

# Physik-Praktikum: BUB

## Einleitung

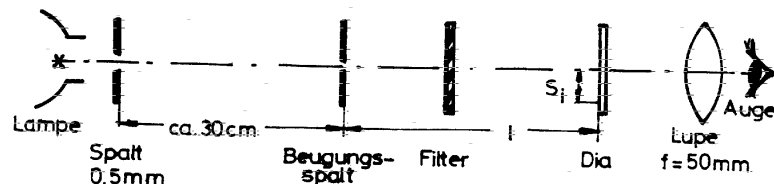
Während man Lichtbrechung noch mit einer Modellvorstellung von Licht als Teilchen oder als Strahl mit materialabhängiger Ausbreitungsgeschwindigkeit erklären kann, ist die Lichtbeugung am Spalt oder am Gitter und die sich daraus ergebenden Interferenzerscheinungen (wenn mindestens ein Doppelspalt vorhanden ist) das Paradebeispiel für den Wellencharakter des Lichts.

## Versuchsaufbau und Durchführung

Dieser Versuch besteht aus zwei Teilen: im ersten Teil haben wir die Lichtbrechung an einem Prisma untersucht, danach die Lichtbeugung an einem Spalt und an einem optischen Gitter.

## Lichtbeugung am Spalt und am Gitter

### Beugung am Spalt



$$\text{Maxima: } \lambda = \frac{d \cdot \sin(S_i/l)}{z + 1/2} \quad z \in \mathbb{N}$$

$$\text{Minima: } \lambda = \frac{d \cdot \sin(S_i/l)}{n} \quad n \in \mathbb{N}$$

1. Messung Spalt:		(Abstände Maximum/Minimum zum Hauptmaximum: in mm; andere Abstände in cm; Wellenlängen: in nm)											
Hauptmaximum:	9,8	Position Spalt:	68	Position Maßstab:	55,3	Abstand:	12,7						
Maxima	12,5	11,9	11,3	10,7	8,9	8,3	7,7	7,1					
Abstand zum Hauptmaximum:	2,7	2,1	1,5	0,9	0,9	1,5	2,1	2,7					
Ordnungszahl	4	3	2	1	1	2	3	4					
Wellenlänge	5,81E-007	5,81E-007	5,81E-007	5,81E-007	5,81E-007	5,81E-007	5,81E-007	5,81E-007	Mittelwert:	5,81E-007	Std-abw:	1,57E-011	
Minima		11,6	11	10,4	9,2	8,6	8						
Abstand zum Hauptmaximum:		1,8	1,2	0,6	0,6	1,2	1,8						
Wellenlänge		5,81E-007	5,81E-007	5,81E-007	5,81E-007	5,81E-007	5,81E-007		Mittelwert:	5,81E-007	Std-abw:	7,81E-012	
2. Messung Spalt:		(Abstände Maximum/Minimum zum Hauptmaximum: in mm; andere Abstände in cm; Wellenlängen: in nm)											
Hauptmaximum:	10	Position Spalt:	68	Position Maßstab:	42,5	Abstand:	25,5						
Maxima	15,2	14	12,9	11,8	8,3	7,2	6	4,9					

Abstand zum Hauptmaximum:	5,2	4	2,9	1,8	1,7	2,8	4	5,1				
Ordnungszahl	4	3	2	1	1	2	3	4				
Wellenlänge	5,57E-007	5,51E-007	5,60E-007	5,79E-007	5,47E-007	5,40E-007	5,51E-007	5,47E-007	Mittelwert:	5,54E-007	Std-abw:	1,18E-008
Minima		13,5	12,3	11,3	8,9	7,8	6,5					
Abstand zum Hauptmaximum:		3,5	2,3	1,3	1,1	2,2	3,5					
Wellenlänge		5,63E-007	5,55E-007	6,27E-007	5,31E-007	5,31E-007	5,63E-007		Mittelwert:	5,61E-007	Std-abw:	3,54E-008
<b>3. Messung Spalt:</b> (Abstände Maximum/Minimum zum Hauptmaximum: in mm; andere Abstände in cm; Wellenlängen: in nm)												
Hauptmaximum:	10,3	Position Spalt:	68	Position Maßstab:	36	Abstand:	32					
Maxima	15,4	13,9	11,4	8,1	6,6	5,2						
Abstand zum Hauptmaximum:	5,1	3,6	1,1	2,2	3,7	5,1						
Ordnungszahl	3	2	1	1	2	3						
Wellenlänge	5,60E-007	5,53E-007	2,82E-007	5,64E-007	5,69E-007	5,60E-007			Mittelwert:	5,15E-007	Std-abw:	1,14E-007
Minima	14,7	13,2	11,7	8,8	7,3	5,8						
Abstand zum Hauptmaximum:	4,4	2,9	1,4	1,5	3	4,5						
Wellenlänge	5,64E-007	5,57E-007	5,38E-007	5,77E-007	5,77E-007	5,77E-007			Mittelwert:	5,65E-007	Std-abw:	1,54E-008

Die hier angegebene Standardabweichung gibt nur die statistischen Fehler an. Aber die apparativen Fehlersindach nicht zu vernachlässigen:

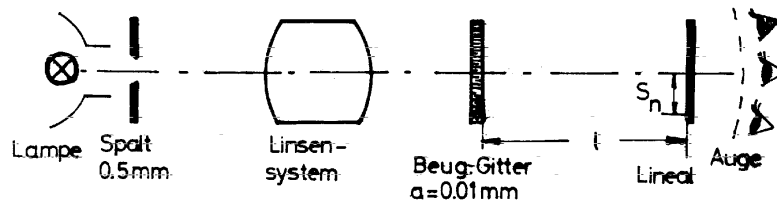
- Der Abstand zwischen Maßstabsdia und Beugungsspalt kann nur auf  $\pm 2$  mm genau gemessen werden.
- Die Maxima und Minima sind erstens unscharf (offenbar ist die Lichtquelle nicht ganz monochromatisch) und zweitens sind die äußeren Maxima lichtschwach (offensichtlich hat die Lichtquelle eine geringe Kohärenzlänge). Fehler: 1 Skalenstrich, entspricht  $\pm 0,1$  mm

Fehlerfortpflanzung:

$$u = \sqrt{(0,1 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2 \left( \frac{d \cos(S/l)}{l n} \right)^2 + (2 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2 \left( \frac{d \cos(S/l) S}{l^2 n} \right)^2} \quad (\text{bzw. } z + 1/2 \text{ statt } n)$$

Es ergibt sich folgender Mittelwert:  $\lambda = (56 \pm 4) \cdot 10 \text{ nm}$ .

### Beugung am Gitter



Gitterkonstante  $a = 0,01 \text{ mm}$  :

$$\lambda = \frac{a \cdot \sin \arctan(S_n/l)}{n} \quad n \in \mathbb{N}_0$$

(Die Formel in der Praktikumsanleitung im Abschnitt 3.3 b) ist übrigens falsch, dort wurde die

Gitterkonstante  $a$  mit dem Beugungswinkel  $\alpha$  verwechselt.)

<b>1.MessungGitter:</b>	(Abstände:in cm;Wellenlängen:in m)										
<i>Hauptmaximum:</i>	15,1	<i>Position Schirm:</i>	97,4	<i>Position Gitter:</i>	52,8	<i>Abstand:</i>	44,6				
Maximablau	21	19	17,1	13,3	11,2	9,3					
Abstandzum Hauptmaximum:	5,9	3,9	2	-1,8	-3,9	-5,8					
Maximagrün	22,5	20	17,6	12,7	10,2	7,8					
Abstandzum Hauptmaximum:	7,4	4,9	2,5	-2,4	-4,9	-7,3					
Maximagelb	23	20,3	17,7	12,5	10	7,8					
Abstandzum Hauptmaximum:	7,9	5,2	2,6	-2,6	-5,1	-7,3					
Ordnungszahl	3	2	1	-1	-2	-3					
Wellenlängeblau	4,37E-007	4,36E-007	4,48E-007	4,03E-007	4,36E-007	4,30E-007	<i>Mittelwert:</i>	4,32E-007	<i>Standardabw:</i>	1,51E-008	
Wellenlängegrün	5,46E-007	5,46E-007	5,60E-007	5,37E-007	5,46E-007	5,38E-007	<i>Mittelwert:</i>	5,46E-007	<i>Standardabw:</i>	7,97E-009	
Wellenlänge gelb	5,81E-007	5,79E-007	5,82E-007	5,82E-007	5,68E-007	5,38E-007	<i>Mittelwert:</i>	5,72E-007	<i>Standardabw:</i>	1,72E-008	
<b>2.MessungGitter:</b>	(Abstände:in cm;Wellenlängen:in m)										
<i>Hauptmaximum:</i>	15,1	<i>Position Schirm:</i>	97,4	<i>Position Gitter:</i>	42,8	<i>Abstand:</i>	54,6				
Maximablau	22,3	19,9	17,5	12,8	10,4	8					
Abstandzum Hauptmaximum:	7,2	4,8	2,4	-2,3	-4,7	-7,1					
Maximagrün	24,2	21,1	18,1	12,2	9,2	6,1					
Abstandzum Hauptmaximum:	9,1	6	3	-2,9	-5,9	-9					
Maximagelb	24,7	21,5	18,3	12	8,8	5,6					
Abstandzum Hauptmaximum:	9,6	6,4	3,2	-3,1	-6,3	-9,5					
Ordnungszahl	3	2	1	-1	-2	-3					
Wellenlängeblau	4,36E-007	4,38E-007	4,39E-007	4,21E-007	4,29E-007	4,30E-007	<i>Mittelwert:</i>	4,32E-007	<i>Standardabw:</i>	6,90E-009	
Wellenlängegrün	5,48E-007	5,46E-007	5,49E-007	5,30E-007	5,37E-007	5,42E-007	<i>Mittelwert:</i>	5,42E-007	<i>Standardabw:</i>	7,15E-009	
Wellenlänge gelb	5,77E-007	5,82E-007	5,85E-007	5,67E-007	5,73E-007	5,71E-007	<i>Mittelwert:</i>	5,76E-007	<i>Standardabw:</i>	6,84E-009	
<b>3.MessungGitter:</b>	(Abstände:in cm;Wellenlängen:in m)										
<i>Hauptmaximum:</i>	15,2	<i>Position Schirm:</i>	97,4	<i>Position Gitter:</i>	76,2	<i>Abstand:</i>	21,2				
Maximablau	18	17,1	16,1	14,3	13,3	12,4					
Abstandzum Hauptmaximum:	2,8	1,9	0,9	-0,9	-1,9	-2,8					
Maximagrün	18,8	17,5	16,4	14,1	12,9	11,7					
Abstandzum Hauptmaximum:	3,6	2,3	1,2	-1,1	-2,3	-3,5					
Maximagelb	19	17,7	16,5	14	12,7	11,5					
Abstandzum Hauptmaximum:	3,8	2,5	1,3	-1,2	-2,5	-3,7					
Ordnungszahl	3	2	1	-1	-2	-3					
Wellenlängeblau	4,36E-007	4,46E-007	4,24E-007	4,24E-007	4,46E-007	4,36E-007	<i>Mittelwert:</i>	4,36E-007	<i>Standardabw:</i>	9,94E-009	
Wellenlängegrün	5,58E-007	5,39E-007	5,65E-007	5,18E-007	5,39E-007	5,43E-007	<i>Mittelwert:</i>	5,44E-007	<i>Standardabw:</i>	1,65E-008	
Wellenlänge gelb	5,88E-007	5,86E-007	6,12E-007	5,65E-007	5,86E-007	5,73E-007	<i>Mittelwert:</i>	5,85E-007	<i>Standardabw:</i>	1,60E-008	

HiergibtesebenfallszusätzlichzudenstatistischenFehlernauchapparativeFehler:

- DerAbstandzwischenGitterundLinealkannebenfallsnurauf  $\pm 2$  mm genaugeschriebenwerden.
- Das Lineal hat eine Millimetereinteilung, d.h. es kann nur auf ca.  $\pm 0,5$  mm genau abgelesen werden.

Wenn man mit Hilfe des Fehlerfortpflanzungsgesetzes von Gauß die Unsicherheiten berechnet, kommt man auf eine apparative Unsicherheit, die deutlich größer als die statistische Unsicherheit ist, annähernd in der Größenordnung der Wellenlängen!

$$u = 0,5 \cdot 10^{-8} \cdot \sqrt{\frac{l^2 (16 S^2 + l^2)}{(l^2 + S^2 n)^3}};$$

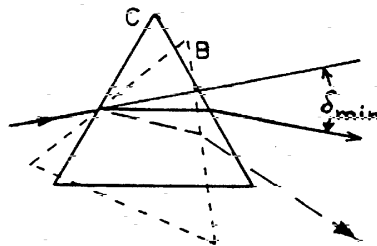
Es ergeben sich als Mittelwerte für die Spektrallinien:  $\lambda_{blau} = (433 \pm 24)$  nm ,  $\lambda_{grün} = (544 \pm 24)$  nm und  $\lambda_{gelb} = (578 \pm 24)$  nm

## Lichtbrechung am Prisma

Zuerst wird der Prismenwinkel bestimmt, indem die Reflexionswinkel von parallel einfallendem Licht auf beide Seiten gemessen wird:

1. Messung:  $\gamma_1 = \alpha_1 - \beta_1 = 128,8^\circ - 9,1^\circ = 119,7^\circ \Rightarrow \varepsilon_1 = \gamma_1 / 2 = 59,85^\circ$ ,
2. Messung:  $\gamma_2 = \alpha_2 - \beta_2 = 125,8^\circ - 6,1^\circ = 119,7^\circ \Rightarrow \varepsilon_2 = \gamma_2 / 2 = 59,85^\circ$ .

Messung des Winkels minimaler Ablenkung  $\delta_{min}$ :



blau-violette Linie:  $\delta_{blau} = \gamma_0 - \gamma_1 = 183,0^\circ - 131,9^\circ = 51,1^\circ$

grüne Linie:  $\delta_{grün} = \gamma_3 - \gamma_2 = 179,9^\circ - 132,6^\circ = 47,3^\circ$

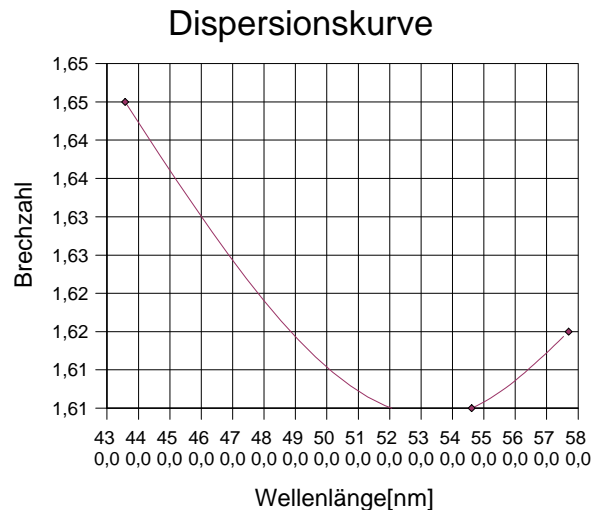
gelbe Linie:  $\delta_{gelb} = \gamma_5 - \gamma_4 = 180,3^\circ - 132,4^\circ = 47,9^\circ$

Obwohl die Winkelskala einen Nonius hat, kann man den Winkel nicht auf 1/20 Grad genau ablesen, weil erstens die Spaltbreite (eine Spektrallinie ist keine wirkliche Linie, sondern hat im Spektroskop eine Breite), zweitens die Optik des Okulars (je nach Blickwinkel verschiebt sich das Fadenkreuz gegenüber der Linie) und drittens die Tatsache, dass sich im Bereich des minimalen Ablenkungswinkels bei Drehung des Prismas dieser kaum verändert, eine genaue Ablesung schwierig machen. Während des Versuchs stellten wir fest, dass man in einem Bereich von etwa  $\pm 0,7^\circ$  um den beobachteten Minimalwinkel aufgrund obiger Fehlerquellen keinen Unterschied sieht. Bei unseren Messergebnissen müsste der minimale Ablenkungswinkel der gelben Spektrallinie vermutlich geringer sein als der der grünen (da beides im Bereich normaler Dispersion), eine Messunsicherheit von ca.  $\pm 0,7^\circ$  muss man also auf jeden Fall annehmen.

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

<i>Linie</i>	<i>Wellenlänge (Literaturwerte)</i>	<i>minimaler Brechungswinkel</i>	<i>Brechzahl</i>
blau-violett	435,8nm	51,1°	(1,65 ± 0,013)
grün	546,1nm	47,3°	(1,61 ± 0,012)
gelb	577,0nm	47,9°	(1,62 ± 0,012)

Esergibtsich,alskubischeSplineinterpoliert,folgendeDispersionskurve:



Fehlerfortpflanzung: Für den minimalen Brechungswinkel und für den Prismenwinkel wird jeweils eine Unsicherheit von  $0,7^\circ$  angenommen (siehe oben). Esergibtsich für die Brechzahl:

$$u_n = (0,7^\circ) \cdot \sqrt{\left( \frac{1}{2} \frac{\cos\left(\frac{\delta_{min} + \varepsilon}{2}\right)}{\sin(\varepsilon/2)} \right)^2 + \left( \frac{1}{2} \frac{\cos\left(\frac{\delta_{min} + \varepsilon}{2}\right)}{\sin(\varepsilon/2)} - \frac{1}{2} \frac{\sin\left(\frac{\delta_{min} + \varepsilon}{2}\right) \cos(\varepsilon/2)}{\sin^2(\varepsilon/2)} \right)^2};$$

Damit wurde die Messunsicherheit der Brechzahlen in der obigen Tabelle berechnet.

Wenn man eine Skala einblendet, kann man die Wellenlänge einer unbekanntenen Linie bestimmen, weil man die Skala nach der bekannten Dispersionskurve des Prismas eichen und auf eine bekannte Spektrallinie ausrichten kann.

### Fragen

#### Mit welcher Lichtquelle lässt sich Interferenzerscheinungen am besten demonstrieren und warum?

Mit einer monochromatischen Lichtquelle, weil die Beugung abhängig von der Wellenlänge des Lichts ist. Bei farbigem Licht sind deshalb die Interferenzmaxima und -minima der verschiedenen Wellenlängen nicht an der selben Stelle, die Interferenz sieht also unschärfer aus. Weil die Wellenlänge von rotem Licht annähernd doppelt so groß wie von violetterem Licht ist, ist die Entfernung der Maxima und der Minima voneinander deutlich sichtbar. Bei weißem Licht sieht man also sehr breite Maxima im Farbverlauf der Spektralfarben; ein ideal monochromatisches Licht ist Laserlicht.

Damit Interferenzerscheinungen auftreten, müssen die interferierenden Wellenzüge kohärent sein. Je größer die Kohärenzlänge des Lichts, desto größer kann der Gangunterschied der interferierenden Wellenzüge sein, d.h. desto mehr Maxima sind zu sehen. Laserlicht hat auch eine sehr große

Kohärenzlänge, mansiehtdamitalsodeutlichmehrMaximaalsmitLichtausderGlühbirne.

### TretenBeugungserscheinungenunranObjektenauf,derenAbmessunginder GrößenordnungderLichtwelleliegt(ersterSatzin3.1.1)?

Beugungserscheinungen treten bei allen Objekten auf. Allerdings kann man sie bei Objekten (d.h. Spalte,Gitter),diedeutlichgrößeralsdieLichtwellenlängesind,vernachlässigen.DerGrundist:Einen derartigen großen Spalt kann man sich als Aneinanderreihung von kleinen Einzelspalten von der Breite in der Größenordnung einer Lichtwellenlänge vorstellen, bei denen jeweils Beugung und Interferenz auftritt.EsgibtkeineTrennstreifenzwischen denEinzelspalten,essindalsoimPrinzipunendlichviele Einzelspalte, die sich auch überlappen. Die Folge: Die Überlagerung der Interferenzerscheinungen, die beliebiggegenseitigverschobensind,ergibteinenbreiten,gleichmäßigenLichtstrahl.

Das bedeutet: Beugung tritt bei großen Objekten nur am Rand auf, und kann gegenüber der Intensität desungebeugtenStrahlsvernachlässigtwerden.

### WiegroßistdieGeschwindigkeitvonLichtimGlas?

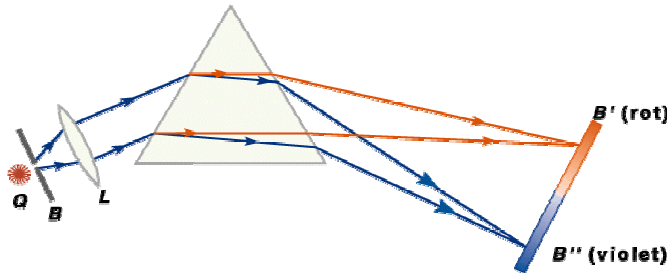
$$n_{\text{Glas}} = \frac{c}{c_{\text{Glas}}} \Rightarrow c_{\text{Glas}} = \frac{c}{n_{\text{Glas}}}; n_{\text{Glas}} = 1,61 \text{ (Flintglas)} \Rightarrow c_{\text{Glas}} = 0,621 c = 1,86 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

### WasverstehtmanunterDispersion?

DieDispersionbezeichnetdieAbhängigkeitderPhasengeschwindigkeit(unddamitderBrechzahl)von der Wellenlänge. Wird die Brechzahl mit wachsender Wellenlänge kleiner ( $dn/d\lambda < 0$ ), so spricht man von *normalerDispersion*, imumgekehrtenFallvon *anomalerDispersion*.

### WodurchkanndasAuflösungsvermögeneinesPrismenspektrographeninderPraxis begrenztsein?

- Spaltbreite: Damit die Lichtintensität nicht zu klein wird (d.h. noch so viel Licht da ist, dass man die Linien sieht), kann die Spaltbreite nicht beliebig klein sein. Benachbarte Spektrallinien können jedoch näher beieinander sein als die Linie (die ja das Bild des Spalts ist) breit ist, daher erscheinen diesebeidenLinienalseineeinzig.
- Dispersion (ist sie zu klein, werden benachbarte Spektrallinien zu wenig verschieden gebrochen, sie erscheinen nicht als einzelne Linien – daher verwendet man für Prismen Flintglas statt Kronglas, da seineDispersiongrößerist)
- Basislänge des Prismas (je größer das Prisma bzw. der lichtgefüllte Bereich des Prismas, desto größer ist der Abstand der Strahlen verschiedener Wellenlänge voneinander, siehe Grafik (aus Stöcker<sup>1</sup>))



(Das *spektrale Auflösungsvermögen* eines Prismas ist als Produkt der Basislänge und der Dispersion desPrismasdefiniert.)

- AbbildungsfehlerundBeugungbeidenanderenoptischenKomponentenwiez.B.Linsen

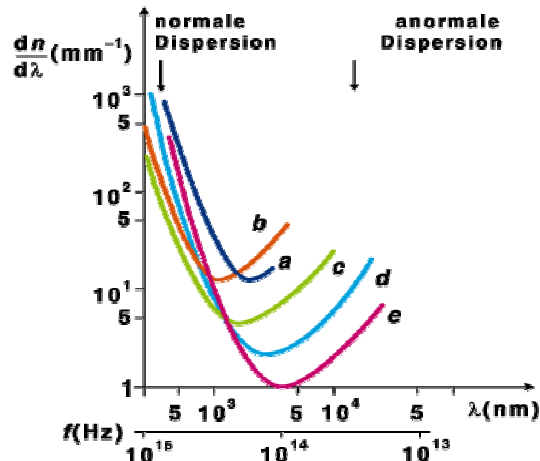
## Nimmt der Brechungsindex von Flintglas vom roten zum blauen Spektralbereich zu oder ab?

Im Bereich des sichtbaren Lichts hat Flintglas normale Dispersion, d.h. der Brechungsindex nimmt vom (langwelligen) roten bis zum (kurzwelligen) blauen Licht zu.

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

Nein.

Grafik aus Stöcker<sup>1</sup>:



(a): Flintglas, (b): Quarz, (c): Flussspat, (d): NaCl, (e): KBr

<sup>1</sup> Horst Stöcker (Hrsg.): Taschenbuch der Physik (mit CD-ROM), 3. Auflage, Harri Deutsch Verlag, Thun/Frankfurt am Main 1998, ISBN 3-8171-1556-3