

V303: Lock-In-Verstärker

Simon Schulte
simon.schulte@udo.edu

Tim Sedlaczek
tim.sedlaczek@udo.edu

Durchführung: 13.12.2016

Abgabe: 20.12.2016

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
3 Durchführung	4
3.1 Versuchsaufbau	4
3.2 Versuchsdurchführung	4
4 Auswertung	6
4.1 Messwerte	6
4.2 Messungen zur Phasendifferenz	8
4.3 Messungen zur Lichtintensität	13
5 Diskussion	15
Literatur	15

1 Zielsetzung

Ziel des Versuchs ist es, die Funktionsweise eines Lock-In-Verstärkers kennenzulernen.

2 Theorie

Ein Lock-In-Verstärker ist ein Verstärker, dessen Hauptaufgabe darin liegt, stark verrauschte Signale auf die gesuchte Frequenz zu filtern, wie bei einem Bandpass. Der Lock-In-Verstärker hat allerdings eine um den Faktor 100 bessere Güte als ein üblicher Bandpass. Ein Lock-In-Verstärker moduliert ein Messsignal mit einer Referenzfrequenz ω_0 . Dabei werden das Nutzsignal U_{sig} und das Referenzsignal U_{ref} in einem Mischer miteinander multipliziert. Dies ist in Abbildung 1 zu sehen. Anschließend integriert der dem Mischer nachgeschaltete Tiefpass das Mischsignal $U_{\text{sig}} \times U_{\text{ref}}$ über mehrere Perioden der Modulationsfrequenz. Durch die Perioden mitteln sich die unerwünschten Rauschbeiträge weitestgehend heraus. Am Ausgang ist nun eine zur Eingangsspannung U_{sig} proportionale Gleichspannung $U_{\text{out}} \propto U_0 \cos \phi$ zu messen. Dabei ist ϕ die veränderliche Phasenlage des Referenzsignals, die mit dem Nutzsignal U_{sig} synchronisiert wird.

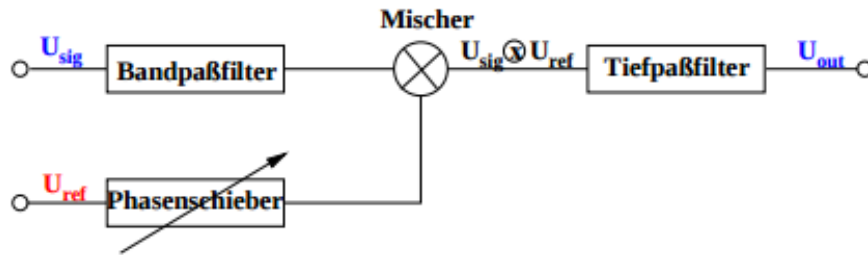


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Lock-In-Verstärkers [TuD16]

In Abbildung 2 sind die Signalverläufe für eine sinusförmige Signalspannung zu sehen, wie sie auch in diesem Versuch vorkommen. Die Signalspannung ist dabei

$$U_{\text{sig}} = U_0 \sin(\omega t) \quad (1)$$

Diese wird durch eine Rechteckspannung U_{ref} derselben Spannung moduliert. U_{ref} ist dabei ein Schalter oder ein Chopper. Sie kann durch eine Fourierreihe genähert werden. Dann erhält man aus dem Produkt von U_{sig} und U_{ref}

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

Mit einer Phasendifferenz ϕ zwischen Nutz- und Referenzspannung wird 2 zu

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

Da die Cosinus-funktion maximal wird, wenn das Argument 0 (oder einem Vielfachen von 2π) entspricht, wird die Ausgangsspannung maximal für $\phi = 0$, also wenn es keinen Phasenunterschied zwischen Nutz- und Referenzspannung gibt.

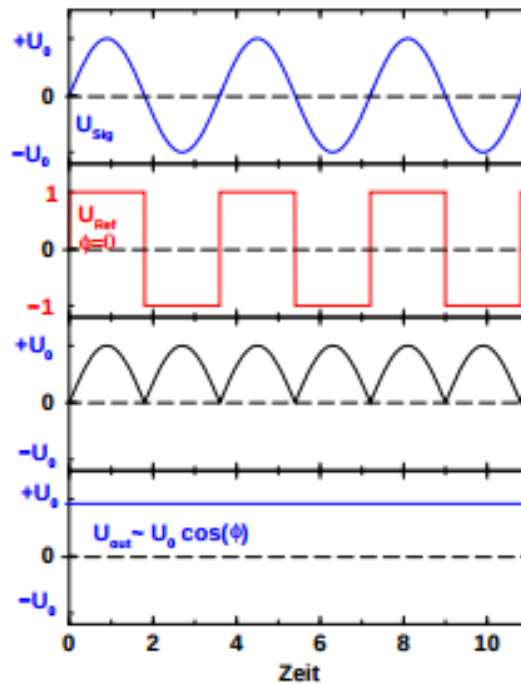


Abbildung 2: Signalverläufe für eine sinusförmige Signalspannung [TuD16]

3 Durchführung

3.1 Versuchsaufbau

In Abbildung 3 ist der Schaltplan eines Lock-In-Verstärkers zu sehen. Als erstes wurde dieser Schaltplan aufgebaut. Der Schaltplan eines Lock-In-Verstärkers beinhaltet einen Vorverstärker, die Hoch-, Tief-, und Bandpassfilter, einen Phasenschieber, einen Funktionsgenerator, einen Rauschgenerator, einen Tiefpass-Verstärker und einen Amplituden-/Lock-In-Detektor. All diese Geräte sind separat bedienbar. Dabei verstärkt der Vorverstärker das zu untersuchende Signal. Die Filter sind dafür da, die gewünschten Frequenzen aus dem Signal herauszufiltern. Mit dem Phasenschieber kann man das bereits in der Theorie erwähnte ϕ variieren. Der Funktionsgenerator wird zum Erzeugen periodischer elektrischer Signale genutzt. Der Rauschgenerator erzeugt Rauschen als zufällige Signalschwankung.

3.2 Versuchsdurchführung

Zuerst werden Messungen ohne Rauschsignal aufgenommen. Dabei wird der Noise-Generator noch nicht eingeschaltet. Als nächstes wird ein Sinussignal U_{sig} erzeugt mit 1 kHz und 20 mV. Dabei entsteht auch ein Referenzsignal U_{ref} mit gleicher Frequenz wie U_{sig} .

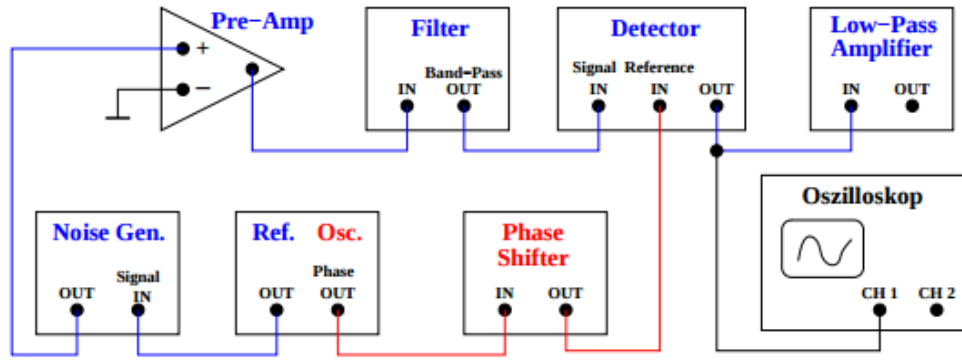


Abbildung 3: Schaltplan eines Lock-In-Verstärkers [TuD16]

Die Ausgangsspannung U_{out} , nach Integration durch den Tiefpass, wird 8 mal in Abhängigkeit von der Phasenverschiebung bestimmt. Danach wird der Noise-Generator eingeschaltet und die Messungen wiederholt.

Als letztes wird noch ein Photo-Detektor in den Schaltplan integriert. Dieser Schaltplan ist in 4 zu sehen. Die LED des Photo-Detektors blinkt mit 200 Hz. Sie kann mit einer Rechteckspannung moduliert werden. Dann wird als Funktion des Abstandes zwischen LED und Photodiode die Lichtintensität gemessen und der maximale Abstand r_{max} bestimmt, bei dem das Licht der LED die Photodiode noch erreicht. Durch ein Oszilloskop werden die in der Auswertung genutzten Bilder gespeichert. Dies ist mit Hilfe des "print"-Knopfes am Oszilloskop möglich. Mit diesem Speicher-Oszilloskop können die Signale aller Komponenten einzeln vermessen und skizziert werden.

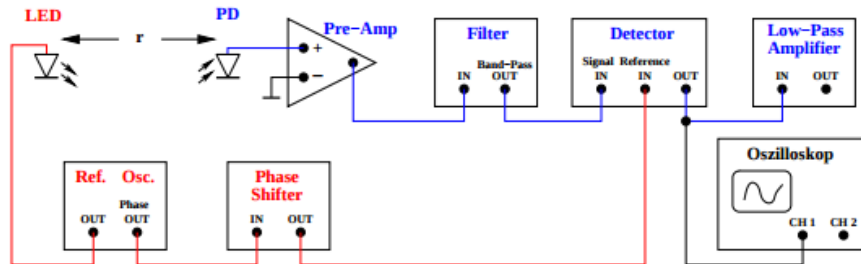


Abbildung 4: Schaltplan eines Lock-In-Verstärkers mit einem Photo-Detektor [TuD16]

4 Auswertung

4.1 Messwerte

Im Laufe der drei Messreihen wurden folgende Werte gemessen:

Tabelle 1: Ausgangsspannung vom Tiefpass bei der jeweiligen Phase in $^{\circ}$.

Phase in $^{\circ}$	Spannung bei inaktivem Noise Generator	Spannung bei aktivem Noise Generator
0	7,0	7,5
30	6,5	7,25
60	3,25	3,6
90	0,25	0,25
120	-2,7	-2,75
150	-6,4	-6,75
180	-7,0	-7,75
210	-6,6	-7,0
240	-3,4	-3,75
270	-0,25	-0,25
300	2,5	2,6
330	6,25	6,75
360	7,2	7,75

Tabelle 2: Ausgangsspannung bei der Messung der Lichtintensität in Abhängigkeit vom Abstand.

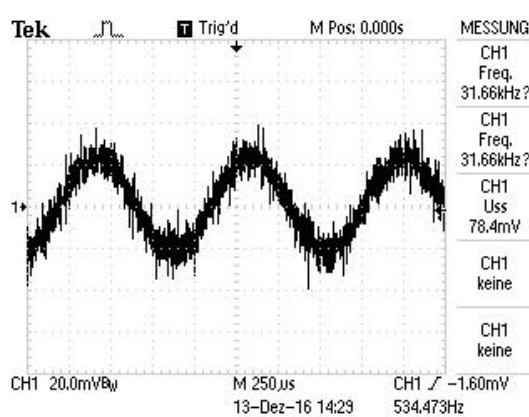
Lock-In Gain	Spannung in V	Abstand in cm
10	8,5	6,1
10	3,5	11,1
10	2	16,1
10	1,25	21,1
50	4	26,1
50	2,75	31,1
50	2	36,1
50	1,75	41,1
200	3,5	46,1
200	2,6	51,1
200	2,25	56,1
200	2	61,1
500	2,5	66,1
1000	3,1	71,1
1000	2,9	81,1
1000	2,75	91,1
1000	2,6	101,1
1000	2,5	111,1
1000	2,4	121,1
1000	2,25	131,1
1000	2,2	141,1

4.2 Messungen zur Phasendifferenz

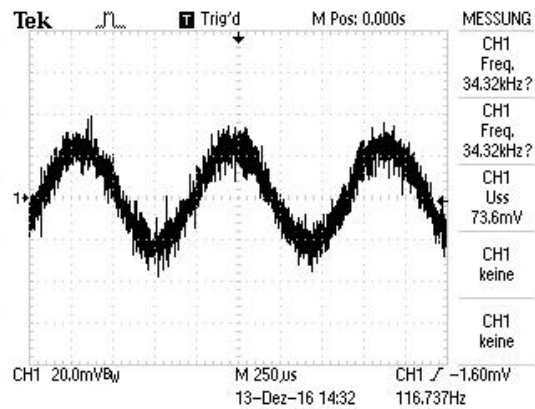
Zunächst war gefragt an welchem Ausgang des Ref./Oscil. man die Spannung variieren kann und an welchem eine konstante Spannungsamplitude anliegt.

Antwort: An dem Ref.-Ausgang (Signal) kann man die Spannung variieren während am Oscil.-Ausgang(Referenz) eine konstante Spannungsamplitude von ca. 30 V anliegt.

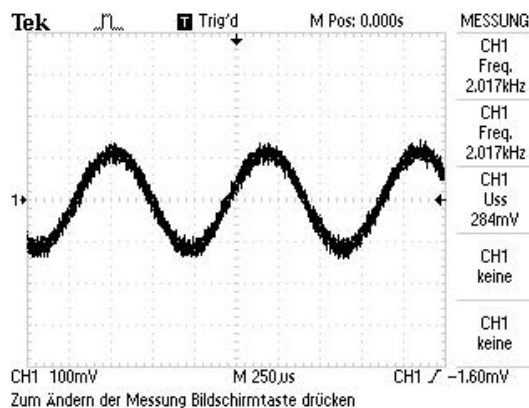
Als nächstes wird die Apparatur schrittweise, bei inaktivem Noise Generator, aufgebaut. Dabei entstanden die folgenden Bilder:



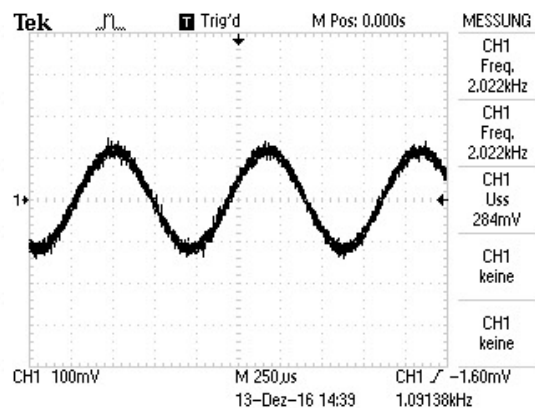
(a) Verlauf der Signalspannung.



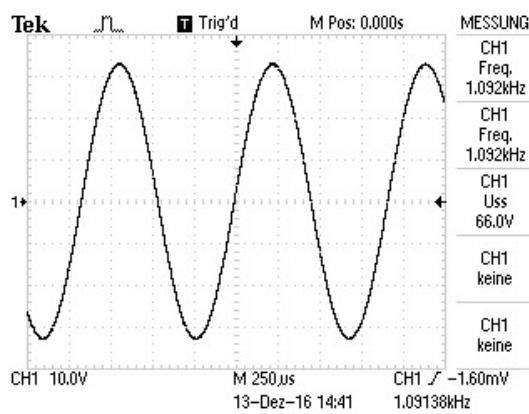
(b) Verlauf der Signalspannung am inaktiven Noise Generator abgenommen.



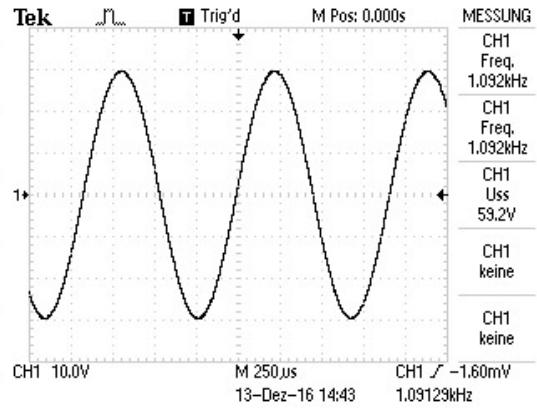
(a) Verlauf der Signalspannung nach dem Durchlaufen des Vorverstärkers.



(b) Verlauf der Signalspannung nach dem Filter.

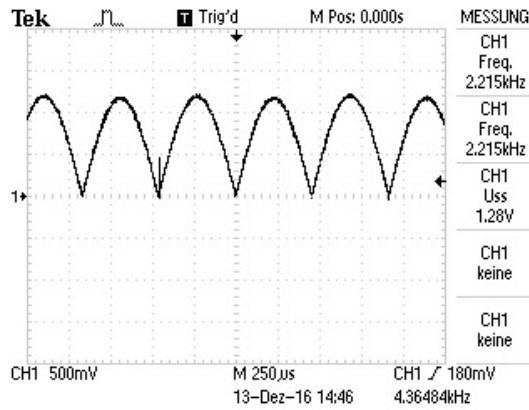


(a) Verlauf der Referenzspannung.

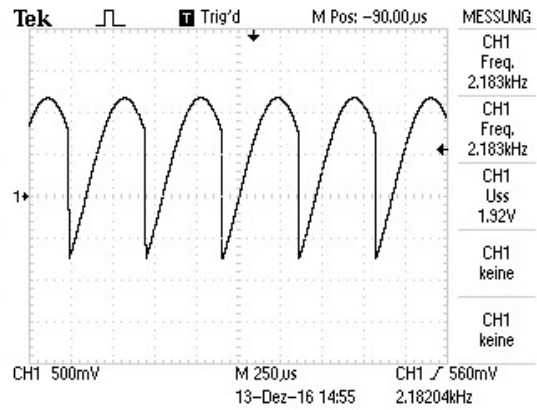


(b) Verlauf der Referenzspannung am Ausgang des Phasenverschiebers.

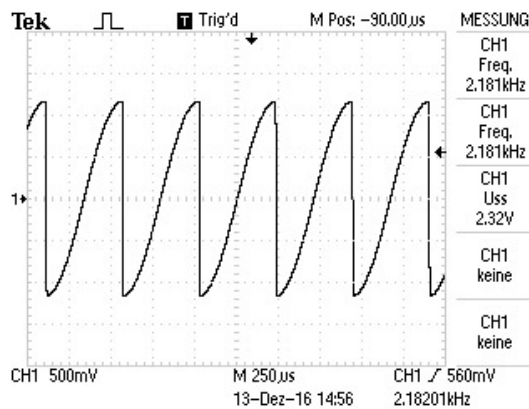
Als nächstes sollten mindestens 5 Bilder von verschiedenen Phasendifferenzen gemacht werden:



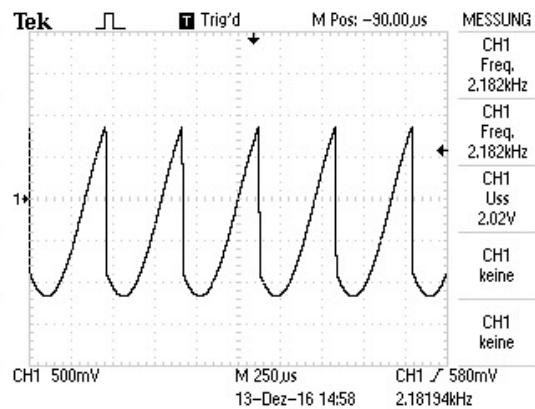
(a) Spannungsverlauf am Lock-In Detektor bei gleicher Phase von Signal und Referenz.



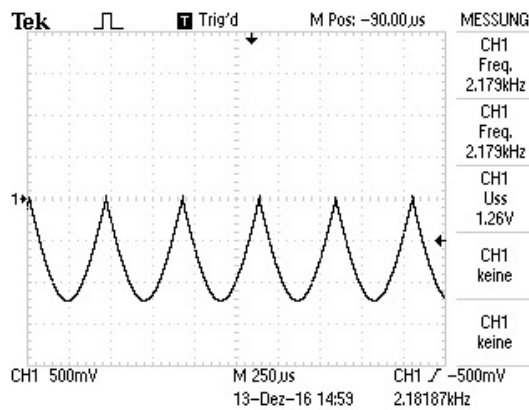
(b) Spannungsverlauf bei einer Phasendifferenz von 45° .



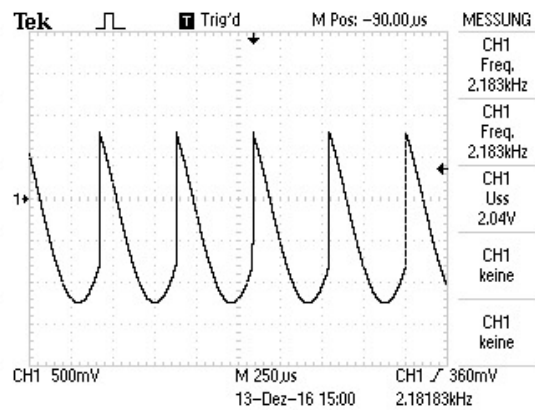
(a) Spannungsverlauf bei einer Phasendifferenz von 90° .



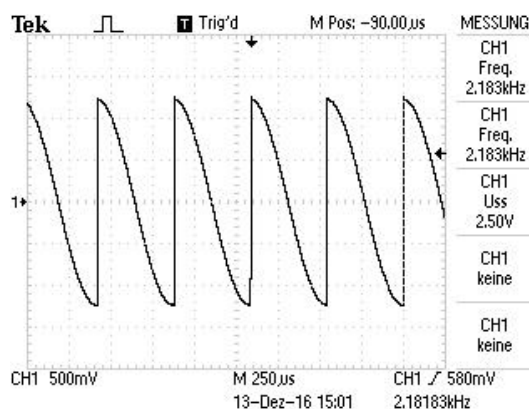
(b) Spannungsverlauf bei einer Phasendifferenz von 135° .



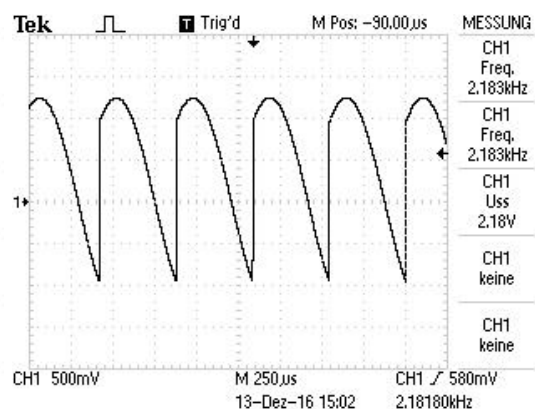
(a) Spannungsverlauf bei einer Phasendifferenz von 180° .



(b) Spannungsverlauf bei einer Phasendifferenz von 225° .

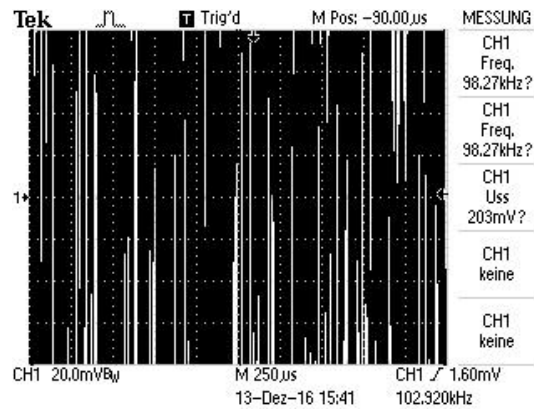


(a) Spannungsverlauf bei einer Phasendifferenz von 270° .

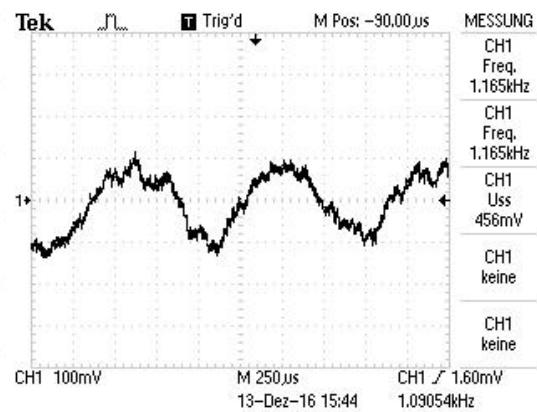


(b) Spannungsverlauf bei einer Phasendifferenz von 315° .

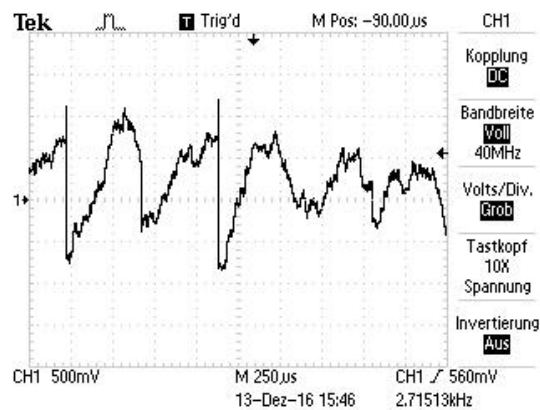
Nun werden Bilder von den Spannungsverläufen, bei eingeschaltetem Noise Generator, gemacht:



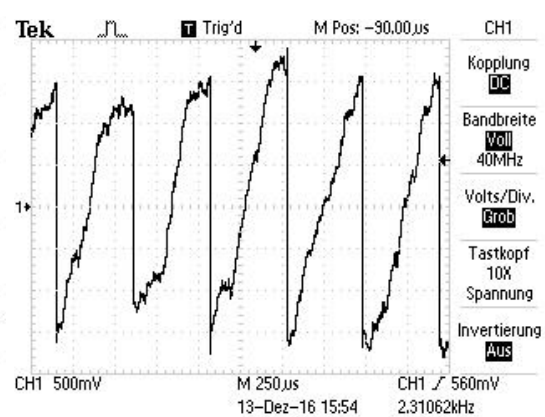
(a) Signalspannung mit dem durch den Noise Generator erzeugten Rauschen.



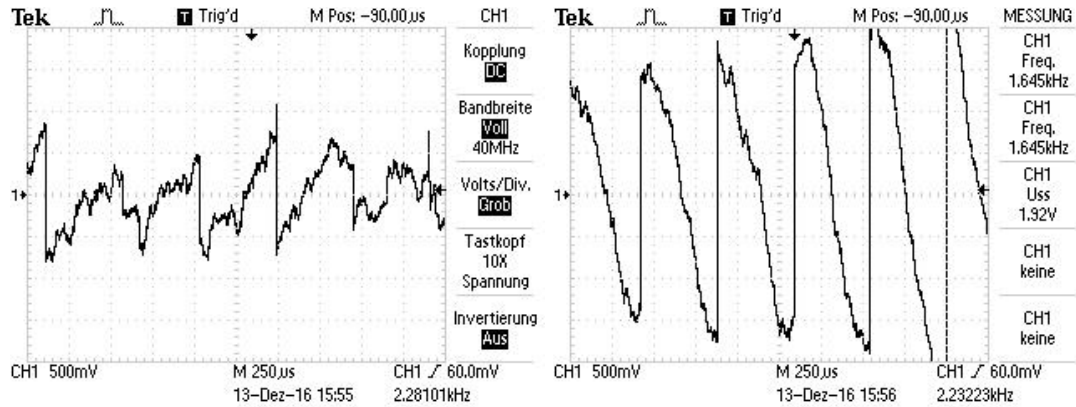
(b) Signal nach der Filterung.



(a) Spannungsverlauf am Ausgang des Lock-In Detektors bei gleicher Phase zum Referenzsignal.



(b) Spannungsverlauf bei einer Phasendifferenz von 90° .



(a) Spannungsverlauf bei einer Phasendifferenz von 180°.

(b) Spannungsverlauf bei einer Phasendifferenz von 270°.

Die Ausgangsspannung am Tiefpass wird für beide Messreihen gegen die Phasendifferenz aufgetragen und durch Python mit einer Funktion der Form

$$U = a \cdot \cos(\phi + b) \quad (4)$$

gefittet.

Für die Messreihe zum inaktiven Noise Generator ergeben sich als Parameter $a = 7.1 \pm 0.2$ und $b = -0.05 \pm 0.02$, während sich für die Messreihe zum aktiven Noise Generator $a = 7.6 \pm 0.2$ und $b = -0.06 \pm 0.02$ ergeben.

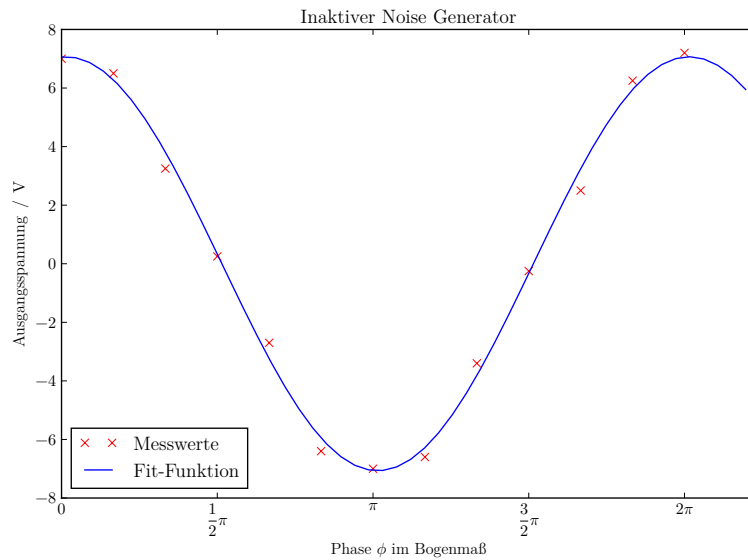


Abbildung 15: Graph der Messwerte und der Fitfunktion bei inaktivem Noise Generator.

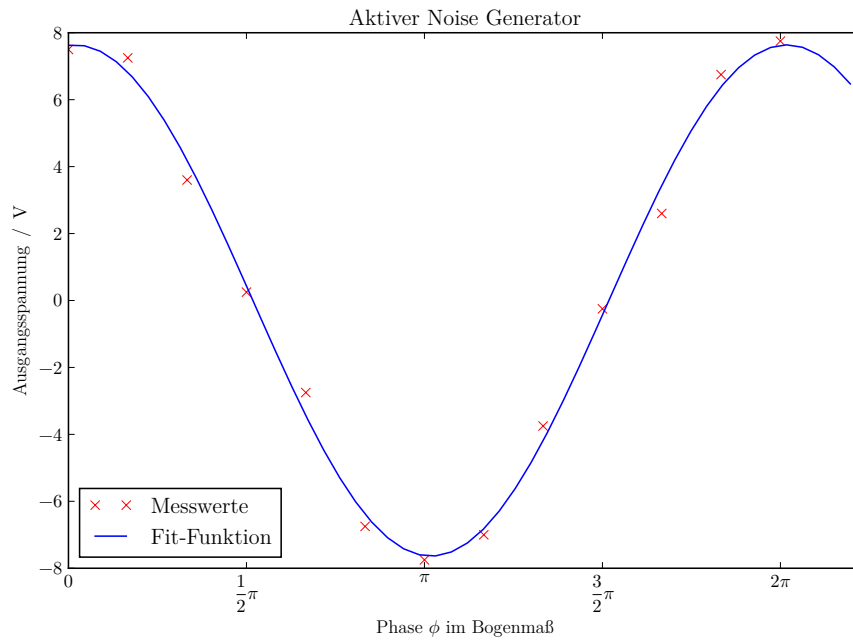


Abbildung 16: Graph der Messwerte und der Fitfunktion bei aktivem Noise Generator.

Demnach folgt aus b eine interne Phasenverschiebung des Gerätes von 3° .

4.3 Messungen zur Lichtintensität

Zur Messung der Lichtintensität in Abhängigkeit vom Abstand wird der Logarithmus vom Betrag der gemessene Spannung gegen den Logarithmus vom Betrag des Abstands aufgetragen und mit einer linearen Funktion

$$g(x) = b \cdot x + a \quad (5)$$

gefittet. Dabei ergeben sich die Parameter zu: $b = -2,18 \pm 0,09$ und $a = -3,5 \pm 0,1$. Mit b lässt sich erkennen, dass die Spannung mit dem Abstandsquadrat abnimmt. Der folgende Graph zeigt den Verlauf dieser Funktion aufgetragen.

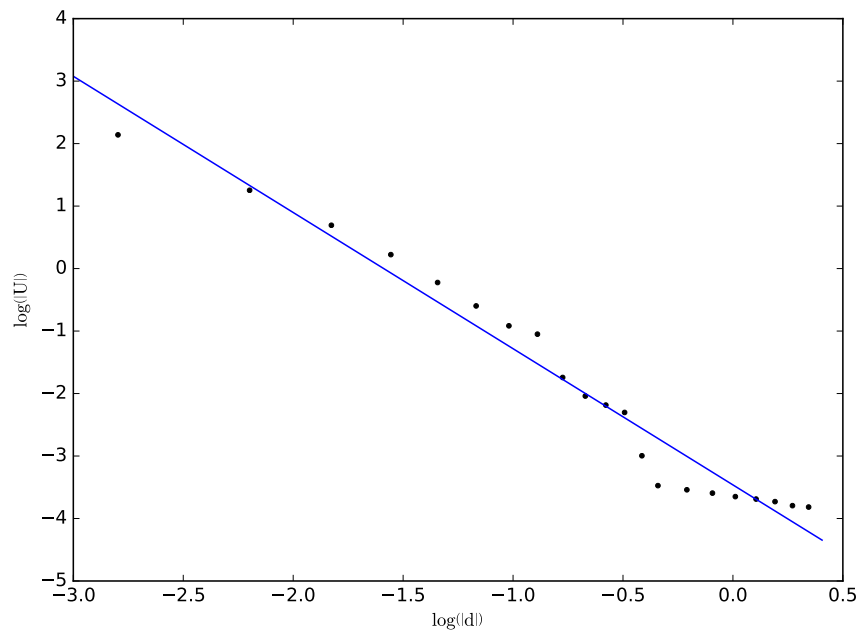


Abbildung 17: Graph der Messwerte und der Fitfunktion bei der Messung der Lichtintensität.

Wie man sieht wird die Messung ab einer Distanz von 50 cm relativ ungenau. Somit lässt sich bis dorthin eindeutig das Signal der LED nachweisen. Auf größere Entfernung nimmt das Signal weiterhin ab, wobei es sich bei einer Distanz von 1 m allmählich asymptotisch einem konstanten Wert nähert.

5 Diskussion

Anhand der drei Messreihen lässt sich gut die Funktionsweise des Lock-In Verstärkers erkennen. Das Signal, welches in der ersten Messreihe untersucht wurde enthielt schon ein leichtes Rauschen, welches fast gänzlich verschwand. Gut zu erkennen war dabei, dass das Referenzsignal immer entsprechend der Phasenverschiebung einen 180° breiten Abschnitt des Sinussignals ausschneidet und mit doppelter Frequenz darstellt, was an dem Vorzeichen der Referenzspannung liegt. Nach dem einschalten des Noise Generators war das Signal nicht mehr zu erkennen, doch erhält man am Ende fast die gleichen Werte, wie bei der ersten Messreihe.

Auch bei der dritten Messreihe war das Gerät in der Lage das LED Signal zu identifizieren. Dass es sich hierbei um das Signal der LED handelt, kann man anhand der $\frac{1}{r^{2.18}}$ Abhängigkeit erraten. Im Idealfall nimmt die Lichtintensität mit $\frac{1}{r^2}$ ab. Jene Abweichung lässt sich damit begründen, dass sowohl die LED als auch die Photodiode um die vertikale Achse drehbar sind. Somit führt eine Ungenauigkeit in der Ausrichtung dieser beiden Geräte dazu, dass man mit zunehmender Distanz einen zusätzlichen Einfluss durch den von der direkten Verbindungslinie abweichend schwächer werdenden Lichtkegel der LED erhält.

Ein weiterer Faktor, der möglicherweise eine Rolle spielt ist die Deckenbeleuchtung, die mit einer Frequenz von 50 Hz leuchtet und mit 100 Hz in dem Lock-In Verstärker ankommt. Normalerweise sollte eben jenes Licht durch den Lock-In Verstärker herausgefiltert werden, doch konnte man, z.B. wenn man eine Hand in den Lichtweg der LED hält, immernoch eine Spannung von 0,02 V messen. Möglicherweise könnte es zu einem derartigen Einfluss kommen, da 200 Hz ein Vielfaches von 100 Hz ist und dies somit je nach Phasendifferenz zum Referenzsignal für eine kleine Spannung sorgen könnte. Des Weiteren fällt auf, dass die gemessene Spannung bei der dritten Messreihe bei jedem umstellen des Gains einen kleinen Sprung nach unten macht.

Literatur

[TuD16] Tu-Dortmund. *Versuch 303: Der Lock-In-Verstärker*. 19. Dez. 2016. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/LockIn.pdf>.