

O 12a „Atomspektren“

Toshiki Ishii (Matrikel 3266690)

13.05.2013

Studiengang Chemie (Bachelor of Science)

Aufgabenstellung

1. Ermittlung der Gitterkonstante eines Reflexionsgitters mittels Vermessung des reflektierten Lichts sowie der ersten drei Beugungsordnungen der grünen Hg-Linie bei 546,1 nm bei einem Einstrahlwinkel von 60° .
2. Bestimmung der Wellenlängen von drei Dubletts des Na-Spektrums aus dem Beugungsspektrum 1. Ordnung bei gleicher Gitteranordnung wie in der ersten Aufgabe.
3. Berechnung des Auflösungsvermögens des Reflexionsgitters.

Zubehör

- Präzisionsgoniometer mit Reflexionsgitter
- Hg-Dampflampe
- Na-Dampflampe
- Handspektrometer
- Tischlampe

Grundlagen

Kohärenz, Interferenz, Beugung

Betrachtet man Licht als elektromagnetische Welle, so kann man ihm in jedem Punkt beziehungsweise zu jeder Zeit eine Phase zuordnen. Besteht ein Lichtstrahl aus vielen Lichtwellen gleicher Wellenlänge, die in Phase schwingen, so wird der Lichtstrahl als kohärent bezeichnet. Beide Kriterien lassen sich in der Praxis nur mit endlicher Genauigkeit erfüllen. Die Strecke, die ein kohärenter Lichtstrahl zurücklegen kann, sodass er noch als kohärent bezeichnet werden kann, wird als Kohärenzlänge l bezeichnet. Die Zeit, die er zum Zurücklegen dieser Strecke benötigt, als Kohärenzzeit τ .

Bei Superposition zweier Lichtwellen gleicher Wellenlänge in einem Punkt tritt Interferenz auf. Je nach Phasenverschiebung δ kann dies zu Verstärkung ($\delta = 2k \cdot \pi$), Auslöschung ($\delta = (2k + 1) \cdot \pi$) oder einer Zwischenform der beiden führen.

Trifft eine Lichtwelle auf ein räumlich begrenztes Hindernis, so tritt Beugung auf. Alle Randpunkte des Hindernisses werden dabei nach dem HUYGENSSchen Prinzip zu Ausgangspunkten einer sich in alle Richtungen ausbreitenden Elementarwelle (Kugelwelle). Beugungsphänomene sind dabei umso stärker ausgeprägt, je kleiner das Hindernis im Verhältnis zur Wellenlänge ist. Ist das Hindernis jedoch kleiner als die Wellenlänge des Lichts, so ist nur noch Streuung und keine Beugung mehr zu beobachten.

Beugung eines kohärenten Lichtstrahls an einem Doppelspalt führt zunächst zu Beugung und dadurch zur Ausbildung zweier Kugelwellen (beziehungsweise Zylinderwellen), die sich überlagern (Interferenz). Auf einem Schirm hinter dem Doppelspalt lässt sich ein Interferenzmuster beobachten.

Optische Gitter

Zur Lichtbeugung genutzte optische Gitter, auch Beugungsgitter genannt, bestehen aus parallel angeordneten linienartigen Strukturen. In ihrer Funktionsweise unterscheidet man zwei Gittertypen: Transmissions- und Reflexionsgitter.

Transmissionsgitter (Amplitudengitter) bestehen aus einer Abfolge von Lücken und Stegen. Ein Nachteil dieser Gitter ist die Tatsache, dass sie einen großen Teil des einfallenden Lichts absorbieren beziehungsweise reflektieren, welches auf diese Weise nicht zur Intensität des Spektrums beitragen kann.

Reflexionsgitter (Phasengitter) bestehen aus einer Spiegelfläche (Glas- oder Metallplatte), in die feine Rillen geritzt wurden, die bei Beleuchtung zu Ausgangspunkten von Elementarwellen werden. Unter einem bestimmten Einfallswinkel entsteht Interferenz, die Elementarwellen bilden ein Gitterspektrum.

Auflösungsvermögen optischer Gitter

Ein grundlegender Parameter optischer Gitter ist die Gitterkonstante, der Reziprok des Abstands zweier äquivalenter Punkte in diesem Gitter. Mit steigender Gitterkonstante werden Hauptmaxima schärfer und Nebenmaxima schwächer – das Auflösungsvermögen steigt. Das Auflösungsvermögen ist der kleinste noch wahrnehmbare Abstand, den zwei Spektrallinien haben dürfen, um im Spektrometer noch als getrennt wahrgenommen werden zu können und berechnet sich nach:

$$A = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = k \cdot N$$

Dabei ergibt sich $\Delta\lambda$ (die kleinste Wellendifferenz, die vom Spektrometer noch aufgelöst werden kann) aus dem RAYLEIGH-Kriterium, nach dem zwei Spektrallinien gleicher Intensität als gerade noch aufgelöst anzusehen sind, wenn das Interferenzmaximum der einen mit dem -minimum der anderen zusammenfällt.

Entstehung von Linienspektren

Elektronen befinden sich in einem Atom, Molekül oder Ion auf bestimmten Energieniveaus, wobei es nur einen Besetzungszustand gibt, der langfristig stabil ist. Dieser wird als Grundzustand bezeichnet. Bei Wechselwirkung zwischen einem Elektron und einem Photon geeigneter Energie kommt es dazu, dass das Photon seine Energie an das Elektron abgibt. Das Elektron wird dadurch in ein höheres Energieniveau angehoben. Der dabei entstehende Zustand wird als angeregter Zustand bezeichnet und ist nicht stabil. Er kann durch Emission eines Photons oder thermische Abregung wieder in den Grundzustand übergehen. In letzterem Fall fehlen dann im transmittierten Licht Photonen der Energie, die von den Elektronen des Teilchens aufgenommen werden können. Es wird ein Absorptionsspektrum beobachtet.

Umgekehrt kann es durch Zufuhr von thermischer Energie und Kollisionen zwischen den Teilchen dazu kommen, dass Elektronen in einen angeregten Zustand angehoben werden. Dieser Zustand kann dann wiederum durch thermische Abregung und durch Abgabe von Photonen in den Grundzustand übergehen. Im letzteren Fall kommt es zu einem Emissionsspektrum.

Eine dritte Möglichkeit ist eine Kombination der beiden Mechanismen, bei der zwar sowohl Anregung als auch Abregung mittels Photonen erfolgen, jedoch über unterschiedliche Energieniveaus. Je nach Stabilität der Zwischenzustände unterscheidet man hier in Fluoreszenz (kurzlebige Zustände) und Phosphoreszenz (langlebige Zustände).

Messwerte

Ordnung	Winkel	Farbe	Winkel
—	0°10'40"	(0. Ordnung)	60°10'40"
0	60°10'39"	gelbgrün	90°25'15" 90°26'36"
1	89°27'47"	orange	91°18'32" 91°20'17"
2	111°14'38"	rot	92°25'36" 92°27'21"
3	131°43'29"		

Sowohl die Leuchtstoffröhre im Versuchsraum als auch eine zur Verfügung stehende Tischlampe zeigten eine rote Linie bei 620 nm, eine gelbe Linie bei 590 nm, eine grüne Linie bei 550 nm, eine blaugrüne Linie bei 480 nm und eine blauviolette Linie bei 440 nm.

Das Sonnenlicht zeigte sich als kontinuierliches Spektrum mit Lücken bei 670 nm, 590 nm, 530 nm, 520 nm und 490 nm.

Auswertung

Auswertung – Korrektur der Messdaten

Der erste Winkel (0°10'40") wurde für Transmission durch Luft gemessen und sollte deshalb exakt null sein. Mit dieser Messung wurde der systematische Fehler des Goniometers bestimmt. Um diesen Wert müssen deshalb alle anderen Winkel korrigiert werden. Dies ergibt bei gleichzeitiger Umrechnung in die Dezimaldarstellung:

Ordnung	φ	Farbe	φ
0	59,9997°	(0. Ordnung)	60,0000°
1	89,2853°	gelbgrün	90,2431° 90,2656°
2	111,0661°	orange	91,1311° 90,1603°
3	131,5469°	rot	92,2489° 92,2781°

Auswertung – Gitterkonstante

Für die Phasendifferenz δ zwischen zwei von benachbarten äquivalenten Punkten eines Gitters (Gitterkonstante g) kommenden kohärenten Lichtstrahlen derselben Wellenlänge λ gilt

$$\delta = 2\pi \cdot \frac{\Delta s}{\lambda}$$

mit dem Wegunterschied (Gangunterschied) Δs . Dabei legt der eine Strahl vor dem Einfall die Strecke $g \cdot \sin \alpha$ (Einfallswinkel α zur Gitternormalen), der andere nach der Beugung die Strecke $g \cdot \sin \beta$ (Beugungswinkel β zur Gitternormalen) zurück, sodass

$$\delta = 2\pi \cdot \frac{g \cdot \sin \alpha - g \cdot \sin \beta}{\lambda}$$

$$\frac{\delta}{2\pi} = g \cdot \frac{\sin \alpha - \sin \beta}{\lambda}$$

Konstruktive Interferenz tritt dabei genau dann auf, wenn die gebeugten Lichtwellen phasengleich sind. Der Term $\frac{\delta}{2\pi}$ muss also eine ganze Zahl sein. Diese ganze Zahl ist als Beugungsordnung k bekannt:

$$k = g \cdot \frac{\sin \alpha - \sin \beta}{\lambda}$$

$$g = \frac{k \cdot \lambda}{\sin \alpha - \sin \beta}$$

Dabei lag im durchgeführten Experiment die Gitternormale bei $120,000^\circ$. Der Einfallswinkel war damit immer $60,000^\circ$, der Beugungswinkel die Differenz zwischen der Gitternormalen und dem gemessenen Winkel. Für die einzelnen Messwerte ergibt dies folgende Gitterkonstanten:

$$g_1 = \frac{1 \cdot 546,1 \text{ nm}}{\sin 60,000^\circ - \sin(120,000^\circ - 89,2853^\circ)} = 1,5372 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

$$g_2 = \frac{2 \cdot 546,1 \text{ nm}}{\sin 60,000^\circ - \sin(120,000^\circ - 111,0661^\circ)} = 1,5367 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

$$g_3 = \frac{3 \cdot 546,1 \text{ nm}}{\sin 60,000^\circ - \sin(120,000^\circ - 131,5469^\circ)} = 1,5366 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

Auswertung – Wellenlängen des Natrium-Spektrums

Auch hier gilt der bereits hergeleitete Zusammenhang

$$k = g \cdot \frac{\sin \alpha - \sin \beta}{\lambda}$$

$$\lambda = g \cdot \frac{\sin \alpha - \sin \beta}{k}$$

Die Ordnung beträgt in allen Fällen $k = 1$, als Gitterkonstante wurde $1,5366 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ gewählt. Wie in der vorhergehenden Auswertung ist $\alpha = 60,000^\circ$, $\beta = 120,000^\circ - \varphi$ mit dem gemessenen Winkel φ .

Farbe	Wellenlänge	
gelbgrün	568,1 nm	568,6 nm
orange	588,8 nm	589,5 nm
rot	615,2 nm	615,9 nm

Auswertung – Auflösungsvermögen des Gitters

Das Auflösungsvermögen eines optischen Gitters berechnet sich nach:

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = k \cdot N$$

Dabei ist N die Anzahl der Spalte, die sich aus der Gitterbreite w und der Gitterkonstante g ergibt

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = k \cdot \frac{w}{g}$$

$$= k \cdot \frac{50 \text{ mm}}{1,5367 \cdot 10^{-6} \text{ m}}$$

$$= 3,25 \cdot 10^4 \cdot k$$

Messunsicherheit

Messunsicherheit – Gitterkonstante

Die Gitterkonstante wurde nach

$$g = \frac{k \cdot \lambda}{\sin \alpha - \sin \beta}$$

berechnet. Da k als ganze Zahl keine Unsicherheit aufweist, berechnet sich die Unsicherheit für g nach

$$u(g) = k \cdot \sqrt{\frac{u^2(\lambda)}{(\sin \alpha - \sin \beta)^2} + \lambda^2 \cdot \frac{u^2(\alpha) \cdot \cos^2 \alpha + u^2(\beta) \cdot \cos^2 \beta}{(\sin \alpha - \sin \beta)^4}}$$

Die Unsicherheit der Wellenlänge λ der grünen Quecksilberlinie wurde nicht angegeben. Es wird deshalb $\pm 0,1$ nm angenommen. Die Unsicherheit der Winkelmessung wird vom Hersteller mit $10''$ angegeben, was $0,003^\circ$ entspricht. Bei Berechnung der exakten Ergebnisse mit dem Computer stellt sich heraus, dass der erste Summand in der Wurzel für alle Messwerte vernachlässigbar klein ist. Da außerdem $u(\alpha) = u(\beta) = u(\varphi)$ angenommen wird, vereinfacht sich die Formel zu

$$u(g) = k \cdot \sqrt{\lambda^2 \cdot \frac{u^2(\alpha) \cdot \cos^2 \alpha + u^2(\beta) \cdot \cos^2 \beta}{(\sin \alpha - \sin \beta)^4}}$$

$$= u(\varphi) \cdot k \cdot \lambda \cdot \frac{\sqrt{\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta}}{(\sin \alpha - \sin \beta)^2}$$

Damit ergeben sich folgende Messunsicherheiten:

Ordnung	$\frac{u(g)}{\text{nm}}$
1	± 13
2	$\pm 7,2$
3	$\pm 4,8$

Es ist folglich der für das Maximum dritter Ordnung gemessene Wert der mit der kleinsten Unsicherheit.

Messunsicherheit – Wellenlänge des Natrium-Spektrums

Da sich die Wellenlänge nach

$$\lambda = g \cdot \frac{\sin \alpha - \sin \beta}{k}$$

berechnet und k als ganze Zahl keinen Fehler aufweist, gilt

$$u(\lambda) = \frac{\sqrt{u^2(g) \cdot (\sin \alpha - \sin \beta)^2 + g^2 \cdot u^2(\varphi) \cdot (\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta)}}{k}$$

Daraus berechnen sich folgende Unsicherheiten:

Farbe	Wellenlänge	
gelbgrün	$\pm 4,9$ nm	$\pm 4,9$ nm
orange	$\pm 5,0$ nm	$\pm 5,0$ nm
rot	$\pm 5,1$ nm	$\pm 5,1$ nm

Zusammenfassung

Zusammenfassung – Gitterkonstante

Das Gitterkonstante des verwendeten Reflexionsgitters beträgt $(1536,6 \pm 4,8)$ nm.

Zusammenfassung – Natrium-Spektrum

Die Wellenlängen des Na-Spektrums wurden mit

Farbe	Wellenlänge	
gelbgrün	568,1 nm	568,6 nm
orange	588,8 nm	589,5 nm
rot	615,2 nm	615,9 nm

bestimmt. Die Messunsicherheit beträgt ± 5 nm.

Im Internet wurden am 18.05.2013 (14:28) unter

<http://books.google.de/books?id=SMNujUcc1Z0C&pg=PA190>

folgende Werte gefunden:

Farbe	Wellenlänge		
gelbgrün	568,2633 nm	568,8193 nm	568,8205 nm
orange	588,9950 nm	589,5924 nm	
rot	615,4225 nm	616,0747 nm	

Der Vergleich mit den Tabellenwerten legt nahe, dass der Fehler zu großzügig geschätzt wurde.

Zusammenfassung – Charakterisierung von Spektren

Im Emissionsspektrum der Tischlampe wurden folgende diskrete Linien gefunden:

Farbe	Wellenlänge
rot	620 nm
gelb	590 nm
grün	550 nm
blaugrün	480 nm
blauviolett	440 nm

Das Sonnenlicht zeigte sich den Experimentatoren als kontinuierliches Spektrum mit folgenden Lücken:

Farbe	Wellenlänge	Bezeichnung	Ursprung	Tabellenwert
rot	670 nm	B-Linie	atmosphärisches O ₂	686,719 nm
gelb	590 nm	D-Linie	Na	588,997 nm/589,594 nm
			He	587,562 nm
grün	530 nm	E-Linie	Fe	527,039 nm
grün	520 nm	b-Linie	Mg	516,733 nm/517,270 nm/518,362 nm
			Fe	516,751 nm/516,891 nm
blau	490 nm	F-Linie	H	486,134 nm