

V303

Der Lock-In-Verstärker

Theodor Zies

theodor.zies@tu-dortmund.de

Tom Troska

tom.troska@tu-dortmund.de

Durchführung: 14.12.2021

Abgabe: 21.12.2021

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1. Zielsetzung	3
2. Theorie	3
3. Durchführung	4
3.1. Messung ohne Rauschen	5
3.2. Messung mit Rauschen	6
3.3. Messung mit einer LED	6
4. Auswertung	7
4.1. Messung ohne Rauschen	7
4.2. Messung mit Rauschen	9
4.3. Messung mit einer LED	11
5. Diskussion	13
Literatur	13
A. Anhang	14
A.1. Originaldaten	14

1. Zielsetzung

Ziel dieses Versuches ist es, die Funktionsweise eines Lock-In-Verstärkers anhand verschiedener Probeschaltungen kennenzulernen. Dafür werden sowohl verrauschte, als auch unverrauschte Eingangssignale verwendet und ausgewertet.

2. Theorie

Ein Lock-In-Verstärker ermöglicht es stark verrauschte Signale bis zu einem gewissen Grad zu entrauschen. Dazu wird das verrauschte Eingangssignal U_{sig} zunächst durch einen Bandpassfilter von Frequenzen ω , die höher oder tiefer als die Zielfrequenz ω_0 sind, bereinigt. Anschließend wird das Eingangssignal U_{sig} mit einem Referenzsignal U_{ref} selber Frequenz ω_0 und Phase φ multipliziert, um weiteres Rauschen zu unterdrücken. Dies bewirkt auch eine Gleichrichtung des Eingangssignals. Mithilfe eines Tiefpassfilters mit Zeitkonstante $RC \gg \frac{1}{\omega_0}$ werden Frequenzen ω , die nicht der Zielfrequenz ω_0 entsprechen, nahezu vollständig herausgefiltert. Darüber hinaus integriert der Tiefpassfilter das Eingangssignal U_{sig} .

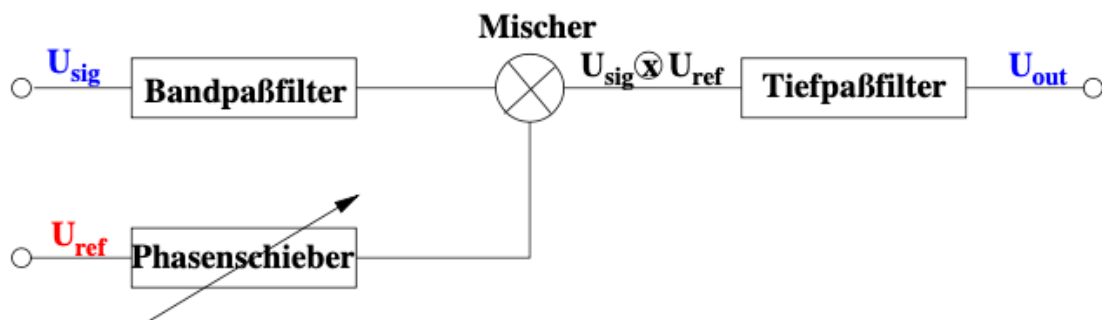


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Lock-In-Verstärkers.[2]

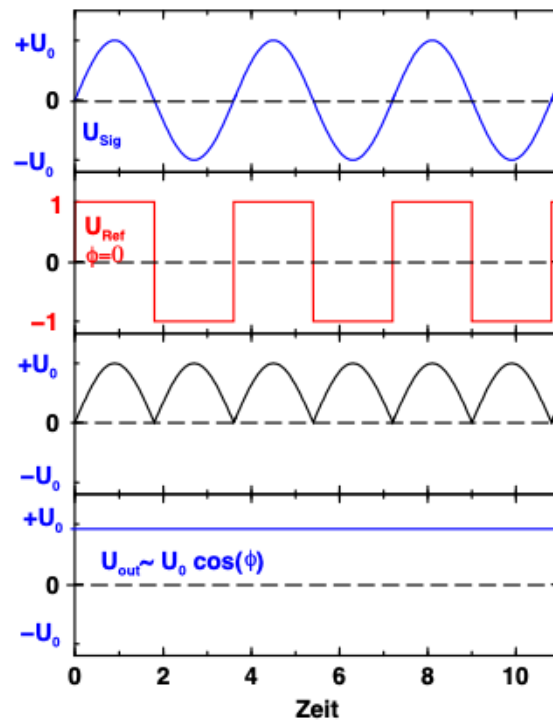


Abbildung 2: Sinusförmiges Eingangssignal mit rechteckigem Referenzsignal und resultierendem Ausgangssignal.[2]

Es ergibt sich folgender Zusammenhang

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

Folglich wird das Ausgangssignal maximal bei einer Phasenverschiebung $\Delta\varphi = k\pi$ mit einem k aus den ganzen Zahlen \mathbb{Z} .

3. Durchführung

Für den gesamten Versuch wird ein Lock-In-Verstärker mit eingebautem Vorverstärker, Tief- und Bandpass, Phasenverschieber, sowie Funktions- und Rauschgenerator verwendet. Außerdem wird ein Oszilloskop verwendet, um die verschiedenen Signale darzustellen.

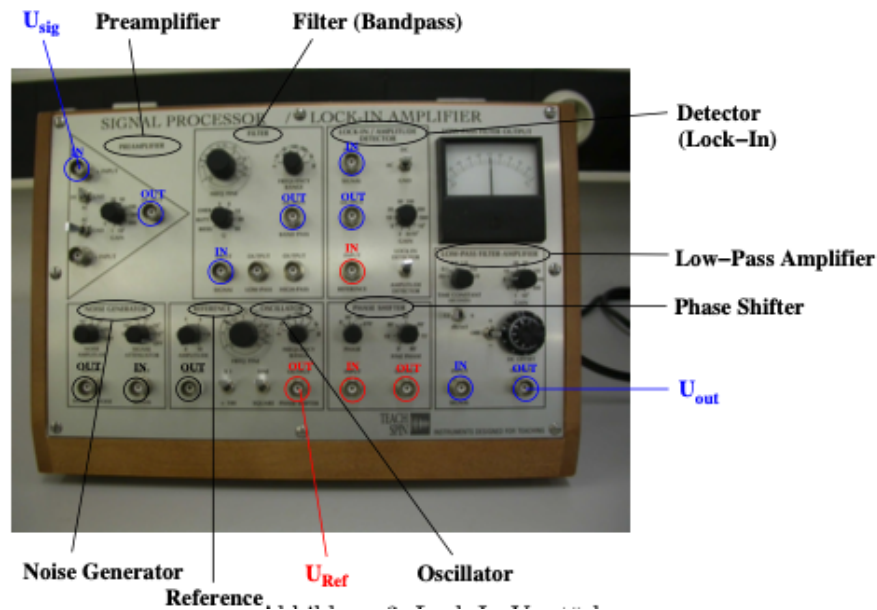


Abbildung 3: Lock-In-Verstärker ohne Verkabelung.[2]

3.1. Messung ohne Rauschen

Das in Abbildung 3 zu sehende Gerät wird wie in Abbildung 4 verkabelt, wobei in einer ersten Messreihe der Rauschgenerator überbrückt wird. Der Funktionsgenerator wird auf eine Sinusspannung mit $U_{\text{sig}} \approx 2\text{ V}$ und eine Frequenz von rund 1 kHz eingestellt. Dieses Signal wird verstärkt und durch den Bandpassfilter geleitet. Das Referenzsignal U_{ref} wird ebenfalls im Funktionsgenerator erzeugt und hat dieselbe Frequenz wie U_{sig} , wird allerdings im Phasenverschieber um $\Delta\varphi$ phasenverschoben. Dieses Signal U_{ref} wird im Detektor mit dem Signal U_{sig} multipliziert und in einem Tiefpass nochmals gefiltert. Das Ausgangssignal U_{out} wird auf einem Oszilloskop angezeigt.

Im Verlauf der Messung wird die Verschiebung der Phase zwischen U_{sig} und U_{ref} mit dem Phasenverschieber in 30° Schritten verändert und es wird mithilfe des Oszilloskop die Spannung des Ausgangssignal U_{out} gemessen und tabellarisch protokolliert.

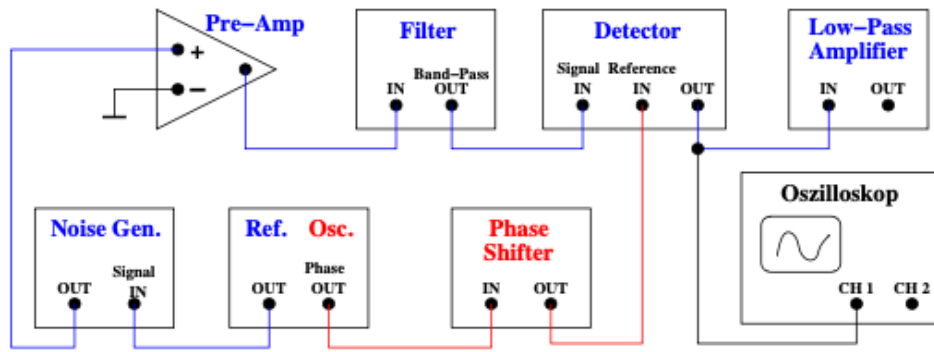


Abbildung 4: Schematischer Aufbau des Lock-In-Verstärkers.[2]

3.2. Messung mit Rauschen

Die Messung aus 3.1 wird nun mit einem eingeschalteten Rauschgenerator wiederholt. Die Amplitude des Rauschens liegt hierbei in derselben Größenordnung wie die des Signals U_{sig} .

3.3. Messung mit einer LED

Es wird eine Photodektorschaltung gemäß Abbildung 5 aufgebaut. Der Unterschied zu der vorherigen Schaltung (Abbildung 4) liegt darin, dass nun nicht mehr ein Rauschgenerator verwendet wird. Stattdessen wird das Ausgangssignal eines Photodetektors, welcher Lichtwellen einer blinkenden LED registriert, analysiert. Aufgrund des Umgebungslichtes nimmt der Photodetektor von sich aus bereits ein Hintergrundrauschen auf, welches anschließend mit dem Lock-In Verstärker rausgefiltert werden soll.

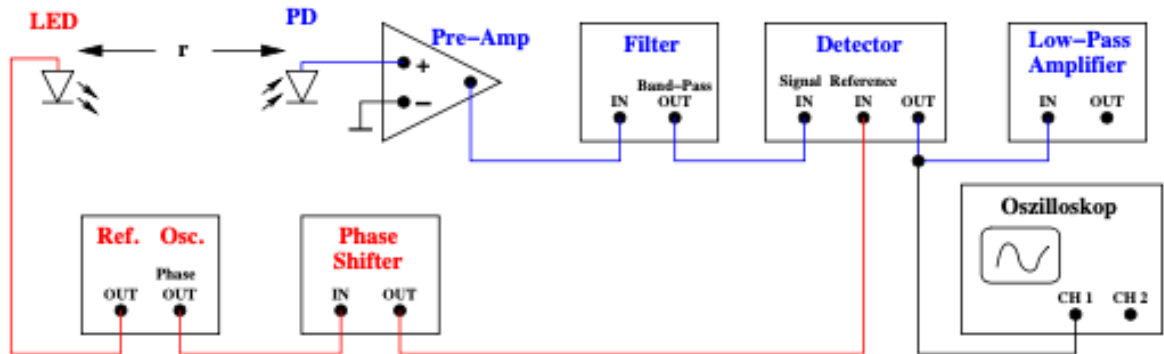


Abbildung 5: Schematischer Aufbau der Photodektorschaltung.[2]

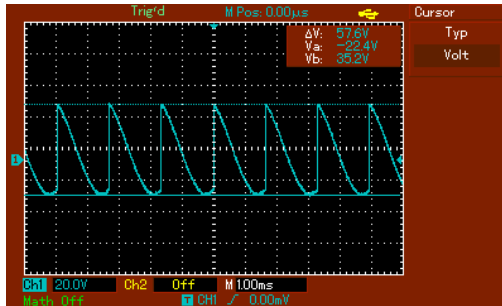
Die blinkende LED wird schrittweise von dem Photodetektor entfernt und es wird die Signalstärke U_{out} abhängig von dem Abstand r zwischen LED und Photodetektor mithilfe des Oszilloskops bestimmt.

4. Auswertung

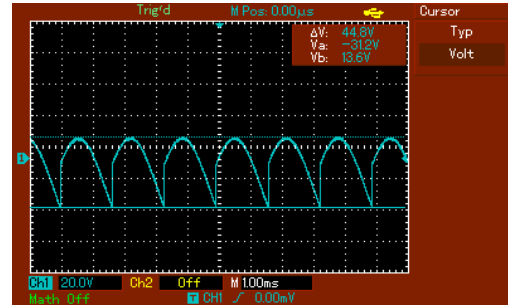
Es werden nun die mithilfe des digitalen Oszilloskopes ermittelten Amplituden des Ausgabesignals ausgewertet.

4.1. Messung ohne Rauschen

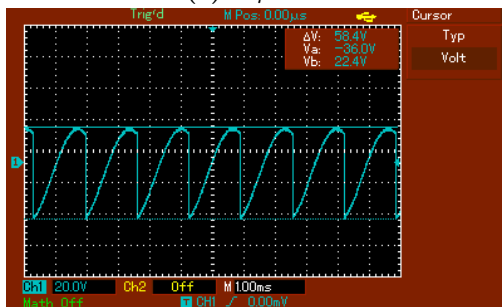
In Abbildung 6 sind Oszilloskopbilder von ausgewählten Phasenverschiebungen für die Messung ohne Rauschen zu sehen.



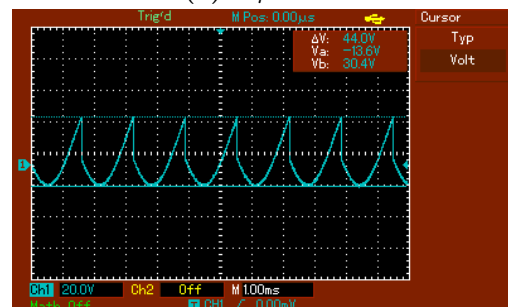
(a) $\Delta\varphi = 0^\circ$



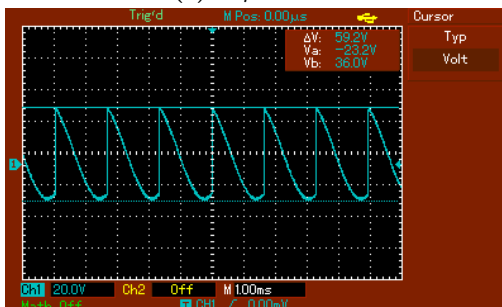
(b) $\Delta\varphi = 90^\circ$



(c) $\Delta\varphi = 180^\circ$



(d) $\Delta\varphi = 270^\circ$



(e) $\Delta\varphi = 360^\circ$

Abbildung 6: Oszilloskopbilder des Ausgabesignals U_{sig} für verschiedene Phasenverschiebungen $\Delta\varphi$.

Es ergeben sich halbwellenförmige Signalverläufe, was der Theorie (Abbildung 2) entspricht. Aus den Bildern werden die jeweiligen Amplituden des Ausgabesignals für alle

Phasenverschiebungen abgelesen und in Tabelle 1 festgehalten.

Tabelle 1: Amplitude des unverrauschten Signals in Abhängigkeit der Phasenverschiebung $\Delta\varphi$

$\Delta\varphi$	$U_{\text{sig}} / \text{V}$
0	57,6
30	60,6
60	53,6
90	44,8
120	32,0
150	50,4
180	58,4
210	61,6
240	53,6
270	44,0
300	32,0
330	50,4
360	59,2

Diese Daten werden nun graphisch in Abbildung 7 dargestellt und mit der Theoriekurve der Funktion (1) verglichen. Der Wert für die Spannung U_0 wird vorab zu $U_0 = 48 \text{ V}$ gemessen.

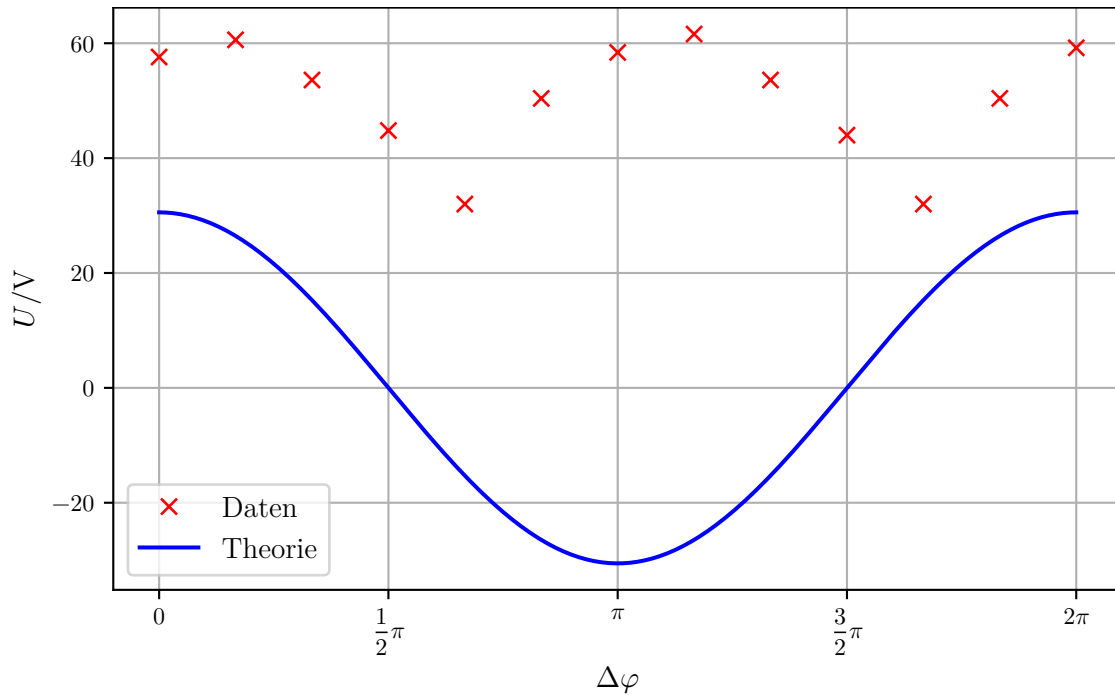
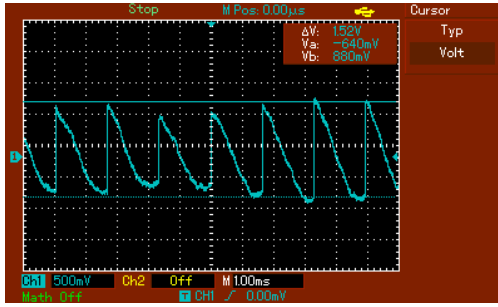


Abbildung 7: Amplitude des Ausgangssignal U_{sig} vor dem Tiefpass in Abhängigkeit der Phasenverschiebung φ .

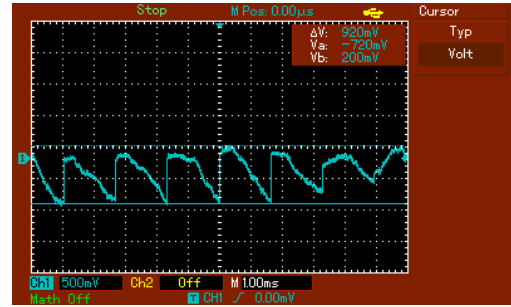
Ein Zusammenhang zwischen den Messwerten und der Theorie kann hier nicht bestätigt werden, möglich Gründe dafür werden in der Diskussion genannt.

4.2. Messung mit Rauschen

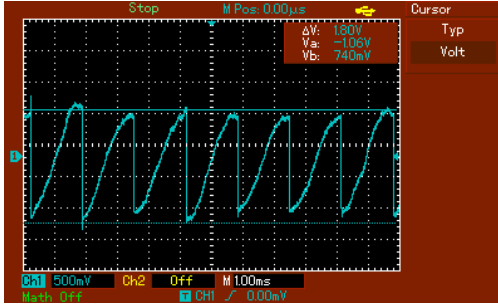
Es werden nun die Oszilloskopbilder betrachtet, die sich bei verrauschtem Eingangssignal ergeben haben. Diese sind erneut für ausgewählte Phasenverschiebungen in Abbildung 8 zu sehen.



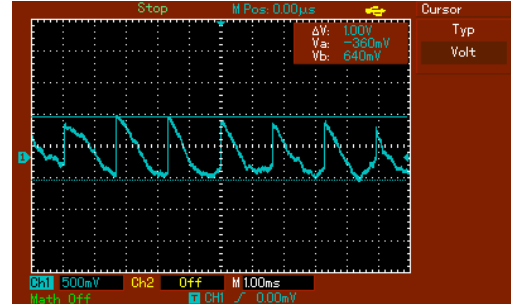
(a) $\Delta\varphi = 0^\circ$



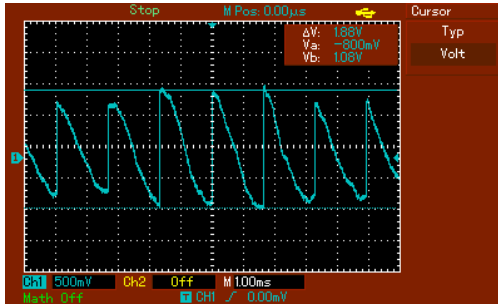
(b) $\Delta\varphi = 90^\circ$



(c) $\Delta\varphi = 180^\circ$



(d) $\Delta\varphi = 270^\circ$



(e) $\Delta\varphi = 360^\circ$

Abbildung 8: Oszilloskopbilder des Ausgangssignals U_{sig} für verschiedene Phasenverschiebungen $\Delta\varphi$ mit rauschen.

Vergleicht man die Oszilloskopbilder mit den Bildern in Abbildung 6, dann ist ein ähnlicher Signalverlauf zu erkennen. Der Lock-In-Verstärker hat demnach wie erwartet das Rauschen größtenteils herausgefiltert und das Ausgangssignal ist näherungsweise gleich geblieben. Bei genauer Betrachtung fallen minimale Sprünge und kleine Unregelmäßigkeiten im Signalverlauf auf, hier handelt es sich wahrscheinlich um besonders starke Störungen des Rauschgenerators, die der Lock-In-Verstärker nicht vollständig herausfiltern konnte. Insgesamt verifizieren die Bilder jedoch eindeutig die Funktionsweise des Lock-In-Verstärkers, anschließend werden noch die Amplituden des Ausgangssignals analog zu Unterabschnitt 4.1 in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Amplitude des verrauschten Signals in Abhängigkeit der Phasenverschiebung $\Delta\varphi$

$\Delta\varphi$	$U_{\text{sig}} / \text{V}$
0	1,52
30	1,28
60	1,14
90	0,92
120	1,02
150	1,26
180	1,80
210	1,42
240	1,16
270	1,00
300	1,58
330	1,62
360	1,88

Die absoluten Werte der Amplituden sind hier deutlich geringer als die des unverrauschten Signals. Deren Abhängigkeit von der Phasenverschiebung ist jedoch noch vergleichbar mit der unverrauschten Messung in Tabelle 1.

4.3. Messung mit einer LED

Die gemessene Signalstärke U_{out} in Abhängigkeit des Abstandes r ist in Tabelle 3 dokumentiert.

Tabelle 3: Signalstärke des Ausgabesignals des Photodetektors abhängig von dem Abstand r zwischen LED und Photdetektor.

r / cm	$U_{\text{sig}} / \text{V}$
6,6	210,0
7,0	194,0
7,5	170,0
8,0	138,0
8,5	110,0
9,0	93,6
9,5	83,2
10,0	74,4
11,0	60,0
12,0	48,0
13,0	40,0
14,0	32,4
15,0	28,0
17,0	20,4
19,0	16,2
21,0	12,8
23,0	11,4
25,0	9,0
30,0	6,9
40,0	5,5
50,0	4,5
60,0	3,9

Die Werte werden in Abbildung 9 graphisch dargestellt. Dazu wird eine nicht-lineare Ausgleichsfunktion mit der Python Erweiterung *scipy* [1] bestimmt, um eine mögliche $\frac{1}{r^2}$ -Abhängigkeit der Signalstärke zu überprüfen. Dafür wird eine Funktion der Form:

$$f(r) = \frac{C}{r^2}$$

als Ansatz verwendet. Für den Parameter C ergibt sich der Wert:

$$C = (8,63 \pm 0,21) \text{ kV cm}^2$$

Mit dem Fit lässt sich die $\frac{1}{r^2}$ -Abhängigkeit gut bestätigen, in Abbildung 9 ist eine Korrelation von Messwerten und Ausgleichsfunktion deutlich zu erkennen. Somit ist die Funktionsweise des Lock-In-Verstärkers verifiziert, da das Rauschen des Umgebungslichtes erfolgreich herausgefiltert werden konnte.

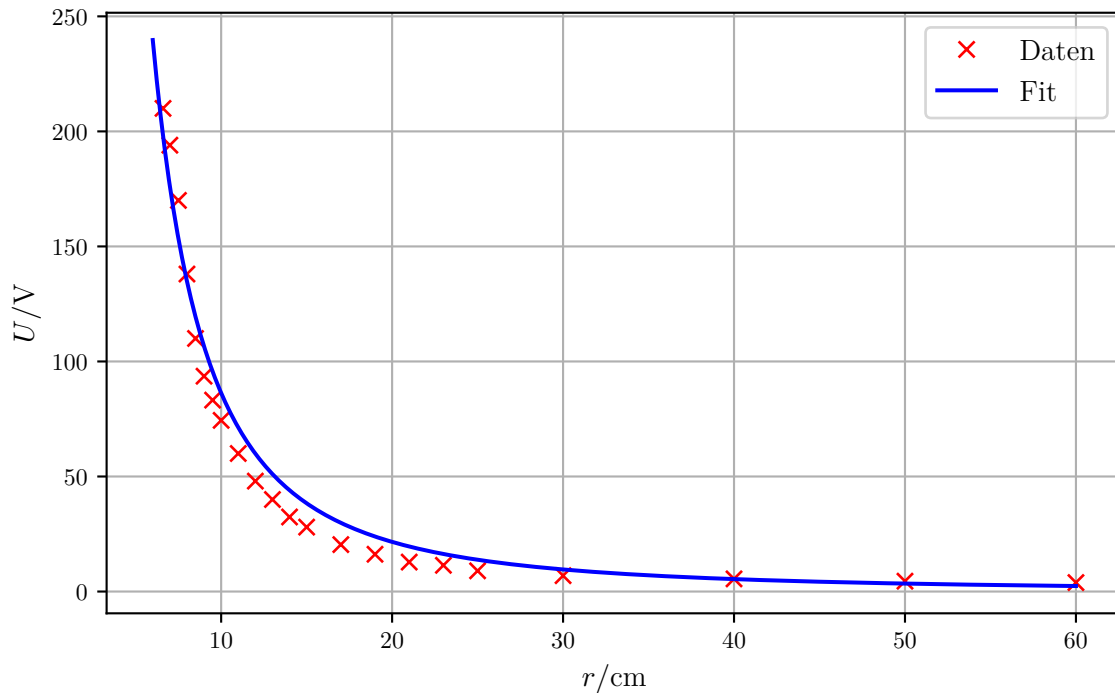


Abbildung 9: Amplitude der Signalstärke U_{sig} des Photodetektors abhängig von dem Abstand r zwischen der LED und des Photodetektors.

5. Diskussion

Für die Messung ohne Rauschen ist davon auszugehen, dass der Tiefpass nicht ordnungsgemäß in Betrieb genommen wurde. Eventuell wurde ein Fehler bei der Verkabelung der einzelnen Bauteile begangen oder der Tiefpass selbst war defekt. Dies hat zur Folge, dass das gemessene Ausgangssignal nicht integriert wurde. Das wiederum bedingt, dass die Theorieformel (1) sich nicht auf die Messwerte anwenden lässt, was auch in Abbildung 7 deutlich zu erkennen ist.

Unabhängig davon wird die Funktionsweise des Lock-In-Verstärkers in 4.2 und in 4.3 bestätigt, da in beiden Fällen das Rauschen soweit unterdrückt werden kann, dass die theoretischen Zusammenhänge gezeigt werden.

Literatur

- [1] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [2] *Versuch V303: Der Lock-In-Verstärker*. TU Dortmund, Fakultät Physik.

A. Anhang

A.1. Originaldaten

V303 - Der Lat-In Verstärker

<u>Phasenverschiebung / DEG</u>	<u>U unversucht / V</u>	<u>U versucht / V</u>
-0,1	57,6	1,52
30	60,0	1,28
60	53,6	1,14
-0,1	44,8	0,92
120	32,0	1,02
150	50,4	1,26
-0,1	58,4	1,80
210	61,6	1,42
240	53,6	1,16
-0,1	44,0	1,00
300	32,0	1,58
330	50,4	1,62
-0,1	59,2	1,88

LED

<u>Abstand x / cm</u>	<u>Spannung / V</u>
6,6	210
7,0	194
7,5	170
8,0	138
8,5	110
9,0	93,6
9,5	83,2
10,0	74,4
11,0	60,0
12,0	48,0
13,0	40,0
14,0	32,4
15,0	28,0
17,0	20,4
19,0	16,2
21,0	12,8
23,0	11,4
25,0	9,0
30,0	6,9
40,0	5,5
50,0	4,5
60,0	3,9