

V303

Der Lock-In-Verstärker

Evelyn Romanjuk
evelyn.romanjuk@tu-dortmund.de

Ramona-Gabriela Kallo
ramonagabriela.kallo@tu-dortmund.de

Durchführung: 12.01.18

Abgabe: 19.01.18

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
2.1 Sinusspannung	3
3 Durchführung	5
4 Auswertung	6
4.1 Verifizierung der Funktionsweise des Lock-In-Verstärkers	6
4.1.1 Ohne Rauschsignal	6
4.1.2 Mit Rauschsignal	10
4.2 Überprüfen der Rauschunterdrückung mit einer Photodetektorschaltung .	13
5 Diskussion	15
Literatur	18

1 Zielsetzung

In diesem Versuch soll die Funktionsweise eines Lock-In-Verstärkers untersucht werden.

2 Theorie

Ein Lock-In-Verstärker (schematischer Aufbau: s. Abb 1) ist ein Verstärker mit eingebautem phasenempfindlichen Detektor. Dieser dient bei der Messung stark verrauschter Signale als extrem schmalbandiger Bandpassfilter, wodurch das Rauschen effizient gefiltert werden kann. Das Messsignal kann dazu mit einer Referenzfrequenz ω_0 moduliert werden.

Der Bandpassfilter befreit das modulierte, verrauschte Nutzsignal U_{sig} von Rauschteilen höherer ($\omega \gg \omega_0$) und niedrigerer Frequenzen ($\omega \ll \omega_0$). Als nächstes wird das Nutzsignal U_{sig} mit dem Referenzsignal U_{ref} multipliziert, welches eine variable Phase besitzt. Mit einem Phasenschieber wird die Phase des Referenzsignals vor dem Mischer variiert, um sie mit der Phase des verrauschten Signals synchronisieren zu können. Als Ergebnis folgt dann ein Tiefpass ($\tau = RC \gg \frac{1}{\omega_0}$), welcher das multiplizierte Mischsignal integrieren kann, damit die Rauschbeiträge herausgemittelt werden können.

Es ergibt sich eine proportionale Gleichspannung zur Eingangsspannung für das Signal:

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

wobei ϕ die Phasenlage zwischen den beiden Signalen ist.

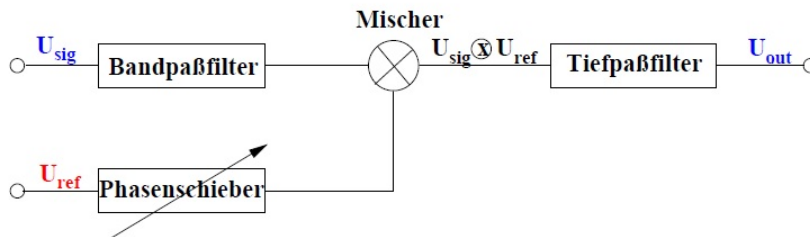


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Lock-In-Verstärkers. [1, S. 1]

Der Tiefpass definiert also die Bandbreite des Restrauschens:

$$\Delta\nu = \frac{1}{\pi RC}.$$

Dies gilt nur in dem Fall, wenn die Zeitkonstante $\tau = RC$ sehr groß gewählt wird, damit die Bandbreite beliebig klein gehalten werden kann.

2.1 Sinusspannung

Als Beispiel wird eine sinusförmige Spannung in der Abbildung (2) betrachtet. Sie ist gegeben als:

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

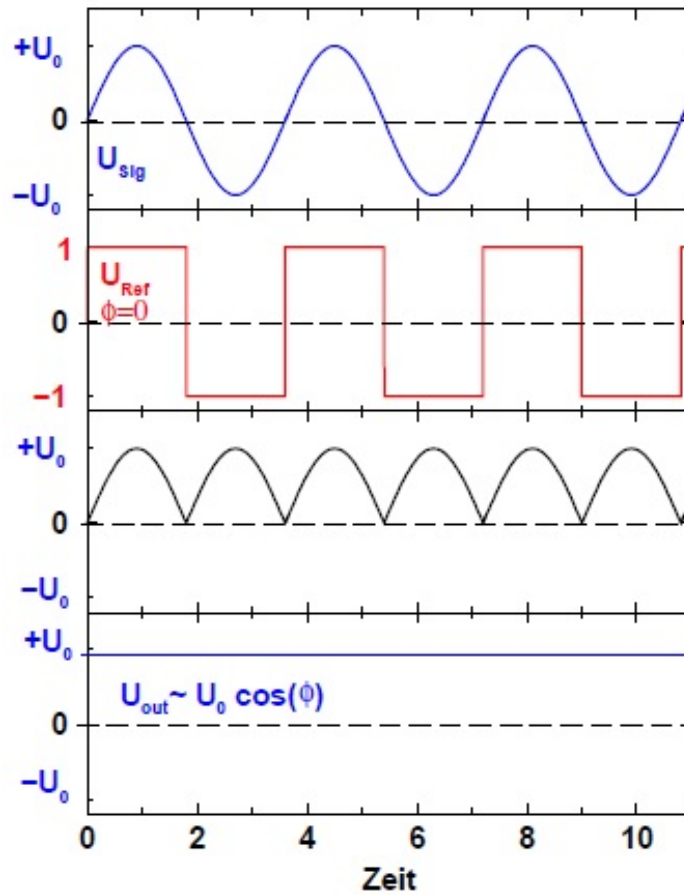


Abbildung 2: Die Signalverläufe der sinusförmigen Signalspannung: Sinusspannung(1), Referenzspannung(2), gemischte Signale(3), Ausgabesignal des Tiefpasses(4). [1, S. 2]

Es wird eine Referenzsignal verwendet, welches in diesem Fall eine Rechteckspannung mit einer auf 1 normierten Amplitude enthält. Sie kann durch die Fourier-Reihe angenähert werden:

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

Für das Produkt der beiden Signale ergibt sich:

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

wobei dieses dann die gerade Oberwelle der Grundfrequenz ω entspricht (s. Abbildung 2).

Der Tiefpass wird dann im folgenden so gewählt, dass die Oberwellen unterdrückt

werden und sich somit eine zur Signalspannung proportionale Gleichspannung ergibt:

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

Die höchste Ausgangsspannung ergibt sich bei einer Phasendifferenz der beiden Signale von $\phi = 0$.

3 Durchführung

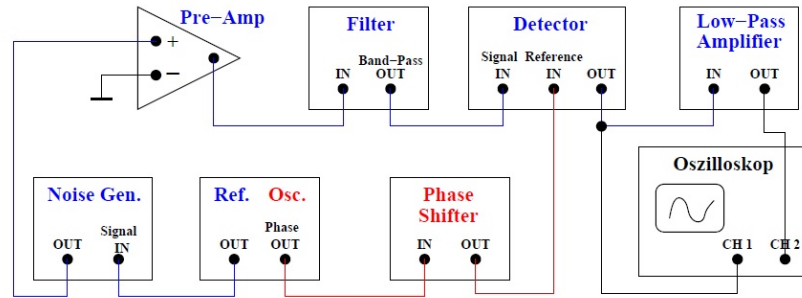


Abbildung 3: Aufbau des verwendeten Lock-In-Verstärkers im ersten Versuchsteil. [1, S. 3]

Die verwendete Messapparatur ist modular in der Abbildung 3 aufgebaut. Damit können die Komponenten einzeln untersucht werden und der Lock-In-Verstärker kann Schritt für Schritt aufgebaut werden. Zu bedienen sind der Vorverstärker, die Filter (Hoch-, Tief- und Bandpassfilter), der Phasenverschieber, ein Funktionsgenerator, ein Rauschgenerator, ein Tiefpass-Verstärker und ein Amplituden-/ Lock-In-Detektor. Mit Hilfe des Oszilloskops können dann die Signale einzeln vermessen und schematisch skizziert werden. Der Aufbau wird Schritt für Schritt gemacht, beginnend mit dem Signal Processor und nach jedem neu angeschlossenen Bauteil wird ein Bild des Oszilloskops gemacht.

Es wird zunächst mit verrauschtem und unverraushtem Signal jeweils für fünf verschiedene Phasen durchgeführt und das Ausgangssignal nach dem Tiefpass wird zehn mal in Abhängigkeit von der Phasenverschiebung untersucht. Dabei wird für diese beiden Teilversuchen eine Frequenz von ca. 1 kHz und eine Spannung von mindestens 10 mV eingestellt.

Im nächsten Versuchsteil ist der Aufbau in der Abbildung 4 zu sehen. Die Leuchtdiode wird mit einer Rechteckspannung betrieben, die Frequenz liegt in diesem Fall zwischen 50 Hz und 500 Hz. Es wird hier die Lichtintensität in Abhängigkeit des Abstandes r zwischen LED und Photodiode gemessen. Hier wird untersucht, wie groß der maximale Abstand r_{max} ist, bei dem das Licht der blinkenden Photodiode noch nachgewiesen werden kann.

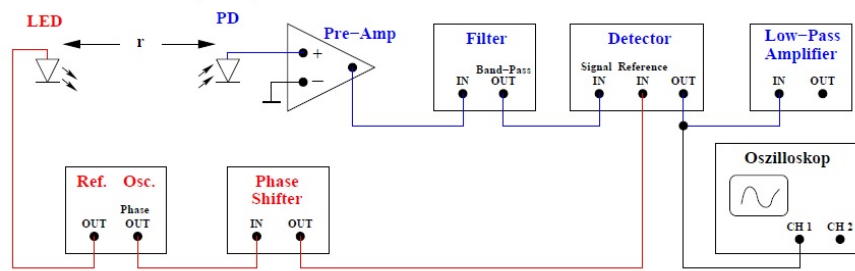


Abbildung 4: Aufbau der Photodetektorschaltung. [1, S. 4]

4 Auswertung

4.1 Verifizierung der Funktionsweise des Lock-In-Verstärkers

4.1.1 Ohne Rauschsignal

In den folgenden Abbildungen (5), (6), (7), (8) und (9) sind die Spannungen bei Phasenverschiebungen von 0° , 15° , 30° , 45° und 60° zu sehen.

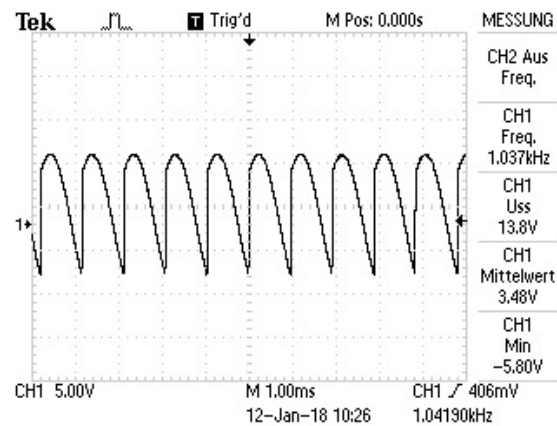


Abbildung 5: Spannungssignal bei einer Phase von 0° .

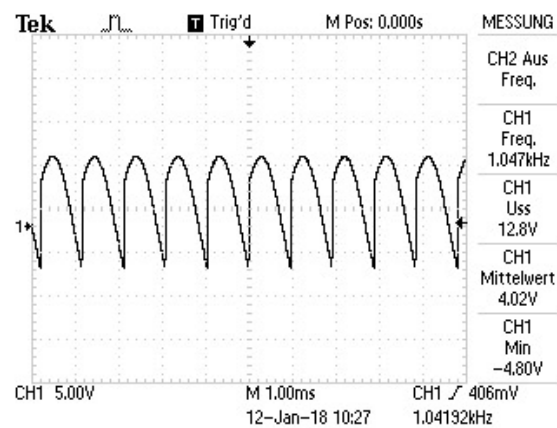


Abbildung 6: Spannungssignal bei einer Phase von 15° .

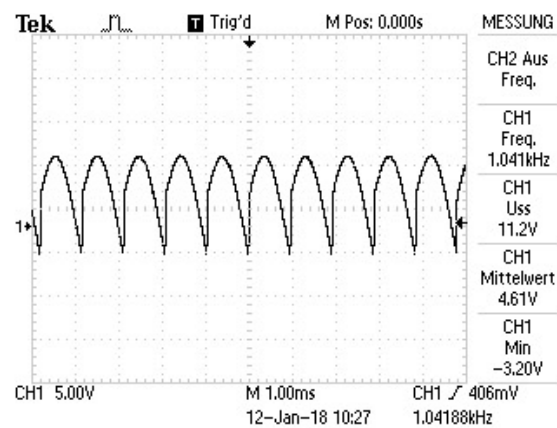


Abbildung 7: Spannungssignal bei einer Phase von 30° .

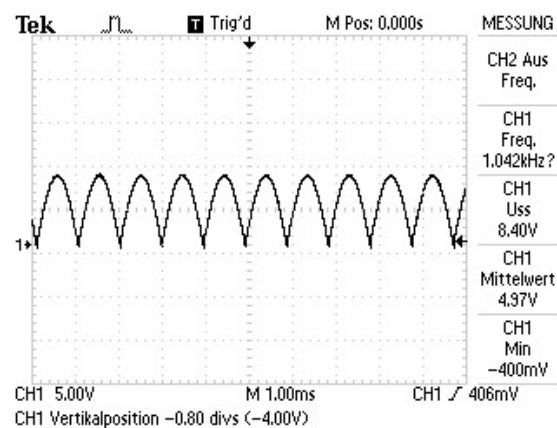


Abbildung 8: Spannungssignal bei einer Phase von 45° .

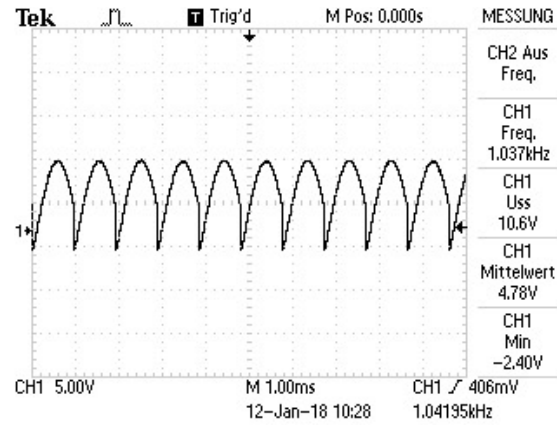


Abbildung 9: Spannungssignal bei einer Phase von 60° .

Zudem können aus Tabelle (1) die gemessenen Ausgangsspannungen zu zehn verschiedenen Phasen entnommen werden und sind weiterhin in Abbildung (10) gegeneinander aufgetragen.

Tabelle 1: Messdaten von Phasenverschiebung und Spannung, ohne Rauschsignal.

ϕ / Grad	$U / 10^{-3} \text{ V}$
0	1,3
30	-30,4
60	-66,4
90	-72,6
120	-64,5
150	-29,1
180	1,6
210	32,3
240	67,3
270	73,1

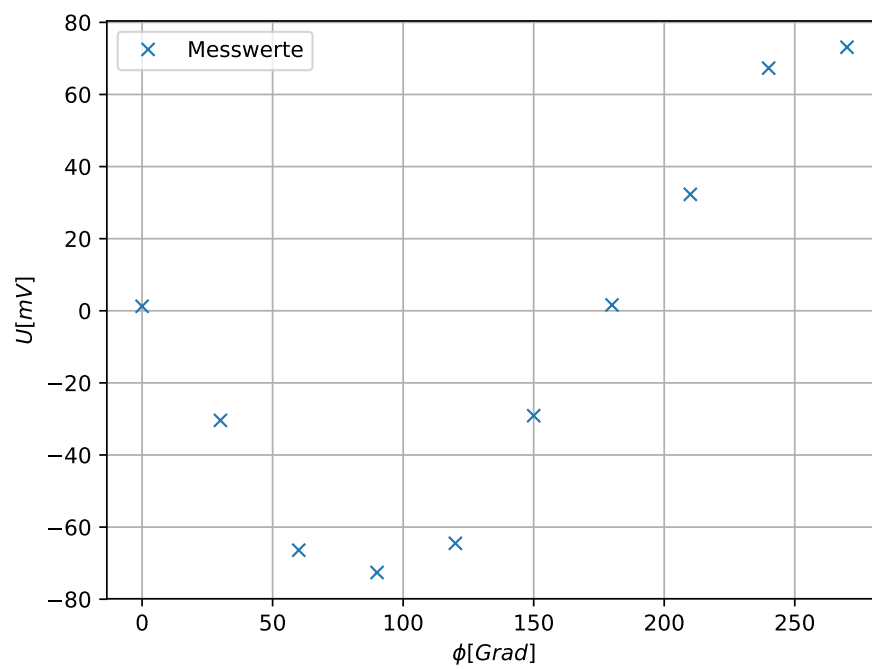


Abbildung 10: Spannung in Abhängigkeit der Phasenverschiebung, ohne Rauschsignal.

4.1.2 Mit Rauschsignal

Die Messungen werden mit einem durch ein Noise Generator erzeugtes Rauschsignal wiederholt. Es ergeben sich die in (11), (12), (13), (14), (15) zu sehenden Bilder.

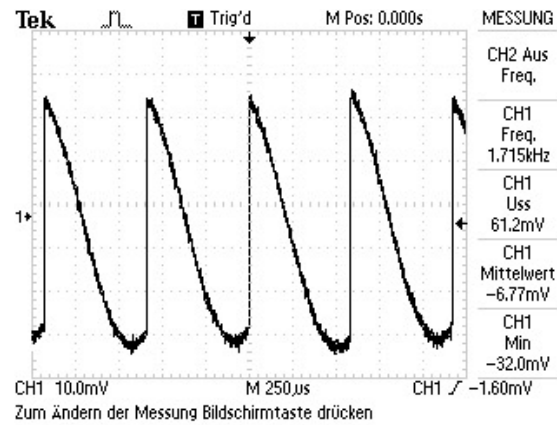


Abbildung 11: Spannungssignal bei einer Phase von 0° .

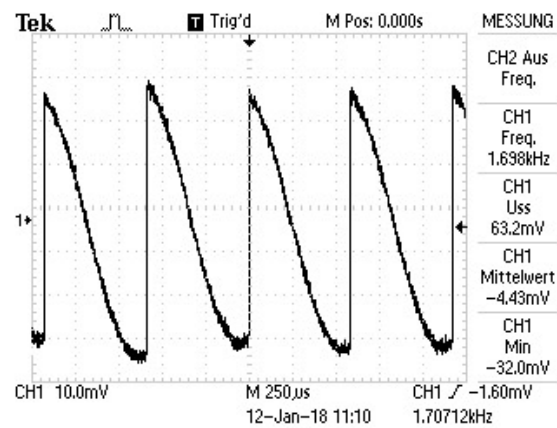


Abbildung 12: Spannungssignal bei einer Phase von 15° .

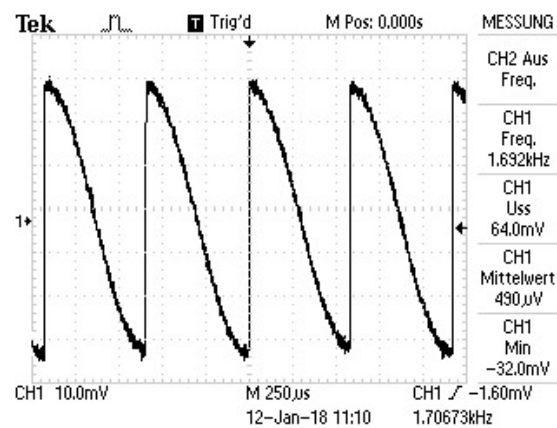


Abbildung 13: Spannungssignal bei einer Phase von 30° .

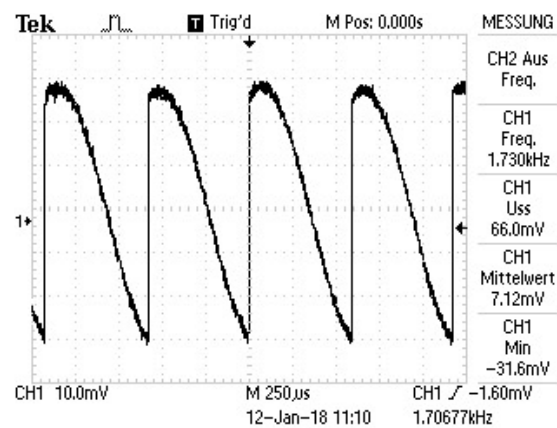


Abbildung 14: Spannungssignal bei einer Phase von 45° .

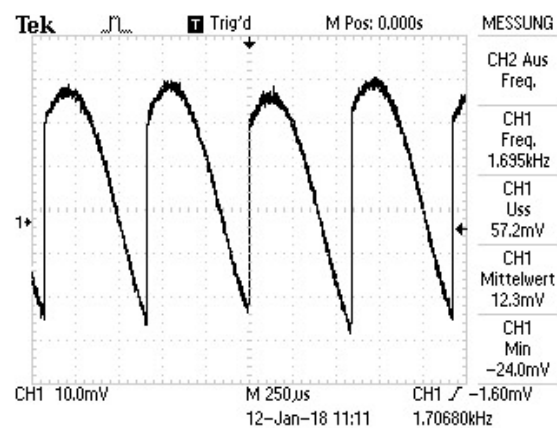


Abbildung 15: Spannungssignal bei einer Phase von 60° .

In dieser Messreihe wurden die folgenden Werte für Phasenverschiebung und Spannung genommen:

Tabelle 2: Messdaten von Phasenverschiebung und Spannung, mit Rauschsignal.

ϕ/Grad	$U/10^{-3}\text{ V}$
0	-13,3
30	3,9
60	26,9
90	35,4
120	38,4
150	28,9
180	14,6
210	-2,1
240	
270	

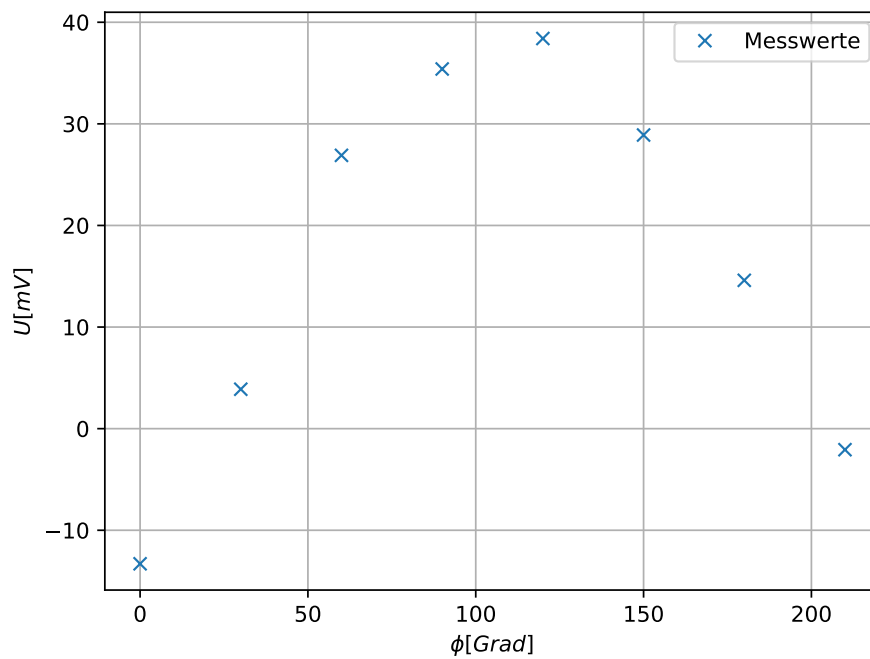


Abbildung 16: Spannung in Abhängigkeit der Phasenverschiebung, mit Rauschsignal.

4.2 Überprüfen der Rauschunterdrückung mit einer Photodektorschaltung

Die Werte für die eingestellten Abstände r sowie die abgelesenen Spannungen U sind in der nachfolgenden Tabelle zu finden.

Tabelle 3: Messdaten von Abstand und Spannung.

r/cm	$U/10^{-3}\text{ V}$
2,6	243,00
4,6	100,00
6,6	51,50
8,6	23,60
9,6	19,50
10,6	13,40
12,6	9,06
14,6	7,90
16,6	7,04
18,6	5,33
20,6	4,40
22,6	4,05
24,6	3,83
26,6	3,60
28,6	3,35
30,6	3,22
35,6	2,70
40,6	2,36
45,6	2,07
55,6	1,80
65,6	1,65

Die Werte werden, wie in Abbildung (17) zu sehen, gegeneinander aufgetragen.

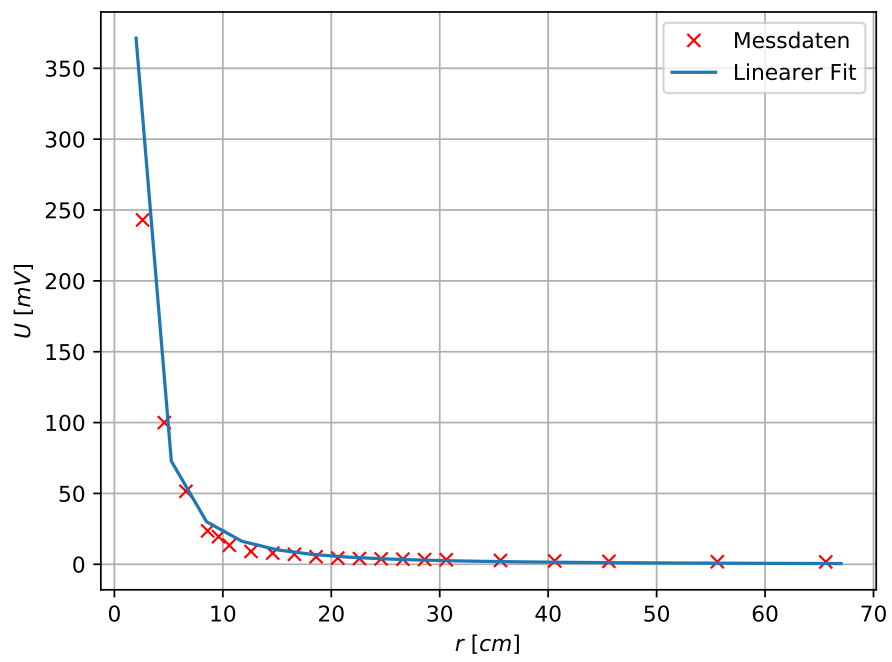


Abbildung 17: Spannung in Abhängigkeit des Abstands.

Vom Python-Modul Matplotlib wird eine Ausgleichskurve der Form $y = \frac{a}{(r+b)^2}$ angelegt. Ebenso berechnet es für a und b :

$$a = 2477,3 \pm 151,5$$

$$b = 0,583 \pm 0,104$$

Zum Ende hin ist die Steigung der Ausgleichskurve näherungsweise konstant, sodass r_{\max} , also der Abstand ab dem das Licht der Diode nicht mehr zu der gemessenen Lichtintensität beiträgt, hier auf

$$r_{\max} = 65,6 \text{ cm}$$

gesetzt werden kann.

5 Diskussion

Im ersten Versuchsteil ist die Funktion des Lock-In-Verstärkers deutlich zu sehen. Zwar zeigen die Spannungskurven der beiden Messreihen leicht unterschiedliche Formen auf, was möglicherweise an fehlerhaften Einstellungen der Messgeräte liegen könnte, aber dennoch sind bei der zweiten Messreihe trotz Rauschsignal die eigentlichen, ungestörten Spannungskurven klar zu erkennen. Somit ist die Funktionsweise des Lock-In-Verstärkers verifiziert.

Im zweiten Versuchsteil wird festgestellt, dass die Messwerte recht gut dem Abstands-gesetz entsprechen, da die meisten Werte sehr nah an der Ausgleichskurve $y = \frac{a}{(r+b)^2}$ liegen. Zu Bestimmung des maximalen Abstands müssten allerdings mehr Werte aufgenommen werden um ein eindeutiges Ergebnis zu bekommen. Da der Versuch in einem beleuchteten Raum durchgeführt wurde, hätte eine Messung ohne Photodiode gemacht werden müssen, um dadurch besser abschätzen zu können, wann der maximale Abstand erreicht ist. Alternativ könnte der Versuch auch in einem abgedunkeltem Raum gemacht werden, um ausschließlich das Licht der Diode zu erfassen.

V303 - Lock-In-Verstärker

12.01.18

$$U_0 \sin(\omega) \cdot U_1 \sin(\omega t) = U_0 U_1 \sin^2(\omega t) = U_0 U_1 (1 - \cos^2(\omega)) \\ = \left(1 - \frac{1}{2} \cos(2\omega)\right) U_0 U_1$$

Aufgabe 1

Ausgang kann die

- Bei welchem Spannungssumplitude variiert werden?
 - Reference Oscillator: Amplitude
- welche der Ausgänge liefert eine konstante Spannung?
 - wie groß ist sie?
 - 4,56 V

Aufgabe 2

- Einstellung U_{sig} : 1 kHz und 30,6 mV.
- 5 verschiedene Phasen: $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ,$
- Tiefpassfilter:

Phasenverschiebung [$^\circ$]	Spannung	
0	1,25 mV	
30	-30,4 mV	Ohne Rauschen
60	-66,4 mV	
90	-72,6 mV	
120	-64,5 mV	
150	-29,1 mV	
180	1,62 mV	
210	32,3 mV	
240	67,3 mV	
270	73,1 mV	

Abbildung 18: Originale Messdaten.

Aufgabe 3

- 5 verschiedene Phasen: $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$

Phasenverschiebung $[\circ]$	Spannung
0°	$-13,3 \text{ mV}$
30°	$3,88 \text{ mV}$
60°	$26,9 \text{ mV}$
90°	$35,4 \text{ mV}$
120°	$38,4 \text{ mV}$
150°	$28,9 \text{ mV}$
180°	$14,6 \text{ mV}$
210°	$-2,07 \text{ mV}$
240°	$-$
270°	$-$

Aufgabe 4

Abstand r	Spannung
$2,6 \text{ cm}$	243 mV
$4,6 \text{ cm}$	100 mV
$9,6 \text{ cm}$	$19,5 \text{ mV}$
$6,6 \text{ cm}$	$51,5 \text{ mV}$
$8,6 \text{ cm}$	$23,6 \text{ mV}$
$10,6 \text{ cm}$	$13,4 \text{ mV}$
$12,6 \text{ cm}$	$9,06 \text{ mV}$
$14,6 \text{ cm}$	$7,9 \text{ mV}$
$16,6 \text{ cm}$	$7,04 \text{ mV}$
$18,6 \text{ cm}$	$5,33 \text{ mV}$
$20,6 \text{ cm}$	$4,40 \text{ mV}$
$22,6 \text{ cm}$	$4,05 \text{ mV}$
$24,6 \text{ cm}$	$3,83 \text{ mV}$
$26,6 \text{ cm}$	$3,60 \text{ mV}$
$28,6 \text{ cm}$	$3,35 \text{ mV}$
$30,6 \text{ cm}$	$3,22 \text{ mV}$
$32,6 \text{ cm}$	
$35,6 \text{ cm}$	$2,70 \text{ mV}$
$40,6 \text{ cm}$	$2,36 \text{ mV}$
$45,6 \text{ cm}$	$2,07 \text{ mV}$
$55,6 \text{ cm}$	$1,80 \text{ mV}$
$65,6 \text{ cm}$	$1,65 \text{ mV}$

Abbildung 19: Originale Messdaten.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuch E2: Der Lock-In-Verstärker*. 2017. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/MEDPHYS/BACHELOR/AP/SKRIPT/LockInMP.pdf> (besucht am 14.01.2018).