

OPTISCHE SPEKTROSKOPIE

GP II

Stichworte

Dispersion; Prismen. Beugung und Interferenz; Beugungsgitter. Spektralapparate und Spektralanalyse.

Ziele des Versuchs

Phänomenologische und experimentelle Einführung in elementare Grundlagen der optischen Spektroskopie als bedeutsame wissenschaftliche und angewandte Untersuchungsmethode in vielen naturwissenschaftlichen Arbeitsgebieten.

Literatur

[1]: Kapitel 9.1.5, 10.1,1 mit 10.1.6, 13.1, 13.2.3

[4]: Kapitel 2.3, 3.9, 7.6.1

Aufgaben

1. Aufbau und Justierung des Spektrometers (Beleuchtung, Kollimator, Fernrohr).

Wahlweise Aufgabenstellungen am Prismenspektrometer oder am Gitterspektrometer:

Prismenspektrometer

2. Messung des Winkels der brechenden Kante eines Prismas.
3. Aufnahme des Spektrums einer Quecksilber-Spektrallampe zur Kalibrierung des Spektrometers.
4. Eine der nachfolgend angegebenen spektroskopischen Aufgabenstellungen.
5. Aufnahme der Dispersionskurve $n(\lambda)$ und Bestimmung der differentiellen Dispersion $dn/d\lambda$ für die 577/579-nm-Linien von Quecksilber.
6. Bestimmung des Auflösungsvermögens des Prismas und Vergleich mit der theoretischen Erwartung.

7. Qualitative Beobachtung und Diskussion des Beugungsspektrums eines Beugungsgitters.

Gitterspektrometer

2. Aufnahme des Spektrums einer Quecksilber-Spektrallampe in der ersten und der zweiten Ordnung und Bestimmung der Gitterkonstanten.
3. Eine der nachfolgend angegebenen spektroskopischen Aufgabenstellungen.
4. Bestimmung des Auflösungsvermögens des Gitters in erster und zweiter Ordnung und Vergleich mit den theoretischen Erwartungen.
5. Qualitative Beobachtung und Diskussion des Dispersionspektrums eines Prismas

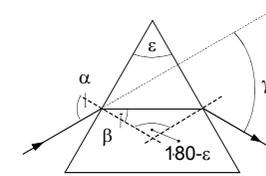
Spektroskopische Aufgabenstellungen

- b) Spektroskopie einer unbekanntes Lampe und Analyse der Lampenfüllung.

Physikalische GrundlagenPrisma

Der Durchgang von Licht durch transparente Medien stellt ein Resonanzphänomen dar mit einer als *Dispersion* bezeichneten Frequenz- bzw. Wellenlängenabhängigkeit des Brechungsindex n . Licht verschiedener Wellenlänge wird demzufolge an einer Grenzfläche unterschiedlich gebrochen und so in seine spektralen Anteile zerlegt.

An einem Prisma hängt der gesamte Ablenkwinkel bei Durchgang durch die beiden Grenzflächen neben dem Brechungsindex zusätzlich von der Richtung des einfallenden Lichtes ab. Einfache Verhältnisse ergeben sich für den Sonderfall, dass ein Lichtstrahl das Prisma parallel zur Basis und damit symmetrisch durchsetzt. Der gesamte Ablenkwinkel wird in diesem Fall minimal (*Minimalablenkung*). Für den Eintritts- und Austrittswinkel an einer der Grenzflächen folgt aus den geometrischen Verhältnissen (siehe folgende Abbildung):



$$\beta = \frac{\epsilon}{2} \quad \text{und}$$

$$\gamma = 2(\alpha - \beta) \quad \text{bzw.}$$

$$(1) \quad \alpha = \frac{\gamma + \epsilon}{2}$$

wobei ϵ der Winkel der *brechenden Kante* des Prismas ist. Aus dem Brechungsgesetz lässt sich dann mit (1) der Brechungsindex des Prismenmediums berechnen. (Der Brechungsindex n_0 der umgebenden Luft hat den Wert 1,0003).

Prismen finden in der Spektroskopie oder zur Lichtfilterung Anwendung. Als *Dispersionsvermögen* eines Prismas wird die Winkeldifferenz zwischen der Ablenkung roten und violetten Lichts bezeichnet. Es bestimmt das Auflösungsvermögen des Prismas und die "Länge" des Spektrums.

Das Dispersionsvermögen und der Brechungsindex sind unabhängig voneinander. So ist der Brechungsindex von Flintglas nur wenig größer als der von Kron- glas, das Dispersionsvermögen dagegen fast doppelt so groß. Das unterschiedliche Verhalten der verschiedenen Glassorten ermöglicht die Konstruktion von Prismen, die stark ablenken, aber nicht dispergieren (Ablenkprisma, *achromatisches Prisma*) oder von Prismen, die dispergieren, aber nicht ablenken (*Geradsichtprisma*).

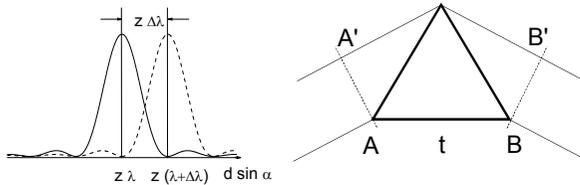
Auflösungskriterien

Die Festlegung des Auflösungsvermögens eines Spektralapparats erfordert eine konventionelle Festlegung darüber, wann zwei Spektrallinien als getrennt betrachtet werden sollen. Allgemein, aber praktikabel ist das *Sparrow-Kriterium*, wonach zwei Linien als getrennt anzusehen sind, wenn sie ein relatives Minimum besitzen. Quantitativ bestimmter ist das *Rayleigh-Kriterium* (*John William Strutt*, seit 1873 *Baron Rayleigh*; 1842-1919; engl. Physiker), dass Linien dann als getrennt zu betrachten sind, wenn das Beugungsmaximum der einen Linie mit dem ersten Beugungsminimum der anderen Linie zusammenfällt (siehe Abbildung). Die Intensität im Minimum dieser Doppellinie fällt dann auf den Wert $8/\pi^2$ des Maximums.

Auflösungsvermögen des Prismas

Das endliche Auflösungsvermögen des Prismas ist beugungsbedingt, da es eine Begrenzung für den Strahlengang darstellt. Es lässt sich aus einer Betrachtung der optischen Weglängen am Prisma herleiten (siehe Abbildung).

A-A' und B-B' stellen zwei Wellenfronten vor und hinter dem Prisma dar, die zu einer Ablenkrichtung gehören, unter der entsprechend dem *Rayleigh-Kriterium* für die Wellenlänge λ das Hauptmaximum und für die Wellenlänge $\lambda+\Delta\lambda$ das erste Nebenminimum liegen sollen.



Rayleigh-Kriterium

Auflösung am Prisma

Für das Hauptmaximum (zu λ) dürfen die Strahlen keinen Gangunterschied aufweisen, während das erste Nebenminimum im Beugungsdiagramm (zu $\lambda+\Delta\lambda$) dann entsteht, wenn die Randstrahlen gerade einen Gangunterschied von einer Wellenlänge aufweisen (siehe Versuch *BEUGUNG UND INTERFERENZ*).

Für den Brechungsindex in Abhängigkeit von λ soll für die kleine Wellenlängendifferenz näherungsweise ein linearer Ansatz herangezogen werden:

$$(2) \quad n(\lambda) = n \quad \text{und} \quad n(\lambda + \Delta\lambda) = n + \frac{dn}{d\lambda} \Delta\lambda$$

Da der optische Weg von A' nach B' wegen $n \approx 1$ für beide Wellenlängen gleich ist, muss ein Gangunterschied von λ an der Basis des Prismas (Basislänge t) entstehen:

$$(3) \quad \left(n + \frac{dn}{d\lambda} \Delta\lambda \right) t - n t = \lambda$$

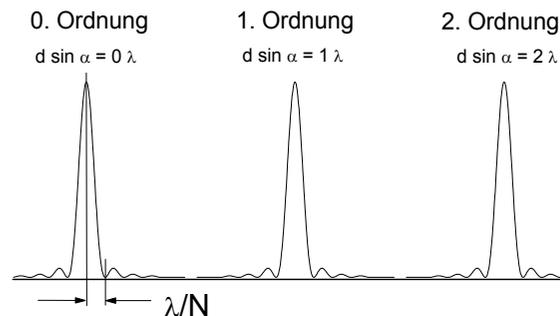
Das Auflösungsvermögen des Prismas wird demnach durch die Basislänge t (die die Öffnung des Prismas darstellt) und die *differentielle Dispersion* $dn/d\lambda$ bestimmt.

Beugungsgitter

Ein Gitter ist in einer einfachen Vorstellung eine Blende mit einer periodischen Folge scharf und undurchlässig begrenzter Spalte. Praktisch gebräuchliche Gitter werden z.B. durch Ritzen einer Glasplatte hergestellt und entsprechen diesem Bild nicht. Allgemein wird von einem Gitter immer dann gesprochen, wenn bei einem Objekt eine Transmission (oder Reflexion) periodisch im Abstand d , der *Gitterkonstanten*, wiederkehrt.

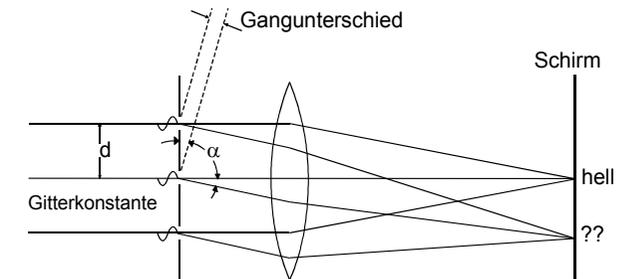
Beleuchtet man ein Gitter mit kohärentem Licht bzw. modellmäßig mit einer monochromatischen, ebenen Welle, so beobachtet man hinter dem Gitter eine ebenfalls periodische Intensitätsverteilung, die durch die Prinzipien von Beugung und Interferenz erklärt werden kann. Vergleichsweise einfache Verhältnisse ergeben sich für eine *Aufpunktebene* (Beobachtungsebene) im Unendlichen, die praktisch durch eine nachfolgende Sammellinse hinter dem Gitter realisiert werden kann. Die so entstehende Intensitätsverteilung heißt *Fraunhofersches Beugungsdiagramm* (Joseph Fraunhofer, 1787-1826, dt. Optiker und Physiker).

Dabei entstehen scharfe *Beugungsmaxima* (Hauptmaxima), die durch breite Zonen mit weitgehender Auslöschung getrennt sind (siehe Abbildung; in der Abbildung sind die Zonen der Auslöschung zur zeichnerischen Auflösung der Nebenmaxima unmaßstäblich breit dargestellt):



Die Hauptmaxima lassen sich vergleichsweise einfach aus der Bedingung herleiten, dass der Gangunterschied von Strahlen benachbarter Spalte für *konstruktive Interferenz* ein ganzzahlig Vielfaches der Wellenlänge betragen muss (siehe Abbildung):

$$(4) \quad d \sin \alpha = z \lambda \quad \text{mit} \quad z = 0, 1, 2, \dots$$



Die Laufzahl z wird als *Ordnung* der Beugungsmaxima bezeichnet. Da bei gegebenen Gitterkonstanten die Lage der Maxima neben der Ordnung nur von der Wellenlänge abhängig ist, können mit Hilfe des Gitters (absolute) Wellenlängenmessungen vorgenommen werden.

Auflösungsvermögen des Gitters

Neben den durch (4) gegebenen Hauptmaxima existiert eine Folge von Nebenmaxima, deren Intensität aber mit zunehmendem Abstand vom Hauptmaximum sehr schnell gegen Null geht. Die Lage des ersten Nebenminimums der Ordnung z ist gegeben durch:

$$(5) \quad d \sin \alpha_{\min} = \left(z + \frac{1}{N} \right) \lambda$$

wenn N die Gesamtzahl der beitragenden Gitterspalte ist. (Für gerades N kann diese Beziehung in Strenge abgeleitet werden, indem man sich das Gitter in zwei gleiche Abschnitte mit halber Spaltzahl geteilt denkt, und die Spalte paarweise destruktiv, d.h. mit dem Gangunterschied $\lambda/2$, interferieren lässt).

Setzt man gemäß dem *Rayleigh-Kriterium* für das Hauptmaximum die Bedingung (4) mit einer Wellenlänge $\lambda+\Delta\lambda$ und für das Nebenminimum die Bedingung (5)

mit der Wellenlänge λ ein, so folgt für die auflösbare Wellenlängendifferenz bzw. für das Auflösungsvermögen:

$$(6) \quad \Delta\lambda = \frac{\lambda}{zN} \quad \text{bzw.} \quad \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = zN$$

d.h. das Auflösungsvermögen steigt mit wachsender Spaltzahl und mit steigender Ordnung.

Wasserstoffspektrum und Rydbergkonstante

Im Jahre 1885 fand der Schweizer Mathematiker und Physiker *Johann Jakob Balmer* (1825-1898) bei der empirischen Analyse der charakteristischen Linienserie des Wasserstoff (*Balmer-Serie*), dass sich die Wellenzahlen der Linien als Differenz zweier Terme schreiben lassen:

$$(7) \quad \frac{1}{\lambda} = R \left[\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right] \quad \text{mit} \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

Diese Entdeckung wurde später eine wichtige Stütze des *Bohrschen-Atommodells* (*Niels Bohr*, dän. Physiker; 1885-1962), nach der die Strahlung der Atome durch den Übergang von Elektronen zwischen zwei Niveaus verursacht wird. Die Konstante R in der Beziehung ist die *Rydberg-Konstante* (*Johannes Rydberg*, 1854-1919; schwed. Physiker):

$$(8) \quad R = \frac{2\pi^2 m_e e^4}{h^3 c}$$

Apparatur und Geräte

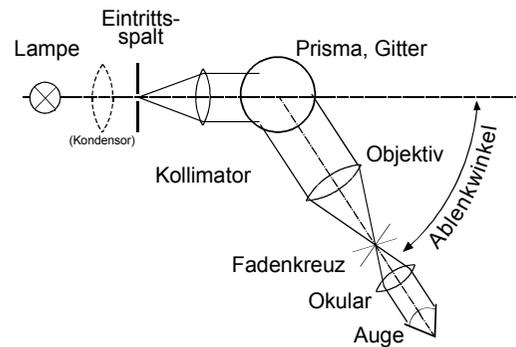
Goniometeraufbau (Winkel-Messeinrichtung) aus Dreikantschienen mit neig- und drehbarem Prismen- bzw. Gittertisch.

Optische Komponenten: Eintrittsspalt, Kollimatorlinse, Objektiv, Okular mit Fadenkreuz.

Justier-Fadenkreuz (zur Winkelmessung am Prisma), Messspalt (zum Auflösungsvermögen). Spektrallampen mit Netzgerät: Hg-Lampe, unbekannte Lampen.

Versuchsdurchführung und Auswertung

Ein Spektralapparat (Spektrometer) für visuelle Beobachtung besteht aus einem Goniometer zur Winkelmessung, einem Eintrittsspalt mit Kollimator zur Erzeugung parallelen Lichts, dem dispersiven Element (Prisma, Gitter) und einem Beobachtungsfernrohr. Es wird meist durch einen Beleuchtungsapparat ergänzt, der dem Spektrometer das zu untersuchende Licht zuführt (Kondensor). Siehe auch Abbildung.



Justierung

Voraussetzung für quantitativ einwandfreie Ergebnisse optischer Experimente ist eine sehr sorgfältige Justierung des optischen Aufbaus, durch die darüber hinaus ein Verständnis für die Grundlagen der geometrischen Optik vermittelt wird.

Zur Festlegung der Höhenachse sind die Kollimatorlinse und das Objektiv in der Höhe fest eingestellt. Die übrigen Bauteile müssen gut auf diese Höhe ausgerichtet werden.

Ein Beleuchtungsapparat ist wegen der hohen Leuchtdichte der Lampen nicht erforderlich, und zur Justierung wird die Hg-Spektrallampe direkt hinter den Eintrittsspalt aufgestellt. Der Spalt stellt eine (in einer Raumrichtung) näherungsweise punktförmige, sekundäre Lichtquelle dar.

Die Justierung des Kollimators erfolgt durch Autokollimation. Das vom Kollimator ausgehende Licht wird an einem auf dem Prismen-tisch aufgestellten Spiegel reflektiert, wobei der Spalt bei richtiger Justierung des Kollimators scharf auf sich selbst zurück abgebildet

wird. Die Justierung kann bei etwas seitlich verschobener Abbildung auf die eine Spaltbacke kontrolliert werden.

Das Fadenkreuz des Okulars wird bei entspanntem Auge gegen einen diffus beleuchteten Hintergrund fokussiert. Das Okular wird dann am Ende des schwenkbaren Arms des Goniometers aufgestellt.

Die Objektivlinse wird schließlich so justiert, dass der Spalt scharf auf die Beobachtungsebene im Okular abgebildet wird. Kriterium für eine einwandfreie Justierung ist Parallaxenfreiheit, d.h. dass sich das Spaltbild und das Fadenkreuz bei seitlicher Bewegung des Auges nicht gegeneinander verschieben. Ursachen für ein schlechtes Spaltbild können, neben falscher Justierung des Kollimators oder des Objektivs, ein zu weit geöffnetes oder geschlossenes, ein schräggestelltes oder ein verschmutztes Spalt sein. Eine leichte Überstrahlung des Spaltes lässt sich dagegen unter den gegebenen Umständen nicht vermeiden.

Der Winkel zwischen der Kollimator- und der Fernrohrachse kann an einer Winkelskala mit einem 1/100-Grad-Nonius abgelesen werden. Zur Gewährleistung einer hohen Ablesesicherheit ist der Gebrauch des Nonius vor Beginn der Messungen zu üben.

Fehlerschätzung

Insbesondere bei optischen Versuchen sind alle Mess-einstellungen zu wiederholen (Kontrollmessung), um aus der Reproduzierbarkeit bzw. den beobachteten Abweichungen Aussagen über die Fehler treffen zu können (Schätzfehler).

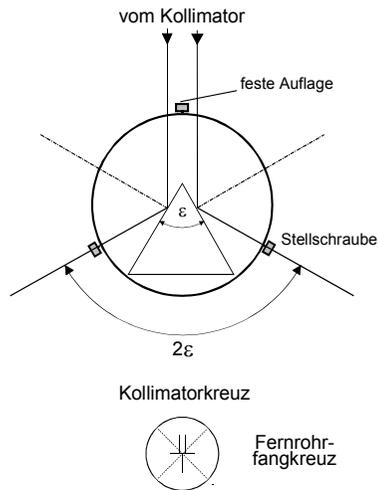
Prismenspektrometer

Zu Aufgabe 1 (Winkel der brechenden Kante; siehe Abbildung auf der folgenden Seite)

Zur Winkelmessung an der brechenden Kante wird an Stelle des Eintrittsspalts ein Fadenkreuz auf einer Mattscheibe in den Strahlengang gesetzt (Fadenkreuz zum Fernrohr), scharf gestellt und in der Höhe so ausgerichtet, dass die Schnittpunkte der beiden Fadenkreuze (im Kollimator und im Okular) zur Deckung gebracht werden können.

Der Prismentisch wird zunächst nach Augenmaß horizontal ausgerichtet und so gedreht, dass eine der drei Neigungs-Stellschrauben zum Kollimator zeigt, und die beiden anderen entsprechend in die Beobachtungsrichtungen.

Dann wird das Prisma so auf dem Prismentisch aufgestellt, dass das von den beiden Seitenflächen reflektierte Licht mit dem Fadenkreuz im Fernrohr beobachtet werden kann.



Das Prisma muss dabei vergleichsweise weit zum Fernrohr verschoben sein, da die Ausleuchtung sehr schmal ist und die Seitenflächen nur an der Spitze des Prismas trifft.

Nun wird die Ausrichtung der Prismenseitenflächen senkrecht zur optischen Achse fein justiert, indem man sukzessive auf beiden Seiten die Fadenkreuze beobachtet und durch Justierung an den jeweils gegenüberliegenden Stellschrauben auf gleiche Höhe ausrichtet. Die Einstellungen sind so lange fortzuführen, bis die Höhe auf beiden Seiten übereinstimmt.

Zum Schluss wird dann die Winkeldifferenz der beiden reflektierten Fadenkreuzschnittpunkte zur Bestimmung des Winkels der brechenden Kante des Prismas gemessen.

Zu Aufgabe 2 (Kalibrierkurve)

Das Prisma wird nun in Ablenkposition gebracht, wobei wieder auf eine gute Ausleuchtung zu achten ist. Dann wird die Minimalablenkung für die 546-nm-Linie eingestellt, und das gesamte Spektrum der Quecksilberlampe aufgenommen. Die Positionen der optischen Komponenten auf den Dreikantschienen, und insbesondere die Position des Prismas, darf während dieser und den folgenden Messungen nicht verändert werden, da dabei die Zuordnung zwischen Wellenlängen und Ablenkwinkel (Kalibrierung) verloren gehen würde.

Zur Auswertung wird der Zusammenhang zwischen Wellenlängen und Ablenkwinkeln grafisch darzustellen. Um dabei der Genauigkeit der Messungen zu entsprechen, ist diese Kalibrierkurve auf DIN-A4-mm-Papier anzufertigen!

Zu Aufgabe 3 (Spektroskopische Aufgabe)

Siehe nachfolgende Hinweise zu den spektroskopischen Aufgabenstellungen.

Zu Aufgabe 4 (Dispersionskurve und differentielle Dispersion)

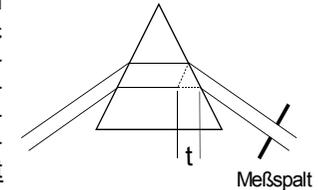
Für die Hauptlinien des Hg-Spektrums (579, 577, 546, 492, 436 und 405 nm) wird die Minimalablenkung einzeln eingestellt und die Ablenkung gemessen. Aus den Messungen können, ausgehend von (1), die Brechungsindizes berechnet und die Dispersionskurve $n(\lambda)$ grafisch dargestellt werden. Die differentielle Dispersion für die 579/577-nm-Linien bestimmt man durch Konstruktion eines Tangenten an die Kurve bei dieser Wellenlänge.

Zu Aufgabe 5 (Auflösungsvermögen)

Da die Wellenlängen der Linien nicht verändert werden können, muss zur Realisation der Auflösungsgrenze die optisch wirksame Basislänge t des Prismas verkleinert werden. Dazu wird in den Kollimatorstrahlengang direkt vor dem Prisma ein zusätzlicher Messspalt eingebracht und soweit geschlossen, bis ein geeignetes und auf Minimalablenkung eingestelltes Linienpaar unter subjektiver Berücksichtigung der Auflösereiterien (*Sparrow* bzw. *Rayleigh*) gerade noch getrennt erscheint.

Die Untersuchung wird an dem 579,1/577,0-nm-Linienpaar von Quecksilber durchgeführt. Das experimentell beobachtete Auflösungsvermögen ergibt sich dann aus dem Verhältnis des Mittelwerts der Linien zur Differenz, und der theoretisch erwartete Wert aus Gleichung (3).

Die wirksame Basislänge t lässt sich aus der eingestellten Spaltöffnung b , dem Ablenkwinkel γ und dem Prismenwinkel ε berechnen. Bei den Ableseungen an der Mikrometerschraube des Messspalts ist zu berücksichtigen, dass der Nullpunkt willkürlich verschoben liegt, und dass die Skala hinsichtlich der Öffnung des Spalts rückwärts zählt.



Zu Aufgabe 6 (Gitterspektrum)

Das Prisma wird durch ein Gitter ausgetauscht. Die charakteristischen Unterschiede der Spektren sind zu beobachten, zu protokollieren und im Bericht kurz qualitativ zu diskutieren.

Gitterspektrometer

Zu Aufgabe 1 (Gitterkonstante)

Das Gitter wird in den Strahlengang eingebracht (Orientierung des Gitters siehe Platzskript) und durch Beobachtung des auf den Spalt zurückgeworfenen Reflexes der Gitterträger-Oberfläche sorgfältig senkrecht zum Strahlengang justiert (*Autokollimation*).

Die Furchen des verwendeten Gitters sind asymmetrisch geritzt (*geblaztes Gitter*), wodurch für einen bestimmten Wellenlängenbereich die größte Intensität in eine bestimmte Ablenkrichtung und eine bestimmte Ordnung gebracht werden kann.

In der 1. Ordnung ist das gesamte, beobachtbare Spektrum der Hg-Lampe aufzunehmen, und in der 2. Ordnung die Hauptlinien (579, 577, 546, 492, 436 und 405 nm). Wegen der hohen Genauigkeit der Messung ist eine grafische Auswertung in diesem Fall ungeeignet.

Zu Aufgabe 2 (Spektroskopische Aufgabe)

Siehe nachfolgende Hinweise zu den spektroskopischen Aufgabenstellungen.

Zu Aufgabe 3 (Auflösungsvermögen)

Da die Wellenlängen der Linien nicht verändert werden können, muss zur Realisation der Auflösungsgrenze der wirksame Bereich des Gitters verringert werden. Dazu wird in den Kollimator direkt vor das Gitter ein zusätzlicher Mess-Spalt eingebracht und soweit geschlossen, bis ein geeignetes Linienpaar unter subjektiver Berücksichtigung der Auflösungskriterien (*Sparrow* bzw. *Rayleigh*) gerade noch getrennt erscheint.

Die Untersuchung wird an dem 579,1/577,0-nm-Linienpaar von Quecksilber durchgeführt. Das experimentell beobachtete Auflösungsvermögen ergibt sich dann aus dem Verhältnis des Mittelwerts der Linien zur Differenz, und der theoretisch erwartete Wert aus Gleichung (6).

Die Zahl der Gitterspalte lässt sich aus der durch den Mess-Spalt begrenzten, wirksamen Gitterbreite und der Gitterkonstanten berechnen. Bei den Ablesungen an der Mikrometerschraube des Mess-Spalts ist zu berücksichtigen, dass der Nullpunkt willkürlich verschoben liegt, und dass die Skala hinsichtlich der Öffnung des Spalts rückwärts zählt.

Zu Aufgabe 5 (Prismenspektrum)

Das Gitter wird durch ein Prisma ausgetauscht. Die charakteristischen Unterschiede der Spektren sind zu beobachten, zu protokollieren und im Bericht kurz qualitativ zu diskutieren.

Zu den spektroskopischen Aufgabenstellungen

Unbekannte Lampen

Es werden das Spektrum einer (der drei vorhandenen) unbekannteren Lampen aufgenommen und die beobachteten Wellenlängen aus der Kalibrierkurve bzw. mit der Gitterkonstanten bestimmt. Das Ergebnis ist anhand der Tabelle ausgewählter Spektrallinien im Anhang dieses Skripts zu analysieren.

Spektrallinien

Spektrum der Hg-Spektrallampe und Spektrallinien von Cd, He und Zn siehe Folgeseite.

