

Analogieversuche zur Gravitationswellendetektion - Durchführung im Praktikum -

Inhaltsverzeichnis

Nummerierung fortlaufend aus Vorbereitungsteil

3. Experimentelle Durchführung

3.1. Versuchsaufbau: Michelson-Interferometer (MI)

3.1.1 Aufbau MI

3.1.2. Betrachten der Signalform des MI

3.2. Versuchsaufbau: Michelson-Fabry-Perot Interferometer (MFPI)

3.2.1. Aufbau MFPI

3.2.2. Betrachtung der Signalform des Fabry-Perot Interferometers (FPI)

3.2.3. Betrachtung der Signalform des Michelson-Fabry-Perot Interferometers (MFPI)

3.3. Störquellen und Rauschen

3.4. Analogieversuche zur Gravitationswellendetektion

3.4.1. Beobachtung bei Spiegelbewegung durch Schallwellen

3.4.2. Datenanalyse in der Gravitationswellendetektion

3. Experimentelle Durchführung

3.1. Versuchsaufbau: Michelson Interferometer (MI)

3.1.1. Aufbau MI

Zunächst sollen Sie den Grundaufbau ein Michelson-Interferometer aufbauen und justieren. Richten Sie sich dazu nach der zum Versuch gehörenden Justieranleitung.

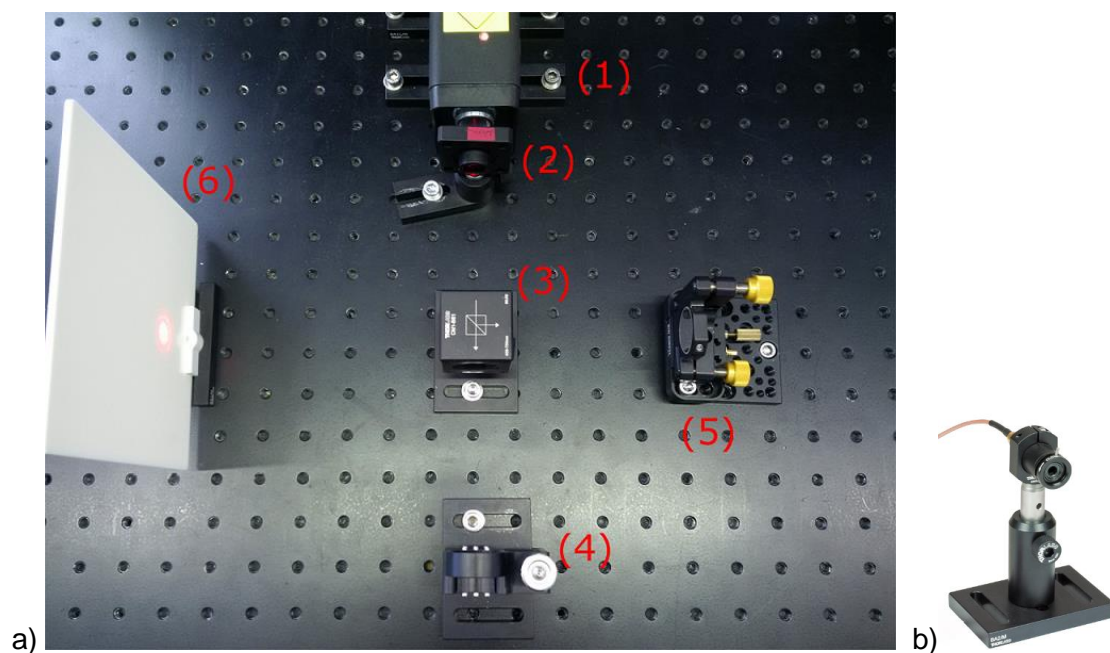


Abbildung 3.2.: a) Aufnahme des Michelson-Interferometer-Aufbaus zur Messung kleiner Armlängenänderungen mittels Piezo: (1) Laser als Lichtquelle, (2) Linse, (3) 50:50 Strahlteiler, (4) x-Arm Endspiegel in Translationshalterung, (5) y-Arm Endspiegel mit Piezo, (6) Schirm (bzw. einsetzbarem Photodetektor, s. b))

Die Lichtquelle ist ein HeNe-Laser (0,8mW Leistung) der Wellenlänge 632,8nm (1). Der Strahlteiler in der Mitte (3) besitzt ein Teilungsverhältnis von 50:50. Der Spiegel (4) im x-Arm sitzt in einer manuell verfahrbaren Translationshalterung für grobe Armlängenänderungen in Schritten im Bereich der Wellenlänge. Für eine feinere Bewegung wird im y-Arm eine im nm-Bereich verfahrbare Piezostage verwendet. Diese wird angesteuert mit einem Steuergerät (s. Bild rechts), an welchem eine externe Steuerspannung von einem Funktionsgenerator angeschlossen werden kann. Es steht die Signalgeneratorfunktion des PC Oszilloskops PicoScope zur Verfügung (s. Software-Anleitung). Zur Detektion des Signals am Interferometer-Ausgang wird eine Photodiode mit einer über einen kleinen Hebel verstellbaren Blende verwendet. Der Ausgang des Photodetektors wird an ein Oszilloskop angeschlossen und das elektrische Signal über der Zeit dargestellt. Das Signal kann auch per Fast-Fourier-Transformation (kurz *FFT*) als Frequenzspektrum dargestellt werden. Es werden ein Digitaloszilloskop sowie das PicoScope (PC Oszilloskop) verwendet. Das angezeigte Signal wird als *Photosignal* bezeichnet.



3.1.2. Betrachten der Signalform des MI

Als *Signalform* eines Interferometers wird eine Darstellung des Verlaufs der Intensität am Interferometer-Ausgang bei der Änderung einer Armlänge um mehrere Wellenlängen bezeichnet. Da alle Signalformen periodisch sind, ist der absolute Wert der Armlänge für die Signalform unerheblich. Die Armlängenänderung wird dadurch erreicht, dass mit einem Signalgenerator eine Dreiecksspannung an das Steuergerät der Piezostage angelegt wird. Dieses reagiert mit einer entsprechenden Steuerspannung, welche an die Piezostage angelegt wird. Dadurch führt die Stage eine periodische Translation aus, welche mit Ausnahme der Umkehrpunkte als gleichförmige Bewegung erachtet werden kann. Somit verhält sich die Armlängenänderung linear zur Zeit, und die Darstellung des Photosignals auf einem Oszilloskop in x-t-Darstellung entspricht der Signalform des Aufbaus. Diese Betriebsart wird häufig als *scanning*, zum Beispiel *Scanning Fabry-Perot-Interferometer*, bezeichnet. Um sicherzustellen, dass der Signalverlauf nicht an einem Umkehrpunkt betrachtet wird, kann die externe Dreiecksspannung an den zweiten Kanal des Oszilloskops angelegt und gleichzeitig dargestellt werden. Die wichtige Rolle der Signalform des verwendeten Interferometers für die Gravitationswellendetektion wurde bereits in Abschnitt 2.3.2 der Vorbereitung erläutert.

Versuch 1: Signalformen im Michelson-Interferometer

Bauen Sie ein Scanning Michelson-Interferometer auf (s. Justieranleitung). Achten Sie darauf, dass die Armlängen möglichst gleich sind. Positionieren Sie den Photodetektor zentral im Interferenzmuster. Nehmen Sie dann die Signalform auf und vergleichen Sie Ihre Aufnahmen mit der erwarteten Signalform.

3.2 Versuchsaufbau: Michelson-Fabry-Perot Interferometer (MFPI)

3.2.1. Aufbau MFPI

Nun wird in das Michelson-Interferometer zusätzlich ein Fabry-Perot-Interferometer (auch als „Kavität“ bezeichnet) eingebaut. In Abbildung 3.3 ist der Aufbau schematisch dargestellt. Dieser kommt dem Interferometerdesign von aLIGO sehr nahe.

Im Vergleich mit dem in Abb. 2.9 gezeigten schematischen Aufbau eines Gravitationswellendetektors fällt vor allem auf, dass wir – im Gegensatz zu LIGO – in unserem Analogie-Aufbau nur in einem Arm, hier im y -Arm, eine Kavität verwenden. Der Einbau einer weiteren Kavität auch im x -Arm würde den Justieraufwand deutlich erhöhen, weshalb wir im Praktikum darauf verzichten. Der Praktikumsaufbau des Michelson-Fabry-Perot- Interferometers ist in Abb. 3.4a) zu sehen, 3.4b) zeigt vergrößert noch einmal die Fabry-Perot-Kavität.

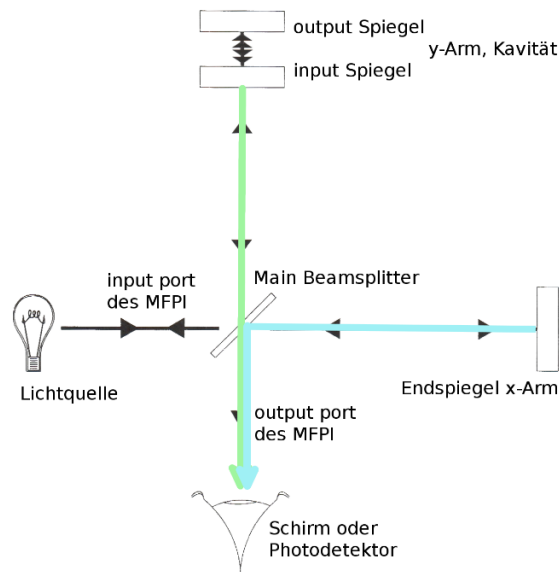


Abbildung 3.3.: Schematischer Aufbau eines Michelson-Fabry-Perot-Interferometers mit Hervorhebung der in Abschnitt 3.3.2 besprochenen Beiträge zum Interferenzmuster, abgewandelt entnommen aus [Sau94, Seite 14, Fig. 2.3]

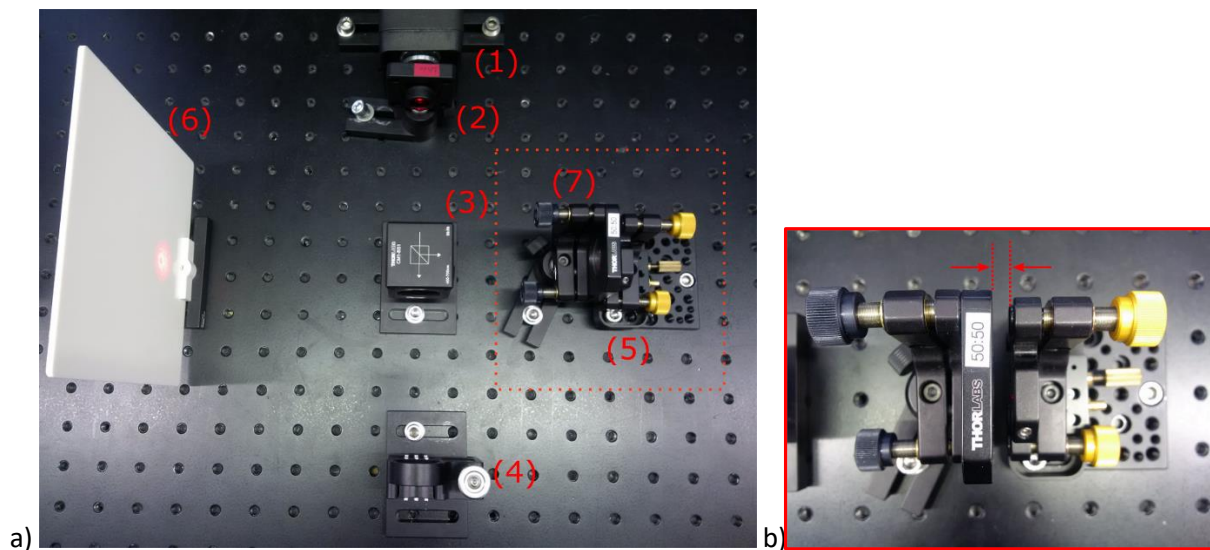


Abbildung 3.4.: a) Aufnahme des Michelson-Fabry-Perot-Interferometers ((1) Laser, (2) Linse, (3) Strahlteiler, (4) x-Arm Spiegel, (5) y-Arm Spiegel, (6) Schirm, (7) Fabry-Perot Strahlteiler). Das Fabry-Perot-Interferometer ist im roten Kästchen markiert und in b) nochmals vergrößert gezeigt. Die rote Pfeil-Markierung in b) zeigt die etwa 5mm große Kavität.

3.2.2 Betrachten der Signalform des Fabry-Perot Interferometers (FPI)

Versuch 2: *Bauen Sie ein Scanning Fabry-Perot-Interferometer auf. Messen Sie die Signalform und vergleichen Sie Ihre Aufnahmen mit der erwarteten Signalform. Ermitteln Sie aus den Aufnahmen die Finesse F und vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit dem nach Gleichung 2.22 theoretisch zu erwartenden Wert.*

Hinweis: Die resultierende Finesse dieses Fabry-Perot-Interferometers ist durch eine unzureichende Ebenheit der verwendeten Strahlteiler sehr begrenzt ist kann von dem nach Formel 2.22 bestimmten Wert abweichen.

3.2.3. Betrachten der Signalform des Michelson-Fabry-Perot Interferometers (MFPI)

Erstellen und justieren Sie den Aufbau wie in Abb. 3.4. Genauere Informationen finden Sie in der Justieranleitung.

Die Messung der Signalform kann nun komplett analog zum Michelson-Interferometer, wie in 3.1.2 beschrieben, durchgeführt werden. Die Piezostage wird für den output Spiegel der Kavität im y-Arm verwendet. Es bleibt somit die x-Armlänge für eine Messung unverändert, während die Kavitätslänge verändert wird. Für weitere Messungen wird die x-Armlänge mit der Feinstellschraube der Translationstage leicht verändert.

Versuch 3: Signalformen im Michelson-Fabry-Perot-Interferometer

Bauen Sie ein Scanning Michelson-Fabry-Perot-Interferometer auf. Nehmen Sie die Signalformen für fünf verschiedene beliebige x-Armlängen auf. Vergleichen Sie Ihre Aufnahmen mit den erwarteten Signalformen. Welchem Anteil des x-Arms an der komplexen Amplitude entsprechen Ihre aufgenommenen Situationen in etwa jeweils? (Hinweis: vgl. Abb. 2.10 bis 2.13 aus der Vorbereitung)

3.3. Störquellen und Rauschen

Versuch 4: Rauschen

Erstellen Sie eine Frequenzanalyse des Rauschens (FFT-Darstellung) Ihres Michelson-Fabry-Perot-Aufbaus und deuten Sie diese. Welche unmittelbaren Rauschquellen können Sie ausmachen? Welche lassen sich vermeiden, welche nicht?

3.4. Analogieversuche zur Gravitationswellendetektion

Die folgenden Versuche sind Analogieversuche zur Gravitationswellendetektion, bei der extrem kleine Längenänderungen detektiert werden müssen. Dazu wird in der Regel das Interferometer, wie in 2.3 beschrieben, auf seinen Arbeitspunkt eingestellt. Die Betrachtung mittels x-t Darstellung auf einem Oszilloskop dient lediglich der Kontrolle, dass der Arbeitspunkt gehalten wird. Die tatsächliche Messung findet mit einem zweiten Oszilloskop im FFT Modus, also als Frequenzanalyse des Signals, statt. Wird der Endspiegel des y-Armes mit einer bestimmten Frequenz angeregt, welche als *Piezo-* oder *Tonsignalfrequenz* bezeichnet wird, so muss in der Frequenzanalyse des Photosignals beobachtet werden, ob sich ein Peak bei der entsprechenden Frequenz zeigt. Diese Situation ist in Abbildung 3.5 gezeigt. Mit einem PC Oszilloskop lässt sich die Amplitude bei einem festen Frequenzwert durchgängig messen und Mittel- sowie Extremwerte lassen sich direkt auslesen. Außerdem ist zu beobachten, ob Oberschwingungen, also Peaks bei einem Vielfachen der entsprechenden Frequenz, auftreten.

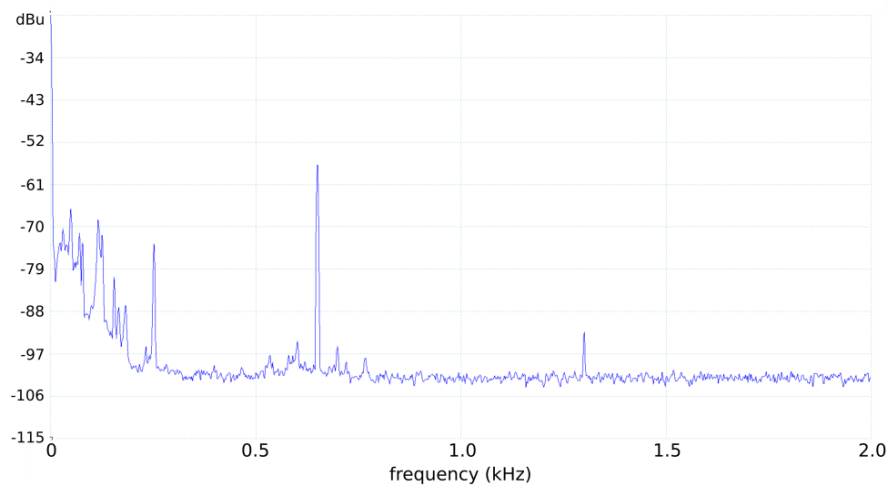


Abbildung 3.5.: Frequenzanalyse des Photosignals eines Michelson-Fabry-Perot-Interferometers während der Wiedergabe eines Tonsignals mit einer Frequenz von 650Hz. Man erkennt einen Peak bei 650Hz sowie eine zweite harmonische Anregung („Oberton“) bei 1,3kHz.

3.4.1. Beobachtung bei Spiegelbewegung durch Schallwellen

Die zweite Methode eine Spiegelbewegung zu verursachen, ist die Anregung durch Schallwellen. Dies ist das eigentliche Analogieexperiment: Die Schallwellen stehen nun stellvertretend für die Gravitationswellen bei LIGO. Verwenden Sie nun den kleinen Aktivlautsprecher, um den Aufbau mit Tonfrequenzen aus dem Signalgenerator zu beschallen. Um eine rein mechanische Übertragung des Schalls über das Breadboard zu verhindern, sollte der Lautsprecher gar nicht auf dem Breadboard positioniert sein oder mindestens auf einer dämpfenden Unterlage stehen. Bei diesem Versuch können die Lautstärke-Einstellung der Lautsprecher, sowie die Frequenz und Amplitude des Signalgenerators, mit welchem sie angesteuert werden, gewählt werden. Verwenden Sie die geringst mögliche Lautstärke bei der Sie das Signal noch detektieren können.

Versuch 5: Messen von Schallsignalen

Senden Sie nun einen 650Hz-Sinuston über den Lautsprecher in das Michelson-Fabry-Perot-Interferometer. Stellen Sie den Arbeitspunkt geeignet ein und messen Sie das Signal in der FFT-Darstellung. Wie verhält sich das Rauschen nun im Vergleich zu Versuch 4? Können Sie einen Einfluss der Einstellung des Arbeitspunktes auf das Signal-zu-Rausch-Verhältnis feststellen?

3.4.2 Datenanalyse in der Gravitationswellendetektion

Wie Sie in der Vorbereitung erfahren haben, ist das Suchen von Korrelationen eines Mess-signals und eines Referenzsignals aus einer Datenbank eine gängige und gute Methode, um im Interferometer gemessene Signale identifizieren und außerdem einem Ereignis zuordnen zu können. Im folgenden Analogieversuch sollen Sie diese Methode nun selbst ausprobieren. Das Prinzip des Versuchs funktioniert folgendermaßen:

- Sie verwenden der Einfachheit halber NUR das Michelson-Interferometer. Sie müssen jedoch den verfahrbaren Spiegel im γ -Arm austauschen und anstatt der verfahrbaren Piezo-Stage einen Spiegel verwenden, der direkt auf einen Piezo geklebt wurde.
- Nachdem Sie das Interferometer wieder justiert haben, verwenden Sie nun den Piezo im γ -Arm, um ausgewählte Signale (Audiosignale, Simulationen möglicher Gravitationswellenereignisse) aus einer zur Verfügung gestellten Datenbank in den Aufbau zu bringen (statt der Schallwelle wird das Signal nun über den Piezo eingebracht). *Übrigens: Auch bei LIGO werden auf diese Art Testsignale in das Interferometer eingebracht!*
- Sie sollen das Signal mit dem Photodetektor des Interferometers messen und auf einem Laptop abspeichern. Das Detektorsignal wird dazu mit einem handelsüblichen Audioverstärker verstärkt und mit der Freeware *audacity* aufgezeichnet.
- Nun müssen Sie herausfinden, welches Ereignis Sie gemessen haben (Supernova-Explosion, Verschmelzung von schwarzen Löchern etc.?). Dazu verwenden Sie die Korrelationsmethode (Matched Filtering), um Ihr gemessenes Signal mit den Signalen aus der zur Verfügung stehenden Datenbank zu vergleichen. Die Berechnungen führt dabei ein von uns geschriebenes python-Programm aus, das auf dem Laptop im Praktikum bereits installiert ist (siehe Softwareanleitung für Details).

Versuch 6: Einführung der Korrelationsmethode (Matched Filtering)

- *Sie finden auf dem Computer am Experimentieraufbau einen Satz an möglichen Signalen (im Ordner `template_bank` auf dem Desktop). Die Signale sind im `.wav`-Format abgespeichert und können z.B. mit dem Windows Media Player abgespielt werden. Suchen Sie sich eines der Signale aus und geben es in den EXT-Eingang des Piezo-Controllers. Zeichnen Sie mit der Software *audacity* auf dem Praktikumlaptop zeitgleich das Signal der Photodiode auf.*
- *Vergleichen Sie zunächst mit bloßem Auge das aufgezeichnete Signal und die templates in der template bank (Sie finden diese auch auf dem Laptop).*
- *Führen Sie im Anschluss mit der `matched-filtering`-Software ein `matched filtering` mit der template bank durch.*

Versuch 7: Messung mit der Korrelationsmethode

- *Wiederholen Sie Versuch 6 mit einem der Signale im Ordner `unknown`. Finden Sie mit der Korrelationsmethode heraus, welches Gravitationswellenereignis aus der template bank Sie wahrscheinlich gemessen haben.*