

Lichtbeugung und Lichtbrechung (BUB)

Manuel Staebel – 2236632 / Michael Wack 2234088

1 Einleitung

Der Welle-Teilchen-Dualismus des Lichtes (bzw. von EM-Wellen) ist ein Grund für die vielen unterschiedlichen Beobachtungen, die bei Experimenten mit elektromagnetischen Wellen gemacht werden können. Im Versuch BUB werden Beugungsphänomene untersucht, die auf Wellencharakteristik des Lichts hinweisen. Im zweiten Teil, bei dem Brechungserscheinungen demonstriert werden, spielt nur der Teilchencharakter des Lichtes eine Rolle.

2 Versuchsdurchführung

2.1 Bestimmung der grünen Hg-Linie durch Beugung am Spalt

Da der Versuch bereits, wie in der Anleitung angegeben, aufgebaut war, mussten wir nur noch wenige Veränderungen vornehmen. Zuerst justierten wir den Abstand zwischen Lupe und Maßstabsdia so, dass die Skala deutlich und scharf abgebildet wurde. Dann versuchten wir durch verschieben des direkt an der Lichtquelle gelegenen Spaltes die Parallelität des Lichts und damit die Abbildung der Beugungserscheinungen zu verbessern und den Einfluss von Streulicht zu minimieren. Allerdings hatte dies keinen all zu großen Einfluss auf das Ergebnis. Anschließend bestimmten wir bei drei verschiedenen Abständen L zwischen Beugungsspalt und Maßstabsdia die Lage des Hauptmaximum und aller gut sichtbaren Minima.

Aus der absoluten Lage der Minima kann man den jeweiligen Abstand zum Hauptmaximum (S_i) und, mit Kenntnis des Abstandes L zwischen Beugungsspalt und Maßstabsdia, auch den jeweiligen Beugungswinkel α bestimmen. Der Winkel ergibt sich mit Hilfe folgender Formel: $\alpha = \arctan S_i/L$. Da es sich um sehr kleine Winkel handelt, gilt: $\sin \alpha \approx \tan \alpha$. Mit Hilfe dieser Beziehung ergibt sich:

$$\frac{S_i}{L} = \frac{n \cdot \lambda}{d} \Rightarrow \lambda = \frac{S_i \cdot d}{L \cdot n} \quad (\lambda = \text{Lichtwellenlänge, } n = \text{Ordnung des Minimums, } d = \text{Spaltbreite} = 127 \mu\text{m})$$

Mit Hilfe obiger Formeln ergeben sich folgende Werte:

	L	Hauptmaximum	6	5	4	3	2	1	1	2	3	4	5	6
Absolutwerte [mm]	100	20,3	17,9	18,3	18,7	19,1	19,5	19,9	20,7	21,1	21,5	21,9	22,3	22,7
S_i [mm]		0	2,4	2	1,6	1,2	0,8	0,4	0,4	0,8	1,2	1,6	2	2,4
$\sin \alpha \approx \tan \alpha = S_i/L$		0	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0	0	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
λ [nm]			508	508	508	508	508	508	508	508	508	508	508	508

Absolutwerte	150	20,1	16,4	17	17,7	18,2	18,9	19,5	20,7	21,3	22	22,6	23,2	23,8
S_i [mm]		0	3,7	3,1	2,4	1,9	1,2	0,6	0,6	1,2	1,9	2,5	3,1	3,7
$\sin \alpha \approx \tan \alpha = S_i/L$		0	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0	0	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
λ [nm]			522,11	524,93	508	536,22	508	508	508	508	536,22	529,17	524,93	522,11

Absolutwerte	200	19,9	15	15,8	16,6	17,4	18,2	19	20,8	21,7	22,5	23,3	24,3	25,1
S_i [mm]		0	4,9	4,1	3,3	2,5	1,7	0,9	0,9	1,8	2,6	3,4	4,4	5,2
$\sin \alpha \approx \tan \alpha = S_i/L$		0	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0	0	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
λ [nm]			518,58	520,7	523,88	529,17	539,75	571,5	571,5	571,5	550,33	539,75	558,8	550,33

Aus den erhaltenen Wellenlängen lässt sich der Mittelwert und die Messunsicherheit errechnen. Konkret ergeben sich für die Wellenlänge der grünen Hg-Linie folgende Werte:

Mittelwert: 524 nm Standardabweichung: 21 nm statistische Messunsicherheit: $u_s = 4$ nm

Die apparative Messunsicherheit wurde mit Hilfe der Formeln der Fehlerfortpflanzung bestimmt: Der Fehler der Spaltbreite war mit $\pm 2 \mu\text{m}$ auf der Apparatur angegeben. Der Fehler von S_i wurde von uns auf $\pm 0,05$ mm geschätzt. Für L gehen wir von ± 2 cm aus, da ein Schiefstehen

der einzelnen optischen Komponenten sowie ein Versatz der Hauptebenen gegenüber der Ablesemarkierung nicht ausgeschlossen werden kann. Als Ausdruck für die Fehlerfortpflanzung ergibt sich:

$$\frac{u_A}{\lambda} = \left(\left(\frac{0,05 \text{ mm}}{2,16 \text{ mm}} \right)^2 + \left(\frac{2 \mu \text{ m}}{127 \mu \text{ m}} \right)^2 + \left(\frac{20 \text{ mm}}{150 \text{ mm}} \right)^2 \right)$$

Und somit als apparative Messunsicherheit: $u_A = 10 \text{ nm}$

Die gesamte Messunsicherheit beträgt demnach:

$$u_\lambda = \sqrt{u_A^2 + u_S^2} = 11 \text{ nm}$$

$$\lambda = 524 \pm 11 \text{ nm}$$

2.2 Bestimmung der Wellenlängen der gelben, grünen und blauen Hg-Linien durch Beugung am Gitter

Der Versuchsaufbau ähnelt dem der letzten Messung, nur dass der Spalt durch ein Gitter und das Maßstabsdia durch ein Lineal ersetzt und der Grünfilter entfernt wurde. Durch die unterschiedlich starke Beugung der verschiedenen Quecksilber-Linien erscheinen die Maxima der einzelnen Farben getrennt. Dies kann zur Berechnung der Wellenlängen der Hg-Linien benutzt werden. Die Rechnung erfolgt analog zu der am Spalt, nur dass sich der Winkel α nun auf die Maxima und nicht mehr auf die Minima bezieht. Der Spaltbreite d entspricht die Gitterkonstante a ($=0,01 \text{ mm}$).

Es ergeben sich folgende Werte:

L	Blau			Grün			Gelb			
Ordnung	0	1	2	0	1	2	0	1	2	
Lage [mm]	400	151,5	169,0	186,5	151,5	173,5	196,0	151,5	175,0	198,5
S_i [mm]	0,0	17,5	35,0	0,0	22,0	44,5	0,0	23,5	47,0	
λ [nm]		437,5	437,5		550,0	556,3		587,5	587,5	

Lage [mm]	450	151,5	171,0	191,0	151,5	176,0	201,0	151,5	178,0	204,0
S_i [mm]	0,0	19,5	39,5	0,0	24,5	49,5	0,0	26,5	52,5	
λ [nm]	0	433,3	438,9		544,4	550,0		588,9	583,3	

Lage [mm]	500	151,5	173,5	195,0	151,5	179,0	206,5	151,5	180,5	210,0
S_i [mm]	0,0	22,0	43,5	0,0	27,5	55,0	0,0	29,0	58,5	
λ [nm]		440,0	435,0		550,0	550,0		580,0	585,0	

Hieraus lassen sich für die einzelnen Linien Mittelwerte und statistische Messunsicherheiten bestimmen:

Blau: $\lambda_b = 437 \pm 2 \text{ nm}$ Grün: $\lambda_{gr} = 550 \pm 2 \text{ nm}$ Gelb: $\lambda_g = 585 \pm 2 \text{ nm}$

Die apparativen Messunsicherheiten ergeben sich analog zu der Messung am Spalt. Leider stand uns kein Fehler der Gitterkonstante a zur Verfügung. Für L nahmen wir wieder einen Fehler von 2 cm , für S_i $0,5 \text{ mm}$ an.

Für die blaue Linie ergibt sich folgender apparativer Fehler:

$$u_A = \left(\left(\frac{0,5 \text{ mm}}{29,5 \text{ mm}} \right)^2 + \left(\frac{20 \text{ mm}}{450 \text{ mm}} \right)^2 \right) \cdot 437 \text{ nm} = 1 \text{ nm}$$

Gesamter Fehler:

$$u_\lambda = \sqrt{u_A^2 + u_S^2} = \sqrt{(1 \text{ nm})^2 + (2 \text{ nm})^2} = 2 \text{ nm} \Rightarrow \lambda_{blau} = 437 \pm 2 \text{ nm}$$

Für die grüne Linie ergibt sich folgender apparativer Fehler:

$$u_A = \left(\left(\frac{0,5 \text{ mm}}{30,5 \text{ mm}} \right)^2 + \left(\frac{20 \text{ mm}}{450 \text{ mm}} \right)^2 \right) \cdot 550 \text{ nm} = 1 \text{ nm}$$

Gesamter Fehler:

$$u_\lambda = \sqrt{u_A^2 + u_S^2} = \sqrt{(1 \text{ nm})^2 + (2 \text{ nm})^2} = 2 \text{ nm} \Rightarrow \lambda_{grün} = 550 \pm 2 \text{ nm}$$

Für die gelbe Linie ergibt sich folgender apparativer Fehler:

$$u_A = \left(\left(\frac{0,5 \text{ mm}}{39,5 \text{ mm}} \right)^2 + \left(\frac{20 \text{ mm}}{450 \text{ mm}} \right)^2 \right) \cdot 585 \text{ nm} = 1 \text{ nm}$$

Gesamter Fehler:

$$u_\lambda = \sqrt{u_A^2 + u_S^2} = \sqrt{(1 \text{ nm})^2 + (2 \text{ nm})^2} = 2 \text{ nm} \Rightarrow \lambda_{\text{gelb}} = 585 \pm 2 \text{ nm}$$

Die große Abweichung der Wellenlänge der grünen Hg-Linie von der Messung am Spalt kommt vermutlich von einer falschen Gitterkonstanten. Diese Annahme resultiert aus der Beobachtung, dass sich mit 3 Beugungsordnungen unmöglich die gesamte Linealbreite ausnutzen ließ, wie in der Anleitung angegeben. Da an der Versuchsapparatur keine Angabe zu finden war, mussten wir die Angabe aus der Anleitung verwenden.

2.3 Brechung am Prisma

Zuerst musste das Fernrohr auf unendlich eingestellt werden. Dies geschah durch Anvisieren eines weit entfernten Gegenstandes. Anschließend wurde der Spalt sowohl scharf als auch sehr dünn eingestellt.

Die Messung des Prismenwinkels ergab: $\epsilon = \alpha/2 = 124,8^\circ/2 = 62,4^\circ$

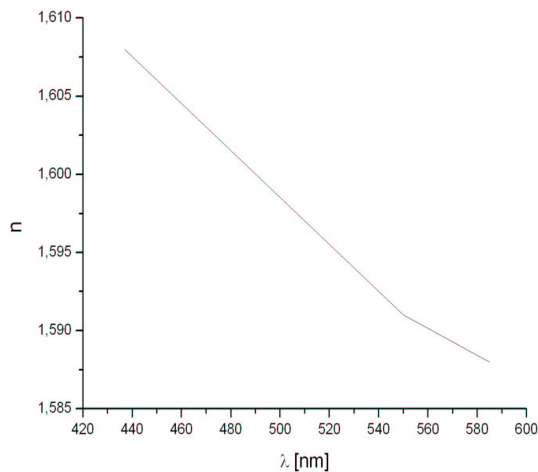
Durch Messung des Winkels der Minimalablenkung lässt sich mit Hilfe der Wellenlänge und dem Prismenwinkel der Brechungsindex mit folgender Formel berechnen:

$$n = \frac{\sin\left(\frac{\delta_{\min} + \epsilon}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\epsilon}{2}\right)}$$

Für die am Gitter gemessenen Wellenlängen ergeben sich folgende Brechungsindizes:

Linie	λ [nm]	α_1 [°]	α_2 [°]	δ_{\min} [°]	n
Blau	437	129,3	179,7	50,4	1,608
Grün	550	131,1	179,7	48,6	1,591
Gelb	585	131,4	179,7	48,3	1,588

Trägt man n über λ auf, ergibt sich folgendes Diagramm:



Am Ende des Versuchs wurde in das Spektrum eine Skala eingeblendet. Dadurch kann die Apparatur als Spektrometer benutzt werden. Kennt man die Wellenlängen von zwei Linien des Spektrums kann man mit Hilfe der Skala auf Wellenlängen anderer unbekannter Linien schließen.

3 Fragen

3.1 Mit welcher Lichtquelle lassen sich Interferenzerscheinungen am besten demonstrieren und warum?

Die elementare Bedingung um Interferenzerscheinungen zu zeigen, ist kohärentes Licht. Ein Laser ist daher die geeignetste Lichtquelle, um Interferenzerscheinungen zu demonstrieren. Er liefert Licht einer Wellenlänge mit zeitunabhängiger Phasendifferenz. Da sein Licht monochromatisch ist, müssen keine Filter (wie bei

anderen Lichtquellen) verwendet werden, um die Interferenzerscheinungen klar sichtbar zu machen. Filter schwächen das Licht und sind daher nicht optimal.

Um Interferenzerscheinungen bei thermischen Lichtquellen sichtbar zu machen, müsste das „verwendete“ Licht z.B. über eine Blende auf ein kleines Flächenstück der Lichtquelle reduziert werden, um einen näherungsweise kohärenten Strahl zu erzeugen. Die Verwendung der Blende hat wiederum den Nachteil, die Intensität des Lichtes zu schwächen.

3.2 Treten Beugungerscheinungen nur an Objekten auf, deren Abmessung in der Größenordnung der Lichtwelle liegt (erster Satz in 3.1.1)?

Nein. Ein Schatten ist der Bereich hinter einem Gegenstand, der im Sinne der geometrischen Optik durch einen von der Quelle ausgehenden Strahl nicht erreichbar ist. Durch Beugung dringt die Welle auch in die geometrische Schattenzone hinter dem Gegenstand ein. Bei Objekten, die eine deutlich höhere Abmessung als die Wellenlänge des Lichtes haben, liegt das Beugungsbild nur so nah am Rand des geometrischen Schattenraumes, dass man es nicht erkennen kann.

3.3 Wie groß ist die Geschwindigkeit von Licht im Glas?

Nach dem Snelliusschen Brechungsgesetz gilt:

Phasengeschwindigkeit von Licht in einem Medium: $c = \frac{c_0}{n}$

$$n_{\text{blau}} = 1,608$$

Für den ermittelten Brechungsindex n_{blau} erhalten wir damit eine Lichtgeschwindigkeit im Medium Glas von

$$c_{\text{blau}} = \frac{299792458 \text{ m/s}}{1,608} = 186,438 \cdot 10^6 \text{ m/s} .$$

3.4 Was versteht man unter Dispersion?

Dispersion ist die Abhängigkeit der Phasengeschwindigkeit von der Wellenlänge (bzw. Frequenz) der Welle.

Normale Dispersion: Die Brechzahl des Mediums wird mit wachsender Wellenlänge λ kleiner.

Anomale Dispersion: Die Brechzahl des Mediums wird mit wachsender Wellenlänge λ größer.

Keine Dispersion: Brechzahl des Mediums ist unabhängig von der Wellenlänge.

3.5 Wodurch kann das Auflösungsvermögen eines Prismenspektrographen in der Praxis begrenzt sein?

Zunächst gilt natürlich als Obergrenze das theoretisch maximal erreichbare Auflösungsvermögen für ein

Prismenspektroskop: $A = L \cdot \frac{dn}{d\lambda}$ wobei L die Basislänge des tatsächlich mit Licht ausgefüllten Prismas und

$\frac{dn}{d\lambda}$ die Dispersion ist. Hinzu kommen weitere Faktoren, die das Auflösungsvermögen begrenzen:

Aus Intensitätsgründen darf die Breite des verwendeten Spalts nicht beliebig klein sein, wodurch schon eher (je größer der Spalt) – als bei einer scharfen, „dünnen“ Abbildung – Überlagerungen auftreten. Weiter spielen die Fehler der verwendeten Linsen sowie Fehler im Schliff oder Material des Prismas eine Rolle.

3.6 Nimmt der Brechungsindex von Flintglas vom roten zum blauen Spektralbereich zu oder ab?

Der Brechungsindex von Flintglas nimmt zu, d.h. blaues Licht wird am stärksten abgelenkt.

3.7 Ist der Verlauf der Funktion $n(\lambda)$ linear?

Aus dem Graph der sich aus den Werten in unserem Versuch ergab, könnte man auf eine Linearität von $n(\lambda)$ schließen. Dies ist im Allgemeinen jedoch nicht der Fall. $n(\lambda)$ hat einen materialabhängigen Verlauf.