Abbildung 10:** Die Ausgangsspannung  $U_{Out}$  ist gegen die Phasenverschiebung  $\varphi$  aufgetragen. Diese Abbildung bezieht sich auf Versuchsteil 5.2.

Der durch die Messung der Ausgangsspannung mit Gleichung (1) ermittelte Wert für die Signalspannung ist, anhand der Fitwerte bestimmt,

$$U_{0,noise} = (3,86 \pm 0,09) \text{ V}.$$

### 5.3 Überprüfung der Rauschunterdrückung des Lock-In-Verstärkers

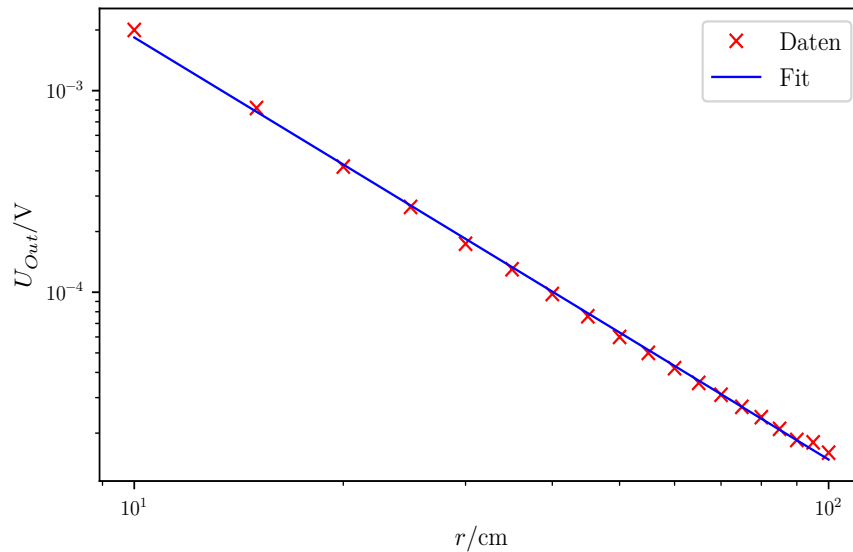
Die Werte der Ausgangsspannung  $U_{Out}$  mit Verstärkung des Tiefpasses und des Detektors in Abhängigkeit vom Abstand  $r$  der LED zur Photodiode sind in Tabelle 3 zu finden. Die tatsächliche Ausgangsspannung  $U_{Out}$  in Abhängigkeit vom Abstand  $r$  der LED zur Photodiode befindet sich in Tabelle 4. Die Werte aus Tabelle 4 sind in Abbildung 11 gegeneinander aufgetragen. Es ist also die Ausgangsspannung in Abhängigkeit vom Abstand dargestellt.

**Tabelle 3:** Der Abstand  $r$  zwischen Leucht- und Photodiode aufgetragen gegen die Spannung  $U_{Out}$ . Dazu jeweils den Wert für die Verstärkung des Tiefpasses und des Detektors.

$r/\text{cm}$	$U_{Out}/\text{V}$	Gain Tiefpass	Gain Detektor
10,0	4,0	20,0	100,0
15,0	4,1	50,0	100,0
20,0	4,2	100,0	100,0
25,0	5,3	200,0	100,0
30,0	8,7	500,0	100,0
35,0	6,5	500,0	100,0
40,0	4,9	500,0	100,0
45,0	7,6	1000,0	100,0
50,0	6,0	1000,0	100,0
55,0	5,0	1000,0	100,0
60,0	4,2	1000,0	100,0
65,0	7,1	1000,0	200,0
70,0	6,2	1000,0	200,0
75,0	5,4	1000,0	200,0
80,0	4,8	1000,0	200,0
85,0	4,2	1000,0	200,0
90,0	3,7	1000,0	200,0
95,0	9,0	1000,0	500,0
100,0	8,0	1000,0	500,0

**Tabelle 4:** Der Abstand  $r$  zwischen Leucht- und Photodiode aufgetragen gegen die tatsächliche Spannung  $U_{Out}$ , nach Division durch die Verstärkerwerte.

$r/\text{cm}$	$U_{Out}/\mu\text{V}$
10,0	2000,0
15,0	820,0
20,0	420,0
25,0	265,0
30,0	174,0
35,0	130,0
40,0	98,0
45,0	76,0
50,0	60,0
55,0	50,0
60,0	42,0
65,0	35,5
70,0	31,0
75,0	27,0
80,0	24,0
85,0	21,0
90,0	18,5
95,0	18,0
100,0	16,0



**Abbildung 11:** Die Ausgangsspannung  $U_{Out}$  ist gegen den Abstand  $r$  der LED zur Photodiode aufgetragen. Die Werte sind doppellogarithmisch aufgetragen.

Der maximale Abstand  $r_{max}$ , bei dem das Licht der LED noch nachgewiesen werden kann, ist nicht eindeutig bestimmbar. Der Wert der Steigung des Fits beträgt

$$m = -2,09 \pm 0,02.$$

## 6 Diskussion

Die Amplitude der Signalspannung ließ sich am Funktionsgenerator verändern. Die verstärkte Spannung ergab einen konstanten Wert von 3,28 V. Dieser Wert wurde mit dem Oszilloskop als Vergleichswert gemessen.

Der Noise Generator wurde im ersten Versuchsteil überbrückt. Die Bilder, die gemacht wurden, ergeben, dass die Spannung  $U_{Out}$  ohne den Tiefpass wie eine Sinusfunktion aussieht, die nach etwas mehr als einer viertel Periode abgeschnitten wird und dieses Bild anschließend periodisch fortgesetzt wird. Bei einer Phasenverschiebung verschiebt sich der Sinus in positive  $t$ -Richtung, wie sich an den Abbildungen erkennen lässt. Hier wurde eine Phasenverschiebung von insgesamt  $60^\circ$  betrachtet. Dabei wurde der Sinus um etwas weniger als eine viertel Phase verschoben. Also entspricht die Phasenverschiebung auch ungefähr der Verschiebung des Bildes, das gesehen wird.

Wenn das Signal mittels des Tiefpasses integriert wird, erhält man den Wert zwischen dem Graphen und der  $t$ -Achse. Für die Messung ohne Noise Generator ergibt sich damit ein Wert von 3,75 V und ein relativer Fehler von 4,53 %. Der direkt an der Spannung abgelesene Wert beträgt 3,28 V, was einer relativen Abweichung von 15,03 % zwischen dem gemessenen Wert und dem aus dem Fit ermittelten Wert entspricht.

Mit dem Noise Generator ergab sich für die Spannung ein Wert von 3,86 V und ein relativer Fehler von 2,33 %. Somit liegt dieser etwas weiter von dem exakten Wert entfernt. Dies war auch zu erwarten, da der Noise Generator das Signal ungenauer macht. Insgesamt ist die Abweichung aber trotzdem nicht groß. Die Abweichung zur Messung ohne Noise Generator beträgt 2,85 %. Zum exakten Wert beträgt die Abweichung 18,4 %. Das Bild war bei der Spannung mit dem Noise Generator natürlich deutlich ungenauer, der Lock-In-Verstärker hat das Signal aber trotzdem ähnlich genau ermittelt. Die Messungen mit der LED und der Photodiode haben auch das zu erwartende Ergebnis geliefert. Es ist zu erkennen, dass die Werte auf einer beidseitig logarithmierten Skala linear abnehmen. Der Nullpunkt war nicht exakt zu bestimmen. Bei einer Entfernung von einem Meter gab es noch immer einen Ausschlag des Messgeräts. Aus der Grafik lässt sich dieser Wert auch nicht ablesen. Aufgrund der logarithmischen Skala wird der absolute Nullpunkt sogar nie erreicht.

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuch 303: Der Lock-In-Verstärker*. 2018. URL: <http://129.217.224.2/HOME/PAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/LockIn.pdf>.
- [2] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [3] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. „SciPy: Open source scientific tools for Python“. Version 0.16.0. In: (). URL: <http://www.scipy.org/>.
- [4] Eric O. Lebigot. „Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties“. Version 2.4.6.1. In: (). URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [5] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.