

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

<b>1</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
1.1	Zielsetzung . . . . .	3
1.2	Theoretische Grundlagen . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Durchführung</b>	<b>3</b>
2.1	Funktionsgenerator . . . . .	3
2.2	Mischen der Signale . . . . .	4
2.3	Rauschgenerator . . . . .	4
2.4	LED und Photodiode . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Auswertung</b>	<b>4</b>
3.1	Auswertung: Funktionsgenerator . . . . .	4
3.2	Auswertung: Mischen der Signale . . . . .	5
3.3	Auswertung:Rauschgenerator . . . . .	6
3.4	Auswertung: LED und Photodiode . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Diskussion</b>	<b>10</b>
	<b>Literatur</b>	<b>11</b>

# 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 das Signal auf die Referenzfrequenz  $\omega_0$  moduliert. Danach 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 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  $U_{sig} \cdot U_{ref}$ .

Betrachten wir das Beispiel eine 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  $\omega$ , die Phasenverschiebung ist gegeben durch  $\phi$ . Der Tiefpaß integriert  $U_{sig} \cdot U_{ref}$  über einige Perioden und unterdrückt dabei die Oberwellen, sodass man eine Gleichspannung erhält, die proportional zu der Signalspannung ist:

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

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

[sample]

## 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.

### 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:

Abbildung aus Protokoll

Der Rauschgenerator (Noise Gen. auf Abbildung) wird zunächst nicht verwendet. Die Signalspannung mit einer Frequenz von 1Khz und einer Amplitude von 1V wird verstärkt und mit der Referenzspannung gemischt. Gemessen werden die Ausgangsspannung sowie die integrierte Ausgangsspannung für verschiedene Phasenverschiebungen  $\phi$ . Auf diese Weise wird die Phasenabhängigkeit der integrierten Spannung nachgewiesen.

## 2.3 Rauschgenerator

Für diesen Versuchsteil wird der Signalspannung ein Rauschen beigelegt. 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 Werte 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 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 und wird - nachdem es den Bandpass passiert hat - mit der Referenzspannung gemischt und an die resultierende Spannung an Oszilloskop und Tiefpaß bestimmt. Da die Signalfrequenz nicht einem Vielfachen der Netzfrequenz entspricht, wird das durch die Raumbelichtung 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. In diesem Versuch lässt sich allerdings nur nachweisen, dass dieses  $r_{max}$  größer als der maximale Abstand der Apparatur ist.

# 3 Auswertung

## 3.1 Auswertung: Funktionsgenerator

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

### 3.2 Auswertung: Mischen der Signale

Die Signalspannung wird im folgenden mit einer Amplitude von 1V und einer Frequenz von 1kHz betrieben. Als Amplitude wird die Spannung zwischen oberer und unterer Halbwelle bezeichnet; als Phasenverschiebung der Wert, 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 U<sub>Ausgangsspannung</sub> beträgt 3,04V.

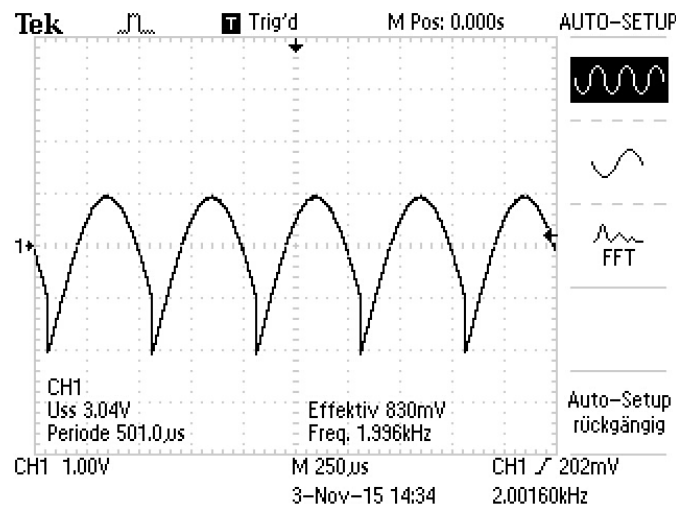


Abbildung 1:  $U_{out}$  nach Mischen

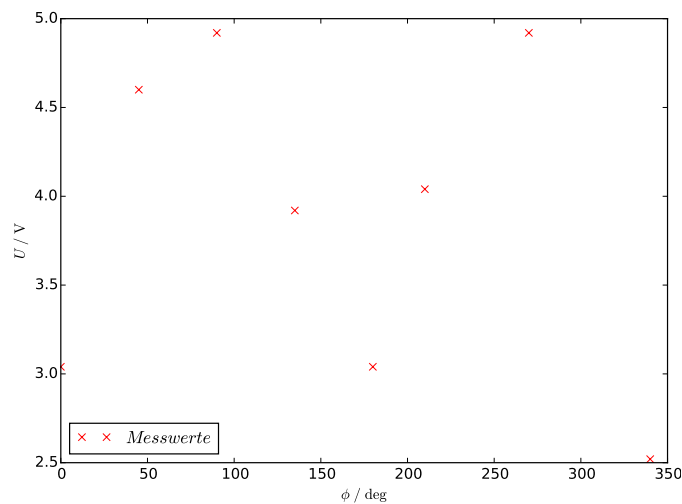
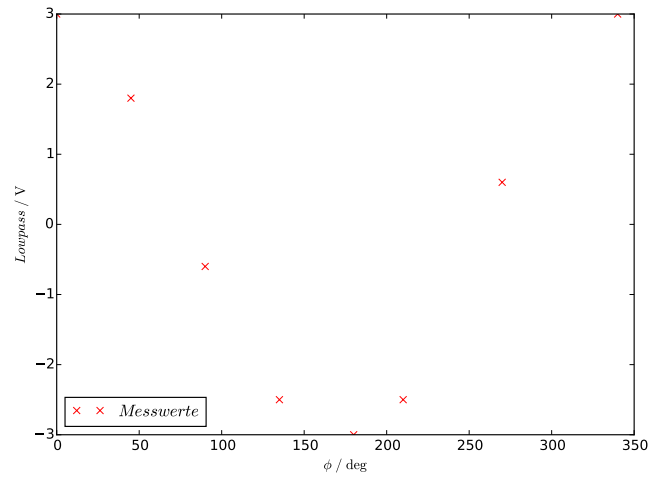


Abbildung 2:  $U_{out}$  nach Mischen

In 2 ist die gemischte Ausgangsspannung  $U_{out}$  gegen die Phasenverschiebung  $\phi$  aufgetragen. Gut zu erkennen ist die Abhängigkeit der Ausgangsspannung von der Phasenver-

schiebung. Die Maxima von  $U_{out}$  liegen hierbei bei etwa  $90^\circ$  bzw.  $270^\circ$ .

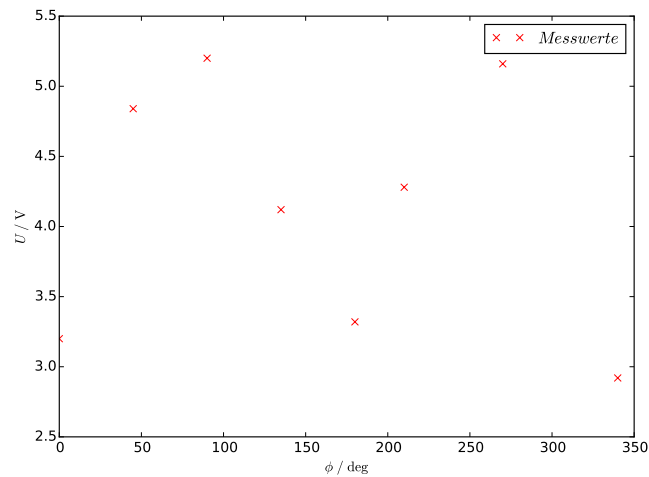


**Abbildung 3:** Integral der gemischten Ausgangsspannung

In 3 ist das am Tiefpaß integrierte Signal gegen die Phasenverschiebung  $\phi$  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  $\phi$  in einem Cosinus auftaucht.

### 3.3 Auswertung: Rauschgenerator

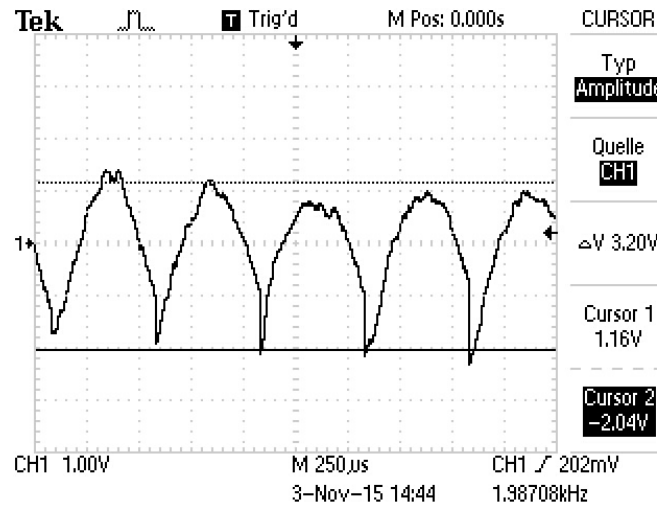
Nach Zuschalten des Rauschgenerators ergeben sich folgende Messwerte für  $U_{out}$  in Abhängigkeit von  $\phi$ :



**Abbildung 4:**  $U_{out}$  mit Rauschen

Wie unschwer in 4 zu erkennen ist, ergeben sich sehr ähnliche Messwerte nach Filterung

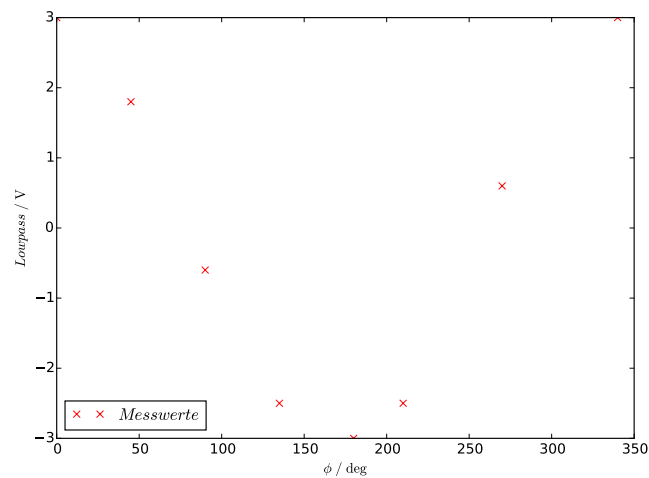
und Mischen. Im folgender Abbildung ist die Spannung für  $\phi = 0^\circ$  dargestellt, analog zu 1.



**Abbildung 5:**  $U_{out}$  nach Mischen

Gut sichtbar ist das nicht vollständig rausgefilterte Rauschen, die Form der Spannung ähnelt aber stark der aus 1.

Die Messwerte an dem Tiefpaß sehen wie folgt aus:



**Abbildung 6:** Integral der gemischten Ausgangsspannung mit Rauschen

und unterscheiden sich damit überhaupt nicht von denen ohne zugeschalteten Rauschgenerator. Der Grund dafür ist, dass der Tiefpaß die Spannung über mehrere Periodendauern integriert. Daher wird das verbliebene rauschen einfach herausgemittelt.

Im folgenden sind alle Meßwerte (mit und ohne Rauschen) dargestellt:

Abbildung 7:  $U_{out}(\phi = 0^\circ)$



Abbildung 9:  $U_{out}(\phi = 135^\circ)$

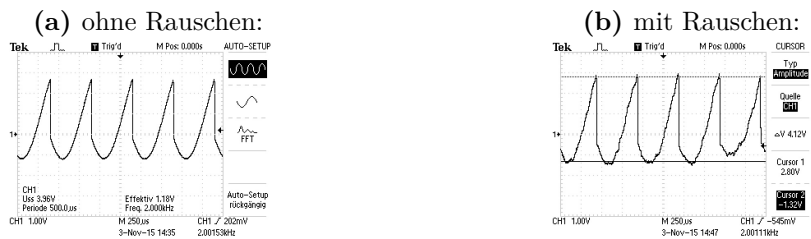


Abbildung 11:  $U_{out}(\phi = 90^\circ)$



Abbildung 13:  $U_{out}(\phi = 180^\circ)$





Abbildung 15:  $U_{out}(\phi = 270^\circ)$



Abbildung 17:  $U_{out}(\phi = 210^\circ)$

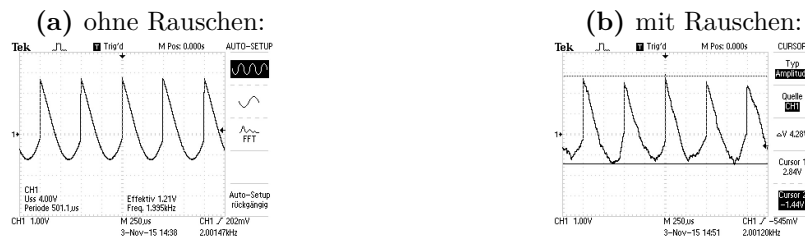


Abbildung 19:  $U_{out}(\phi = 45^\circ)$



Abbildung 21:  $U_{out}(\phi = 340^\circ)$



### 3.4 Auswertung: LED und Photodiode

In 23 ist das am Tiefpaß integrierte Signal in Abhängigkeit von dem Abstand  $r$  zwischen LED und Photodiode dargestellt. 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.

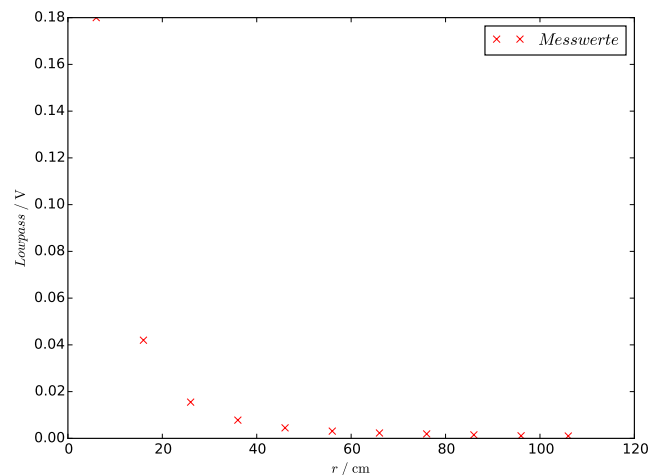


Abbildung 23: Integriertes Signal

## 4 Diskussion

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

Zunächst erscheint die maximale Spannungsamplitude a 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 , wobei nichts über den verwendeten Lock-In-Verstärker bekannt ist. Die Unterschiede zwischen verschiedenen geräten scheinen sich aber über mehrere Größenordnungen zu erstrecken.

Beim Mischen der Signale - sowohl mit als auch ohne zugeschalteten Rauschgenerator - fällt auf, dass die am Phasenschieber eingestellte Phasenverschiebung  $\phi$  von der tatsächlichen Verschiebung der Signale um einen festen Wert abweicht (Wie bereits in der

Auswertung erwähnt). Dies lässt sich durch verschiedene Signallaufzeiten erklären.

## Literatur

- [1] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [2] 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/>.
- [3] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [4] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.
- [5] Marcel C. Strzys Thorben Lünneweber. „Der Lock-In-Verstärker“. In: (2008). URL: <http://physik-praktikum.jimdo.com/>.
- [6] Various. *Lock-in-Verstärker*. 11.04.2015. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Lock-in-Verst%C3%A4rker>.