

Lock-In-Verstärker

Ann-Sophie Schubert
ann-sophie.schubert@udo.edu

Lars Funke
lars.funke@udo.edu

Durchführung: 17.11.2015

Abgabe: 24.11.2015

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Theorie	4
3	Aufbau	5
4	Durchführung	5
4.1	Verrauschtes Signal	6
4.2	Photodektorschaltung	6
5	Auswertung	8
5.1	Ohne Rauschen	8
5.2	Mit Rauschen	10
5.3	Photodektorschaltung	13
6	Diskussion	14
	Literatur	14

1 Einleitung

Ein Lock-In-Verstärker wird benutzt, um (stark) verrauschte periodische Signale zu verstärken und zu messen.

2 Theorie

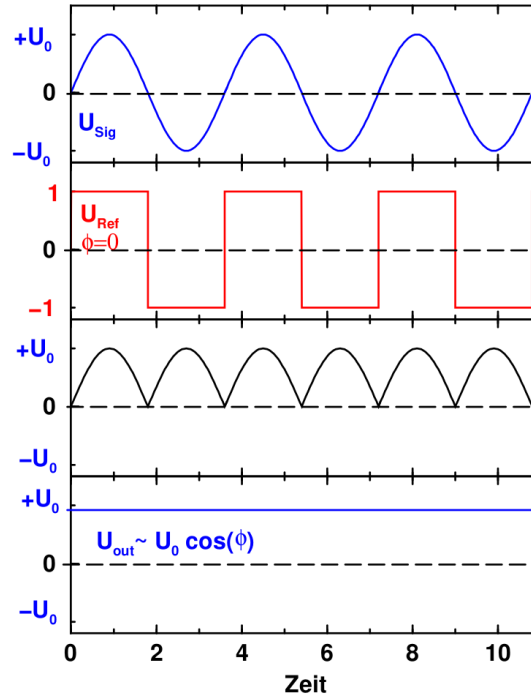


Abbildung 1: Signalverläufe. Aus [1].

Für eine sinusförmige Spannung

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

welche mit einer synchronisierten Rechteckspannung U_{ref} der Amplitude 1 moduliert wird, ergibt sich, wie in Abb. 1 ersichtlich nach der Modulation ein Signal welches dem Betrag der Signalspannung entspricht. Die unteren Halbwellen wurden also an der Zeitachse gespiegelt. Zur Bestimmung der Ausgangsspannung wird nun das Referenzsignal mit einer Fourier-Reihe genähert, sodass

$$U_{\text{ref}} = \frac{4}{\pi} \left(\sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \dots \right) \quad (2)$$

ist. Das Produkt des Signals mit der Referenzschwingung, also das modulierte Signal hat somit die Schwingungsgleichung

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

Durch den Tiefpassfilter werden zuletzt die Schwingungsanteile entfernt und übrig bleibt nur die Ausgangsspannung

$$U_{\text{out}} = \frac{2}{\pi} U_0. \quad (4)$$

Sind U_{ref} und U_{sig} nicht in Phase, sondern mit einer Phasenschiebung ϕ versehen, ist die Ausgangsspannung von dieser abhängig:

$$U_{\text{out}} = \frac{2}{\pi} U_0 \cos \phi \quad (5)$$

3 Aufbau

Ein Signal, welches zuvor durch einen Bandpassfilter von höher- ($\omega \gg \omega_0$) und niederfrequentem ($\omega \ll \omega_0$) Rauschen befreit wurde, wird mit einem Referenzsignal moduliert. Dieses kann durch einen Phasenschieber an das zu messende Signal angeglichen werden, sodass die Schwingungen in Phase sind ($\Delta\phi = 0$). Zuletzt wird das Mischsignal mit einem Tiefpassfilter über mehrere Perioden aufintegriert, wobei sich die stochastischen Rauschanteile bei ausreichender Zeitkonstante $\tau = RC \gg 1/\omega_0$ aufheben.

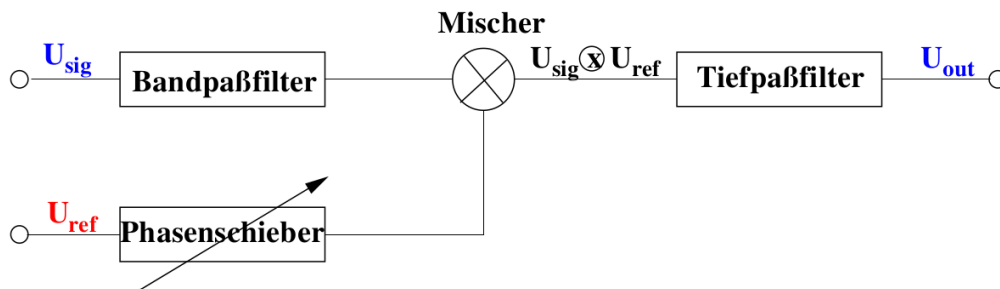


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Lock-In-Verstärkers. Aus [1].

4 Durchführung

Im Experiment wird das in Abb. 3 dargestellte Gerät verwendet, um die Eigenschaften eines Lock-In-Verstärkers zu evaluieren. Es besteht aus Signal- und Rauschgenerator, Vorverstärker, Bandpass, Referenzgenerator, Phasenschieber, Lock-In-Detektor und Tiefpass. Diese können mit Koaxialkabeln untereinander verbunden werden. Die erzeugten Spannungsverläufe werden mithilfe eines digitalen Speicheroszilloskops angezeigt und gespeichert werden.

4.1 Verrauschtes Signal

Zuerst wird die Schaltung aus Abb. 4 aufgebaut und die Funktionsweise des Lock-In-Verstärkers für ein Signal ohne und mit Rauschen evaluiert. Dazu wird der Rauschgenerator zuerst überbrückt, verschiedene Phasenverschiebungen eingestellt und die Ausgangsspannung gemessen. Dieses wird mit nicht überbrücktem Rauschgenerator wiederholt.

4.2 Photodetektorschaltung

Danach folgt die Messung einer Photodetektorschaltung mit dem Aufbau aus Abb. 5. Dabei wird die Intensität einer LED, die moduliert angesteuert wird, mit dem Lock-In-Verstärker gemessen.

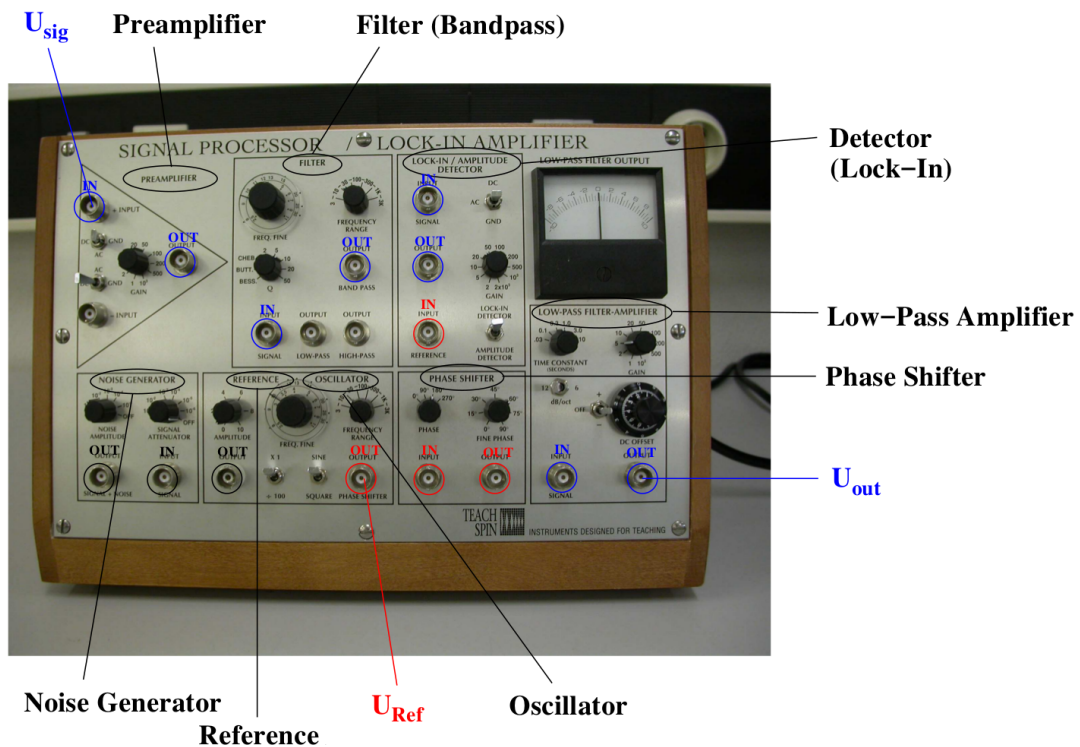


Abbildung 3: Lock-In-Verstärker. Aus [1].

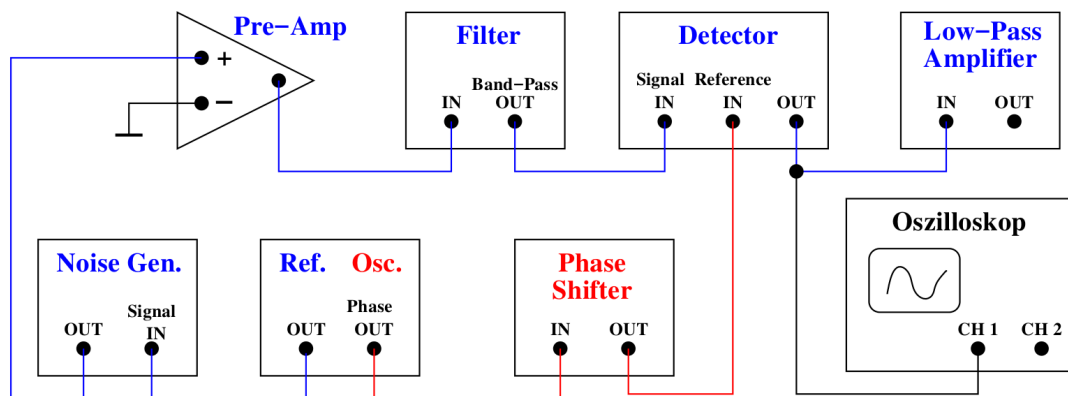


Abbildung 4: Schematischer Versuchsaufbau. Aus [1].

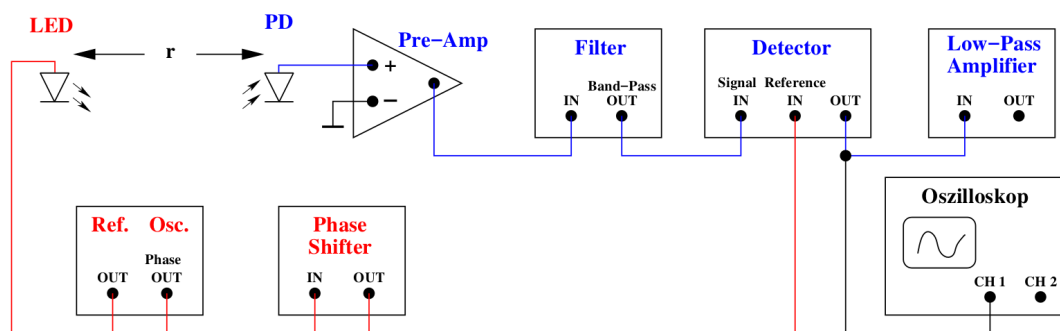


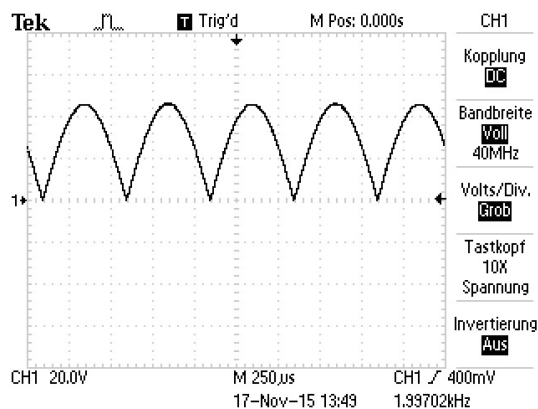
Abbildung 5: Schematischer Versuchsaufbau der Photodektorschaltung. Aus [1].

5 Auswertung

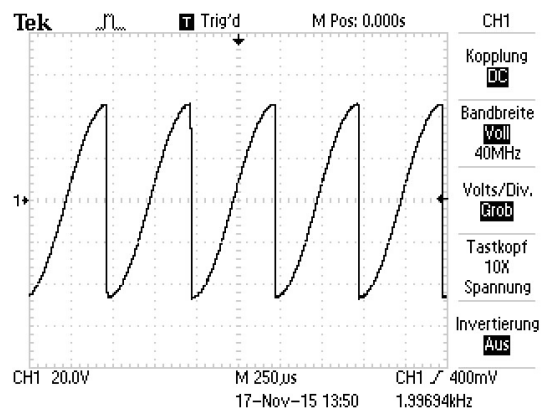
Am Ausgang Osc. variieren die Spannungsamplituden; Ref. liefert eine konstante Spannung, welche 22,8 V beträgt.

5.1 Ohne Rauschen

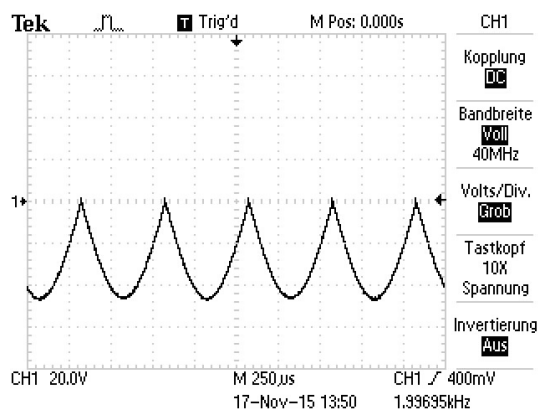
Ein sinusförmiges Signal mit $U = 10\text{ mV}$ und $f = 1\text{ kHz}$ wird mit einem ebenfalls sinusförmigen Referenzsignal gleicher Frequenz gemischt. Das Ausgangssignal soll für fünf Phasenverschiebungen abgebildet werden, sowie das Signal nach Integration durch den Tiefpass.



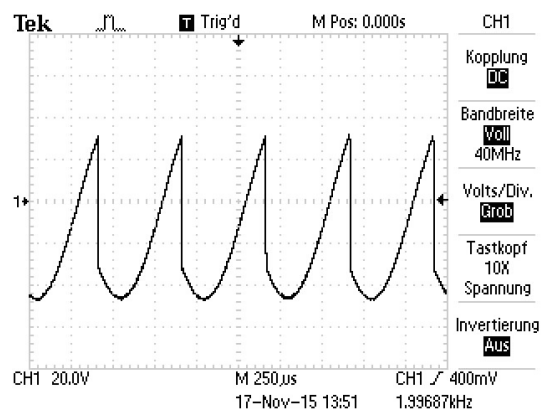
(a) Phasenverschiebung 0°.



(b) Phasenverschiebung 90°.



(a) Phasenverschiebung 180°.

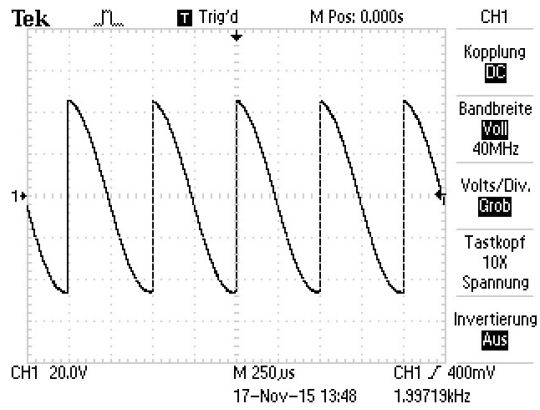


(b) Phasenverschiebung 225°.

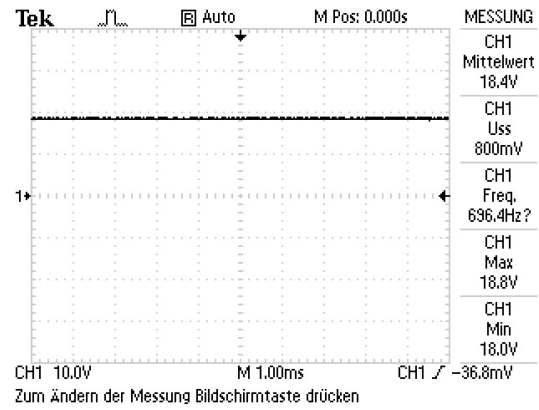
Wird die Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Phasenverschiebung gemessen, ergeben sich folgende Messwerte.

Die gemessenen Werte sollen mit 5 verglichen werden.

Da der Lock-In-Detector Gain auf 2 eingestellt ist, wird 5 mit 2 multipliziert.



(a) Phasenverschiebung 270° .



(b) Signal nach Integration durch den Tiefpass.

Tabelle 1: Ausgangsspannung ohne Rauschen

$\phi / ^\circ$	U / V	$\phi / ^\circ$	U / V
0	32.9	180	-33.4
15	32.1	195	-32.7
30	28.4	210	-29.6
45	20.8	225	-21.8
60	9.37	240	-10.8
75	0.728	255	-1.26
90	-3.00	270	2.52
105	-7.35	285	7.22
120	-16.4	300	16.0
135	-26.1	315	25.7
150	-31.9	330	33.1
165	-33.40	345	33.1

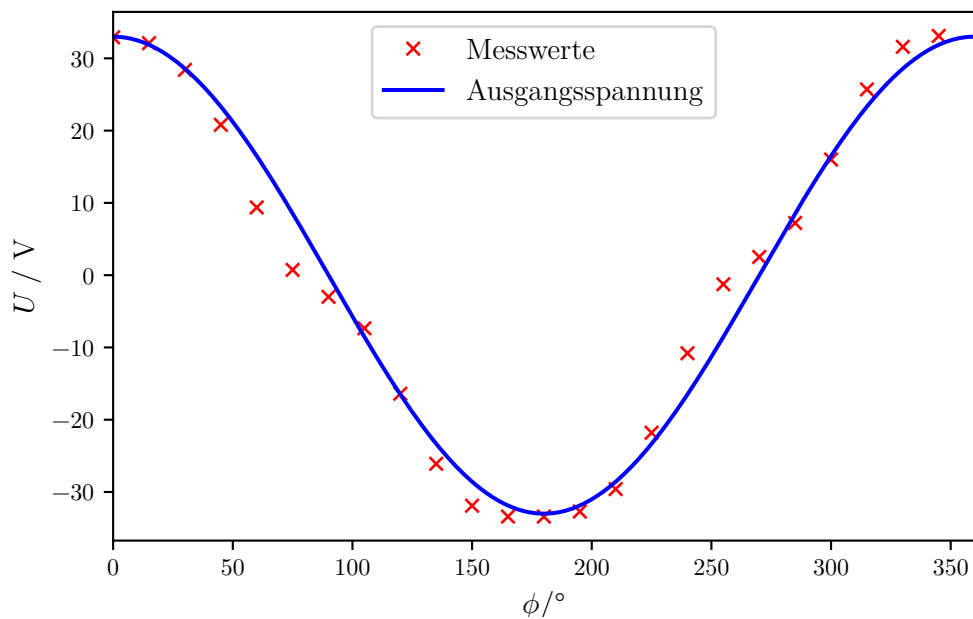


Abbildung 9: Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Phasenverschiebung ohne Rauschen.

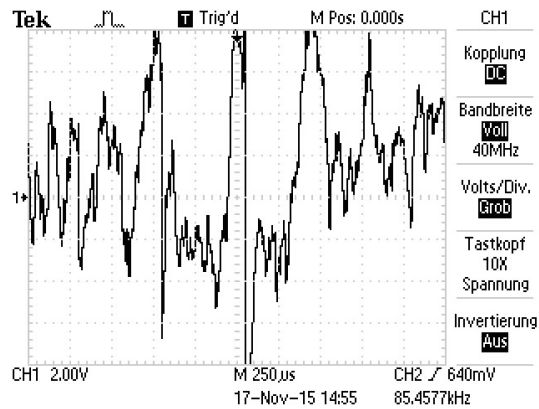
5.2 Mit Rauschen

Unter Hinzufügen eines Rauschsignals sollen erneut fünf Phasen abgebildet werden.

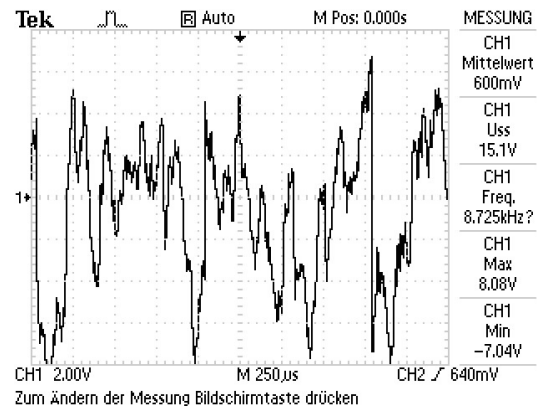
Für die Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Phasenverschiebung ergeben sich die Messwerte in Tabelle 2.

Auch diese Werte werden mit 5 verglichen. 5 wird ebenfalls mit 2 multipliziert.

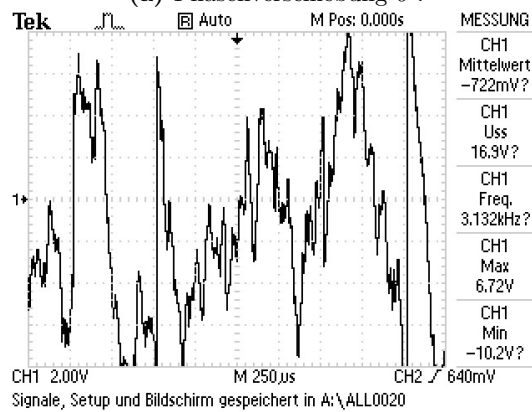
Die aufgenommenen Messwerte, sowie der Verlauf der Graphen mit und ohne Rauschen verhalten sich ähnlich.



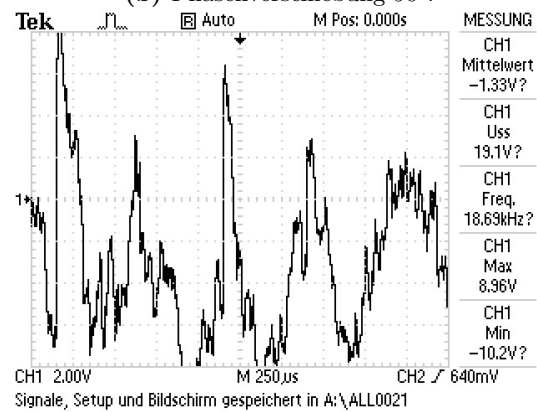
(a) Phasenverschiebung 0° .



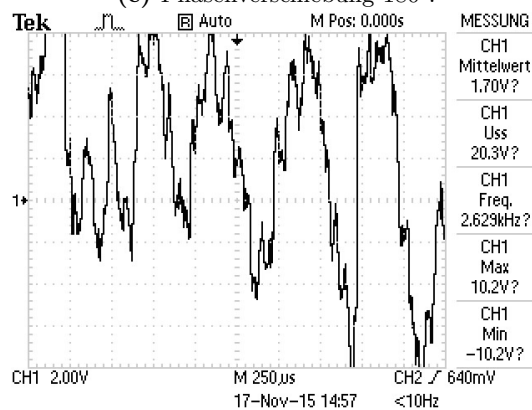
(b) Phasenverschiebung 90° .



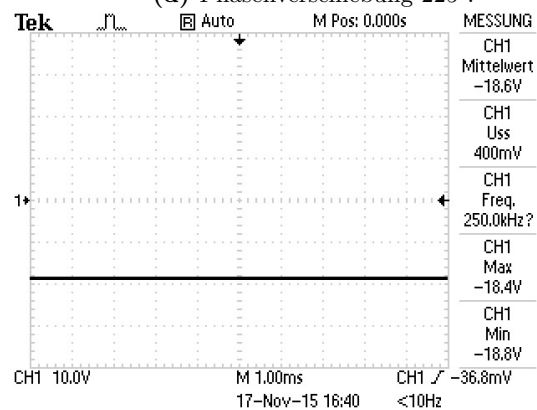
(c) Phasenverschiebung 180° .



(d) Phasenverschiebung 225° .



(e) Phasenverschiebung 270° .



(f) Signal nach Integration durch den Tiefpass.

Tabelle 2: Ausgangsspannung mit Rauschen

$\phi / ^\circ$	U / V	$\phi / ^\circ$	U / V
0	33.0	180	-33.5
15	31.7	195	-31.2
30	28.0	210	-28.1
45	21.5	225	-21.8
60	9.28	240	-9.56
75	0.1	255	-2.01
90	-3.31	270	2.95
105	-7.91	285	7.80
120	-16.1	300	15.3
135	-24.8	315	25.7
150	-31.3	330	30.8
165	-33.0	345	32.8

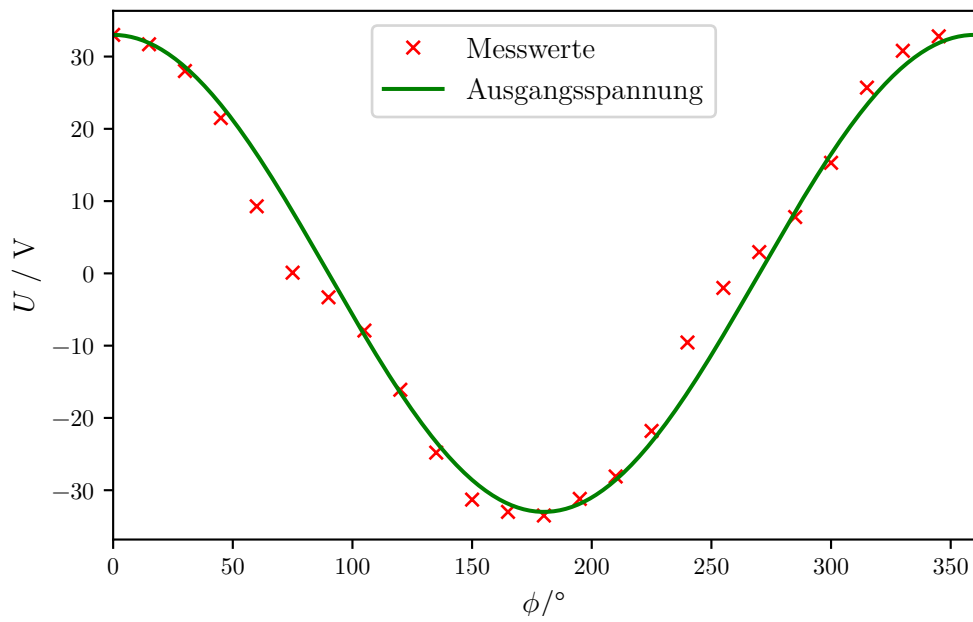


Abbildung 11: Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Phasenverschiebung mit Rauschen.

5.3 Photodetektorschaltung

Bei ausgeschalteter LED beträgt die Spannung $U_{\text{null}} = -7,72 \text{ V}$. Die Blinkfrequenz wird auf $f = 321,3 \text{ Hz}$ und der Low-Pass-Amplifier auf Gain 1000 eingestellt.

Tabelle 3: Photodetektorspannung U_{out} in Abhängigkeit des Abstandes r

r / m	$U_{\text{out}} / \text{V}$	r / m	$U_{\text{out}} / \text{V}$
0,10	88,20	1,00	-6,95
0,15	28,60	1,05	-7,01
0,20	11,00	1,10	-7,04
0,25	3,61	1,15	-7,08
0,30	-0,17	1,20	-7,11
0,35	-2,00	1,25	-7,14
0,40	-3,53	1,30	-7,18
0,45	-4,45	1,35	-7,21
0,50	-5,05	1,40	-7,24
0,55	-5,43	1,45	-7,27
0,60	-5,76	1,50	-7,30
0,65	-6,08	1,55	-7,34
0,70	-6,31	1,60	-7,35
0,75	-6,45	1,65	-7,37
0,80	-6,61	1,70	-7,39
0,85	-6,72	1,75	-7,43
0,90	-6,80	1,80	-7,44
0,95	-6,84	1,85	-7,43
		1,90	-7,43

Die bereinigten Messwerte ergeben sich aus

$$U_{\text{ber}} = \frac{U_{\text{out}}}{\text{Gain}} - \frac{U_{\text{null}}}{1000}. \quad (6)$$

Bei einer linearen Ausgleichsrechnung der Werte $\ln r$ und $\ln U_{\text{ber}}$ an die Funktion

$$y = \alpha x + \beta \quad (7)$$

ergeben sich die Koeffizienten

$$\alpha = (-1,895 \pm 0,026) \text{ V m}^{-1} \quad (8)$$

$$\beta = (-7,093 \pm 0,020) \text{ V} \quad (9)$$

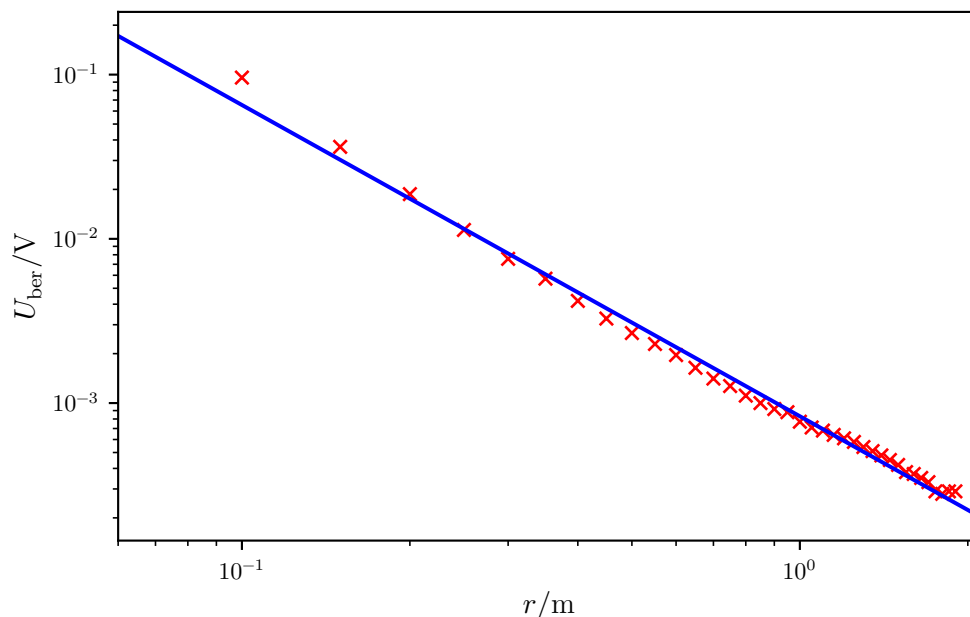


Abbildung 12: Doppellogarithmischer Plot von $U(r) = e^{\beta} \cdot r^{\alpha}$.

6 Diskussion

Der Graph der Messwerte entspricht (5) eine Cosinus-Funktion. Sie sind in der Phase identisch. Die Amplitude der Messwerte liegt über der des anderen Graphen, was auf Schwankungen bei der Anzeige der Spannung zurückgeführt werden kann. Folglich kann (5) als korrekt angenommen werden.

Wie erwartet nimmt bei der Photodetektorschaltung die Spannung in Abhängigkeit vom Abstand exponentiell ab, da die sich ausbreitende Welle kugelförmig ist. Die exponentielle Abnahme lässt sich an der fallenden Geraden im Doppellogarithmischen Plot erkennen.

Der Lock-In-Verstärker kann selbst sehr verrauschte Signale, welche auf dem Oszilloskop nicht mehr erkennbar sind, messen.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zu Versuch 303: Lock-In-Verstärker.*