

Einführung

Im ersten Teil des Versuchs geht es um Beugung und Interferenz am Einzelspalt, im zweiten Teil am Gitter. Eine Na-Lampe (Spektrallampe) wird genutzt um die Fraunhofer-Beugung am Einzelspalt zu untersuchen. Fürs Gitter wird eine Hg-Lampe benutzt.

Theorie + FormelnSuperposition & Interferenz

Elektrische Feld  $\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \delta)}$  mit der Kreisfrequenz  $\omega = 2\pi \nu$  und dem Wellenvektor  $\vec{k} \rightarrow |\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda} \rightarrow \lambda \rightarrow$  Wellenlänge. Treten nun mehrere Wellen aufeinander (Superposition)

ergibt sich  $\vec{E}_{\text{tot}} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ . Damit ergibt sich die gesamte Intensität  $I_{\text{tot}} = \langle E_{\text{tot}} E_{\text{tot}}^* \rangle$

$$= I_1 + I_2 + \langle \vec{E}_1 \vec{E}_2^* + \vec{E}_2 \vec{E}_1^* \rangle = \vec{E}_{0,1} \cdot \vec{E}_{0,2} \cdot (e^{i((\vec{k}_1 - \vec{k}_2) \cdot \vec{r} - (\omega_1 - \omega_2)t + (\delta_1 - \delta_2))} + e^{-i((\vec{k}_2 - \vec{k}_1) \cdot \vec{r} - (\omega_2 - \omega_1)t + (\delta_2 - \delta_1))})$$

Die Lichtquelle ist monochromatisch  $\rightarrow \omega_1 = \omega_2$   $|\vec{k}_1| = |\vec{k}_2|$  damit ist  $\langle \vec{E}_1 \vec{E}_2^* + \vec{E}_2 \vec{E}_1^* \rangle = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\vec{E}_{0,1}, \vec{E}_{0,2}) \cos((\delta_2 - \delta_1)t)$ ,  $\delta$  ist die Phasenlage

Räumliche Kohärenz bezeichnet nun wenn zwischen 2 Quellen ein räumlicher Abstand besteht. ( $\vec{r}_1 - \vec{r}_2$ )

Gangunterschied  $\Delta s = \Delta_2 - \Delta_1 = (\vec{r}_2 - \vec{r}_1) \cdot (\hat{r}_2 - \hat{r}_1) \approx 2d \sin \beta' \approx 2d \beta'$ , wegen kleiner

Kleinwinkelnäherung  $\sin \beta' \approx \frac{D}{L} \approx \beta'$  ergibt sich  $\Delta s \approx \frac{2dD}{L}$

Mit  $\Delta s = \frac{\lambda}{4}$  findet ein Wechsel zwischen konstruktiver und destruktiver Interferenz.

Räumliche Kohärenzbedingung ist somit  $\frac{2dD}{L} \ll \frac{\lambda}{4}$ . Dies kann man nun umstellen mit  $\alpha' = \frac{D}{L}$

$\alpha' = \frac{1}{B} \geq 0$  und  $\beta' \ll \frac{1}{B} \geq 0$  mit  $\alpha = \frac{\alpha'}{2}$  und  $\beta = \frac{\beta'}{2}$ .

Zeitliche Kohärenz bezieht sich auf die Länge eines Wellenzugs

Sie liegt vor wenn entlang der Zeitachse eine feste Phasenkohärenz besteht.

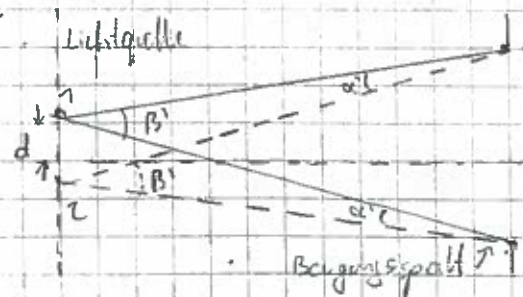
Dieser Wellenzug muss lang genug existieren um

interferieren zu können.  $\Delta = c \cdot T$  mit  $T$  Lebensdauer eines Atoms im angeregten Zustand

$$T = \frac{1}{(2\pi \Delta \nu)}$$

Beugung und Interferenz am Gitter

Die Bedingung für eine Maximum lautet  $\Delta c = a \sin \alpha = m \lambda$  mit



$g$  = Gitterkonstante die durch  $B = Ng$  bestimmt wird.  $B \rightarrow$  Breite des Gitters  
 $N \rightarrow$  Anzahl der Spalte,  $m$  ist die Ordnungszahl des Maximums.

Spektrales Auflösungsvermögen  $A$

$$A \equiv \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mN$$

Minimum der Ablenkung

Der Ablenkwinkel  $\varphi_m$  ergibt sich durch  $\varphi_m = \alpha_m - \alpha_0$ . Im Falle  $\alpha_0 = \pm \alpha_m$  entsteht ein Extremum.

Im min. der Ablenkung gilt  $\varphi_{m,\min} = 2|\alpha_0| = 2|\alpha_m|$

Fraunhofer  $\rightarrow$  Fernfeld ( $d \ll D$ )

Fresnel  $\rightarrow$  Nahfeld (kleinwinkelnäherung)

Aufgabe 368 A

Die Ausdehnung der Lichtquelle entlang der Verbindungslinie ist richtungsunabhängig. Die Formeln ① und ② gelten weiterhin!

⊗

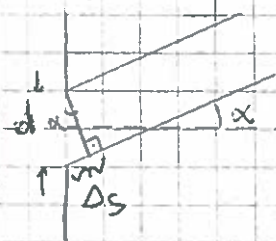
Aufgabe 368 B

$$\Lambda = c \cdot \tau, \quad \tau = \frac{1}{2\pi \Delta\nu} \quad | \Delta\nu = 10 \text{ MHz} \wedge \Delta\lambda = \frac{c^2}{\nu^2} \Delta\nu \approx 1 \cdot 10^{-14} \text{ m}$$

$$\tau = 1,59 \cdot 10^{-8} \text{ s}$$

$$\text{Somit ist } \Lambda = c \cdot 1,59 \cdot 10^{-8} \text{ s} = 4,775 \text{ m} \quad \checkmark$$

Aufgabe 368 C



$$\Rightarrow \Delta s = d \sin \alpha = k \cdot \lambda \quad (\text{konstruktiv})$$

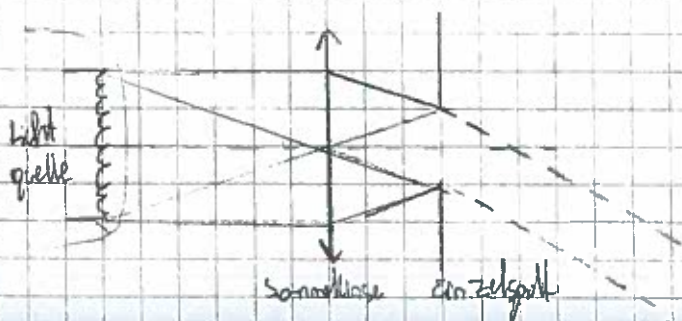
$$\Rightarrow \sin \alpha = \frac{k \cdot \lambda}{d}$$

$$\Rightarrow \sin \alpha = \frac{\lambda}{d}$$

$|k| = 1$  da erstes Max. gesucht

$$|d| = D \quad \checkmark$$

Aufgabe 368 D



⊗

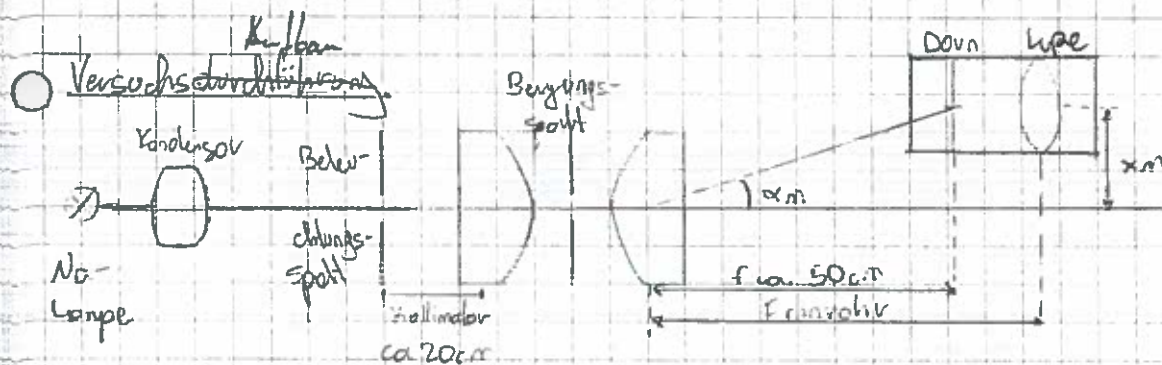


## Aufgabe 368 E

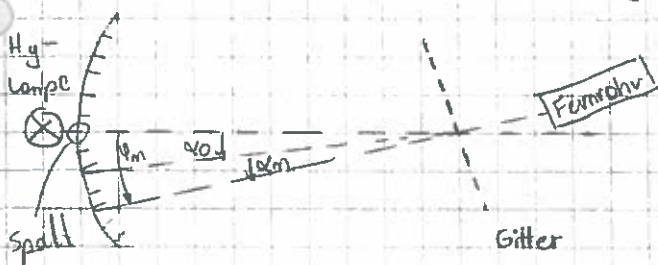
Weil wir "gerade" Spalte (also Striche) verwenden sieht man gerade Spektrallinien, für S-förmige bräuhete man S-förmige Spalte. ✓

## Aufgabe 368 F

Okular und Gitter müssen in den Mittelpunkt des Kreises stehen da der Abstand  $\lambda$  sein muss. Zudem muss der Krümmungsradius gleich dem der Spalte sein um einen großen Winkelbereich abzubilden. Theoretisch kann man noch eine Linse zwischen Gitter und Spalt befestigen. (-)



Dies ist der Aufbau zur Fraunhoferbeugung, damit misst man die Winkel  $\alpha_m$  der Maxima indem man die seitliche Entfernung  $x_m$  dieser Maxima ermittelt und dann mit Hilfe der Brennweite  $f$  des Fernrohrs den Winkel  $\alpha_m$  bestimmt. Dies wird für mehrere Ordnungen ermittelt. Zusätzlich soll man das Beugungsbild beim vergrößern und verkleinern betrachten.



Dies ist der Aufbau für den zweiten Teil des Versuchs. Der Ablenkwinkel  $\varphi_m$  wird mithilfe des Gitters bestimmt. Dazu dient noch eine grüne Hg-Lampe mit der wir auch die Gitterkonstante bestimmen werden.

Darach wird mit dem gleichen Verfahren die  $\lambda$  der blauen Linie bestimmt. Zuletzt nutzt man die gelbe Linie um zu beweisen dass  $\lambda = \frac{a}{N} = m\lambda$ . Hierzu wird vor das Gitter ein Spalt gestellt und dessen Größe für verschiedene Ordnungen variiert (i) somit erhält man für verschiedene Ordnungen und unterschiedliche Anzahlen  $N$  ausgeleuchteter Strichzahlen  $m$ .

### Aufgabe 368 d

$$x_0 = 50 \text{ cm} \quad \Delta x = 0,01 \text{ cm}$$

Ordnung  $\varphi_l [\text{cm}] \pm 0,2 \text{ cm}$   $\varphi_r [\text{cm}] \pm 0,1 \text{ cm}$

1	55,5	44,5
2	61,1	39
3	66,8	33,5
4	72,7	28,05
5	78,75	22,6
6	84,9	17,1
7	91,3	11,5

### Aufgabe 368 e

$$x_0 = 50 \text{ cm}$$

$\varphi_l [\text{cm}] \pm 0,2 \text{ cm}$   $\varphi_r [\text{cm}] \pm 0,1 \text{ cm}$

54,4	45,5
58,9	41,2
63,4	36,8
68	32,5
72,7	28,1
77,45	23,7
82,35	19,35

### Aufgabe 368 f

2. Ordnung

4. Ordnung

$$f = 10 \text{ cm}$$

$$f = 10 \text{ cm}$$

$$g = 11,3 \text{ cm} \pm 0,2 \text{ cm}$$

$$g = 11,8 \text{ cm} \pm 0,2 \text{ cm}$$

$$B = 2,2 \text{ cm} \pm 0,2 \text{ cm}$$

$$B = 1,5 \text{ cm} \pm 0,2 \text{ cm}$$

$$\left( \begin{array}{l} 7. \text{ Ordnung} \\ f = 10 \text{ cm} \\ g = 11,8 \text{ cm} \pm 0,2 \text{ cm} \\ B = 1 \text{ cm} \pm 0,2 \text{ cm} \end{array} \right) \rightarrow \text{siehe Fazit}$$

### Aufgabe 368 b

$$x_0 = 27,17 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$$

Minimum

$x_m [\text{mm}] \pm 0,1 \text{ mm}$

1	<del>24</del> 24	28,21
2	<del>26</del> 26	29,19
3	<del>28</del> 28	30,25
4	<del>30</del> 30	31,29
5	<del>32</del> 32	32,32
6	<del>34</del> 34	33,39
7	<del>36</del> 36	34,47
8	<del>38</del> 38	35,40

! Falsch abgelesen !

### Aufgabe 368 c

Spalt verkleinern  $\rightarrow$  Streifen dünner & schärfer

Spalt vergrößern  $\rightarrow$  Streifen dicker & unscharf

$$g = (52 \pm 0,5) \text{ cm} \quad f = 50 \text{ cm}$$

$$B = (3,2 \pm 0,1) \text{ cm}$$

$$D = (0,1 \pm 0,001) \text{ mm}$$



# Auswertung

b.

$$x_m = x - x_0$$

$$\Delta x_m = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta x_0)^2}$$

Steigung m

$$n = (1,01 \pm 0,01) \text{ mm}$$

$$= 175 \text{ nr}$$

Ordnung ( Minimum )

$x_m$  [mm]

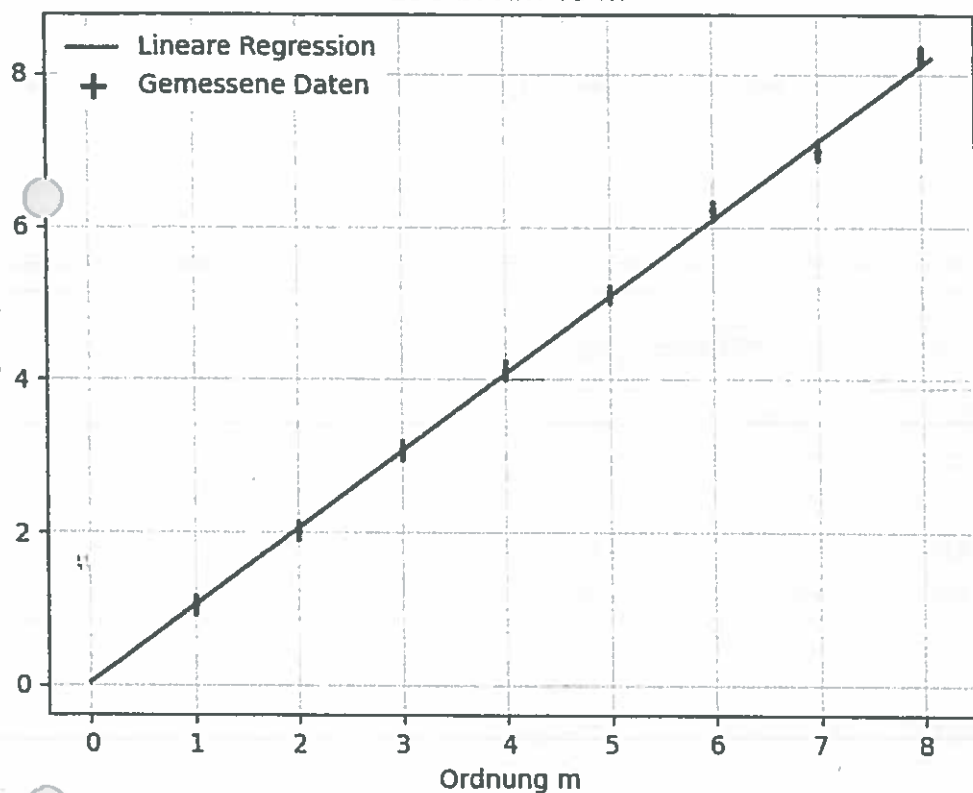
$\Delta x_m$  [mm]

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8

1,04  
2,02  
3,08  
4,12  
5,12  
6,22  
7  
8,23

0,14  
0,14  
0,14  
0,14  
0,14  
0,14  
0,14  
0,14

236 b.  $x_m$  vs m



$$I(\alpha) = I_0 \frac{\sin^2(q)}{q^2}$$

$$q = \frac{\pi D \sin(\alpha)}{\lambda}$$

$I(\alpha) \approx 0$  da Minima

Also muss  $\sin(q) = 0$

$$\Leftrightarrow q = m \pi \Rightarrow m = \frac{q}{\pi}$$

$$\Rightarrow m = \frac{D \sin(\alpha)}{\lambda}$$

$$\Rightarrow \lambda = \frac{D \sin(\alpha)}{m} \quad (1)$$

ident.:  $\sin \alpha = \frac{x_m}{f} \approx \alpha$  | Kleinwinkelnäherung

Man setzt man alles in (1) ein:  $\lambda = \frac{D \cdot x_m}{f} = \frac{D}{f} \cdot m$

$$\Delta \lambda = \sqrt{\left(\frac{D}{f} \cdot \Delta D\right)^2 + \left(\frac{D}{f} \cdot \Delta m\right)^2}$$

$$\lambda = (577 \pm 8) \text{ nm}$$

geg.: In der Brunnenkarte ist das Bild am schärfsten & B=G

Literaturwert: Grün  $\lambda = 500 - 560 \text{ nm}$  (Wikipedia)

Grünlich-Gelb  $\lambda = 570 - 575 \text{ nm}$

Ergebnisdiskussion?

Wie vorher (vorherige Seite) beschrieben, dass wenn der Spalt kleiner ist, das Beugungsmuster

schärfer ist. Dies geht nur bis ein gewissen Abstand, danach kommt nicht mehr genug Licht rein ein Beugungsbild zu erzeugen. Je größer man den Spalt öffnet desto verschärfter

d. das Beugungsgitter bis zu einem Grad wo keine Maxima mehr vorhanden sind.

wir Interferenz hier wahrnehmen ist die räumliche Kohärenzbedingung überprüft

$$\text{Lorenzgleichung } \frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \Rightarrow b = \frac{fg}{g-f}$$

$$\Delta b = \frac{1}{f^2} \Delta f \quad \Delta f = 0,1 \text{ nm}$$

$$(13000 \pm 0,0000004) \text{ nm}$$

$$= \frac{b}{g} \Rightarrow G = \frac{B \cdot g}{b}$$

$$= (1,28 \pm 20) \text{ nm}$$

Ergebnis (diskussion) ???

$$\Delta G = \frac{B \cdot g}{b^2} \Delta b$$

↑  
Ergebnis  $10^{-12} \text{ nm} \approx 0 \text{ nm}$   
was?

d

$$= \frac{(x_l - x_0) + (x_0 - x_r)}{2} = \frac{x_l - x_r}{2}$$

$$\Delta x_m = \frac{1}{2} \sqrt{(\Delta x_r)^2 + (\Delta x_l)^2} = 0,112 \text{ cm}$$

$$R = x_m \quad | R = 1 \text{ m} \Rightarrow \psi_m = x_m \quad \text{und} \quad \Delta \psi_m = \Delta x_m$$

$$\sin\left(\frac{\psi_m}{2}\right) = \frac{m \lambda}{2 g} \quad | g \rightarrow \text{bisher konstante}$$

$$g = \frac{m \lambda}{2 \sin\left(\frac{\psi_m}{2}\right)}$$

$$\Delta g = \frac{m \lambda}{4} \frac{\cos\left(\frac{\psi_m}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi_m}{2}\right)} \Delta \psi_m = \text{...}$$

rdnung	$x_l$ [cm]	$x_r$ [cm]	$x_m$ [m]	$\Delta x_m$ [m]	$g$ [m]	$\Delta g$ [m]
1	55,5	44,5	0,055	0,00112	9,930E-06	5,559E-09
2	61,1	39	0,111	0,00112	9,889E-06	5,529E-09
3	66,9	33,5	0,167	0,00112	9,821E-06	5,481E-09
4	72,7	28,05	0,223	0,00112	9,804E-06	5,456E-09
5	78,75	22,6	0,281	0,00112	9,757E-06	5,410E-09
6	84,9	17,1	0,339	0,00112	9,711E-06	5,360E-09
7	91,3	11,5	0,399	0,00112	9,644E-06	5,294E-09

$$g_m = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 g_i$$

$$= 9,734 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

$$\Delta g_m = 5,441 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

beachten  $x_m = \psi_m$  da  $R = 1 \text{ m}$

$$g = (9,734 \pm 0,005441) \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

e

rdnung	$x_l$ [cm]	$x_r$ [cm]	$x_m$ [m]	$\Delta x_m$ [m]	$\lambda$ [nm]	$\Delta \lambda$ [nm]
1	54,4	45,5	0,045	0,00112	435,787	11,419
2	58,9	41,2	0,089	0,00112	433,233	6,352
3	63,4	36,8	0,133	0,00112	433,871	4,871
4	68	32,5	0,178	0,00112	434,029	4,231
5	72,7	28,1	0,223	0,00112	435,898	3,911
6	77,45	23,7	0,269	0,00112	437,361	3,728
7	82,35	19,35	0,315	0,00112	438,900	3,618

$x_m$  gleich berechnet wie

vorher und  $x_m = \psi_m$ .

$$\lambda_m = 435,58 \text{ nm} \quad \left(\frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 \lambda_i\right)$$

$$\Delta \lambda = 5,45 \text{ nm}$$

$$\sin\left(\frac{\psi_m}{2}\right) = \frac{m \lambda}{2 g} \Leftrightarrow \lambda = \frac{2 g \sin\left(\frac{\psi_m}{2}\right)}{m}$$

$$\lambda = \sqrt{\left(\frac{2 g}{m} \cos\left(\frac{\psi_m}{2}\right) \cdot \Delta \psi_m\right)^2 + \left(\frac{2 g \sin\left(\frac{\psi_m}{2}\right)}{m} \cdot \Delta g\right)^2}$$

$$\lambda = (435,58 \pm 5,45) \text{ nm}$$

alternativ Wert: 450 - 475 nm (Wikipedia) → Falsch

f

$$= 578,01 \text{ nm}$$

$$A = \frac{\lambda}{\Delta \lambda} = 275,243 = m \cdot N$$

$$g = 9,794 \cdot 10^{-6} \text{ m} \Rightarrow d.$$

$$= 3,794 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$\text{Linien pro Millimeter } \frac{N}{\text{mm}} = \frac{1}{g}; \quad \Delta\left(\frac{N}{\text{mm}}\right) = \frac{1}{g^2} \Delta g$$

$$\Rightarrow \frac{N}{\text{mm}} = (102,103 \pm 0,057)$$

zur 2. Ordnung:

$$\text{in der Abbildungsgleichung } b = \frac{f \cdot g}{g - f} \quad \text{und} \quad \Delta b = \frac{1}{g^2} \Delta g \quad | \quad g = 11,3 \text{ cm} \pm 0,2 \text{ mm} \quad f = 10 \text{ cm}$$

$$\Rightarrow b = (93,3 \pm 0,00157) \text{ cm}$$

$$\text{mit } \frac{B}{b} = \frac{g}{f} \Rightarrow G = \frac{B \cdot g}{b}$$

$$| B = 3,2 \pm 0,2 \text{ cm}$$

$$\Delta G = \sqrt{\left(\frac{g}{b} \Delta B\right)^2 + \left(\frac{B}{b} \Delta g\right)^2 + \left(\frac{B \cdot g}{b^2} \Delta b\right)^2}$$

$$\Rightarrow G = (0,2665 \pm 0,0247) \text{ cm} = (2,665 \pm 0,247) \text{ mm}$$

$$\text{Es sieht also: } \frac{N}{\text{mm}} \cdot G = \cancel{102,103 \cdot 0,2665} = N = (272,1 \pm 0,014) \text{ Striche}$$

$$\Rightarrow R_{\text{zorden}} = 2N = \cancel{544,2} = (544,2 \pm 0,014) \rightarrow \text{scheint mir groß}$$

zur 4. Ordnung:

$$\cdot b = (65,5 \pm 0,00144) \text{ cm}$$

$$| g = 11,8 \pm 0,2 \text{ cm}$$

$$\cdot G = (0,1853 \pm 0,0363) \text{ cm} = (1,853 \pm 0,363) \text{ mm}$$

$$| B = 1,5 \pm 0,2 \text{ cm}$$

$$N = (189,197 \pm 0,029) \text{ Striche}$$

$$\cdot R_{\text{zorden}} = 4N = (756,788 \pm 0,084) \rightarrow \text{zu groß} \rightarrow \text{Fazit}$$

7. Ordnung unmöglich einzustellen (nicht mehr gesehen) s.o.

g

Bei diesen Versuchsaufbau konnten wir leider nicht das Teleskop und Gitter zusammen in den Abstand des Fokallängenradius zur Skala bringen. Die Linse konnten wir auch nicht so positionieren, dass die Linse steht, weil die Skala im Weg war (die konnte man nicht abnehmen).

Es war aber trotzdem in anderen Gittereinstellungen die gleiche Schärfe zwischen Skala und Beugungslinien zu sehen, wie im Minimum der Abblendung.



ist

bei  $\lambda$  gibt es eine Abweichung zum Literaturwert ich denke unsere Messung war nicht genau genug da wir unfähig war hatten. Wenn man sich zu viel bewegt hat, hat dies die Werte verschoben.

Der  $\lambda$  überweicht unser Wert vom Literaturwert ab das liegt wahrscheinlich daran das die Werte  $\varphi$  bzw. versch. genommen abgelesen wurden.

Es sieht schon gefährlich zu sein, wie man sieht ist  $\lambda$  schon 2 mal so groß wie der Wert den wir heraus bekommen in  $b$  sogar länger als  $\lambda$ , welches hätte man  $b$  messen sollen aber dies wollten wir vermeiden da der Wert mit dem verfügbaren Lineal einfach zu groß wäre und die Werte dann fehlerhaft seien. Die 7. Ordnung so versch. genommen (und ausgebreitet) und deswegen vermöge richtig abzulesen.

Fazit zu welchem Aufgaben?

Todo:

- Durchführung
- Vorarbeiten
- Ergebnisse darstellen und diskutieren
- Fazit ergänzen

Einführung

den wir alles aufgebaut haben, haben wir durch den Wellenmeter Interferenz gesehen. Die Striche waren am Anfang schräg also haben wir den Spalt verkleinert und dann jeweils die Abstände  $x_n$ , also Distanz von  $n$ -Ordnung zur 0. Ordnung gemessen. Dies haben wir für 8 Ordnungen gemacht. Dann haben wir die Veränderung des Beugungsbildes bei Verkleinerung und Vergrößerung des Spalts wahrgenommen und notiert.

Im zweiten Teil haben wir durch das Fernrohr und blicken darauf Beugung beobachtet und jeweils  $\varphi$  (Winkel 0. Ordnung bis  $x$ -Ordnung) gemessen.  $\varphi \rightarrow$  links war jeweils scharf zu erkennen jedoch  $\varphi$ -Rechts nicht, höher die Ordnung war desto breiter wurde das Beugungsbild.  $\varphi_2$  und  $\varphi_1$  wurden jeweils an ersten Extraktlinien (blau, grün, orange) gemessen.

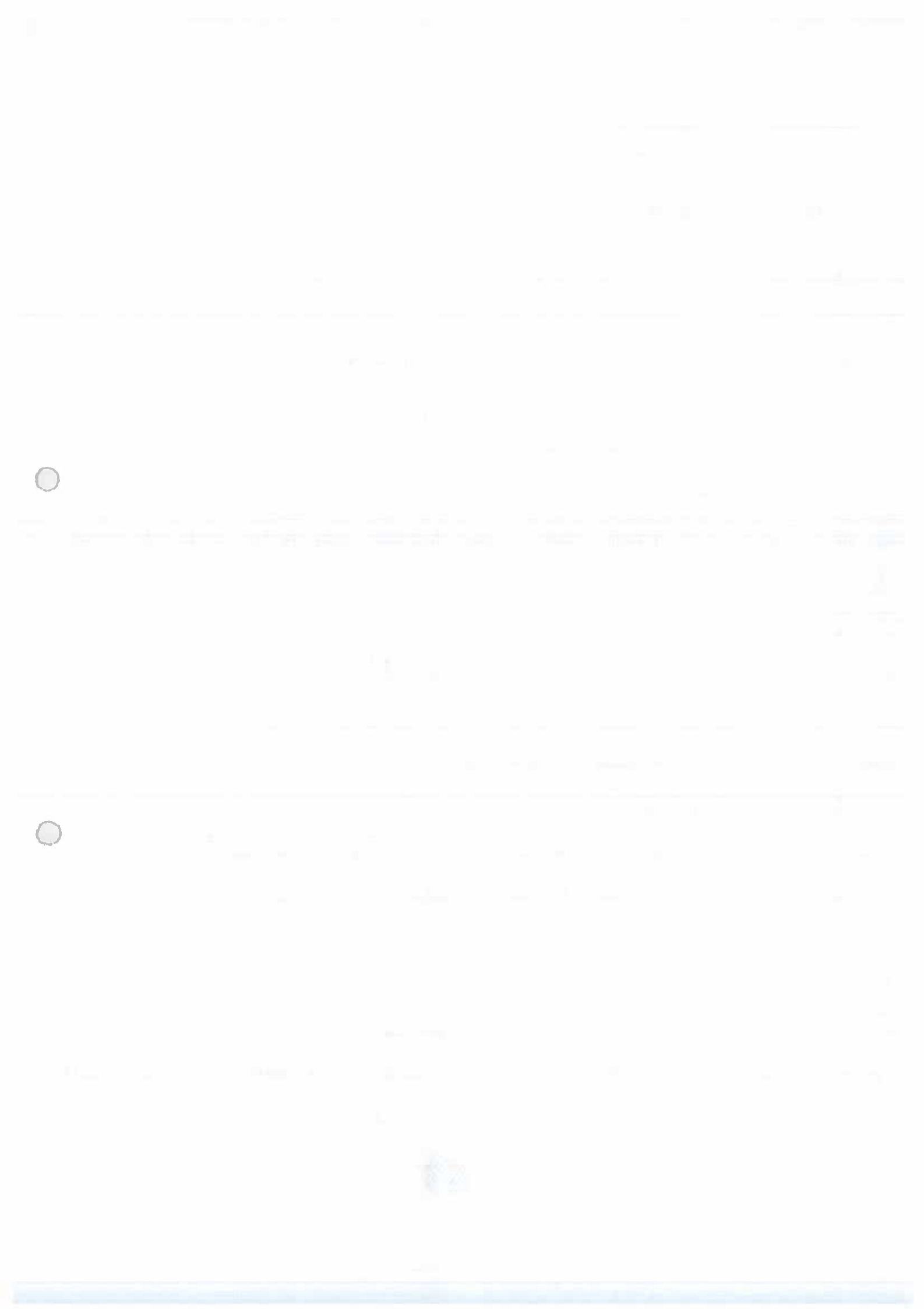
Aufgaben

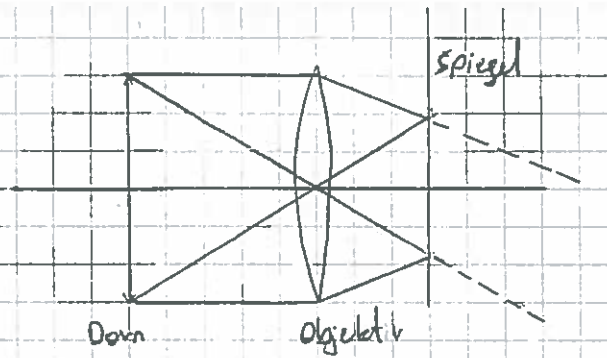
Lichtquelle

Durch Variation der Breite kann es sein, dass die Kohärenzbedingung nicht mehr erfüllt ist.

$\rightarrow$  andere Größe







ser Ergebnis bei c ist  $\delta = (1,28 - 0,041) \text{ mm}$  mit  $\Delta b = 0,041 \text{ mm}$

= 0

mit die Lichtquelle räumlich kohärent ist, muss gelten:  $dD \ll \lambda L$

$$> 0,00128 \text{ m} \cdot 0,0001 \text{ m} = 1,28 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \ll \lambda 582,857 \text{ nm} \cdot 0,503 \text{ m} = 3,708 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

Die Kohärenzbedingung ist hier nicht mehr erfüllt.

Unser Resultat:  $\lambda = (577 \pm 8) \text{ nm}$  Literatur:  $\lambda = 570 - 575 \text{ nm}$  (Wikipedia)

Unser Wert passt laut Literatur Wert zu einer Grünlich-Gelben Farbe, welche ich bestätigen kann.

Fazit ergänzung

Bei der a ging es darum wie man den Aufbau aufbaut! Dazu muss man sagen dass wir den nicht aufgebaut haben, (nur kontrolliert) da die Gruppe mit uns, den Versuch vor uns gemacht haben und man sich beide Aufbauten teilt.

-> siehe Fazit vorherige Seite

Bei der c sollten wir die räumliche Kohärenzbedingung überprüfen. ~~was~~ Jedoch ist unser Ergebnis, dass die Spaltbreite schlecht und ~~man~~ nicht weiter anwendbar. Die Bildweiten sind entweder viel weiter weg als die Wund ( $c \rightarrow b = 13 \text{ m}$ ) oder viel näher als die Wund ( $f \rightarrow b < 70 \text{ cm}$ ). Bei der Wund war die Gegenstandsweite auch nicht genau messen da man das hier nicht genau an den Mittelpunkt der Linse und Spalt anlegen kann.

Das passt auch mit Fehler nicht auf den Literatur Wert von Wikipedia für Blauviolettes Licht. Bei der d wurde die Auslenkung zur grünen Linie gemessen bei der c die blaue.

bestanden

