



UNIVERSITÄT REGENSBURG

Naturwissenschaftliche Fakultät II - **Physik**

Anleitung zum Anfängerpraktikum *A2*

Versuch 5a - Lock-In-Verstärker

1. Auflage 2009

**Dr. Stephan Giglberger**

# Inhaltsverzeichnis

<b>5</b>	<b>Lock-In-Verstärker</b>	<b>3</b>
5.1	Grundsätzliches über den Versuch . . . . .	3
5.1.1	Lernziel . . . . .	3
5.1.2	Vorkenntnisse . . . . .	3
5.1.3	Literatur . . . . .	3
5.2	Verstärkertypen . . . . .	4
5.3	Funktionsprinzip des Lock-in-Verstärkers . . . . .	6
5.4	Fragen zum Versuch . . . . .	9
5.5	Aufgabenstellung . . . . .	9
5.5.1	Versuchsdurchführung . . . . .	10

# 5 Lock-In-Verstärker

## 5.1 Grundsätzliches über den Versuch

Die Messung kleiner elektrischer Signale stellt mitunter hohe Anforderungen an die benötigten Geräte. Technisch ist es heute zwar kein allzu großes Problem mehr, sehr rauscharme Verstärker mit hoher Signalverstärkung zu konstruieren; ist das Signal selbst allerdings Größenordnungen niedriger als das Grundrauschen, müssen besondere Verstärkertypen und eine besondere Meßtechnik angewandt werden. Eine kleine Übersicht hierzu finden Sie in Kap. 5.2.

### 5.1.1 Lernziel

Der Student soll

- einen generellen Überblick über verwendete Verstärkertypen bekommen
- sich über Ursachen von Störsignalen und deren Beseitigung bewußt werden
- Prinzip und Funktionsweise eines Lock-in-Verstärkers verstehen

### 5.1.2 Vorkenntnisse

- Signal-Rausch-Abstand (SNR: Signal to Noise Ratio)?
- Thermisches Rauschen, weißes Rauschen, rosa Rauschen, 1/f-Rauschen
- Hochpaß, Tiefpaß, Bandpaß

### 5.1.3 Literatur

Gerthsen: 84 UC 156 G 384

Literatur

84 xxx H.-J. Kunze: Physikalische Meßmethoden, S. 105-124

<https://ces.karlsruhe.de/culm/laborgeraete/verstaerker/verst1.htm>

## 5.2 Verstärkertypen

Nachfolgend seien an dieser Stelle die wichtigsten Verstärkertypen mit ihren jeweiligen Einsatzgebieten kurz vorgestellt.

- **Impedanzwandler**

Der Impedanzwandler paßt Ausgangs- und Eingangswiderstände zweier Systemen aufeinander an, er „transformiert“ einen Widerstand. Da der Widerstand im allgemeinen frequenzabhängig ist, wird er mathematisch durch eine komplexe Zahl dargestellt und als Impedanz bezeichnet. Als Operationsverstärker-Grundschialtung versteht man unter dem Impedanzwandler eine Gleichspannungs-Verstärkerschialtung mit der Verstärkung 1, einem sehr hohen Eingangswiderstand und einem sehr kleinen Ausgangswiderstand.

- **NF-Verstärker**

Der Niederfrequenzbereich (NF) umfasst in etwa den Hörbereich des Menschen (20Hz bis 20kHz). Entscheidend für die Qualität des Spannungs- oder Leistungsverstärkers ist ein konstanter Amplituden-Frequenzgang. Der Phasen-Frequenzgang ist meist von untergeordneter Bedeutung, da das Ohr Phasenunterschiede im Klंगाufbau nicht wahrnimmt.

- **HF-Verstärker**

Bei hohen Frequenzen wird das Verstärkerverhalten stark von der Bauteileauswahl und dem Schaltungsaufbau beeinflusst. Kapazitäten und Induktivitäten aus der Leitungsführung und der Anordnung der Bauelemente führen zu Dämpfungen und Eigenschwingungen. HF-Verstärker sind als Spannungsverstärker (z.B. in der Nachrichtentechnik) und als Leistungsverstärker (z.B. Rundfunksender, Mikrowellen, Kernspinresonanz) anzutreffen.

- **Chopper-Verstärker** (Zerhacker-Verstärker)

Bei Gleichspannungsverstärkern sind Temperatur- und Alterungsdrift sowie die Gleichtaktunterdrückung<sup>1</sup> problematisch. Zerhackt man das Eingangssignal, dann lässt es sich als Wechselspannung verstärken. Das Zerhacken ist am besten durch ein periodisches Ein- und Ausschalten oder Umpolen des Eingangssignals zu beschreiben. Die Chopperfrequenz muss dabei deutlich grösser als die höchste im Signal vorkommende Frequenz sein. Das Zerhacken kann mechanisch, elektronisch oder optoelektronisch erfolgen. Nach der Wechselspannungs-Verstärkung werden die Halbwellen wieder phasenrichtig zusammengesetzt und die noch vorhandenen Anteile der Chopperfrequenz herausgefiltert.

- **Heterodyn-Verstärker** (Mischer-Verstärker)

Steckt man die Information des Signals z.B. durch Zerhacken nur in die Amplitude eines Trä-

---

<sup>1</sup>Eine gleich große Änderung der Spannungen an beiden Eingängen eines Differenzverstärkers (=Gleichtakt) sollte im Idealfall zu keiner Änderung der Ausgangsspannung führen → Gleichtaktunterdrückung.

gersignals (Amplitudenmodulation) und lässt man den Verstärker nur ganz schmalbandig diese Trägerfrequenz verstärken, so werden alle störenden Anteile im Frequenzbereich ausserhalb der Trägerfrequenz nicht mitverstärkt. In der Praxis sieht das so aus:

Durch einen Chopper wird die Signalinformation in die Amplitude des Choppersignals gesteckt. Der Verstärker ist auf die Chopperfrequenz abgestimmt und verstärkt nur diesen Anteil. Da man den Chopper aber bei unterschiedlichen Frequenzen betreiben möchte, muss die Filterfrequenz des Verstärkers auf die Chopper-Frequenz (CF) eingestellt werden können. Einstellbare Filter (Nachlauf-Filter) mit konstanten Eigenschaften sind sehr aufwendig. Daher wird das modulierte Choppersignal mit einer Hochfrequenz (HF) elektronisch multipliziert (gemischt). In der Mischung steckt auch die Differenz der Frequenzen  $HF-CF=ZF$  (Zwischenfrequenz). Auf diese Zwischenfrequenz ist der Verstärker fest eingestellt. Bei Änderung der Chopper-Frequenz muss nur die HF entsprechend nachgeführt werden, um wieder die festgelegte, unveränderliche ZF zu erhalten.

- **Lock-In-Verstärker** (LIA: Lock In Amplifier)

Das Prinzip der selektiven Verstärkung ist beim Lock-In-Verstärker am ausgeprägtesten. Bestand beim Heterodyn- Verstärker noch die Gefahr, dass die HF nicht präzise eingestellt ist oder im Lauf der Messung HF oder CF driftet, so ist hier durch eine spezielle Schaltung sichergestellt, dass sich der Verstärker automatisch auf die extern zugeführte Chopper-Frequenz einstellt oder „einrastet“ (lock in). Der Verstärker arbeitet extrem schmalbandig, so dass ein guter Verstärker ein Signal verstärken kann, das in einem 100 000 mal so grossen Rauschen verborgen ist (50dB). Messprobleme, die den Einsatz eines Lock-In-Verstärkers erfordern, findet man z.B. in der Faser- und Quantenoptik, speziellen Spektroskopieverfahren, Halleffekt-Messungen und in der Elektrochemie.

Ein einkanaliger Lock-In-Verstärker liefert ein Ausgangssignal, das von der Phasenlage zwischen Mess- und Referenzsignal abhängt. Daher ist die Ausgangsspannung nicht eindeutig von der Amplitude des Eingangssignals abhängig. Mit einem zweikanaligen Verstärker und einer Phasenverschiebung der beiden Referenzsignale um  $90^\circ$ , erhält man Real- und Imaginärteil eines komplexen Spannungswertes. Mit analogen Rechenschaltungen oder nach einer Digitalisierung und Berechnung erhält man daraus den Betrag und die Phase des Eingangssignals. Da meist nur diese Messwerte und nicht das verstärkte Signal als solches benötigt werden, wird diese Geräteausführung auch als Vektor-Voltmeter bezeichnet.

- **Gated Integrator**

Signale, die nur während einer kurzen Zeit Information tragen (pulsförmige Signale, wie sie bei Laserpulsen oder Teilchendetektoren vorkommen), tragen oft ihre Information in der Fläche unter der Pulsform. Das Signal wird über einen Kondensator integriert. Beim Gated Integrator

wird durch ein externes Triggersignal der Verstärkereingang nur während einer vorher eingestellten Zeit geöffnet, um Störungen vor und nach dem Puls zu unterdrücken. Der Integrator glättet die zufälligen Signalschwankungen. Das Ergebnis ist ein einziger Wert (Integral) pro Impuls. Der zeitliche Signalverlauf geht verloren.

Viele analoge Integratoren sind inzwischen durch Digitaltechnik ersetzt. Bei Abtastraten von z.B. 20 MHz können auch Pulsfolgen mit Abständen von 500ns getrennt erfasst werden. Die Digitaltechnik erlaubt eine vielseitige Nachbearbeitung (post processing) der Daten (filtern, rückfalten).

- **Box Car Averager**

Periodische Puls-Signale enthalten zwischen den Pulsen meist nur Rauschen. Dieses schlechte Signal/Rausch-Verhältnis lässt sich verbessern, wenn man die Periode in viele Zeitfenster unterteilt und jedem Zeitfenster einen Integrator zuordnet. Durch Addition aus den einzelnen Messwerten in jedem Fenster wird ein Mittelwert gebildet (Averaging). Elektronisch wird die Addition im Box Car Averager durch die Ansammlung entsprechender Ladungen in einem Kondensator realisiert. Das Signal wächst mit der Anzahl  $n$  der Messwerte, während die statistischen Schwankungen zwischen den einzelnen Pulsen nur mit der Wurzel aus  $n$  wachsen. Es verbessert sich also das Signal/Rausch-Verhältnis. Der zeitliche Signalverlauf bleibt erhalten. Der Box Car Averager ist inzwischen durch Digitaltechnik ersetzt. Er wird nur noch mit Averager bezeichnet.

### 5.3 Funktionsprinzip des Lock-in-Verstärkers

Abbildung 5.1 zeigt das prinzipielle Schema eines Lock-in-Verstärkers: das modulierte, verrauschte Nutzsignal  $U_{\text{sig}}$  wird verstärkt und anschließend durch einen Bandpaßfilter von Rauschteilen höherer ( $\omega \gg \omega_{\text{ref}}$ ) und niedriger Frequenzen ( $\omega \ll \omega_{\text{ref}}$ ) befreit.

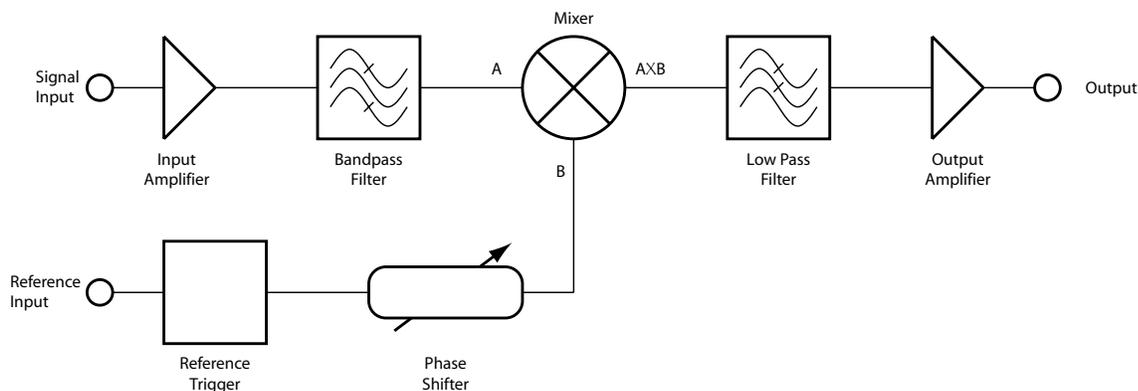


Abbildung 5.1: Blockschaltbild eines Lock-in-Verstärkers

In einem Mischer wird es danach mit einem Referenzsignal  $U_{\text{ref}}$  der Frequenz  $\omega_{\text{ref}}$  multipliziert. Die Phasenlage  $\phi$  des Referenzsignals kann dabei durch einen Phasenschieber variiert werden und so mit dem Signal synchronisiert werden ( $\Delta\phi = 0$ ).

Der dem Mischer nachgeschaltete Tiefpaß mit  $\tau = RC \gg 1/\omega_{\text{ref}}$  integriert das Mischsignal  $U_{\text{sig}} \times U_{\text{ref}}$  über mehrere Perioden der Modulationsfrequenz. Hierdurch werden Beiträge der nicht zur Modulationsfrequenz synchronisierten Rauschbeiträge zu einem großen Anteil herausgemittelt, so dass am Ausgang letztendlich eine Gleichspannung anliegt, die proportional zur Eingangsspannung **und** zum Kosinus der Phasenverschiebung  $\Delta\phi$  zwischen Eingangs- und Referenzsignal ist:

$$U_{\text{out}}(t) = 1/T \int_{t-T}^t ds \sin(2\pi\omega_{\text{ref}} \cdot s + \phi) U_{\text{sig}}(s). \quad (5.1)$$

(bzw. nur  $U_{\text{out}}(t) \propto U_{\text{ref}} \cos \phi$ ) Hier ist davon ausgegangen worden, dass das Modulationssignal sinusförmig ist.

Der Tiefpass definiert die Bandbreite des Rauschens: je größer die Zeitkonstante  $\tau = RC$  desto kleiner ist die Bandbreite  $\Delta\nu = 1/(\pi RC)$ . Auf diese Art kann man Lock-in-Verstärker mit Güten von  $Q = 100.000$  erreichen.

Das Signal wird oftmals mit einer Rechteckspannung moduliert - so wird beispielsweise ein (optisches) Signal durch eine Chopperscheibe unterbrochen („zerhackt“). Diese Rechteckspannung kann durch eine Fourierreihe angenähert werden, die sich aus den ungeraden Harmonischen der Grundfrequenz  $\omega$  zusammensetzt:

$$U_{\text{ref}} = \frac{4}{\pi} \left( \sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \dots \right) \quad (5.2)$$

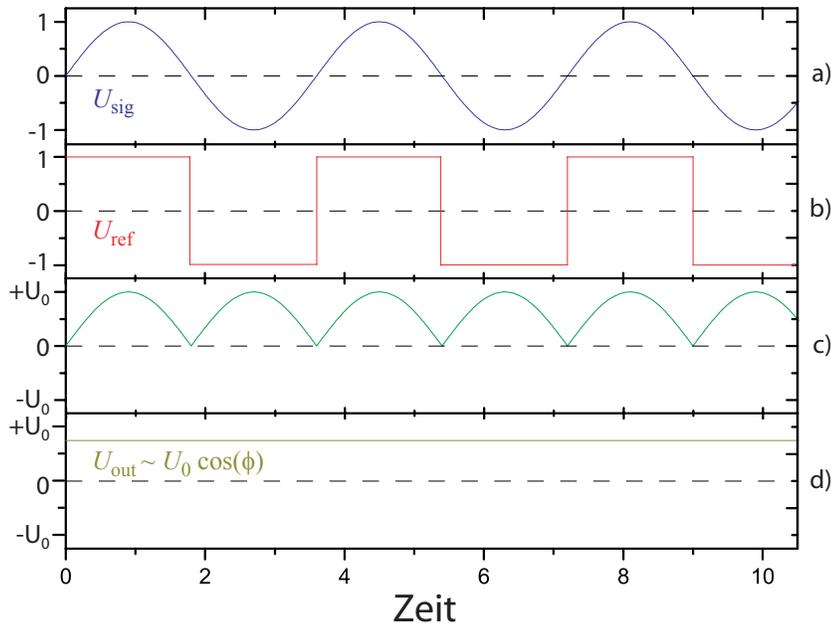
Das Produkt aus Signal- und Modulationsfrequenz ergibt dann

$$U_{\text{sig}} \times U_{\text{ref}} = \frac{2}{\pi} U_0 \left( 1 - \frac{2}{3} \cos(2\omega t) - \frac{2}{15} \cos(4\omega t) - \frac{2}{35} \cos(6\omega t) + \dots \right) \quad (5.3)$$

und enthält die geraden Oberwellen der Grundfunktion  $\omega$  - von hier kommt auch der Begriff **Phasengleichrichter** für den Lock-in-Verstärker. Der Tiefpaßfilter wird so gewählt, dass er die Oberwellen unterdrückt, der Ausgang liefert eine Gleichspannung, die proportional zur Signalspannung und zum Kosinus der Phasenverschiebung ist

$$U_{\text{out}} = \frac{2}{\pi} U_0 \cos \phi. \quad (5.4)$$

Die Ausgangsspannung ist demnach maximal für eine Phasenverschiebung von  $\phi = 0$ . Abb. 5.2 zeigt für diesen Fall den Spannungsverlauf am Lock-in-Verstärker.



**Abbildung 5.2:** Anliegende Signale: a) sinusförmige Signalspannung  $U_{\text{sig}} = U_0 \sin(\omega t)$ , die durch eine b) Rechteckspannung  $U_{\text{ref}}$  (Referenz) derselben Frequenz moduliert wird; c) das Produkt aus Signal- und Referenzspannung  $U_{\text{sig}} \times U_{\text{ref}}$  führt zur Ausgangsgleichspannung  $U_{\text{out}} \propto U_0 \cos(\phi)$  d).

Das zu untersuchende sinusförmige Signal (Abb. 5.2a) wird durch eine Rechteckspannung (Abb. 5.2b) derselben Frequenz „zerhackt“. Das Produkt dieser beiden Signale  $U_{\text{sig}} \times U_{\text{ref}}$  (Abb. 5.2c) wird im nachgeschalteten Tiefpassfilter über mehrere Perioden integriert und liefert so eine Gleichspannung, die proportional zum Eingangssignal und zum Kosinus der Phasenverschiebung von Eingangsspannung und Referenzsignal ist.

Der Lock-in-Verstärker reagiert also sensitiv auf die relative Phasenverschiebung zwischen Meßsignal und Oszillatorsignal  $U_{\text{out}} \propto U_0 \cos \phi$ . Daraus ergibt sich, dass nach dem Phasenabgleich ( $\phi = 0$ ) selbst Störsignale, die auf der gleichen Frequenz laufen wie das Messsignal (aber natürlich nicht in Phase mit dem Referenzsignal sind), gegenüber dem Messsignal abgeschwächt werden.

## 5.4 Fragen zum Versuch

1. Erkläre die Begriffe Thermisches Rauschen, Rosa Rauschen, Weißes Rauschen,  $1/f$ -Rauschen.
2. Kann man den Lock-in Verstärker als empfindlichen Spannungsverstärker für kleine Signale verwenden?
3. Was versteht man unter der Güte eines selektiven Verstärkers?
4. Beschreibe, wie durch Mittelung das (stochastische) Rauschen vermindert werden kann. Erkläre den Satz „Die SNR steigt durch achtfach-Averaging um 9 dB“.

## 5.5 Aufgabenstellung

Zum Verständnis der Funktionsweise des Lock-in-Verstärkers stehen ein modular aufgebauter Verstärker und ein Speicheroszilloskop zur Verfügung. Der Signal-Processor / Lock-in Amplifier stellt einen Vorverstärker, die Filter (Hoch-, Tief-, Bandpassfilter), den Phasenschieber, einen Funktionsgenerator, einen Rauschgenerator, einen Tiefpaß-Verstärker und einen Lock-in-Detektor separat zur Verfügung.

### Hinweis 1:

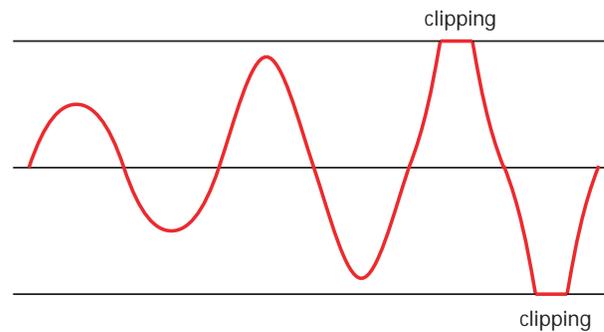
Alle Module sitzen auf dem selben Massepotential (die Aussenleiter der BNC-Kabel sind durch das Gehäuse mit der gemeinsamen Masse verbunden). Nur der linke Ausgang des Oszillator-Moduls, also der Referenzsignal-Ausgang, besitzt eine isolierte Masse! **Es muss unbedingt darauf geachtet werden, dass der Referenzsignal Ausgang nicht mit Masse verbunden wird!** Hierfür gibt es ein spezielles BNC-Kabel, bei dem der Aussenleiter unterbrochen ist.

### Hinweis 2:

Es erfordert etwas Geschick, die Verstärkungsfaktoren der einzelnen Module (Pre-Amp, Detector, Low-Pass Amp) richtig zu wählen. Ist die Verstärkung zu hoch gewählt, wird das Signal durch das sog. „clipping“ verzerrt: die Dynamik des Verstärkers ist ausgereizt, die Signalamplitude wird hart begrenzt („Abgeschnitten“). Abb. 5.3 zeigt, wie durch das clipping „Ecken und Kanten“ im Signal generiert werden.

Grundsätzlich sollte man daher folgende Überlegungen berücksichtigen:

1. Der Pre-Amp verstärkt sowohl das Messsignal als auch das Rauschen gleichermaßen. Hier sollte die Verstärkung lediglich so hoch gewählt werden, dass das Signal gegenüber dem zusätzlichen Rauschen, das durch nachfolgende Module verursacht wird, sehr groß ist. Das Ausgangssignal des Vorverstärkers sollte unbedingt am Oszilloskop überprüft werden, da bei einem zu hohen Verstärkungsfaktor der Ausgang leicht übersteuert wird. Dadurch wird die nachfolgende



**Abbildung 5.3:** clipping: durch die begrenzte Dynamik des Verstärkers wird das Signal „abgeschnitten“

Signalverarbeitung massiv gestört. Besonders kritisch sind in diesem Zusammenhang Rauschspitzen.

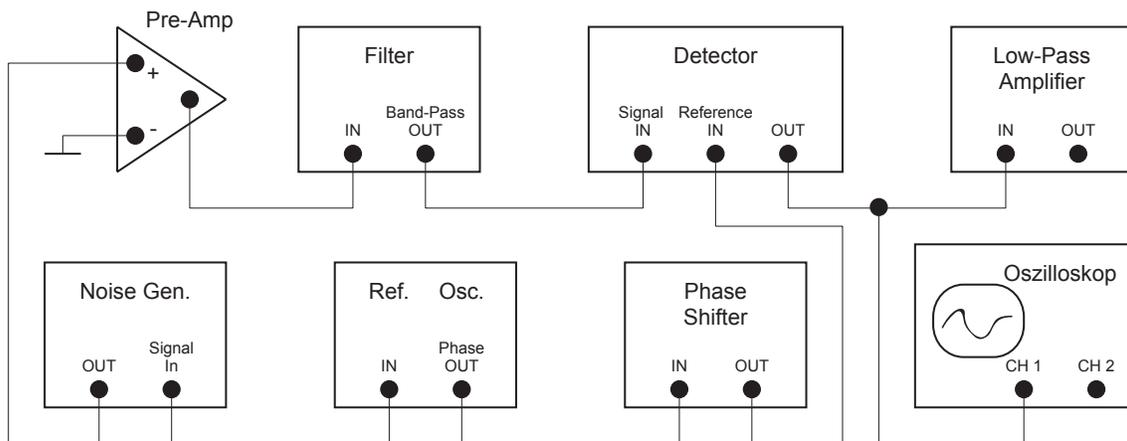
2. Der Verstärkungsfaktor am Detector sollte möglichst groß gewählt werden, da hier bereits das phasenrichtig gefilterte Messsignal ausgegeben wird. Je größer das Messsignal an dieser Stelle, desto genauer der spätere Messwert. Das Ausgangssignal sollte unbedingt mit dem Oszilloskop kontrolliert werden, da man auch hier Gefahr läuft, den Ausgang durch eine zu hohe Verstärkung zu übersteuern.
3. Der Verstärkungsfaktor für den Low-Pass-Amplifier sollte wie bei einem analogen Voltmeter oder Amperemeter so gewählt werden, dass das Meßsignal den Meßbereich möglichst optimal ausschöpft („oberes Drittel der Messkala“).

Anmerkung: Beim Low-Pass-Amplifier kann man mit dem zuschaltbaren DC-Offset den Messwert auf Null zurückregeln. Der Offset wird vor der Signalverstärkung hinzuaddiert, d.h. man kann so einen viel größeren Verstärkungsfaktor wählen um kleine Änderungen im Meßsignal sichtbar zu machen.

### 5.5.1 Versuchsdurchführung

1. Untersuchen Sie mit Hilfe des Oszilloskops die Signale des Funktionsgenerators (Reference / Oscillator).  
Bei welchem Ausgang kann die Spannungsamplitude variiert werden und welcher Ausgang liefert eine konstante Spannung? Wie groß ist sie?
2. Legen Sie den Rauschgenerator auf den Verstärkereingang und betrachten Sie das verrauschte Signal nach dem Bandpassfilter. Variieren Sie die Güte des Filters und beschreiben Sie den Effekt.

3. Bauen Sie die Schaltung gem. der Abb. 5.4 schrittweise auf. Benutzen Sie für diesen Versuch-



**Abbildung 5.4:** Prinzipieller Aufbau eines Lock-in-Verstärkers: neben dem Vorverstärker enthält der Lock-in-Verstärker verschiedene Hoch-, Tief- und Bandpaßfilter, einen Phasenschieber, einen Mischer (Lock-in-Detektor) und einen Tiefpaß-Verstärker.

teil den Noise-Generator NICHT. Geben Sie ein sinusförmiges Signal  $U_{\text{sig}}$  von ca. 1 kHz und 10 mV (Oscillator Output) auf den Verstärker und mischen Sie den Ausgang mit einem Sinus-Referenzsignal  $U_{\text{ref}}$  gleicher Frequenz.

- Skizzieren Sie das Ausgangssignal für fünf verschiedene Phasen.
  - Wie sieht das Ausgangssignal aus, wenn Sie es integrieren (Tiefpaß)? Vergleichen Sie verschiedene Integrationszeiten.
  - Messen Sie die Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Phasenverschiebung. Nehmen Sie mindestens zehn Meßwerte auf und vergleichen Sie das Ergebnis mit Gl. (5.4).
- Messen Sie die Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Phasenverschiebung. Nehmen Sie mindestens zehn Meßwerte auf und vergleichen Sie das Ergebnis mit Gl. (5.4).
  - Verändern Sie nun die Schaltung, indem Sie zusätzlich ein Rauschsignal (Noise Generator) von der Größenordnung der Signalspannung hinzugeben. Wiederholen Sie alle Messungen aus Aufgabe 3. Wie haben sich die Signale verändert?
  - Untersuchen Sie nun das Rauschsignal (signal attenuator am Rauschgenerator auf OFF, Noise auf 1). Das Meßsignal sollte nun um den Wert Null pendeln. Wird das Referenzsignal dazugeschalten pendelt das Meßsignal nun um einen endlichen Wert.
  - Bauen Sie eine Photodetektorschaltung nach Abb. 5.5 auf. Modulieren Sie die Leuchtdiode (LED) mit einer Rechteckspannung und lassen Sie sie mit 50 Hz bis 500 Hz blinken. Das

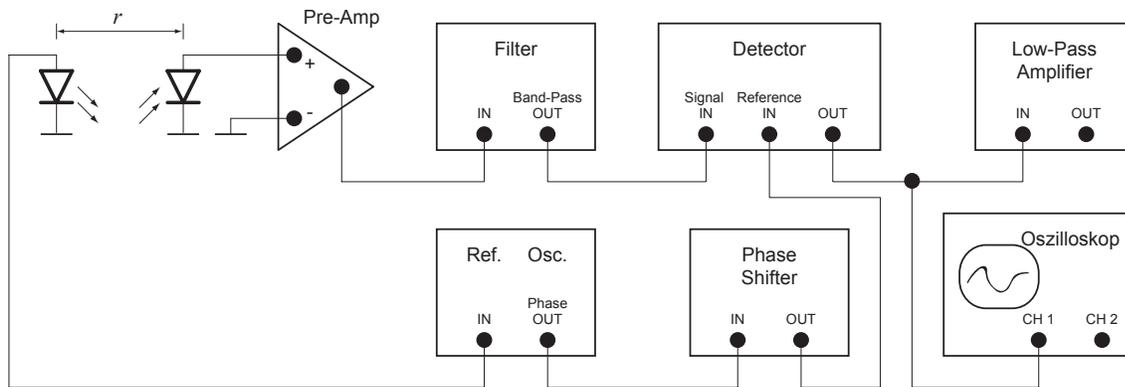


Abbildung 5.5: Photodetektor-Aufbau zu Aufgabe 7.

ausgesendete Licht kann mit einer Photodiode gemessen werden. Messen Sie die Intensität des LED-Lichtes in Abhängigkeit des Abstandes  $r$  zwischen LED und Photodiode. Welches ist der maximale Abstand  $r_{\max}$ , bei dem das Licht gerade noch nachgewiesen werden kann?