

Technische Universität Dortmund
Versuch Nr. 303
Lock-In-Verstärker

Maximilian Demmel
maximilian.demmel@uni-dortmund.de

Jan Stubben
jan.stubben@uni-dortmund.de

6. Juni 2008

1 Einleitung

In diesem Versuch wird die Funktionsweise eines Lock-In-Verstärkers getestet.

2 Theorie

Bei einem Lock-In-Verstärker handelt es sich um einen Verstärker mit integriertem phasenempfindlichen Detektor. Mit ihm können stark verrauschte Signale gemessen werden. Zunächst wird das zu messende Signal mit einer bekannten Referenzfrequenz ω_0 moduliert. Aus dem modulierten, verrauschten Signal U_{Sig} werden nun mit einem Bandpass die Anteile mit den Frequenzen $\omega \ll \omega_0$ und $\omega \gg \omega_0$ herausgefiltert. Im nächsten Schritt wird U_{Sig} in einem Mischer mit einem Referenzsignal U_{Ref} , der selben Frequenz und variabler Phase multipliziert. Mit einem Phasenschieber läßt sich die Phase ϕ von U_{Ref} variieren um es mit der Phase des verrauschten Signals zu synchronisieren. Dies ist der Fall wenn $\Delta\phi = 0$ gilt. Es folgt nun ein Tiefpass (wobei $\tau = RC \gg \frac{1}{\omega_0}$), welcher $U_{Sig} \cdot U_{Ref}$ über mehrere Perioden integriert. Bei diesem Prozess werden alle Rauschbeiträge weitestgehend herausgemittelt. Für das ausgehende Signal gilt:

$$U_{out} \sim U_0 \cos\phi.$$

Über den Tiefpass kann die Bandbreite $\Delta\nu = \frac{1}{\pi RC}$ des Restrauschen durch geeignete Wahl der Zeitkonstante $\tau = RC$ beliebig reduziert werden. Auf diese Weise erreicht man mit Lock-In-Verstärkern Güten von $Q=100000$. Ein Bandpass erreicht Güten bis $Q=1000$. Einen schematischen Aufbau findet man hier:

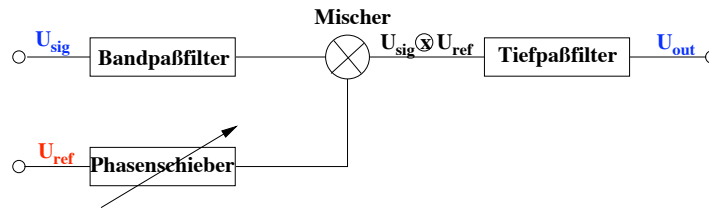


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Lock-In-Verstärkers

2.1 Beispiel

In dem folgenden Beispiel haben wir für das Signal dieses gewählt:

$$U_{Sig} = U_0 \sin(\omega t)$$

Für U_{Ref} wählen wir eine Rechteckspannung derselben Frequenz. Die Amplitude sei auf 1 normiert. Wenn wir diese in einer Fourierreihe darstellen erhalten wir nur ungerade Funktionen:

$$U_{Ref} = \frac{4}{\pi}(\sin(\omega t) + \frac{1}{3}\sin(3\omega t) + \dots)$$

Das Produkt aus Signal und Referenz ergibt dann:

$$U_{Sig} \cdot U_{Ref} = \frac{2}{\pi}U_0(1 - \frac{2}{3}\cos(2\omega t) - \frac{2}{15}\cos(4\omega t))$$

Nach dem Tiefpass und der damit verbundenen Integration erhält man eine zur Signalspannung proportionale Gleichspannung

$$U_{out} = \frac{2}{\pi}U_o.$$

Gibt es eine Phasendifferenz erhält man:

$$U_{out} = \frac{2}{\pi}U_o \cos(\phi).$$

3 Aufbau und Durchführung

Es liegt ein modularer Aufbau vor, der zum Kennenlernen des Lock-In-Verstärkers dient. In dem Aufbau sind Vorverstärker, verschiedene Filter (Hoch-, Tief- und Bandpassfilter), Phasenschieber, Funktionengenerator, Rauschgenerator, Tiefpassverstärker und ein Amplituden-/Lock-In-Detektor separat enthalten. Ein Oszilloskop dient zum Vermessen der Signale. Die einzelnen Bauteile sind wie folgt miteinander verbunden:

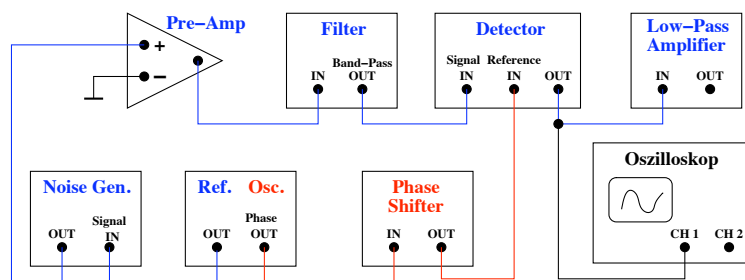


Abbildung 2: Schaltung zur Bedienung des Lock-In-Verstärkers

Die Schaltung wurde sukzessive aufgebaut und das Signal nach jedem Bauteil einmal mit dem Oszilloskop sichtbar gemacht und als Bilddatei gespeichert. Das Ausgangssignal nach dem Tiefpass wurde bei verschiedenen Phasendifferenzen zwischen Signal- und Referenzspannung aufgenommen. Die Aufnahmen von

U_{sig} wurden einmal alle ohne Rauschen (Rauschgenerator überbrückt) und einmal mit Rauschen aufgenommen.

Als zweiten Teil wurde eine Photodetektorschaltung aufgebaut:

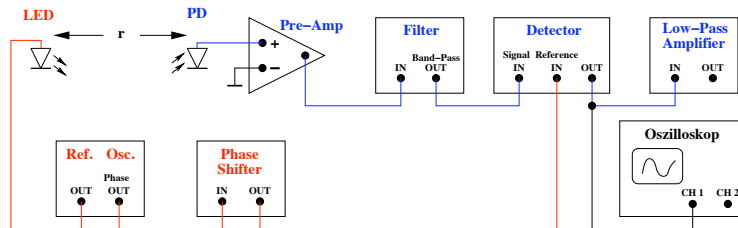


Abbildung 3: Photodetektorschaltung

Hier wird die Leuchtdiode mit der Rechteckspannung einer Frequenz zwischen 50Hz und 500Hz betrieben. Eine Photodiode misst dann die Lichtimpulse der LED. In einer Messreihe wird die Intensität der LED als Funktion des Abstandes r durchgeführt.

4 Auswertung

4.1 Module des Lock-In-Verstärkers

Die Funktionen der einzelnen Module des Lock-In-Verstärkers können mit Hilfe eines Speicheroszilloskops sichtbar gemacht werden. Zu diesem Zweck stand ein Oszilloskop mit USB-Ausgang zur Verfügung, sodass die angezeigten Bilder direkt gespeichert werden konnten. Die einzelnen Stationen sollen hier näher erläutert werden.

4.1.1 Signalgenerator

Abbildung 4 zeigt das Signal direkt nach der Erzeugung. Die Einstellungen hierbei wurden zu $U_{sig} = 10 \text{ mV}$ und $f_{sig} = 1000 \text{ Hz}$ gewählt.

4.1.2 Referenzsignal

Das Referenzsignal, welches in der Phase variabel ist und über eine konstante Amplitude von $U_{Ref} = 1,864 \text{ V}$ verfügt, ist in Abbildung 5 dargestellt.

4.1.3 Vorverstärker

In diesem ersten Durchlauf wird die Entwicklung des unverrauschten Signals nach jedem Element des Lock-In-Verstärkers verfolgt. Vom Signalgenerator geht es demnach in den Vorverstärker. Das zugehörige Bild wird in Abbildung 6 gezeigt. Nach dem Vorverstärker folgt ein

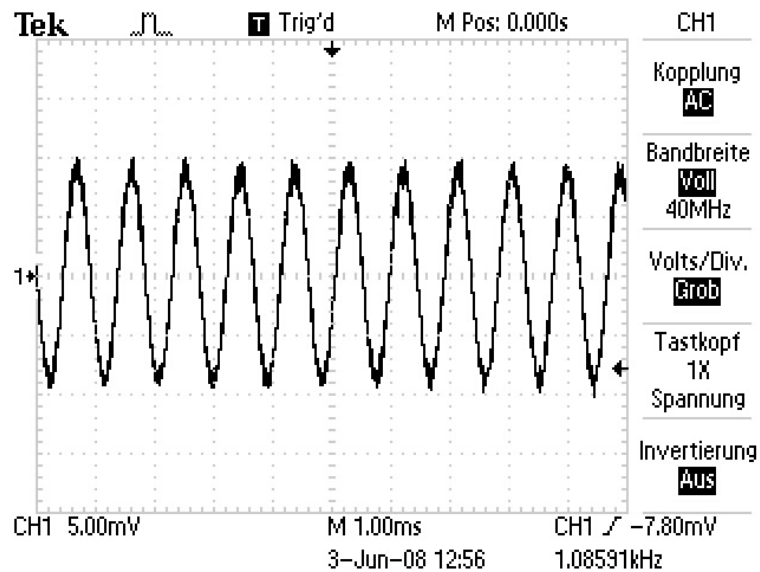


Abbildung 4: Signal nach Generator

4.1.4 Bandpass

Dieser dient zur Filterung unerwünschter Frequenzen weit außerhalb der interessanten Bereiche und wurde in der Bessel-Variante verwendet. Die Güte dieses Filters wird relativ gering gehalten, um die Phasenverschiebung zwischen Ein- und Ausgangsspannung am Bandpass klein zu halten. Abbildung 7 zeigt das Signal nach dem Bandpass.

4.1.5 Mischer

Schließlich wird das Signal in einem Signalmischer mit einem Referenzsignal gleicher Frequenz, aber variabler Phase gemischt. Durch diese Mischung wird eine Gleichrichtung erzeugt, welche in Abbildung 8 deutlich zu erkennen ist.

4.1.6 Integrierglied

Durch das nachgeschaltete Integrierglied mitteln sich die meisten Störungen heraus, sodass eine der beobachteten Frequenz und der Phasenverschiebung zwischen Referenzspannung und Signal proportionale und sehr niederfrequente Spannung gemessen werden kann. Ein beispielhaftes Oszilloskopbild ist in Abbildung 9 dargestellt. Misst man die mittlere Ausgangsspannung in Abhängigkeit der Phasenverschiebung, so ergibt sich Tabelle 1. An den Daten und Abbildung ist deutlich zu sehen, dass die Ausgangs- und Eingangsspannung über den Kosinus der Phase zwischen den Spannungen verknüpft sind.

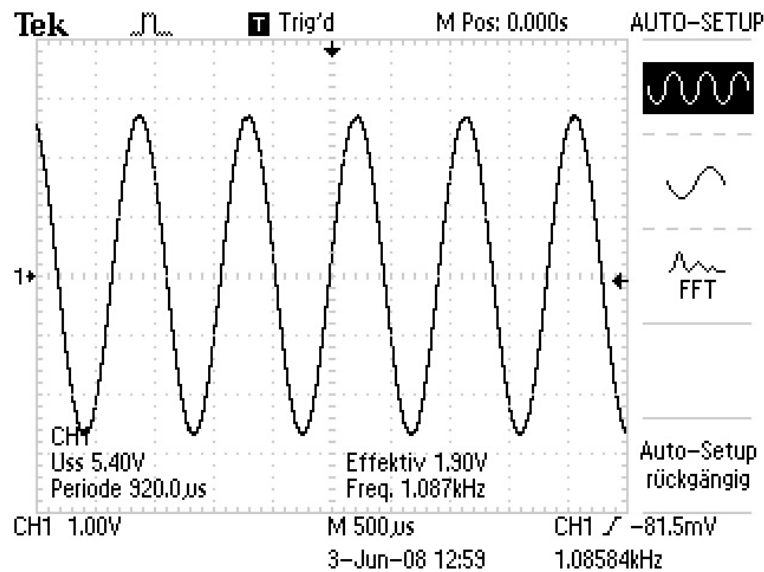


Abbildung 5: Referenzsignal nach Generator

4.2 Funktionsweise bei verrauschtem Signal

Die eigentliche Anwendung des Lock-In-Verstärkers liegt bei der Filterung verrauschter Signale, um die Amplitude einer gewünschten und vorgegebenen Frequenz messen zu können. Zu diesem Zweck wird das erzeugte Signal durch einen Rauschgenerator geführt. Wie im vorherigen Abschnitt wird jetzt eine qualitative Aussage zu jedem Einzelmodul getroffen.

4.2.1 Signal nach Rauschgenerator

In Abbildung 11 ist das Signal nach dem zwischenschaltbaren Rauschgenerator zu sehen.

4.2.2 Vorverstärker

Durch den Vorverstärker ändert sich das grundlegende Signal nicht, nur seine Amplitude wird verstärkt, wie in Abbildung 12 zu beobachten ist.

4.2.3 Bandfilter

Der Bandfilter beschneidet schon sichtbar einige Randbereiche des verrauschten Signals, vergleiche Abbildung 13. Es zeigt sich, dass die Amplitude ebenfalls deutlich kleiner geworden ist, was auch ein Grund für die Wahl einer relativ schwachen Güte des Filters ist.

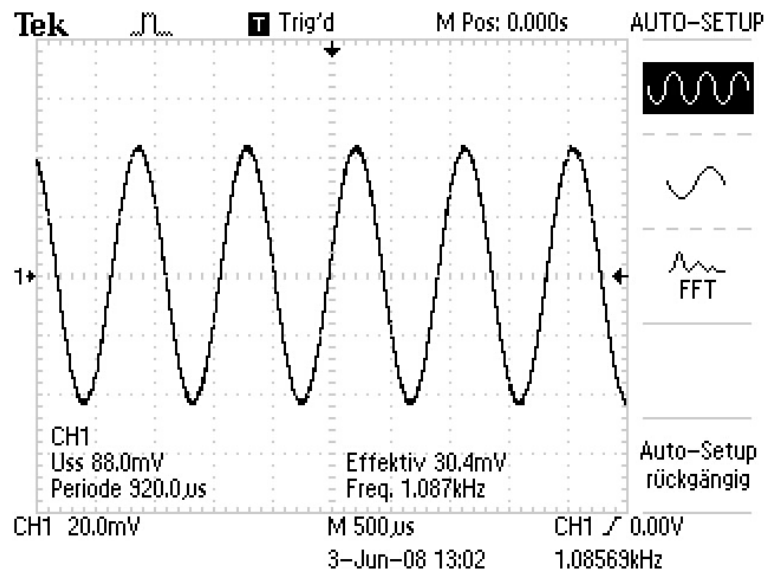


Abbildung 6: Signal nach Vorverstärker

4.2.4 Mischer

Nach der Mischstufe hat das Signal eine Form wie in Abbildung 14 exemplarisch für Phasen von 0° , 90° , 180° und 270° angedeutet. Hier entsteht nicht mehr der Effekt einer vollständigen Gleichrichtung, sodass sich die Störungen über lange Zeiträume integriert herausmitteln werden.

4.2.5 Tiefpass-Filter

Das nach der Integration über mehrere Perioden entstehende zur Amplitude der gesuchten Frequenz und der Phase proportionale Gleichspannungssignal ist in Abbildung für eine Phase von 90° gezeigt. Aus dem Oszilloskopbild ist bereits zu ersehen, dass die Frequenz des Signals bei unter 10 Hz liegt. Misst man die mittlere Ausgangsspannung am Tiefpass gegen die Phasenverschiebung, so erhält man eine ähnliche Abhängigkeit wie zuvor bei unverraushtem Signal, vergleiche Tabelle 2 und Abbildung 16.

4.3 Photodetektorschaltung

Die Messung der Photodetektorschaltung liefert die in Tabelle 3 aufgelisteten Daten. Der Verstärkungsfaktor berechnet sich dabei aus der Verstärkung des Tiefpasses und der Verstärkung des Vorverstärkers, welche getrennt einstellbar ausgeführt sind, zu $V = V_{Ampl} V_{RC}$. Der Empfänger ist bei einer Position von $x_{sensor} = 1,45$ m angebracht. Stellt man diese Daten grafisch dar, so ergibt sich das in Abbildung 17 dargestellte Diagramm. Die Proportionalität zum Kehrwert

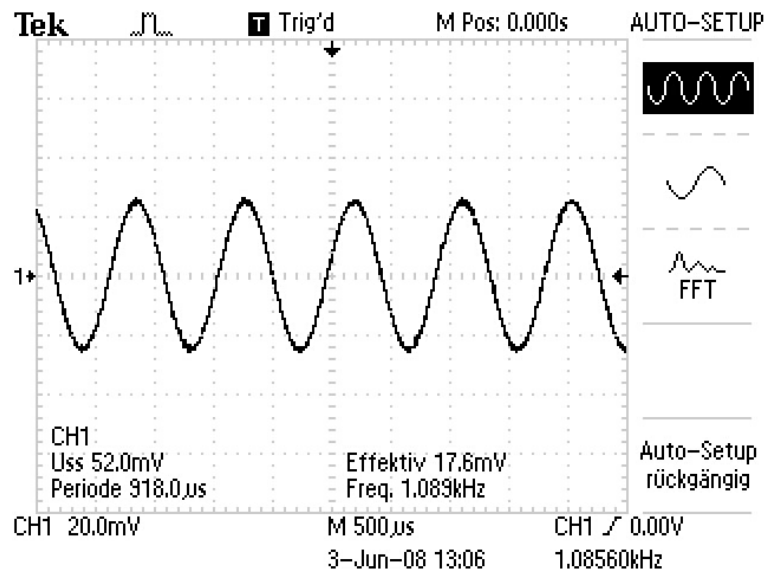


Abbildung 7: Signal nach Bandpass

des Abstandsquadrates zwischen Empfänger und Sender ist deutlich zu erkennen. Augenscheinlich kann das Signal der Photodiode über den gesamten ausgemessenen Bereich nachgewiesen werden.

5 Diskussion

Die Messungen zeigen, dass mit Hilfe eines Lock-In-Verstärkers auch verrauschte Signale bei bekannter zu messender Frequenz genau bestimmt werden können. Am Beispiel der Fotodiode wurde gezeigt, dass die praktische Anwendung durchaus vorhanden ist.

6 Literaturverzeichnis

Alle Abbildungen außer den selbst angefertigten Oszilloskopbildern wurden dem Praktikumsskript zu Versuch 303, Stand 6. Juni 2008 entnommen:

<http://berners-lee.physik.uni-dortmund.de/praktikum/AP-Anleitungen/↔Elektrizitaetslehre/Versuch\%20Nr.303.pdf>

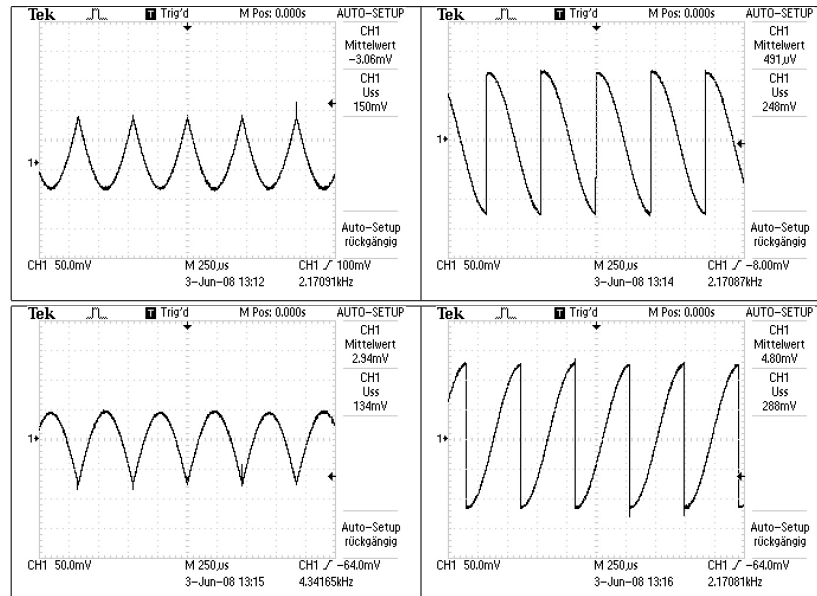


Abbildung 8: Gemischtes Signal mit Referenz bei einer Phasenverschiebung von 15° , 105° , 195° und 285° .

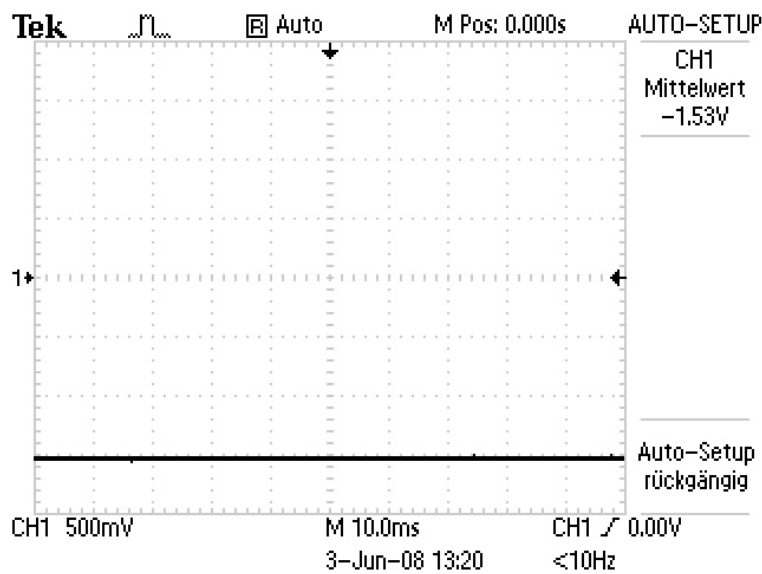


Abbildung 9: Integriertes Signal bei einer Phasenverschiebung von 15° .

φ [°]	U_{mean} [V]	φ [°]	U_{mean} [V]
0	-1,540	195	1,550
15	-1,540	210	1,480
30	-1,460	225	1,190
45	-1,160	240	0,755
60	-0,736	255	0,366
75	-0,339	270	0,123
90	-0,093	285	-0,055
105	0,099	300	-0,508
120	0,509	315	-0,983
135	1,040	330	-1,360
160	1,400	345	-1,510
175	1,520	360	-1,540
180	1,550		

Tabelle 1: Mittlere Ausgangsspannung in Abhängigkeit der Phase

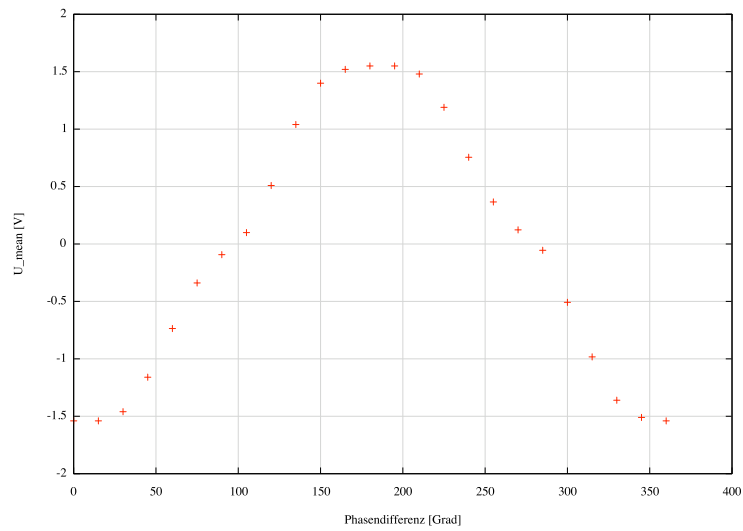


Abbildung 10: Ausgangsspannung gegen Phasenlage

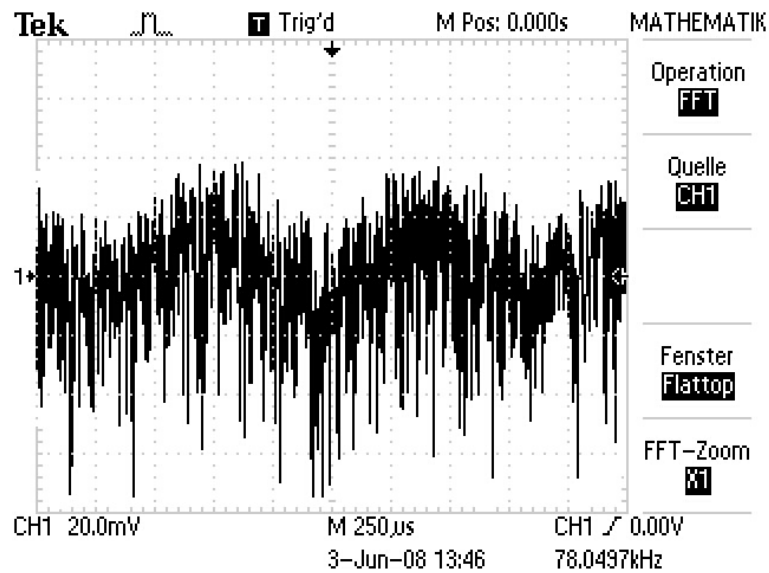


Abbildung 11: Verrauschtes Signal nach Rauschgenerator

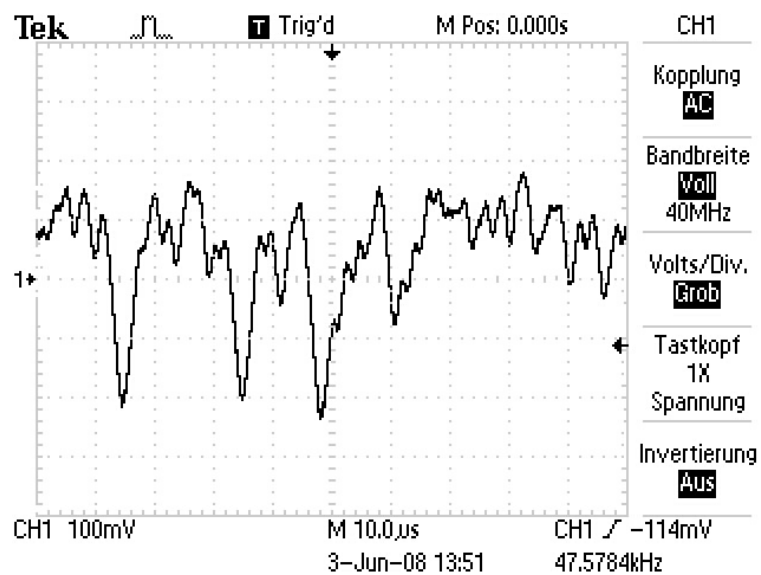


Abbildung 12: Verrauschtes Signal nach Vorverstärker

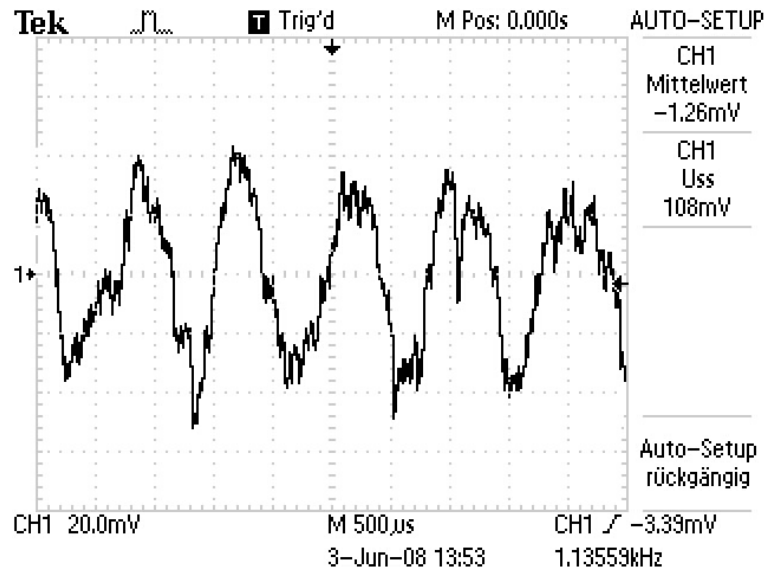


Abbildung 13: Verrauschtes Signal nach Bandfilter

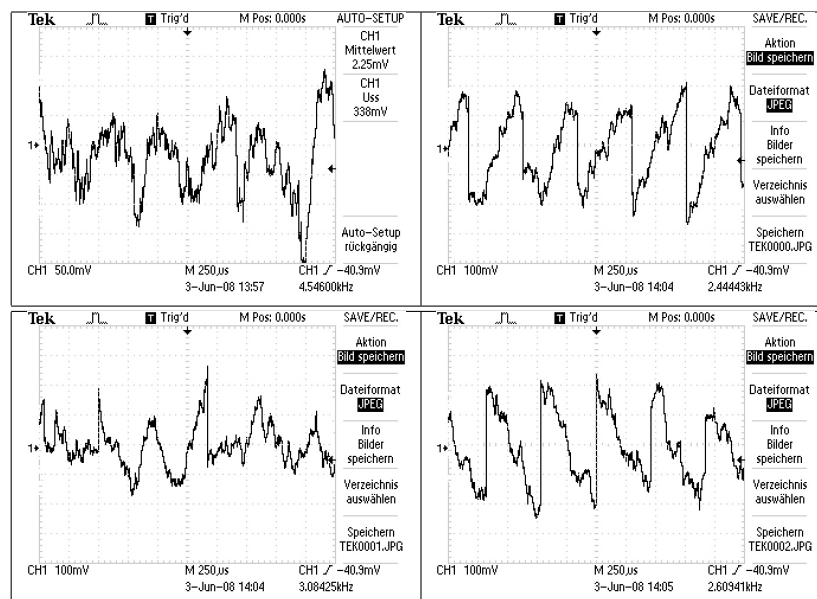


Abbildung 14: Verrauschtes Signal nach Mischer

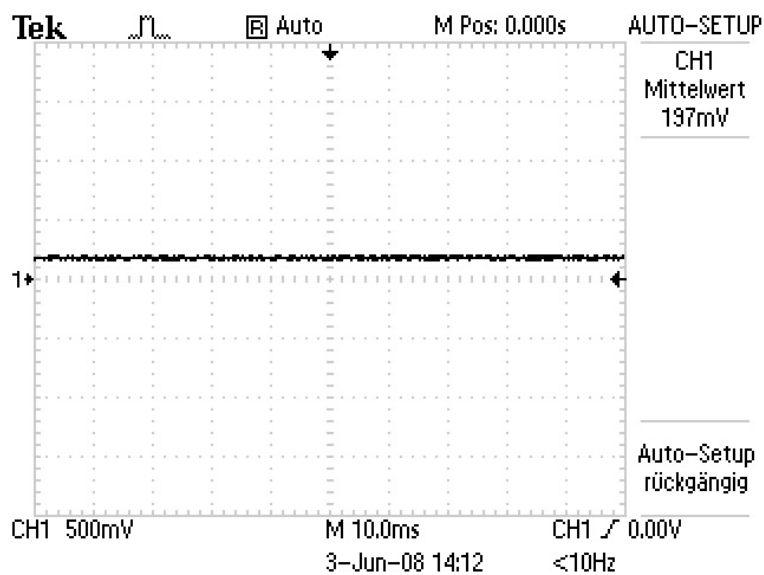


Abbildung 15: Verrauschtes Signal nach Tiefpass

φ [°]	U_{mean} [V]	φ [°]	U_{mean} [V]
0	1,860	195	-1,840
15	1,860	210	-1,760
30	1,750	225	-1,460
45	1,480	240	-0,959
60	0,927	255	-0,440
75	0,454	270	-0,188
90	0,193	285	0,062
105	-0,074	300	0,556
120	-0,521	315	1,100
135	-1,110	330	1,630
150	-1,630	345	1,800
165	-1,790	360	1,840
180	-1,830		

Tabelle 2: Mittlere Ausgangsspannung gegen Phasenverschiebung

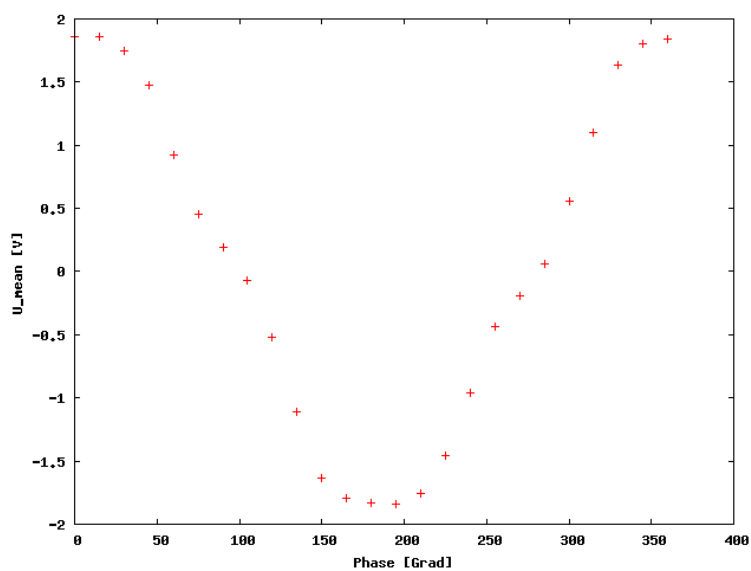


Abbildung 16: Mittlere Ausgangsspannung gegen Phasenverschiebung

LED-Position x [m]	U_{out} [V]	Verstärkungsfaktor V	U_{out}/V [mV]
1,35	11,20	50	224
1,25	7,60		152
1,15	3,00		60
1,05	1,60		32
0,95	1,01		20,2
0,85	0,64		12,8
0,75	8,44	1000	8,44
0,65	7,10		7,10
0,55	6,06		6,06
0,50	4,65		4,65
0,45	4,43		4,43
0,40	7,55	2000	3,78
0,35	2,88	1000	2,88
0,30	6,23	2000	3,12
0,25	2,54	1000	2,54
0,20	5,20	2000	2,60
0,15	2,34	1000	2,34
0,10	4,33	2000	2,17
0,05	2,16	1000	2,16

Tabelle 3: Messdaten der Photodetektorschaltung

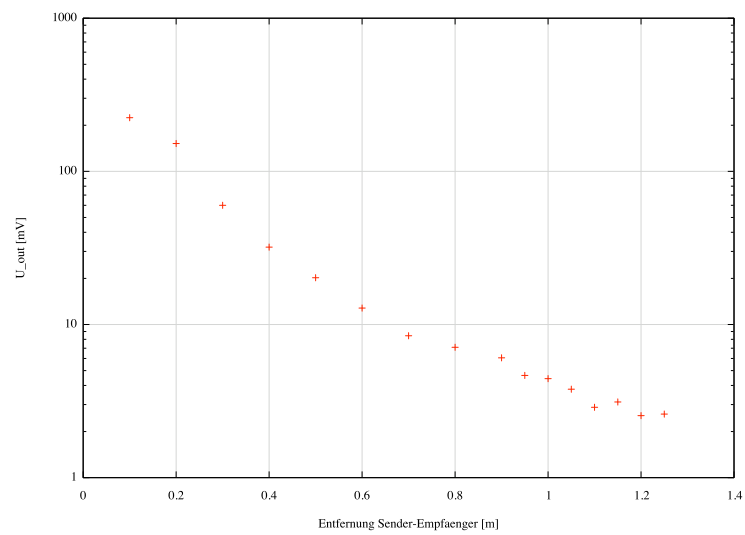


Abbildung 17: Gemessene Ausgangsspannung gegen Entfernung Sender-Empfänger