

406 – Gitter- und Prismenspektrometer

1. Aufgaben

- 1.1 Nehmen Sie ein Quecksilber-Spektrum auf, und berechnen Sie die Wellenlängen der stärksten Spektrallinien!
- 1.2 Bestimmen Sie die Brechzahlen eines Glasprismas für die verschiedenen Hg-Wellenlängen und zeichnen Sie die Dispersionskurve $n(\lambda)$!
- 1.3 (Zusatzaufgaben für Physik-Studenten)
Bestimmen Sie näherungsweise das Auflösungsvermögen des Spektrometers!

2. Grundlagen

Stichworte:

Lichtwelle, Wellenlänge, Beugung, Interferenz, Brechung, Dispersion, Doppelspalt, Gitter, Spektrometer, Auflösungsvermögen

2.1 Zur Einleitung etwas Optik

2.1.1 Das Licht

Licht ist eine *elektromagnetische Welle*. Es bezeichnet den Teil des elektromagnetischen Spektrums, der für den Menschen sichtbar ist und umfasst einen Wellenlängenbereich von etwa 400 nm (violett) bis 700 nm (rot). An den kurzwelligen Teil grenzt das Gebiet der UV- (Ultraviolett-) Strahlung sowie der Röntgen- und Gammastrahlen. Auf der langwelligen Seite folgen die Infrarot- (IR-, Wärme-) Strahlung sowie Mikro- und Radiowellen.

Licht ist eine sinusförmige Transversalwelle. Ein einzelner Lichtwellenzug besitzt eine feste Ausbreitungsebene im Raum und ist damit *polarisiert*.

Neben den Welleneigenschaften besitzt das Licht auch Teilchencharakter. Das Lichtteilchen wird *Photon* genannt. Seine Energie ist wellenlängen- bzw. frequenzabhängig und beträgt $E = h \cdot \nu$ (h ist das Plancksche Wirkungsquantum). Den Zusammenhang zwischen Wellenlänge λ und Frequenz ν vermittelt die (im Vakuum konstante) Lichtgeschwindigkeit c über die Gleichung $c = \lambda \cdot \nu$.

Licht entsteht immer dort, wo angeregte Atome in einen energieärmeren Zustand zurückkehren, d.h. Elektronen von höheren auf niedrigere Energieniveaus springen und den Differenzbetrag ΔE als Photon mit genau dieser Energie abgeben. Die Anregung kann durch Wärme (Glühlampe), elektrisch (Gasentladung/Leuchtstoffröhre) oder z.B. auch chemisch erfolgen. Im Versuch wird als Lichtquelle eine mit Hg-Dampf gefüllte Gasentladungsröhre verwendet. Diese emittiert ein sogenanntes *Linienpektrum*, d.h. einzelne, genau definierte Wellenlängen, welche im Spektrometer als scharfe Spektrallinien verschiedenster Farben sichtbar werden. In der Überlagerung erscheint das Quecksilberlicht weiß.

Es gibt auch andere Arten von Spektren, z.B. das uns vom Regenbogen her bekannte kontinuierliche Spektrum, welches von der Sonne (oder auch von glühenden Festkörpern) abgestrahlt wird.

2.1.2 Wie verhalten sich Lichtstrahlen und -wellen?

Es gibt eine ganze Reihe Phänomene im Zusammenhang mit dem Licht, von denen einige hier kurz in Erinnerung gerufen werden sollen:

Reflexion: entsteht beim Auftreffen von Licht auf eine Grenzfläche zwischen Stoffen mit verschiedenen Brechzahlen. Die *Brechzahl* bzw. der Brechungsindex n ist ein Maß für die „optische Dichte“ eines Mediums und umgekehrt proportional zur Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes. Im Vakuum (näherungsweise auch in Luft) ist $n = 1$. Der *Reflexionsgrad* R lässt sich bei senkrechtem Einfall relativ einfach berechnen:

$$R = (n - 1)^2 / (n + 1)^2 \quad (1)$$

und beträgt für Glas (Brechzahl ≈ 1.5) ca. 4%. Bei schrägem Lichteinfall wird er größer, was sich an einer spiegelnden Wasserfläche oder Glasscheibe leicht nachprüfen lässt.

Brechung: entsteht dort, wo auch die Reflexion auftritt. Der Teil des Lichtes, welcher nicht reflektiert wird, erfährt bei Eintritt in das optisch dichtere (oder dünnere) Medium eine Änderung der Ausbreitungsrichtung (bestes Beispiel: Löffel im Wasserglas von der Seite betrachtet). Die Winkeländerung wird durch das Brechungsgesetz (s. unten) beschrieben.

Dispersion: hat damit zu tun, dass sich die Brechzahl eines Mediums (z.B. Glas) in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lichtes geringfügig ändert. Damit ist der Brechungswinkel für jede Farbe ein anderer, wodurch es bei weißem Licht im Prisma zu einer Aufspaltung in die einzelnen Spektralfarben kommt. In der Natur geschieht dasselbe beim Regenbogen.

Brechung und Dispersion bilden die Grundlage für den Versuchsteil „Prismenspektrometer“. Deshalb werden sie noch einmal in einem eigenen Kapitel (2.2.4) vorgestellt.

Interferenz: ist die Überlagerung zweier Lichtwellen mit derselben Frequenz und gleicher Lage im Raum. Interferenzen entstehen in den meisten Fällen dann, wenn ein Lichtbündel geteilt wird und man die beiden Teilstrahlen nach Durchlaufen unterschiedlich langer Wegstrecken wieder vereinigt. In Abhängigkeit von der Wegdifferenz Δx erfolgt dann eine Verstärkung oder Schwächung des Lichtes: maximale Verstärkung, wenn Δx ein ganzzahliges Vielfache der Wellenlänge (bzw. geradzahliges Vielfache von $\lambda/2$) ist; Auslöschung, wenn Δx ein ungeradzahliges Vielfache von $\lambda/2$ ist.

Interferenz am Doppelspalt bzw. Gitter ist die Grundlage des Versuchsteiles „Gitterspektrometer“ (Details siehe Kap.2.2.2).

2.2 Spektralapparate

2.2.1 Allgemeines

Bei optischen Spektralapparaten wird ein Parallelstrahl (entstanden aus Punktlichtquelle/Eintrittsspalt mit nachfolgender Kollimatorlinse) auf ein wellenlängenselektives Element (Gitter,

Prisma) gelenkt, wodurch eine richtungsabhängige Zerlegung in einzelne (jetzt monochromatische) Parallelstrahlen erfolgt. Mit einer zweiten Linse bzw. einer Fernrohranordnung (zum Vergrößern) entsteht die Abbildung der Lichtquelle, jetzt aber zerlegt in ihre spektralen Bestandteile. Diese kann dann vermessen werden.

Zur Wellenlängenselektion kann entweder die **Dispersion** (Prisma) oder die Abhängigkeit der **Beugung** von der Wellenlänge (Gitter) ausgenutzt werden. Wichtigstes Kriterium für die Leistungsfähigkeit eines Spektralapparates ist neben der Lichtstärke das *Auflösungsvermögen* (vgl. 2.3).

2.2.2 Beugung und Interferenz

Nach dem Huygensschen Prinzip ist jeder Punkt einer Welle gleichzeitig Ausgangspunkt einer kugelförmigen Elementarwelle. Fällt eine ebene Wellenfront auf ein Hindernis mit zwei schmalen Öffnungen (Doppelspalt, vgl. Bild 1), so findet man dahinter durch Überlagerung (Interferenz) der beiden Elementarwellen Gebiete höherer bzw. niedriger Lichtintensität (Verstärkung bzw. Auslöschung, vgl. dazu auch Abschnitt 2.1.3 (Interferenz) in der Anleitung zum Versuch 409 - Newtonsche Ringe).

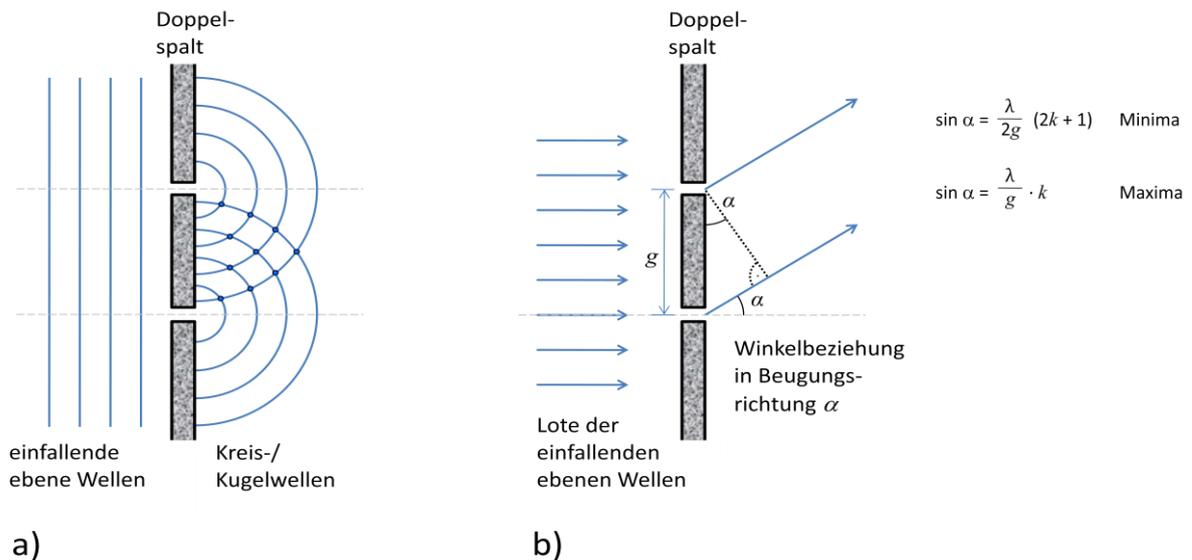


Bild 1: a) Wellenausbreitung am Doppelspalt. b) Winkelbeziehungen für die Entstehung von Interferenzen.

In größerer Entfernung bzw. durch Abbildung mittels einer Sammellinse auf einen Schirm sieht man das charakteristische Interferenzstreifenmuster eines Doppelspalt: helle und dunkle Streifen in gleichmäßigem Abstand, die hellen Streifen unter einem Beugungswinkel, bei dem der Gangunterschied $k \cdot \lambda$ beträgt ($k = 0, 1, 2, \dots$), die dunklen bei einem Gangunterschied von $(2k+1) \cdot \lambda/2$.

2.2.3 Gitterspektrometer

Erhöht man die Zahl der Spalte auf 3, 4, 5, ..., so kann man sich leicht überlegen, dass zusätzlich zu den Hauptmaxima eine bestimmte Anzahl Nebenmaxima im Interferenzbild entsteht: Hauptmaxima unter einem Winkel, wo die Elementarwellen *aller* Spalte einen Gangun-

terschied von $k \cdot \lambda$ besitzen, Nebenmaxima dort, wo nur ein Teil der Elementarwellen konstruktiv interferiert. Bild 2a zeigt ein Beispiel für die Interferenz an fünf Einzelspalten.

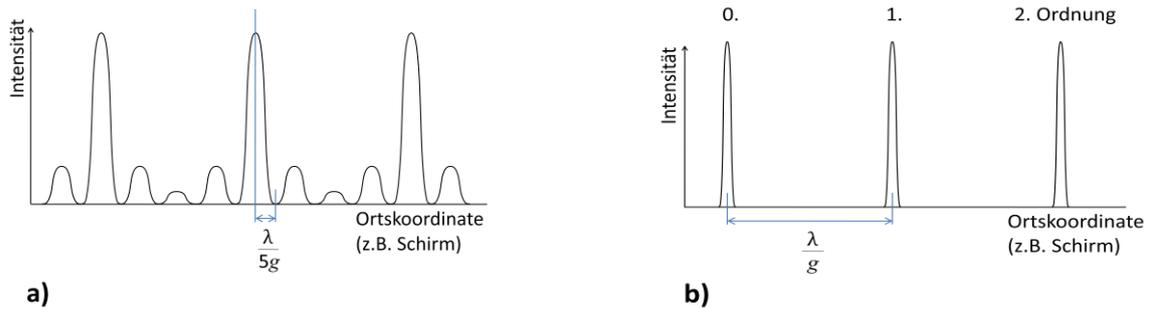


Bild 2. Interferenz-(Intensitäts)muster hinter a) fünf Einzelspalten und b) einer sehr großen Anzahl von Spalten jeweils z.B. auf einem Schirm.

Erhöht man die Zahl der Spalte immer weiter, so steigt die Anzahl der Nebenmaxima, ihre Intensitäten werden aber so gering, dass sie keine Rolle mehr spielen und schließlich nur noch die nunmehr sehr schmalen (Haupt-) Maxima nullter, erster, zweiter, ... Ordnung übrigbleiben (Bild 2b). Jetzt haben wir ein sogenanntes Beugungsgitter.

Da die Stellen maximaler Verstärkung wellenlängenabhängig sind, findet bei Beleuchtung mit weißem Licht in allen (außer der nullten) Beugungsordnungen eine spektrale Zerlegung statt: rotes Licht wird stärker abgelenkt als blaues (Bild 3).

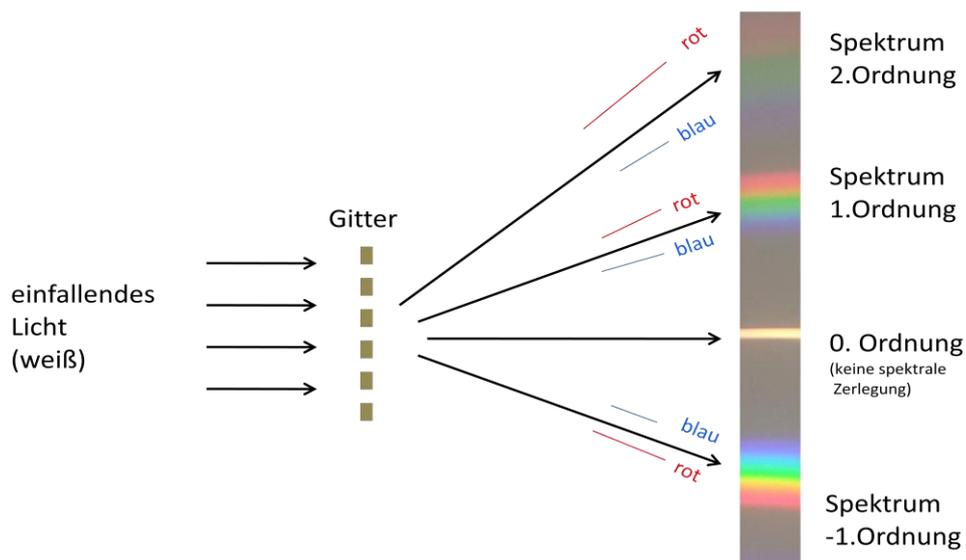


Bild 3: Entstehung von Spektren verschiedener Ordnungen bei einem Gitter.

Damit kann das Gitter zur Aufnahme eines Spektrums verwendet werden, und die Wellenlängen der einzelnen Spektrallinien lassen sich bei Kenntnis der Gitterkonstanten G über

$$n \cdot \lambda = G \cdot \sin \delta \tag{2}$$

direkt aus dem gemessenen Ablenkwinkel δ (n -ter Ordnung: $n = 1, 2, \dots$) berechnen.

2.2.4 Brechung und Dispersion

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c des Lichtes ist in verschiedenen Materialien unterschiedlich groß. Diese Erscheinung hängt mit dem atomaren bzw. molekularen Aufbau der Stoffe zusammen. Bei Beleuchtung werden die atomaren Bausteine zur Aussendung von Licht angeregt (mitschwingende Hertzsche Dipole). Im Falle der Beleuchtung mit sichtbarem Licht sind es die Elektronen, bei Wärmeausbreitung betrifft es dann auch die Gitteratome.

Sichtbare Folge der Änderung der Lichtgeschwindigkeit an der Grenzfläche zweier Stoffe ist die *Brechung* des Lichtes. Den Zusammenhang zwischen Einfallswinkel (α_1 , α_2) sowie Ausbreitungsgeschwindigkeit (c_1 , c_2) und Brechzahl (n_1 , n_2) in beiden beteiligten Materialien liefert das Snellius'sche Brechungsgesetz:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3).$$

Die Elektronen eines Atoms oder Moleküls, die durch eine Lichtwelle in erzwungene Schwingungen versetzt werden, verfügen über eine oder mehrere Eigenfrequenzen. Diese Eigenfrequenzen sind zum einen für die *Absorption* des Lichtes verantwortlich, und außerdem beeinflussen sie die Abstrahlung der von außen angeregten elektromagnetischen Wellen. Daraus ergibt sich eine Abhängigkeit der Brechzahl von der Wellenlänge $n(\lambda)$. Diese Erscheinung bezeichnet man als *Dispersion*. Weißes Licht wird damit beim Durchgang durch ein Prisma in seine spektralen Bestandteile zerlegt. In Gebieten normaler Dispersion (bei üblichen Gläsern im sichtbaren Spektralbereich) nimmt die Brechzahl mit zunehmender Wellenlänge ab, d.h. kurzwelliges (violett) Licht wird stärker gebrochen als langwelliges (rotes) Licht.

2.2.5 Prismenspektrometer

Beim Durchgang durch ein Prisma wird ein Lichtstrahl zweimal an den jeweiligen Grenzflächen gebrochen. Dadurch wird der einfallende Lichtstrahl um den Winkel δ von seiner ursprünglichen Ausbreitungsrichtung abgelenkt (Bild 4). Da die Brechzahl von der Wellenlänge des Lichts abhängt, wird das eingestrahlte Licht in sein Spektrum zerlegt.

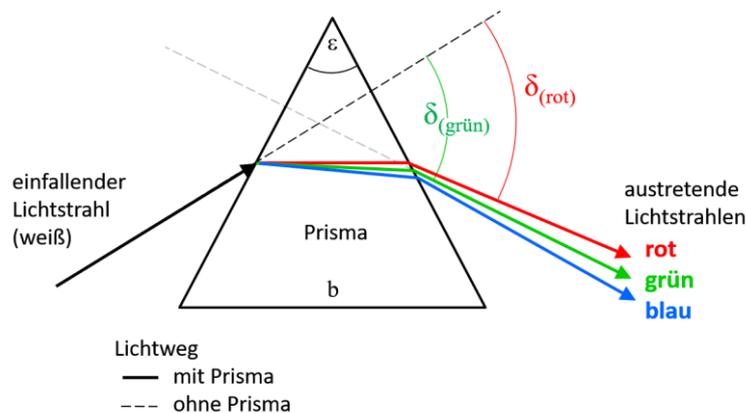


Bild 4: Ablenkung eines Lichtstrahls um den Winkel δ beim Durchgang durch ein Prisma mit Brechungswinkel ε .

Verwendet man eine Lichtquelle, die ein Linienspektrum aussendet (z.B. eine Quecksilberdampflampe), so kann man durch Messung der Ablenkwinkel einer jeden Spektrallinie die Dispersionskurve $n(\lambda)$ ermitteln. Umgekehrt kann bei bekannter Dispersionskurve das Prisma zur Bestimmung der Wellenlänge von Spektrallinien benutzt werden.

2.3 Spektrales Auflösungsvermögen

Die Leistungsfähigkeit eines Spektrometers wird durch sein spektrales Auflösungsvermögen

$$A = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (3)$$

charakterisiert. Es gibt an, in welchem Maße verschiedene Wellenlängen (zwei Spektrallinien) mit dem Abstand $\Delta\lambda$ getrennt wiedergegeben werden können, und es ist durch die apparativ bedingte Verbreiterung der Linien begrenzt (Größe des Eintrittspaltes am Spektrometer, Größe des Prismas).

Bei einem voll ausgeleuchteten Prisma mit der Basislänge b erhält man für das Auflösungsvermögen (vgl. Literatur):

$$A = b \cdot \left| \frac{dn}{d\lambda} \right| \quad (4).$$

Das Auflösungsvermögen lässt sich also aus der Steigung der Dispersionskurve berechnen und ist wie diese von der Wellenlänge abhängig.

Beim Gitter gilt $\lambda/\Delta\lambda = k \cdot N$, wobei k die Beugungsordnung und N die Anzahl der beleuchteten Gitterspalte sind.

3. Versuchsdurchführung

3.1 Messaufbau

Als Lichtquelle dient eine Hg-Dampf-Lampe. Deren Licht fällt auf den Eintrittspalt und gelangt von dort in den sogenannten Kollimator, den es als paralleles Lichtbündel verlässt. Gitter bzw. Prisma befinden sich auf einem drehbaren Objektisch. Nach Durchgang des Lichtes durch Gitter/Prisma sieht man im Fernrohr voneinander getrennte farbige Bilder des Spaltes, welche bei genügender Verringerung der Spaltbreite in Linien übergehen. Das ist das Quecksilberspektrum.

Um eine Spektrallinie zu vermessen, wird sie in das Fadenkreuz justiert, welches sich im Okular des Fernrohres befindet. Dann kann der zugehörige Winkel abgelesen werden. Die kleinste Einheit auf der Winkelskala ist ein halbes Grad, also 30 Bogenminuten. Dazu gibt es (ähnlich wie bei einem Messschieber) einen Nonius, der eine Minutenteilung von 1 bis 30 besitzt.

Vor Beginn der Messung muss das Goniometer so justiert werden, dass ein scharfes Bild des Eintrittspaltes in der Mitte des Fernrohrokkulars zu sehen ist.

3.2 Aufnahme des Hg-Spektrums mit dem Beugungsgitter

Das Gitter wird senkrecht zum einfallenden Licht auf den Objektisch gestellt und der Eintrittsspalt so weit verkleinert, dass scharfe Spektrallinien in der jeweils ersten Beugungsordnung (auf beiden Seiten) sichtbar sind. Dann werden nacheinander auf beiden Seiten die hellsten Linien ins Fadenkreuz justiert und die zugehörigen Winkel (δ_1 , δ_2) abgelesen. Die Hälfte der Differenz $\delta_1 - \delta_2$ ist der Beugungswinkel δ . Die Berechnung der Wellenlängen erfolgt mit Gl.2.

Fertigen Sie eine Abbildung an, in der Sie die Lage (Wellenlänge) aller ausgemessenen Spektrallinien und (qualitativ) ihre Intensität darstellen. Nicht ausgemessene schwächere Linien können nach Augenmaß mit eingezeichnet werden, um den Eindruck des Spektrums zu vervollständigen.

3.3 Bestimmung der Dispersionskurve eines Prismas

Zum Messen der Ablenkungswinkel für alle interessierenden Spektrallinien wird grundsätzlich die sogenannte „Minimalablenkung“ genutzt: Wenn man den Objektisch mit dem Prisma dreht und die Spektrallinien im Fernrohr verfolgt, so kehrt sich an einer bestimmten Stelle die Bewegung der Linien um. Das ist die Stelle der Minimalablenkung (vgl. Lit. und Bild 4). Der Strahl läuft in diesem Fall genau symmetrisch durch das Prisma, wodurch sich ein einfacher Zusammenhang zwischen Ablenkungswinkel, Prismenwinkel und Brechzahl ergibt. Es genügt in unserem Fall, diesen Punkt einmalig für eine mittlere Wellenlänge (z.B. die grüne Linie) einzustellen (eigentlich ist sie für jede Linie geringfügig anders).

Auch beim Prisma ist es möglich, die Ablenkung auf beiden Seiten des Goniometers zu vermessen und δ als die Hälfte der Differenz beider Winkelablesungen zu nehmen. Dazu muss aber das Prisma auf dem Objektisch gedreht werden. Alternativ kann als Bezugswinkel der direkte Durchgang (das Spaltbild ohne Prisma) verwendet werden. Dann genügt die Vermessung der Linien auf einer Seite.

Aus dem Ablenkungswinkel δ und dem Prismenwinkel ε lässt sich die Brechzahl n des Prismas für die verwendete Wellenlänge mit Gl.6 berechnen:

$$n = \frac{\sin \frac{\varepsilon + \delta}{2}}{\sin \frac{\varepsilon}{2}} \quad (6).$$

Der brechende Winkel ε kann bei gleichseitigen Prismen als 60° angenommen werden.

Nachdem über Gl.6 die Brechzahlen für alle vorgegebenen Linien bestimmt wurden, trägt man für die bekannten Wellenlängen [Tabellenwerte nutzen!] $n(\lambda)$ über λ auf und erhält so die *Dispersionskurve*.

Das Auflösungsvermögen (Zusatzaufgabe) sollte mindestens für je eine Wellenlänge am Anfang bzw. am Ende des sichtbaren Spektralbereiches berechnet werden. Wie klein darf jeweils der Abstand zweier Linien sein, damit sie gerade noch getrennt werden können?

Führen Sie dort, wo es angebracht ist, eine Fehlerabschätzung durch, und vergleichen Sie die Ergebnisse mit den erwarteten Werten.

Anhang:

zu vermessende Spektrallinien (Vorschlag)

stärkste Rot

Doppellinie Gelb

Grün

jeweils stärkste Blaugrün, Blau, Violett

Gitterkonstanten:

Für Gitter ohne roten Punkt: $G = 1.6239 \mu\text{m}$

Für Gitter mit roten Punkt: $G = 1.6667 \mu\text{m}$