

# **Versuch 303 "Der Lock-In-Verstärker"**

Robert Konradi  
robert.konradi@tu-dortmund.de

Lauritz Klünder  
lauritz.kluender@tu-dortmund.de

Durchführung: 22.12.2017, Abgabe: 12.01.2018

TU Dortmund – Fakultät Physik

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Durchführung</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Auswertung</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Diskussion</b>	<b>14</b>
	<b>Literatur</b>	<b>15</b>

## 1 Theorie

Ein Lock-In-Verstärker wird verwendet um stark verrauschte Signale zu detektieren. Dazu muss die Referenzfrequenz allerdings bekannt sein.

Der Aufbau eines Lock-In-Verstärkers ist in Abbildung (1) schematisch dargestellt. Zunächst geht das Nutzsignal  $U_{\text{sig}}$  durch einen Bandpassfilter, welcher die Rauschanteile die eine höhere oder niedrigere Frequenz als die Referenzfrequenz haben herausfiltert. Der Bandpassfilter ist nicht genau, wodurch eine Bandbreite an Frequenzen übrig bleibt. Daraufhin wird das gefilterte Nutzsignal in einem Mischer gemischt, mit einem Referenzsignal  $U_{\text{ref}}$  was die Referenzfrequenz als Frequenz hat. Dabei werden die beiden mathematischen Funktionen der Signale multipliziert. Beim Mischen kommt es darauf an ob die beiden Signale in Phase sind oder Phasenverschoben sind.

Zuletzt geht das gemischte Signal durch einen Tiefpass. Ein Tiefpass kann unter der Voraussetzung  $RC \gg \frac{1}{\omega_0}$  als Integrator wirken. Diese Voraussetzung ist beim Lock-In-Verstärker gegeben. Durch das Integrieren ergibt sich für das Ausgangssignal

$$U_{\text{out}} = AU_0 \cos(\phi). \quad (1)$$

Dabei ist die Phasenverschiebung zwischen  $U_{\text{sig}}$  und  $U_{\text{ref}}$ . Für den Spezialfall, dass  $U_{\text{sig}}$  und  $U_{\text{ref}}$  sinusförmig sind ergibt sich Gleichung (1) zu

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

Mit dem Tiefpass am Ende lässt sich die Bandbreite des Restrauschens einstellen, indem die Zeitkonstante  $RC$  groß gemacht wird, denn es gilt die Beziehung  $\Delta\nu = \frac{1}{\pi RC}$ .

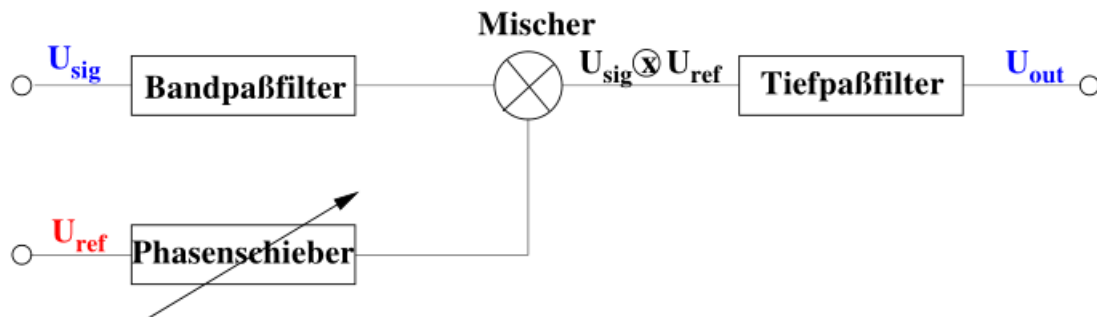


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Lock-In-Verstärkers [1].

## 2 Durchführung

Für diesen Versuch wird ein modular aufgebauter Verstärker verwendet. Dieser besteht aus einem Vorverstärker, den Filtern, einen Phasenschieber, einem Funktionsgenerator, einem Rauschgenerator, einem Tiefpass-Verstärker und einem Amplituden-/Lock-In-Detektor. Dieser Verstärker ist in Abbildung (2) dargestellt.

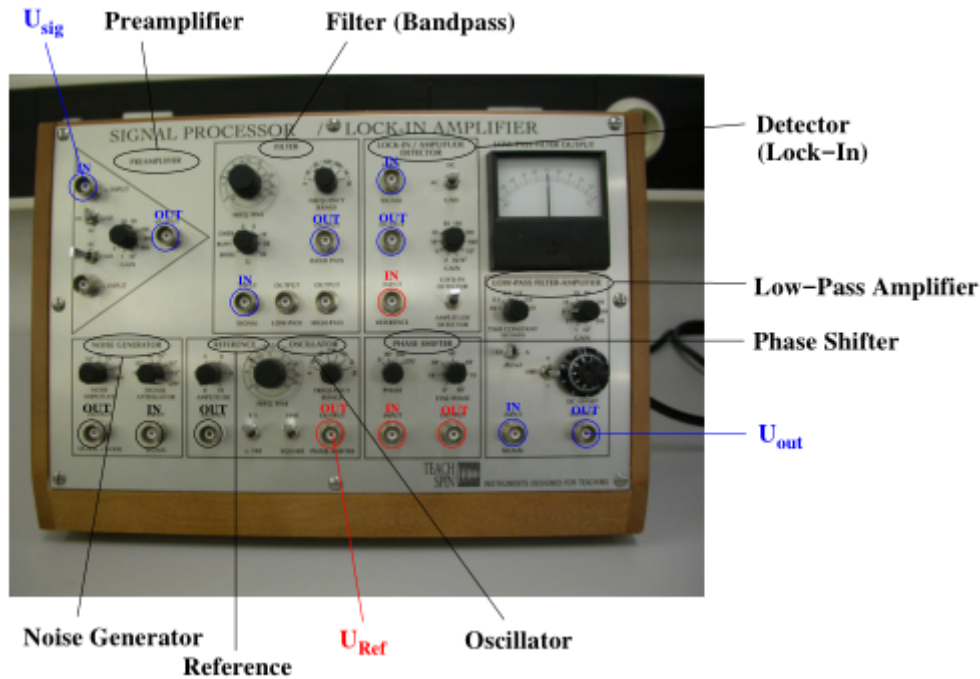


Abbildung 2: Darstellung des modular aufgebauten Verstärkers [1].

Als erstes soll der Funktionsgenerator untersucht werden. Dabei wird untersucht bei welchem Ausgang die Spannungsamplitude verändert werden kann und bei welchem das nicht möglich ist. Der Ausgang bei dem das nicht möglich ist, ist für das Referenzsignal. Daraufhin soll die in Abbildung (3) gezeigte Schaltung gebaut werden. Der Funktionsgenerator soll ein sinusförmiges Signal als Nutzsignal und ein sinusförmiges Signal als Referenzsignal produzieren. Die resultierende Spannung wird erst ohne den Tiefpass auf einem Oszilloskop dargestellt und danach mit dem Tiefpass.

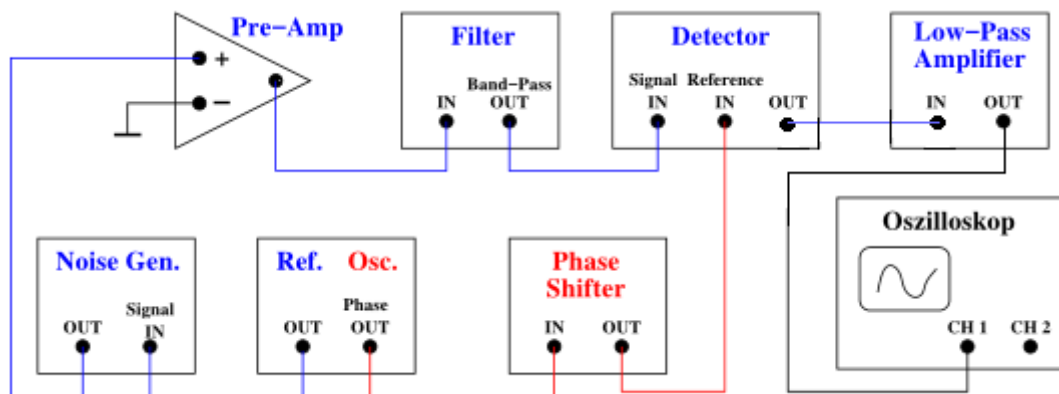


Abbildung 3: Schaltung des Lock-In-Verstärkers für den ersten Teil des Versuches [1].

Als nächstes wird mit dem Rauschgenerator ein Rauschsignal hinzugegeben. Für diesen Fall wird wieder die resultierende Spannung erst ohne den Tiefpass dargestellt und danach mit dem Tiefpass.

Zum Schluss wird die Intensität einer Leuchtdiode gemessen. Dazu wird die in Abbildung (4) gezeigte Schaltung benötigt. Die Leuchtdiode soll mit einer Frequenz von 50 Hz bis 500 Hz blinken und das Signal wird von einer Photodiode empfangen. Nun wird die Intensität des Lichtes in gewissen Abständen gemessen.

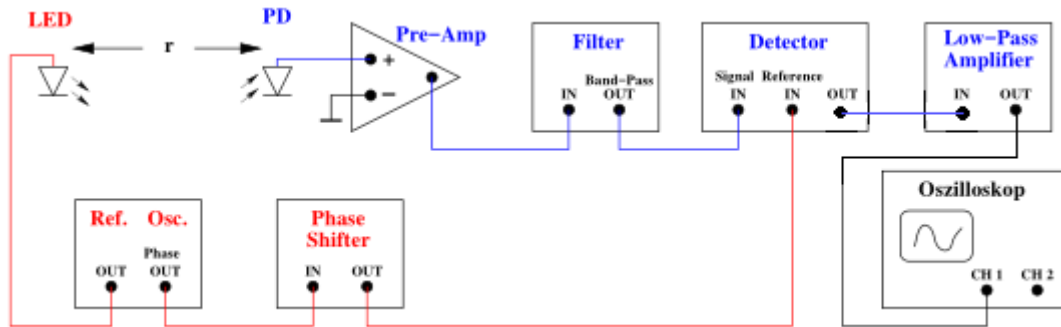


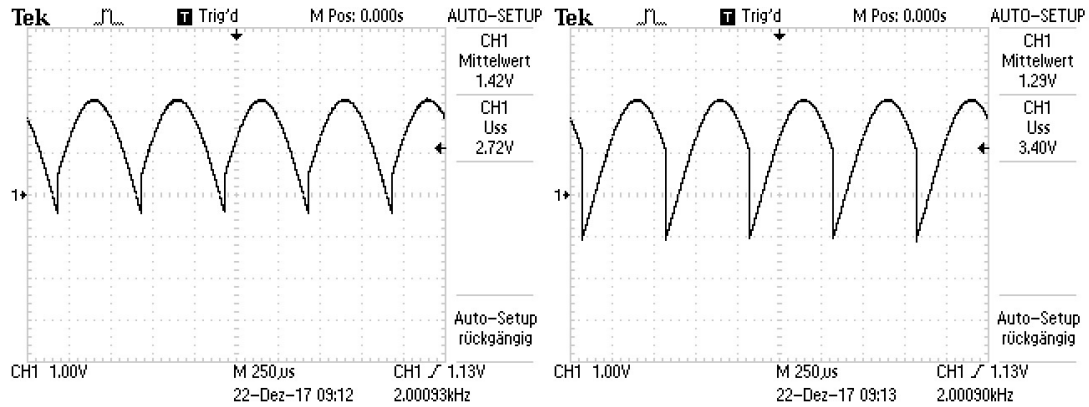
Abbildung 4: Schaltung des Lock-In-Verstärkers mit der Leuchtdiode [1].

### 3 Auswertung

Zunächst wird das Signal des Funktionsgenerators überprüft. Am Ausgang des Reference/Oscillator liefert die sinusförmige Referenzspannung eine konstante Amplitude von 3,28 V.

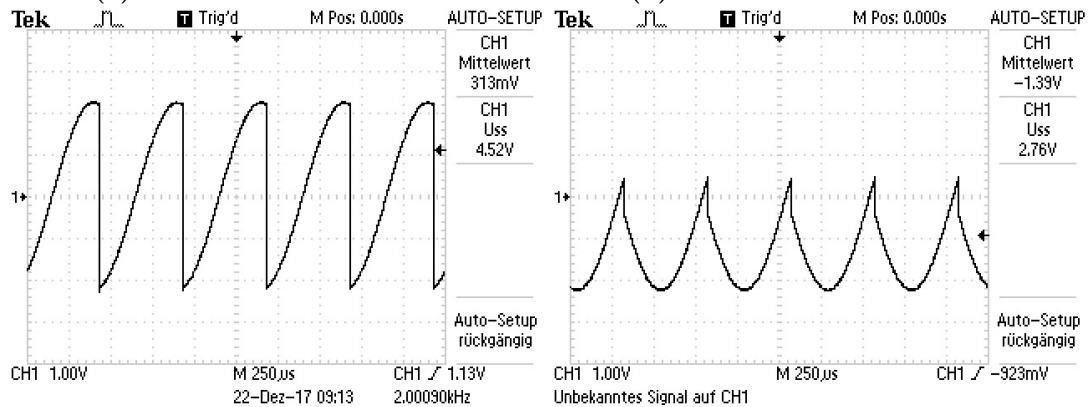
Zur Überprüfung welches Signal am Mischer ankommt wird ein sinusförmiges Signal  $U_{\text{sig}}$  mit einer Frequenz  $\omega = 1\text{kHz}$  und einer Amplitude von 10 mV eingestellt.

Eine schematische Darstellung der Amplitude in unterschiedlichen Phasen zeigt die nun folgenden Bildschirmfotos dar.



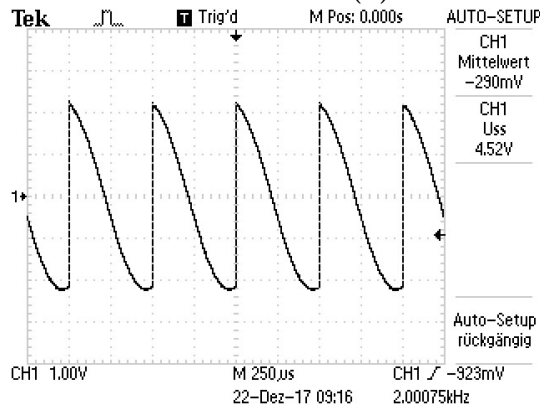
(a) Phasendifferenz bei 0 Grad

(b) Phasendifferenz bei 45 Grad



(c) Phasendifferenz bei 90 Grad

(d) Phasendifferenz bei 180 Grad

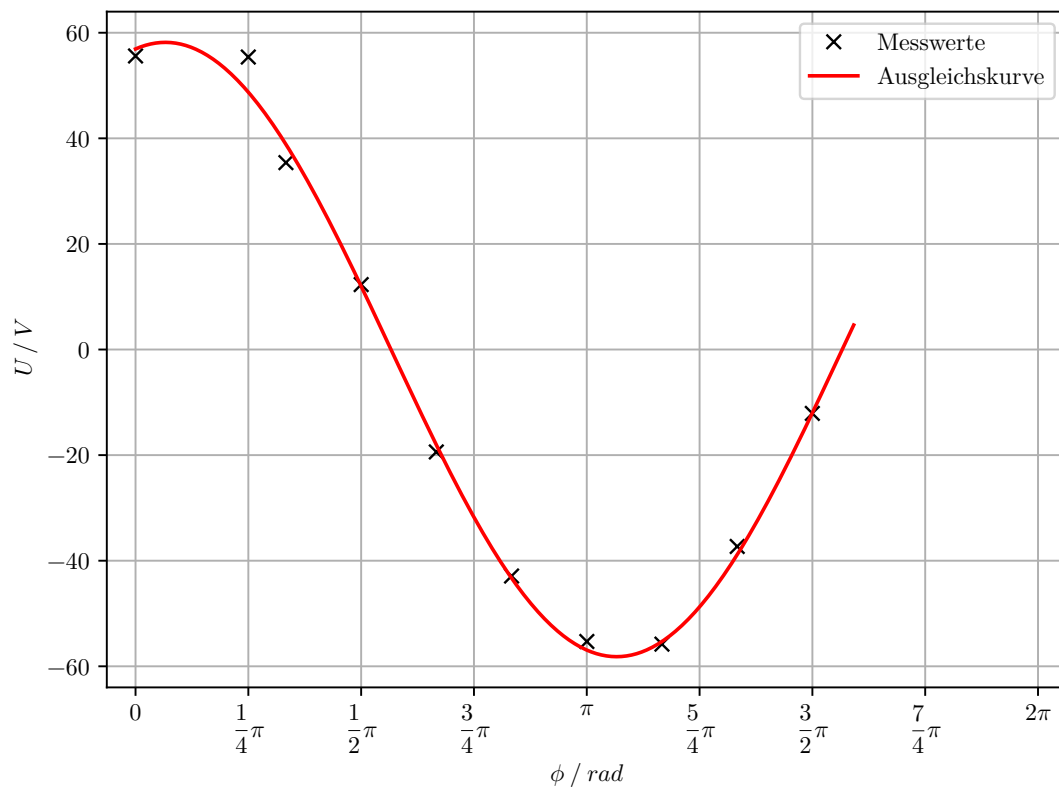


(e) Phasendifferenz bei 270 Grad

Anschließend wird das Signal am Mischer durch ein Tiefpassfilter angeschlossen und folgende Messwerte sind in der Tabelle (1) dargestellt. Die Theoriewerte werden mit der Gleichung (1) berechnet.  $U_o$  ist durch den Vorverstärker und Verstärker auf 55,6V verstärkt worden.

Im Diagramm (6) wurde ein Ausgleichsrechnung durchgeführt, da die eingestellte Pha-

senverschiebung nicht geeicht war. Die Ausgleichsrechnung wurde mithilfe von Python 3.6 durchgeführt.



**Abbildung 6:** Darstellung der Referenzspannung.

Folgende Ausgleichsrechnung wurde angewandt:

$$U_o = A \cdot \cos(x - \phi) \quad (2)$$

Dabei ist  $A$  die Amplitude,  $x$  die eingestellte Phase und  $\phi$  die Phasenverschiebung.

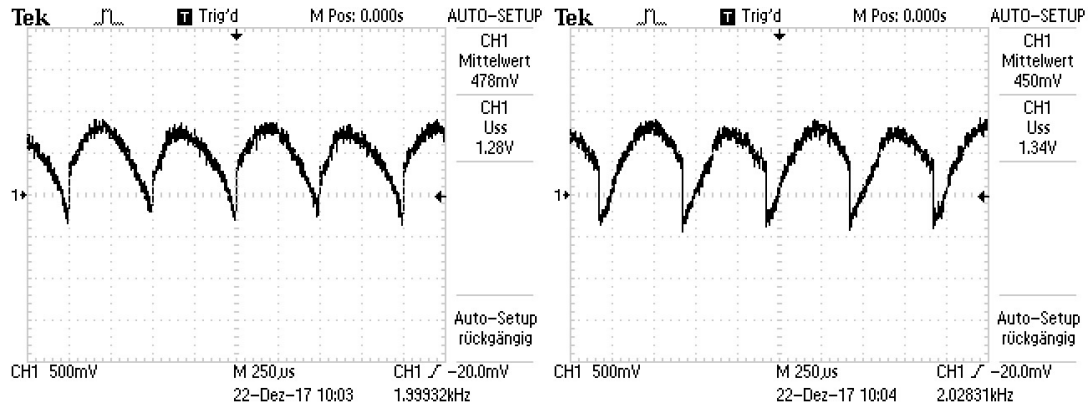
- $A = (58,3 \pm 1,4) \text{ V}$
- $\phi = (0,205 \pm 0,030) \text{ rad}$

**Tabelle 1:** Darstellung der Messergebnisse.

$U_{\text{mess}}/V$	$\Phi/^\circ$	$U_{\text{theo}}$	<i>Abweichung</i> /%
55,6	0	54,36	2,28
55,4	45	46,51	19,1
35,4	60	37,03	4,40
12,3	90	11,30	8,85
-19,4	120	-17,40	11,5
-42,9	150	-41,48	3,42
-55,3	180	-54,44	1,58
-55,8	210	-52,80	5,68
-37,3	240	-37,01	0,78
-12,1	270	-11,34	8,47

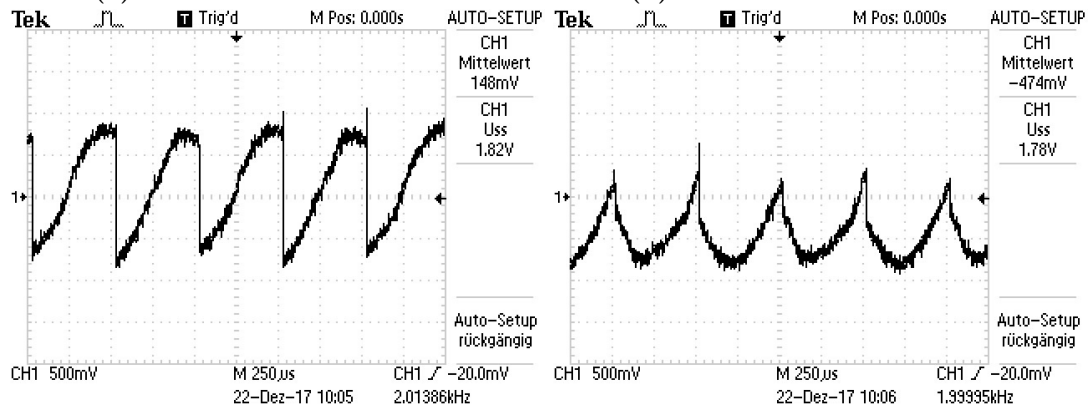
Nun wird ein Rauschsignal hinzugeschaltet. Das Verfahren erneut durchgeführt. Eine schematische Darstellung der Amplitude mit Rauschen in unterschiedlichen Phasen wird in den nun folgenden Bildschirmfotos gezeigt.





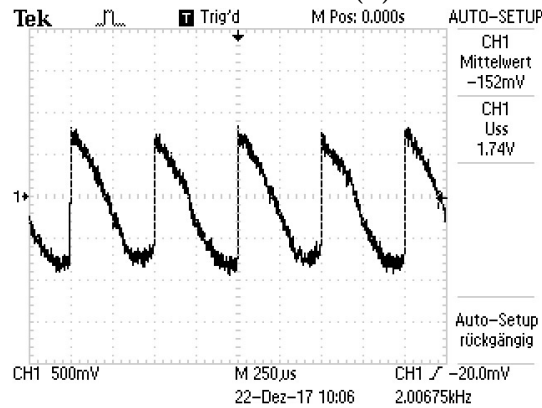
(a) Phasendifferenz bei 0 Grad

(b) Phasendifferenz bei 45 Grad



(c) Phasendifferenz bei 90 Grad

(d) Phasendifferenz bei 180 Grad



(e) Phasendifferenz bei 270 Grad

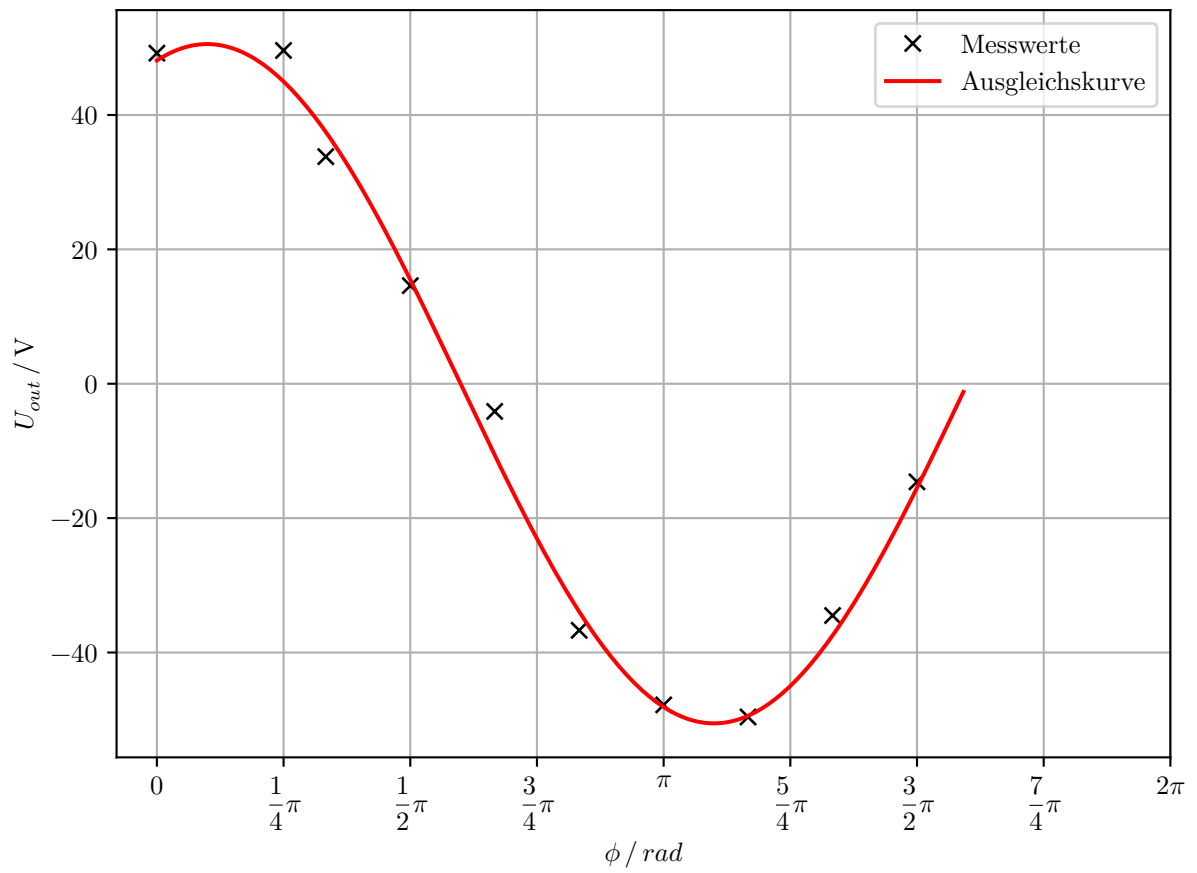
Anschließend wird das Signal mit Rauschen an einen Tiefpassfilter angeschlossen und die Messwerte sind in der Tabelle (2) dargestellt. Auch bei diesem Fall wird mit Python 3.6 eine Ausgleichsrechnung durchgeführt, welche in Abbildung (8) Graphisch dargestellt ist.

Diese Ausgleichsrechnung wurde wieder mit der Gleichung (2) durchgeführt. In diesem Fall ergeben sich für die Parameter:

- $A = (50,55 \pm 1,52) \text{ V}$
- $\phi = (0,311 \pm 0,003) \text{ rad}$

**Tabelle 2:** Darstellung der Messergebnisse für das verrauschte Signal.

$U_{\text{mess}}/\text{V}$	$\Phi/^\circ$	$U_{\text{theo}}/\text{V}$	<i>Abweichung</i> /%
49,2	0	48,13	2,22
49,6	45	44,98	10,27
33,8	60	37,47	9,79
14,6	90	15,46	5,56
-4,12	120	-10,65	61,31
-36,7	150	-33,94	8,13
-47,8	180	-48,13	0,69
-49,6	210	-49,41	0,38
-34,5	240	-37,45	7,88
-14,6	270	-15,48	5,68



**Abbildung 8:** Graphische Darstellung der Messwerte mit dem Rauschsignal.

Die Abweichung in Tabelle (1) und (2) sind mit folgende Formel

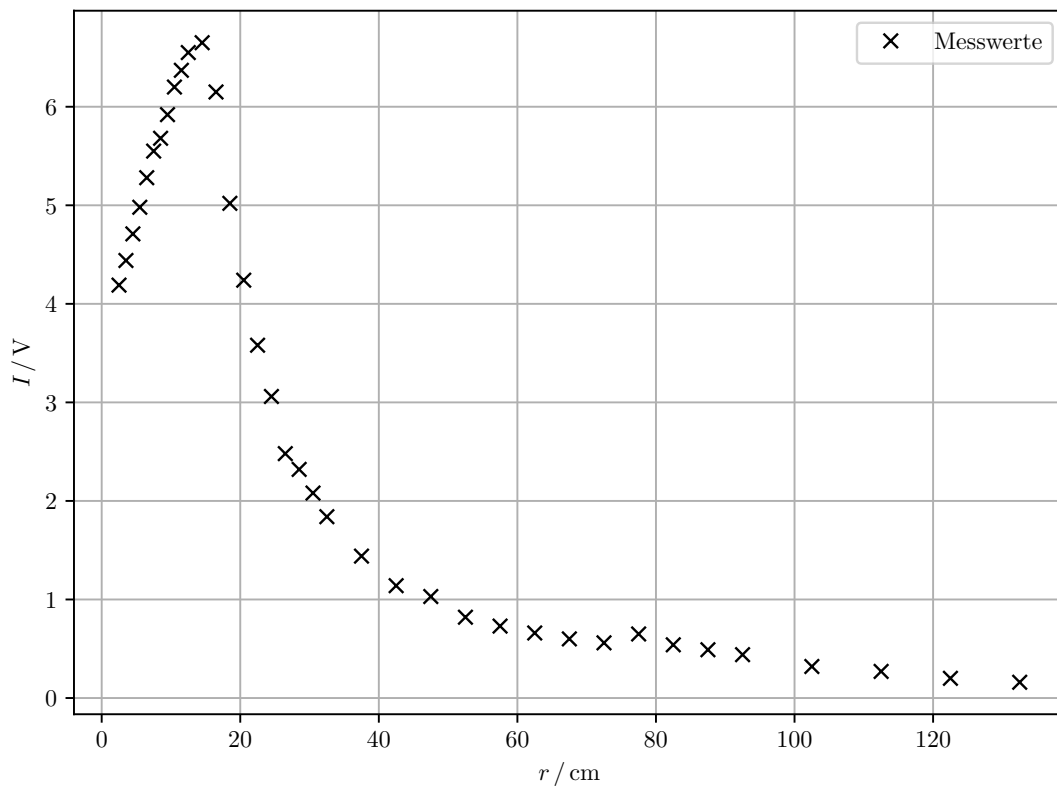
$$\sigma = \left| \frac{U_{theo} - U_{mess}}{U_{theo}} \right| \cdot 100$$

berechnet worden.

Bei der Leuchtdiode wird eine Rechteckspannung moduliert. Die eingestellte Frequenz ist  $\omega = 159,6 \text{ Hz}$  und besitzt eine Amplitude von  $2 \text{ V}$ . Folgende Messwerte werden in der Tabelle (3) und in der Abbildung (9) als Diagramm dargestellt.

**Tabelle 3:** Messreihe zur Leuchtdiode

<i>Intensitt/V</i>	<i>r/cm</i>	<i>Intensitt/V</i>	<i>r/cm</i>
4,19	2,5	2,08	30,5
4,44	3,5	1,84	32,5
4,71	4,5	1,44	37,5
4,98	5,5	1,14	42,5
5,28	6,5	1,03	47,5
5,55	7,5	0,82	52,5
5,68	8,5	0,73	57,5
5,92	9,5	0,66	62,5
6,20	10,5	0,60	67,5
6,37	11,5	0,56	72,5
6,55	12,5	0,65	77,5
6,65	14,5	0,54	82,5
6,15	16,5	0,49	87,5
5,02	18,5	0,44	92,5
4,24	20,5	0,32	102,5
3,58	22,5	0,27	112,5
3,06	24,5	0,20	122,5
2,48	26,5	0,16	132,5
2,32	28,5	-	-



**Abbildung 9:** Darstellung der Intensität in Abhängigkeit des Abstandes

Die Werte bis zu dem Abstand  $r = 14,5 \text{ cm}$  sind physikalische nicht sinnvoll, nach dem Gesetz der Strahlungsintensität. Dieses besagt, dass  $I \propto \frac{1}{r^2}$  ist. Daher werden die Messergebnisse ab dem Abstand von  $r = 14,5 \text{ cm}$  betrachtet und erneut in Diagramm (10) dargestellt.

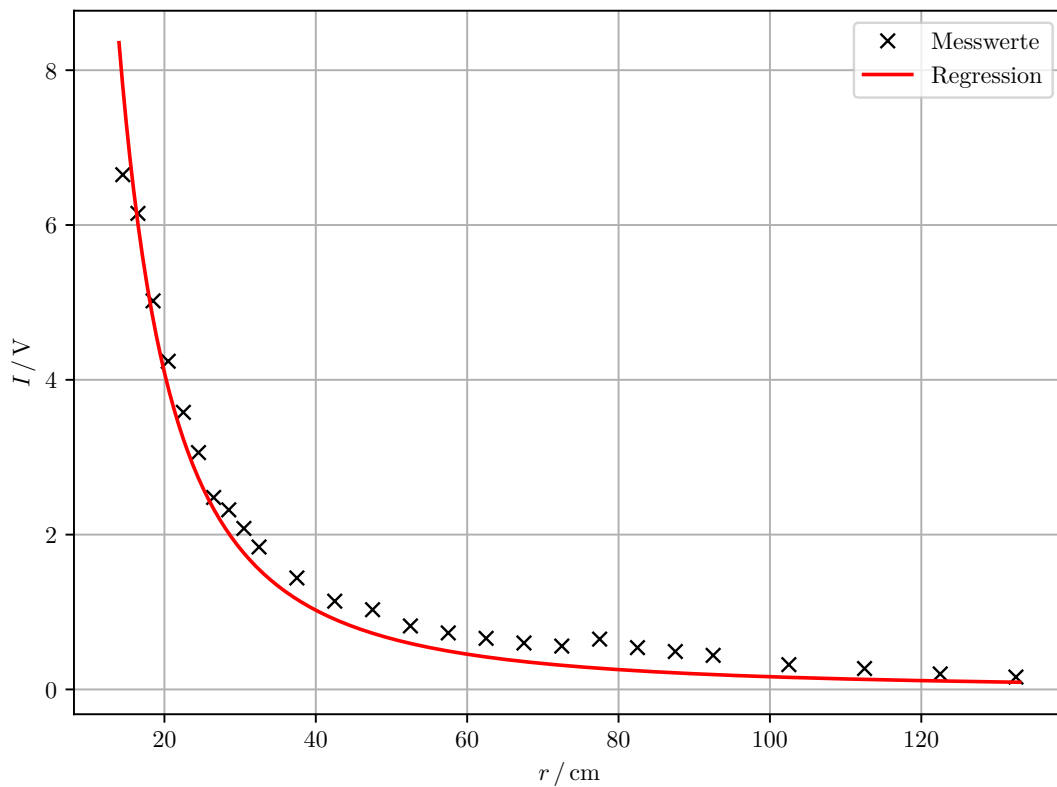


Abbildung 10: Darstellung der Intensität in Abhängigkeit des Abstandes

## 4 Diskussion

Durch die Ausgleichsrechnung wurde bestimmt, dass bei dem ersten Teil, ohne das Rauschsignal, eine Phasenverschiebung um ca 11 Grad zu der eingestellten Phase vorlag. Für den zweiten Teil, mit dem Rauschsignal, betrug die Phasenverschiebung ca 17,8 Grad. Da der Phasenverschieber nicht geeicht war, gibt es einen Fehler bei der Phasenverschiebung und somit auch bei den bestimmten Theoriewerten. Die vorhandenen Abweichungen können durch systematische Fehler erklärt werden. Die Abweichungen bei den Messungen mit dem Rauschsignal können auch durch den Noise Generator verursacht worden sein.

Zur Überprüfung des Strahlungsintensitätsgesetzes mithilfe einer Leuchtdiode sind die Werte bis zu einem Abstand von  $r = 14,5 \text{ cm}$  nicht physikalisch sinnvoll, da sie quadratisch abfallen müssten. Mögliche Gründe für solche Werte sind, dass Störfaktoren wie Deckenlampen die Messwerte verfälschen. Außerdem hat das Oszilloskop bei den größeren Abständen die Intensität nicht mehr genau messen können, da der Wert zu klein war und Störfaktoren immer größer wurden.

## Literatur

- [1] T. Dortmund, *Anleitung zum Versuch 303: Der Lock-In-Verstärker*, 2017.