

V303 - Lock-In Verstärker

Lock-In Verstärker

Robin Pelkner
robin.pelkner@tu-dortmund.de

Joshua Althüser
joshua.althueser@tu-dortmund.de

Durchführung: 30.11.2018

Abgabe: 06.11.2018

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Ziel des Versuchs	3
2 Theorie	3
2.1 Lock-In-Verstärker	3
2.2 Photodiode	4
3 Aufbau und Durchführung	4
4 Auswertung	6
4.1 Messung von verrauschten und unverrauschten Signalen	6
4.2 Messung von Lichtintensität einer LED und einer Photodiode	9
5 Diskussion	11
Literatur	11

1 Ziel des Versuchs

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

2 Theorie

2.1 Lock-In-Verstärker

Ein Lock-In-Verstärker wird vorallem zur genauen Messung von verrauschten Signalen verwendet. Dazu wird ein Messsignal durch ein Referenzfrequenz ω_0 moduliert, anschließend wird das hierzugehörige Nutzsignal U_{sig} durch einen Bandpassfilter von Rauschanteilen mit höheren und niedrigeren Frequenzen befreit. Danach wird das Signal, wie auch in Abbildung 1 zu sehen, mit einem Referenzsignal U_{ref} , welches dieselbe Frequenz ω_0 wie U_{sig} hat, multipliziert. Die Phase Φ der Referenzspannung im Vergleich zu U_{sig} ist dabei durch einen Phasenschieber veränderlich. Für eine zu messende Sinusspannung, wie im Versuch, gilt also

$$U_{\text{sig}} = U_0 \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$U_{\text{ref}} = \frac{4}{\pi} (\sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \dots) \quad (2)$$

wobei U_{ref} durch ein Rechtecksignal moduliert wird. Das gemischte Signal ergibt somit

$$U_{\text{sig}} \times U_{\text{ref}} = \frac{2}{\pi} U_0 (1 - \frac{2}{3} \cos(2\omega t) - \frac{2}{15} \cos(4\omega t) - \dots). \quad (3)$$

Das resultierende Signal $U_{\text{sig}} \times U_{\text{ref}}$ wird anschließend durch einen Tiefpaß über ein Vielfaches der Periodenlänge integriert, was dazu führt, dass die Oberfrequenzen ω des Mischsignals unterdrückt werden. Das Ausgangssignal ist dann

$$U_{\text{out}} = \frac{2}{\pi} U_0 \cos(\Phi). \quad (4)$$

Indem nun $\Delta\Phi = 0$ gewählt wird, werden das Eingangs- und das Referenzsignal synchronisiert, so dass sich Gleichung 4 zu

$$U_{\text{out}} = \frac{2}{\pi} U_0 \quad (5)$$

vereinfacht. Der Tiefpassfilter kann dabei eine fast beliebig kleine Bandbreite $\Delta\nu = \frac{1}{\pi RC}$ haben, da sich die Zeitkonstante $T = RC$ sehr groß wählen lässt. Hierdurch sind Güten mit bis zu $Q = 100000$ möglich.

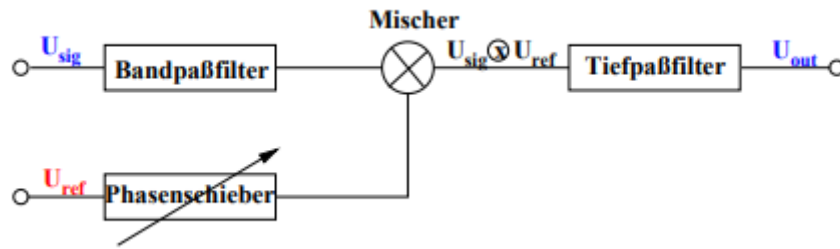


Abbildung 1: Funktionsweise eines Lock-In-Verstärkers [1, S. 1]

2.2 Photodiode

Bei der Photodiode handelt es sich um eine p-n-Diode, welche an einem p-n-Übergang eintreffende Photonen in elektrischen Strom umwandeln. Der Effekt der dabei in der Diode stattfindet nennt sich Photoeffekt. Dabei bewirken die Photonen in der Sperrschicht ein Elektron-Loch-Paar. Da es sich hierbei um einen Halbleiter handelt, werden die Elektronen zur n-Seite und die Löcher zur p-Seite beschleunigt. Hierdurch kommt es zur Erhöhung der Elektrischen Feldstärke am Übergang, was schlussendlich einen elektrischen Strom bewirkt. [2]

3 Aufbau und Durchführung

Zunächst wurde die Funktionsweise des Signal Processors bzw. Lock-In Amplifier des Lock-In-Verstärkers betrachtet. Dabei wurden die Spannungsamplituden der Ausgänge Reference und Oscillator auf Variation bzw. Konstanz mittels eines angeschlossenen digitalen Oszillators hin überprüft. Der konstante Amplitudenwert wurde notiert. Anschließend sollte die Schaltung, welche in Abbildung 2 zu sehen ist, schrittweise aufgebaut werden, wobei der Noise Generator für diesen Teil ersteinmal überbrückt werden sollte. Zuerst wurde nur ein Sinusförmiges Eingangssignal U_{sig} mit einer Frequenz von 1 kHz und einer Spannung von 10 mV auf den Verstärker gegeben und danach mit einer ebenfalls sinusförmigen Referenzspannung U_{ref} , gleicher Frequenz, gemischt. Das resultierende Signal wurde auf dem digitalen Oszilloskop ausgegeben. Für fünf verschiedene Phasen der Referenzspannung, welche am Reference Ausgang einstellbar ist, wurde eine Grafik erstellt. Anschließend sollte die Schaltung, wie in Abbildung 2, vollständig nachgebaut werden, wobei der Noise Generator weiterhin überbrückt wurde. Nun sollte wieder das Ausgangssignal betrachtet werden, welches nun allerdings integriert wurde, das heißt mit Nutzung des angeschlossenen Tiefpasses. In diesem Aufbau wurden verschiedene Ausgangsspannungen in Abhängigkeit von der Phasenverschiebung der Referenzspannung aufgenommen, welche wieder am Reference Ausgang verändert wurde. In einem nächsten Schritt wurde der Noise Generator wie in Abbildung 2 angeschlossen. Zu Beachten war, dass sich die vom Noise Generator erzeugten Rauschsignale in der selben Größenordnung befanden wie die Signalspannung U_{sig} . Wie schon zuvor wurde nun wieder die

Ausgangsspannung U_{out} in Abhängigkeit der Phasenverschiebung aufgenommen. In einem

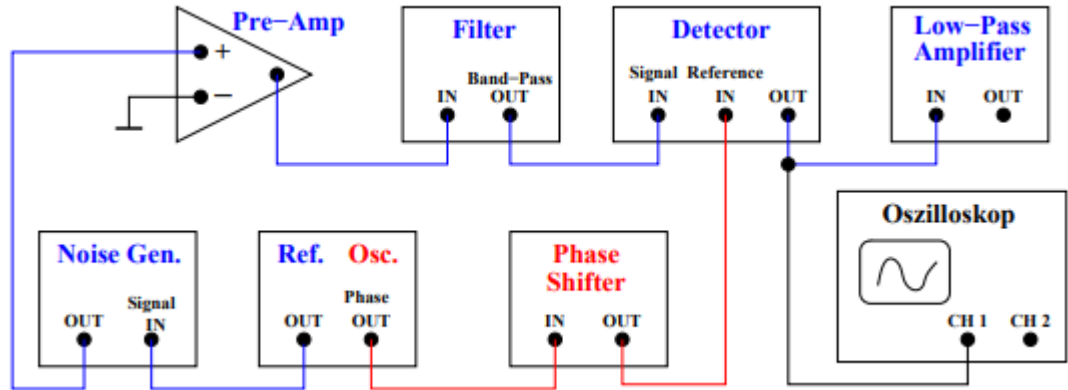


Abbildung 2: Schaltskizze zur Messung der Ausgangsspannung in Abhängigkeit zur Phasenverschiebung [1, S. 4]

letzten Schritt sollte der Lock-In-Verstärker auf die Rauschunterdrückung hin untersucht werden. Hierzu wurde, wie in Abbildung 3 dargestellt, die Schaltung modifiziert, so dass nun statt des Noise Generators eine LED und eine Photodiode geschaltet sind, welche einen Abstand r von einander haben. Zu Beachten war, dass die LED mit einer Rechteckspannung versorgt wurde, welche im Frequenzbereich von 50 Hz bis 500 Hz liegt, weshalb hier mit einer 300 Hz Rechteckspannung gearbeitet wurde. Es wurde die Lichtintensität der LED in Abhängigkeit des veränderlichen Abstandes r gemessen und notiert. Außerdem sollte der maximale Abstand r_{max} bestimmt werden, an dem das Licht der LED noch mit der Photodiode nachgewiesen werden konnte.

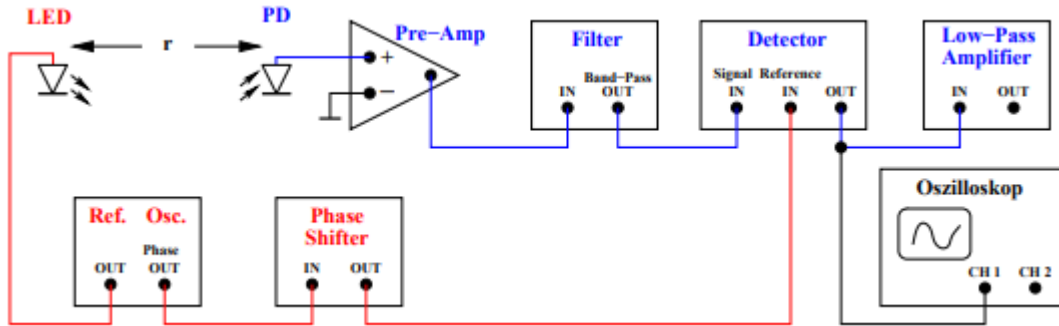


Abbildung 3: Schaltskizze zur Überprüfung der Rauschunterdrückung des Lock-In-Verstärkers mittels einer Photodiode [1, S. 5]

4 Auswertung

4.1 Messung von verrauschten und unverrauschten Signalen

Zunächst wurde die konstante Spannung des Funktionsgenerators gemessen. Diese wird von dem Oscillator-Ausgang bereitgestellt und beträgt $U_{\text{const}} = 3.2\text{V}$. Der Reference-Ausgang liefert eine variable Spannungsamplitude U_{ref} . Die Frequenzen sind jeweils einstellbar.

Die Phasenverschiebung der beiden Signale lässt sich mithilfe von Python 3.7.0 auf circa 45° bestimmen. Mit dieser Information und Gleichung 4 lässt sich nun auch U_{out} berechnen. Diese beiden sind in den folgenden beiden Messwerttabellen gegeneinander aufgeführt.

Tabelle 1: Messdaten der Phasenverschiebung.

$\Delta\phi$	$U_{\text{low}} / \text{V}$	$U_{\text{out}} / \text{V}$	$\Delta\phi$	$U_{\text{low}} / \text{V}$	$U_{\text{out}} / \text{V}$
0°	17,5	1,3	0°	20,0	1,3
15°	20,0	1,7	15°	25,0	1,7
30°	22,5	1,9	30°	27,5	1,9
45°	25,0	2,0	45°	30,0	2,0
60°	22,5	1,9	60°	27,5	1,9
75°	20,0	1,8	75°	25,0	1,8
90°	17,5	1,5	90°	20,0	1,5
105°	15,0	1,0	105°	17,5	1,0
120°	10,0	0,5	120°	10,0	0,5
135°	0,0	0,0	135°	0,0	0,0
150°	-7,5	-0,5	150°	-7,5	-0,5
165°	-15,5	-1,0	165°	-17,5	-1,0
180°	-17,5	-1,5	180°	-20,0	-1,5

(a) Messwerte ohne Rauschen
(b) Messwerte mit Rauschen

$\Delta\phi$ beschreibt hier bei die am Phasenverschieber eingestellte Phasenverschiebung zwischen dem Oscillator- und dem Reference-Signal und U_{low} beschreibt die am Low-Pass-Filter gemessene Spannung. Auffällig ist, dass die errechnete Spannung, um eine Größenordnung abweicht. Dies geht vermutlich auf ein fehlerhaftes Ablesen der Messskala zurück. Diese Abweichung wird im Weiteren nicht beachtet, da die Kurvenform lediglich in der Amplitude abweicht und nicht in Frequenz oder Phasenverschiebung.

In Abbildung 4 sind die durch den Tiefpass entstehenden Wellen bei der jeweils angegebenen Phasenverschiebung durch den Phasenverschieber. Diese Graphen entstehen durch das nicht verrauschte Signal. Für das verrauschte Signal haben die Graphen jedoch dieselbe Form, mit der Ausnahme, dass diese an der x -Achse gespiegelt sind.

Die Messdaten aus Tabelle 1 wurden zur besseren Einsicht geplottet und es wurde ein sinusförmiger Fit über die Messwerte gelegt. Es ist zu bemerken, dass die Werte in der Messung ohne Rauschen ein wenig kleiner waren, als jene der Messung mit Rauschen. Die Frequenzen sind annähernd gleich, eben so wie die Phasenverschiebung zwischen U_{const}

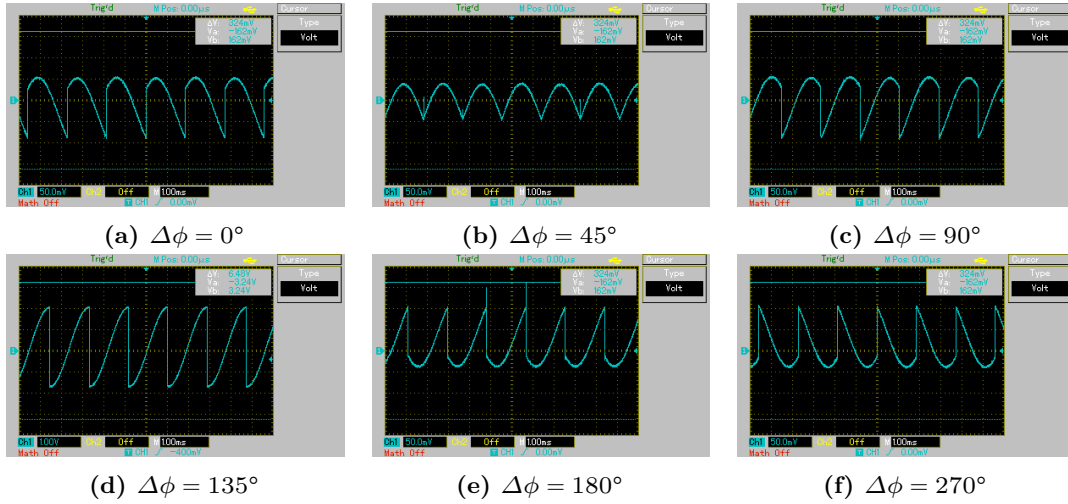


Abbildung 4: Graphen am Oszilloskop

und U_{ref} . Dies war zu erwarten, da das Rauschen durch den Lock-In-Filter größtenteils herausgefiltert wird.

Die Graphen wurden nach der Form $f(x) = a \cdot \cos(b \cdot x + c)$ geplottet. Mithilfe von Python 3.7.0 lassen sich die unverrauschten Werte als

$$\begin{aligned} a &= (24.7 \pm 0.5)\text{V} \\ b &= 0.018 \pm 3 \cdot 10^{-7} \\ c &= -0.860 \pm 0.004 \end{aligned}$$

bestimmen. Für die verrauschten Werte ergibt sich:

$$\begin{aligned} a &= (29.5 \pm 0.4)\text{V} \\ b &= 0.018 \pm 1.8 \cdot 10^{-7} \\ c &= -0.849 \pm 0.003 \end{aligned}$$

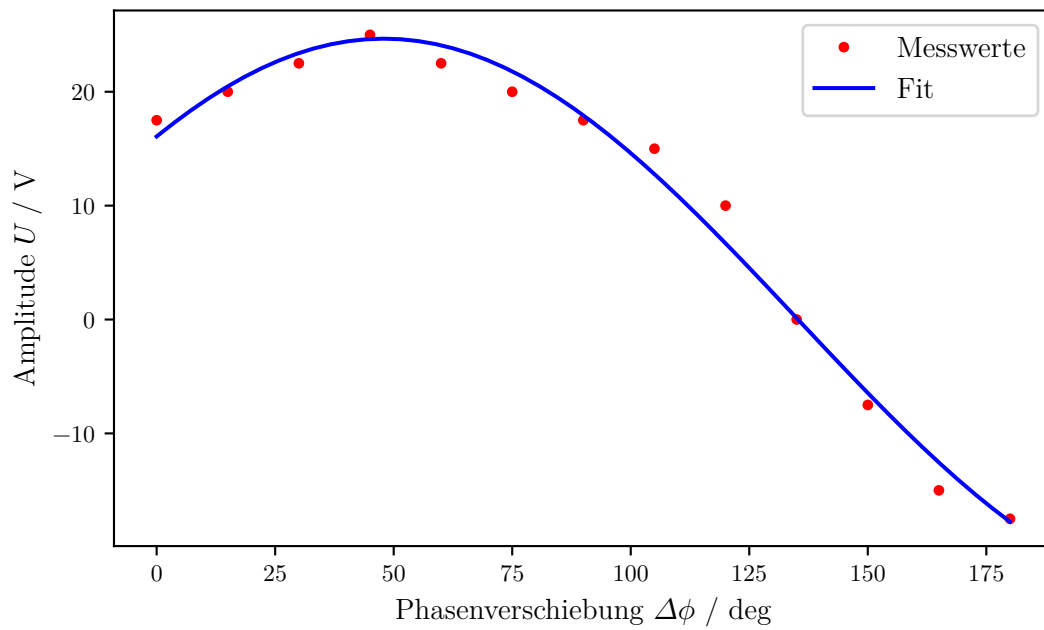


Abbildung 5: Plot und Fit der Daten der Messung ohne Rauschen.

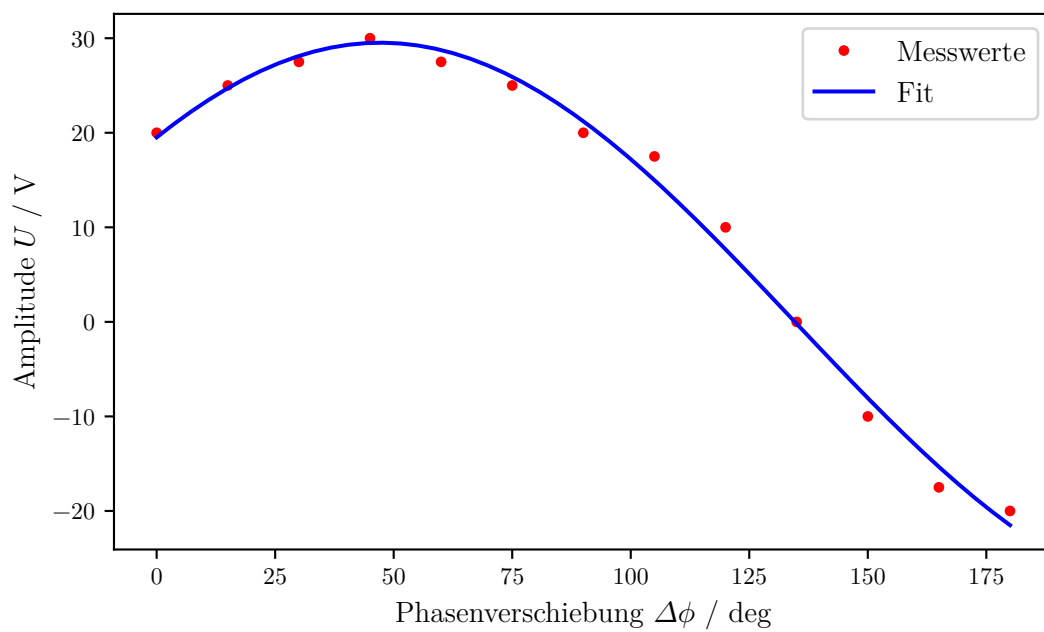


Abbildung 6: Plot und Fit der Daten der Messung mit Rauschen.

4.2 Messung von Lichtintensität einer LED und einer Photodiode

Um diesen Teil korrekt auswerten zu können werden einige Einstellungen am Gerät benötigt:

Frequenz / Hz	Verstärkung (Amplifier)		
	Pre-Amplifier	Lock-In	Tiefpass
300	100	5	2

Im Folgenden wurden die Gesamtverstärkung von 1000 bereits herausgerechnet. Es konnte keine Distanz r_{\max} bestimmt werden, ab der die Photodiode keine Spannung mehr emittierte. Daher wurde die Messung bis zum durch den Messchieber begrenzten Abstand r_{\max} von 1.3m durchgeführt.

Die Abstrahlung von einer Lichtquelle wie einer LED ist kugelförmig; daraus lässt sich die abgestrahlte Leistung als

$$P = I \cdot 4\pi r^2$$

bestimmen. So lässt sich leicht zeigen, dass für die Intensität I

$$I \sim \frac{1}{r^2}$$

gilt. Da die gemessene Spannung linear von der Intensität abhängt, gilt außerdem

$$U \sim \frac{1}{r^2}.$$

Die Spannung lässt sich insgesamt in Abhängigkeit von r als

$$U(r) = \frac{a}{(r+b)^2} + c$$

beschreiben. Die Koeffizienten lassen sich mittels Python 3.7.0 bestimmen und sind

$$\begin{aligned} a &= (0.182 \pm 0.002) \text{ mV m}^2 \\ b &= (0.0656 \pm 0.0008) \text{ m} \\ c &= (-0.080 \pm 0.001) \text{ mV} \end{aligned}$$

Das Signal wird erwartungsgemäß proportional zu $\frac{1}{r^2}$ kleiner.

Die gemessenen Werte sind in Tabelle 2 zu finden. Zur Veranschaulichung wurden diese Werte in einem Plot aufgenommen und ein Fit darübergelegt. Dieser ist in Abbildung 7 zu sehen.

Tabelle 2: Messung der Intesität einer LED an einer Photodiode.

r / m	$U_{\text{LED}} / \text{mV}$
0,1	6,560
0,2	2,640
0,3	1,180
0,4	0,700
0,5	0,500
0,6	0,230
0,7	0,192
0,8	0,156
0,9	0,140
1,0	0,130
1,1	0,116
1,2	0,059
1,3	0,052

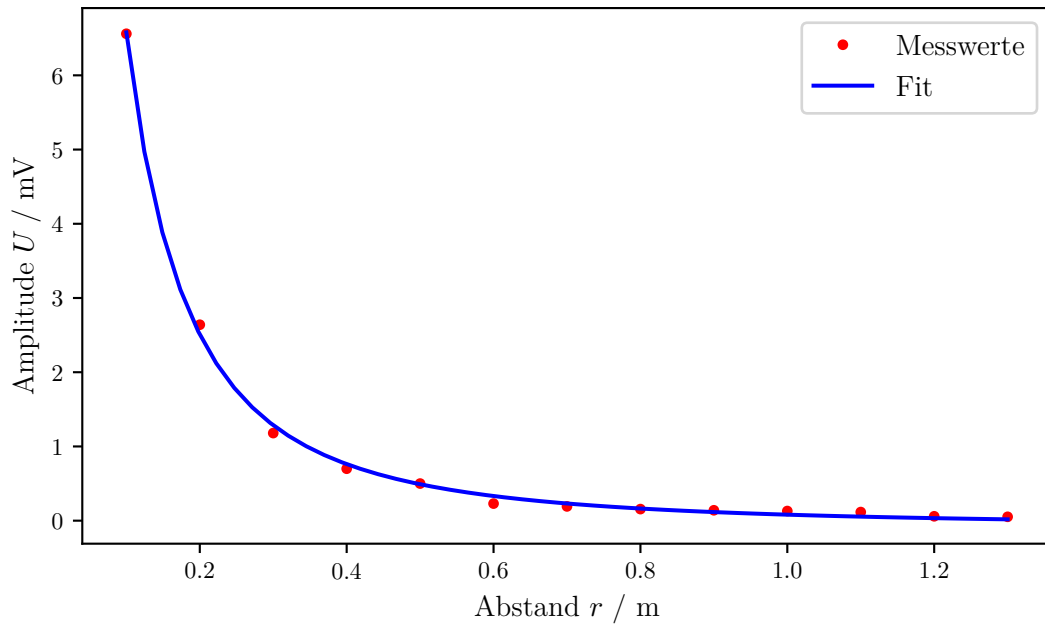


Abbildung 7: Plot und Fit der empfangen Intensität der Leuchtdiode.

5 Diskussion

Im Auswertungsteil wurde bereits auf eine Abweichung der Messwerte für U_{low} zu U_{out} hingewiesen. Des weiteren war es schwierig den in der Anleitung geforderten Wert von 10mV für U_{ref} einzustellen, daher wird dieser Wert mit einem relativ großen Fehler behaftet sein.

Bedingt durch die Größe des Phasenverschiebers am Gerät, war eine exakte Einstellung der Winkel nicht möglich, weshalb die Werte für $\Delta\phi$ nicht genau sein können. Das bedeutet des Weiteren, dass die jeweiligen $\Delta\phi$ in der Messung mit verrauschten Signal ein wenig anders sein können, als in der Messung mit unverraushtem Signal. Dennoch sind die Kurven beider Signale sehr ähnlich, weshalb dieser Fehler als eher klein eingeordnet werden kann.

Eine vermutlich größere Fehlerquelle ist die analoge Skala am Low-Pass-Filter an dem die Werte für U_{low} abgelesen wurden. Die Skala ist einerseits sehr klein, was ein Ablesen mit bloßem Auge deutlich erschwert, andererseits gibt es keine Möglichkeit die Skala einzustellen beziehungsweise zu verändern, sodass für unterschiedliche Größenordnungen dieselbe Skala verwendet werden muss. Besagter Fehler wurde in den Rechnung nicht näher betrachtet.

Die Messwerte, die mithilfe des Oszilloskop gemessen wurden, sind vergleichsweise als eher genau einzustufen, da sich diese gut einstellen ließ und mit der Cursor-Funktion konnte eine Amplitude gut abgelesen werden. Die Abbildungen auf dem Bildschirm des Oszilloskops kamen schnell zum stehen und flackerten wenig bis gar nicht.

Im zweiten Versuchsteil fällt wie bereits in der Auswertung erwähnt auf, dass es nicht möglich war ein r_{max} zu bestimmen, ab dem kein Signal mehr an der Photodiode zu erkennen war. Jedoch gibt es von 1,1m Abstand auf 1,2m Abstand einen vergleichsweise großen Sprung in der Spannung, der nicht in das restliche Schema passt. Für 1,2m auf 1,3m verhält sich dies allerdings weiterhin erwartungsgemäß. Eine Weitere Untersuchung auf eine größere Distanz war bedingt durch die Länge der Schiebeleiste nicht möglich. Eventuell war das Licht der LED ab dieser Stelle so schwach, dass es allein nicht ausgereicht hätte, damit die Photodiode ein Signal ausstößt, allerdings zusammen mit anderem Licht in dem Raum könnte die Intensität groß genug gewesen sein, dass dennoch ein Signal gesendet wurde. Ein Überprüfen desse war nicht möglich, da sich in dem Raum auch andere Menschen aufgehalten haben, die Licht benötigten. Allerdings wäre dadurch der Werte von c in der Ausgleichsrechnung von dieser Messung erklärt.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung - V303 - Lock-In Verstärker*. 2018.
- [2] Uni Göttingen. *Die Photodiode*. 2018. URL: lp.uni-goettingen.de/get/text/4741.