

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 verrauschtes Signal 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  $U_{\text{sig}}$  durchläuft im Gerät verschiedene Bauelemente, die in Abbildung 1 dargestellt sind.

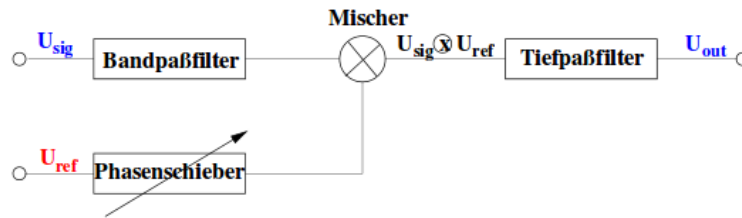


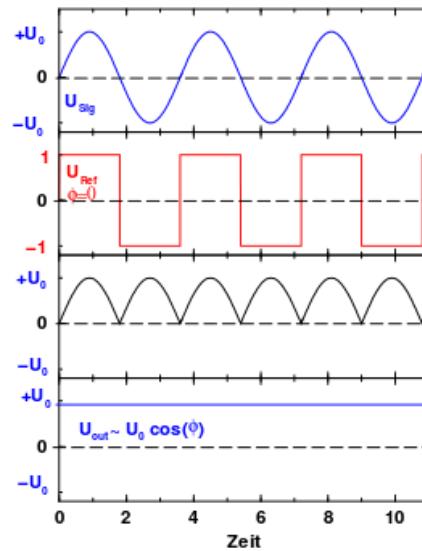
Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Lock-In-Verstärkers. [1]

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  $U_{\text{ref}}$  – eine Sinus- oder Rechteckspannung der Frequenz  $\omega_0$  –, 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  $\omega_0$  über mehrere Perioden integriert, um restliche Rauschanteile  $\omega \neq \omega_0$  auszuschließen. Zurück bleiben nur die Anteile der Signalsspannung  $U_{\text{sig}}$ , 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  $U_{\text{out}}$  ist eine Gleichspannung, welche proportional zur Eingangsspannung  $U_{\text{sig}}$  und zum Cosinus der Phasendifferenz  $\Delta\Phi$  ist:

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

$U_{\text{out}}$  wird also maximal, wenn die Phasendifferenz  $\Delta\Phi = 0$  (wahlweise Vielfache von  $180^\circ$ ) beträgt. [2]



**Abbildung 2:** Überlagerung eines sinusförmigen Eingangssignals mit rechteckiger Referenzspannung. [1]

Wird beispielsweise ein sinusförmiges Eingangssignal  $U_{\text{sig}} = U_0 \sin(\omega t)$  wie in Abbildung 2 mit einem rechteckigen Referenzsignal  $U_{\text{ref}}$  gleicher Frequenz überlagert, 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  $\omega$  durch den als Gleichrichter funktionierenden Tiefpass geleitet ergibt sich die Gleichspannung

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

Besteht kein Phasenunterschied zwischen Eingangs- und Referenzsignal nimmt die Ausgangsspannung ihren Maximalwert

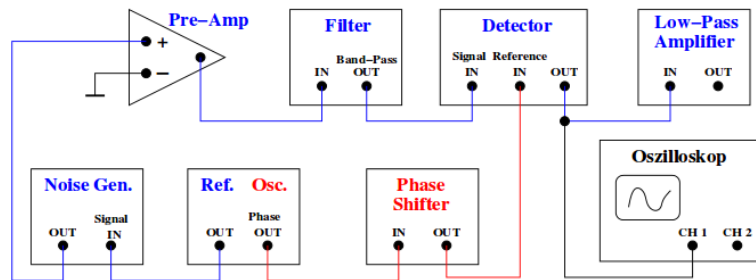
$$U_{\text{out}} = \frac{2}{\pi} U_0 \quad (3)$$

an. Die Rechteckspannung mit auf 1 genormter 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

Um mit dem Lock-In-Verstärker vertraut zu werden, werden vor eigentlichem Versuchsbeginn nacheinander die beiden Ausgänge des Funktionengenerators an das bereitstehende Oszilloskop geschlossen. Durch Ausprobieren kann festgestellt werden, welches

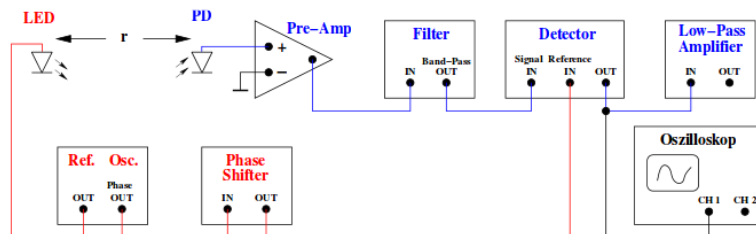
das zu messende Signal bzw. das Referenzsignal ist. Die Amplitude des Referenzsignals kann im Gegensatz zum Messsignal verändert werden; außerdem besteht die Möglichkeit zwischen Rechteck- und Sinusspannung zu wählen.



**Abbildung 3:** Schematischer Versuchsaufbau zur Verifizierung der Funktionsweise des Verstärkers. [1]

Im ersten Versuchsteil soll die Funktionsweise des Gerätes bestätigt werden. Dazu wird die in Abbildung 3 gezeigte Schaltung aufgebaut. Der Noise-Generator wird in diesem Versuchsteil nicht benötigt und für die Messung überbrückt. Es werden Frequenz und Amplitude des Mess- und des sinusförmigen Referenzsignals eingestellt. Mit dem Phasenschieber werden 10 unterschiedliche Phasen realisiert 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. [1]

Die in Abbildung 4 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 einer gepulsten LED 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. Durch Verschieben der Photodiode auf der Metallschiene kann die Ausgangsspannung am Lock-In-Verstärker abgelesen werden. Das Oszilloskop dient dazu, die verschiedenen Signale sichtbar zu machen. Es kann beliebig an die verschiedenen Bestandteile des Verstärkers angeschlossen 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  $U_{\text{eff}} = \sqrt{2}U_0$  für Sinusschwingungen ergibt sich eine Amplitude von etwa 6,55 V. Die Spannungen, die der den Tiefpass und damit den gesam-

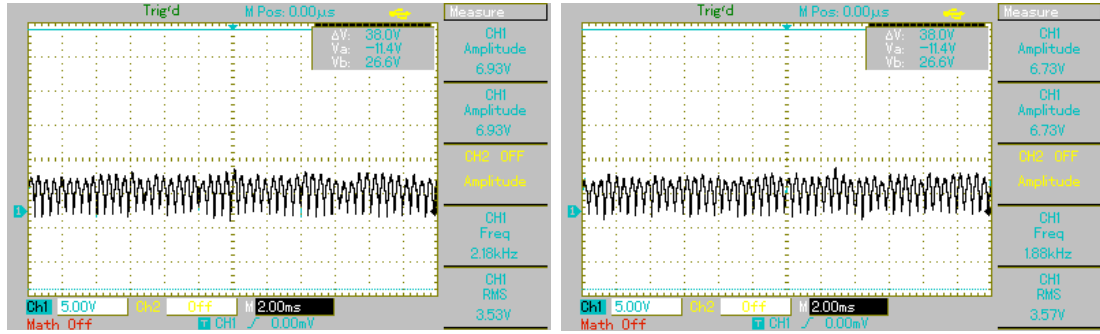
Phase	Ausgangsspannung $U_0$ /[V]	
	ohne Störung	mit Störung
0°	−6,00	−6,00
45°	−4,00	−4,00
90°	0,20	0,50
120°	2,62	3,00
135°	4,25	4,50
180°	5,81	6,00
225°	3,95	3,50
270°	0,20	−0,50
315°	−4,17	−4,50
360°	−5,83	−5,50

**Tabelle 1:** Ausgangsspannung des gegebenen Signals.

ten Lock-In-Verstärker verlassen, sind in Tabelle 1 aufgetragen. Die angegebene Phase ist die eingestellte Phase des Phasenschiebers. Diese Spannungen werden in Diagramm 6 gegen die eingestellte Phase aufgetragen; es zeigt sich, dass die Beziehung (1) durch die Datenpunkte verifiziert wird, es aber zu einem festen Phasenversatz  $\alpha$  von  $\alpha = 180^\circ$  kommt. Dies ist nicht darauf zurückzuführen, dass das hier verwandte Referenzsignal nicht normiert-rechteckförmig, sondern sinusförmig ist, aber eventuell darauf, dass die Ausgänge des Funktionsgenerators und die Bauteile des Verstärkers einen permanenten Phasenversatz aufweisen bzw. die Leitungen einen Versatz bewirken. Die Abbildung 5 zeigt das Sinus-förmige Signal mit der überlagerten Störung. Trotz der Abweichungen vom idealen Signal werden die Werte der Messung ohne Störung sehr gut angenähert.

### 4.2 Verstärkung des LED-Signales

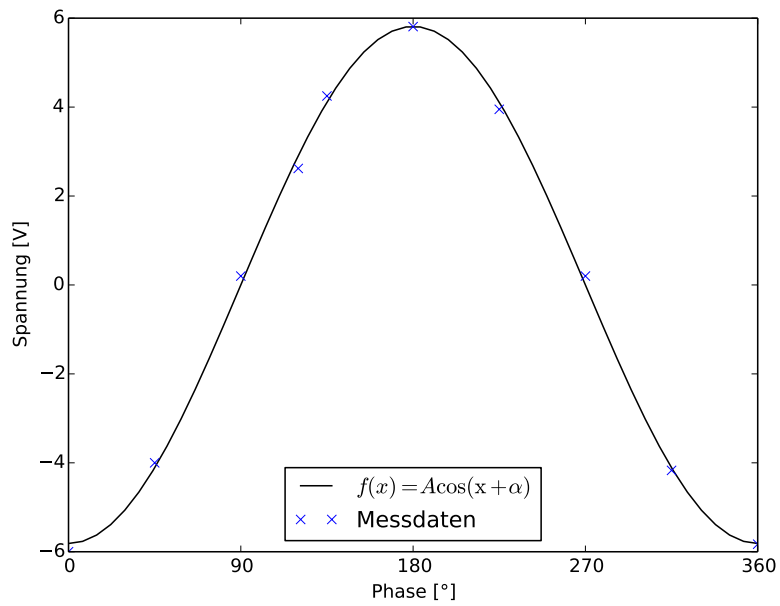
In 4.1 wurde experimentell nachgewiesen, dass der Betrag der Ausgangsspannung maximal wird, wenn der Phasenschieber auf Vielfache von  $180^\circ$  eingestellt ist. Bei der Einstellung  $0^\circ$  wird eine maximale, negative Spannung erwartet und den eventuellen Einfluss des Phasenschiebers umgangen. Das Signal, das von der Photodiode aufgenommen wird, wandelt der Lock-In-Verstärker dementsprechend in eine reine negative Gleichspannung. Im Interesse der Lesbarkeit werden die negativen Spannung unter Berücksichtigung der



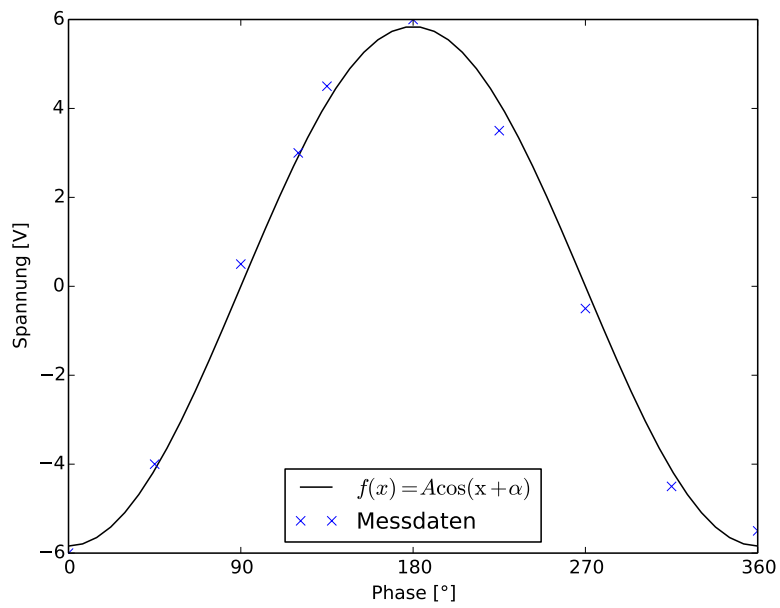
**Abbildung 5:** Fotos des Oszillators: das Signal mit Störungen zu zwei verschiedenen Zeiten. [5]

Gesamt-Verstärkung in Diagramm 8 aufgetragen. 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 einer messbaren Signal die Ausgangsspannung auf Null zurück und nimmt ihren ursprünglichen Wert an, wenn der Lichtweg zwischen LED und Photodiode frei gemacht wird. Der näherungsweise lineare Abfall der Spannung bei doppel-logarithmischer Skalierung (8b) zeigt, dass die gemessene Intensität mit  $r^{-\alpha}$  mit  $\alpha \in \mathbb{R}$  abfällt.

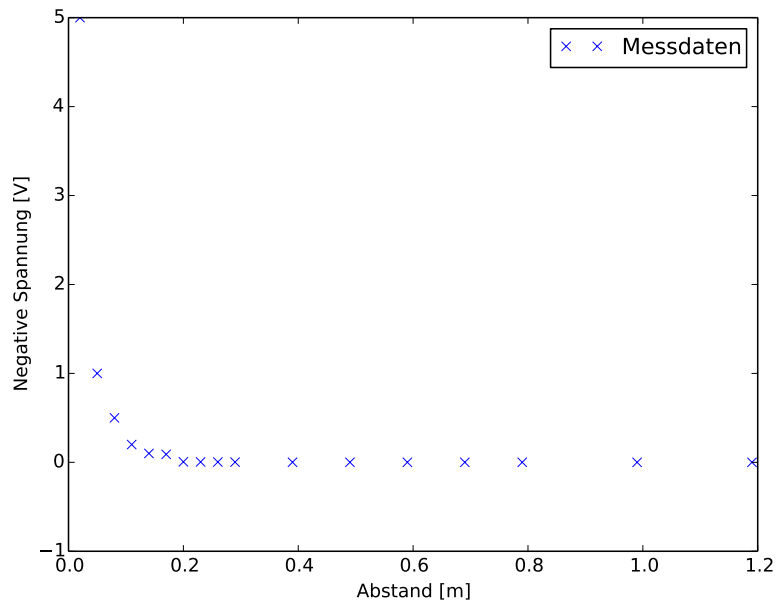
Bei einem Abstand größer als 1,20 m ist trotz Verstärkung keine Ausgangsspannung zuverlässig messbar, die Ausgangsspannung zeigt beim Abdecken der LED keine wesentliche Änderung.



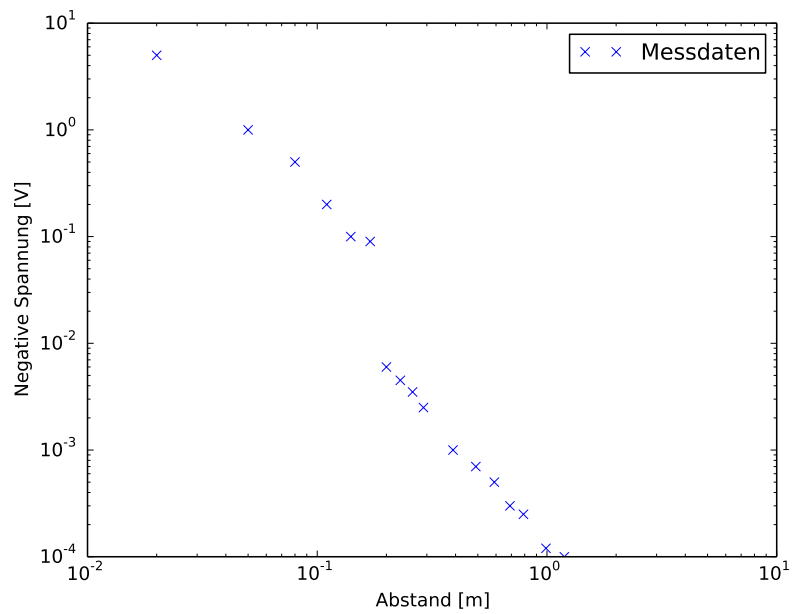
**Abbildung 6:** Ausgangsspannung des Lock-In-Verstärkers bei Sinus-förmigen Eingang mit  $U = 4,63 \text{ V}$  und  $f = 300 \text{ Hz}$ .



**Abbildung 7:** Ausgangsspannung des Lock-In-Verstärkers bei gestörtem Signal.



(a) Lineare Skalierung.



(b) Doppelt-logarithmische Skalierung.

**Abbildung 8:** Ausgangsspannung des Lock-In-Verstärkers bei Messung mit der LED.



Abstand a [m]	Ausgangsspannung $U_0$ [V]	Gesamt-Verstärkung	
		absolut	relativ
0.02	−5	$400 \cdot 5$	1
0.05	−1	$400 \cdot 5$	1
0.08	−0,5	$400 \cdot 5$	1
0.11	−2	$400 \cdot 50$	10
0.14	−1	$400 \cdot 50$	10
0.17	−0,9	$400 \cdot 50$	10
0.20	−6,0	$400 \cdot 500$	100
0.23	−4,5	$400 \cdot 500$	100
0.26	−3,5	$400 \cdot 500$	100
0.29	−2,5	$400 \cdot 500$	100
0.39	−1,0	$400 \cdot 500$	100
0.49	−0,7	$400 \cdot 500$	100
0.59	−0,5	$400 \cdot 500$	100
0.69	−0,3	$400 \cdot 500$	100
0.79	−0,25	$400 \cdot 500$	100
0.99	−0,12	$400 \cdot 500$	100
1.19	−0,1	$400 \cdot 500$	100

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

## 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 1).

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 in der Lage, Signale mit variabler Frequenz zu verstärken und Störung in Frequenzlage zu filtern.

Ein anderer Verwendungszweck ist die Bestimmung des Phasenversatzes von zwei Signalen. Nach Gleichung (1) ist die ausgegebene Gleichspannung maximal, wenn die Eingangssignale keinen Phasenversatz aufweisen. In Abschnitt 4.1 wird gezeigt, wie sich ein Phasenunterschied auf die resultierende Spannung auswirkt.

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuch V303: Der Lock-In-Verstärker*. URL: <http://129.217.224.2/HOME/PAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/LockIn.pdf> (besucht am 07.12.2014).
- [2] Dr. Stephan Giglberger. *Anleitung zum Anfängerpraktikum A2, Versuch 5a - Lock-In-Verstärker*. URL: <http://www.physik.uni-regensburg.de/studium/praktika/a2/download/versuch5a.pdf> (besucht am 07.12.2014).
- [3] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. In: *Computing in Science and Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://link.aip.org/link/?CSX/9/90/1>. Version 1.3.1.
- [4] Travis E. Oliphant. „Python for Scientific Computing“. In: *Computing in Science and Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://link.aip.org/link/?CSX/9/10/1>. Version 1.8.1.
- [5] The GIMP Team. *GIMP: GNU Image Manipulation Program*. URL: <http://www.gimp.org/>. Version 2.8.10.

Die verwendeten Plots wurden mit *matplotlib*[3] und die Grafiken mit *GIMP*[5] erstellt und/oder bearbeitet. Die Berechnungen wurden mit *Python-Numpy*, [4] durchgeführt.