

# **Versuch 303 - Der Lock-In-Verstärker**

**TU Dortmund, Fakultät Physik**

**Anfänger-Praktikum**

**Lars Klompmaker**

[lars.klompmaker@tu-dortmund.de](mailto:lars.klompmaker@tu-dortmund.de)

**Fabian Lehmann**

[fabian.lehmann@tu-dortmund.de](mailto:fabian.lehmann@tu-dortmund.de)

**13. Juni 2013**

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Theorie</b>	<b>2</b>
1.1 Beispiel: Sinusspannung . . . . .	2
<b>2 Durchführung</b>	<b>4</b>
<b>3 Auswertung</b>	<b>5</b>
3.1 Untersuchung der Schaltelemente des Lock-In-Verstärkers . . . . .	5
3.2 Phasenabhängigkeit des Ausgangssignals . . . . .	8
3.3 Phasenabhängigkeit des integrierten Ausgangssignals . . . . .	9
3.4 Rauschunterdrückung des Lock-In-Verstärkers bei einer Photodetektorschaltung . . . . .	12
<b>4 Diskussion</b>	<b>13</b>
4.1 Funktionsverifikation der Apparatur . . . . .	13
4.2 Überprüfung der Rauschunterdrückung mit einer Photodetektorschaltung . .	14
<b>5 Quellen</b>	<b>14</b>

# 1 Theorie

In diesem Versuch soll die Funktionsweise eines Lock-In-Verstärkers untersucht und verstanden werden.

Ein Lock-In-Verstärker (schematischer Aufbau: s. Abb. 1) ist ein Verstärker mit eingebautem phasenempfindlichen Detektor. Er dient bei Messungen mit stark verrauschten Signalen als extrem schmalbandiger Bandpassfilter, wodurch das Rauschen effizient gefiltert werden kann. Das Messsignal wird dazu mit einer Referenzfrequenz  $\omega_0$  moduliert.

Zuerst befreit ein Bandpass das modulierte, verrauschte Nutzsignal  $U_{\text{sig}}$  von Rauschanteilen  $\omega \ll \omega_0$  und  $\omega \gg \omega_0$ . Dann wird das Signal  $U_{\text{sig}}$  in einem Mischer mit einem Referenzsignal  $U_{\text{ref}}$  multipliziert. Dieses Signal hat dabei die selbe Frequenz wie  $U_{\text{sig}}$  ( $\omega_0$ ), jedoch eine variable Phase. Mit einem Phasenschieber lässt sich dabei die Phase des Referenzsignals vor dem Mischer variieren, um sie mit der Phase des verrauschten Signals synchronisieren zu können. Darauf folgt ein Tiefpass ( $\tau = RC \gg \frac{1}{\omega_0}$ ), der das multiplizierte Signal über mehrere Perioden integriert. So werden die Rauschbeiträge weitestgehend herausgemittelt. Für das sich ergebende Signal gilt nun eine Proportionalität zur Eingangsspannung:

$$U_{\text{out}} \propto U_0 \cos \phi, \quad (1)$$

wobei  $\phi$  der Phasenunterschied zwischen beiden Signalen ist (idealerweise ist dieser  $\phi = 0$ ).

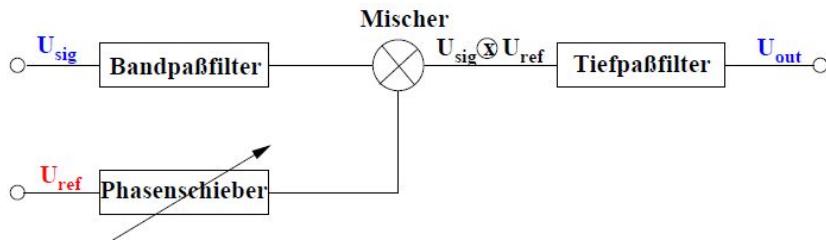


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Lock-In-Verstärkers [1]

Der zuletzt geschaltete Tiefpass definiert die Bandbreite des Restrauschens:

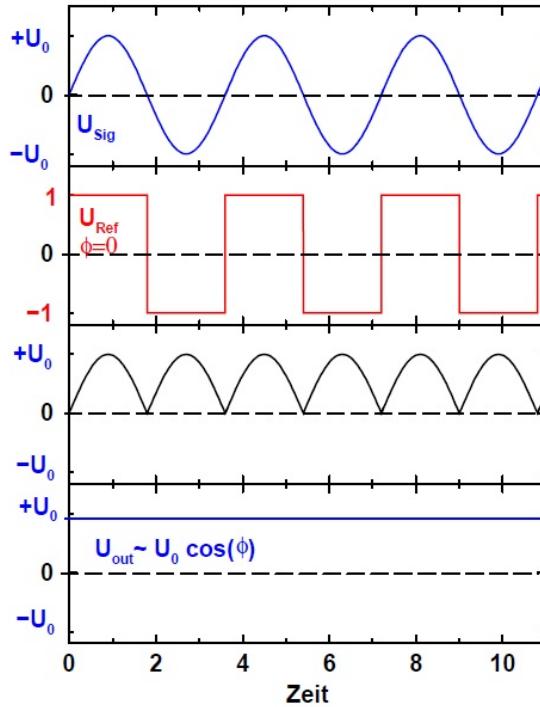
$$\Delta\nu = 1/(\pi RC). \quad (2)$$

Wird die Zeitkonstante  $\tau = RC$  somit sehr groß gewählt, kann die Bandbreite beliebig klein gehalten werden. Es kann so mit einem Lock-In-Verstärker eine Güte von  $Q = 100\,000$  erreicht werden, entgegen der Güte eines einfachen Bandpasses von nur  $Q = 1000$ .

## 1.1 Beispiel: Sinusspannung

Es wird beispielhaft eine sinusförmige Signalspannung betrachtet (s. Abb. 2):

$$U_{\text{sig}} = U_0 \sin(\omega t). \quad (3)$$



**Abbildung 2:** Beispiel: Sinusspannung (Graph 1), Referenzspannung (2), gemischte Signale (3), Ausgabesignal des Tiefpasses (4) [1]

Als Referenzsignal wird in diesem Beispiel eine Rechteckspannung mit einer auf 1 normierten Amplitude verwendet. Diese kann durch eine Fourierreihe angenähert werden:

$$U_{\text{ref}} = \frac{4}{\pi} \left( \sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \dots \right). \quad (4)$$

Für das Produkt der beiden Signale ergibt sich damit

$$U_{\text{sig}} \times U_{\text{ref}} = \frac{2}{\pi} U_0 \left( 1 - \frac{2}{3} \cos(2\omega t) - \frac{2}{15} \cos(4\omega t) - \frac{2}{35} \cos(6\omega t) + \dots \right), \quad (5)$$

was der geraden Oberwelle der Grundfrequenz  $\omega$  entspricht (s. Abb. 2). Der nun folgende Tiefpass ist so gewählt, dass die Oberwellen unterdrückt werden und sich somit eine zur Signalspannung proportionale Gleichspannung ergibt:

$$U_{\text{out}} = \frac{2}{\pi} U_0 \cos \phi. \quad (6)$$

Bei einer Phasendifferenz der beiden Signale von  $\phi = 0$  ergibt sich somit die höchste Ausgangsspannung.

Ein Lock-In-Verstärker kann auch verwendet werden, um bei einer Photodetektorschaltung mit blinkender LED das detektierte Licht von den Anteilen der Raumbeleuchtung und anderen Störquellen zu befreien (Rauschen), wodurch beispielsweise eine Abstandsmessung

in einem nicht abgedunkelten Raum möglich ist. Die LED wird dabei mit einer Rechteckspannung betrieben, um das Blinken zu erzeugen. Dadurch hat auch die detektierte Lichtintensität der LED einen rechteckigen Verlauf.

## 2 Durchführung

Die verwendete Versuchsapparatur ist modular aufgebaut (vgl. Abb. 3). Dadurch können die Komponenten einzeln untersucht werden und der Lock-In-Verstärker kann Schritt für Schritt aufgebaut werden.

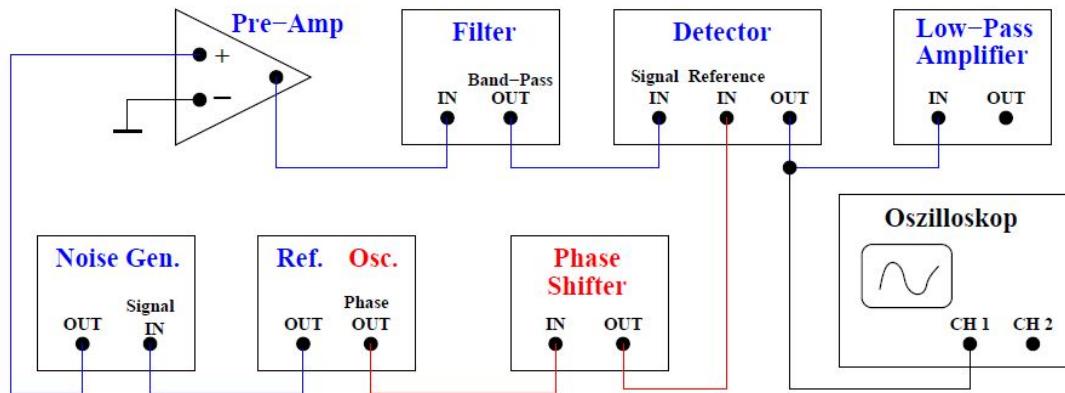


Abbildung 3: Modularer Aufbau des verwendeten Lock-In-Verstärkers [1]

Separat bedienbar sind so: Der Vorverstärker, die Filter (Hoch-, Tief-, Bandpassfilter), der Phasenschieber, der Funktionsgenerator, ein Generator zum Erzeugen des Rauschens, der Tiefpass-Verstärker und ein Amplituden-/ Lock-In-Detektor. Dazu kommt ein Oszilloskop zum Betrachten der einzelnen Signale. Die Schaltung wird Schritt für Schritt, beginnend beim Signalgeber, aufgebaut und nach jedem neu angeschlossenen Bauteil wird ein Bild des Oszilloskops gemacht. Dies wurde einmal mit verrauschemtem und einmal mit unverrauschemtem Signal durchgeführt. Das Signal nach dem Tiefpass wird für verschiedene Phasen untersucht.

Im zweiten Versuchsteil wird nun eine Photodetektorschaltung gemäß Abbildung 4 aufgebaut.

Eine Leuchtdiode wird hier mit einer Rechteckspannung betrieben, die Frequenz dieser liegt zwischen 50 Hz und 500 Hz. Mit einer Photodiode wird in Abhängigkeit des Abstandes  $r$  der Lichtimpuls der LED gemessen. Das Rauschen ergibt sich dabei aus der Beleuchtung des Raumes und anderen Lichtquellen, da die Apparatur nicht abgeschirmt war, wie es bei anderen optischen Versuchen der Fall ist. Die Intensität des Lichts der Leuchtdiode nimmt quadratisch mit dem Abstand ab, wodurch der Beitrag des detektierten Lichts abnimmt, je weiter man sich von ihr entfernt. Es wird untersucht, wie groß der maximale Abstand  $r_{\max}$  ist, bei dem das Licht der blinkenden Photodiode noch nachgewiesen werden kann.

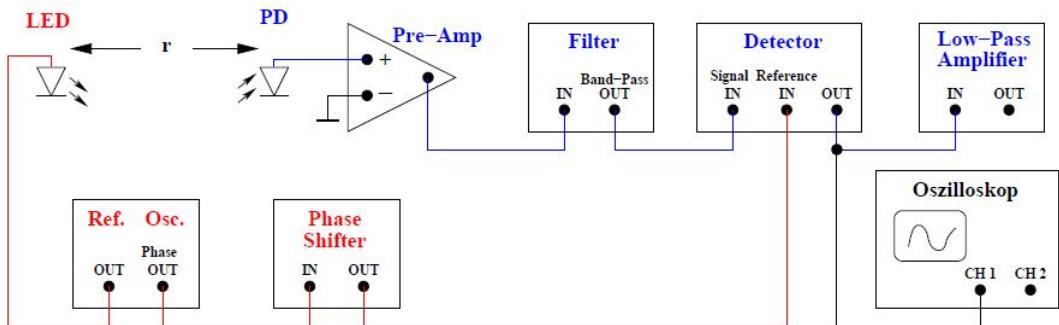


Abbildung 4: Photodetektorschaltung [1]

### 3 Auswertung

#### 3.1 Untersuchung der Schaltelemente des Lock-In-Verstärkers

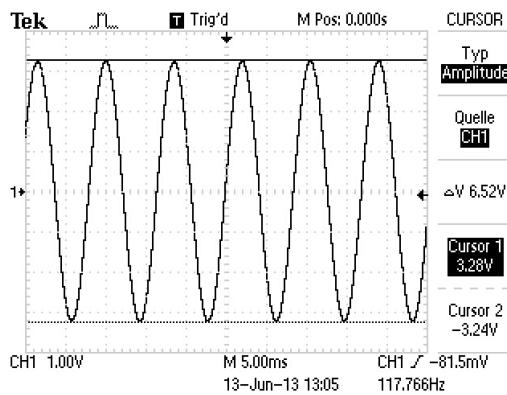
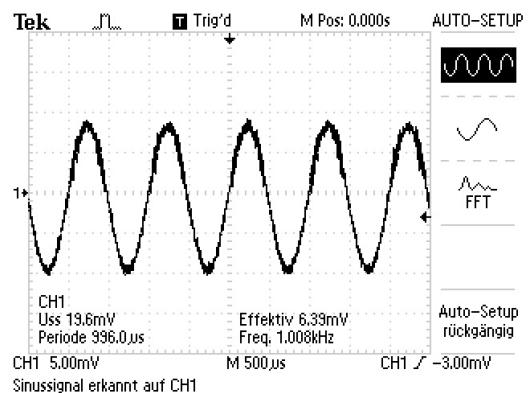
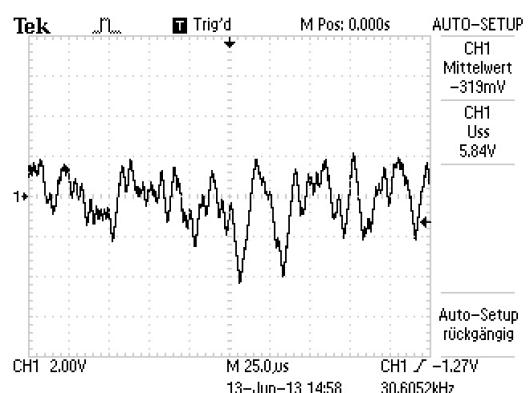


Abbildung 5: Funktionsgeneratiorausgang mit konstanter Spannung (Phase)

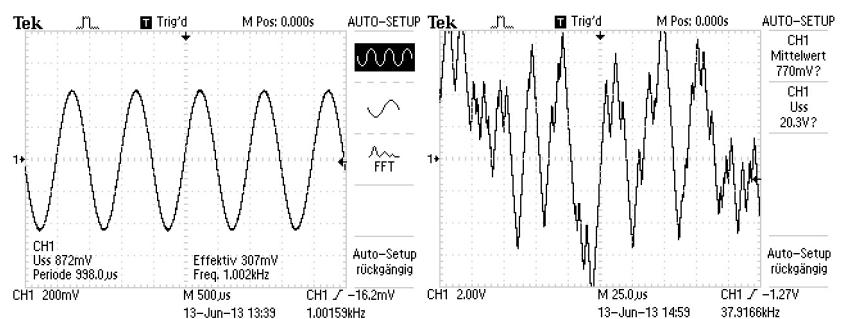
Die Ausgangssignale des Funktionsgenerators sind in Abbildung 5 und Abbildung 6 dargestellt. Die Amplitude des Phase-Ausgangs (Abb. 5) ist konstant  $6,52 \text{ V} / 2 = 3,26 \text{ V}$ , die Amplitude des anderen Ausgangs (6), hier bei eingestellten 10 mV und 1,04839 kHz, ist variabel. Durchläuft die erzeugte Sinusfunktion ein Rauschsignalerzeuger, so hat das Signal eine Form wie in Abbildung 7. In Abbildung 8 ist das klare 50-fach verstärkte Signal (links in der Abbildung), beziehungsweise das verrauschte 5-fach verstärkte Signal (rechts in der Abbildung) zu sehen. Im folgenden ist das verrauschte Signal nur noch 2-fach verstärkt. Nachdem die Signale einen Bandpassfilter mit Güte 50 und passender Frequenz (1 kHz) durchlaufen haben, besitzen sie eine Form wie in Abbildung 9. Durchläuft das Phasensignal den Phase Shifter lässt sich die Phase variieren (Abb. 10).



**Abbildung 6:** Funktionsgeneratortausrang



**Abbildung 7:** Sinussignal mit Rauschen



**Abbildung 8:** Signal nach Verstärkerdurchlauf (klar/verrauscht)

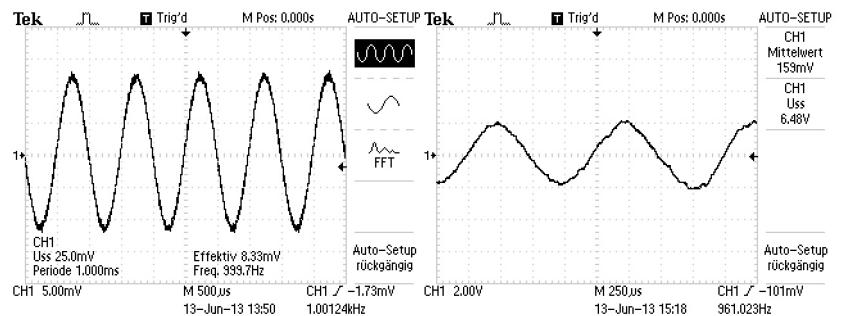


Abbildung 9: Signal nach Bandpassfilterdurchlauf (klar/verrauscht)

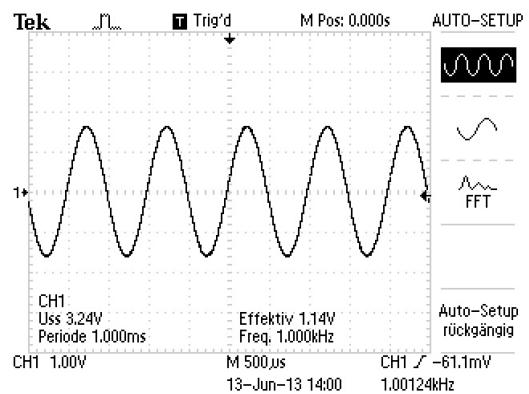


Abbildung 10: Phasensignal nach Durchlaufen des Phase Shifters ( $45^\circ$ )

### 3.2 Phasenabhängigkeit des Ausgangssignals

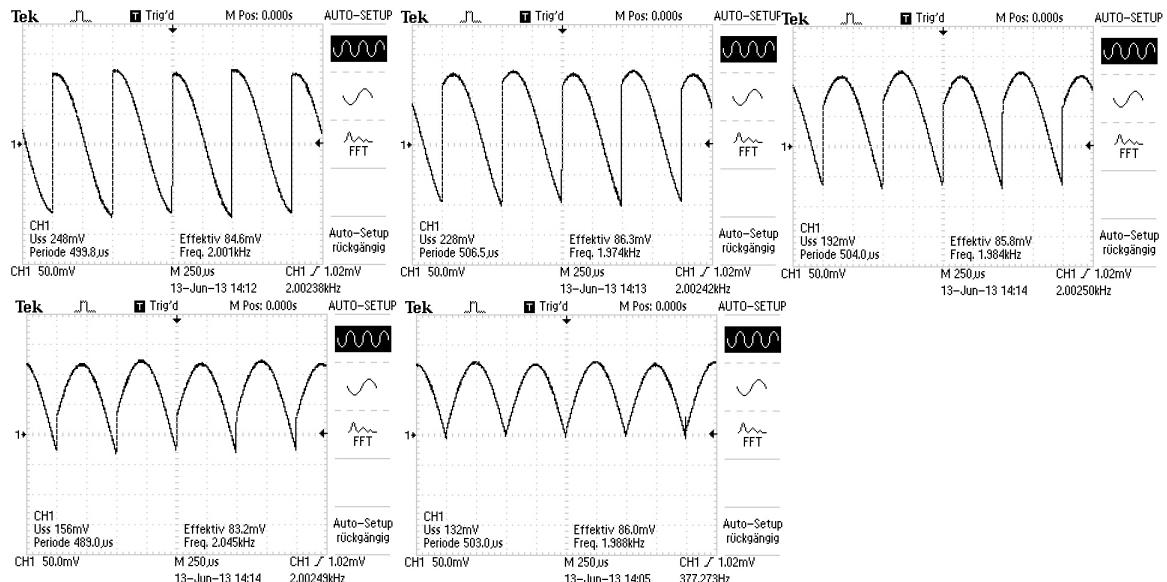
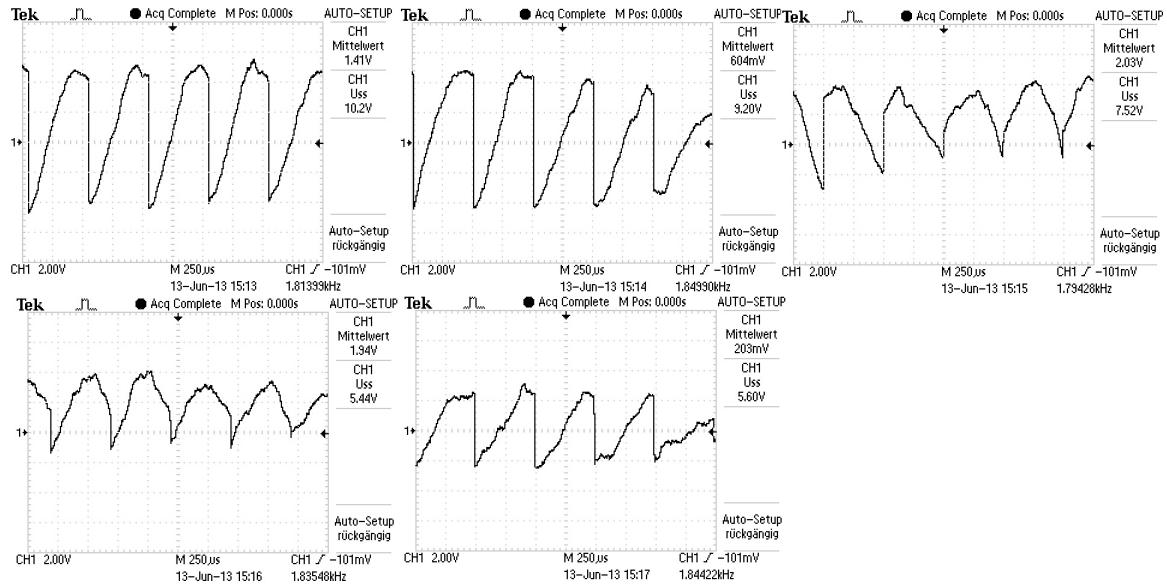


Abbildung 11: Detektorausgang des klaren Signals bei Phasendifferenzen von  $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$

In Abbildung 11 ist das Signal des Detektorausgangs des klaren Sinussignals bei Phasendifferenzen von  $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  und  $75^\circ$  zu sehen (von links oben nach rechts unten). In Abbildung 12 ist das Signal des Detektorausgangs des verrauschten Sinussignals bei Phasendifferenzen von  $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$  und  $75^\circ$  zu sehen.



**Abbildung 12:** Detektorausgang des verrauschten Signals bei Phasendifferenzen von  $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 75^\circ$

### 3.3 Phasenabhängigkeit des integrierten Ausgangssignals

Die gegebenen Messwerte aus Tabelle 3.1 lassen sich mit dem gnuplot Befehl fit an die Theoriegleichung (6) anpassen (Abb. 13, 14):

$$U = a \cos(\phi + b) \quad (7)$$

$$\text{klares Signal: } a = (-5,5 \pm 0,1) \text{ V} \quad (8)$$

$$b = 0,14 \pm 0,02 \quad (9)$$

$$\text{verrauschtes Signal: } a = (5,4 \pm 0,2) \text{ V} \quad (10)$$

$$b = 0,06 \pm 0,03 \quad (11)$$

Phase / °	$U_{\text{klar}} / \text{V}$	$U_{\text{verrauscht}} / \text{V}$
0	-5,5200	5,600
15	-5,3600	-
30	-4,6700	3,570
45	-3,5100	-
60	-1,7400	2,160
75	-0,0175	-
90	0,6970	-0,130
105	1,5500	-
120	3,0000	-2,480
135	4,3200	-
150	5,3500	-5,160
165	5,5400	-
180	5,5000	-5,600
195	5,2800	-
210	4,6500	-4,930
225	3,4000	-
240	1,5300	-2,020
255	-0,0465	-
270	-0,7180	0,180
285	-1,6500	-
300	-3,0400	2,550
315	-4,3600	-
330	-5,3600	5,200
345	-5,5900	-
360	-5,5200	5,600

Tabelle 3.1: Phasenabhängigkeit des integrierten Ausgangssignals

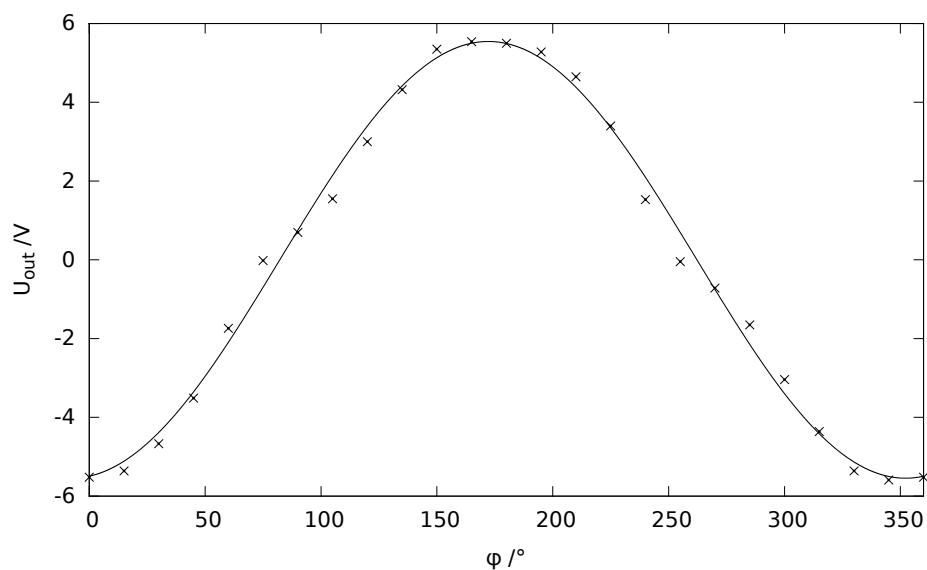


Abbildung 13: Ausgleichskurve zu dem phasenabhängigen, integrierten Signal (klar)

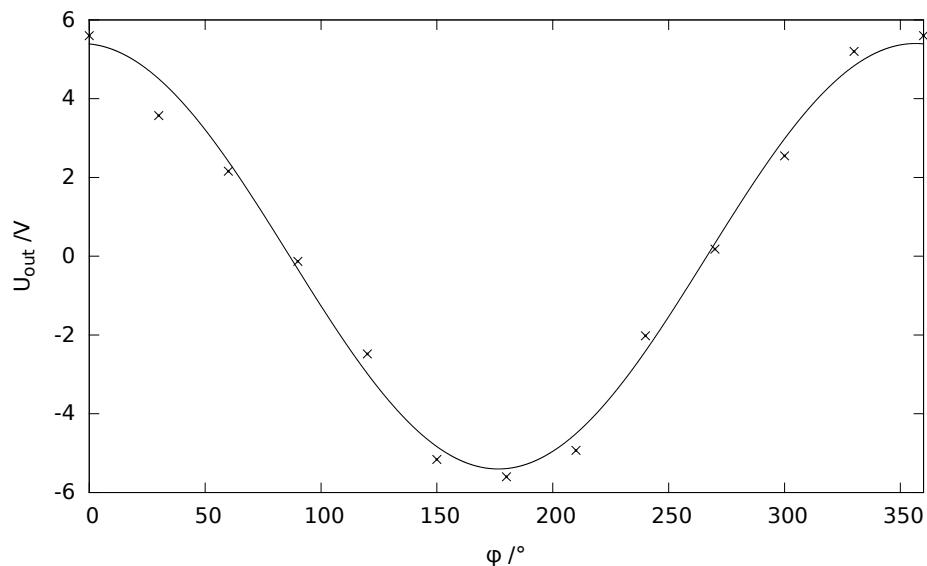


Abbildung 14: Ausgleichskurve zu dem phasenabhängigen, integrierten Signal (verrauscht)

### 3.4 Rauschunterdrückung des Lock-In-Verstärkers bei einer Photodetektorschaltung

r / cm	$U_{\text{out}} / \text{mV}$
10	69,60
11	50,90
12	39,00
13	30,30
14	24,10
15	19,60
16	16,60
17	13,90
20	9,10
23	6,40
27	4,74
32	3,16
37	2,60
42	2,22
47	1,75
52	1,67
57	1,50
62	1,38
70	1,17
80	1,00
90	0,86
100	0,82
110	0,77
120	0,73
130	0,70
140	0,68

**Tabelle 3.2:** Abstandsabhängigkeit des Signals der Photodetektorschaltung

Die Abhängigkeit vom Abstand  $r$  des Signals der Photodetektorschaltung (Tab. 3.2) ist mit dem gnuplot Befehl fit an Gleichung (12) genähert worden:

$$U = \frac{a}{(r + b)^2} \quad (12)$$

$$a = (2,33 \pm 0,05) \cdot 10^{-4} \text{ V m}^2 \quad (13)$$

$$b = (-4,23 \pm 0,07) \cdot 10^{-2} \text{ m} \quad (14)$$

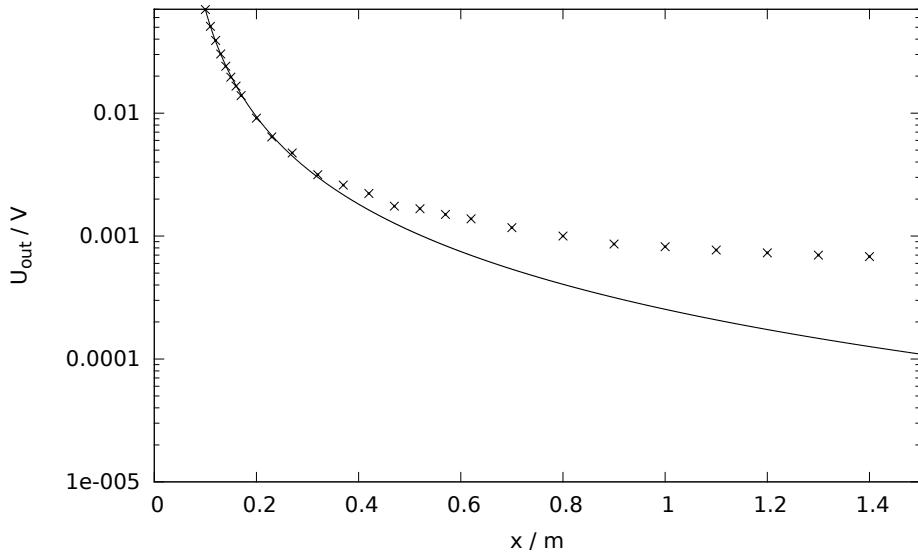


Abbildung 15: Ausgleichskurve zum abstandsabhängigen Signal der Photodetektorschaltung

## 4 Diskussion

### 4.1 Funktionsverifikation der Apparatur

Anhand von Abbildung 5, Abbildung 6 und Abbildung 7 lässt sich die Funktion des Phasenausgangs und des Sinussignalausgangs des Funktionengenerators, sowie die Funktion des Rauschsignalgenerators bestätigen. Abbildung 8 zeigt ein verstärktes Signal, Abbildung 9 lässt eine Bandpassfilterung erkennen und Abbildung 9 zeigt, dass eine Phasenabhängigkeit besteht. Die Bildreihen 11 und 12 bestätigen die Funktion des Detektors. Der Tiefpass funktionierte hingegen nicht, es schien kein Signal anzukommen. Die gegebenen Daten zeigen jedoch, dass ein Tiefpass-Verstärker durchaus funktionieren kann. Die Fehler von  $\Delta a = 1,7\%$  und  $\Delta b = 13,2\%$  bei klarem Signal und  $\Delta a = 3,1\%$  und  $\Delta b = 54,6\%$  bei verrauschem Signal weisen auf einen Zusammenhang nach Gleichung (7) hin (vgl. Abb. 13, 14).

$$U_{\text{klar}} = -5,5 \text{ V} \cos(\phi + 0,14) \quad (15)$$

$$U_{\text{verrauscht}} = 5,4 \text{ V} \cos(\phi + 0,06) \quad (16)$$

Auffällig ist dabei die Phasenverschiebung um  $\pi$ , es wäre möglich, dass der Tiefpass-Verstärker die Phase verschiebt.

Somit sollte bis auf den Tiefpass-Verstärker die Apparatur ordnungsgemäß funktionieren, auch wenn es zu kleineren Einstellungsfehlern aufgrund der ungenügenden Kenntnis der Apparatur gekommen sein kann.

## 4.2 Überprüfung der Rauschunterdrückung mit einer Photodetektorschaltung

Anhand Abbildung 15 und den Fehlern der Näherung von  $\Delta a = 2,2\%$  und  $\Delta b = 1,8\%$  lässt sich ein Zusammenhang nach Gleichung (12) erkennen:

$$U = \frac{2,33 \cdot 10^{-4} \text{ V m}^2}{(r - 4,23 \cdot 10^{-2} \text{ m})^2} \quad (17)$$

Diese Fehlergrößenordnung könnte der nicht näher bekannten Position des Detektors in dem Detektorgehäuse verschuldet sein. Durch ausblenden der LED konnte festgestellt werden, dass der maximale Abstand um noch Licht der Diode nachweisen zu können den Apparaturaufbau überschritt.

## Literatur

### 5 Quellen

- [1] Skript zum Versuch 303 des physikalischen Anfängerpraktikums an der TU Dortmund zu finden unter:

<http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/LockIn.pdf> (Stand 18.06.2013)

(30)

- ① 2 Ausgänge: Output  $\leftarrow$  Amplitudenabhängig  
Output (Phase Shifter)  $\leftarrow$  konstant

$$\Rightarrow 3,28V \text{ und } -3,24V \Rightarrow \Delta V = 6,52V$$

$$f = 1,04829 \text{ kHz}$$

$$6,52$$

Bei Filter: Pre-Amp  $\times 50$

Filter: zw. 30 - 100 Hz  $\rightarrow$  Signalschwächung

Spannung max bei Filterfrequenz  $\sim 1 \text{ kHz}$ , aber im 1,1x V Bereich  
 $\Rightarrow$  ggf. Irrelektivität des Signals vom Amp.

Phase-Shifter:  $U_0$  Sleichf.  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$

Minimum bei  $45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$

Mit Low-Pass: Amp  $\times 2$  am Low-Pass 3,0  
Time-Constant  $\cancel{\text{dazwischen}}$   
DC-Offset  $\pm 3,0$   
 $60^\circ$  Phasenversch.

An Low-Pass: Phase

$0^\circ$	36,8 mV
$15^\circ$	46,5 mV
$30^\circ$	80,6 mV
$45^\circ$	120 mV
$60^\circ$	174,6 mV
$75^\circ$	151 mV
$90^\circ$	149 mV
$105^\circ$	145 mV
$135^\circ$	91,9 mV
$150^\circ$	40,0 mV
$180^\circ$	-24,1 mV
$210^\circ$	-144 mV
$270^\circ$	-148 mV

Mit Rechnung:

Pre-Amp:  $\times 5$  später  $\sqrt{2} \times$  Filter:  $\times 1$

Filter: zw. 30 - 100 Hz  $\rightarrow$  filtert, später: 1 kHz (mit Güte 50 statt 1)

Low Pass

C. H.

Led	90,66 Hz
10cm	69,6 mV
11cm	50,9 mV
12cm	39,0 mV
13cm	30,3 mV
14cm	26,7 mV
15cm	19,6 mV
16cm	16,6 mV
17cm	13,9 mV
20cm	9,10 mV
23cm	6,40 mV
27cm	4,74 mV
32cm	2,16 mV

37cm	2,60
60cm	2,22
67cm	1,75
80cm	1,67
57cm	1,50
57cm	1,38
60cm	1,14
70cm	1,10 mV
80cm	0,86 mV
90cm	0,72 mV
100cm	0,62 mV
110cm	0,47 mV
120cm	0,32 mV

130 0,70  
140 0,68