

Anfängerpraktikum V303

Lock-In-Verstärker

Helena Nawrath
helena.nawrath@tu-dortmund.de

Carl Arne Thomann
arnethomann@me.com

Durchführung: 2. Dezember 2014 Abgabe: 9. Dezember 2014

TU Dortmund – Fakultät Physik

1 Zielsetzung

Versuchsziel ist es, sich mit der Funktionsweise des Lock-In-Verstärkers vertraut zu machen. Außerdem soll für 10 verschiedene Phasen mit und ohne Störung die Funktionsweise verifiziert werden. Zuletzt soll die Rauschunterdrückung mit einer Photodetektorschaltung überprüft werden.

2 Theorie

Lock-In-Verstärker werden eingesetzt, um Signale mit hohem Rauschen zu messen. Das zu messende Eingangssignal U_{sig} durchläuft im Gerät verschiedene Bauelemente, die in Abbildung ?? dargestellt sind.

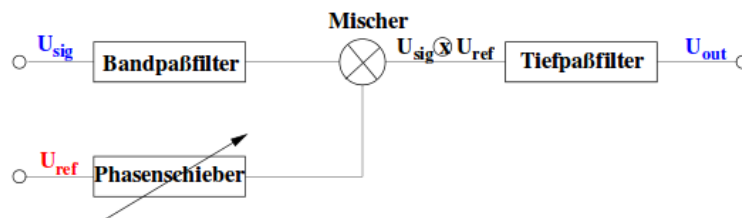


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Lock-In-Verstärkers. [V303]

Nach der Verstärkung durch den *Pre-Amplifier* durchläuft das Signal zunächst einen *Bandpassfilter*, der das Rauschen minimiert. Alle Frequenzen $\omega \ll \omega_0$ und $\omega \gg \omega_0$ werden grob herausgefiltert. Ein *Funktionsgenerator* erzeugt die Referenzspannung U_{ref} – eine Sinus- oder Rechteckspannung der Frequenz ω_0 –, welche über den *Phasenschieber* an die Phase des Eingangssignals angepasst werden kann. Dieser Vorgang nennt sich Synchronisation. Im *Mischer* treffen beide Signale aufeinander und werden multipliziert. Anschließend wird das Mischsignal $U_{\text{sig}} \times U_{\text{ref}}$ an den *Tiefpass* weitergeleitet, der die Modulationsfrequenz ω_0 über mehrere Perioden integriert, um restliche Rauschanteile $\omega \neq \omega_0$ auszuschließen. Zurück bleiben nur die Anteile der Signalsspannung U_{sig} , die mit der Referenzspannung synchronisiert werden konnten. Um eine möglichst geringe Bandbreite $\Delta\nu = \frac{1}{\pi RC}$ zu erhalten, sollte die Zeitkonstante $\tau = RC$ des *Tiefpasses* ausreichend groß gewählt werden. Damit wird eine hohe Gütezahl im Bezug auf Störungsfilterung erzielt.

Die Ausgangsspannung U_{out} ist eine Gleichspannung, welche proportional zur Eingangsspannung U_{sig} und zum Cosinus der Phasendifferenz $\Delta\Phi$ ist:

$$U_{\text{out}} \propto U_{\text{sig}} \cos(\Delta\Phi). \quad (1)$$

U_{out} wird also maximal, wenn die Phasendifferenz $\Delta\Phi = 0^\circ$ (wahlweise Vielfache von 180°) beträgt. [regensburg]

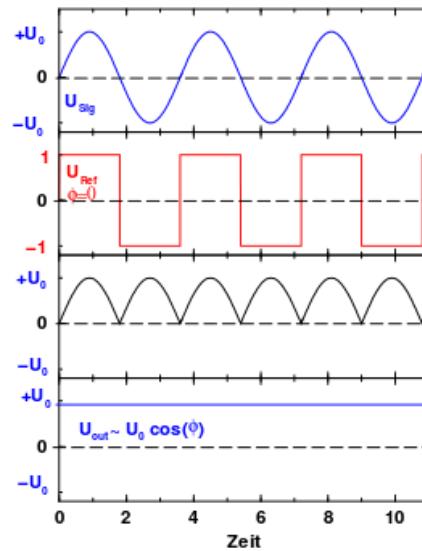


Abbildung 2: Überlagerung eines Sinus-förmigen Eingangssignals mit rechteckiger Referenzspannung. [V303]

Wird beispielsweise ein Sinus-förmiges Eingangssignal $U_{\text{sig}} = U_0 \sin(\omega t)$ wie in Abbildung ?? mit einem rechteckigen Referenzsignal U_{ref} gleicher Frequenz gefaltet, wird diese zunächst durch eine Fourierreihe angenähert, welche aus den ungeraden Harmonischen der Grundfrequenz besteht. Wird das multiplizierte Signal, bestehend aus geraden Oberwellen der Frequenz ω , durch den als Gleichrichter funktionierenden Tiefpass geleitet, ergibt sich die Endspannung

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

Besteht kein Phasenunterschied zwischen Eingangs- und Referenzsignal, so nimmt die Endspannung ihren Maximalwert

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

an. Die Rechteckspannung mit auf 1 genormten Amplitude realisiert einen Schalter („Chopper“). Indem die Werte 1 und -1 durch positive und negative Halbwellen angenommen werden, steht der Schalter auf „Ein“ bzw. „Aus“.

3 Durchführung

Zunächst werden vor Versuchsbeginn nacheinander die beiden Ausgänge des Funktionsgenerators an das bereitstehende Oszilloskop geschlossen. Durch Ausprobieren kann festgestellt werden, welches das zu messende Signal und welches das Referenzsignal ist.

Die Amplitude des Referenzsignals kann im Gegensatz zum Messsignal verändert werden. Außerdem besteht die Möglichkeit, zwischen Rechteck- und Sinusspannung zu wählen.

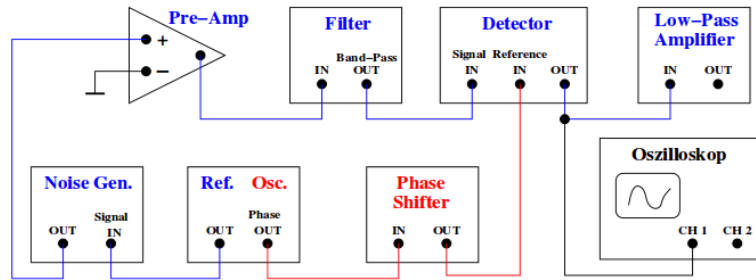


Abbildung 3: Schematischer Versuchsaufbau zur Verifizierung der Funktionsweise des Verstärkers. [V303]

Im ersten Versuchsteil soll die Funktionsweise des Gerätes bestätigt werden. Dazu wird die in Abbildung ?? gezeigte Schaltung aufgebaut. Das Oszilloskop dient dazu, die verschiedenen Signale sichtbar zu machen. Es kann beliebig an die verschiedenen Bestandteile des Verstärkers, etwa vor den Tiefpass, angeschlossen werden. Der Noise-Generator wird in diesem Versuchsteil nicht benötigt und für die Messung überbrückt. Es werden Frequenz und Amplitude des Messsignals und des Sinus-förmigen Referenzsignals eingestellt. Mit dem Phasenschieber werden 10 unterschiedliche Phasen eingestellt und die Werte der Ausgangsspannung notiert.

Dieser Vorgang wird anschließend mit verrauschtem Sinussignal wiederholt. Dazu wird der vorher überbrückte Noise-Generator zugeschaltet.

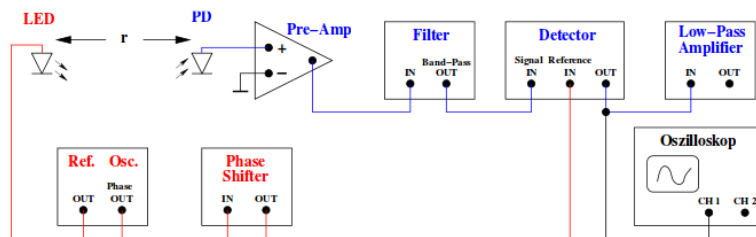


Abbildung 4: Versuchsaufbau zur Messung mit Photodiode. [V303]

Die in Abbildung ?? skizzierte Schaltung wird im zweiten Versuchsteil aufgebaut. Der Noise-Generator wird nun durch eine LED sowie der dazugehörigen Photodiode ersetzt. Es soll die Intensität des Lichtes eines gepulsten LED-Signales in Abhängigkeit vom Abstand gemessen werden. Die sich auf einer Metallschiene befindliche LED soll mit einer Frequenz von 300 Hz blinken, was mit einer Rechteckspannung gleicher Frequenz realisiert wird. Nach Verschieben der Photodiode auf der Metallschiene kann die Endspannung am Lock-In-Verstärker abgelesen werden.

4 Auswertung

4.1 Verstärkung eines gestörten Sinus-Signales

Der Effektivwert bei Sinus-förmiger Wechselspannung ist an beiden Ausgängen 4,63 V, die Frequenz f beträgt 1 kHz. Mit $U_{\text{eff}} = \sqrt{2} \cdot U_0$ für Sinusschwingungen ergibt sich eine Amplitude $U_0 \approx 6,55$ V. Die Endspannungen U_{out} sind in Tabelle ?? aufgetragen. Die angegebene Phase ist die eingestellte Phase des Phasenschiebers.

Phase	Endspannung U_{out} / V		
	ohne Störung	mit Störung	Differenz
0°	−6,00	−6,00	0,00
45°	−4,00	−4,00	0,00
90°	0,20	0,50	0,30
120°	2,62	3,00	0,38
135°	4,25	4,50	0,25
180°	5,81	6,00	0,19
225°	3,95	3,50	−0,45
270°	0,20	−0,50	−0,70
315°	−4,17	−4,50	−0,33
360°	−5,83	−5,50	0,33

Tabelle 1: Ausgangsspannung des gegebenen Signals.

Diese Endspannungen U_{out} werden in Diagramm ?? gegen die eingestellte Phase $\Delta\phi$ aufgetragen. Die Beziehung (??) wird durch die Datenpunkte verifiziert, es kommt allerdings zu einem festen Phasenversatz α von $\alpha \approx 180^\circ$. Dies ist eventuell darauf zurückzuführen, dass die Ausgänge des Funktionsgenerators und die Bauteile des Verstärkers einen permanenten Phasenversatz aufweisen oder die Leitungen einen Versatz bewirken, wodurch sich der kumulierte Versatz α ergibt. Dass die Amplitude der Messkurve größer ist als die Amplitude der Theoriekurve, ist darauf zurückzuführen, dass das im Experiment benützte Referenzsignal nicht normiert-rechteckförmig, sondern sinusförmig mit Amplitude verschieden von 1 V ist.

Abbildung ?? zeigt das gestörte Signal, neben Abweichungen von der Sinus-Form entlang der Auslenkung sind bei Aufnahmen zu verschiedenen Zeiten auch Abweichungen in Frequenz-Richtung sichtbar. Trotz dieser Abweichungen von dem reinen Sinus-förmigen Signal werden die Werte der Messung ohne Störung gut angenähert. Die Differenz der Spannungen ist in Tabelle ?? aufgetragen, die Abbildungen ?? und ?? zeigen zueinander starke Ähnlichkeit. Weiterer Indikator der guten Rauschunterdrückung sind die Aufnahmeserien ?? und ??. Gezeigt werden in Abhängigkeit von der eingestellten Phase die gefalteten Signale, die den Tiefpass erreichen. Der paarweise Vergleich von Bildern des ungestörten und des gestörten Messsignals zeigt die Ähnlichkeit der gefalteten Signale.

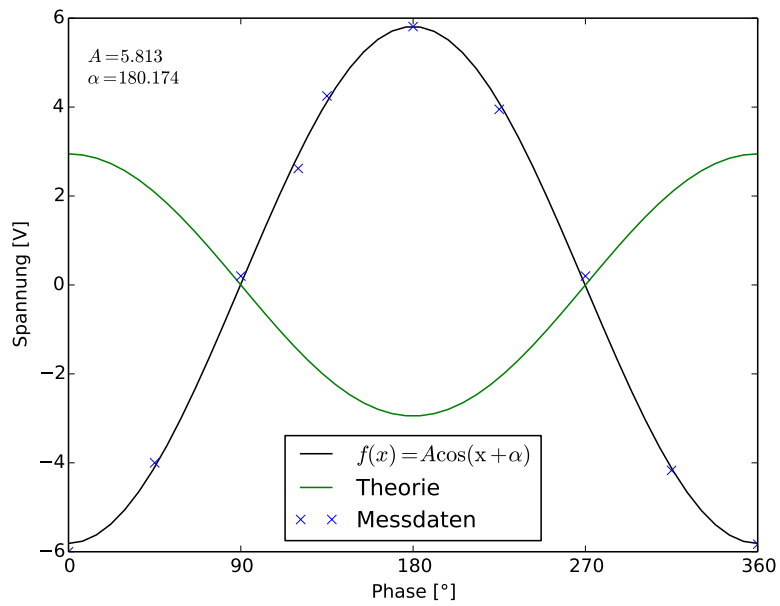


Abbildung 5: Endspannung des Lock-In-Verstärkers bei Sinus-förmigen Eingang mit $U_{\text{eff}} = 4,63 \text{ V}$ und $f = 300 \text{ Hz}$.

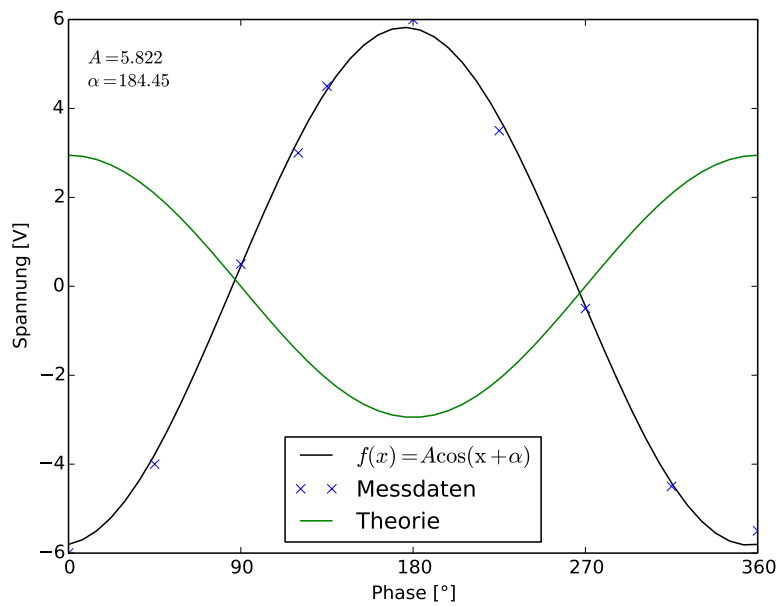


Abbildung 6: Endspannung des Lock-In-Verstärkers bei gestörtem Signal.

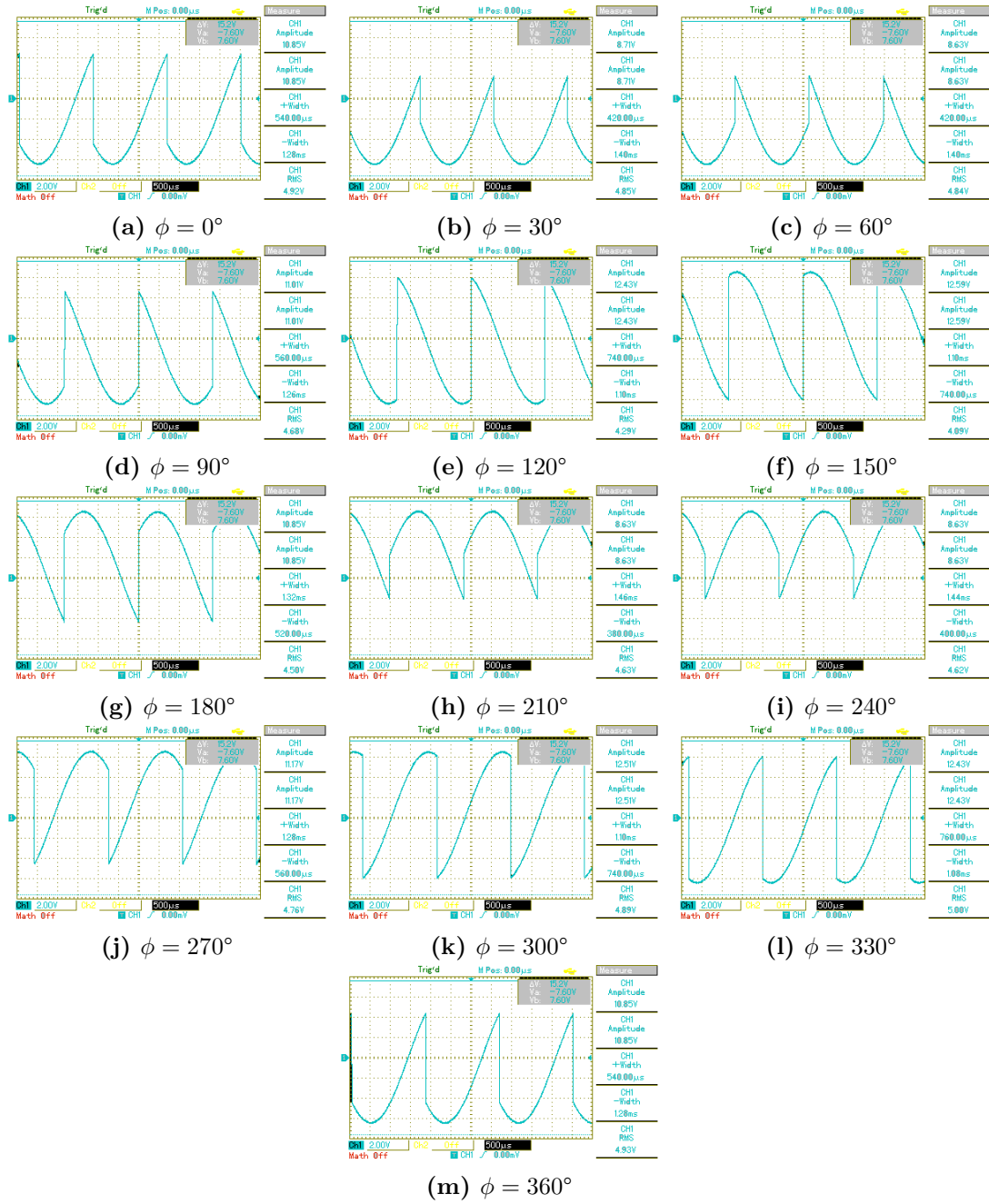


Abbildung 7: Fotos des Oszillators: die gefalteten Signale bei variabler Phasenverschiebung. [gimp]

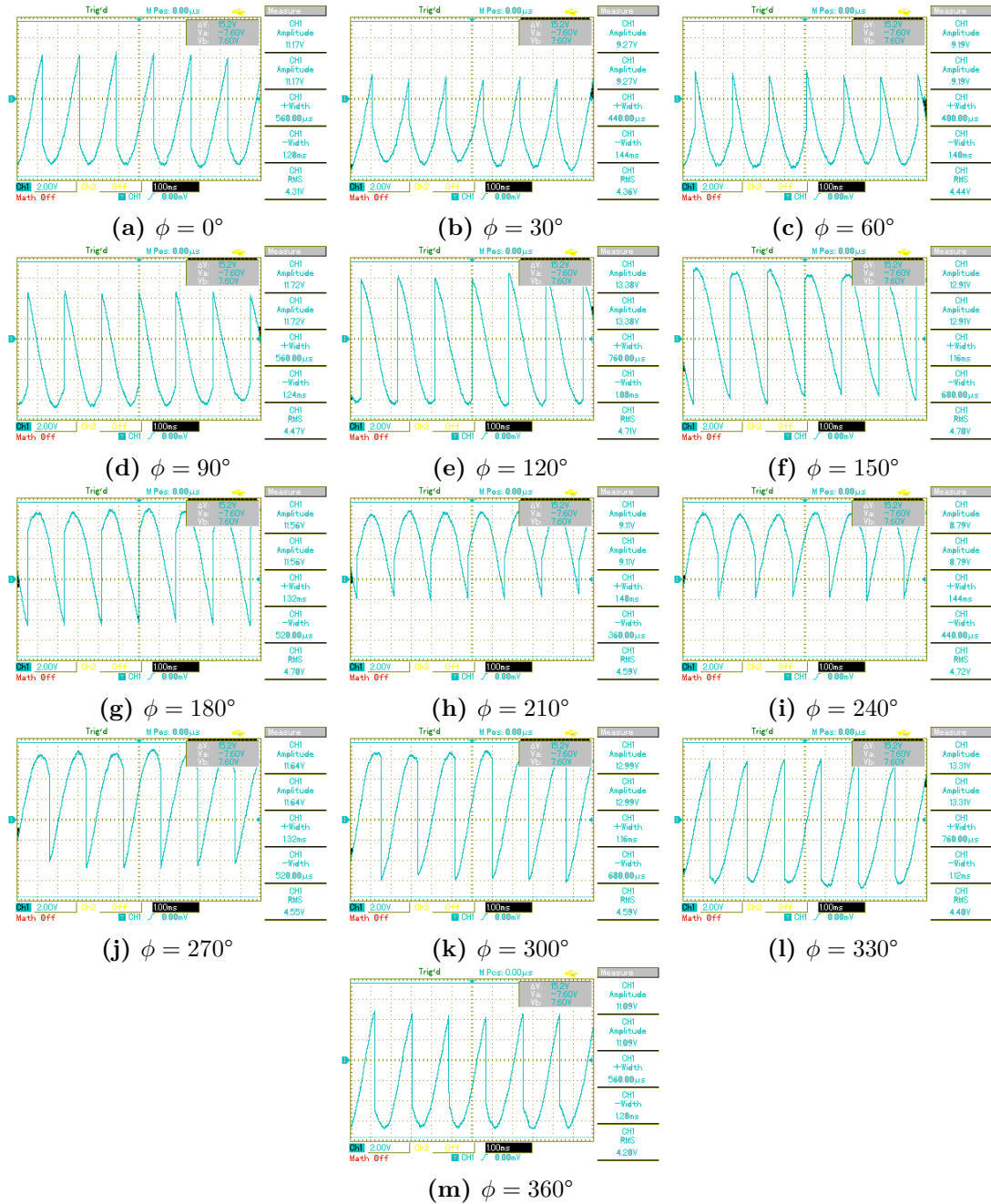


Abbildung 8: Analog zu Abbildung ?? : Faltung des gestörten Signals. [gimp]

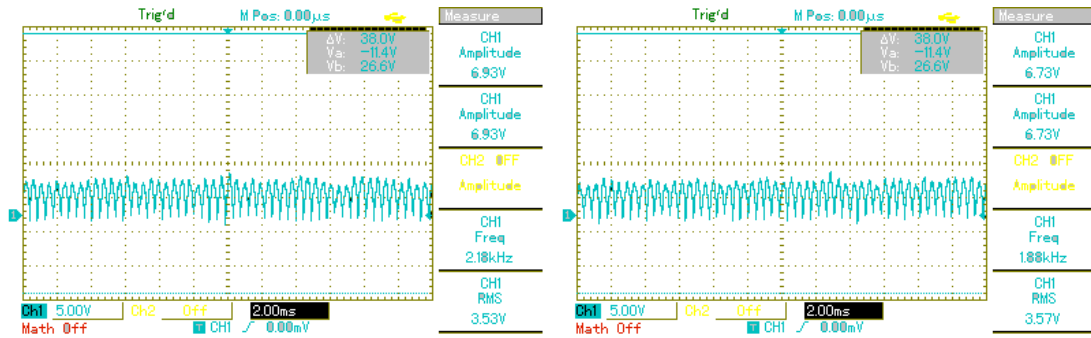


Abbildung 9: Fotos des Oszillators: das gestörte Messsignal zu zwei verschiedenen Zeiten. [gimp]

4.2 Verstärkung des LED-Signales

In Tabelle ?? sind die gemessenen Endspannungen U_{out} , den Abstand a zwischen Photodiode und LED sowie die Gesamtverstärkung, das Produkt aus den einzelnen Verstärkungen der Bauteile, aufgetragen. In ?? ist experimentell nachgewiesen, dass der Betrag

Abstand a [m]	Gemessene Endspannung U_{out} [V]	Umgerechnete Endspannung U_{out} [V]	Relative Verstärkung
0.02	-5	-5	1
0.05	-1	-1	1
0.08	-0,5	-0.5	1
0.11	-2	-0.2	10
0.14	-1	-0.1	10
0.17	-0,9	-0.09	10
0.20	-6,0	-0.06	100
0.23	-4,5	-0.045	100
0.26	-3,5	-0.035	100
0.29	-2,5	-0.025	100
0.39	-1,0	-0.01	100
0.49	-0,7	-0.007	100
0.59	-0,5	-0.005	100
0.69	-0,3	-0.003	100
0.79	-0,25	-0.0025	100
0.99	-0,12	-0.0012	100
1.19	-0,1	-0.001	100

Tabelle 2: Ausgangsspannung bei der Messung des LED-Lichtes.

der Endspannung U_{out} maximal wird, wenn der Phasenschieber auf Vielfache von 180°

eingestellt ist. Bei der Einstellung $\Delta\phi = 0^\circ$ wird eine maximale, negative Endspannung U_{out} erwartet und so den eventuellen Einfluss des Phasenschiebers umgangen. Das Signal, das von der Photodiode aufgenommen wird, wandelt der Lock-In-Verstärker dementsprechend in eine reine negative Gleichspannung als Endspannung. Im Interesse der Lesbarkeit werden die negativen Spannung unter Berücksichtigung der Gesamt-Verstärkung in Diagramm ?? aufgetragen. Hierzu wird die Anfangsverstärkung als 1 definiert und die gemessenen Endspannungen durch die jeweilige relative Gesamtverstärkung dividiert. Der näherungsweise lineare Abfall der Spannung bei doppel-logarithmischer Skalierung zeigt, dass die gemessene Intensität mit $r^{-\alpha}$ mit $\alpha \in \mathbb{R}$ abfällt.

Zur Kontrolle, dass die angegebenen Spannungen auf das LED-Signal zurückzuführen sind und nicht von Fremdeinflüssen stammen, wird die LED zeitweise abgedeckt. Dabei geht bei einem messbaren Signal die Ausgangsspannung auf Null zurück und nimmt ihren ursprünglichen Wert an, wenn der Lichtweg zwischen LED und Photodiode frei gemacht wird. Bei einem Abstand größer als 1,20 m ist trotz Verstärkung keine Ausgangsspannung zuverlässig messbar, die Ausgangsspannung zeigt beim Abdecken der LED keine wesentliche Änderung.

In Abbildung ?? wird die Linearisierung der Messwerte vorgenommen. Es wird eine Regression für die Funktionsklasse

$$y(x) = A \cdot x^b \quad (4)$$

angesetzt, die nach der doppelten Linearisierung die Gestalt

$$\underbrace{\ln(y(x))}_{y_{\text{lin}}} = \underbrace{\ln(A)}_{d_{\text{lin}}} + \underbrace{b}_{c_{\text{lin}}} \cdot \underbrace{\ln(x)}_x \quad (5)$$

hat. Für diese linearisierte Ausgleichsgerade gilt (vgl. [scipy])

$$\Delta = N \sum x^2 - \left(\sum x \right)^2 \quad (6a)$$

$$c_{\text{lin}} = \frac{N \sum x \cdot y - \sum x \cdot \sum y}{\Delta} \quad (6b)$$

$$d_{\text{lin}} = \frac{\sum x^2 \cdot \sum y - \sum x \cdot \sum x \cdot y}{\Delta} \quad (6c)$$

mit der Anzahl aller Werte N.

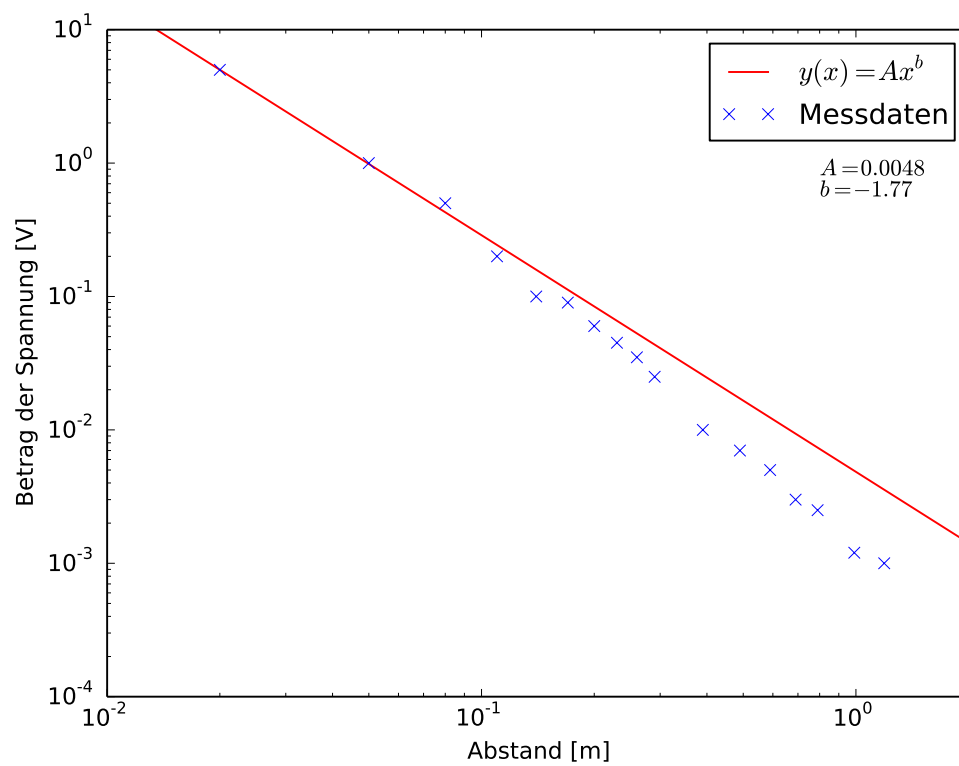


Abbildung 10: Ausgangsspannung des Lock-In-Verstärkers bei Messung mit der LED bei doppelt-logarithmische Skalierung.

5 Diskussion

5.1 Ergebnis des Versuches

Der Lock-In-Verstärker eignet sich hervorragend zur Messung von schwachen und gestörten Signalen. Das Signal kann dabei Störungen aufweisen, die die Signalstärke wesentlich übertreffen, im Versuch wurde die Störsicherheit bei geringem Verhältnis von Störung zu Signal nachgewiesen (vgl. Tabelle ??).

Im Versuch konnte das 300 Hz-Signal der LED über eine Strecke von etwa 1 m nachgewiesen werden, wobei keine speziellen Maßnahmen getroffen wurden, um Einflüsse durch Störlicht zu vermeiden. Die Intensität der LED war dabei nicht wesentlich größer als das Umgebungslicht des Raumes.

5.2 Anwendung des Lock-In-Verstärkers

Anwendung findet der Lock-In-Verstärker beispielsweise in der Elektro- und Informationstechnik zur Übermittlung von Daten über langen Strecken. Bei der Messung von Signalen sollte im Idealfall die Frequenz des Signales bekannt sein, etwa bei amplitudenmodulierten Wellen. Ist die Frequenz des zu messenden Signales bekannt und der benutzte Bandpass durchlässig für das Spektrum der Frequenzen, so kann das Signal präzise von den Störungen gefiltert und verstärkt werden. Dies führt zu einem wesentlichen Unterschied zu reinen Bandpass-Filtern: der Lock-In-Filter ist in der Lage, Signale mit variabler Frequenz zu verstärken und Störung in Frequenzlage zu filtern (vgl. ??).

Ein anderer Verwendungszweck ist die Bestimmung des Phasenversatzes von zwei Signalen. Nach Gleichung (??) ist die ausgegebene Gleichspannung maximal, wenn die Eingangssignale keinen Phasenversatz aufweisen. In Abschnitt ?? wird gezeigt, wie sich ein Phasenunterschied auf die resultierende Spannung auswirkt. Die verwendeten Plots wurden mit *matplotlib*[**matplotlib**] und die Grafiken mit *GIMP*[**gimp**] erstellt und/oder bearbeitet. Die Berechnungen wurden mit Python-*Numpy*, [**numpy**] durchgeführt.