Aufbau eines F-Praktikum-Versuchs:

Lock-In-Verstärker mit computergestützter Signalverarbeitung in LabVIEW

Bachelor-Arbeit
an der
Fakultät für Physik und Astronomie
der
Ruhr-Universität Bochum

von
Jonas Herick
aus Vreden

Bochum, September 2007

Inhaltsverzeichnis

1. Das Problem Seite 1

2. Rauschen Seite 2
    2.1. Thermisches- oder Widerstandsrauschen Seite 2
    2.2. Schrotrauschen Seite 3
    2.3. (1/f)-Rauschen Seite 3
    2.4. Umwelteinflüsse Seite 3
    2.5. Signal-zu-Rausch-Verhältnis Seite 4

3. Signal/Rausch-Verbesserung Seite 5
    3.1. Filter Seite 5
    3.2. Signalmittelung Seite 6
    3.3. Koaxialkabel Seite 7
    3.4. Lock-In-Verstärker Seite 8
        3.4.1. Phasenempfindlicher Gleichrichter Seite 11

4. Programmierung Seite 15
    4.1. LabVIEW Seite 15
    4.2. Programm Seite 15
        4.2.1. Programm-Oberfläche Seite 15
        4.2.2. Realisierung der Lock-In-Verstärkers Seite 20

5. Der Versuch Seite 25
    5.1. Versuchsaufbau Seite 25
    5.2. Messungen mit dem Lock-In-Verstärker Seite 26

6. Zusammenfassung Seite 32

7. Literaturverzeichnis Seite 33

1. Das Problem

Häufig sind in der Physik oder auch in anderen Wissenschaften die zu messenden Signale sehr klein. Solche Signale werden in diesem Fall stark von statistischen Schwankungen, welche Rauschen genannt werden, überlagert. Das Problem bei der Messung solcher Signale besteht nun darin, das Nutzsignal möglichst stark gegenüber dem Rauschen hervorzuheben.

Um dies zu erreichen, kann man zunächst dafür sorgen, dass jegliche Art von Störeinflüssen möglichst gering gehalten wird. Dazu kann man darauf achten, dass das Messsignal möglichst in ursprünglicher Form am Detektor ankommt, die Apparatur also optimal justiert ist. Andererseits kann man versuchen, das Rauschen möglichst zu minimieren, wie zum Beispiel durch Kühlung von Halbleitern, Vermeidung von Erdschleifen, Abschirmung vor elektromagnetischer Induktion. Sind all diese Möglichkeiten ausgeschöpft, so lässt sich das Signal evtl. noch durch die Verwendung eines phasenempfindlichen Messgerätes verbessern.

Zum Einsatz einer solchen Apparatur muss das Signal jedoch streng periodisch moduliert sein. Der Lock-In-Verstärker fungiert als Frequenzfilter, wobei, auf Grund der statistischen Natur des Rauschens durch Mittelung über einen gewissen Zeitraum das Signal gegenüber dem Rauschen hervor gehoben werden kann. Mit einem Lock-In-Verstärker lassen sich also kleinste AC[1]-Signale messen.

Ziel dieser Arbeit ist es, einen computergestützten Lock-In-Verstärker mit Hilfe des Computerprogrammes „LabVIEW“ der Firma National Instruments zu realisieren. Er soll dabei möglichst gut zur Verwendung im F-Praktikum geeignet sein, also gut strukturiert und übersichtlich aufgebaut sein.

Außerdem soll eine Messapparatur hergestellt werden, die mit dem Lock-In-Verstärker-Programm untersucht werden kann. Besonders einfach lassen sich dabei periodische Signale mit Hilfe eines Funktionsgenerators erstellen. Auch eine optische Variante mit Glühlampe, Chopper-Rad (Lichtzerhacker) und Photodetektor ist einfach zu verwirklichen und eignet sich für diesen Versuch besonders gut.

1 AC: alternating current (Wechselstrom)

2. Rauschen

Der Großteil der heutigen Messapparaturen arbeitet bereits mit elektronischer Datenerfassung. Dabei gelangt man häufig an die Grenzen der Messgenauigkeit, welche physikalisch durch die Unschärferelation und technisch durch das Rauschen der Elektronik festgesetzt werden.

Prinzipiell spricht man bei jeder unerwünschten Beimischung von Signalen zum eigentlichen Messsignal von Rauschen. Im Folgenden beschäftigen wir uns kurz mit den verschiedenen Ursachen für dieses Phänomen.

2.1. Thermisches oder Widerstandsrauschen

Die Leitungselektronen bewegen sich auf Grund ihrer thermischen Energie statistisch im Festkörper, so dass beim Leitungsvorgang durch den Zusammenstoß von Ladungsträgern mit dem schwingenden Gitter des Festkörpers Stromimpulse entstehen. Diese machen sich schließlich als Wärme- bzw. thermisches Rauschen bemerkbar. Da Wärmerauschquellen überall da vorliegen, wo Wirkwiderstände vorhanden sind, spricht man auch von Widerstandsrauschen. Die Rauschleistung eines Widerstands ist dabei völlig unabhängig von der Größe des Widerstandes und hängt lediglich von der absoluten Temperatur T und dem ausgenutzten Frequenzbereich Δf ab. Die maximale Rauschleistung $P_{r\,max}$ eines Widerstandes ergibt sich somit zu:

$$P_{r\,max} = k \cdot T \cdot \Delta f \qquad (1)$$

(Gleichung 1 mit: k= Boltzmann-Konstante, T= absolute Temperatur, Δf= Bandbreite)

Theoretisch würde der rauschende Widerstand diese Leistung an einen nicht realisierbaren, rauschfreien, also „idealen“ Widerstand abgeben. Ein rauschender Widerstand lässt sich gut in einem Ersatzschaltbild, mit einem „idealen“ Widerstand und einem Rauschgenerator, veranschaulichen:

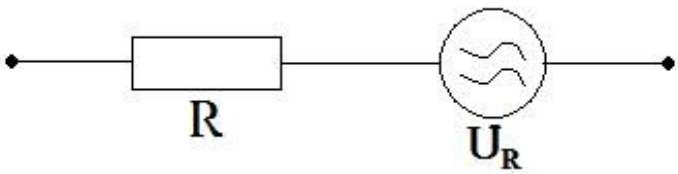

Abbildung 1: Ersatzschaltbild eines Leiters beschrieben durch den "idealen" Widerstand R und Rauschgenerator

2.2. Schrotrauschen

Diese Art von Rauschen geht auf die Quantelung der Ladungsträger zurück. Es tritt immer dann auf, wenn ein elektrischer Strom eine Potentialbarriere überwinden muss.

Die Anzahl der Ladungsträger in einem kontinuierlich fließenden Strom unterliegt dabei statistischen Schwankungen. Diese rühren daher, dass die kinetische Energie der Ladungsträger statistisch verteilt ist und die Potentialbarriere somit nicht gleichmäßig überwunden wird, was zu einer zeitlich nicht konstanten Ladungsverteilung und somit zum Rauschen führt.

Durch diesen Effekt ergibt sich schließlich das Schrotrauschen, dessen maximale Rauschleistung sich wie folgt berechnen lässt:

$$P_{r\,max} = 2 \cdot e \cdot I \cdot R \cdot \Delta f \qquad (2)$$

(Gleichung 2 mit: e=Elektronenladung, I=Gleichstrom, R=Widerstand)

2.3. (1/f)-Rauschen

Bei Frequenzen, die unterhalb von etwa 2kHz liegen, überwiegt diese Art von Rauschen häufig gegenüber dem thermischen bzw. Schrotrauschen. Da sich jedoch die Amplitudenverteilung umgekehrt proportional zur Frequenz verhält, spielt dieser Rauschtyp bei höheren Frequenzen kaum noch eine Rolle und kann vernachlässigt werden.

Die Ursache für das (1/f)-Rauschen, auch Funkel-Rauschen genannt, ist noch nicht endgültig geklärt. Man nimmt jedoch an, dass sich etwa bei Massenwiderständen der veränderliche Kontaktwiderstand zwischen den Kohlekörnern und bei Halbleitern die Oberflächendefekte bemerkbar machen.

2.4. Umwelteinflüsse

Häufig sind nicht diese drei fundamentalen Rauschursachen für das Problem der genauen Messung des Signals verantwortlich. In vielen Fällen liegt die eigentliche Hauptursache in verschiedenen Umwelteinflüssen. So ist häufig das so genannte Netzbrummen, welches durch die 50 Hz- Stromversorgung der verschiedenen Experimentbestandteile hervorgerufen wird, für die Verfälschung der Messergebnisse verantwortlich. Auch kann dieser Effekt noch bei den höheren Harmonischen, also bei 100 Hz, 150 Hz, usw., auftreten.

Des Weiteren können Störungen im Radiofrequenzband auftreten, da Leiter praktisch als Antennen für diese von Mittelwellensendern ausgestrahlten Signale wirken. Auch die Strahlung von Computer-Monitoren oder nahe gelegenen Röntgenapparaturen können Quellen für umweltbedingtes Rauschen sein.

2.5. Signal-zu-Rausch-Verhältnis

Die Qualität eines verrauschten Signals wird durch das S/N[2]-Verhältnis oder auch den Rauschabstand bestimmt. Dieser berechnet sich wie in Gleichung 3 dargestellt:

$$\frac{S}{N} = \frac{P_S}{P_N} = \frac{Signalleistung}{mittlere\ Rauschleistung} \tag{3}$$

2 S/N: Signal/Noise

3. Signal/Rausch-Verbesserung

3.1. Filter

Wie in vielen Messaufbauten, spielen auch beim Lock-In-Verstärker elektronische Filter eine wichtige Rolle. Zwar kommt der eigentliche Lock-in-Verstärker auch nahezu ohne Filter aus, jedoch kann man mit diesem das Signal weiter verstärken.

Elektronische Filter können immer dann eingesetzt werden, wenn Signal und Rauschen bei verschiedenen Frequenzen auftreten. Dabei wird die Bandbreite der Messung stark reduziert, so dass sich das Rauschen, wie in den Gleichungen (1) und (2) zu sehen ist, linear mit der Bandbreite verringert.

Filter arbeiten dabei wie folgt: Sie unterdrücken bestimmte Frequenzen, während sie andere durchlassen. Man unterscheidet dabei vier unterschiedliche Typen von Filtern, deren Übertragungscharakteristika in nachstehender Abbildung zu ersehen sind.

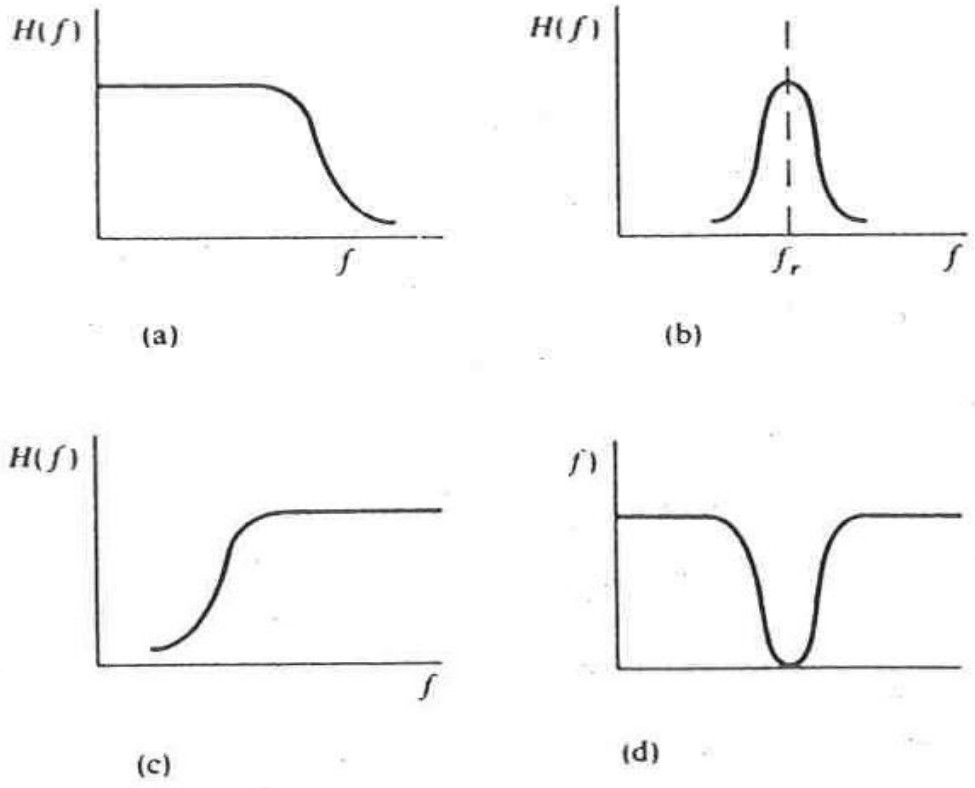

Abbildung 2: Filtercharakteristik der vier grundlegenden Filtertypen:

a) Tiefpass b) Bandpass c) Hochpass d) Bandsperre

Anwendungsbeispiele für Filter:

50 Hz Brummen: In nachstehender Abbildung ist ein Signal von 500 Hz von 50 Hz-Brummen überlagert. Mit Hilfe eines Hochpasses kann man nun das Signal-Rausch-Verhältnis verbessern. Dabei wird auf der einen Seite das 50 Hz-Brummen stark abgeschwächt, während das eigentliche Signal bei 500 Hz nahezu unverändert durchgelassen wird. Ein ähnlicher Effekt lässt sich auch durch die Verwendung einer Bandsperre erzielen, der gezielt die 50 Hz unterdrückt.

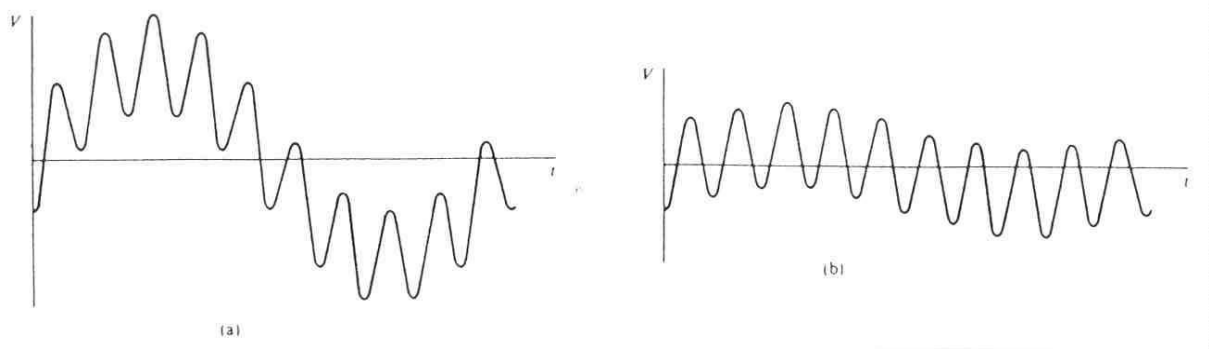

Abbildung 3: a) Eingangssignal mit Brummen *b) gefiltertes Signal*

Breitbandiges Rauschen: Wird ein Signal einer bestimmen Frequenz durch breitbandiges, statistisches Rauschen überdeckt, so lässt sich das Signal selektiv durch einen Bandpass herausfiltern, sodass eine erhebliche Signal/Rausch-Verbesserung erzielt wird.

3.2. Signalmittelung

Bei besonders stark verrauschten Signalen empfiehlt sich die Methode der Signalmittelung, um das Signal gegenüber dem Rauschen hervorzuheben. Voraussetzung für diese Methode ist jedoch, dass das Signal periodisch und von bekannter Phase ist. Dazu wird das Signal samt Rauschen in n Segmente zerlegt und in ebenso vielen Kanälen gespeichert. Dieser Vorgang wird mehrmals wiederholt, wobei jeder Durchgang zu dem Speicherinhalt hinzu addiert wird.
Auf diese Weise wächst die Signalstärke in N Durchgängen auf ihren N-fachen Wert an, während, auf Grund der statistischen Natur des Rauschens, dieses nur jeweils mit seinem quadratischen Mittel in die Addition, und somit lediglich $\sqrt{N}$-fach in die Messung eingeht. Man erhält nach N Durchgängen also eine Signal/Rausch-Verbesserung von $\sqrt{N}$.

3.3. Koaxialkabel

Eine Möglichkeit, die Verbindungen zwischen den einzelnen Elementen vor Induktion und somit vor möglichen Rauschquellen abzusichern, besteht in der Verwendung von Koaxialkabel.

Koaxialkabel sind zweiadrige Kabel, die aus einem Innen- und einem Außenleiter bestehen. Der Aufbau dieser Art von Kabel ist konzentrisch, wobei der Innenleiter im konstanten Abstand von dem Außenleiter umgeben ist. Zwischen den beiden Leitern befindet sich ein Isolator bzw. Dielektrikum, welches zu einem Teil oder ganz aus Luft bestehen kann.

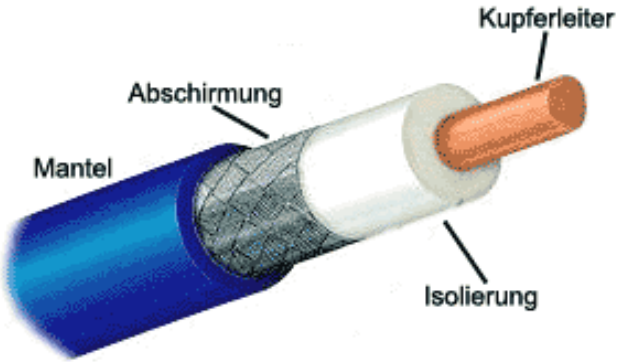

Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Koaxialkabels

Beim Anlegen einer elektrischen Spannung entsteht bei Koaxialkabeln nur zwischen Innen- und Außenleiter ein elektrisches Feld, nicht jedoch außerhalb von diesem. Somit ist diese Art von Kabeln abgeschirmt von äußeren Störeinflüssen. Es kann keine Störspannung durch Influenz in das Kabel gelangen. Hierzu muss jedoch der äußere Leiter, auch Mantel genannt, auf Erde gelegt werden.

Koaxialkabel, in unserem Fall mit BNC-Steckverbindungen, eigenen sich somit hervorragend zur Übertragung von schwachen Gleichströmen, niederfrequenten Wechselströmen, sowie kleinen Impulsen im Laborbetrieb. Ihre Übertragungsgeschwindigkeit beträgt dabei annähernd Lichtgeschwindigkeit und auch die Spannungsverluste halten sich für laborübliche Kabellängen in überschaubaren Grenzen.

3.4. Lock-In-Verstärker

Die Lock-In-Messtechnik ist ein äußerst wirkungsvolles Verfahren, welches als erstes durch den US-amerikanischen Physiker Robert Henry Dicke zur Untersuchung extrem schwacher Mikrowellenstrahlung angewandt wurde. Es ist möglich, sowohl die Amplitude, also die Signalsärke, als auch die Phase verrauschter, harmonischer Signale zu messen.

Das Prinzip des Lock-In-Verstärkers beruht dabei auf der Modulation der zu messenden Größe mittels eines Referenzsignals gleicher Frequenz. Der Name beschreibt dabei bereits, das Nutz- und Referenzsignal bei dieser Schaltung „locked“, also gewissermaßen miteinander verschlossen bleiben.

Im heutigen physikalischen Forschungs- und Lehrbetrieb wird dieses Verfahren in vielerlei Hinsicht eingesetzt. So findet es beispielsweise Anwendung in der Radioastrometrie, in der kernmagnetischen und auch Elektronenspin-Resonanzspektroskopie. Auch in der Chemie werden solche Apparaturen häufig verwendet.

Kommerzielle Geräte verschiedener Hersteller kosten dabei um die 2.000 € und werden sowohl in der klassischen Ausführung, als Analog-Lock-In-Geräte, als auch in der Variante mit digitaler Signalverarbeitung produziert. Mit guten Lock-In-Verstärkern ist dabei die Detektion von Analogsignalen in bis zu um 4 Größenordnungen größerem Rauschen möglich.

Ein Lock-In-Verstärker ist dabei im Allgemeinen wie folgt aufgebaut:

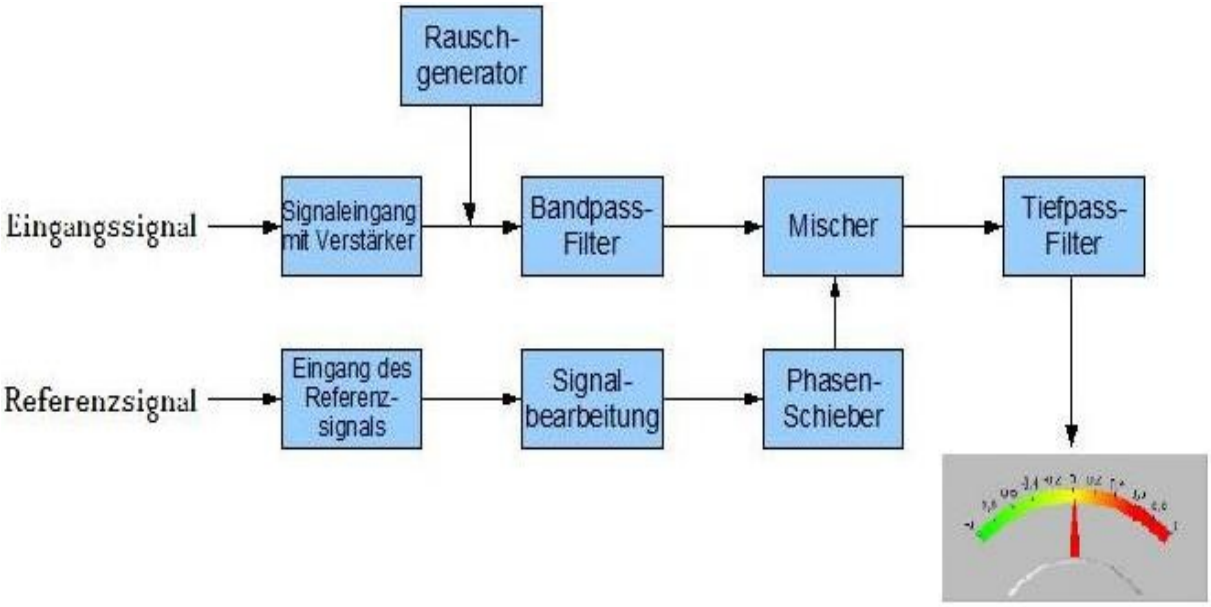

Abbildung 5: Blockdiagramm des Lock-In-Verstärkers

- am Signaleingang wird das zu messende **Nutzsignal** aufgenommen und evtl. verstärkt
- am zweiten Signaleingang wird das **Referenzsignal** aufgenommen und evtl. bearbeitet
- mit dem **Phasenschieber** kann die Phasenbeziehung zwischen Nutz- und Referenzsignal verändert werden:

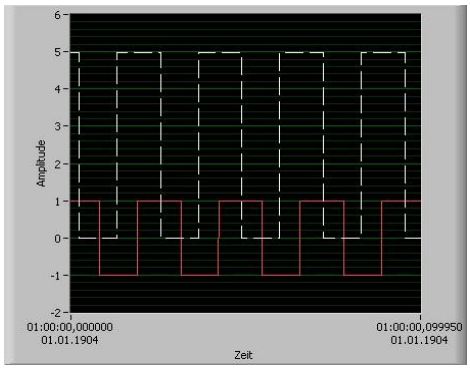

Abbildung 6: Referenzsignal (gestrichelt) sowie bearbeitetes und um 90° phasenverschobenes Referenzsignal (durchgezogen)

So können Referenz- und Nutzsignal beispielsweise in die gleiche Phase gebracht werden:

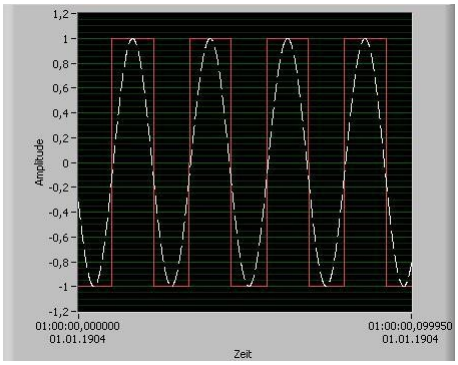

Abbildung 7: Nutzsignal (gestrichelt) und bearbeitetes Referenzsignal (durchgezogen)

- der **Multiplizierer bzw. Mischer** verknüpft Referenz- und Nutzsignal

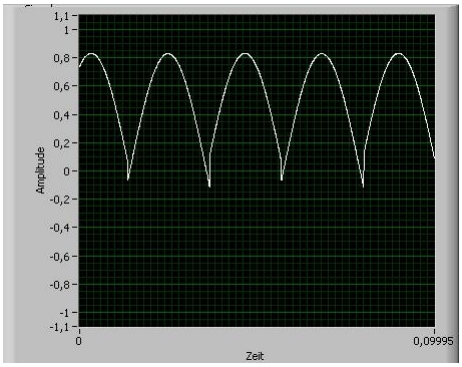

Abbildung 8: Signalverlauf nach Mischung

- mit einem **Tiefpassfilter** lässt sich die Signalstärke ermitteln

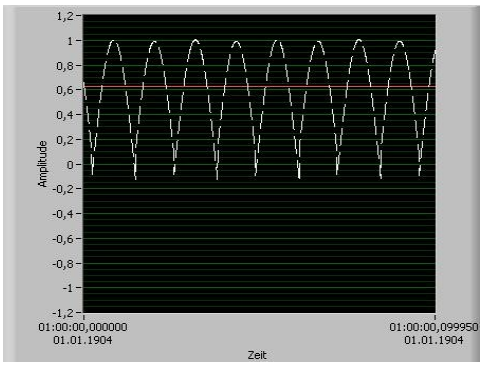

Abbildung 9: Signal nach dem Mischer (gestrichelt) Signal nach Tiefpassfilterung (durchgezogen)

- die Elemente **Rauschgenerator** und der **Bandpassfilter** sind dabei lediglich optionale Elemente und nicht zwingend erforderlich für das Prinzip des Lock-In-Verstärkers

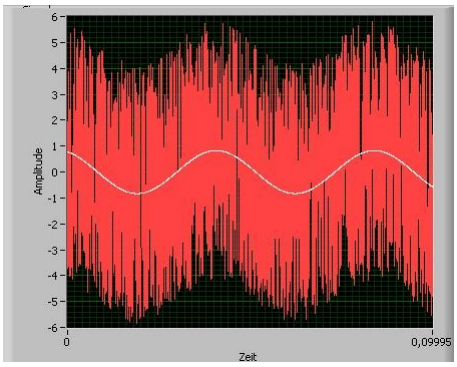

Abbildung 10: Nutzsignal (weiss) und verrauschtes Nutzsignal, mit 5V-Rausch-amplitude (grau)

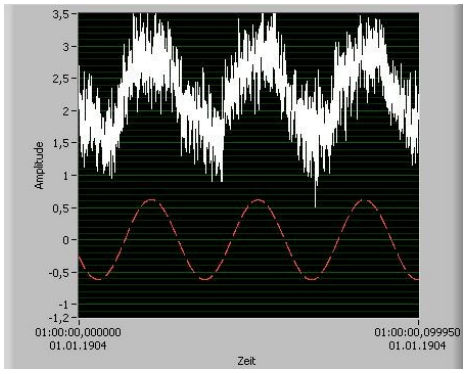

Abbildung 11: Verrauschtes Nutzsignal vor (durchgezogen) und nach Bandpassfilterung (gestrichelt)

3.4.1. Phasenempfindlicher Gleichrichter

Die Verknüpfung des oben erwähnten Multiplizierers bzw. Mischers mit der anschließende Tiefpassfilterung wirk häufig auch als „phasenempfindlicher Gleichrichter“ (PSD, aus dem Englischen für „Phase Sensitive Detector“) bezeichnet. Der PSD stellt das zentrale Element eines jeden Lock-In-Verstärkers dar. Er hat die Aufgabe, die Wechselstromkomponenten des Nutzsignals in eine Gleichstromkomponente zu überführen und schließlich eine Mittelung der Signalstärke über mehrere Perioden zu erzielen. Prinzipiell lässt sich die Schaltung gut im nachstehenden Diagramm verdeutlichen.

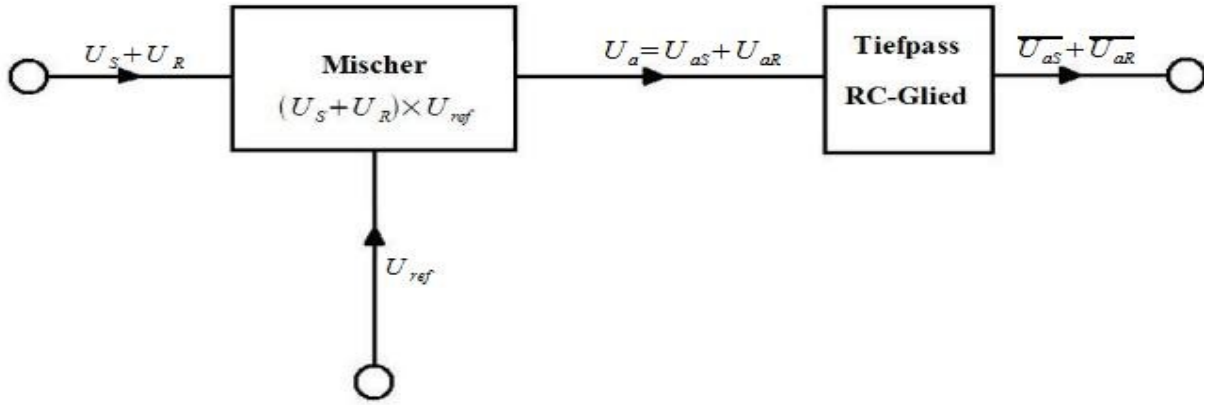

Abbildung 12: Blockdiagramm eines phasenempfindlichen Gleichrichters

Zum besseren Verständnis und zur Erklärung der Arbeitsweise dieser Schaltung, welche im Allgemeinen für beliebige periodische Signale einsetzbar ist, gehen wir zunächst von einem sinusförmigen Nutzsignal E, mit der Amplitude V sowie der Signalfrequenz *w* aus:

$$E(t)=V\cdot\sin(w\cdot t)$$

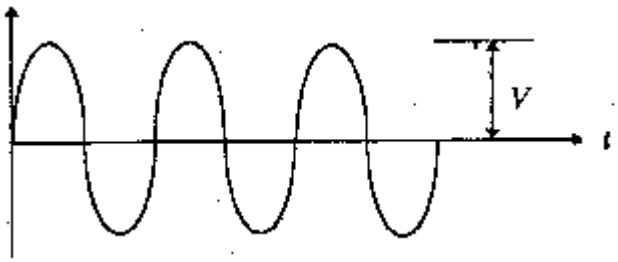

Abbildung 13: Sinusförmiges Ausgangssignal

Bei diesem Signal soll nun sowohl die Amplitude als auch die Phasenverschiebung zum Referenzsignal R, welches von der gleichen Frequenz wie das Nutzsignal ist, ermittelt

werden. Das Referenzsignal läuft dazu zunächst über eine Triggerstufe, welche ein Rechtecksignal generiert. In der Reihendarstellung dieses Rechtecksignals sind alle ungeraden Harmonischen der Grundfrequenz *w* enthalten.

$$R(t)=\frac{4}{\pi}\cdot[\sin(w\cdot t)+\frac{1}{3}\cdot\sin(3\cdot w\cdot t)+\frac{1}{5}\cdot\sin(5\cdot w\cdot t)+\ldots]=\frac{4}{\pi}\cdot\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{2\cdot n+1}\cdot\sin((2\cdot n+1)\cdot w\cdot t)$$

Wir gehen nun zunächst davon aus, dass die Phasenverschiebung zwischen Nutz- und Referenzsignal null ist, sie sich also in Phase befinden.

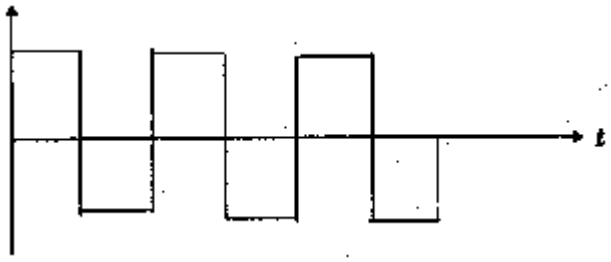

Abbildung 14: Rechteckiges Referenzsignal

Nun werden Referenz- und Nutzsignal miteinander multipliziert. Auf diese Weise fungiert das Referenzsignal als eine Art periodischer Invertierer, der in einer Halbperiode das Nutzsignal ungeändert lässt und es in der anderen invertiert. Mathematisch erhält man durch die Multiplikation der beiden Signale folgende Fourier-Reihe, die letztendlich nur noch die geraden Harmonischen der Grundfrequenz *w* erhält.

$$A(t)=E(t)\cdot R(t)=V\cdot\sin(w\cdot t)\cdot\frac{4}{\pi}\cdot\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{2\cdot n+1}\cdot\sin((2\cdot n+1)\cdot w\cdot t)$$

$$=\frac{4}{\pi}\cdot V\cdot\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{2\cdot n+1}\cdot\sin(w\cdot t)\cdot\sin((2\cdot n+1)\cdot w\cdot t)$$

$$=\frac{4}{\pi}\cdot V\cdot\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{2\cdot n+1}\cdot\frac{1}{2\cdot i}(\mathrm{e}^{i\cdot w\cdot t}-\mathrm{e}^{-i\cdot w\cdot t})\cdot\frac{1}{2\cdot i}\cdot(\mathrm{e}^{i\cdot(2\cdot n+1)\cdot w\cdot t}-\mathrm{e}^{-i\cdot(2\cdot n+1)\cdot w\cdot t})$$

$$=\frac{4}{\pi}\cdot V\cdot\sum_{n=0}^{\infty}\frac{-1}{8\cdot n+4}\cdot(\mathrm{e}^{i\cdot(2\cdot n+2)\cdot w\cdot t}-\mathrm{e}^{-i\cdot 2\cdot n\cdot w\cdot t}-\mathrm{e}^{i\cdot 2\cdot n\cdot w\cdot t}+\mathrm{e}^{-i\cdot(2\cdot n+2)\cdot w\cdot t})$$

$$=\frac{4}{\pi}\cdot V\cdot\sum_{n=0}^{\infty}\frac{-1}{8\cdot n+4}\cdot(2\cdot\cos((2\cdot n+2)\cdot w\cdot t)-2\cdot\cos(2\cdot n\cdot w\cdot t))$$

$$=\frac{2}{\pi}\cdot V\cdot[1-\sum_{n=1}^{\infty}\frac{2}{4\cdot n^2-1}\cdot\cos(2\cdot n\cdot w\cdot t)]$$

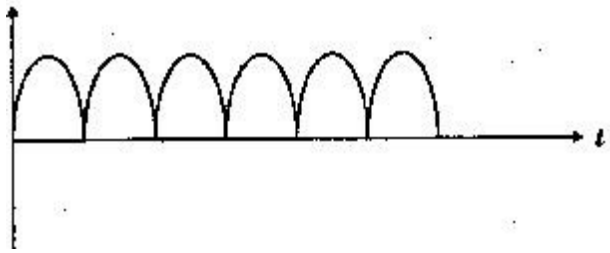

Abbildung 15: Signalverlauf nach Mischen von Ausgangssignal und Referenzsignal

Sind Nutzsignal und Referenzsignal in Phase, so lässt sich mittels des RC-Gliedes, also durch einen Tiefpassfilter mit großer Zeitkonstante, die Amplitude des Nutzsignals ermitteln. Der Tiefpassfilter unterdrückt dabei die Harmonischen des Signals A, so dass man schließlich als Ausgangssignal ein zur Amplitude des Eingangssignals proportionales Signal erhält:

$$V_{out} = \frac{2}{\pi} \cdot V \tag{4}$$

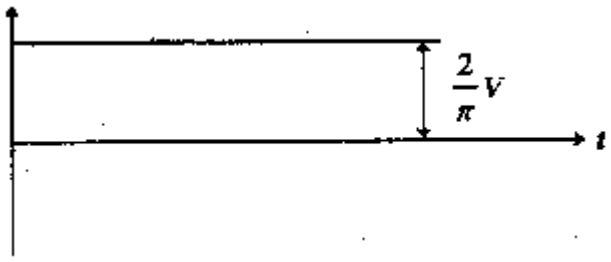

Abbildung 16: Signal nach Tiefpassfilterung

Das Maximum des Ausgangssignals erhält man jedoch nur bei 0° Phasenverschiebung zwischen den beiden Signalen. Im Fall, dass dies jedoch nicht erfüllt ist, kann man sich leicht überlegen, dass die Stärke des Ausgangssignals über die Cosinus-Funktion mit der Phasenverschiebung verknüpft ist. Wir setzen also an:

$$V_{out} = \frac{2}{\pi} \cdot V \cdot \cos(\Phi_V) \tag{5}$$

Signale, die jedoch nicht die gleiche Frequenz wie das Referenzsignal haben werden durch die Multiplikation mit dem Referenzsignal in positive und negative Signalanteile überführt, welche auf Grund der anschließenden Integration über den Tiefpassfilter zu null gemittelt

werden. Auch ein möglicher Offset des Nutzsignals wird auf diese Weise eleminiert.

Bei nicht periodischen Signalen wird das eigentliche Nutzsignal moduliert und somit in ein periodisches Signal überführt, damit man das Signal vom Rauschen unterscheiden kann. Dabei ist darauf zu achten, dass die spätere Modulierungsfrequenz, nicht mit der Frequenz eines Interferenzsignals zusammenfällt, also zum Beispiel nicht im Bereich des Netzbrummens (50 Hz) liegt . Außerdem sollte die Messung nach Möglichkeit außerhalb des (1/f)-Rauschens liegen. Es sollte also eine Frequenz von über 2kHz, was bei vielen Versuchsanordnungen jedoch schwierig ist, gewählt werden.

4. Programmierung

4.1. LabVIEW

LabVIEW ist eine graphische Programmierumgebung der Firma *National Instruments*. Es ist sehr intuitiv nach dem Drag-and-Drop-Verfahren zu bedienen. Dazu werden die einzelnen Elemente einfach per Mausklick über „Kabel“ verbunden. Somit muss man nicht zunächst eine komplizierte Programmiersprache erlernen, da durch das Verbinden der Bauelemente (Stoppuhr, Zufallsgenerator, mathematische Operatoren usw.) beliebig komplexe Programme erstellt werden können.

Mit Hilfe einer DAQmx-Treiberschnittstelle und eines entsprechenden Interfaces, in unserem Fall die PCI-6221-Karte der M-Serie, ebenfalls von der Firma *National Instruments*, können elektronische Signalverläufe aufgenommen oder simulierte und bearbeitete Signale ausgegeben werden. Auf diese Weise können über LabVIEW auch komplizierte Experimente gesteuert und ausgewertet werden.

4.2. Programm

Der Lock-In-Verstärker wurde im Hinblick auf den Einsatz als F-Praktikums-Versuch an der Ruhr-Universität Bochum mit LabVIEW programmiert. Aus diesem Grund, um das Programm aus pädagogischer und didaktischer Sicht möglichst sinnvoll anzulegen, wurde keiner der grundlegenden Prozesse automatisiert. Alle Einstellungen, von der Verstärkung des Nutzsignals über die Einstellung des Bandpass-Filterbereichs bis zur Auswahl der Zeitkonstanten des Tiefpasses, sind eigenständig zu verrichten.

4.2.1. Programm-Oberfläche

Im Prinzip sind auf der Programm-Oberfläche alle bereits im theoretischen Teil des Lock-In-Verstärkers erklärten Bestandteile zu erkennen (siehe Abbildung 17).

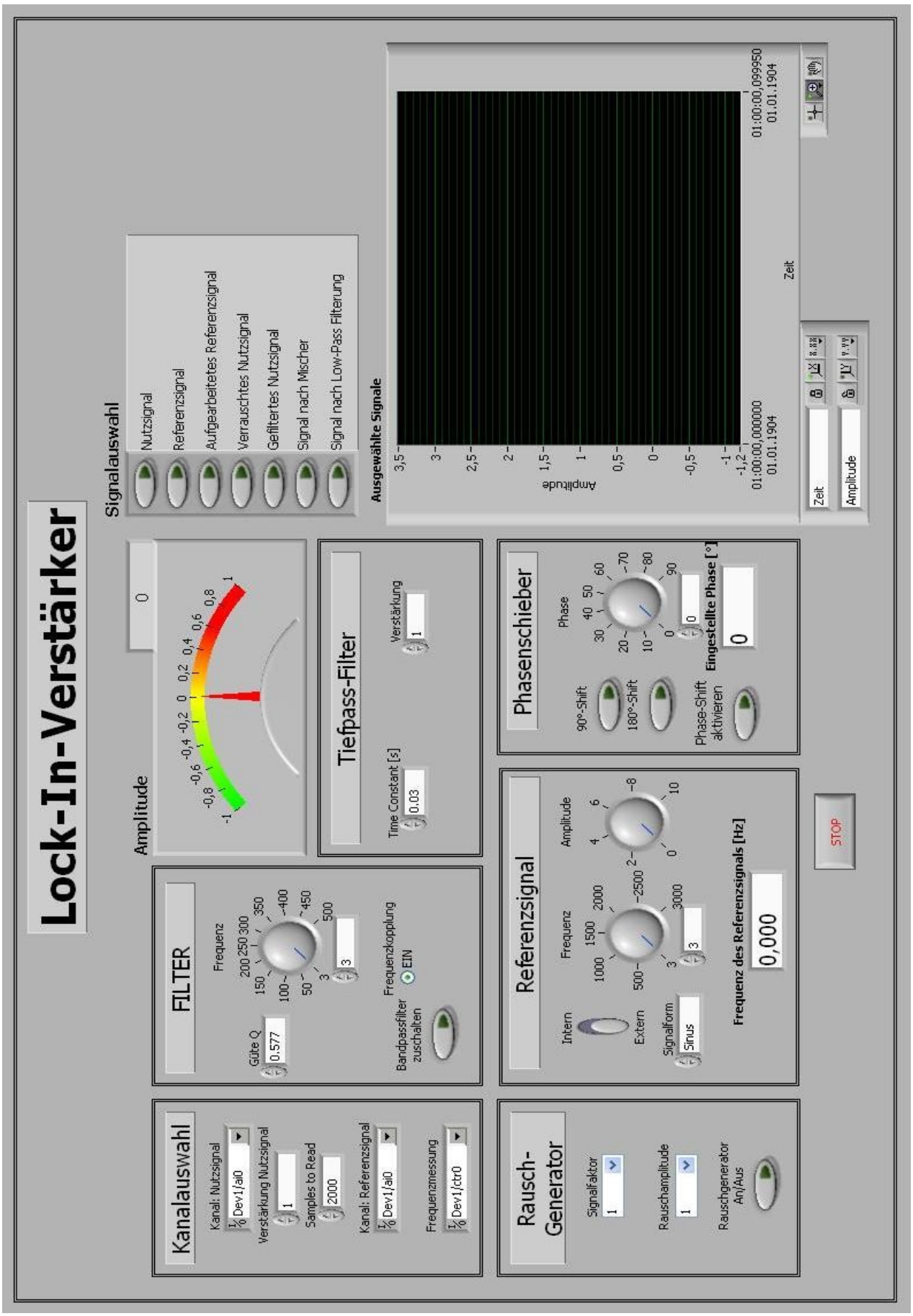

Abbildung 17: Benutzeroberfläche des mit LabVIEW erstellten Lock-in-Verstärkers

Kanalauswahl: In diesem Teil des Frontpanels[3] können die verschiedenen externen Signale den entsprechenden Anschlüssen auf dem Interface und damit den jeweiligen internen Kanälen zugeordnet werden. Auch die Verstärkung des Nutzsignals kann hier eingestellt werden.

Des Weiteren ist zu beachten, dass für die Messung der Signalfrequenz die entsprechenden internen Kanäle „ctr1“ und „ctr2“ auf dem Interface auf den Eingängen PFI9 bzw. PFI12 liegen. Um diese zu verwenden, kann man einfach mit einem kleinen Kabel die Anschlüsse überbrücken und sie so auf die BNC-Eingänge USER1 und USER2 legen.

Mit der Einstellung „Samples to Read“ lässt sich beeinflussen, wie viele Messwerte die Messkarte in einem Durchgang aufnimmt und verarbeitet. Insgesamt werden jede Sekunde 20000 Werte detektiert. Stellt man die Anzahl der „Samples to Read“ also auf beispielsweise 2000, so werden alle 0,1 Sekunden 2000 neue Werte aufgenommen und zusammen an das Programm übergeben. Diese Einstellung ist besonders für die Genauigkeit der späteren Phasenverschiebung wichtig.

Rausch-Generator: Mit dem Rauschgenerator lässt sich auf Wunsch zum Nutzsignal ein computer-generiertes Rauschen hinzufügen. Dabei lassen sich sowohl die Rauschamplitude als auch der Faktor, mit dem das eigentliche Nutzsignal in das neu erzeugte Signal eingehen soll, einstellen.

Filter: Es handelt sich hierbei um einen Bandpass-Filter, mit dem das Nutzsignal, welchem evtl. zusätzliches Rauschen hinzugefügt wurde, teilweise „bereinigt“ wird. Er lässt sich durch den Schalter „Bandpassfilter zuschalten“ ein- oder ausschalten.

Über einen Drehschalter kann man dabei die Mittelfrequenz des Bandpasses einstellen, bei welcher der Filter arbeiten soll. Durch den Gütefaktor Q lässt sich dabei die Bandbreite bestimmen, in welcher der Filter durchlässig sein soll. Der Faktor Q hängt dabei wie folgt mit der Bandbreite B zusammen:

$$Q=\frac{f_0}{B} \quad \text{mit} \quad B=f_2-f_1$$

3 Benutzeroberfläche

Je geringer also der Gütefaktor Q ist, desto größer ist die Bandbreite des Filters und desto mehr ungewollte Frequenzen können durch diesen gelangen.

Referenzsignal: Mit diesem Funktionselement ist es möglich zu wählen, ob das Referenzsignal intern erstellt werden soll, oder ob das über das Interface eingespeiste Signal verwendet wird.
Wird dabei die interne Referenzsignalerstellung gewählt, so kann man des Weiteren zwischen verschiedenen Signalformen (Sinus- oder Rechteckschwingung) wählen. Auch erlaubt diese Untereinheit des Frontpanels, die Amplitude sowie die Frequenz des erzeugten Referenzsignals einzustellen.
Ist jedoch der Betrieb mit dem externen Referenzsignal gewählt, so haben die Einstellungen Signalform, Frequenz und Amplitude keine Bedeutung. Jedoch kann unter der Anzeige „Frequenz des Referenzsignals [Hz]“ die momentane Frequenz abgelesen werden. Das Referenzsignal liegt in diesem Fall als normiertes Rechtecksignal vor.

Phasenschieber: Diese Einheit kann bei Bedarf zugeschaltet werden, um die Phase des Referenzsignals an die des Nutzsignals anzupassen. Dabei ist mit dem Drehregler „Phase“ eine kontinuierliche Phasenänderung zwischen 0°-90° möglich, während mit den beiden Schaltern „90°-Shift“ und „180°-Shift“ die jeweilige Phasenverschiebung ein- bzw. ausgeschaltet werden kann. Insgesamt lässt sich die Phase bei Bedarf also um volle 360° ändern.

Tiefpass-Filter: Der Tiefpassfilter wird hier zur Ermittelung der Signalstärke nach dem Mischer verwendet. Mit ihm lässt sich so die Amplitude des Eingangssignals ermitteln. Ein proportionales Signal wird dabei auf dem simulierten Drehspuleninstrument „Low-Pass Filter Output“ angezeigt. Die eigentliche Signalamplitude kann man, wie schon im voraus erklärt, aus diesem Signal ermitteln.
Mit der Einstellung „Time Constant [s]“ lässt sich dabei die Zeitkonstante des Tiefpasses bestimmen und somit auch der Zeitraum, über den die Werte gemittelt werden sollen. Jedoch benötigt dieser bei größeren Zeitkonstanten auch länger, um das Gleichgewicht zu erreichen.

Man muss daher immer einen Kompromiss zwischen Genauigkeit und benötigter Zeit eingehen.
Über die einstellbare „Verstärkung“ lässt sich hierbei noch einmal die Signalstärke variieren.

Signalauswahl: Mit Hilfe dieser Einstellungen lässt sich auswählen welche Signalverläufe im darunterstehenden Diagramm angezeigt werden sollen. Dabei lässt sich einfach per Schalterstellung auswählen, ob nur einer oder mehrere Graphen dargestellt werden sollen.

4. Realisierung des „Lock-In-Verstärkers“

Der Aufbau des Programms stellt sich im Blockdiagramm wie folgt dar:

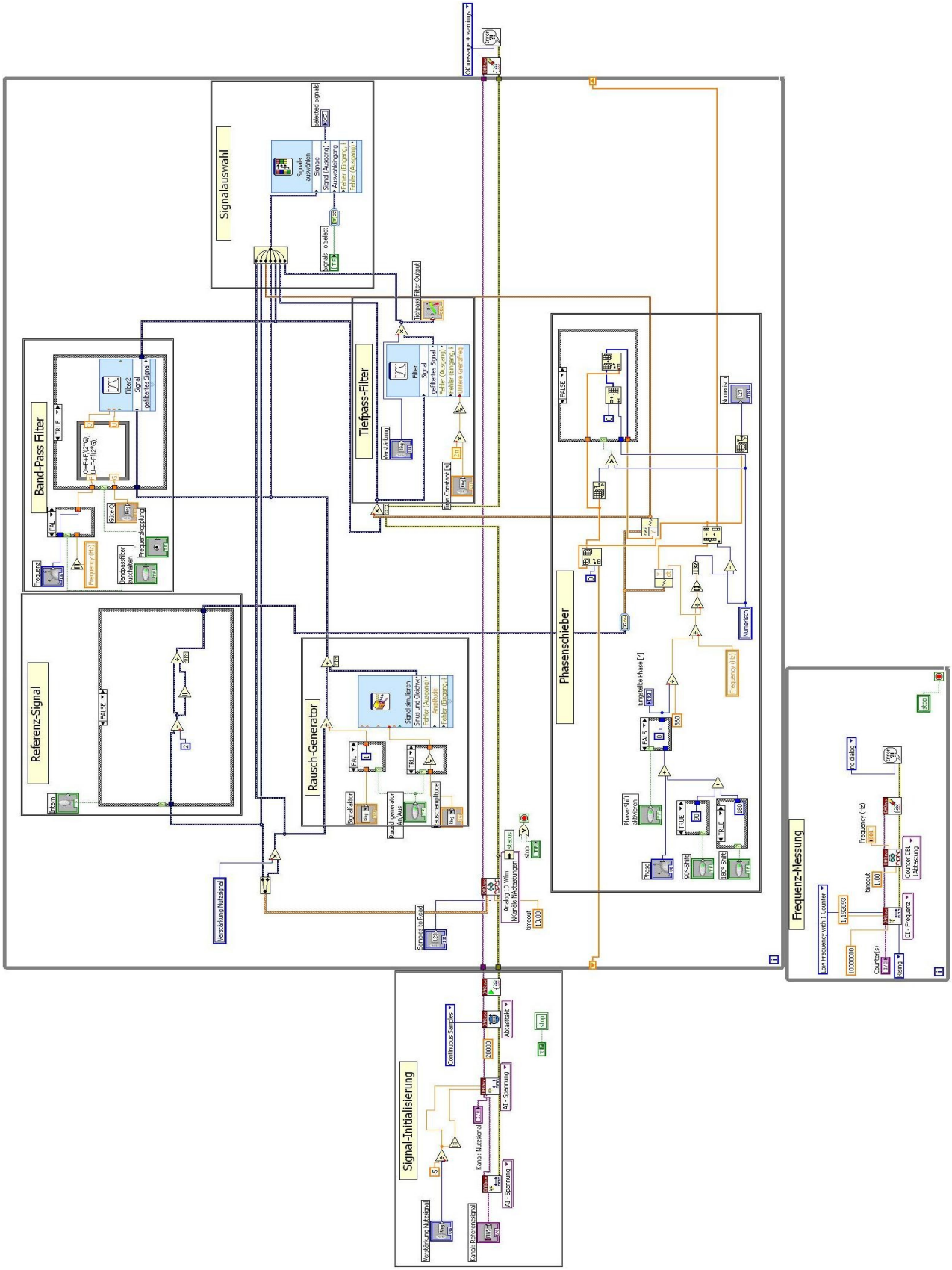

Abbildung 18: Blockdiagramm des Lock-In-Verstärkers

Signal-Initialisierung: Zunächst werden mittels DAQmx-Tools die beiden Kanäle für Referenz- und Nutzsignal erstellt. Anschließend kann diesen auf der Benutzeroberfläche der entsprechende Eingang auf dem *National Instruments*-Interface zugewiesen werden.

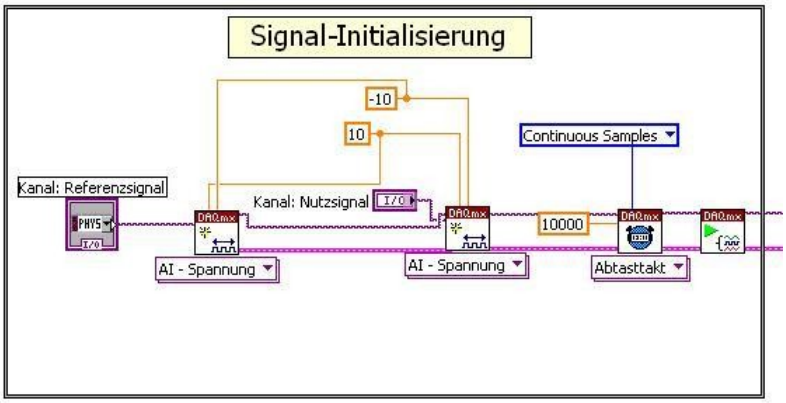

Abbildung 19: Blockdiagramm der Signal-Initialisierung

Das **Referenzsignal** lässt sich entweder intern erstellen, oder man kann das von außen in das System eingegebene Signal verwenden. Bei letzterem wird das Signal durch einfache Rechenoperationen normiert, so dass es die Werte 1 und -1 annimmt.

Wählt man den internen Betrieb, so lassen sich über diverse Einstellungen Phase, Amplitude und Signalform einstellen. Bei der Einstellung der Signalform wird dabei bestimmt, ob der Wert gleich Null ist. Ist dies der Fall, so ist die Bool'sche Variable TRUE und durch die Case-Struktur wird das zu simulierende Sinussignal ausgewählt. Andernfalls wird ein Rechtecksignal generiert.

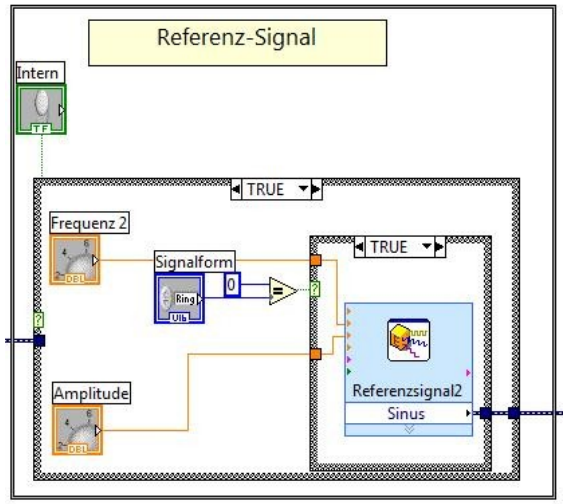

Abbildung 20: Blockdiagramm des Programmteils „Referenz-Signal“

Der **Phasenschieber**, welcher das Referenzsignal verschiebt, wurde mittels eines Schieberegisters realisiert. Mit Hilfe eines solchen Registers ist es möglich bestimmte Messwerte von einem Programmdurchlauf in den nächsten zu übertragen. Prinzipiell stellt dieser Phasenverschieber lediglich einen Verzögerungsterm dar, der zunächst aus der eingestellten Phase und der Frequenz des Referenzsignals die Zeit berechnet, um welche das Signal verschoben werden muss.

Da das Programm pro Durchgang immer eine bestimmte Anzahl an Messwerten aufnimmt, (dieser Wert wird unter „Samples to Read“ im Frontpanel-Element „Kanalauswahl“ eingestellt) kann man berechnen wie viele Werte an den nächsten Programmdurchlauf übertragen werden müssen. Diese Werte werden nun zuerst bearbeitet, während die zuletzt in diesem Durchgang aufgenommenen Werte wieder an den nächsten Durchlauf übergeben werden.

Somit erreicht man eine Verzögerung der Ausgabe der jeweiligen Messwerte, welche der eingestellten Phasenverschiebung entspricht.

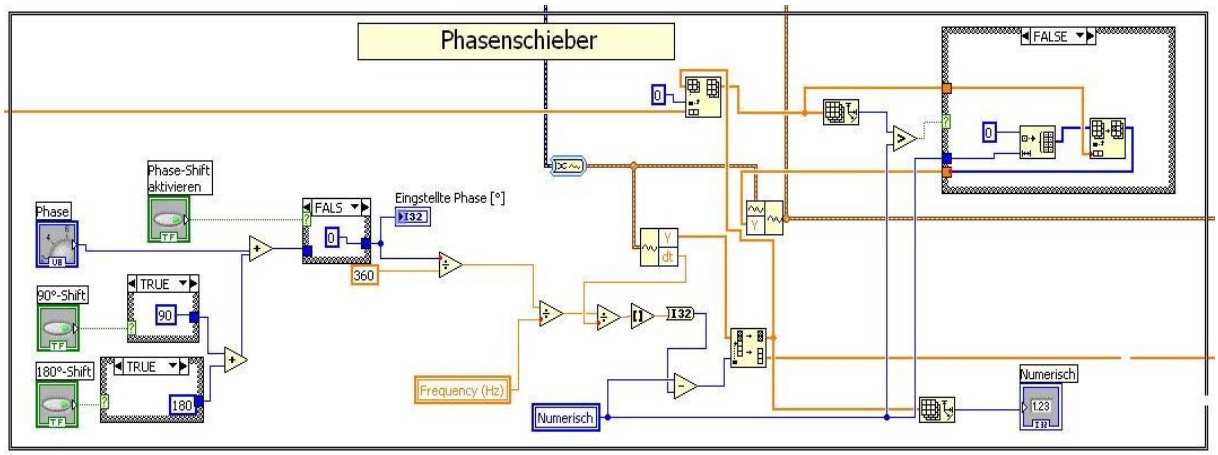

Abbildung 21: Blockdiagramm des Phasenschiebers

Der **Rausch-Generator** generiert nach Wunsch ein Rauschsignal, welches zum Nutzsignal hinzu addiert wird. Die „Rauschamplitude“ wird dabei direkt durch das LabVIEW-Unterprogramm „Signal simulieren“ abgefragt. Mit der Einstellung des Signalfaktors kann man dabei des Weiteren bestimmen, zu welchem Teil das eigentliche Nutzsignal in das neu entstehende Signal eingehen soll.

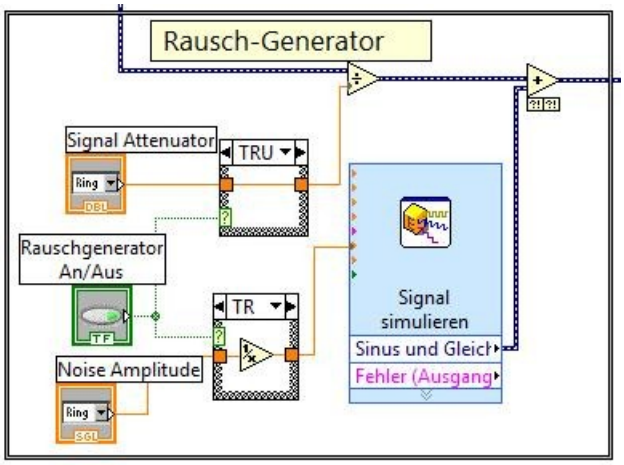

Abbildung 22: Blockdiagramm des Rausch-Generators

Beim **Band-Pass-Filter** wurde die ein/aus-Schaltung ebenfalls mit Hilfe einer Case-Struktur erreicht, welche im ausgeschalteten Zustand das ankommende Signal unverändert lässt. Im eingeschalteten Zustand jedoch wird das Signal gefiltert. Sowohl die obere als auch die untere Grenzfrequenz, welche vom Filter als Einstellungen benötigt werden, werden dazu aus der gegebenen Frequenz sowie dem Gütefaktor Q mittels eines Formelknotens berechnet.

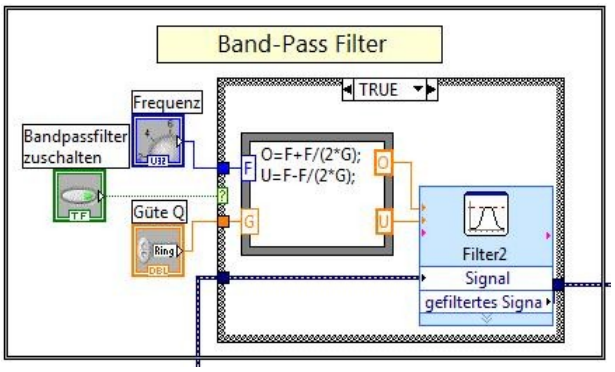

Abbildung 23: Blockdiagramm-Ansicht des Filters

Zur **Frequenz-Messung** in LabVIEW wird zunächst mittels DAQmx-Bausteinen ein entsprechender Kanal erstellt, in den das Signal eingelesen werden soll. Das Programm zählt dabei, so wie es hier eingestellt ist, die ansteigenden Flanken des Messsignals und ermittelt so die Frequenz. Die maximale Frequenz ist dabei auf etwa ein Megahertz begrenzt, während die minimale noch messbare Frequenz etwas mehr als 1 Hertz beträgt. Diese Werte kommen aus technischen Gründen zustande, die mit der LabVIEW-Programmierung zusammenhängen.

Nachdem der Kanal erstellt ist, bestimmt ein Zähler alle 10ms die momentane Frequenz und gibt sie auf der Benutzeroberfläche unter der Anzeige „Frequenz des Referenzsignals [Hz]“ aus. Anschließend wird der Wert gelöscht und der nächste detektiert.

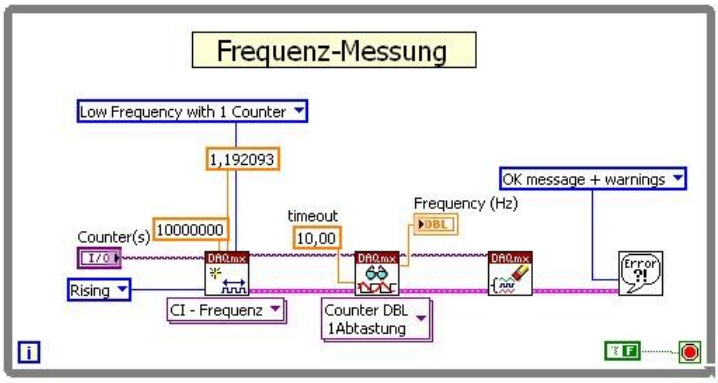

Abbildung 24: Frequenzbestimmung mit LabVIEW

5. Der Versuch

Ziel dieses Versuches ist es, den Studierenden einen Einblick in die Funktionsweise eines Lock-In-Verstärkers zu vermitteln. Sie sollen dabei die grundlegenden Sachverhalte eines solchen Gerätes untersuchen und so ein besseres Verständnis für diese Methode der Signal-zu-Rausch-Verbesserung erhalten.

5.1. Der Versuchsaufbau

In diesem Versuch werden, neben dem bereits oben erwähnten, in LabVIEW programmierten, Lock-In-Verstärker-Programm folgende weiter Elemente verwendet:

- ein Computer auf dem das Programm ausgeführt werden kann
- eine Messkarte mit Interface zur Aufnahme der Signale mit dem PC
- ein Funktionsgenerator zur Simulation von Signalen
- eine Glühlampe mit Lichtchopper[4]
- eine Lichtschranke zur Bestimmung der Frequenz des Lichtchoppers
- ein Hohlspiegel zum Fokusieren der Lichtstrahlen
- ein Photodetektor

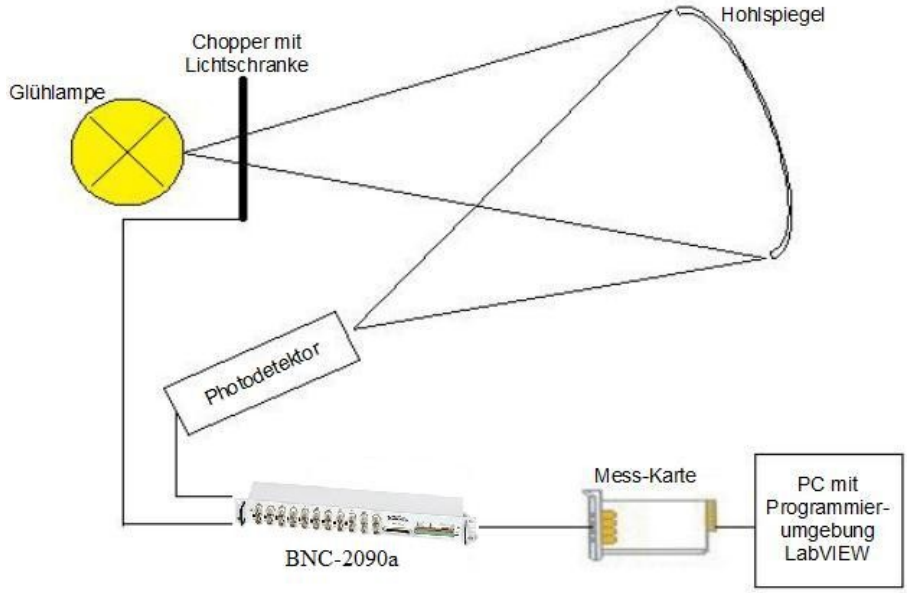

Abbildung 25: Darstellung des Messaufbaus zum Betrieb des Lock-In-Verstärkers mit Glühlampe und Photodetektor

4 Chopper: Zerhacker

Beim Aufbau der Versuchsapparatur ist darauf zu achten, dass die entsprechenden Anschlüsse der Versuchselemente den richtigen Kanälen des Programmes zugeordnet sind und dass beim Betrieb der Schaltung mit der Glühlampe und dem Photodetektor, diese richtig justiert ist, das heißt, dass der Hohlspiegel das Licht möglichst gut auf dem Detektor zentriert und die Lichtschranke so steht, dass sich das Chopperrad problemlos in dieser drehen kann.

5.2. Messungen mit dem Lock-In-Verstärker

Zur Bestätigung der, schon in dem Kapitel „Der phasenempfindliche Gleichrichter“ unter Gleichung (5) erwähntnen Beziehung zwischen dem Ausgangssignal des Tiefpassfilters sowie der Phasenbeziehung zwischen Nutz- und Referenzsignal, wurde der Lock-In-Verstärker mit einem Funtionsgenerator betrieben. Als Nutzsignal wurde hierzu das sinusförmige Ausgangssignal des Generators verwendet. Die Amplitude war dabei auf 2,145 Volt und die Frequenz auf 24 Hz eingestellt. Als Referenzsignal diente das ebenfalls vom Generator erzeugte Rechtecksignal gleicher Frequenz.

Beobachtet man nun das Ausgangssignal bei verschiedenen Phasen, so erkennt man gut die Beziehung:

$$V_{out} = \frac{2}{\pi} \cdot V_S \cdot \cos(\phi_S + \phi_V)$$

Diese Beziehung lässt sich, wie schon in der Herleitung zur Gleichung (4), der Ausgangsspannung des „phasenempfindlichen Gleichrichters“, relativ einfach herleiten. Jedoch tritt in diesem Fall in der Fourier-Reihe der Rechteckfunktion noch die Gesamtphase auf:

$$R(t, \phi) = \frac{4}{\pi} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2 \cdot n + 1} \cdot \sin((2 \cdot n + 1) \cdot (w \cdot t + \phi))$$

So bleibt schließlich nach der Multiplikation als einziger nicht zeitabhängiger Term cos(Φ) in der Summe übrig.

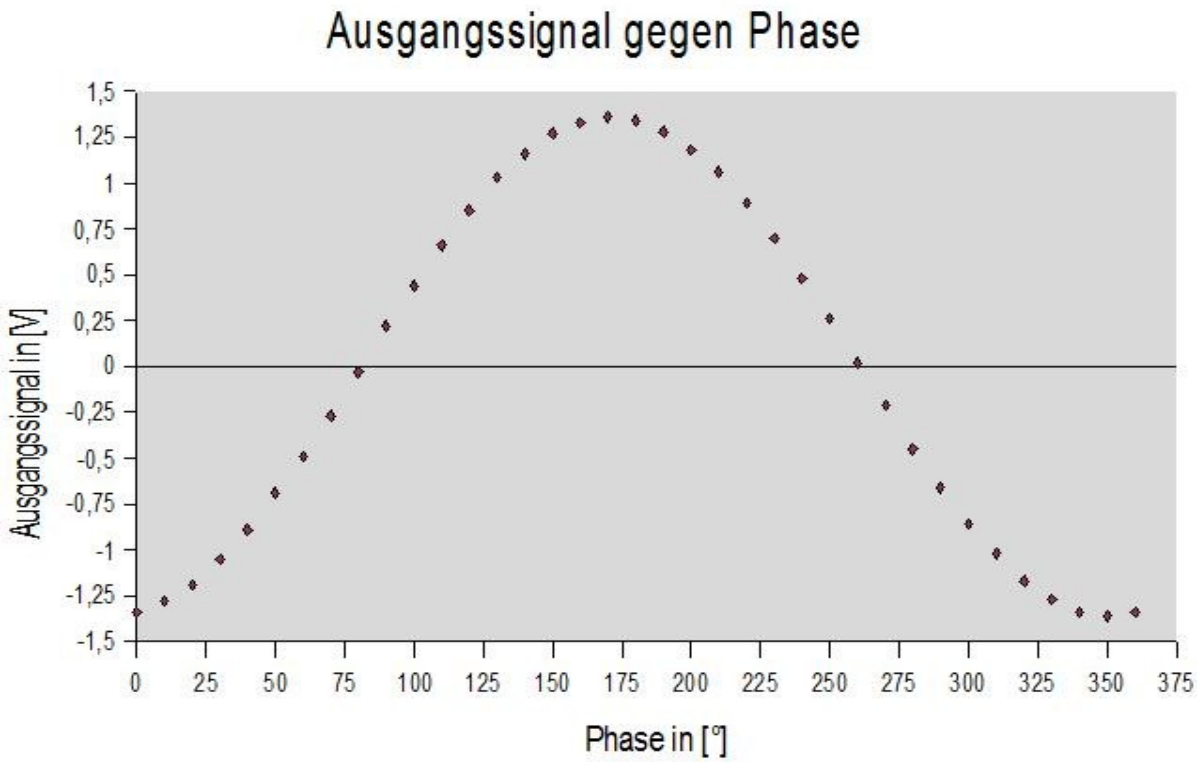

Abbildung 26: Verlauf des Ausgangssignals (sinusförmiges Nutzsignal; Amplitude 2,145V; Frequenz 24Hz) bei veränderter Phase.

Formt man die obige Gleichung wie folgt um, so kann man aus den gemessenen Werten über Mittelung der Einzelwerte die genaue Amplitude des Nutzsignals ermitteln:

$$\frac{(\pi \cdot V_{out})}{(2 \cdot \cos(\phi_S + \phi_V))} = V_S$$

(mit: V_{out}= Ausgangssignal des Verstärkers, V_S= Signalamplitude, Φ_S=Verschiebung des Referenzsignals zum Nutzsignal, Φ_V= eingestellte Phasenverschiebung)

In unserem Fall ergibt sich so eine gemessene Signalamplitude von 2,1432 Volt mit einer Standardabweichung von 0,0124, also etwa 0,6%, was im Wesentlichen mit dem eingespeisten Signal übereinstimmt. Jedoch wurde zu diesem Zweck die Phasenverschiebung zwischen den Signalen am Graphen abgelesen und auf 171° bestimmt.

Ein ähnlicher Wert ergibt sich auch durch die direkte Messung. Beobachtet man den Signalverlauf in der Nähe des Maximums, so ergeben sich lediglich leichte Änderungen.

Eingestellte Phase [°]	170	171	172	173	174
Ausgangssignal [V]	1,359	1,360	1,360	1,359	1,357

Tabelle 1: Ausgangssignal im Bereich des Maximums

Man erkennt, dass das Maximum zwischen 171° und 172° liegen muss und das gemessene Signal 2,136 Volt entspricht. Da jedoch eine genauere Phasenuntersuchung auf Grund der technischen Gegebenheiten des Lock-In-Verstärkers nicht möglich ist, kann man untersuchen, wie das Verhalten des Graphen im um 90° verschobenen Bereich ist. Hier muss, wegen der Verknüpfung über die Cosinus-Funktion, der Nulldurchgang des Graphen liegen.

Eingestellte Phase [°]	81	82
Ausgangssignal [V]	-0,008	0,032

Tabelle 2: Ausgangssignal in der Nähe des Nulldurchgangs

Da der Verlauf im Bereich des Nulldurchganges naheszu linear ist, weil der Cosinus für kleine Winkel sich durch sein Argument ersetzten lässt, kann man die Phase beim Nulldurchgang interpolieren. Es ergibt sich eine Phase von 81,2° beim Nulldurchgang des Graphen und somit eine Phasenverschiebung von 171,2° zwischen Nutz- und Referenzsignal.

Anfertigung und Auswertung eines Bode-Diagramms des Lock-In-Verstärkers

Nachdem mit dem Lock-In-Verstärker das Maximum des Ausgangssignals bestimmt wurde, wobei bei konstanter Frequenz die Phase zwischen Nutz- und Referenzsignal abgeglichen wurde, kann man einen Bode-Plot des Systems erstellen. Dazu wird die Amplitude des Ausgangssignals bei verschiedenen Frequenzen ermittelt und anschließend werden die beiden Größen gegeneinander aufgetragen.

In diesem Fall wurde die Phasenverschiebung zu 126 Grad ermittelt. Anschließend wurde über den Bereich von etwa 30 bis 300 Hertz an mehreren Punkten die Ausgangsamplitude bestimmt, sodass man schließlich folgenden Kurvenverlauf erhält:

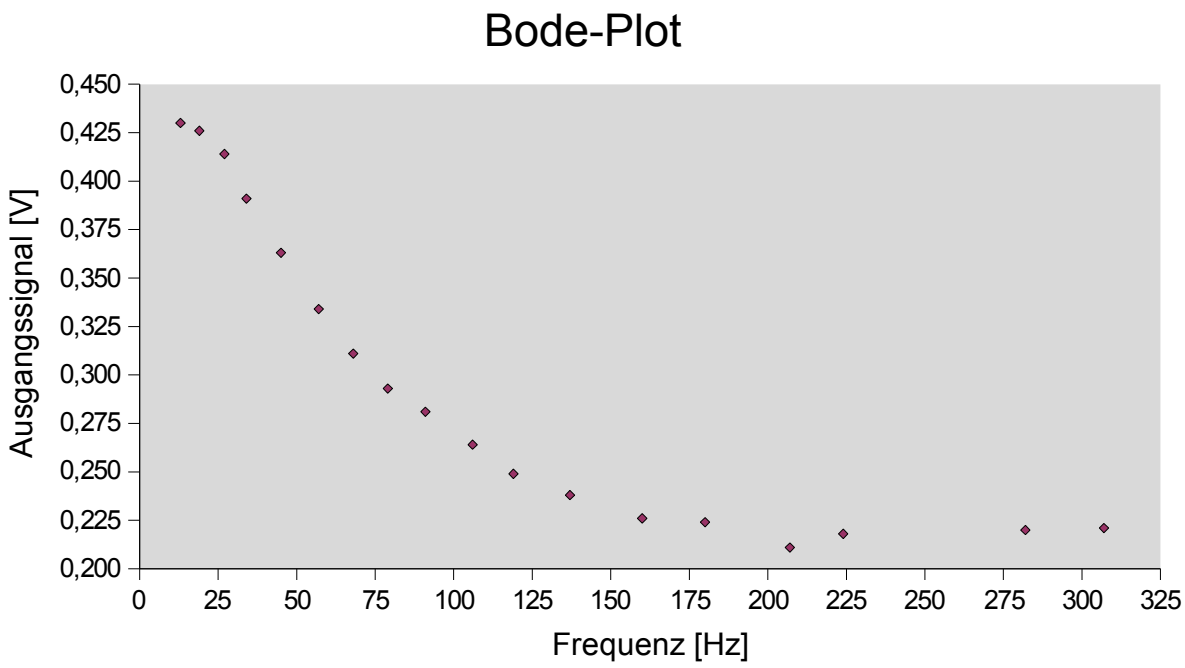

Abbildung 27: Frequenz gegen Ausgangssignal (Photodetektor mit Lock-In-Verstärker bei einer Verstärkung des Eingangssignals von 500).

Man erkennt, dass das System aus Lock-In-Verstärker und Photodetektor im niedrigen Frequenzbereich relativ gut durchlässig für das Signal ist, während die Dämpfung mit steigender Frequenz stetig zunimmt. Jedoch flacht die Kurve immer mehr ab und bleibt ab zirka 200 Hz auf konstantem Niveau.

Insgesamt bleibt festzustellen, dass die Verstärkung der Schaltung am besten bei sehr niedrigen Frequenzen ist. Es bleibt jedoch zu untersuchen, ob dieses Verhalten direkt vom

Lock-In-Verstärker abhängt oder es an der Reaktionszeit des Photodetektors liegt.

Zu diesem Zweck wurde ebenfalls ein Bode-Plot vom Betrieb des Lock-In-Verstärkers mit einem Funktionsgenerator erstellt:

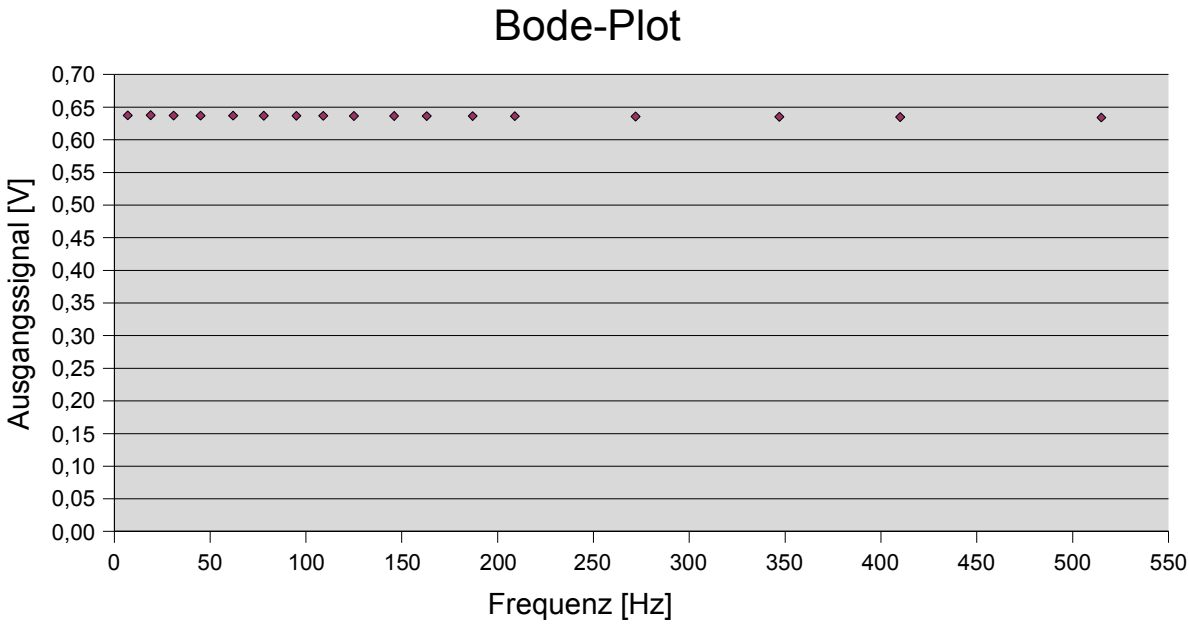

Abbildung 28: Bode-Diagramm des Signalverlaufs beim Betrieb mit dem Funktionsgenerator

Es ist zu erkennen, dass der Lock-In-Verstärker nahezu frequenzunabhängig arbeitet. Dies weist darauf hin, dass der obere Verlauf unter Abbildung 27 also durch die Reaktionszeit des Photodetektors verursacht wird.

Ermittelung der Signal-zu-Rausch-Verbesserung

Beobachtet man das Ausgangssignal des Lock-In-Verstärkers bei verschiedenen Einstellungen des computergenerierten Rauschens, so zeigt sich, dass sich vor allem bei große Rauschamplituden nicht unbedingt ein exakter Wert einstellt, sondern der Wert in einem gewissen Bereich schwankt. Der Lock-In-Verstärker kann das Signal-zu-Rausch-Verhältnis also nicht beliebig weit verbessern, sondern es nur in einem gewissen Rahmen beeinflussen.

Um zu ermitteln, in welchem Maß der in LabVIEW programmierte Verstärker das Signal-zu-Rausch-Verhältnis optimieren kann, betreibt man die Apparatur mit einem Generator, der ein kontinuierliches Sinus-Signal erzeugt. Dieses Signal lässt man nun durch das, von dem Programm simulierten Rauschsignal überlagern und beobachtet jeweils das Signal-zu-Rausch-Verhältnis vor und nach der Bearbeitung.

Dabei ist die Angabe des SNR[5] in Dezibel [dB] zweckmäßig, was sich wie folgt berechnen lässt:

$$SNR_{dB} = 10 \cdot \log\left(\frac{S}{N}\right)$$

Rausch-amplitude [V]	Ausgangs-signal (maximum)	Ausgangs-signal (minimum)	Ausgangs-signal (mittel)	Ausgangs-signal (Fehler)	SRN (vorher)	SRN (vorher) [dB]	SRN (nachher)	SRN (nachher) [dB]	Signal-zu-Rausch-Verbesserung [dB]
1	0,641	0,637	0,639	0,002	1,00	0,0	399,37	26,01	26,01
5	0,647	0,616	0,632	0,016	0,20	-7,0	40,74	16,1	23,09
10	0,641	0,597	0,619	0,022	0,10	-10,0	28,14	14,49	24,49
50	0,695	0,583	0,639	0,056	0,02	-17,0	11,41	10,57	27,56
100	0,765	0,504	0,635	0,131	0,01	-20,0	4,86	6,87	26,87

Tabelle 3: Veränderung des Signal-zu-Rausch-Verhältnises bei verschiedenen Rauschamplituden bei einer Signalamplitude von 1 Volt, Frequenz von 43 Hz sowie einer Einstellung der „Time Constant“ auf 3 Sekunden.

Man erkennt, dass bei kleinen Rauschamplituden das Signal-zu-Rausch-Verhältnis nach der Bearbeitung durch den Verstärker relativ hoch ist. Das Signal kann also nahezu vollständig vom Rauschen getrennt werden.

Bei Signalen, die von Rauschen größerer Amplitude überlagert werden, ist dass Signal-zu-Rausch-Verhältnis schlechter. Mit dem eigentlichen Signal gelangt in diesen Fällen auch ein Teil des Rauschens durch das System und das Ausgangssignal am Lock-In-Verstärker schwankt stark.

In allen Fällen zeigt sich jedoch, dass die Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses in etwa gleich ist. Man erhält eine Verbesserung etwa um den Faktor 400 oder, um es in der üblichen Schreibweise anzugeben, von etwa 26 dB.

5 SNR: Signal to Noise Ratio (Signal-zu-Rausch-Verhältnis)

6. Zusammenfassung

Im Laufe dieser Bachelor-Arbeit wurde der Aufbau eines für den F-Praktikums-Betrieb geeigneten Lock-In-Verstärkers beschrieben. Zunächst wurden einige theoretische Grundlagen der Messungen von kleinen Signalen erklärt, wie beispielsweise das Problem des Rauschens und wie dieses auf verschiedene Arten verringert werden kann.

Im Mittelpunkt stand hierbei natürlich die Arbeits- und Funktionsweise eines Lock-In-Verstärkers. Besondere Beachtung kommt dabei dem „Phasenempfindlichen Gleichrichter“ zu, welcher das zentrale Element eines jeden Lock-In-Verstärkers ist. Er arbeitet entweder analog oder wie in diesem Fall mit computergestützter, also digitaler, Signalverarbeitung.

Danach wurden Aufbau und Funktion des im Rahmen dieser Arbeit in LabVIEW programmierten Lock-In-Verstärkers beschrieben. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Gestaltung der Benutzeroberfläche gelegt, die den Studenten entgegen kommen soll.

Abschließend wurden einige Messergebnisse, welche durch Untersuchungen mit diesem Lock-In-Verstärker gewonnen wurden, beschrieben. Die vorher bereits im theoretischen Teil beschriebenen Grundlagen konnten dabei bestätigt werden und die Signal-zu-Rausch-Verbesserung des Verstärkers wurde auf etwa 26 dB ermittelt. Speziell im Betrieb des Lock-In-Verstärkers über den Photodetektor mit Glühlampe wurde jedoch festgestellt, dass dieser wegen der technischen Gegebenheiten des Detektors besonders gut im Bereich niedriger Frequenzen arbeitet.

Insgesamt bleibt festzustellen, dass der Lock-In-Verstärker ein gutes Mittel ist, um das Nutzsignal gegenüber dem Rauschen hervorzuheben. Obwohl kommerzielle Lock-In-Verstärker eine bessere Signalaufbereitung erbringen, ist dieser modularer Eigenbau zum Studium des Lock-In-Verstärkers hervorragend geeignet.

7. Literaturverzeichnis

1. Kunze, Hans-Joachim, Physikalische Messmethoden, Teubner, Stuttgart (1986), S. 119ff und S. 105ff
2. Fricke, Hans, Grundlagen der elektrischen Nachrichtenübertragung, Teubner, Stuttgart (1979), S. 19ff
3. D. Hammer, Elektronische Messung verrauschter Signale, G-I-T Fachzeitschrift, 19. Jg. (1975), S. 413-420, S. 778-786 und S. 881- 887
4. Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Physik, Versuch 6: Lock-In-Verstärker, http://e-praktikum.physik.hu-berlin.de/Versuche/versuch6.pdf, (Zugriff: 15.09.2007, 15.27MEZ)
5. Technische Universität Berlin, Institut für Festkörperphysik, Praktikum: Methoden der Angewandten Physik, Signalverarbeitung mit Lock-In-Verstärker, http://sol.physik.tu-berlin.de/htm_group/teaching/scripte/LockIn_2004.pdf (Zugriff: 15.09.2007, 15.32MEZ)
6. W. Richter, Physikalisches Institut der Universität Bayreuth, Physikalisches Praktikum für Fortgeschrittene: Signale/Rausch-Verbesserung, http://www.praktika.physik.uni-bayreuth.de/Signal_Rausch.pdf (Zugriff: 15.09.2007, 15.37MEZ)
7. Stanford Research Systems (1993), MODEL SR830 DSP Lock-In Amplifier (Revision 2.2 (6/2005)), http://www.thinksrs.com/downloads/PDFs/Manuals/SR830m.pdf (Zugriff: 15.09.2007, 15.45MEZ)
8. T. Schnitzler: Elemente für die Programmierung eines Lock-In-Verstärkers mit digitaler Signalverarbeitung, Duisburg (2006)
9. T. Schnitzler: Der Lock-In-Verstärker mit digitaler Signalverarbeitung programmiert in LabVIEW, Duisburg (2006)