

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch O5
Institut für Physik	Beugung am Gitter	Seite 1

1. Aufgabenstellung

- 1.1. Mithilfe von Licht bekannter Wellenlänge sind die Gitterkonstante und das maximale Auflösungsvermögen für die erste Beugungsordnung eines optischen Transmissionsgitters zu bestimmen.
- 1.2. In ähnlicher Anordnung ist die Wellenlänge maximaler Durchlässigkeit für ein Metallinterferenzfilter zu ermitteln.
- 1.3. Die Wellenlängen der sichtbaren Hauptlinien des Quecksilberspektrums sind mithilfe eines Reflexionsgitters zu bestimmen.
- 1.4. Der mittlere Spurbstand einer Compact Disc (CD) ist abzuschätzen.

Literatur:	Schenk, W. Kremer, F. (Hrsg.)	Physikalisches Praktikum Vieweg + Teubner Verlag Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 13. Auflage 2011, S. 263-265
	Walcher, W.	Praktikum der Physik B. G. Teubner Stuttgart Leipzig Wiesbaden 8. Auflage 2004, S. 207-209
	Eichler, H. J., Kronfeldt, H.-D. Sahm, J.	Das Neue Physikalische Grundpraktikum Springer Berlin Heidelberg New York 2. Auflage 2006, S. 400-402
	Demtröder, W.	Experimentalphysik 2, Elektrizität und Optik Springer Verlag Berlin Heidelberg New York 4. Ausgabe 2006, S. 320-327

2. Grundlagen

2.1. Beugung

Fortschreitende Wellen breiten sich in einem homogenen Medium geradlinig aus. Bringt man in das Wellenfeld ein undurchdringliches Hindernis, so kann es im zu erwartenden Schattenbereich dennoch zur kohärenten Überlagerung von Teilwellen kommen, so dass Intensitätsmaxima und -minima auftreten (*Interferenzmuster*). Diese sind besonders gut beobachtbar, wenn die Größe des Hindernisses mit der Wellenlänge vergleichbar wird.

Die quantitative Beschreibung des Beugungsphänomens gelingt mit dem *Huygens-Fresnelschen Prinzip*, indem man in einem interessierenden Raumpunkt P alle eintreffenden Elementarwellen unter Berücksichtigung ihrer Phase überlagert. Befindet sich dieser Punkt im Unendlichen, dann vereinfachen sich die Verhältnisse und man spricht von *Fraunhofer-Beugung*, deren Interferenzerscheinungen nur richtungsabhängig sind.

Eindimensionale optische Gitter (*Strichgitter*) werden beispielsweise aus einer Glasplatte gefertigt, in die in kurzen Abständen b parallele Furchen geritzt sind (*Transmissionsgitter*). Wird die Oberfläche spiegelnd metallisiert, dann erhält man ein *Reflexionsgitter*. Trifft auf das Gitter paralleles Licht, dann werden alle so entstandenen Spalte als Ausgangspunkte neuer Elementarwellen mit identischer Amplitude betrachtet. Die Elementarwellen haben am Ort der Entstehung darüber hinaus auch noch dieselbe Phasenlage, wenn die Ausbreitungsrichtung der ankommenden ebenen Welle senkrecht auf der Gitterebene steht.

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch O5
Institut für Physik	Beugung am Gitter	Seite 2

Möchte man Fraunhofer-Beugung beobachten, kann man mit Hilfe einer Abbildungslinse die Beugungsfigur in einen endlichen Abstand verschieben (*Auffangschirm*, Abb. 1). Auf die gegenseitige Phasenlage der betrachteten Teilwellen im Punkt P hat diese Maßnahme keinen Einfluss.

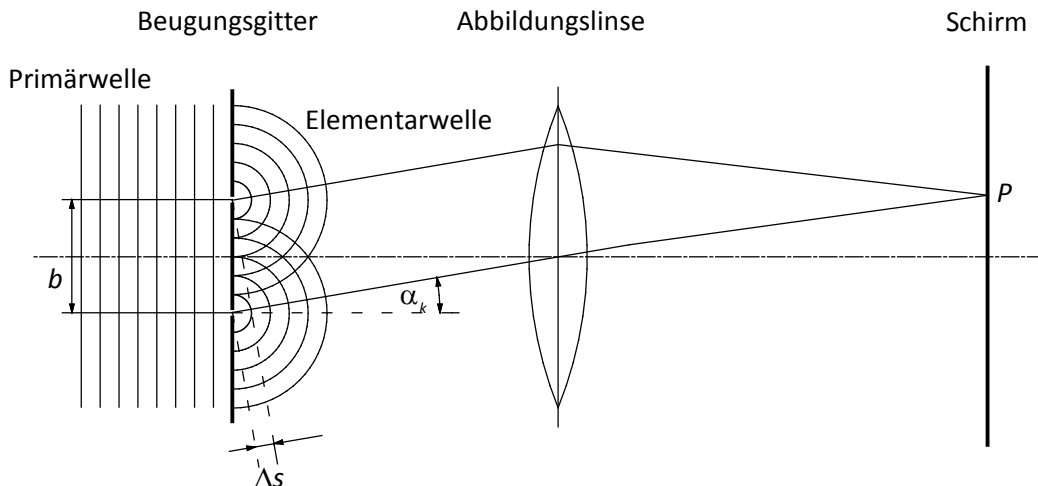


Abb. 1: Fraunhofer-Beugung an zwei ausgewählten Spalten des Beugungsgitters

Ist die auftreffende Welle monochromatisch, beobachtet man in P genau dann ein Intensitätsmaximum, wenn sich die durch zwei Elementarwellen benachbarter Spalte zurückgelegten Wegstrecken um ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge λ unterscheiden:

$$\Delta s = b \sin \alpha_k = k \lambda, \quad (1)$$

$k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ gibt die Beugungsordnung an.

Je mehr Gitterspalte an der Beugung beteiligt sind, desto schärfer werden die Intensitätsmaxima, man definiert daher als Auflösungsvermögen A eines Beugungsgitters den Quotienten $\lambda/\Delta\lambda$. $\Delta\lambda$ ist dabei der kleinste Wellenlängenunterschied benachbarter Spektrallinien, die mit Hilfe des Gitters noch voneinander trennbar sind. Man kann zeigen, dass gilt:

$$A = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = k N. \quad (2)$$

N ist die Anzahl der an der Beugung beteiligten Gitterspalte. Wird die gesamte Breite B des Gitters beleuchtet, so erhält man mit $N = B/b$ dessen maximales Auflösungsvermögen in einer bestimmten Beugungsordnung.

2.2. Compact Disc

Bei einer Compact Disc (CD) werden die enthaltenen Informationen digital in Form kleiner Vertiefungen (*Pits*) und Zwischenräume (*Lands*) in einer einzigen spiralförmigen Spur angeordnet. Die Strukturgrößen sind so gering, dass sie mit einem guten optischen Mikroskop gerade noch beobachtet werden können. Ein Spurbereich von $0,3 \mu\text{m}$ Länge beispielsweise trägt die logische Information „Null“ oder „Eins“ (*Bitzelle*). Wird eine Compact Disc von der Ausleseseite her mit weißem, annähernd parallelen

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch O5
Institut für Physik	Beugung am Gitter	Seite 3

Licht bestrahlt, dann beobachtet man auf einem geeignet angebrachten Schirm außer dem direkt zurückgeworfenen Licht ringförmig angeordnete Farbsäume, die auf die Beugung an einem Reflexionsgitter zurückzuführen sind.

Wenn auch die Qualität des Interferenzmusters nicht mit der eines optischen Präzisionsgitters vergleichbar ist, so ist dennoch bei Verwendung einer monochromatischen Lichtquelle eine Abschätzung des radialen Abstandes benachbarter Spurabschnitte möglich, so dass man sich ein Bild von der Informationsdichte dieses optischen Massenspeichers machen kann.

3. Messanleitung

3.1. Der Aufbau für die ersten beiden Versuchsteile ist in folgender Skizze dargestellt:

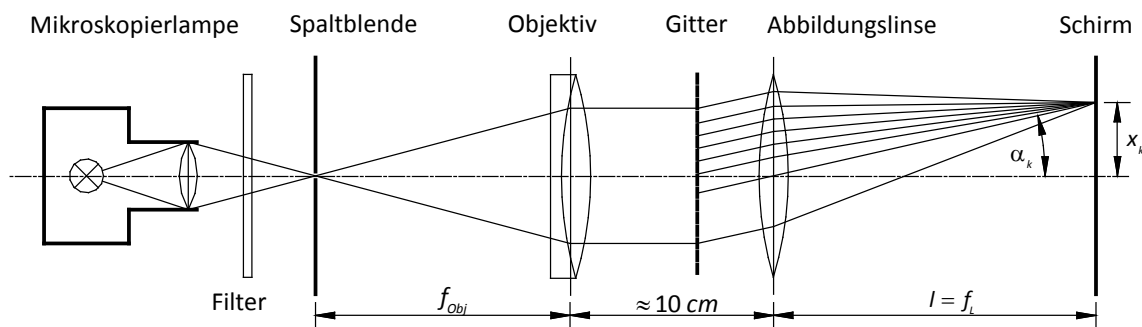


Abb. 2: Versuchsaufbau mit Transmissionsgitter

Zunächst überprüft man, ob die Achsen aller optischen Elemente etwa auf einer Höhe stehen. Verwendet werden in den beiden ersten Versuchsteilen eine Mikroskopierlampe, je ein Interferenzfilter mit bekannter bzw. unbekannter Durchlasswellenlänge, eine einstellbare Spaltblende, ein einfaches Objektiv (*zweilinsiger Achromat*), zwei Abbildungslinsen mit unterschiedlichen Brennweiten (f_l etwa 190 mm bzw. 300 mm) sowie ein Auffangschirm mit Millimeterskala.

Die Leuchtwendel der Mikroskopierlampe wird mittels des eingebauten Kondensors auf die Spaltblende (*Beleuchtungsspalt*) abgebildet. Das Objektiv ist danach so zu positionieren, dass das Bild der Blende im Unendlichen entsteht, so erreicht man annähernd paralleles Licht zwischen Objektiv und Abbildungslinse. Zur Kontrolle der Parallelität wird ein Fernrohr benutzt, das man zuvor auf ein möglichst weit entferntes Objekt außerhalb des Gebäudes scharf eingestellt hat und danach nicht mehr verändert. Blickt man unmittelbar hinter dem Objektiv mit dem Fernrohr auf den Spalt, muss dieser scharf gesehen werden, was durch die Verschiebung des Objektivs erreichbar ist.

Das Metallinterferenzfilter positioniert man zur Vermeidung störender Reflexe zwischen Lampe und Spaltblende, wichtig ist dabei, dass es genau senkrecht im Strahlengang steht, weil ansonsten die Wellenlänge maximaler Durchlässigkeit nicht ihrem Nennwert entspricht. Der Abstand zwischen Objektiv und Abbildungslinse ist unkritisch, sollte aber so kurz wie möglich sein (vgl. Angabe in Abb. 2). Das Beugungsgitter bringt man erst ganz zum Schluss für die Messung in den Strahlengang.

Gemäß Gl. (1) ist für das orangefarbige Licht des ersten Interferenzfilters ein größerer Beugungswinkel zu erwarten als für das blaue Licht des anderen Filters. Zur Verringerung der relativen Messunsicher-

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch O5
Institut für Physik	Beugung am Gitter	Seite 4

heiten ist ein möglichst großes x_k anzustreben, angepasst an die Größe des Auffangschirmes werden deshalb Linsen unterschiedlicher Brennweite für die Erzeugung des Spaltbildes verwendet:

- Orangefilter (λ_{\max} aufgedruckt): Linse 1 ($f_L \approx 190 \text{ mm}$)
- Blaufilter (λ_{\max} unbekannt): Linse 2 ($f_L \approx 300 \text{ mm}$)

Messgrößen sind die Abbildungslänge $l = f_L$ und der gemittelte Abstand x_k zwischen den Beugungsbildern nullter und k -ter Ordnung, wobei sich k auf die Werte +1 und -1 beschränkt.

- Hinweis: Die Position der Schirmebene lässt sich direkt an der Marke des optischen Reiters ablesen, die beiden Abbildungslinsen sind so auf dem optischen Reiter montiert, dass bei korrekter Ausrichtung die bildseitige Hauptebene mit einer Reiterfläche zusammenfällt.

Zur Berechnung der Gitterkonstanten b nach Gl. (1) wird

$$\sin \alpha_k = \frac{x_k}{\sqrt{x_k^2 + l^2}} = \frac{\tan \alpha_k}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha_k}} \quad (3)$$

verwendet. Die Berechnung der kombinierten Unsicherheiten erfolgt auf Basis der geschätzten Unsicherheiten der Messgrößen x_k ($k = \pm 1$) und l .

3.2. In gleicher Versuchsanordnung wie unter 3.1 wird lediglich das Interferenzfilter mit bekannter gegen das mit unbekannter Wellenlänge ausgetauscht und Linse 1 durch Linse 2 ersetzt. Es empfiehlt sich eine nochmalige Kontrolle der Objektivposition. Mit der vorher ermittelten Gitterkonstanten b und dem gemittelten x_k der Spaltbilder k -ter Ordnung ($k = \pm 1$) wird λ_{\max} ebenfalls nach Gl. (1) und (3) berechnet.

3.3. Zur Bestimmung der Wellenlängen der stärksten Quecksilberlinien steht ein hochwertiges Reflexionsgitter vom Echelette-Typ zur Verfügung (Abb. 3). Es konzentriert infolge reflektierender sägezahnförmiger Furchen den größten Teil des auftreffenden Lichts in eine einzige Beugungsordnung. Man vergleiche hierzu am fertigen Versuchsaufbau die Intensitäten der positiven mit denen der negativen ersten Beugungsordnung!

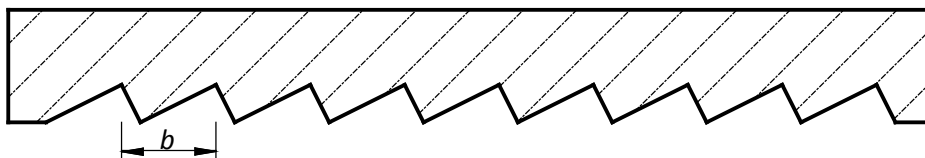


Abb. 3: Stark vergrößerter Querschnitt durch ein Echelette-Gitter (b - Gitterkonstante)

Achtung! Das eingesetzte Reflexionsgitter ist ein hochwertiges optisches Bauelement. Sprechen Sie niemals über der ungeschützten Oberfläche oder berühren Sie sie gar. Setzen Sie nach Beendigung der Messungen die Schutzkappe wieder auf den Gitterhalter.

Unmittelbar hinter der Quecksilber-Hochdrucklampe wird die Kondensorlinse mit der ebenen Fläche zur Lichtquelle hin aufgestellt und damit ein Bild des Lichtbogens auf den Beleuchtungsspalt entwor-

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch O5
Institut für Physik	Beugung am Gitter	Seite 5

fen. Seine Länge sollte dann etwa der Höhe des Spaltes entsprechen. Lampengehäuse und Spalt haben den geringsten Justierspielraum und legen die Höhe der optischen Achse fest. Das Objektiv wird zunächst so platziert, dass das Bild des Spaltes an der nächsten Zimmerwand scharf erscheint. Den optischen Reiter mit Messlineal setzt man in Lichtrichtung nach dem Objektiv so auf die Schiene, dass für den Objektivreiter ein Verschiebeweg zum Lineal von mindestens 5cm verbleibt.

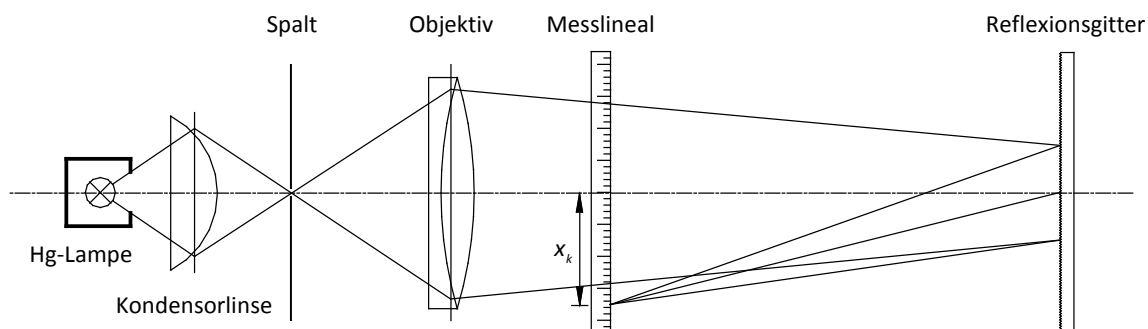


Abb. 4: Versuchsaufbau mit Reflexionsgitter bzw. Compact Disc

Das Reflexionsgitter stellt man in solcher Entfernung vom Messlineal auf, dass für die gelben Spektrallinien positiver und negativer erster Ordnung ein möglichst großes x_k ablesbar ist (vgl. Abb. 4). Durch Verschieben des Objektivs und Verdrehen des Reflexionsgitters wird zunächst der direkte Reflex als Spaltbild nullter Ordnung auf die Nullmarke des Lineals scharfgestellt. Sollte dies nicht gelingen, ist die korrekte Position aller Elemente auf der optischen Achse (auch Höhenjustage) zu überprüfen.

Weitere Hinweise zum Experiment:

- Bedingt durch die Abbildungseigenschaften des Objektivs sind nicht alle Spektrallinien auf dem Messlineal gleichzeitig scharfstellbar. Für die korrekte Bestimmung von x_k muss die Position des Objektivs jeweils geringfügig korrigiert werden. Dies lässt sich „spielfrei“ mit dem Verschiebetisch des Objektivhalters realisieren.
- Die Breite des Beleuchtungsspalt sollte nur so groß sein, dass die Feinstruktur der gelben Spektrallinie (Doppellinie) gut erkennbar ist.
- Der Auffangschirm des Messlineals wurde mit einer weißen Fluoreszenzfarbe gespritzt. Auf dieser Oberfläche sind daher die Linien auch am violetten Rand des Spektrums und sogar im beginnenden ultravioletten Bereich gut sichtbar.
- Angaben zum Reflexionsgitter: Liniendichte 651 L/mm entspricht $b=1,5361\text{ }\mu\text{m}$
- Wegen der Empfindlichkeit des Reflexionsgitters soll der Abstand zum Auffangschirm nicht direkt gemessen werden, sondern nur die Position l^* einer Kante des Gitterhalters auf der optischen Schiene. Diese wird im weiteren Gang des Experiments für mindestens 10 verschiedene Abstände in 2cm -Schritten Richtung Messlineal verändert. Zu jedem l^* sind die Abstände x_k mit $k = 1$ für 5 bis 6 Spektrallinien zu notieren.

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch O5
Institut für Physik	Beugung am Gitter	Seite 6

Die Wellenlängen der beobachteten Spektrallinien ergeben sich aus Gl. (1) und (3), wobei $\tan\alpha_k$ als Anstieg S der Ausgleichsgeraden durch die grafisch dargestellten Messwerte $x_k(I^*)$ für jede Linie zu bestimmen ist. Für die Berechnung der Unsicherheiten werden im Unterschied zu 3.1 die vom Praktikumsprogramm angegebenen Unsicherheiten der Anstiege verwendet, die gefundenen Wellenlängen sind mit Tabellenwerten zu vergleichen.

3.4. Für die Bestimmung des radialen Spurbabstandes einer Compact Disc wird die gleiche Messanordnung wie in 3.3 verwendet. Anstelle des Reflexionsgitters wird die CD in einer seitlich verstellbaren Halterung in den Strahlengang gebracht und so beleuchtet, dass möglichst senkrecht verlaufende Spurbabschnitte das Beugungsbild auf das Messlineal reflektieren. Da die Spektrallinien jetzt nicht mehr so scharf sind, kann mit einer größeren Breite des Beleuchtungsspalt gearbeitet werden.

Mit Hilfe der nun bekannten Wellenlänge der grünen oder gelben Hg-Linie wird für einen möglichst großen Abstand l der CD vom Messlineal der Abstand x_k für die positive und negative erste Beugungsordnung gemessen und hieraus die Gitterkonstante (mittlerer Spurbabstand) einschließlich der aus der Messung resultierenden Unsicherheit berechnet.