

Versuch 303

Der Lock-In-Verstärker

Lukas Nickel

lukas.nickel@tu-dortmund.de

Rohat Kavili

rohat.kavili@tu-dortmund.de

Durchführung: 03.11.2015

Abgabe: 10.11.2015

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	3
1.1	Zielsetzung	3
1.2	Theoretische Grundlagen	3
2	Durchführung	4
2.1	Funktionsgenerator	4
2.2	Mischen der Signale	4
2.3	Rauschgenerator	5
2.4	LED und Photodiode	5
3	Auswertung	5
3.1	Messwerte:	5
3.2	Auswertung: Funktionsgenerator	7
3.3	Auswertung: Mischen der Signale	7
3.4	Auswertung: Rauschgenerator	8
3.5	Auswertung: LED und Photodiode	12
4	Diskussion	13
	Literatur	14

1 Theorie

1.1 Zielsetzung

Ziel des durchgeführten Versuches ist es die Funktionsweise und technischen Hintergründe des Lock-In-Verstärkers kennenzulernen. Dazu werden einige Messungen mit verschiedenen Signalen vorgenommen.

1.2 Theoretische Grundlagen

Der Lock in Verstärker wird hauptsächlich dafür eingesetzt verrauschte Signale zu messen. Gegenüber einem gewöhnlichen Bandpass bietet ein Lock-In-Verstärker den Vorteil um einige Größenordnungen höhere Güten zu erzielen. Der Aufbau eines Lock-In-Verstärkers gestaltet sich wie folgt: Zunächst wird die Signalspannung durch einen Bandpaß geschickt. Dadurch können bereits Rauschanteile mit einer von der Signalspannung verschiedenen Frequenz herausgefiltert werden. Daraufhin wird das Signal mit einer Referenzspannung gemischt. Mit dem Phasenverschieber lässt sich die Phase zwischen Signal- und Referenzspannung anpassen. In nachfolgendem Tiefpass wird die gemischte Spannung integriert und auf diese Weise von noch vorhandenem Rauschen befreit. Dabei ist zu beachten, dass der Tiefpass nur für gleiche Frequenzen von Signal- und Referenzspannung einen Wert ungleich Null liefert. Dies liegt darin begründet, dass der Tiefpass - so wie er in einem Lock-in-Verstärker genutzt wird - die Kreuzkorrelation zwischen Referenz- und Signalspannung berechnet, der Tiefpaß integriert also $U_{sig} \times U_{ref}$.

Betrachten wir das Beispiel einer sinusförmige Signalspannung $U_s = U_0 \sin(\omega t)$, die moduliert wird durch eine Rechteckspannung U_{ref} . Die Frequenzen beider Spannungen sind identisch, bezeichnet mit ω , die Phasenverschiebung ist gegeben durch ϕ . Der Tiefpaß integriert $U_{sig} \times U_{ref}$ über einige Perioden und unterdrückt dabei die Oberwellen, sodass man eine Gleichspannung erhält, die proportional zu der Signalspannung ist ¹:

$$U_{out} = 2/\pi U_0 \cos(\phi). \quad (1)$$

Die Ausgangsspannung hängt also über einen Cosinus von der Phasenverschiebung ab und ist maximal für $\phi = 0$.

¹Herleitung siehe : [3, S. 1-3]

2 Durchführung

Bei dem Versuch kommen ein Lock-In-Verstärker, ein Oszilloskop, eine LED und eine Photodiode zum Einsatz. Der Lock-In-Verstärker beinhaltet einen Funktionsgenerator mit 2 Ausgängen, einen Phasenschieber und einen Rauschgenerator. Nachfolgend ist ein beschriftetes Bild des verwendeten Geräts zu sehen:

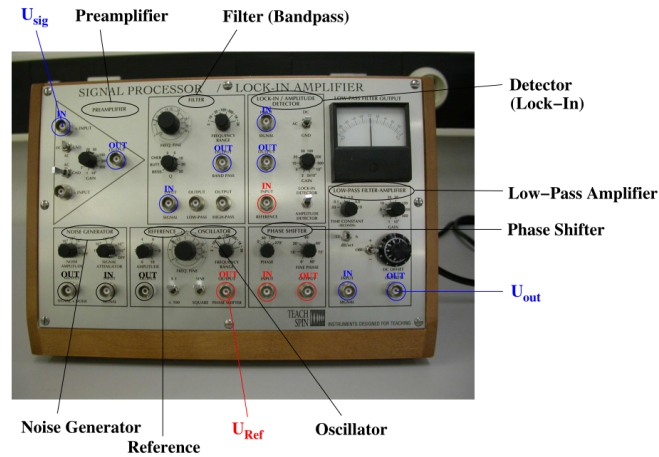


Abb. aus : [3, S. 3]

2.1 Funktionsgenerator

Der erste Teil des Versuches befasst sich mit der Funktionsweise des Geräts. Dafür werden die Spannungen an beiden Ausgängen des Funktionsgenerators einzeln vermessen. Dabei wird festgestellt, dass der linke Ausgang eine regelbare Spannung generiert, während die Amplitude der Spannung an dem rechten Ausgang konstant bei 4,48V liegt.

2.2 Mischen der Signale

In dem zweiten Versuchsabschnitt werden die beiden generierten Signale gemischt und integriert. Dafür wird folgende Schaltung aufgebaut:

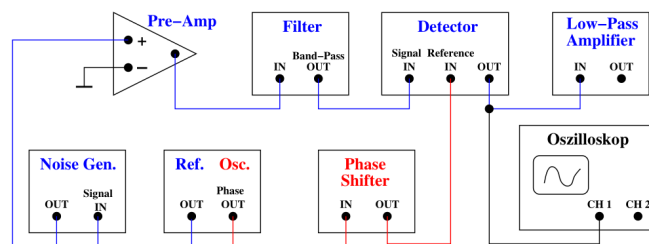


Abb. aus: [3, S. 1]

Der Rauschgenerator wird zunächst nicht verwendet (Rauschen auf off einstellen). Die Signalspannung mit einer Frequenz von 1Khz und einer Amplitude von 1V wird verstärkt und mit der Referenzspannung gemischt. Gemessen werden die Ausgangsspannung U_{out} sowie die am Tiefpaß integrierte Ausgangsspannung für verschiedene Phasenverschiebungen ϕ . Auf diese Weise wird die Phasenabhängigkeit der integrierten Spannung nachgewiesen.

2.3 Rauschgenerator

Für diesen Versuchsteil wird der Signalspannung ein Rauschen beigefügt. Dazu wird der Rauschgenerator eingestellt und ein Rauschen erzeugt, dessen Größenordnung um eine unter der des Signals liegt. Daraufhin werden alle Messungen aus dem zweiten Versuchsteil wiederholt um die Ergebnisse mit den unverrauschten Werten zu vergleichen. Die Messungen ergeben, dass das Integral der gemischten Spannung identisch ist - unabhängig von dem Rauschen.

2.4 LED und Photodiode

Im letzten Abschnitt wird die aus den anderen Versuchsteilen bekannte Schaltung leicht abgewandelt. Anstatt die Signalspannung direkt zu vermessen wird mit ihr eine LED betrieben. Die Frequenz der Signalspannung beträgt dabei 184,4 Hz, die Amplitude ist maximal mit 4,48V. Das von der LED ausgestrahlte Licht wird von einer Photodiode im Abstand r vermessen. Die Photodiode ist an den Eingang des Verstärkers angeschlossen. Die Spannung der Diode wird - nachdem sie den Bandpass passiert hat - mit der Referenzspannung gemischt und die resultierende Spannung an Oszilloskop und Tiefpaß bestimmt. Da die Signalfrequenz nicht einem Vielfachen der Netzfrequenz entspricht, wird das durch die Raumbeleuchtung hervorgerufene Signal am Bandpaß zum großen Teil ausgefiltert. Dadurch lässt sich die Lichtintensität in Abhängigkeit von r messen und ein maximaler Abstand für die Detektierung bestimmen. Mit diesem Versuchsaufbau lässt sich allerdings nur nachweisen, dass der maximale Abstand r_{max} , in dem das Licht der LED detektiert wird, größer als der maximale Abstand der Apparatur.

3 Auswertung

3.1 Messwerte:

Im nachfolgenden sind alle Messwerte tabellarisch dargestellt:

Tabelle 1: Mischen der Signale:

$\phi[deg]$	$U_{out}[V]$	$Tiefpass[V] - gainbereinigt$
0	3.04	1.5
45	4.60	0.9
90	4.92	-0.3
135	3.92	-1.25
180	3.04	-1.5
210	4.04	-1.25
270	4.92	0.3
340	2.52	1.5

Tabelle 2: Rauschgenerator:

$\phi[deg]$	$U_{out}[V]$	$Tiefpass[V] - gainbereinigt$
0	3.20	1.5
45	4.84	0.9
90	5.20	-0.3
135	4.21	-1.25
180	3.32	-1.5
210	4.28	-1.25
270	5.16	0.3
340	2.92	1.5

Tabelle 3: LED und Photodiode:

$r[cm]$	$Tiefpass[V]$	$Gain(Tiefpass)$
6	3.6	20
16	2.1	50
26	3.1	200
36	3.9	500
46	4.5	1000
56	3.1	1000
66	2.3	1000
76	1.9	1000
86	1.5	1000
96	1.1	1000
106	1.0	1000
116	0.9	1000
126	0.9	1000
146	0.6	1000
166	0.5	1000
186	0.5	1000

3.2 Auswertung: Funktionsgenerator

Die Messung ergibt eine gleichbleibende Spannungsamplitude von 4,48V für den rechten Ausgang. Am linken Ausgang lässt sich die Spannungsamplitude von 0V bis zu der Amplitude des anderen Ausgangs regeln, also maximal 4,48V.

3.3 Auswertung: Mischen der Signale

Die Signalspannung wird im folgenden mit einer Amplitude von 1V und einer Frequenz von 1kHz betrieben. Als Amplitude wird hierbei die Spannung zwischen oberer und unterer Halbwelle bezeichnet; als Phasenverschiebung der Wert, der am Gerät eingestellt wird. Die interne Phasenverschiebung wird zunächst vernachlässigt. Als Beispiel dient ein Messwert, der bei $\phi = 0^\circ$ aufgezeichnet wurde, die Amplitude der Ausgangsspannung beträgt 3,04V:

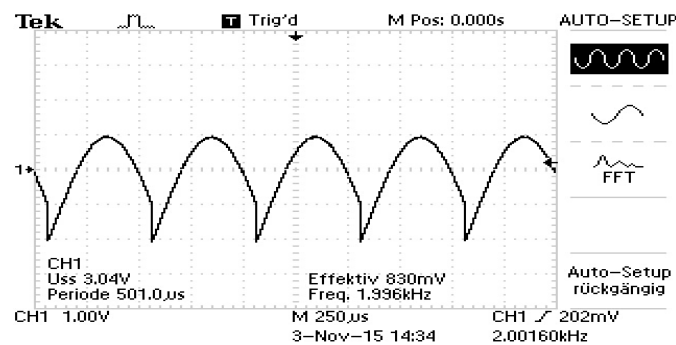


Abbildung 1: U_{out} für $\phi=0$

In Abb.2 ist die gemischte Ausgangsspannung U_{out} gegen die Phasenverschiebung ϕ aufgetragen. Gut zu erkennen ist die Abhängigkeit der Ausgangsspannung von der Phasenverschiebung. Die Maxima von U_{out} liegen hierbei bei etwa 90° bzw. 270° :

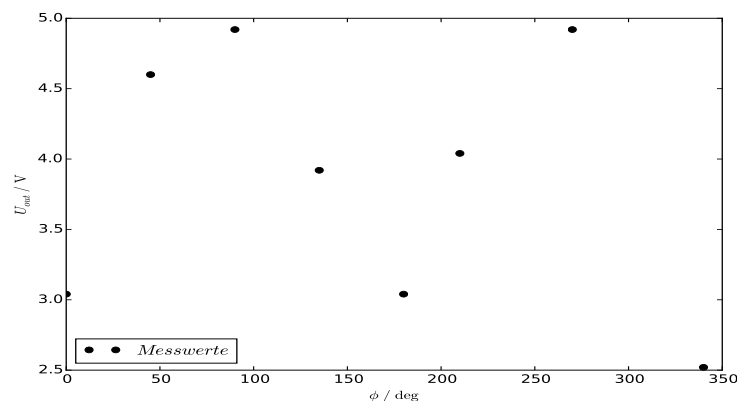


Abbildung 2: U_{out} nach Mischen ohne Rauschen

In Abb.3 ist das am Tiefpaß integrierte Signal gegen die Phasenverschiebung ϕ aufgetragen. Maximale Werte ergeben sich um $\phi = 0^\circ$ herum, das Minimum liegt bei ca. $\phi = 180^\circ$. Das deckt sich mit der Formel (1), in der ϕ in einem Cosinus auftaucht.

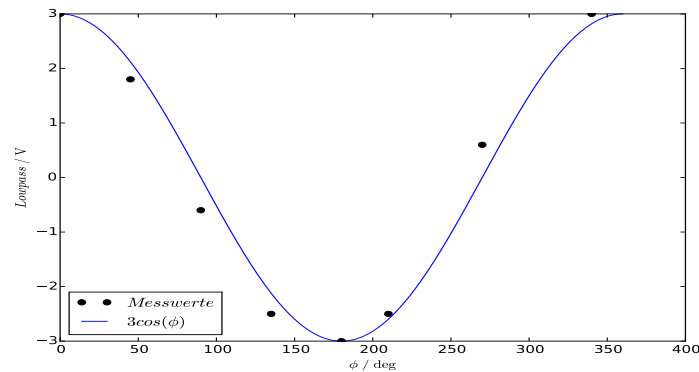


Abbildung 3: Integral der gemischten Ausgangsspannung ohne Rauschen

3.4 Auswertung: Rauschgenerator

Wie unschwer in Abb.4 zu erkennen ist, ergeben sich mit Rauschen sehr ähnliche Messwerte nach Filterung und Mischen. Im folgender Abbildung ist die Spannung für $\phi = 0^\circ$ dargestellt, analog zu Abb.1.

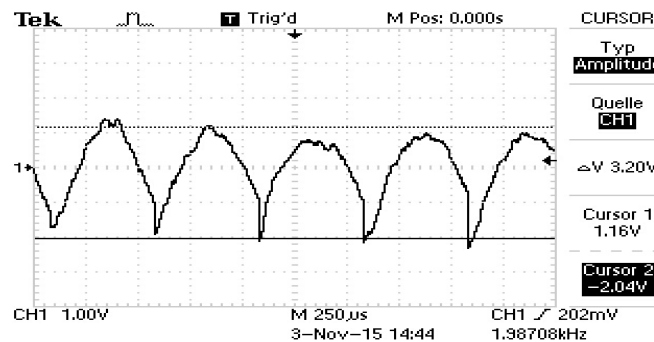


Abbildung 4: U_{out} für $\phi=0$ mit Rauschen

Gut sichtbar ist das nicht vollständig rausgefilterte Rauschen in Abb. 4, die Form der Spannungskurve ähnelt aber stark der aus Abb.1.

Für U_{out} ergeben sich folgende Messwerte in Abhängigkeit von ϕ :

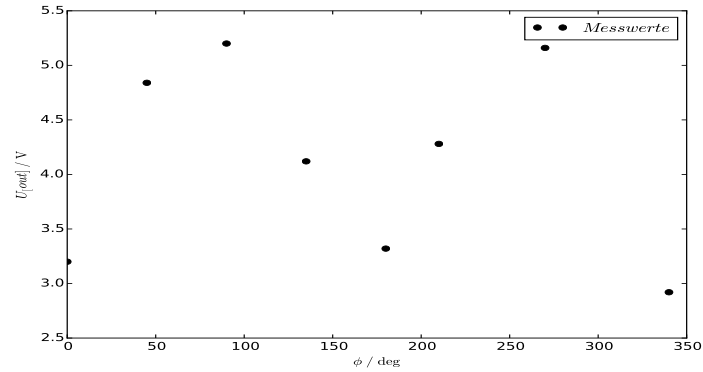


Abbildung 5: U_{out} nach Mischen mit Rauschen

Die Messwerte an dem Tiefpaß (Abb.6) unterscheiden sich überhaupt nicht von denen ohne zugeschalteten Rauschgenerator (Abb.3). Der Grund dafür ist, dass der Tiefpaß die Spannung über mehrere Periodendauern integriert. Daher wird das verbliebene Rauschen einfach herausgemittelt.

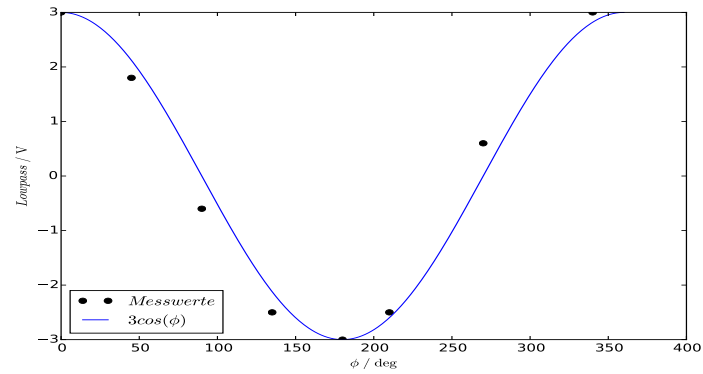
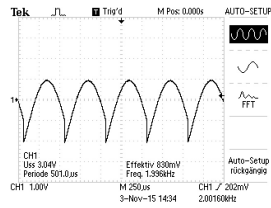


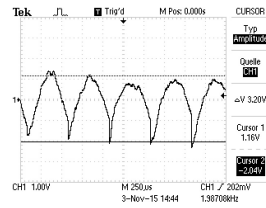
Abbildung 6: Integral der gemischten Ausgangsspannung mit Rauschen

Auf den folgenden zwei Seiten sind alle Meßwerte für U_{out} (mit und ohne Rauschen; vor der Integration am Tiefpaß) dargestellt:

ohne Rauschen:

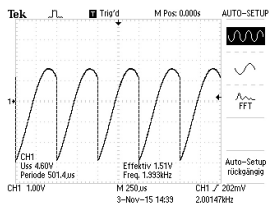


mit Rauschen:

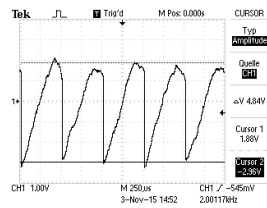


$$U_{out}(\phi = 0^\circ)$$

ohne Rauschen:

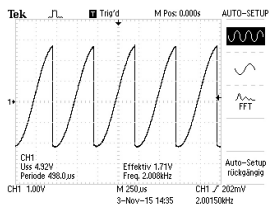


mit Rauschen:

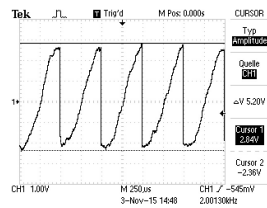


$$U_{out}(\phi = 45^\circ)$$

ohne Rauschen:

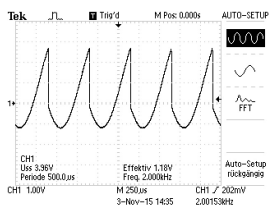


mit Rauschen:

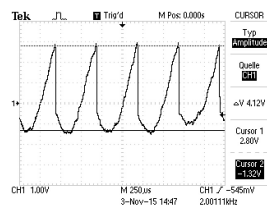


$$U_{out}(\phi = 90^\circ)$$

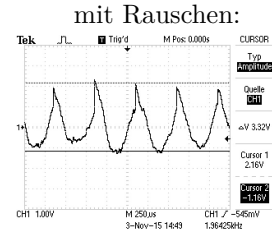
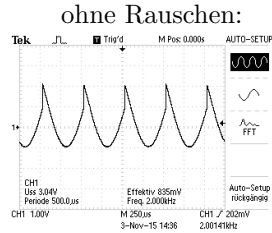
ohne Rauschen:



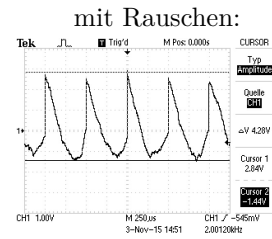
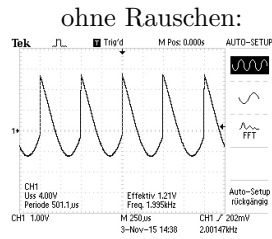
mit Rauschen:



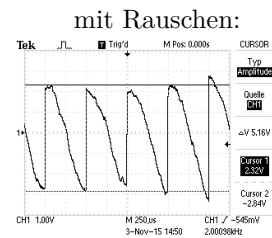
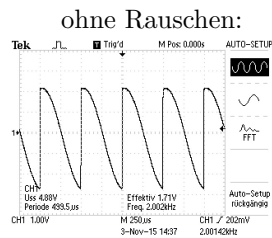
$$U_{out}(\phi = 135^\circ)$$



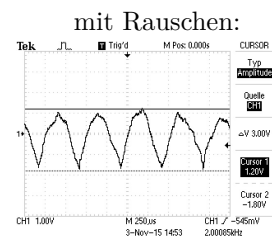
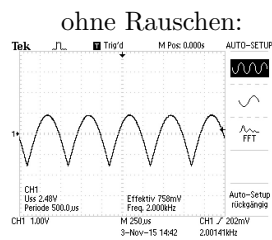
$$U_{out}(\phi = 180^\circ)$$



$$U_{out}(\phi = 210^\circ)$$



$$U_{out}(\phi = 270^\circ)$$



$$U_{out}(\phi = 340^\circ)$$

3.5 Auswertung: LED und Photodiode

In 14 ist das am Tiefpaß integrierte Signal in Abhängigkeit von dem Abstand r zwischen LED und Photodiode dargestellt, wobei das Umgebungslicht die Messung als Rauschen verfälscht. Das erwartete Ergebnis ist, dass die Spannung mit steigendem Abstand abnimmt. Interessanterweise sind die 1,86m der Versuchsanordnung allerdings nicht genug um die Intensität des Lichts der LED soweit abzuschwächen, dass die Photodiode kein Signal mehr detektieren könnte. Bei diesem maximalen Abstand ist am Tiefpaß noch ein Wert von 0,5 (mit Gain = 1000) abzulesen. Wenn der Weg zwischen LED und Diode unterbrochen wird (z.B. indem eine Hand vor die LED gehalten wird), sodass die Diode kein Licht der LED mehr empfangen kann, ergibt sich am Tiefpaß ein Wert von 0,2 (mit Gain = 1000). Das zeigt, dass die Diode auch bei $r=1,86\text{m}$ noch Licht der LED empfängt, dass mit dem Lock-In-Verstärker ausgewertet werden kann.

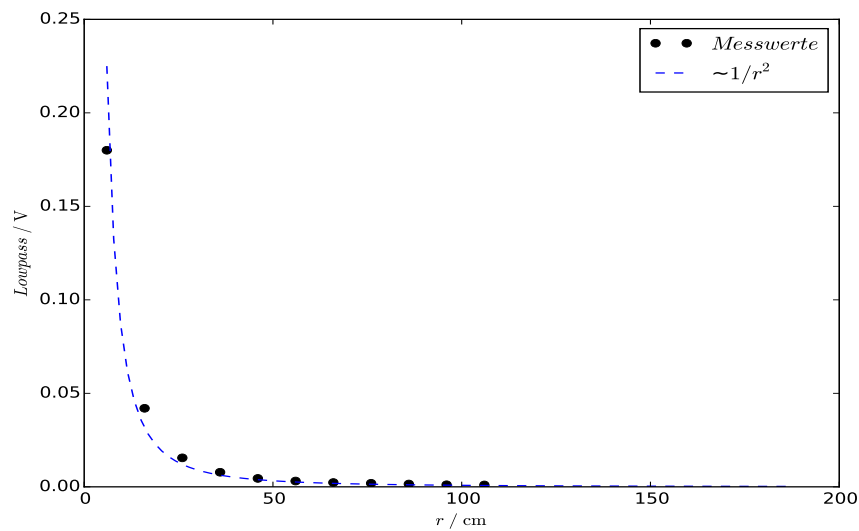


Abbildung 14: Integriertes Signal

4 Diskussion

Dieser Abschnitt befasst sich mit möglichen Meßfehlern oder Abweichungen von der Theorie.

Zunächst erscheint die maximale Spannungsamplitude an dem Funktionsgenerator mit 4,48V relativ niedrig. Ein Vergleich mit der anderen Praktikumsgruppe lässt einen Wert erwarten, der eine Größenordnung höher liegt. Nicht ausgeschlossen ist allerdings, dass die Geräte sich in ihrer Bauweise unterscheiden. In einem Praktikum aus dem Jahr 2008 tauchte ein Wert von 2,3mV auf ([2]), wobei nichts über den verwendeten Lock-In-Verstärker bekannt ist. Die Unterschiede zwischen verschiedenen Geräten scheinen sich also über mehrere Größenordnungen zu erstrecken.

Bei der Betrachtung der Meßwerte von 3.2 und 3.3 (Abb.3 und 6) an dem Tiefpaß - sowohl mit als auch ohne zugeschalteten Rauschgenerator - fällt auf, dass die am Phasenschieber eingestellte Phasenverschiebung ϕ von der tatsächlichen Verschiebung der Signale um einige Grad abweicht (Wie bereits in der Auswertung erwähnt), ansonsten aber sehr gut mit der Theorie (Vgl.: Gleichung 1) harmoniert. Dies lässt sich durch verschiedene Signallaufzeiten erklären.

In 3.4 lässt sich das Abstandsgesetz für die Intensität der LED in Abb.14 wiederfinden. Die Meßwerte harmonisieren ziemlich gut mit der zu erwartenden $1/r^2$ -Abhängigkeit für den Intensitätsabfall im Raum.

Literatur

- [1] *Lock-in-Verstärker*. 11.04.2015. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Lock-in-Verst%C3%A4rker>.
- [2] Marcel C. Strzys Thorben Lünneweber. „Der Lock-In-Verstärker“. In: (2008). URL: <http://physik-praktikum.jimdo.com/>.
- [3] *Versuch V303: Der Lock-In-Verstärker*. TU Dortmund. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/LockIn.pdf>.