

O 9

Interferenz und Beugung

1. Physikalische Grundlagen

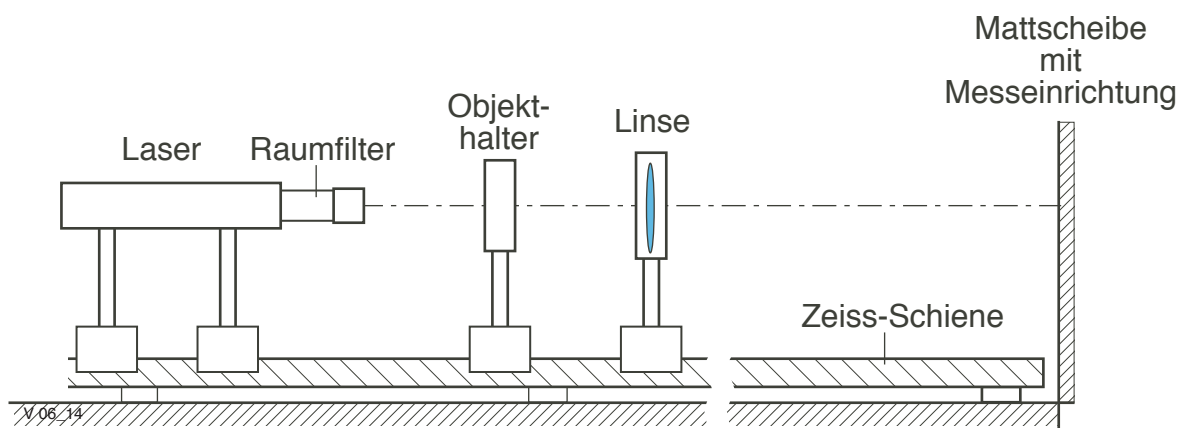
Studieren Sie die Abschnitte betreffend **Interferenz und Beugung** im Skriptum (Theorie Beugung). Es ist für das Verständnis besonders wichtig, dass man sich klar wird über den Unterschied zwischen der Beugung an einer einfachen Öffnung (Loch, Spalt) und der Beugung an einer periodischen Struktur (Gitter).

Als Ergänzung soll hier noch erwähnt werden, dass das Fraunhofer'sche Beugungsmuster eines ebenen Objektes (Öffnung oder Abdeckung) gleich der Fouriertransformierten dieses Objektes ist. Da wir in der Optik experimentell nicht das elektromagnetische Feld sondern Intensitäten messen, müssen wir das experimentell beobachtete Muster mit dem Betragsquadrat der Fouriertransformierten vergleichen. Überzeugen Sie sich von dieser "Behauptung" indem Sie mit MathCAD oder Matlab das Betragsquadrat der Fouriertransformierten eines Rechteckpulses und eines Doppelpulses berechnen und graphisch darstellen. Vergleichen Sie diesen Graphen am Versuchsnachmittag mit dem Beugungsmuster eines Einfach- resp. Doppelspaltes. Bei 2d-Objekten muss selbstverständlich eine 2d-Fouriertransformation durchgeführt werden. Bei Interesse wenden Sie sich für Genaueres an Ihren Dozenten.

2. Durchführung des Experimentes

2.1 Experimenteller Aufbau (generell)

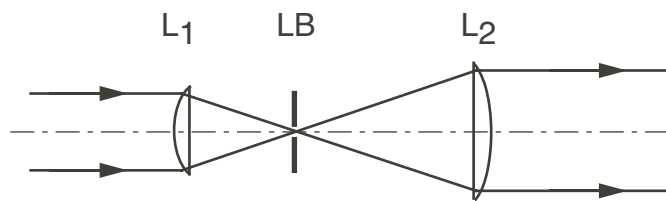
Der experimentelle Aufbau ist relativ einfach und besteht aus einer langen optischen Bank (Zeiss-Schiene), auf welcher Lichtquelle, Beugungs-Objekte und optische Komponenten montiert werden. Zur bequemen Beobachtung und Vermessung der Beugungsmuster ist am Ende der Zeiss-Schiene eine Mattscheibe mit Vermessungseinrichtung montiert.



Figur 1

Als kohärente Lichtquelle stehen ein He-Ne-Laser ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) sowie ein grüner Laserpointer (frequenzverdoppelter Nd-YAG, $\lambda = 532 \text{ nm}$) zur Verfügung. Der vom Laser emittierte Strahl ist praktisch ein Parallelstrahl (=ebene Welle) und kann direkt benutzt oder bei grösseren Objekten (zum Beispiel bei Gittern) mit einem Teleskop aufgeweitet werden. Ein solches Teleskop mit Raumfilter ist in Figur 2 dargestellt: Im Brennpunkt der Linse L_1 befindet sich eine mit Mikrometerschrauben justierbare Lochblende von $20 \mu\text{m}$ Durchmesser.

Damit wird alles von der axialen Richtung abweichende Licht des primären Bündels ausgeblendet und eine gleichmässige Verteilung der Intensität im aufgeweiteten Lichtbündel erreicht (es resultiert eine gut ebene Wellenfront). **Laser und Teleskop** sollten justiert sein. Wenn nach dem Aufsetzen des Teleskops und Anziehen der Fusschraube kein Lichtbündel sichtbar wird, ist **der Dozent beizuziehen**.

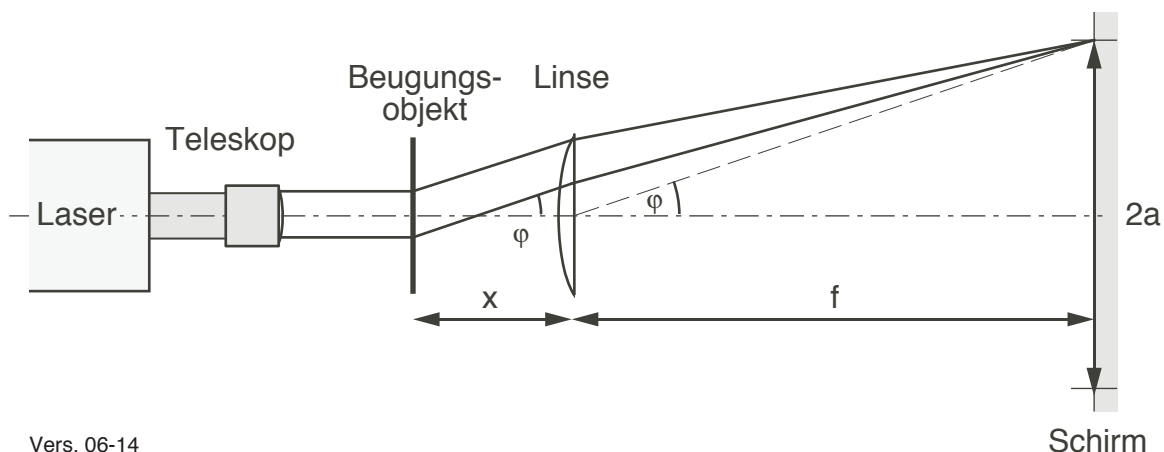


Figur 2

Teleskop weder versehentlich noch willentlich dejustieren!!!

Die optischen Bauteile, insbesondere das Teleskop-Raumfilter, sind sorgfältig zu behandeln. Das Raumfilter und andere teure Komponenten sind bei Nichtgebrauch korrekt zu versorgen resp. auf der separaten Zeisschiene festzuklemmen (**bei Beschädigung haften die Experimentatoren !**).

2.2 Fraunhofer-Beugung (Beugung bei Fraunhofer'sche Beobachtungsart)



Vers. 06-14

Figur 3

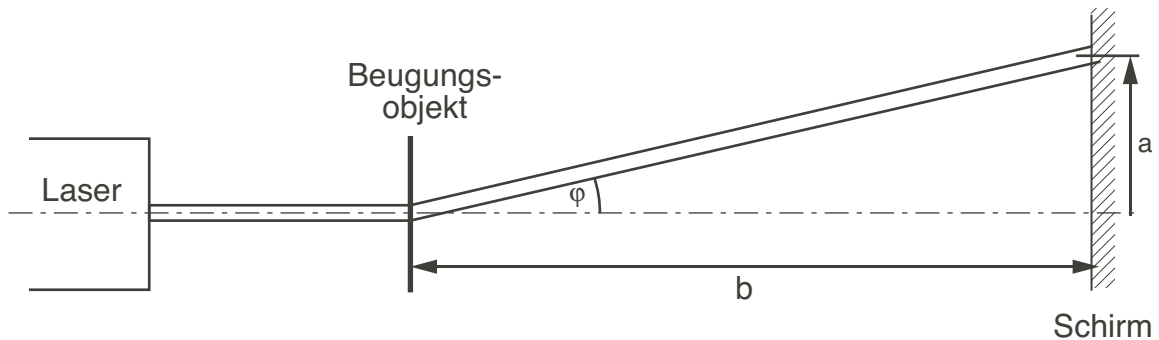
Das Beugungsmuster wird in der Brennebene einer Sammellinse beobachtet was bedeutet, dass alle mit gleicher Richtung einfallenden Strahlen im entsprechenden Punkt der Brennebene zur Interferenz gelangen. Speziell wird das nicht gebeugte Licht im Brennpunkt gesammelt. Man mache sich klar und überzeuge sich experimentell, dass die seitliche Lage des beugenden Objektes vor der Linse keinen Einfluss auf das Interferenzmuster hat. Insbesondere liefern mehrere gleiche Objekte, welche regellos angeordnet sind, dasselbe Muster wie ein einzelnes, abgesehen von der grösseren Intensität.

Beachten Sie ferner: Der Abstand zwischen beugendem Objekt und Linse bestimmt den erfassten Winkelbereich aber nicht Grösse und Form des Beugungsmusters.

Die Brennweite f der Linse bestimmt die Grösse des Interferenzmusters: Je kleiner die auftretenden Beugungswinkel, desto grösser muss die Brennweite gewählt werden, um ein bequem vermessbares Muster zu erhalten.

Bei Objekten, welche kleiner sind als der Durchmesser des primären Laserbündels, kann auf eine Aufweitung verzichtet werden. Dies hat den Vorteil dass der relative Anteil des gebeugten Lichtes erheblich grösser wird, was zu einem intensiveren Beugungsbild führt.

2.3 Direkte Beobachtung des Fernfeldes



Figur 4

Wenn der Abstand b des Objektes zum Schirm sehr viel grösser ist als der Durchmesser des beugenden Objektes und wenn der Durchmesser des Laserbündels auf dem Schirm nicht zu gross wird, kann auf die Abbildungslinse verzichtet werden. In einem Punkt des Schirms gelangen dann immer noch annähernd parallele Strahlen zur Interferenz. Allerdings ergibt sich für eine bestimmte Beugungsrichtung oder Ordnung ein Fleck vom Durchmesser des Laserbündels anstelle eines scharfen Punktes wie bei der Anordnung 2.2. Dies beeinträchtigt in vielen Fällen die Messung aber nicht. Selbstverständlich ist diese Anordnung mit aufgeweitetem Laserbündel wegen der kleinen Intensität nicht verwendbar. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass man b beliebig wählen und sehr genau messen kann, genauer als die Brennweite f in der Anordnung 2.2, wo die Lage der Linsen-Hauptebene immer etwas unsicher ist.

2.4 Details zu Beugungsobjekten und optischen Komponenten

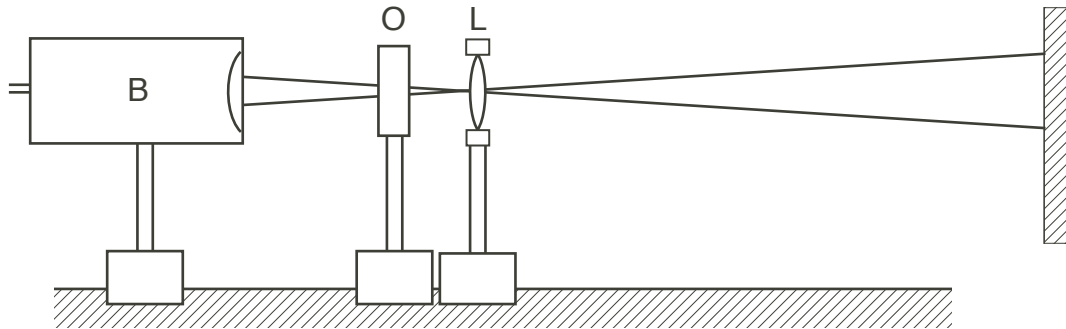
- Die Beugungs-Objekte befinden sich in einem grauen Kunststoffbehälter.
 - Behandeln Sie diese mit der nötigen Sorgfalt!
 - Zum Montieren von Haaren oder Fäden dienen die mit einer vertikalen Kerbe versehenen Aluplatten. Man befestigt das Haar / den Faden mit etwas Plastillin. Nach Gebrauch wieder entfernen.
- Als Halter für die Beugungs-Objekte dient der aus 2 Translationstischen aufgebaute Montageblock. Vorne können Sie die Aluplatten direkt oder einen Sekundärhalter zur Aufnahme von runden Objekten bzw. Dia-Objekten einstecken. Die vertikale und horizontale Ausrichtung erfolgt mittels der Translationstische, die Winkeljustierung mit der seitlichen Schraube.
- Zur qualitativen Betrachtung oder zum Photographieren der Beugungsmuster dient ein weisser Schirm, der zur Messung hochgezogen wird (verschieben Sie ihn sorgfältig).

Bitte nicht auf den Schirm zu zeichnen !

- Zum Messen wird das Beugungs-Muster auf der Mattscheibe beobachtet und vermessen. Beugungs-Maxima bzw. Minima sollen immer symmetrisch vermessen werden, da die Lage des Zentrums des Beugungsmusters nur ungenau bestimmt werden kann: Es soll z.B. der Abstand zwischen den Minimas der Ordnung $m=-5$ und $m= + 5$ gemessen und für die Auswertung durch 2 dividiert werden (ins Protokoll gehören die abgelesenen Werte!). Beachten Sie auch, dass die Genauigkeit des Resultates beim Benutzen höherer Ordnungen grösser wird (weshalb).
- Die Distanz Objekt - bzw. Linse - Schirm wird mit einem gewöhnlichen Doppelmeter gemessen.

Keine Stahlmassstäbe verwenden, da sie die Mattscheibe zerkratzen.
- Das Stereomikroskop dient zur vergleichenden optischen Vermessung der Beugungs-Objekte. Der Okularmassstab muss vorerst mit einem Glasmassstab kalibriert werden: Notieren Sie die jeweiligen Werte mit geschätzten Unsicherheiten (Fehlerrechnung!).

- Wollen Sie die Abmessungen von Beugungs-Objekten durch optische Abbildung bestimmen, so müssen Sie diese in den speziellen Dia-Halter schieben. Zur Abbildung verwendet man vorzugsweise den Achromaten $f = 20 \text{ mm}$, wobei der Abbildungsmaßstab mit Hilfe eines Objektmikrometers bestimmt wird. Dieser ist in einem grauen PVC-Rahmen gehalten, welcher ebenfalls in den Dia-Halter eingeschoben werden kann ($20 \text{ Skalenteile} = 10 \text{ mm}$). Zur Beleuchtung verwendet man eine Reuter-Lampe. Diese wird so justiert (am Stiel und den seitlichen Schrauben), dass der Wendel auf die Abbildungslinse abgebildet wird:



Figur 5

- L: Abbildungslinse in festem Abstand vom Schirm je nach gewünschter Vergrößerung.
 O: zu messendes Objekt
 B: Halogen-Lampe (12 Volt) für Beleuchtung des Objektes.

3. Aufgaben

Bei diesem Versuch ist eine grosse Zahl von Experimenten möglich, welche untenstehend beschrieben werden. Die Auswahl der Aufgaben und der Umfang der durchgeführten Experimente soll weitgehend der Initiative der Studierenden überlassen sein. Es soll bei diesem Versuch nicht in erster Linie eine grosse Zahl von Messergebnissen produziert werden sondern man bemühe sich auch um wirkliches Verständnis. Es ist deshalb unerlässlich, vor dem Vorbereiten des Laborheftes eine Auswahl zu treffen und mit dem Dozenten zu besprechen.

Als Richtlinie für den Umfang des Versuches kann gelten:

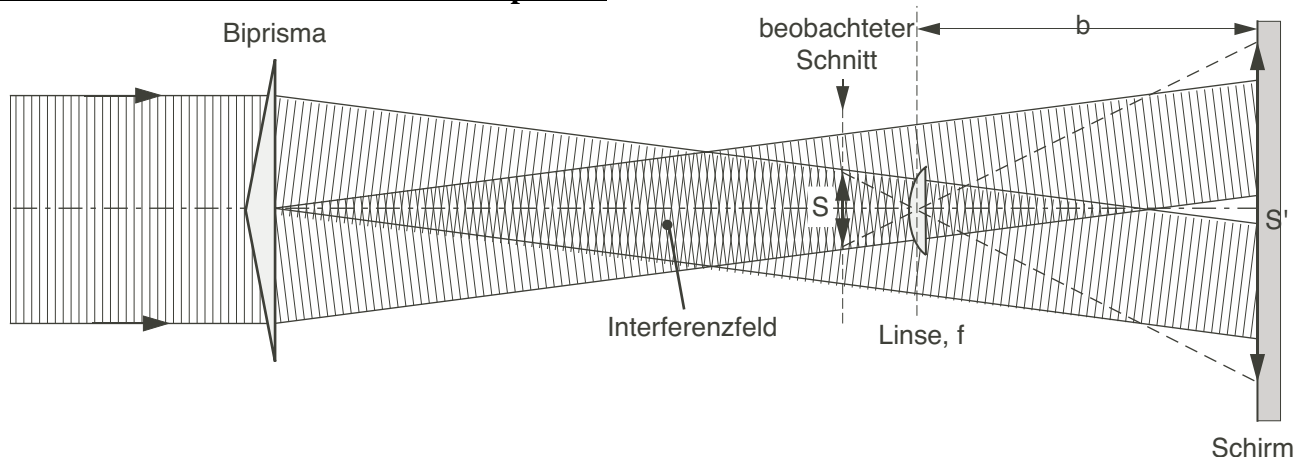
1. Beugung am Spalt und Antispalt mindestens zwei Objekte
2. Beugung am Loch und Antiloch mindestens zwei Objekte
3. Beugung an einer periodischen Struktur mindestens zwei Objekte

Eine dieser Aufgaben kann durch den Fresnel'schen Versuch ersetzt werden.

In jedem Fall sind theoretisch berechnete und gemessene Grössen **mit Fehlergrenzen** anzugeben und miteinander zu vergleichen!

3.1 Aufgaben zur Auswahl

3.1.1 Interferenz am Fresnel'schen Biprisma



Figur 6

Die einfallende ebene Welle (= aufgeweitetes Laserbündel) wird durch das Biprisma in zwei Teilwellen aufgespalten, welche in ihrem Überlappungsbereich ein räumliches Interferenzfeld bilden. Auf einem Schirm kann irgendwo ein ebener Schnitt durch dieses Feld direkt beobachtet werden. Man wird feststellen, dass die Interferenzstreifen sehr nahe beieinander liegen. Deswegen wird nun mit einer kurzbrennweitigen Linse, z.B. $f = 30 \text{ mm}$, ein stark vergrössertes Bild S' eines ebenen Schnittes S auf dem Schirm entworfen. Die Vergrösserung ergibt sich leicht aus der Brennweite f der Linse und der gemessenen Bildweite b . Für eine gute Genauigkeit sollte der Abstand zwischen Biprisma und dem Schirm möglichst gross sein.

Durch Verschieben der Linse lässt sich das ganze Interferenzfeld abtasten. Dabei kann man beobachten, wie die Breite des Feldes von der Lage des Schnittes S abhängt. Selbstverständlich ändert hierbei auch etwas die Vergrösserung, da die Bildweite b ja verändert wird.

Messungen:

Der Abstand d der Interferenzstreifen (Maxima bzw. Minima) wird für verschiedene Schnitte S aus den im Bild S' gemessenen Abständen d' ermittelt (nicht den Abstand zweier benachbarter Minimas messen, sondern ?). Aus d und der Wellenlänge des Lasers berechne man sodann den Winkel zwischen den beiden interferierenden Wellen und vergleiche diesen Wert mit dem direkt gemessenen. Zur direkten Bestimmung des Winkels zwischen den interferierenden Wellen fokussiert man die beiden Teilwellen mittels einer langbrennweitigen Linse ($f=200 \text{ cm}$) auf die Mattscheibe. Aus dem Abstand der beiden "Lichtpunkte" auf der Mattscheibe und der Brennweite erhält man sodann den gesuchten Winkel.

3.1.2 Beugung am Spalt und Antispalt (Draht)

a) Aus einigen Abständen symmetrisch liegender Minima n -ter Ordnung bestimme man die Breite des Spaltes oder Drahtes nach der Beugungstheorie mittels Regression.

Dieses Ergebnis vergleiche man mit dem direkt gemessenen (Drähte mit Mikrometerschraube, Spalte mit Hilfe einer stark vergrößernden Abbildung) und dem ev. am Objekt angeschriebenen Wert.

b) Praktische Anwendung zur Messung des Durchmessers von Drähten, Fasern, Haaren und so weiter.

3.1.3 Beugung an Loch und Antiloach (kreisförmiger Fleck auf Glasplatte)

Aus den beobachtbaren Minimas bestimmt man nach der Beugungstheorie (analog zu 3.1.2) den Durchmesser des Loches bzw. mittleren Durchmesser der Teilchen. Das Ergebnis vergleiche man mit dem angeschriebenen und/resp. mit dem aus einer Abbildung bestimmten Wert.

Anmerkung zur Untersuchung von Pollenkörnern: Bei regellos verteilten gleichen Beugungsobjekten entsteht bei Fraunhofer'scher Beobachtungsart dasselbe Interferenzmuster wie für ein einzelnes Objekt, wobei die Intensität natürlich proportional zur Zahl der Beugungszentren ansteigt. Natürliche Objekte sind nicht exakt gleich gross, sondern streuen mehr oder weniger stark um einen Mittelwert. Die Überlagerung vieler, aber etwas verschiedener Interferenzmuster der einzelnen Teilchen liefert deshalb ein etwas verschwommenes Bild, welches dem mittleren Durchmesser entspricht. Die Mittelung lässt sich sehr schön demonstrieren: ohne Aufweitung des Laserbündels werden relativ wenige Teilchen getroffen. Man beobachtet ein körniges, ziemlich undeutliches Interferenzmuster. Die hellen Punkte sind Interferenzmaxima der von verschiedenen Beugungszentren ausgehenden Wellen (vgl. Beugung am Gitter). Bei aufgeweitetem Lichtbündel werden sehr viel mehr Teilchen getroffen, wodurch die Mittelung sowohl über die Grösse, als auch über die Abstände viel besser wird.

3.1.4 Beugung am Doppelspalt (ev. Dreifachspalt)

Mit diesem berühmten Versuch hat Thomas Young 1807 die Wellennatur des Lichtes bewiesen.

Hauptzweck dieses Versuches ist, Klarheit zu gewinnen über den Unterschied zwischen Beugungserscheinungen an einfachen und mehrfachen Öffnungen. Deckt man mit einer Rasierklinge einen Spalt sorgfältig ab, so ergibt sich das bekannte Interferenzmuster des Einzelspaltes mit relativ breiten Maxima. Dieses kommt zustande durch Interferenz aller von der Spaltöffnung ausgehenden Elementarwellen.

Werden beide Öffnungen freigegeben, so beobachtet man zusätzliche, viel schärfere Minimas, welche durch Interferenz der von den beiden Öffnungen ausgehenden Wellen entstehen. Die Lage dieser Minimas ist unabhängig von der Spaltbreite b . Die Spaltbreite bestimmt lediglich die Umhüllende des Beugungsmusters. Analoges gilt für Dreifachspalte.

Messungen: Man vermesse das beobachtete Beugungsmuster (Umhüllende und Feinstruktur) und berechne daraus sowohl Spaltbreite als auch Spaltabstand. Die aus dem Beugungsmuster ermittelten Werte sind mit den angegebenen und den durch optische Abbildung bestimmten Werten zu vergleichen.

3.1.5 Beugung am Gitter (Strichgitter)

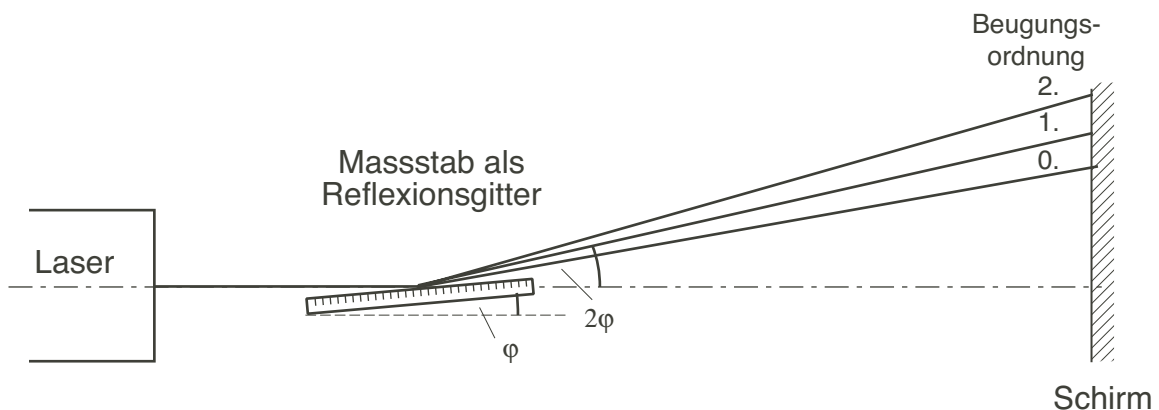
Die Maxima des Beugungsmusters liegen an denselben Stellen wie beim Doppelspalt. Ihre Lage ist unabhängig von der Zahl der Spaltöffnungen (Furchen) und hängt auch nicht von deren Form ab. Je mehr Furchen aber beteiligt sind, desto intensiver und schärfer werden die Maxima. Hierin liegt die praktische Bedeutung des Gitters, in dem es gestattet, auch eng benachbarte Spektralkomponenten zu trennen und ihre Wellenlänge zu messen.

Der Einfluss der Furchenzahl auf das Interferenzmuster lässt sich am besten mit dem Gitter von hundert Mikrometer zeigen, in dem man das Laserbündel mit und ohne Aufweitung benutzt.

Messungen:

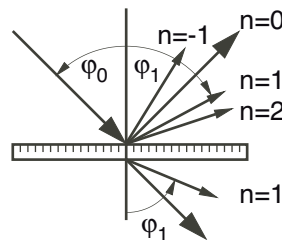
A) Man bestimme die Wellenlänge des Lasers oder umgekehrt die Gitterkonstante aus der Lage einiger Beugungsmaxima für ein bis zwei Gitter. Da hier keine Trennungsprobleme auftreten, kann auch die Versuchsanordnung 2.3 benutzt werden. Diese ist unumgänglich bei grossen Beugungswinkeln, das heisst kleinen Gitterkonstanten. Wie bei allen anderen Versuchen fitte man die theoretische Funktion an die experimentell bestimmten Werte und vergleiche das Resultat mit den angeschriebenen Werten (Über die Genauigkeit der Gitterkonstanten ist nichts bekannt).

B) Prüfung der Teilung eines Massstabes, z.B. Glasmassstab, Schiebelehre usw.: Jede lineare Teilung kann als Strichgitter verwendet werden, bei transparentem Träger in Transmission, bei undurchsichtigem Träger in Reflexion. Bei zu grossem Abstand der Teilstriche kann man das Licht zwecks Verkleinerung der effektiven Gitterkonstanten streifend einfallen lassen. Dabei muss zusätzlich der Neigungswinkel gemessen werden.



Die Formel für Beugung bei schrägem Einfall auf ein Transmissions- resp. Reflexions-Gitter lautet

$$n \cdot \lambda = d \cdot (\sin \varphi_n - \sin \varphi_0)$$



Die in dieser Formel verwendeten Konventionen sind in der Figur neben der Formel dargestellt.

3.1.6 Beugung an Kreuzgittern

Das Interferenzmuster eines zweidimensionalen Gitters hat dieselbe Symmetrie wie das Gitter und wird durch die entsprechende Zahl Gitterperioden bestimmt. Am einfachsten ist das Kreuzgitter, welches gewissermassen aus zwei um 90 Grad verdrehten Strichgittern besteht. Kreuzgitter-Beugungserscheinungen können im Alltag leicht an Geweben (Vorhänge, Regenschirm) beobachtet werden.

Im vorliegenden Versuch stehen eine Reihe von präzisen Drahtgittern zu Verfügung, welche in der Regel durch die Maschenweite w und den Drahtdurchmesser D charakterisiert sind.

Die Kreuzgitter mit ihren relativ grossen Gitterkonstanten eignen sich gut zur Demonstration des Unterschiedes zwischen Interferenzmustern an denen wenige bzw. viele Gitteröffnungen beteiligt sind. Hierzu wird das originale bzw. aufgeweitete Laserbündel benutzt.

Messungen

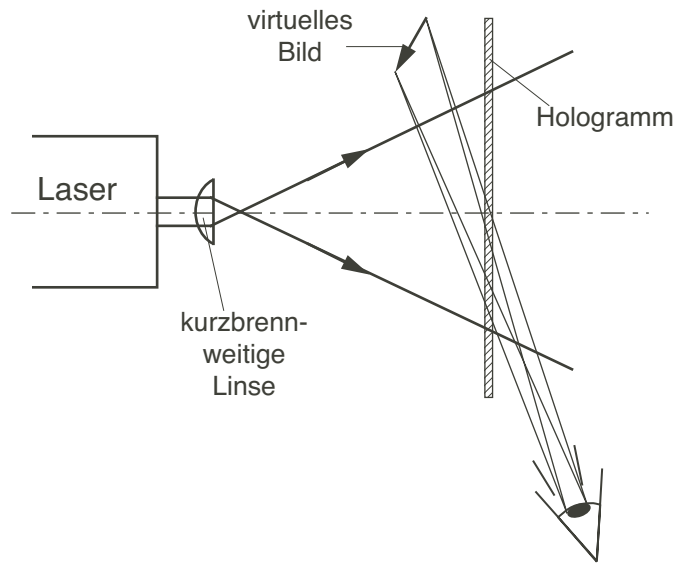
Man fotografiere das Interferenzmuster zusammen mit einem Massstab. In einem Bildbearbeitungsprogramm können dann interessierenden Strecken bestimmt und mittels Beugungstheorie ausgewertet werden. Wiederum gilt: Bei einem periodischen Muster soll eine möglichst grosse Strecke ausgemessen und dann durch die Anzahl Perioden geteilt werden. Vergleichen Sie die Ergebnisse mit den aus einer optischen Abbildung ermittelten Werten und etwaigen Herstellerangaben.

3.1.7 Demonstration eines Hologramms

Zur Theorie konsultiere man ein Optik-Buch aus der Bibliothek.

Der Versuchsaufbau ist in untenstehender Figur dargestellt. Mit Hilfe einer kurzbrennweitigen Linse (z.B. $f=20\text{ mm}$) erzeuge man ein divergentes Lichtbündel von grossem Durchmesser.

Das Hologramm annähernd senkrecht ins Lichtbündel stellen und das virtuelle Bild gemäss Figur hinter dem Hologramm suchen. Falls nichts zu sehen ist, muss das Hologramm gedreht werden. Auf der Wand sieht man eine Schattenprojektion des Hologramms. Jedes Flächenstück des Hologramms enthält die ganze Information über das Objekt. Man überzeuge sich davon indem man mit einer variablen Irisblende das Hologramm mehr oder weniger breit und an verschiedenen Stellen abdeckt. Wird nur eine kleine Fläche beleuchtet, ist der von einer bestimmten Stelle aus beobachtbare Bildausschnitt begrenzt.



4. Journalführung/Auswertung

Im experimentellen Teil des Journals ist zu jedem Teilversuch die verwendete Versuchsanordnung samt Strahlengang sorgfältig und übersichtlich zu dokumentieren.

Wie schon bei den einzelnen Aufgaben erwähnt, sind die Beugungsdaten mittels Regression auszuwerten und das Resultat mit den direkt gemessenen Werten zu vergleichen. Bei den Regressionsresultaten beachten wir, dass die Regressionsroutine die zufälligen Fehler erfasst aber nicht die systematischen: Mögliche systematische Fehler (z.B. Brennweite der Linse) müssen noch "von Hand" mit dem von der Regression gelieferten Fehler "verrechnet" werden.