

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	2
2 Theorie	2
3 Aufbau und Durchführung	5
4 Auswertung	7
4.1 Verifizierung des Funktionsweise des Lock-In-Verstärkers	7
4.2 Überprüfung der Rauschunterdrückung mit dem Photodetektor	14
5 Diskussion	16

1 Zielsetzung

Ziel des Versuches ist es die Funktionsweise eines Lock-In-Verstärker zu verstehen. Dazu wird ein Beispielsignal mit Rauschen und ohne Rauschen untersucht. Anschließend wird eine Photo-Detektor-Schaltung als Rauschen verwendet.

2 Theorie

Ein Lock-In-Verstärker besteht aus einem Bandpassfilter, einem Phasenschieber und einem Tiefpassfilter. Das eingehende, rauschende Signal U_{sig} mit der Frequenz ω_0 wird vom Bandpassfilter von hohen ($\omega \gg \omega_0$) und tiefen ($\omega \ll \omega_0$) Frequenzen befreit.

Durch den Phasenschieber wird die Spannung U_{ref} auf die geeignete Phase gebracht ($\Delta\varphi = 0$).

Am Mischer werden die beiden Signale multipliziert.

Anschließend dient ein Tiefpassfilter ($\tau = RC \gg \frac{1}{\omega_0}$) als Integrator des Mischsignals ($U_{sig} \times U_{ref}$). Die Rauschbeträge werden bei dem Vorgang weitestgehend herausgemittelt. Als Ausgangsspannung ergibt sich dann $U_{out} \propto U_0 \cos \varphi$. Durch eine große Zeitkonstante $\tau = RC$ erreicht man, dass man den Bandpass beliebig klein machen kann. So kann eine Güte von $Q = 100000$ erreicht werden. Ein einzelner Bandpass erreicht eine Güte von $Q = 1000$.

In der Abbildung 1 ist ein Signalverlauf einer Sinusspannung dargestellt ($U_{sig} = U_0 \sin(\omega t)$). Diese wird durch einen auf 1 normierte Rechteckspannung der selben Frequenz moduliert. Durch eine Fourierreihe kann die Rechteckspannung angenähert werden. Dabei werden nur die ungeraden harmonischen Grundfrequenzen genutzt.

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

Für das Produkt aus Signal- und Modulationsfrequenz werden nun die geraden Oberwellen der Grundfrequenz benutzt. Daraus ergibt sich:

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

Die Oberwellen werden wiederum vom nachgeschalteten Tiefpass unterdrückt. Daraus ergibt sich eine Gleichspannung welche proportional zum Eingangssignal ist.

$$U_{out} = \frac{2}{\pi} U_0 \cos \varphi. \quad (3)$$

Sind U_{sig} und U_{ref} in Phase, also

$$\varphi = 0,$$

ergibt sich

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

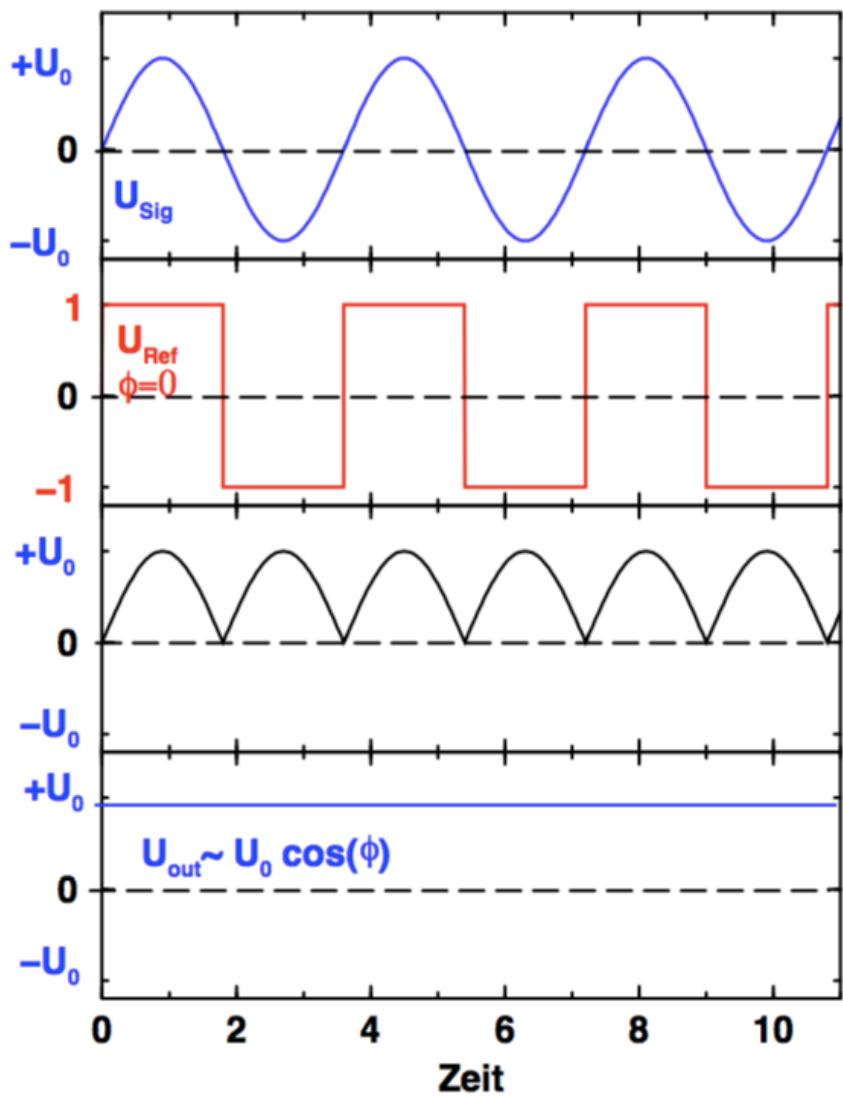


Abbildung 1: Signalverläufe [1]

3 Aufbau und Durchführung

Die Messapparatur ist wie folgt vorgegeben:

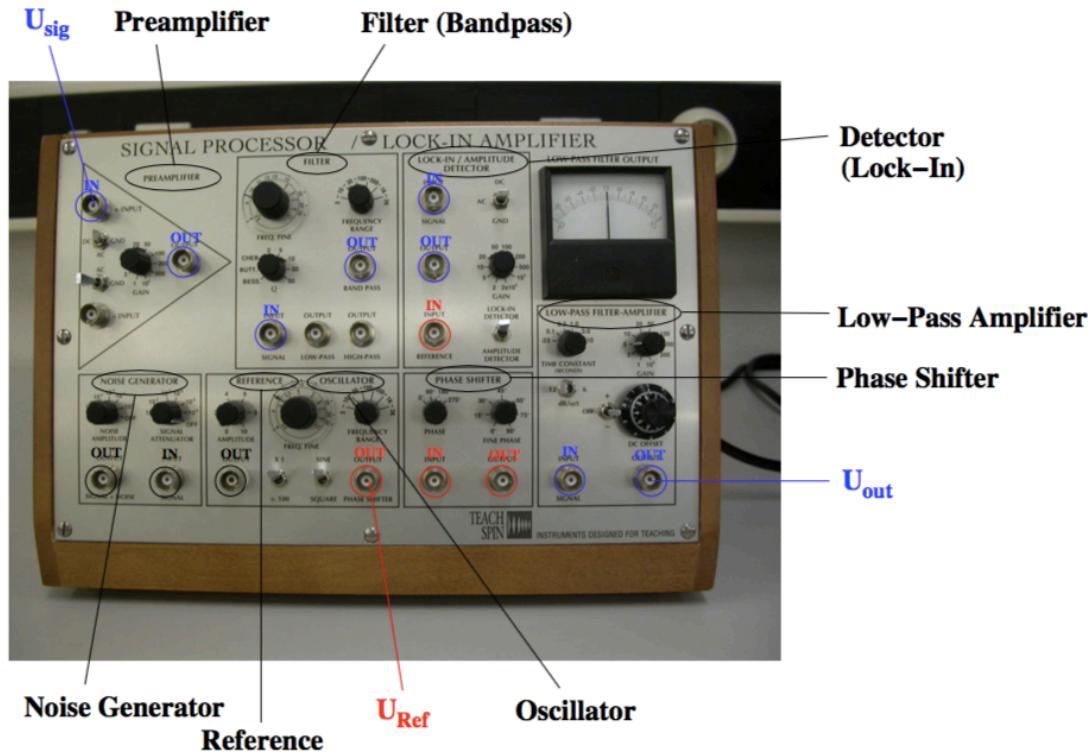


Abbildung 2: Lock-In-Verstärker [1]

Darin sind ein Vorverstärker, ein Bandpass-Filter, ein Lock-In-Detektor, ein Störgenerator, ein Funktionsgenerator, ein Phasenschieber und ein Tiefpass-Verstärker verbaut. Außerdem ist ein Oszilloskop vorhanden.

Zunächst wird geprüft, welcher Ausgang des Funktionsgenerators eine veränderliche Amplitude generiert und welcher eine konstante Amplitude generiert. Der Ausgang "Reference Out" liefert eine veränderliche Amplitude, der Ausgang "Oscillator Phase Out" gibt eine konstante Amplitude von $U_0 = 2,28 \text{ V}$.

Zur Verifizierung der Funktionsweise des Lock-In-Verstärkers wird der Versuchsaufbau zur Schaltung in Abbildung 3 gesteckt.

Der Störgenerator wird jedoch zunächst überbrückt. Es wird eine Sinusspannung U_{ref} mit dem Funktionsgenerator generiert.

Die Ausgangsspannung wird für fünf verschiedene Phasenverschiebungen gespeichert. Für zehn verschiedene Phasen wird die Amplitude gemessen und aufgetragen.

Der Störgenerator wird zugeschaltet. Die weiteren Einstellungen der Schaltung werden beibehalten. Die Amplitude wird für zehn Phasen gemessen und die Ausgangsspannungen werden für fünf Phasen gespeichert.

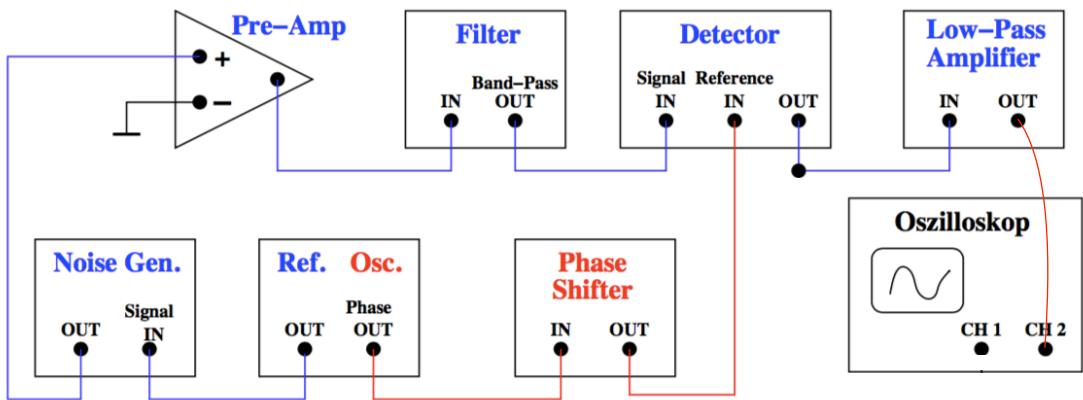


Abbildung 3: Schaltung zur Verifizierung der Funktionsweise des Lock-In-Verstärkers [1]

Für die Messung mit der Photodetektorschaltung wird eine Photodiode und ein Photodetektor in die Schaltung wie in Abbildung 4 eingebaut.

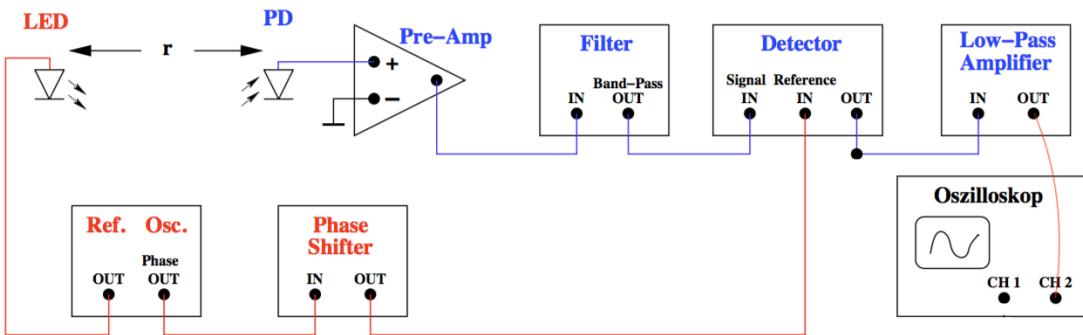


Abbildung 4: Schaltung zur Rauschunterdrückung mit dem Photodetektor [1]

Die Diode wird auf eine Frequenz von $f = 199,6\text{Hz}$ und eine Spannung von $U = 2V$ eingestellt. Die Intensität U_I wird mit dem Abstand x zur Diode gemessen.

4 Auswertung

4.1 Verifizierung des Funktionsweise des Lock-In-Verstärkers

Die Spannungen werden für die Phasenverschiebungen $\varphi = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ, 315^\circ$ gespeichert und in Abbildung 5a, Abbildung 5b, Abbildung 6a, Abbildung 6b und Abbildung 7 zu sehen.

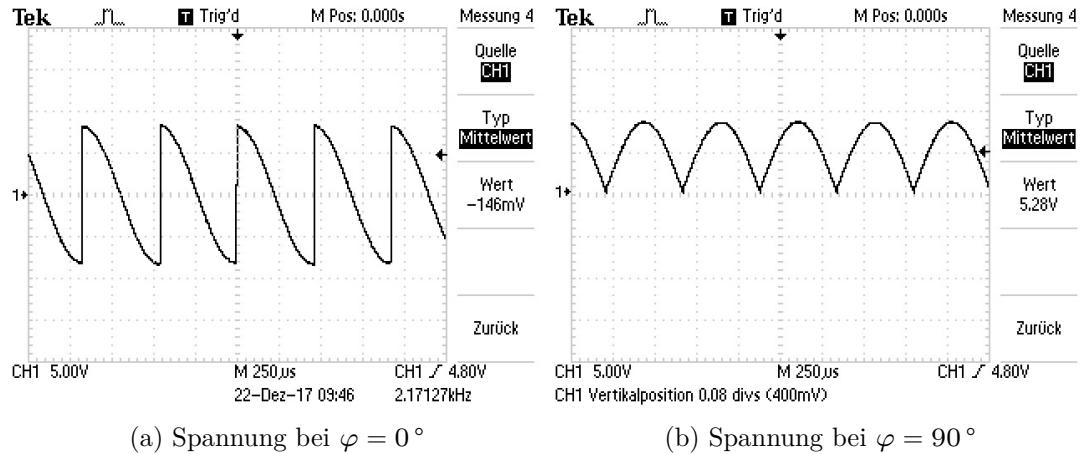


Abbildung 5: Spannungsverläufe an dem Mischer

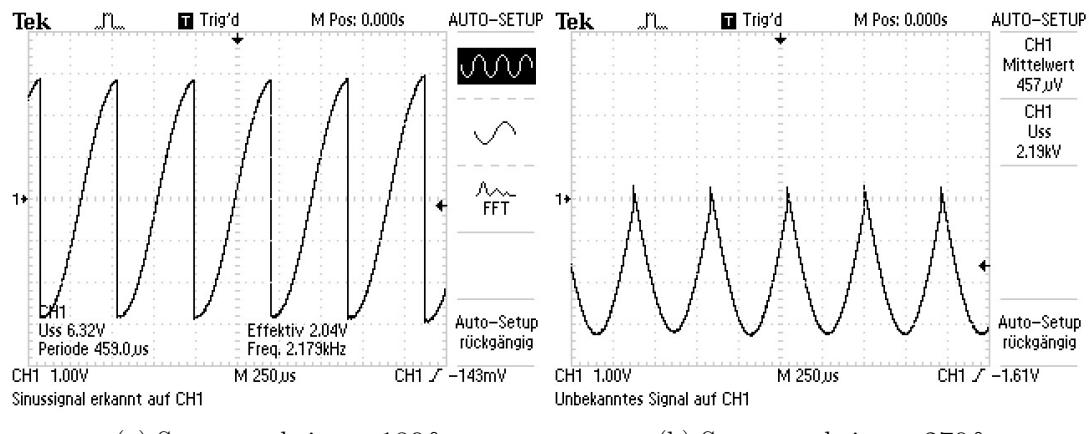


Abbildung 6: Spannungswandläufe an dem Mischer

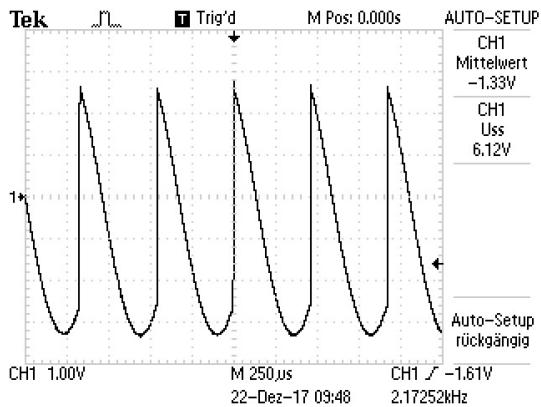


Abbildung 7: Spannung bei $\varphi = 315^\circ$

Die Phasenverschiebung und die Amplitude sind in Tabelle 1 aufgetragen. In Abbildung Tabelle 1: Erste Messreihe zur Verifizierung der Funktionsweise des Lock-In-Verstärkers

$\varphi/\text{°}$	φ/rad	A/V
0	0,000	-69,6
15	0,262	-82,0
45	0,785	-102,0
90	1,571	-76,0
135	2,356	-8,0
180	3,142	70,4
225	3,927	102,0
270	4,712	76,0
315	5,498	7,6
360	6,283	-68,8

8 ist die Phasenverschiebung φ gegen die Spannungsamplitude A aufgetragen.

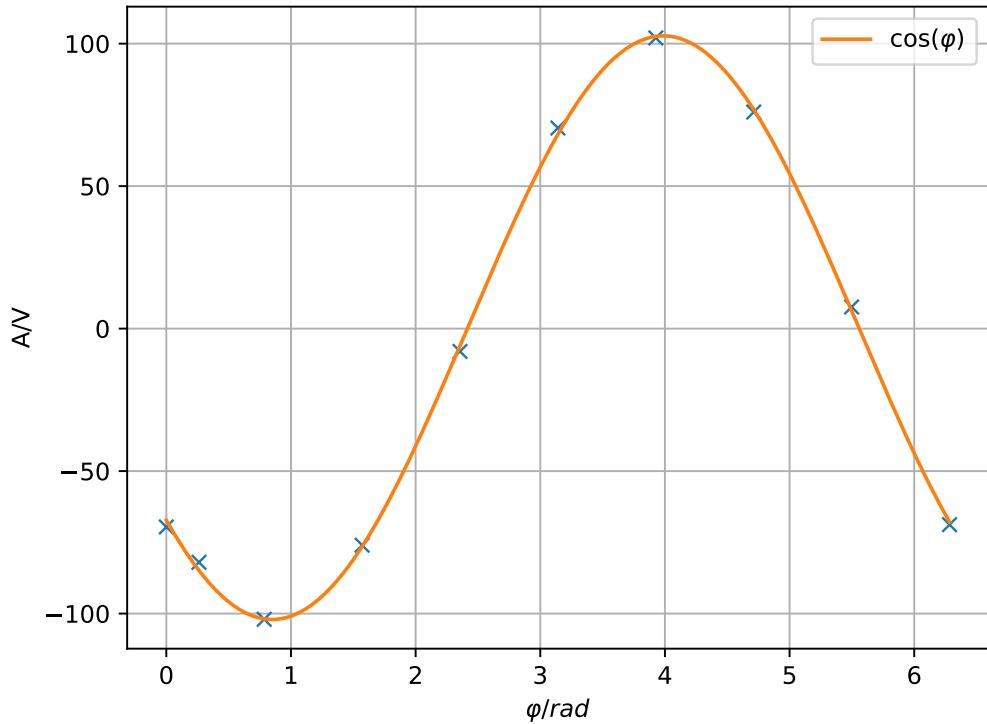


Abbildung 8: Phasenverschiebung φ gegen Spannungsamplitude A

Gefittet ist eine cos-Funktion nach Gleichung (2):

$$A = a \cos(bx + c) + d.$$

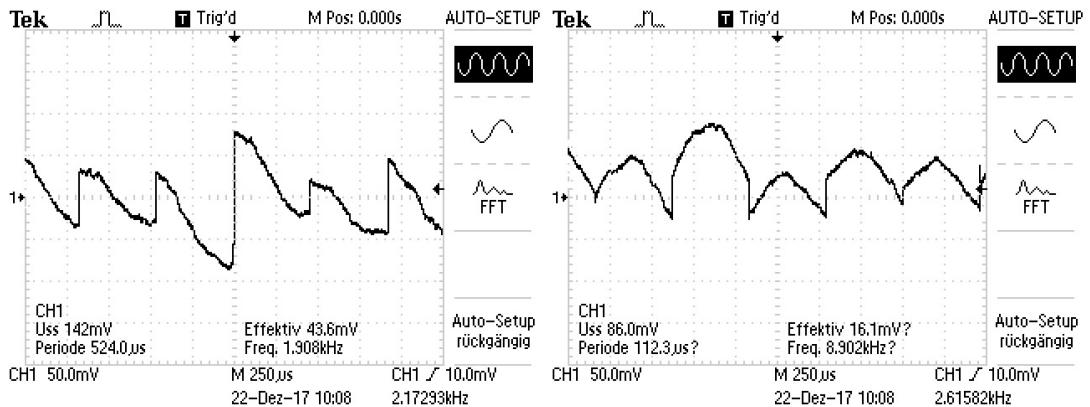
Die Parameter ergeben sich mit Python 3.6.3 zu

$$\begin{aligned} a &= (102,407 \pm 0,986) \text{ V} \\ b &= 1,001 \pm 0,005 \\ c &= 2,291 \pm 0,018 \\ d &= (0,335 \pm 0,715) \text{ V} \end{aligned}$$

Da nach Gleichung (2) $a = \frac{2\bar{U}_0}{\pi}$:

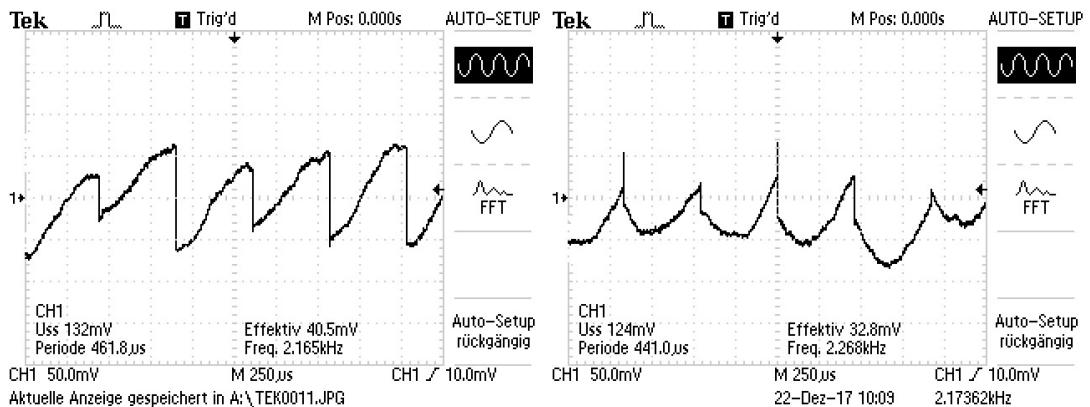
$$\bar{U}_0 = 160,861 \text{ V}$$

Die Spannungen bei den Phasenverschiebungen $\varphi = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ, 315^\circ$ mit eingeschaltetem Störgenerator sind in Abbildung 9a, Abbildung 9b, Abbildung 10a, Abbildung 10b und Abbildung 11 dargestellt.



(a) Spannung bei $\varphi = 0^\circ$ mit zugeschaltetem Rauschen (b) Spannung bei $\varphi = 90^\circ$ mit zugeschaltetem Rauschen

Abbildung 9: Spannungsverläufe an dem Mischer



(a) Spannung bei $\varphi = 180^\circ$ mit zugeschaltete- (b) Spannung bei $\varphi = 270^\circ$ mit zugeschalte-tem Rauschen tem Rauschen

Abbildung 10: Spannungsverläufe an dem Mischer

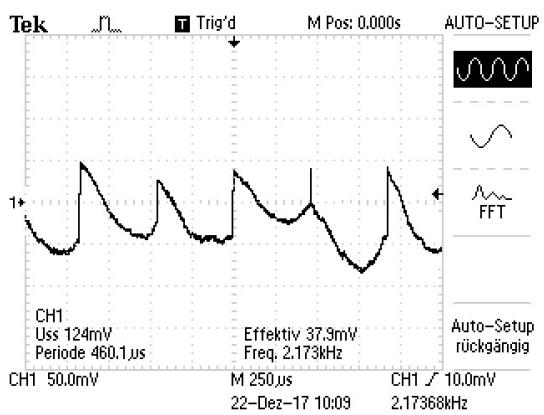


Abbildung 11: Spannung bei $\varphi = 315^\circ$ mit zugeschaltetem Rauschen

Die Messwerte zu der Amplitude und der Phasenverschiebung sind in Tabelle 2 aufgetragen.

Tabelle 2: Zweite Messreihe zur Verifizierung der Funktionsweise des Lock-In-Verstärkers

$\varphi/^\circ$	φ/rad	A/V
0	0,000	-23,2
15	0,262	4,0
45	0,785	90,0
90	1,571	154,0
135	2,356	132,0
180	3,142	24,0
225	3,927	-86,0
270	4,712	-152,0
315	5,498	-128,0
360	6,283	-24,0

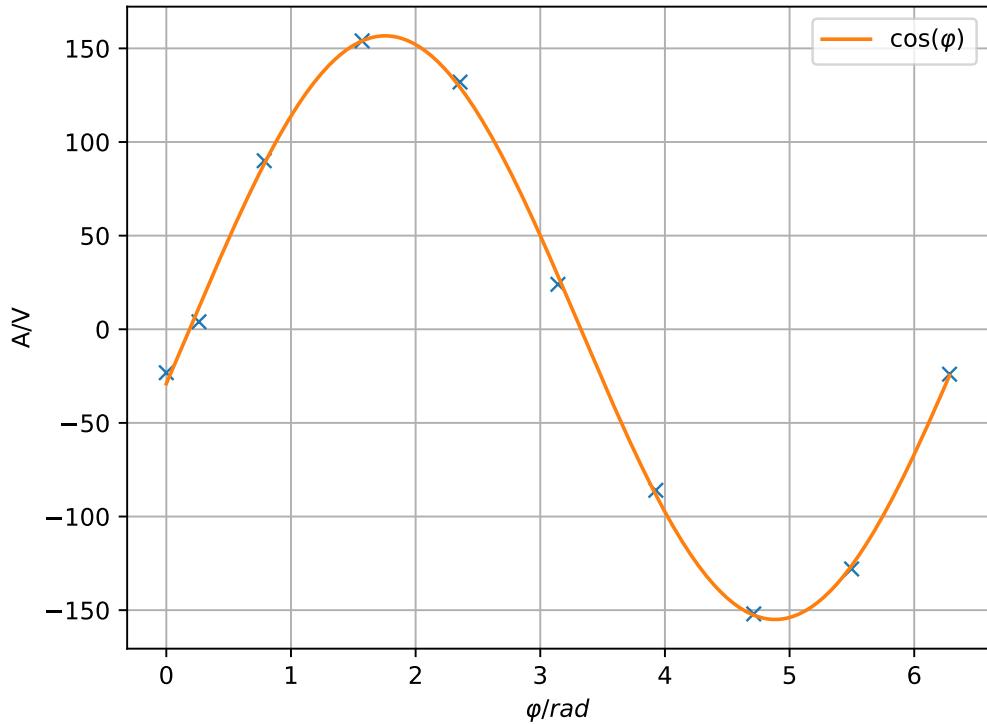


Abbildung 12: Phasenverschiebung φ gegen Spannungsamplitude A bei zugeschaltetem Rauschen

Gefittet ist analog zur ersten Messreihe eine cos-Funktion nach Gleichung (2):

$$A = a \cos(bx + c) + d.$$

Die Parameter ergeben sich mit Python 3.6.3 zu

$$\begin{aligned} a &= (-155,843 \pm 2,400) \text{ V} \\ b &= -1,004 \pm 0,006 \\ c &= -13,944 \pm 0,020 \\ d &= (0,864 \pm 1,584) \text{ V}. \end{aligned}$$

Nach Gleichung (2) entspricht $a = \frac{2\bar{U}_0}{\pi}$:

$$\bar{U}_0 = 244,798 \text{ V}.$$

4.2 Überprüfung der Rauschunterdrückung mit dem Photodetektor

Die Intensität U und der Abstand x zwischen der Diode und dem Detektor sind in Tabelle 3 und in Abbildung 13 zu finden.

In der Abbildung 13 wird die Funktion mit

$$U = a \frac{1}{x^2} + b$$

angenähert.

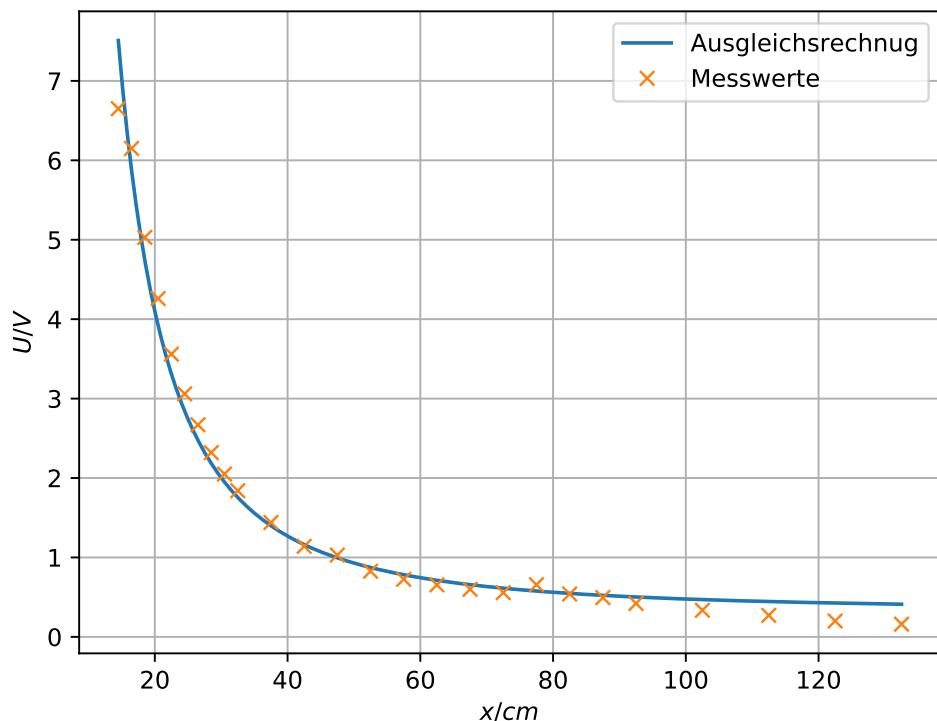


Abbildung 13: Intensität

Die Parameter der gefitteten Funktion lauten:

$$a = (1510,245 \pm 39,012) \text{ Wcm}^2$$

$$b = (0,325 \pm 0,061) \text{ W}$$

Der genaue, maximale Abstand kann nicht angegeben werden, da die Möglichkeiten der Messapparatur vollständig ausgeschöpft wurden. Die Steigung im Graphen ist bei den letzten Messungen annähernd konstant, daher wird

$$x_{max} = 132,5 \text{ cm}$$

Tabelle 3: Messung der Intensität mit der Photodetektorschaltung

x/cm	U/V	x/cm	U/V
2,5	4,190	30,5	2,050
3,5	4,440	32,5	1,840
4,5	4,710	37,5	1,440
5,5	4,940	42,5	1,140
6,5	5,280	47,5	1,030
7,5	5,570	52,5	0,827
8,5	5,690	57,5	0,725
9,5	5,920	62,5	0,655
10,5	6,180	67,5	0,599
11,5	6,370	72,5	0,557
12,5	6,550	77,5	0,657
14,5	6,650	82,5	0,540
16,5	6,150	87,5	0,495
18,5	5,030	92,5	0,421
20,5	4,260	102,5	0,335
22,5	3,560	112,5	0,271
24,5	3,060	122,5	0,200
26,5	2,670	132,5	0,160

mit der Intensität $U_I = 0,160 \text{ V}$ gewählt.

5 Diskussion

Der Versuch zeigt, dass ein Lock-In-Verstärker Störfrequenzen aus einer Spannung filtert und die gewünschte Spannung deutlich verstärkt. Die erste Messreihe zeigt die Spannungsverläufe ohne Störsignal. Werden diese Bilder der Spannungsverläufe mit den Spannungsverläufen mit Störsignal verglichen, fällt das Rauschen in den Bildern auf, aber die Form der ungestörten Spannung ist eindeutig wiederzuerkennen. Für beide Messreihen werden die Spannungsverläufe in Abhängigkeit der Phasenverschiebung φ gemessen. Daraus ergibt sich ein Wert für die Eingangsspannung U_0 :

$$\begin{aligned}\overline{U_{0,\text{ref}}} &= & 160,861 \text{ V} \\ \overline{U_{0,\text{rausch}}} &= & 244,798 \text{ V.}\end{aligned}$$

Die tatsächliche Eingangsspannung U_0 liegt bei

$$U_0 = 2,28 \text{ V.}$$

Aus dem Verhältnis der gemessenen Eingangsspannungen und der tatsächlichen Eingangsspannung lässt sich die Verstärkung abschätzen.

$$\begin{aligned}\frac{\overline{U_{0,\text{ref}}}}{U_0} &= & 70,55 \\ \frac{\overline{U_{0,\text{rausch}}}}{U_0} &= & 107,37.\end{aligned}$$

Die Messwerte zur Überprüfung der Rauschunterdrückung mit der Photodetektorschaltung sind teilweise stark verfälscht und werden daher nicht weiter beachtet. Das Problem ist, dass die Messwerte zunächst fallen und dann wieder ansteigen, dies entspricht aber nicht den physikalischen Gesetzmäßigkeiten. Die Vermutung liegt nahe, dass eine Lichtquelle, die nicht in das Experiment gehört, einen Einfluss auf den bewegten Photodetektor hat. Ein ähnliches Problem führt ebenfalls zu stark schwankenden Werten der Intensität. Das Ausschalten der Raumbeleuchtung zwischen der Aufnahme zweier Werte zeigt, dass die Raumbeleuchtung zu spontanen Intensitätschwankungen von mehr als $U = 0,08 \text{ V}$ führt. Die Werte werden kontinuierlich mit dem Hintergrundrauschen der Raumbeleuchtung aufgenommen. Als maximaler Abstand wird

$$x_{\max} = 132,5 \text{ cm}$$

gemessen.

Literatur

- [1] TU Dortmund. In: *Versuchsanleitung V303*.

V303

Messreihe 1

- | | Amplitude | Phase |
|-----------------------|-----------|---------------------------------|
| • konstante Spannung: | Output | Phase shifter 2,28 V |
| • variable Spannung: | Output | Reference |

~~Winkelgrad~~

Messreihe 2

~~Winkelgrad~~ $\phi/^\circ$ ~~A~~ $\phi/^\circ$

A

0

-69,6 mV

15

-76,0 mV

45

70,4 mV

90

76,0 mV

180

7,6 mV

270

315

360

0

15

45

90

135

180

225

270

315

360

-69,6 mV

-102 mV

-76,0 mV

-8,00 mV

70,4 mV

102 mV

76,0 mV

7,6 mV

-68,8 mV

< -82,0 mV

Abbildung 14: Originale Messdaten

Messreihe 3

<u>ϕ</u>	<u>A</u>
0	-23,2 mV
15	4,00 mV
45	90 mV
80	154 mV
135	132 mV
180	* 24,0 mV
225	-86,0 mV
270	-152 mV
315	-128 mV
360	-24,0 mV

✓

Messreihe 4

$$f = \cancel{8000 \text{ Hz}} \quad 109,6 \text{ Hz}, \quad U = 2V$$

~~109,6 Hz V~~

<u>r in cm</u>	
0	2,85
1	3,5
2	4,5
3	5,5
4	6,5
5	7,5
6	8,5
7	9,5
8	10,5
9	11,5
10	12,5

✓

Abbildung 15: Originale Messdaten

11	14,5	6,65V
12	16,5	6,15V
13	18,5	5,03V
14	20,5	4,26V
15	22,5	3,56V
16	24,5	3,06V
17	26,5	2,67V
18	28,5	2,32V
19	30,5	2,05V
20	32,5	1,84V
21	37,5	1,44 V
22	42,5	1,14 V
23	47,5	1,03V
24	52,5	0,827V
25	57,5	0,725V
26	62,5	0,655V
27	67,5	0,599V
28	72,5	0,557V
29	77,5	0,657V
30	82,5	0,540V
31	87,5	0,495V
32	92,5	0,421V
33	102,5	0,335V
34	112,5	0,271V
35	112,5	0,200V
36	132,5	0,160V

jet

Abbildung 16: Originale Messdaten