

Versuch im  
Fortgeschrittenen-Praktikum

Fourierspektroskopie

# 1 Einleitung

In konventionellen Spektrometern wird Licht mit Hilfe eines Gitters oder eines Prismas spektral zerlegt und die von den einzelnen Wellenlängen angebotenen Intensitäten bestimmt. Bei der Fourier-spektroskopie hingegen werden Interferenzen zweier kohärenter Teilstrahlen in Abhängigkeit vom optischen Gangunterschied vermessen. Man arbeitet also mit weißem Licht und beobachtet die Korrelation der beiden Strahlen zueinander. Über eine Fouriertransformation kann daraus das Spektrum der untersuchten Strahlung ermittelt werden.

Im Versuch sollen die Interferogramme mehrerer Lichtquellen aufgenommen und ausgewertet werden. Die diskrete Fouriertransformation (DFT) und ihre spezifischen Effekte stehen im Mittelpunkt der mathematischen Theorie. Ihr Verständnis ist fundamental für eine sinnvolle Anwendung der DFT.

Auf experimenteller Seite ist der Lock-In-Verstärker hervorzuheben, der eine sehr hohe Empfindlichkeit der Apparatur sicherstellt. Die Aufnahme der Messwerte und deren Auswertung werden mit Hilfe eines am Versuchsplatz bereitgestellten PCs vorgenommen, entsprechende Software ist vorhanden.

## 2 Grundlagen in Stichworten

**Geometrische Optik** Abbildung durch Linsen, Linsenformel

**Monochromatoren** Funktionsweise, Aufbau, Auflösungsvermögen

**Wellenoptik** Kohärenz, Interferenzen gleicher Neigung und gleicher Dicke, Michelson-Interferometer, Kohärenzlänge verschiedener Lichtquellen

**Fouriertheorem** Definition, Bedingungen für die Gültigkeit, Anwendungen

**Fourierspektroskopie** Vorteile gegenüber konventioneller Spektroskopie, Auflösungsvermögen, Fourierintegral für optisches Interferometer, Kriterien zur Charakterisierung des Auflösungsvermögens

**Auswertung** DFT und ihre Relation zur kontinuierlichen Transformation, Apodisierung, Digitalisierungsschrittweite (Abtasttheorem), Shah-Funktion, Cooley-Tuckey-Algorithmus

**Lock-In-Verstärker** Prinzip, verschiedene Ausführungen

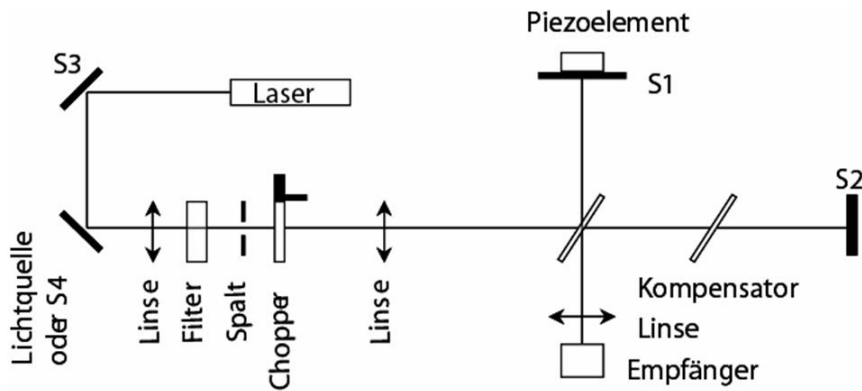


Abbildung 1: Optischer Aufbau

### 3 Versuchsaufbau

#### 3.1 Optischer Aufbau

Den Mittelpunkt des in Abb. 1 dargestellten optischen Aufbaus bildet ein Michelson-Interferometer, bestehend aus einem Strahlteiler mit Kompensator und den justierbaren Spiegeln S1 und S2. Der Spiegel S1 ist an einem Piezoelement montiert, womit seine Position auf einige Nanometer genau verstellt werden kann. S2 ist auf einem Schlitten befestigt und kann in Strahlrichtung verschoben werden, seine Position ist an einer Messuhr abzulesen. Zur Justierung und Kalibrierung des Aufbaus kann mit den Spiegeln S3 und S4 (oder direkt) ein Laserstrahl (HeNe-Laser) in den Strahlengang eingeblendet werden. Der Eintrittsspalt  $S_p$  dient hier im wesentlichen dazu, die geometrische Position des in das Interferometer eintretenden Lichtstrahls zu fixieren und beeinflusst im Gegensatz zu konventionellen Spektrometern **nicht** das Auflösungsvermögen. Verschiedene Linsen stehen zur Strahlaufweitung und -abbildung zur Verfügung.

Da das Interferometer sehr empfindlich auf Erschütterungen reagiert, ist es auf einer Aluminium-Sandwich-Platte aufgebaut. Zur mechanischen Entkopplung von der Unterlage ist die Platte auf Federn gelagert.

### 3.2 Lichtmodulator (Chopper)

Da zum Messen ein Lock-In-Verstärker benutzt werden soll, muss das Licht der Strahlungsquellen moduliert werden. Zu diesem Zweck steht eine rotierende Scheibe mit mehreren durchbrochenen Segmenten zur Verfügung, welche zur Modulation des Lasers, der Halogenlampe sowie der Entladungslampen dient. Der Antrieb dieser Scheibe erfolgt durch einen frequenzstabilisierten Gleichstrommotor, der seine Ist-Drehzahl über eine Lichtschranke am äußeren Rand der Scheibe erhält. Der Sollwert kann an dem Steuergerät, das auch das Referenzsignal für den Lock-In-Verstärker liefert, über einen weiten Bereich variiert werden. Zum Betrieb der Lumineszenzdioden dient eine Stromquelle, die die Intensität der Dioden direkt durch den Strom mit regelbarer Frequenz moduliert. Dies bietet gegenüber der mechanischen Modulation den Vorteil, keinerlei Erschütterungen zu produzieren.

### 3.3 Strahlungsempfänger

Zur Aufnahme der Interferogramme stehen zwei verschiedene Empfänger zur Verfügung, einerseits eine Silizium-Photodiode, andererseits ein PbS-Photowiderstand.

Die Photodiode ist zusammen mit einem zweistufigen Vorverstärker in ein Weißblechgehäuse eingebaut. Vor der Empfängerfläche befindet sich eine Blende mit sehr kleinem ( $< 0,5$  mm) Durchmesser. Die Verstärkung der zweiten Stufe kann durch einen Schalter eingestellt werden und ist immer möglichst groß zu wählen. Nach Beendigung des Versuchs **Ausschalten nicht vergessen**, da der Vorverstärker batteriebetrieben ist!

Der PbS-Empfänger benötigt für den Betrieb ebenfalls eine Gleichspannungsquelle. Eine Batterie ist zusammen mit einem für den Betrieb erforderlichen Vorwiderstand im Gehäuse integriert (die Batterie muss aber noch ein- und hinterher wieder **ausgebaut** werden!). Die zur Auswertung bereitgestellte Software unterstützt in der aktuellen Version noch nicht die Empfänger, d.h. die errechneten Spektren werden nicht um die spektrale Empfängerempfindlichkeit korrigiert.

### 3.4 Elektronischer Aufbau und rechnergestützte Messdatenerfassung und -auswertung

Abb. 2 zeigt einen Überblick über den elektronischen Aufbau des Versuchs. Wie schon erwähnt wurde, erfolgt die Versuchsdurchführung mit Hilfe eines PCs, der die Steuerung des Piezoelements, sowie die Datenaufnahme übernimmt. Zu diesem Zweck wurde ein Programm entwickelt, das weitestgehend

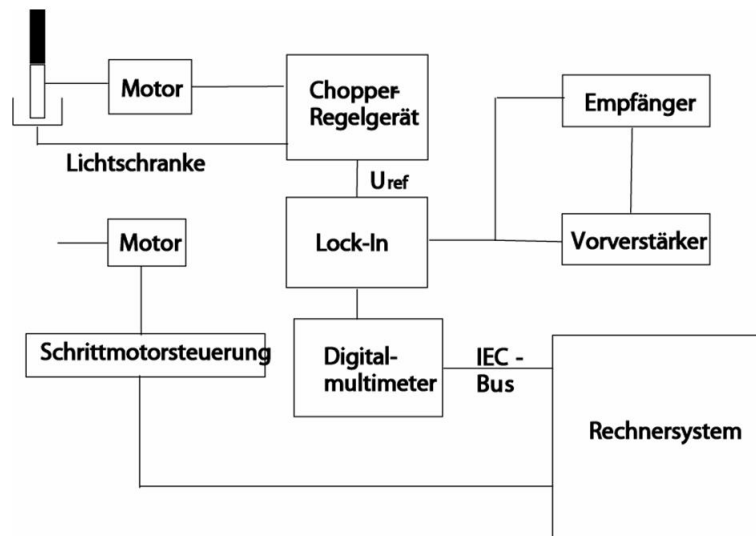


Abbildung 2: Überblick über den elektronischen Aufbau

menügesteuert und dadurch selbsterklärend ist, weshalb auch an dieser Stelle auf eine detaillierte Beschreibung verzichtet werden soll. Im Anhang befindet sich jedoch eine Kurzanleitung für die Inbetriebnahme des Systems und die Bedienung des Programms. Die Messungen sind mit einem Lock-In-Verstärker durchzuführen. Eine kurze Beschreibung der Funktionsweise ist im Anhang zu finden. Vor Beginn der Messungen ist ein Phasenabgleich durchzuführen und sicherzustellen, dass der Chopper mit der richtigen Frequenz betrieben wird. Die Geräte sind vor Versuchsbeginn evtl. entsprechend der Abbildung zu verschalten bzw. eine bestehende Schaltung ist auf ihre Korrektheit zu überprüfen.

## 4 Versuchsdurchführung

### 4.1 Ziel der Justierung

Die Justierung ist der wichtigste und zugleich schwierigste Teil des Versuchs und nimmt am meisten Zeit in Anspruch. Das Ziel ist es, dass das Licht senkrecht auf die Spiegel S1 und S2 fällt und die beiden Interferometerarme einen rechten Winkel bilden. Sind dann die optischen Wege der beiden Teilstrahlen gleich lang, befindet sich das System in der Weißlichtposition (WLP). Da die Grobjustierung in der Regel in Ordnung ist, wird davon abgeraten, die

Stellungen des Spalts, des Strahlteilers, der Spiegel und des Drehtellers zu verändern.

## 4.2 Justierung

Die Justierung des Aufbaus ist in den folgenden Schritten vorzunehmen:

- alle Linsen und den Detektor aus dem Strahlengang entfernen
- den Laser über die Spiegel S3 und S4 einblenden und auf die optische Höhe von ca. 90 mm von der Grundplatte aus justieren. Es empfiehlt sich, den Laser während des gesamten Versuchstages in Betrieb zu lassen, da er evtl. zum Nachjustieren benötigt wird!
- S1 mit einem Blatt Papier abdecken, um die Reflexe von dort auszublenzen. Laser auf die Mitte von S2 justieren. Von S2 muss der Strahl in sich zurück auf den Spalt fallen.
- analog ist mit S1 zu verfahren.
- am Ort des Detektors die Mattscheibe aufstellen. Die Reflexe von S1 und S2 müssen zusammenfallen. Eventuell mit S1 korrigieren. Sollten die Strahlen nicht aufeinanderfallen, kann vorsichtig die Position des Strahlteilers verändert werden.

## 4.3 Aufsuchen der Weißlichtposition

- in dem justierten Interferometer den Laserstrahl durch eine geeignete Linsenkombination aufweiten. Interferenzen durch evtl. Nachjustieren von S1 derart einstellen, dass der Mittelpunkt des Interferenzmusters auch in der Mitte der erleuchteten Fläche liegt.
- soweit es mit dem Laser möglich ist, durch rechnergesteuertes Bewegen des Schrittmotors die WLP suchen. Überlegen Sie sich bitte vor dem Versuch, wie die WPL mit dem Laser bei Interferenzen gleicher Neigung einzugrenzen ist (ein genaues Aufsuchen der WLP mit dem Laser ist i. a. unmöglich)!
- zum exakteren Auffinden der WLP ist die Halogenlampe zu benutzen. Dabei ist zu beachten, dass sich vorher der Mittelpunkt des Laser-Interferenzmusters im Mittelpunkt der ausgeleuchteten Fläche befand. Da die Halogenlampe eine sehr kleine Kohärenzlänge besitzt, sind die Interferenzen mit dieser Lichtquelle nur in einem kleinen Wegbereich

zu beobachten. Sind die Interferenzen auch nach einigem Suchen nicht zu finden, blenden Sie bitte wieder den Laser ein und überprüfen Sie die Justierung. Falls die Interferenzen dann immer noch nicht zu finden sind, kann versucht werden, die WLP durch **sehr vorsichtiges** Verschieben von S2 aufzusuchen (vorher bitte den betreuenden Assistenten befragen!).

#### 4.4 Aufnahme von Interferogrammen

- Detektor und evtl. weitere Linse in den Strahlengang bringen
- Software für die Aufnahme eines Interferogramms vorbereiten
- Interferogramm aufnehmen, während der Messung Erschütterungen der Apparatur vermeiden
- Interferogramm abspeichern
- Interferogramm transformieren und ggf. ausdrucken

#### 4.5 Versuchsaufgaben

- Justieren Sie das Interferometer gemäß der vorgehenden Hinweise.
- Bestimmen Sie die ungefähre Position der WLP mit dem Laser.
- Messen Sie ca. 20-30 Laserinterferenzen mit der Si-Diode und kalibrieren Sie damit den Vortrieb. Die Kalibrierung ist für die Auswertung der folgenden Interferogramme erforderlich.
- Suchen Sie die genaue WLP mit der Halogenlampe.
- Messen Sie das Interferogramm der Halogenlampe. Dabei ist zu beachten, dass die Interferogramme polychromatischer Lichtquellen - bedingt durch den Versuchsaufbau - assymetrisch bezgl. der WLP sind und daher beide Seiten vermessen werden müssen, Abb. 3 zeigt ein Beispiel für ein Interferogramm der Halogenlampe mit dem Filter BG36.  
Starten Sie die Messung daher vor der WLP und messen Sie über die WLP hinaus. Die Anzahl der Messpunkte darf 1024 nicht überschreiten! Benutzen Sie als Empfänger zunächst die Photodiode, danach den PbS-Photowiderstand.
- Vermessen Sie die Halogenlampe erneut mit den vorhandenen Filtern (rot, gelb, blau, Interferenzfilter).



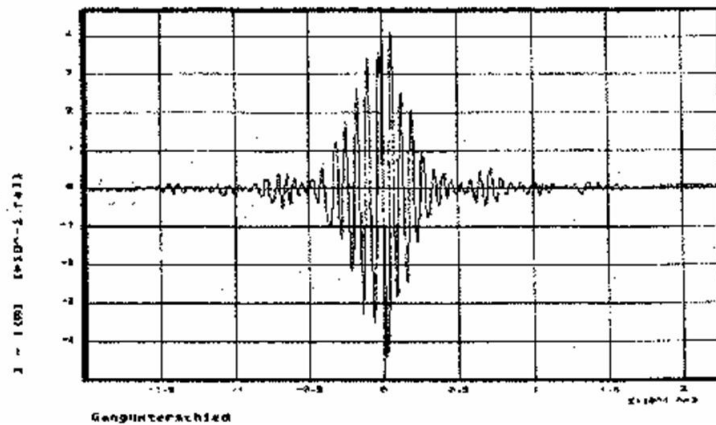


Abbildung 3: Interferogramm der Halogenlampe mit BG36

- Messen Sie die Interferogramme der Lumineszenzdiolen (rot, grün, infrarot).
- Messen Sie die Interferogramme einer Entladungslampe. Nehmen Sie dabei das Spektrum mehrmals mit unterschiedlicher Auflösung auf, indem Sie den gesamten Verschiebeweg des Piezoelements variieren.
- Sofern bei der Versuchsdurchführung genügend Zeit bleibt, wird empfohlen, die Interferogramme weiterer Lichtquellen/Filterkombinationen aufzuzeichnen und auszuwerten. Man kann z.B. Fahrradlampen oder ähnliches vermessen.

#### 4.6 Versuchsauswertung

- Prüfen Sie, ob das Piezoelement linear arbeitet, d.h. ob die Maxima der Interferogramme in festen Abständen auftauchen.
- Verwenden Sie die Interferogramme vom Laser ( $\lambda = 632,8nm$ ) um das Spektrometer zu kalibrieren.
- Werten Sie die Spektren der verschiedenen Lampen und Filterkombinationen aus. Vergleichen Sie dabei, vor allem für die Halogenlampe, die Spektren, die mit unterschiedlichen Empfängern aufgenommen wurden.

- Untersuchen Sie die Auflösung des Interferometers anhand der verschiedenen Spektren der Entladungslampe.

#### 4.7 Besondere Hinweise

- Bei den Spiegeln handelt es sich um Aluminium-bedampfte Glassubstrate ohne Schutzschicht. Deshalb dürfen sie nicht berührt werden. Bei versehentlichem Kontakt keine Reinigungsversuche unternehmen.
- Die Entladungslampen werden von einem gemeinsamen Netzgerät versorgt, das für jede Lampenart einen eigenen Anschluss besitzt. Vor Inbetriebnahme ist also darauf zu achten, dass sich die Anschlussstecker in den richtigen Buchsen befinden. Die Lampen sind einige Minuten vor der Messung in Betrieb zu nehmen, da sich zunächst ein stabiler Lichtbogen einstellen muss. Während des Betriebs werden die Lampengehäuse sehr **heiß**! Nach dem Ausschalten der Lampen können diese erst wieder gezündet werden, wenn sie abgekühlt sind, häufiges Ein- und Ausschalten ist daher zu vermeiden. Wegen des hohen UV-Anteils der Hg Lampe **nicht direkt** in die Strahlungsquelle blicken!
- **Nicht in den Laserstrahl blicken!**
- Auch die Halogenlampe wird während des Betriebs **sehr heiß**.
- Beim Justieren darauf achten, dass das Chopperblatt nicht verbogen wird.

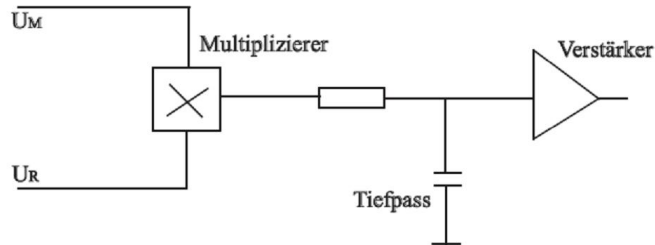


Abbildung 4: Prinzip des Lock-In-Verstärkers

## 5 Anhang

### 5.1 Der Lock-In-Verstärker

#### 5.1.1 Funktionsprinzip

Lock-In-Verstärker gestatten es, Messungen auch bei schlechtem Signal-/Rauschverhältnis durchzuführen. Neben dem eigentlichen Messsignal benötigen sie ein sogenanntes Referenzsignal, dessen Frequenz mit der des zu messenden Signals identisch ist und das z. B. über die Lichtschranke vom Chopper geliefert wird. Mit Hilfe des Referenzsignals wird der Lock-In-Verstärker in Frequenz und Phase auf das Signal abgestimmt.

Abb. 4 zeigt das Blockschaltbild eines einfachen Lock-In-Verstärkers. Das Messsignal  $U_m = U_{m0} \sin(\omega_1 t)$  und die Referenzspannung  $U_r = U_{r0} \sin(\omega_2 t + \varphi)$  werden miteinander multipliziert und durch einen Tiefpass geglättet.

Mathematisch ausgedrückt bildet der Lock-In-Verstärker also das Integral

$$U_{gl} = U_{m0} U_{r0} \int_T \sin(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t + \varphi) dt \quad (1)$$

die Integrationszeit  $T$  wird durch den Tiefpass bestimmt. Man erhält nur dann einen von Null verschiedenen Gleichspannungsanteil  $U_{gl}$ , wenn die Frequenzen  $\omega_1$  und  $\omega_2$  übereinstimmen.  $U_{gl}$  wird maximal, wenn  $\varphi = 0$  ist. Eine weitergehende Beschreibung des Lock-In-Prinzips ist in Referenz [4] zu finden.

**Aufgabe:** Veranschaulichen Sie sich die Funktion des Lock-In-Verstärkers anhand eines Signaldiagramms, indem Sie für bestimmte ausgewählte Frequenz- und Phasenverhältnisse zwischen Referenz- und Messsignal die Funktion des Verstärkers nachvollziehen. Warum ist es i. a. sinnvoll, eine möglichst hohe Referenzfrequenz zu wählen und welche Frequenzen sollte man vermeiden?

### 5.1.2 Kurzanleitung für den Lock-In-Verstärker PAR 120

Links am Verstärker ist der Eingangskanal zu erkennen. Die Eingangsempfindlichkeit lässt sich zwischen 0.1 und 50 mV variieren, sollte sie dennoch nicht ausreichen, steht ein externer Vorverstärker zur Verfügung. Daneben befindet sich der Eingang für die Referenzfrequenz, die vom Chopper bzw. von der Frequenzregelung der Dioden geliefert wird. Der Stufenschalter über der Eingangsbuchse (Mode) muss sich in der Stellung SEL.EXT befinden. In der Mitte ist ein Stufenschalter zur Grobeinstellung und ein Regler zur Feineinstellung der Phase zu erkennen. Mit ihnen muss vor Beginn der Messungen und bei jedem Empfängerwechsel ein Phasenabgleich erfolgen. Ziel dieses Abgleichs ist es, die Ausgangsspannung des Verstärkers zu maximieren. Dazu gleichen Sie den Verstärker zunächst mittels beider Regler auf Null ab, indem Sie gleichzeitig die Eingangsempfindlichkeit immer größer wählen, um dannach mit dem Grobregler die Phase um  $90^\circ$  zu drehen. Der Verstärker zeigt nun maximalen Ausschlag. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass der Nullabgleich wesentlich sensibler als ein direkter Abgleich auf maximalen Zeigerausschlag erfolgen kann.

Die Zeitkonstante kann mit einem weiteren Regler in weiten Grenzen variiert werden. Zu beachten ist jedoch, dass sich mit der Zeitkonstanten  $\tau$  auch gleichzeitig die Einstellzeit des Verstärkers vergrößert: ändert sich das Eingangssignal, so dauert es ein Mehrfaches von  $\tau$ , bis das Ausgangssignal den neuen Wert erreicht hat. Die Zeitkonstante im Messprogramm ist also geeignet zu wählen!

Unter dem Regler für die Zeitkonstante kann ein Offset eingestellt werden. Vor dem Phasenabgleich ist dieser unbedingt auf Null zu regeln. Das analoge Messinstrument zeigt schließlich in Abhängigkeit von dem Stufenschalter METER/MONITOR das Eingangssignal, die Referenzspannung oder die Ausgangsspannung des Verstärkers.

## 5.2 Messung und Auswertung mit dem Computer

Bevor Sie den Rechner in Betrieb nehmen, schalten Sie bitte alle unmittelbar mit dem Rechner in Verbindung stehenden Geräte wie Schrittmotorsteuerung, Multimeter und Ein-/Ausgabegeräte ein.

Schalten Sie den Monitor und einen evtl. vorhandenen Drucker ein.

Nachdem Sie den Rechner gestartet haben, öffnen Sie das in „Labview“ geschriebene Messprogramm. Dieses heißt „CI002“. Ein Link ist auf dem Desktop zu finden. In dem Programm ist als Schnittstelle com3 zu wählen.

## 6 Literatur

1. Bell, R.J., Introductory Fourier Transform Spectroscopy, Academic Press, 1972
2. Bergmann, Schäfer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Band III Optik, Walter de Gruyter, 1974
3. Kohlrausch, Praktische Physik 3, 22. Auflage, Tafeln 10 und 80, Verlag B.G. Teubner 1968
4. Tietze, U., Schenk, Ch., Halbleiterschaltungstechnik, 7. Auflage, Kap. 25.3.4 synchrongleichrichter, Springer Verlag 1985
5. Brigham, E. O., The Fast Fourier Transform, Prentice-Hall 1974