

Gitter- und Spektralapparat

1 Vorbereitung

- 1.1 Allgemeine Vorbereitung für die Versuche 20 - 23
- 1.2 Reflexions- und Brechungsgesetz, Totalreflexion, Dispersion
Lit.: EICHLER¹ Kapitel 33: *Ausbreitung von Licht, Brechung*
- 1.3 Aufbau eines Prismenspektrometers
Lit.: EICHLER Kapitel 37: *Prismenspektrometer*
Anhang A *Kreisnonius*
- 1.4 Interferenz
Interferenz am optischen Gitter (Fraunhofersche Beugung)
Beugung des Lichts (Huygensches Prinzip)
Beugung am Spalt
Lit.: EICHLER Kapitel 38
EICHLER Kapitel 39: *Grundbegriffe der Interferenz*
- 1.5 Kohärenz
Lit.: GERTHSEN² 10.1.1
- 1.6 Auflösungsvermögen
Lit.: EICHLER Kapitel 40: *Fraunhofer-Beugung an einer Lochblende*
EICHLER Kapitel 36: *Auflösung des Mikroskops*
EICHLER Kapitel 37: *Spektrales Auflösungsvermögen*
(Für die detaillierte Herleitung des spektralen Auflösungsvermögens: WALCHER³ 4.3.2.0)
- 1.7 Entstehung von Linienstrahlung, Bohrsches Atommodell, Energiezustände des Wasserstoffatoms
Lit.: EICHLER Kapitel 44: *Licht und Spektren* bis inkl. *Energien und Spektren des H-Atoms*

Man berechne die ersten vier Wellenlängen der Balmer-Serie!

¹Eichler, Kronfeldt, Sahn: Das Neue Physikalische Grundpraktikum; ISBN-13 978-3-540-21453-3

²Meschede: Gerthsen Physik; ISBN-13 978-3-540-25421-8

³Walcher: Praktikum der Physik; ISBN 3-519-13038-6



Abbildung 1: Aufbau zu Versuch 22

2 Aufgaben

2.1 Justierung

Einstellung des Fernrohres auf Unendlich

Zunächst hebe man ggf. den Prismen- oder Gittertisch aus dem Spektrometer heraus. Die Spaltblende vor dem Objektiv des Fernrohres ist ganz zu öffnen. Dazu zieht man die beiden Spaltbacken zur Seite und arretiert diese leicht mit den Rändelschrauben. Nun richte man das Fernrohr auf einen fernen Gegenstand (z.B. die Leiter zwischen den Schornsteinen der Heizungszentrale vom Raum E14/15 aus) und verschiebe das Okular solange, bis der anvisierte Gegenstand parallaxefrei in die Ebene des Fadenkreuzes abgebildet wird. Zwischenbild und Fadenkreuz dürfen sich nicht gegeneinander verschieben, wenn man das Auge vor dem Okular seitlich bewegt. In dieser Stellung schraube man das Okular fest.

Justieren des Kollimators:

Man beleuchte den Kollimatorspalt mit der Na-Lampe, beobachte den Spalt durch das Fernrohr und verschiebe dabei den Spalt im Rohr solange, bis die Spaltländer scharf und parallaxefrei zu sehen sind. In dieser Stellung schraube man den Spalt fest und stelle ihn so ein, dass die Spaltbreite mit der Breite des Fadens im Fadenkreuz vergleichbar wird.

Holen Sie den Betreuer zu Hilfe, wenn Sie sich nicht sicher sind, die Justage richtig durchgeführt zu haben.

Danach mache man sich zunächst mit den zwei Feststellschrauben und dem Feintrieb am Prismentisch vertraut. Mit der unteren Feststellschraube kann man den Teilkreis samt Prismentisch arretieren, mit der oberen den Fernrohrhalter. Ablesungen am Teilkreis sind nur mit arretiertem Prismentisch durchzuführen. Mit dem Feintrieb am Fernrohrhalter lassen sich Fadenkreuz und Linienmitte präziser in Übereinstimmung bringen.

2.2 Justierung der Gitterstellung im Spektroskop

Das Beugungsgitter soll senkrecht zum beleuchtenden Parallelstrahlenbündel, also senkrecht zur Achse des Kollimatorrohres, stehen. Nur in dieser Stellung liegen die Maxima links und rechts symmetrisch zum Maximum nullter Ordnung. Die Richtung des Maximums nullter Ordnung ist unabhängig von der Stellung des Beugungsgitters (man überzeuge sich davon durch Versuch). Man stelle das Gitter senkrecht zur Achse des Kollimatorrohres (nach Augenmaß) und klemme in dieser Stellung den Teilkreis an der Drehachse fest. Fehler, die dadurch entstehen, dass das Gitter nicht wirklich senkrecht steht, werden dadurch aufgehoben, dass man die Beugungsmaxima links und rechts misst und den Mittelwert bildet.

2.3 Bestimmung der Gitterkonstante des Strichgitters Nr. 2

Ermittlung des Beugungswinkels mit anschließender graphischer Bestimmung der Gitterkonstante.

Man messe für alle verfügbaren Interferenzmaxima die Winkeleinstellungen $\beta_{k,links}$ und $\beta_{k,rechts}$, errechne daraus den Beugungswinkel

$$\alpha_k = \frac{\beta_{k,rechts} - \beta_{k,links}}{2}$$

und zeichne $\sin \alpha_k$ als Funktion von k auf Millimeterpapier. Aus der graphisch ermittelten Steigung der mittleren Geraden ist mit der Wellenlänge der Natrium D₂-Linie ($\lambda = 589,00$ nm) die Gitterkonstante mit Fehler zu berechnen.

2.4 Beugung am Spalt

Vergleich der Beugung am Spalt mit der Beugung am Gitter. Abhängigkeit des Intensitätsbilds von der Spaltbreite.

Man ersetze das Gitter durch den veränderlichen Spalt und beleuchte diesen mit Natriumlicht. Man beschreibe die Breite der Interferenzmaxima im Verhältnis zur Breite der Maxima bei der Beugung am Gitter. Wie verändert sich das Intensitätsbild bei Veränderung der Spaltbreite?

2.5 Spektrum der Quecksilber-Cadmiumlampe

Bestimmung der Wellenlängen des Spektrums aus dem Beugungswinkel.

Man messe den Beugungswinkel α_k und berechne die Wellenlängen der vier intensivsten Linien des Hg-Cd-Spektrums mit dem Gitter Nr. 2. Überlegen Sie, welche Beugungsordnung zur genauesten Bestimmung der Wellenlänge führt.

2.6 Bestimmung des brechenden Winkels am Prisma

Bestimmung des brechenden Winkels unter Verwendung der, an den den Winkel einschließenden Flächen, reflektierten Spaltbildern.

Zur Bestimmung der Brechzahl einer Flüssigkeit füllt man diese zweckmäßigerweise in ein Hohlprisma aus ebenen Glasplatten. Im Minimum der Ablenkung tritt dann an vier Stellen eine Brechung des hindurch tretenden Lichtes auf. Die (unbekannte) Brechzahl des umgebenden Glases hat auf die Gesamtablenkung δ des Lichtes keinen Einfluss, so dass mit den gleichen Formeln wie bei Glasprismen ausgewertet werden kann. Der in die Fraunhofersche Formel eingehende brechende Winkel ε des Hohlprismas bleibt aber zu bestimmen.

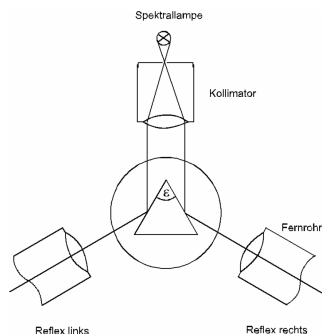


Abbildung 2: Bestimmung des brechenden Winkels

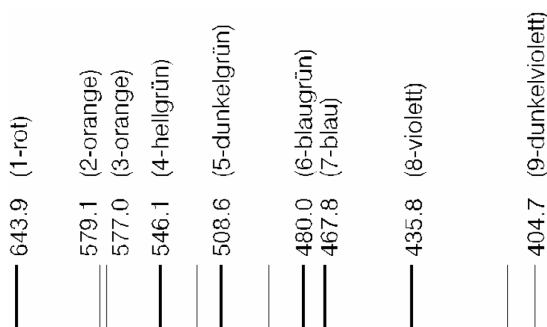


Abbildung 3: Spektrum der Hg-Cd-Lampe. Die Wellenlängen sind in nm angegeben.

Dazu stellt man den Prismentisch Nr. 1 (Ethylcinnamat) auf das Spektrometer und dreht den Teilkreis mit dem Prisma in eine solche Stellung, dass etwa gleichviel Licht auf beide Prismenflächen fällt (siehe Abb. 2). Die Lagen der Reflexe an den Prismenwinkel einschließenden Flächen lassen sich mit dem Fernrohr finden. Der Teilkreis ist zu arretieren. Jetzt können nach jeweils erfolgter Feineinstellung des Fadenkreuzes auf das reflektierte, weiße Spaltbild die Teilkreiswerte unter Verwendung des Nonius abgelesen werden. Bestimmen Sie daraus den brechenden Winkel ε des Hohlprismas.

2.7 Bestimmung von Brechzahlen

Bestimmung der Brechzahlen verschiedener Materialien mithilfe der zuvor bestimmten Positionen der Spektrallinien der Hg-Cd-Lampe.

Das Licht, das eine Hg-Cd-Lampe ausstrahlt, besteht aus Licht mit diskreten, reproduzierbaren Wellenlängen, deren intensivste in Abb. 2 bezeichnet und angegeben sind und für alle weiteren Messungen und Berechnungen als bekannt vorausgesetzt werden können.

Die im Folgenden beschriebenen Messungen und Berechnungen sind nacheinander für jedes dieser drei Prismen in der angegebenen Reihenfolge durchzuführen:

Nr.1: Ethylcinnamat

Nr.2: Flintglas

Nr.3: Schwerflintglas

Seien Sie sorgfältig im Umgang mit den Prismentischen!

Auffinden der Prismenstellung für minimale Ablenkung

Um die minimale Ablenkung $\delta_{min}(\lambda)$ einer vorgegebenen Spektrallinie der Wellenlänge λ aus der Richtung des ohne Prisma unabgelenkten Strahles zu messen, ist wie folgt vorzugehen:

- Der Prismentisch wird in das Spektrometer gesetzt. Der Teilkreis wird so gedreht, dass das aus dem Kollimator tretende Licht durch das Prisma abgelenkt wird. Man schwenke dabei das Fernrohr dorthin, wo sich nach dem Brechungsgesetz das Spektrum erwarten lässt. Tipp: In minimaler Ablenkung ist der Strahlengang bezüglich des Prismas symmetrisch (siehe Abb. 4).
- Hat man das Spektrum gefunden, dreht man den Teilkreis mit dem Prisma und folgt der Verschiebung des Spaltbildes *der gewünschten Wellenlänge* mit dem Fernrohr, bis man die Minimumstellung gefunden hat. Das ist die Stellung, von der aus das Spaltbild in die gleiche Richtung wandert, gleichgültig in welche Richtung man das Prisma dreht. Achten Sie darauf, dass der Fernrohrhalter dabei arretiert ist.

- In der genauen Minimumstellung wird der Teilkreis festgeklemmt. Erscheinen die Linien des Spektrums leicht verschmiert und/oder hebt sich das Fadenkreuz vor dem Hintergrund nicht genügend ab, so reduziere man die Beleuchtung am Arbeitsplatz und/oder enge die Spaltbreite der Fernrohrblende etwas ein. Nach erfolgter Feineinstellung des Fadenkreuzes auf die Linienmitte in der Höhe des Horizontalfadens liest man den Teilkreiswert mit dem Nonius ab und notiert diesen zusammen mit der Angabe, für welche Linie das Prisma nun exakt in Minimalstellung steht.

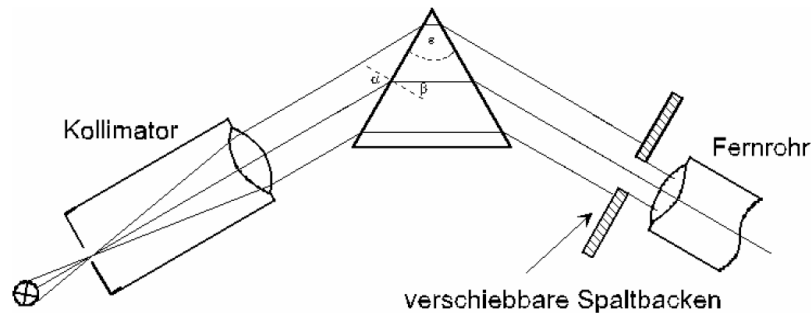


Abbildung 4: Bestimmung des Aperturwinkels

Da es aufwändig wäre, dieses Verfahren für jede einzelne Linie durchzuführen, führe man obiges Verfahren nur für die „mittlere“, dunkelgrüne Linie ($\lambda_5 = 508.6 \text{ nm}$) aus und lese dann jeweils nach erfolgter Feineinstellung die Teilkreiswerte für alle Linien folgender Wellenlängen ab:

$$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7, \lambda_8, \lambda_9,$$

Dann wird der Prismentisch entfernt, das Fernrohr geschwenkt, das Fadenkreuz direkt auf den Spalt eingestellt und der Teilkreiswert abgelesen. Die Differenzen zwischen den vorherigen Teilkreiswerten zu diesem sind in guter Näherung die gesuchten minimalen Ablenkungswinkel $\delta_{min}(\lambda)$.

Der durch diese Methode entstehende, zusätzliche Fehler für die nicht einzeln in Minimalstellung gebrachten Linien ist für Praktikumszwecke vernachlässigbar gering, da die Ablenkungswinkel in der Nähe der Minimumstellung nur schwach vom Einfallswinkel abhängen.

Berechnung von Brechzahlen Die brechenden Winkel der Glasprismen betragen $\epsilon = 60,0^\circ$, für das Hohlprisma verwendet man den unter 2.6 bestimmten Wert; man berechne nun mit der Fraunhoferschen Formel (vgl. EICHLER Seite 389, wobei hier $\gamma = \epsilon$)

$$n = \frac{n_{Prisma}}{n_{Luft}} = \frac{\sin \alpha_{min}}{\sin \beta_{min}} = \frac{\sin \frac{\epsilon + \delta_{min}}{2}}{\sin \frac{\epsilon}{2}}, \quad n_L = 1,000.$$

die Brechzahlen $n(\lambda_1)$, $n(\lambda_5)$ und $n(\lambda_9)$.

Um einen Eindruck von der Genauigkeit der Ergebnisse zu gewinnen, überlege man sich, wie sich die Unsicherheit der einzelnen Teilkreisablesungen auf das Ergebnis fortpflanzt. Man berechne den Standardfehler σ von $n(\lambda_5)$ für beide Glasprismen unter der Annahme, dass die Teilkreiswerte auf $\pm 0,1^\circ$ genau und der brechende Winkel ϵ exakt bestimmt sind. Welche anderen Fehlerquellen bleiben dabei unberücksichtigt?

Anschließend sind die Brechzahldifferenzen $\Delta n = n(\lambda_9) - n(\lambda_5)$ der verschiedenen Prismen zusammenzustellen und zu vergleichen.

2.8 Winkeldispersionskurven

Man zeichne unter Benutzung der unter 2.7 gewonnenen Werte jeweils in getrennten Darstellungen die Winkeldispersionskurve $\delta_{min}(\lambda)$. Die Nullpunkte sind dabei zu unterdrücken.

2.9 Wellenlängenmessung mit dem Prismenspektrometer

Bestimmung der Art des Füllgases einer zweiten Spektrallampe über die Position der Spektrallinien.

Das Schwerflintprisma Nr. 3 steht bezüglich λ_5 in Minimalablenkung. Das Prismenspektrometer wird nun in dieser Einstellung zur Messung unbekannter Wellenlängen eingesetzt, d.h. der Teilkreis mit dem Prisma darf **nicht gelöst** werden. Die unter 2.8 gezeichnete Winkeldispersionskurve benutze man dabei als Eichkurve. Die Hg-Cd-Lampe wird nun durch eine Spektrallampe, deren Füllung nicht bekannt ist, ersetzt. Diese Lampe muss zunächst einbrennen. Man messe die Ablenkungen $\delta(\lambda)$ einiger intensiver Linien des Spektrums und bestimme aus der Eichkurve die unbekanntes Wellenlängen. Versuchen Sie anhand der tabellierten Wellenlängen (Anhang B, Tab. 1) die Art des Füllgases zu bestimmen.

2.10 Auflösungsvermögen

Bestimmung des Mindestauflösungsvermögen und Vergleich mit dem theoretischen Auflösungsvermögen.

Die Leistungsfähigkeit eines Spektrometersaufbaus wird nicht nur durch die Größe des spektroskopierbaren Bereiches und der zur Detektion erforderlichen Linienintensität, sondern vor allem durch sein Auflösungsvermögen charakterisiert. Dieses ist durch die apparativ bedingte Breite der Linien begrenzt; die natürlichen Linienbreiten sind wesentlich schmäler. Durch Verringerung der Breite des Kollimatorspaltes lassen sich die Spaltbilder nicht beliebig schmal machen. Die untere Grenze ist durch die Beugung an der Linsenfassung oder dem Prisma bestimmt, wodurch die Breite der Parallelbündel begrenzt wird.

Die Prismengröße ist an die Öffnungen der Linsen angepasst. Die Bündelbreite d des die Abbildung einer gewissen Spektrallinie bewirkenden Parallelbündels ist hier durch die veränderbare Breite des Spaltes vor dem Objektiv des Fernrohres gegeben.

Aus der Herleitung des theoretischen Auflösungsvermögens in EICHLER Seite 391, ergibt sich für den Fall, dass zwei eng benachbarte Spektrallinien der Wellenlängen λ und $\lambda + d\lambda$ getrennt werden können, die Bedingung:

$$A = d \left| \frac{d\delta}{d\lambda}(\lambda) \right| \geq \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = A_{min}$$

2.10.1 Auflösung eines Hg-Cd-Linienpaares

Stellen Sie nun wieder die Hg-Cd-Lampe vor den Kollimator. Während des Einbrennens der Lampe berechne man das zur Trennung des orangefarbenen Linienpaares λ_2, λ_3 erforderliche Mindestauflösungsvermögen A_{min} .

Zur Vermeidung von Abbildungsfehlern strebt man geringe Bündelbreiten d an. Betrachten Sie das „Linienpaar“ mit dem Hohlprisma Nr. 4 (Wasser) in Minimalablenkung. Was ist zu erkennen?

Wählen Sie nun das Prisma aus, das am besten zur Trennung dieses Linienpaares geeignet ist. Aus den unter 2.8 gezeichneten Winkeldispersionskurven $\delta(\lambda)$ gewinne man dazu graphisch betragsmäßig die Steigungen

$$\left| \frac{d\delta}{d\lambda}(\lambda_2) \right|$$

und rechne dabei auf Bogenmaß um.

2.10.2 Rayleighsche Grenzlage

Bringen Sie nun das Prisma Ihrer Wahl bezüglich des Linienpaares λ_2 und λ_3 mit dem unter 2.7 angegebenen Verfahren in Minimalablenkung und schrauben Sie den Teilkreis fest. Das Fadenkreuz stelle man etwas neben das Paar.

Mit den beiden Spaltbacken der Spaltblende vor dem Fernrohr kann man nun die Bündelbreite d und damit das Auflösungsvermögen A immer weiter herabsetzen. (Optimieren Sie vorher gegebenenfalls die Spaltbreite am Kollimatoreintritt: ein sehr enger Kollimatorschlitz liefert zu geringe Helligkeiten, ein breiter Kollimatorschlitz zu große Linienbreiten.) Ist die minimale Bündelbreite d_{min} , bei der die beiden Linienbilder des Linienpaares gerade noch getrennt erscheinen (Rayleighsche Grenzlage), etwa mittig eingestellt, so arretiere man die Spaltbacken durch leichtes Anziehen der Rändelschrauben. Die Breite d_{min} des entstandenen Spaltes wird mit der Schieblehre nicht direkt gemessen, sondern aus der Differenz des Abstandes der Außenkanten der Spaltbacken zum Abstand der Außenkanten bei zusammen geschobenen Spaltbacken bestimmt.

Man stelle das Mindestauflösungsvermögen A_{min} und das mit

$$A = d_{min} \left| \frac{d\delta}{d\lambda}(\lambda_2) \right|$$

berechenbare theoretische Auflösungsvermögen zusammen. Wie gut ist die Übereinstimmung? Welcher subjektive Fehler geht ein?

A Kreisnonius am Prismenspektrometer

Der Kreisnonius im Praktikum ähnelt dem hier beschriebenen.

Durch den Nonius wird eine genauere Ablesung des Winkels ermöglicht. Der Winkel φ zwischen 29 Teilstrichen auf der Hauptskala ist auf dem Nonius in 30 Teile aufgeteilt. Für die Winkel zwischen den Teilstrichen gilt also:

$$\begin{aligned} \text{auf der Hauptskala: } & \frac{\varphi}{29} \\ \text{auf dem Nonius: } & \frac{\varphi}{30} = \frac{\varphi}{29} \left(1 - \frac{1}{30}\right) \end{aligned}$$

Wenn also der n -te Teilstrich des Nonius mit einem beliebigen Teilstrich $(x + n)$ der Hauptskala zusammenfällt wird der Noniusnullpunkt (also die eigentliche Ablesenmarke) nicht mit dem x -ten Teilstrich der Hauptskala zusammenfallen, außer wenn $n = 30$. Für den Winkel ψ zwischen Hauptskalanullpunkt und Noniusnullpunkt (Ablesemarke) ergibt sich:

$$\psi = (x + n) \frac{\varphi}{29} - n \frac{\varphi}{29} \left(1 - \frac{1}{30}\right) = \left(x + \frac{n}{30}\right) \frac{\varphi}{29}$$

In Worten heißt das: Man lese denjenigen Teilkreisstrich der Hauptskala ab, der mit einem beliebigen Teilkreisstrich der Noniusskala zusammenfällt. Anschließend zähle man die Position dieses Striches an der Noniusskala ab. Verrechnet man dies mit der Skalierung, erhält man den gewünschten Winkelwert. (WALCHER Seite 170)

B Spektrallinien einiger Elemente

Element (Symbol)	λ/nm	Farbeindruck	Helligkeitseindruck	Name
Wasserstoff (H)	656,28	rot	stark	C, H $_{\alpha}$
	486,13	blaugrün	mittel	F, H $_{\beta}$
	434,05	violett	mittel	G, H $_{\gamma}$
	410,17	violett	schwach	h, H $_{\delta}$
Helium (He)	706,54	dunkelrot	schwach	r
	667,82	rot	stark	
	587,56	gelb	sehr stark	d
	504,77	grün	schwach	
	501,57	grün	mittel	
	492,19	blaugrün	mittel	
	471,31	blau	schwach	
	447,15	blau	stark	
438,79	violett	schwach		
Lithium (Li)	670,78	rot	stark	
	610,36	gelbrot	mittel	
	460,29	blau	schwach	
Natrium (Na)	616,08	gelbrot	mittel	
	615,42	gelbrot	mittel	
	589,59	gelb	stark	D $_1$
	589,00	gelb	mittel	D $_2$
	568,82	gelbgrün	mittel	
	568,27	gelbgrün	mittel	
Kalium (K)	769,90	dunkelrot	stark	
	766,49	dunkelrot	stark	
	404,72	violett	mittel	
	404,41	violett	mittel	
Cadmium (Cd)	643,85	rot	stark	C'
	635,99	gelbrot	schwach	
	508,58	grün	stark	
	479,99	blaugrün	stark	F'
	467,82	blau	stark	
	441,46	blau	mittel	
Quecksilber (Hg)	708,19	rot	schwach	
	690,72	rot	schwach	
	579,07	gelb	sehr stark	
	576,96	gelb	sehr stark	
	546,07	grün	stark	e
	491,60	blaugrün	mittel	
	435,84	blau	stark	g
	407,78	violett	mittel	
404,66	violett	mittel	h'	

Tabelle 1: Spektrallinien einiger Elemente. Aus WALCHER Seite 401 & 402.