

V303

Der Lock-In-Verstärker

Kalina Toben

kalina.toben@tu-dortmund.de

Daniel Wall

daniel.wall@tu-dortmund.de

Durchführung: 18.12.2018

1. Abgabe: 08.01.19

2. Abgabe: 22.01.19

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
3 Durchführung	4
4 Auswertung	6
4.1 Verifizierung der Funktionsweise des Lock-In-Verstärkers	6
4.2 Überprüfung der Rauschunterdrückung mithilfe eines Photodetektors . . .	10
5 Diskussion	11
Literatur	12

1 Zielsetzung

Die Funktionsweise eines Lock-In-Verstärkers und eines phasenempfindlichen Gleichrichters wird überprüft. Außerdem wird die Rauschunterdrückung mit einer Photodetektorschaltung untersucht.

2 Theorie

Ein Lock-In-Verstärker dient zur Messung verrauschter Signale. Diese werden mit einem Referenzsignal moduliert, welches eine Referenzfrequenz ω_0 und Phase besitzt. Der Verstärker besteht aus einem Bandpass- und einem Tiefpassfilter und einem Phasenverschieber, wie in Abbildung (1) zu erkennen ist.

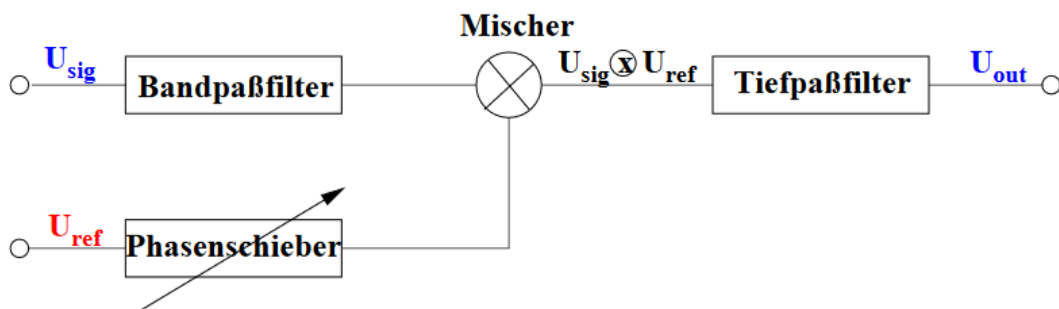


Abbildung 1: Wichtige Bestandteile eines Lock-In-Verstärker. [1, S. 1]

Zuerst wird das verrauschte Signal U_{sig} von hohen und niedrigen Frequenzen durch den Bandpassfilter befreit. Ein Mischer dient dazu, das Signal mit der Frequenz ω_0 des Referenzsignals zu multiplizieren. Mit einem Phasenverschieber kann die Phase φ des verrauschten Signals mit der Phase des Referenzsignals synchronisieren ($\Delta\varphi = 0$). Der Tiefpass ($\tau = RC \gg 1/\omega_0$) integriert das Mischsignal. Die Rauschbeiträge werden sich so weit herausmitteln, dass die Ausgangsspannung proportional zur Eingangsspannung ist ($U_{\text{out}} \propto U_0 \cos\varphi$). Wählt man die Zeitkonstante $\tau = RC$ sehr groß, kann man die Bandbreite $\nu = 1/(\pi RC)$ klein wählen. Damit kann eine hohe Güte von $Q = 100000$ erreicht werden.

Als Beispiel wird in Abbildung (2) eine sinusförmige Signalspannung mit einer Rechteckspannung, welche als eine Fourierreihe mit ungeraden Oberwellen dargestellt werden kann und die gleiche Frequenz besitzt, moduliert. Das Produkt der beiden Frequenzen enthält nur die geraden Oberwellen der Grundfrequenz ω . Wird der Tiefpassfilter so gewählt, dass er die Oberwellen unterdrückt, erhält man eine Gleichspannung proportional zur Signalspannung

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

Sind die Spannungen nicht in Phase, ergibt sich

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

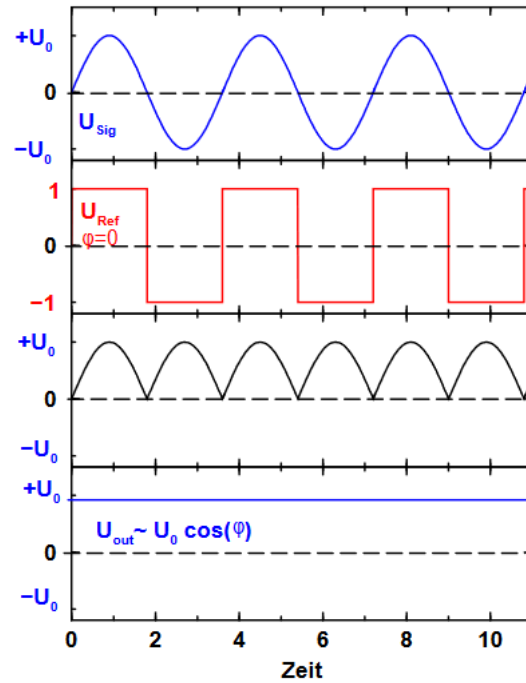


Abbildung 2: Verläufe des verrauschten Signals, der Referenzspannung, des Mischsignals, und der integrierten Spannung. [1, S. 2]

3 Durchführung

Der Lock-In-Verstärker ist in Abbildung (3) dargestellt.

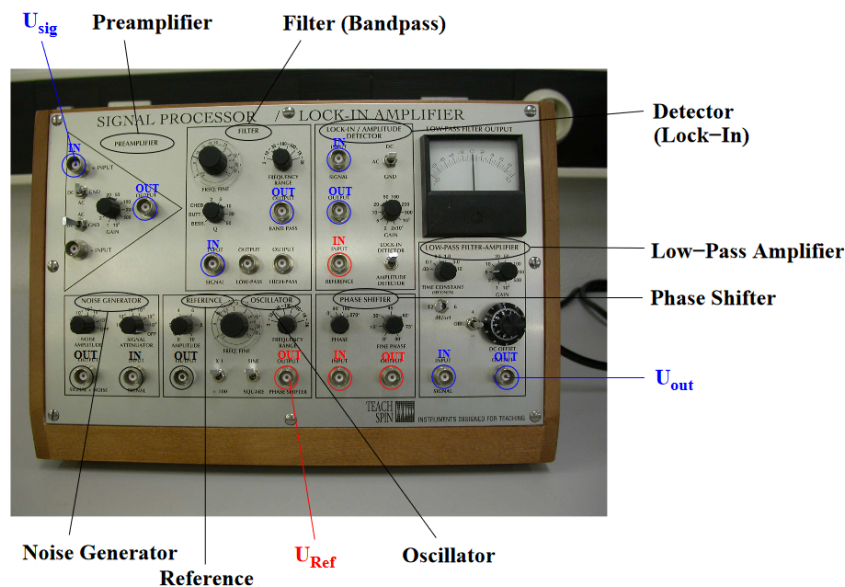


Abbildung 3: Ein Lock-In-Verstärker und seine Bestandteile. [1, S. 3]

Bestandteile sind Vorverstärker, Hoch-, Tief- und Bandpassfilter, Phasenverschieber, Funktionsgenerator, Rauschgenerator, Tiefpass-Verstärker und der Lock-In-Detektor. Ein Oszilloskop zeigt alle Signale an.

Zuerst wird eine wie in Abbildung (4) dargestellte Schaltung aufgebaut. Der Noise Generator wird auf OFF gestellt. Es wird überprüft, bei welchem Ausgang man die Spannung variieren kann, und an welchem sie konstant ist. Als nächstes wird ein sinusförmiges Signal eingestellt und der Ausgang mit einem Referenzsignal, welches auch ein Sinussignal ist, gemischt. Die Frequenz der beiden Spannungen ist identisch. Insgesamt werden für 5 verschiedene Phasen die Ausgangssignale am Oszilloskop skizziert. Anschließend wird der Tiefpass hinzugeschaltet und es werden wieder die Spannungen abgegriffen. Die Ausgangsspannung wird mindestens 10 mal in Abhängigkeit der Phasenverschiebung gemessen. Die gleiche Messung führt man noch einmal durch, diesmal mit eingeschaltetem Noise Generator.

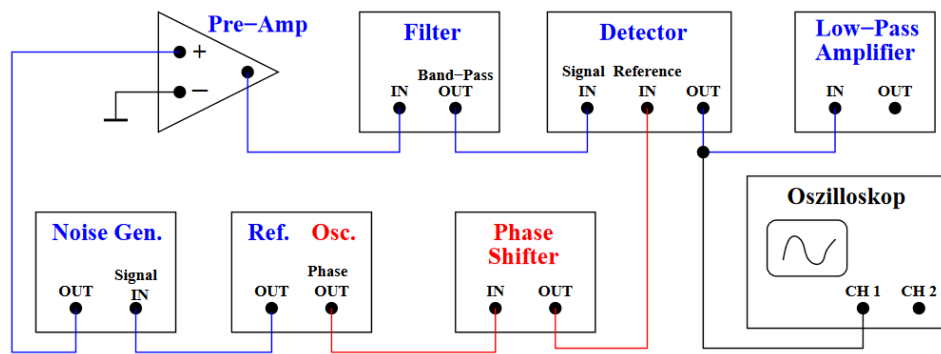


Abbildung 4: Schaltung zum ersten Versuchsteil. [1, S. 4]

Zuletzt wird eine Photodetektorschaltung wie in Abbildung (5) aufgebaut. Es wird die Lichtintensität der LED als Funktion des Abstandes zwischen Diode und LED bestimmt. Die Spannung der LED wird mit einer Rechteckspannung moduliert. Der Abstand wird immer um 5 cm verändert, und es wird solange gemessen, bis die Spannung auf Grund des zu großen Abstands nicht mehr gemessen werden kann.

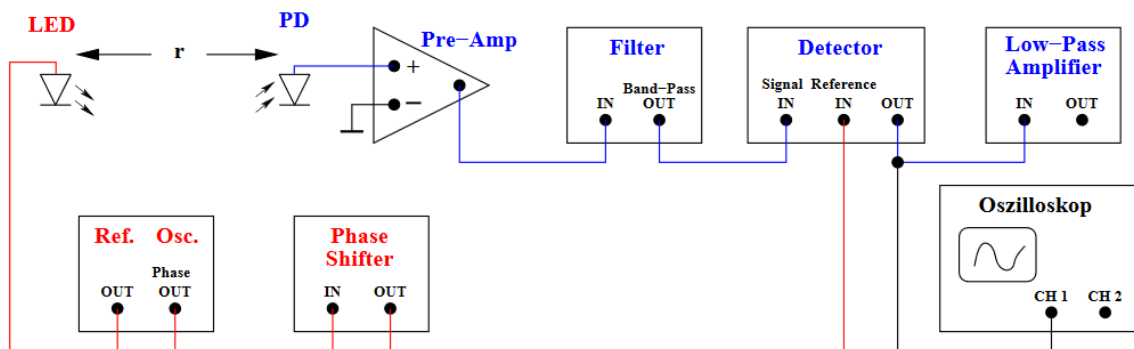
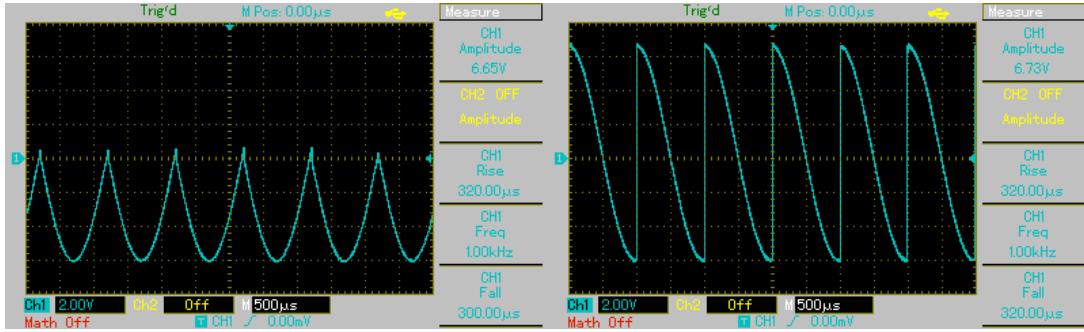


Abbildung 5: Photodetektorschaltung zum letzten Versuchsteil. [1, S. 5]

4 Auswertung

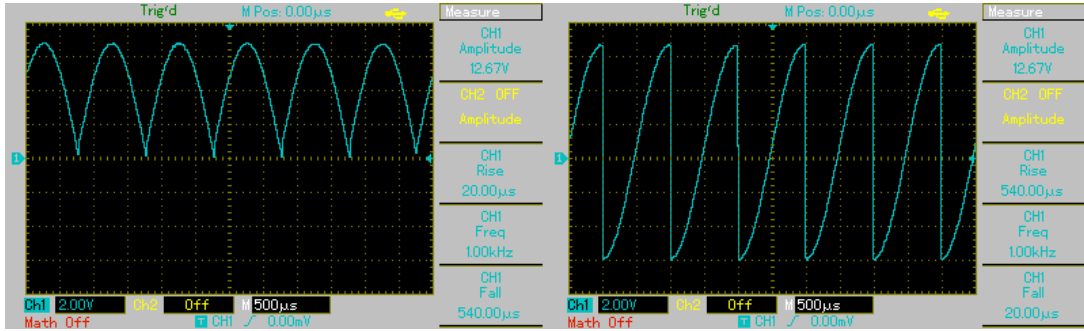
4.1 Verifizierung der Funktionsweise des Lock-In-Verstärkers

Die Spannungsverläufe werden für die Phasenverschiebungen $= 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ, 315^\circ$ gespeichert und in Abbildung 6a bis e dargestellt.



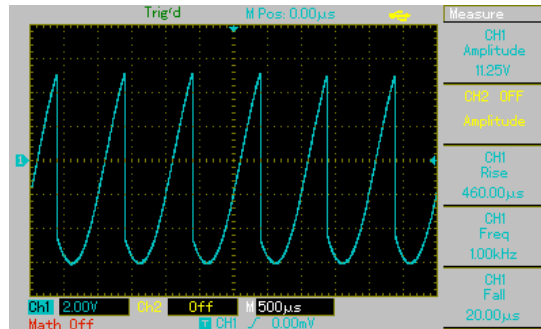
(a) Spannungsverlauf bei $= 0^\circ$

(b) Spannungsverlauf bei $= 90^\circ$



(c) Spannungsverlauf bei $= 180^\circ$

(d) Spannungsverlauf bei $= 270^\circ$



(e) Spannungsverlauf bei $= 315^\circ$

Abbildung 6: Spannungsverläufe für unterschiedliche Phasenverschiebungen φ

Die Phasenverschiebung φ und die Amplitude der Ausgangsspannung U_{out} sind in Tabelle 1 zu sehen. In Abbildung 7 sind diese gegeneinander aufgetragen.

Tabelle 1: Messdaten der Ausgangsspannung U_{out} in Abhängigkeit der Phase

$\varphi / ^\circ$	φ / rad	$U_{\text{out}} / \text{V}$	$\varphi / ^\circ$	φ / rad	$U_{\text{out}} / \text{V}$
0	0,000	-4,0	105	1,833	0,5
15	0,262	-4,0	120	2,094	1,5
30	0,524	-3,8	135	2,356	2,9
45	0,785	-3,1	150	2,618	3,8
60	1,047	-2,0	165	2,880	4,3
75	1,309	-0,8	180	3,142	4,3
90	1,571	0,0			

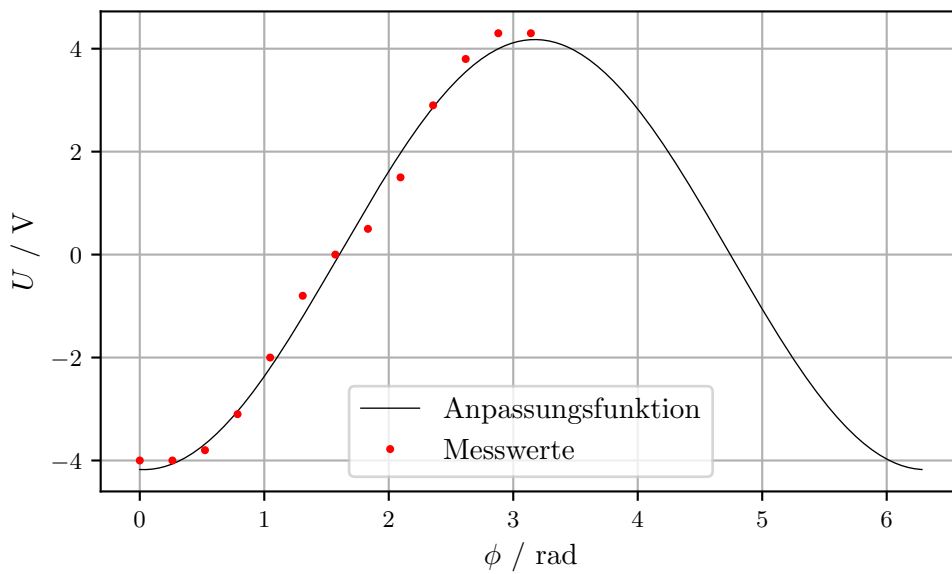


Abbildung 7: Ausgangsspannung U_{out} in Abhängigkeit der Phasenverschiebung φ .

Die Anpassungsfunktion ist nach Gleichung (2) eine cos-Funktion der Form

$$U = a \cos(x + c).$$

Die Parameter a, b, c, d ergeben sich mit Python 3.7 zu

$$a = (4,18 \pm 0,11) \text{ V},$$

$$c = (3,11 \pm 0,03),$$

.

Nach Gleichung (2) ergibt sich aus dem Parameter $a = \frac{2U_0}{\pi}$ für

$$U_0 = (6,56 \pm 0,17) \text{ V}.$$

Die Phasenverschiebung φ und die Amplitude der Ausgangsspannung U_{out} mit zugeschaltetem Störsignal sind in Tabelle 2 zu sehen. In Abbildung 8 sind diese gegeneinander aufgetragen.

Tabelle 2: Messdaten der Ausgangsspannung U_{out} in Abhängigkeit der Phasenverschiebung φ

$\varphi / ^\circ$	φ / rad	$U_{\text{out}} / \text{V}$	$\varphi / ^\circ$	φ / rad	$U_{\text{out}} / \text{V}$
0	0,000	-4,4	105	1,833	0,2
15	0,262	-4,3	120	2,094	1,3
30	0,524	-4,1	135	2,356	2,5
45	0,785	-3,5	150	2,618	3,5
60	1,047	-2,3	165	2,880	3,9
75	1,309	-1,0	180	3,142	4,0
90	1,571	-0,4			

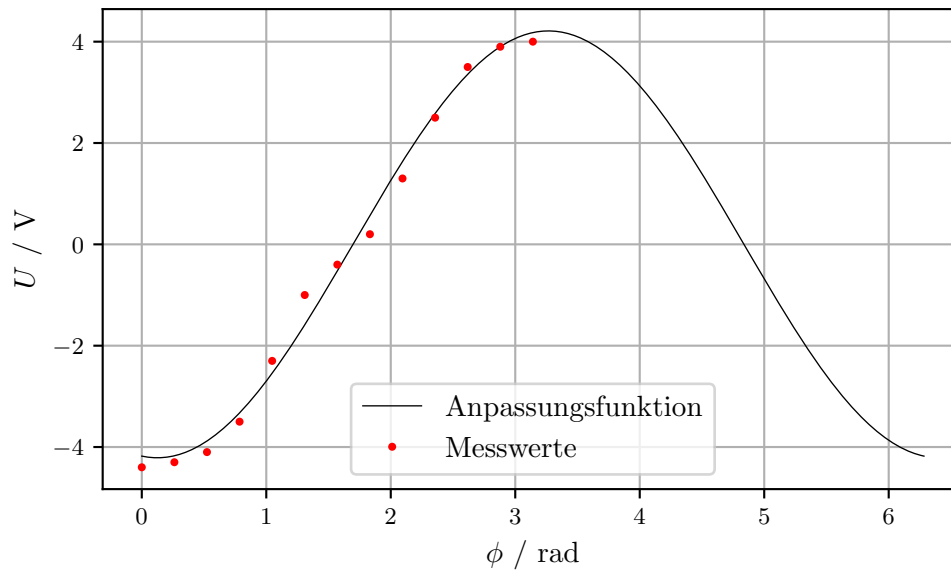


Abbildung 8: Ausgangsspannung U_{out} in Abhängigkeit der Phasenverschiebung φ bei zugeschaltetem Störsignal.

Die Anpassungsfunktion ist analog zur ersten Messreihe nach Gleichung (2) eine

cos-Funktion der Form

$$U = a \cos(x + c).$$

Die Parameter a, b, c, d ergeben sich mit Python 3.7 zu

$$\begin{aligned} a &= (4,21 \pm 0,11) \text{ V}, \\ c &= (6,16 \pm 0,03), \end{aligned}$$

Nach Gleichung (2) ergibt sich aus dem Parameter $a = \frac{2U_0}{\pi}$ für

$$U_0 = (6,62 \pm 0,17) \text{ V}.$$

4.2 Überprüfung der Rauschunterdrückung mithilfe eines Photodetektors

Die Lichtintensität U des Photodetektors und der Abstand r zwischen Diode und Detektor sind in Tabelle 3 und in Abbildung 9 zu sehen.

Tabelle 3: Messdaten der Lichtintensität U in Abhängigkeit des Abstands r

r / cm	U / V	r / cm	U / V
6	12.67	45	0.21
10	6.34	50	0.19
15	3.96	55	0.16
20	3.17	60	0.12
25	0.64	65	0.10
30	0.43	70	0.09
35	0.35	75	0.01
40	0.27	80	0.01

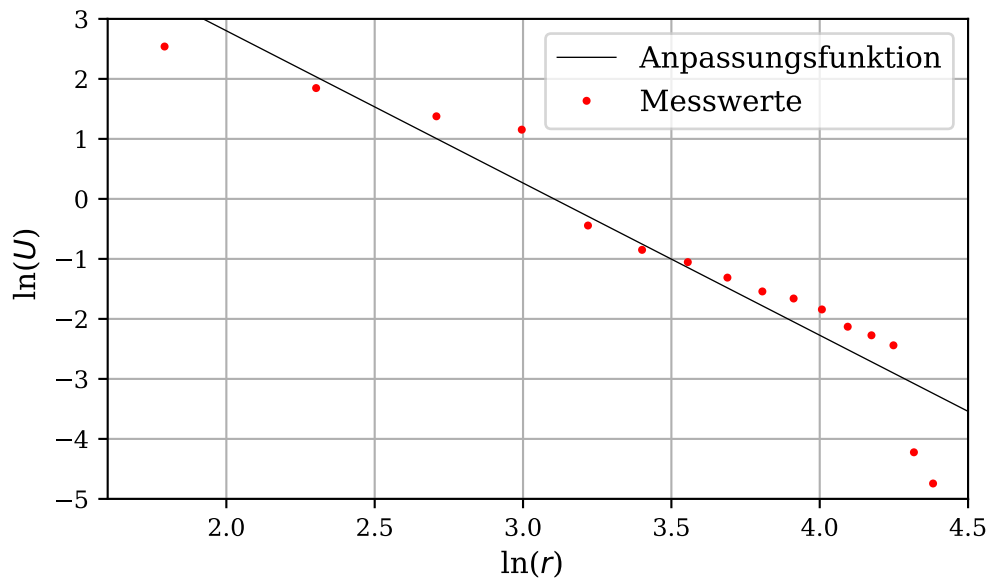


Abbildung 9: Logarithmus der Lichtintensität U des Photodetektors in Abhängigkeit des Logarithmus des Abstands r .

Die Spannung wird gegen den Abstand doppellogarithmisch aufgetragen. Die Funktion wird mit

$$U = a \cdot r + b$$

beschrieben. Die Parameter der Anpassungsfunktion ergeben sich mit Python 3.7 zu

$$a = -2,54 \pm 0,23$$

$$b = 7,88 \pm 0,81.$$

Da sich die Lichtintensität in den letzten beiden Messungen nicht verändern und diese generell zu sehr fluktuiert, wird angenommen, dass für den maximalen Abstand $r_{\max} = 80 \text{ cm}$ nicht mehr hauptsächlich die LED für die Lichtintensität verantwortlich ist, sodass für r_{\max} die Intensität $U_{\min} = 0,01 \text{ V}$ festgehalten wird.

5 Diskussion

Die Bildschirmfotos des Oszilloskops zeigen, dass sich der Spannungsverlauf mit wachsender Phasenverschiebung deutlich verändert. Nach einer Phasenverschiebung von $\varphi = \pi$ wiederholt sich das Bild in etwa, nur dass das Vorzeichen umgekehrt wird. Die tatsächlich angelegte Eingangsspannung U_0 beträgt während der Messreihen $6,45 \text{ V}$, sodass die relative Abweichung der berechneten Eingangsspannungen $1,71\%$ und $2,64\%$ beträgt. Ein

Vergleich der Ergebnisse der ersten beiden Messreihen zeigt, dass ein Lock-In-Verstärker ideal für die Unterdrückung von Störsignalen geeignet ist und in der Lage ist, die gewünschte Spannung zu verstärken.

Die Messwerte der Lichtintensität zur Überprüfung der Rauschunterdrückung mittels LED und Photodetektor sinken zwar kontinuierlich, aber in nicht in dem Maße in dem sie es sollten. Auf Grund des Abstandsgesetzes sollte die Steigung $a = -2$ betragen. Der berechnete Wert lautet $a = -2,54$, welcher um 27% vom Theoriewert abweicht. Die Vermutung liegt nahe, dass das Licht aus der Umgebung einen zu großen Einfluss auf das Experiment hat, welchem durch Abdunklung oder ähnlichem entgegen gewirkt werden könnte. Dies kann auch der Grund für die teils stark schwankenden Intensitäten sein, da alle Werte mit dem variablen Hintergrundrauschen belastet sind. Gerade ab Abständen von mehr als 80 cm überwiegt das Rauschen deutlich, sodass weitere Messungen nicht zielführend sind und abgebrochen wurden.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Anleitung zum Versuch 303, Der Lock-In-Verstärker*. 6. Jan. 2018.
URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/LockIn.pdf>.