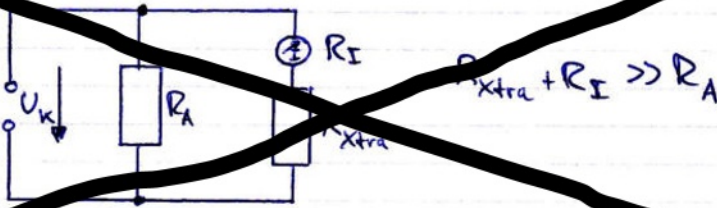


232.6

Mit einem Amperemeter ist es möglich Spannungen zu messen. Hier ist die Konstruktionsweise wichtig. Hierzu schaltet man das Amperemeter genauso parallel, wie man dies mit einem Voltmeter tun würde. Allerdings ist der Innenwiderstand des Amperemeters sehr klein und der eines Voltmeters sehr groß. Man muss dem Amperemeter also einen großen Widerstand in Reihe schalten:



232.7

$$E_{\text{Gap}} = (6,22 \pm 0,13) \text{ eV} \quad (\text{ergibt sich zu groß für Halbleiter } 0,62 \text{ eV würde besser passen...})$$

Der ermittelte Wert für die Gap-Energie passt gut zum Material Aluminium-Nitrid (AlN) mit $E_{\text{Gap}}(\text{AlN}) = 6,2 \text{ eV}$, welches sich innerhalb der Abweichung befindet.

Die nächst-besten Alternativen sind Boron-Nitrid (BN) mit $E_{\text{Gap}}(\text{BN}) \approx 5,9 \text{ eV}$ und

C (Diamant) mit $E_{\text{Gap}} = 5,4 \text{ eV}$. Aluminium-Nitrid ist hier der eindeutige

Favourite. (Quelle für Gap-Energien: chemie.de/lexikon/Bandlücke.html)

online library wiley.com/doi/10.1002/adfm.202300428)

Verstanden 26.10.2023

Versuch 368 - Beugung und Interferenz

Versuch 368 befasst sich in zwei Versuchsteilen mit jeweils der Beugung am Einzelgitter und am Doppelspalt (Gitter). ✓ und Interferenz

Theorie

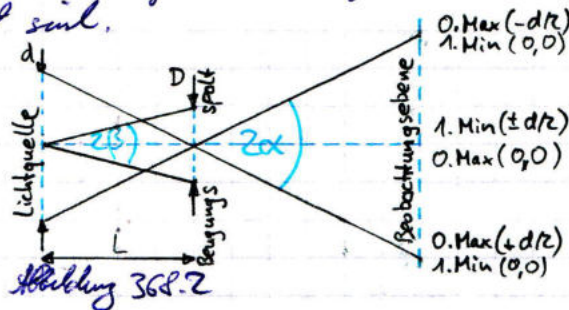
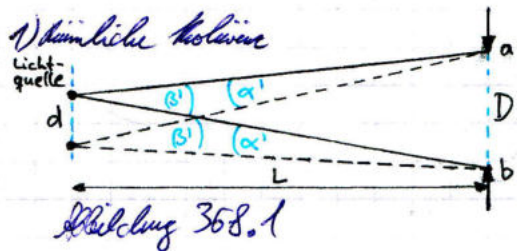
Das E-Feld einer ebenen EM-Welle lässt sich beschreiben durch:

$$\vec{E}(\vec{x}, t) = \vec{E}_0 e^{-i(\vec{k}\vec{x} - \omega t + \phi)} \quad (1)$$

wo \vec{k} der Wellenvektor ($|\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}$), ω die Kreisfrequenz ($\omega = 2\pi\nu$) und ϕ die Phasenlage sind. Durch Superposition von EM-Wellen, lässt sich das E-Feld einfach berechnen: $\vec{E}_{\text{tot}} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$. Hieraus folgt für die Intensität:

$$I_{\text{tot}} = \langle \vec{E}_{\text{tot}} \vec{E}_{\text{tot}}^* \rangle = I_1 + I_2 + \langle \vec{E}_1 \vec{E}_2^* + \vec{E}_2 \vec{E}_1^* \rangle \quad (2)$$

wobei $\langle \vec{E}_1 \vec{E}_2^* + \vec{E}_1^* \vec{E}_2 \rangle$ der Intensitätsausdruck ist. Dies führt dann zur Intensitätsformel, wenn: $\vec{E}_1 \neq \vec{E}_2$, $\omega_1 = \omega_2$ ist, sowie die Wellen kohärent sind.



1. Der Gangunterschied von Strahlen aus zwei Quellpunkten zu den Hauptmaxima des Beugungsgitters muss klein genug sein, sodass beide Extremstrahlen in dieselbe konstruktive Interferenz fallen. Es gilt dann: $dD \ll \frac{1}{2} \lambda L$.

2. Fällt das Maximum der Figur 1 in das 1. Minimum einer Figur 2, dann verschwindet die Überlagerung beider Figuren durch destruktive Interferenz. Es gilt dann: $dD = \lambda L$.

2) Zeitliche Kohärenz

Die zeitliche Länge Δ eines Wellenpakets ist gegeben durch $\Delta = c \tau$, wobei c die Lichtgeschw. und τ die Lebensdauer der angeregten Atome ist. Über die Unsicherheitsrelation ist die Verbindung zur Brunnbreite Δx : $\tau = 1/(2\pi \Delta \nu)$.

Für den Beugungsgang lautet die Intensitätsverteilung am Schirm:

$$I(\alpha) = I_0 \sin^2 q \quad \text{mit} \quad q = \frac{\pi D \sin \alpha}{\lambda} \quad (\text{wobei} \quad \sin q = \frac{\sin \alpha}{q} \text{ ist}) \quad (3)$$

Für Minima gilt $\sin q = 0$, sodass $q = m\pi = \frac{\pi D \sin \alpha}{\lambda}$, wobei m die Ordnung des Minimums ist. Weiterhin gilt bei Minima: $\sin \alpha \approx \frac{x_m}{f}$, wobei x_m der Abstand zum Minimum und f die Brennweite ist. Es folgt aus einfacher Überlegung: $\lambda = D/f \cdot x_m/m$.

Beugungsgitter

Beugungsgitter gibt es als Reflexions- & Transmissionsgitter, wobei letztere in Amplituden- & Phasengitter aufgeteilt werden. In vorliegender Darstellung wird ein Amplitudengitter verwendet. Die wichtigen Größen sind Gitterweite N , Gitterhöhe h , Gitterabstand g (Gitterkonstante) und Gesamtbreite $B = Ng$. Bei entsprechender Ausleuchtung ist eine Intensitätsverteilung mit Haupt- und Nebenmaxima erkennbar. Dabei gibt es $N-1$ Nebenminima und $N+2$ Nebenmaxima.

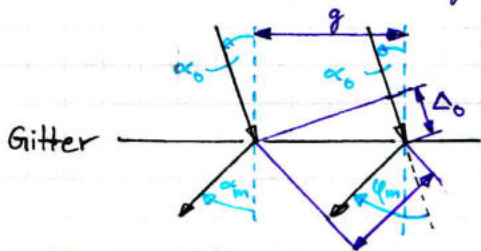


Abbildung 368.4 Beugung am Gitter

Aus Abb. 368.4 lässt sich die Weglängendifferenz zweier parallel einfallender Strahlen bestimmen zu: $\Delta = D_0 + D_m = g(\sin \alpha_0 + \sin(-\alpha_m)) = m\lambda$ für das Hauptmaximum m -te Ordnung. Im Fall $\alpha_0 = 0$ gilt das Differential: $g(\cos \alpha_0 d\alpha_0 - \cos \alpha_m d\alpha_m) = m d\lambda$. Für das spektrale Auflösungsvermögen des Gitters gilt:

$$A = \frac{\lambda}{\Delta \lambda} = mN \quad (\text{wobei} \quad \Delta \lambda = \lambda_2 - \lambda_1 \text{ die Differenz zwischen zwei Wellenlängen ist, die gerade noch als getrennt wahrgenommen werden können. Der minimale Winkelunterschied ist definiert als der Winkel zwischen dem einfallenden Strahl und dem } m\text{-ten Hauptmaximum.})$$

Wenn $\alpha_0 = \pm \alpha_m$ ist, dann gilt:

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

gut!

(4)

Vorarbeiten

368.A

- 2 Fälle: 1. Ausrichtung der Lichtquelle in Richtung der optischen Achse
2. Ausrichtung der Lichtquelle normal zur optischen Achse

In beiden Fällen können die Kohärenzbedingungen verletzt werden, wenn der Gangunterschied Δ verändert wird (durch die Ausrichtung) ✓

368.B

Schwingendauer im Lichtemittierenden Zustand: $\tau = (2\pi\Delta\nu)^{-1} = 1,59 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ mit $\Delta\nu = 10^7 \text{ Hz}$.

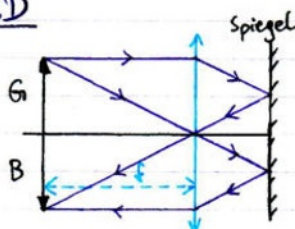
Länge des Wellenlänges: $\Delta = c\tau = 4,77 \text{ m}$ ✓

368.C

Es gilt: $\Delta s = D \sin \alpha_1$ und für Minima am Einzelpunkt $\Delta s = m\lambda$. Mit $m=1$ folgt

sofort: $\sin \alpha_1 = \frac{\lambda}{D}$ ✓

368.D



368.E

Man sieht gerade Spektrallinien, da die Gitter der Gitter gerade sind. Für S-förmige Spektrallinien sollten S-förmige Gitter verwendet werden.

368.F

Um auch außerhalb des Minimums der Abblendung eine scharfe Abbildung zu erzeugen, sorgt man mit einer Sammellinse vor dem Fernrohr, mit Brennweite an Gitter/Objektiv, dafür, dass das Licht parallel ins Fernrohr einfällt. ✓

Messwerte

368.b

$L = (27 \pm 1) \text{ cm}$
 $D = (0,1 \pm 0,001) \text{ mm}$
 $f = 10 \text{ cm}$

Ordnung	Abstand ($\pm 0,1 \text{ mm}$)
0	28,0
1	30,77
2	32,9
3	35,13
4	37,3
5	39,4
6	41,53
-1	24,72
-2	22,87
-3	20,71
-4	18,61
-5	16,57
-6	14,23

Maxima

368.die

Ordn.	grün [cm]		blau [cm]	
	links	rechts	links	rechts
0	50	50	50	50
1	55,5	44,6	54,3	45,6
2	60,8	39,1	58,7	41,3
3	66,3	33,7	63,0	37,1
4	71,8	28,2	67,4	32,6
5	77,3	22,7	71,8	28,2
6	82,8	17,2	76,1	23,9
7	88,4	11,8	80,5	19,5
8	93,9	6,1	85,0	15,1
9	99,5	0,6	89,3	10,6

368.f

$\Delta = 0,2 \text{ cm}$

Ordn.	B
2	$(3 \pm 0,9) \text{ cm}$
4	$(1 \pm 0,5) \text{ cm}$
7	

$b = 200 \text{ cm} \pm 5 \text{ cm}$
 $g = (10,5 \pm 0,2) \text{ cm}$

368.g

ist unabhängig mit Linse,
Bleibt unabhängig mit Linse

368.c

$d \rightarrow$ Durchmesser von Hind. Mass
 $d \rightarrow$ d. Helligkeit: $B = (1 \pm 0,5) \text{ cm}$
 $b = (200 \pm 5) \text{ cm}$ $g = (10,5 \pm 0,2) \text{ cm}$

Auswertung

368.B

Es ist aus den Messungen die Wellenlänge des Lichts der Lichtwellenlänge zu bestimmen. Hierzu müssen zunächst die Orte der Intensitätsminima x_m und gegen den Grad m des Minimums aufgetragen werden. Abbildung 1 zeigt den Zusammenhang mit linearem Fit der Form:

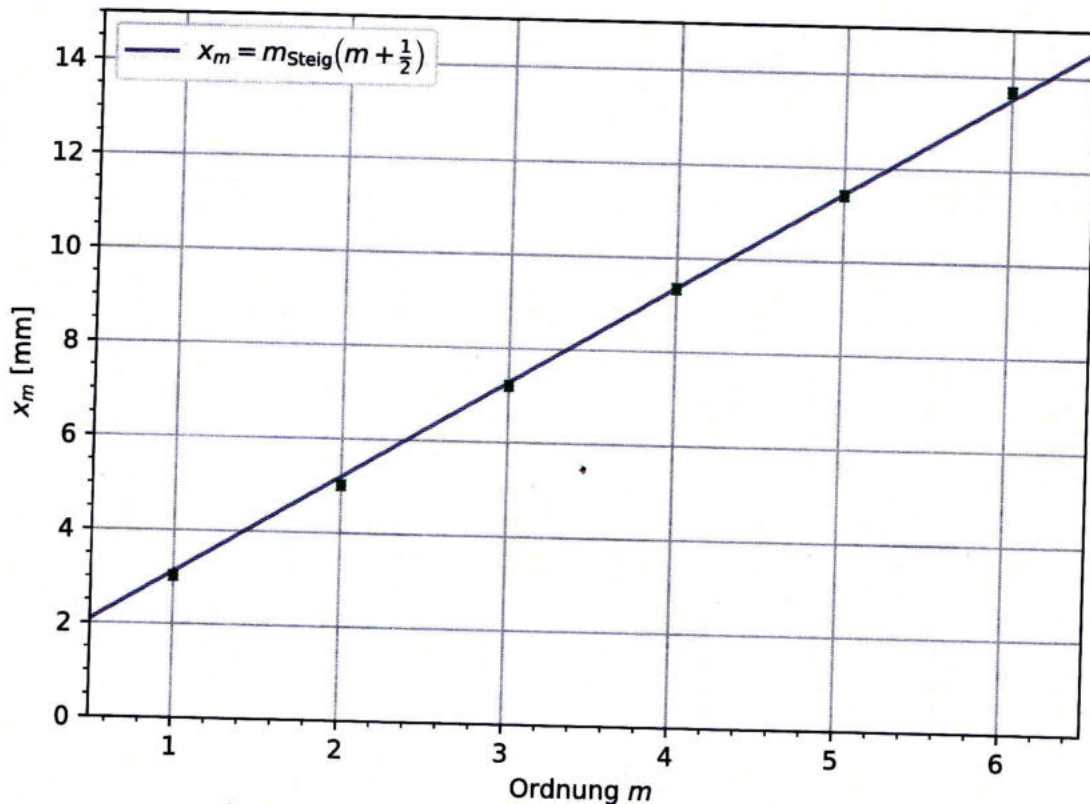


Abbildung 1 - Zusammenhang zwischen der Lage des Minimums und ihrer Grade

Ordnung m	x_m [mm]	Δ
1	3,025	0,1
2	5,015	0,1
3	7,21	0,1
4	9,345	0,1
5	11,415	0,1
6	13,68	0,1

$$x_m = m_{\text{Steig}} \left(m + \frac{1}{2} \right) \quad \text{Es wurden fälschlicherweise}$$

die Maxima gemessen, weshalb ein zusätzliches $\frac{1}{2}$ aus der Bedingung für das Maximum ersieht. Es gilt als Steigung m_{Steig} :

$$m_{\text{Steig}} = (2,08 \pm 0,01) \text{ mm}, \quad \text{mit } \chi^2 = 7,46,$$

Tabelle 1 - Werte zu Abbildung 1

Bzw. $\chi^2_{\text{red}} = 1,49$. Es ist offensichtlich ein linearer Zusammenhang zu erkennen.

Aus m_{Steig} lässt sich unmittelbar die Wellenlänge bestimmen. Aus der Überlegung im Abschnitt 'Theorie' (nach Gl. 3) gilt:

$$\lambda = \frac{D}{f} \cdot \frac{x_m}{m} = \frac{D}{f} \cdot m_{\text{Steig}} \quad \text{mit } \Delta \lambda = \left[\left(\frac{\Delta m_{\text{Steig}} D}{f} \right)^2 + \left(\frac{m_{\text{Steig}} \Delta D}{f} \right)^2 + \left(\frac{m_{\text{Steig}} D \Delta f}{f^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}},$$

also $\lambda = (520,5 \pm 65,28) \text{ nm}$. Der Vergleichswert aus der Literatur ist $\lambda_{\text{Lit}} \approx 589 \text{ nm}$, das Natrium D-Linien-Dublett (eigentlich zwei hintereinander liegende Linien) ([wikipedia.org/wiki/Sodium-D-line](https://en.wikipedia.org/wiki/Sodium_D-line)). Damit ist die ermittelte Wellenlänge am Rande des 10-Konfidenzintervalls. dk

368.C

Die Vergrößerung des Spalttes resultiert in einer Erhöhung des Gangunterschiedes der Hauptstrahlen. Für die Parameter $b = (200 \pm 5) \text{ cm}$, $g = (10,5 \pm 0,2) \text{ cm}$ und $B = (1 \pm 0,5) \text{ cm}$ erhält man mit

$$d_0 = \frac{B}{b} \cdot g \quad \text{mit } \Delta d_0 = \left[\left(\frac{g \Delta B}{b} \right)^2 + \left(\frac{B \Delta g}{b} \right)^2 + \left(\frac{B g \Delta b}{b^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} : d_0 = (0,525 \pm 0,263) \text{ mm} \quad \checkmark$$

Wenn das Interferenzmuster nicht mehr sichtbar ist, dann sind die Kohärenz-

dingungen nicht mehr erfüllt. Diese lautet: $d \cdot D \ll \frac{1}{8} \lambda \cdot L$. Beide Seiten der Gleichung
 limitiert: $d \cdot D = (0,525 \pm 0,026) \text{ mm}^2$ und $\frac{1}{8} \lambda \cdot L = (0,018 \pm 0,002) \text{ mm}^2$. Damit ist die
 Näherungsbedingung nicht mehr erfüllt.

368. d+e

Aus der Messung der Strichwinkel φ_m wird g mit Hilfe der grünen Linie der
 Hg-Lampe die Gitterkonstante g bestimmt. Zunächst werden die gemessenen Werte
 verrechnet. Es gilt:

$$\varphi_m = (a_r - a_l) / 2 \quad \text{mit} \quad \Delta \varphi_m = \frac{1}{\sqrt{2}} \Delta a.$$

Nach Gl. 4 gilt:

$$g = \frac{m \lambda}{\sin(\varphi_m)} \quad \text{mit} \quad \Delta g = \frac{m \lambda \cos(\varphi_m/2)}{g \sin^2(\varphi_m/2)} \Delta \varphi_m.$$

Hieraus lässt sich um die varianzgewichtete Mittelwert bekommen. Es gilt:

$$\bar{g} = \frac{\sum_{m=1}^9 \frac{g_m}{(\Delta g_m)^2}}{\sum_{m=1}^9 \frac{1}{(\Delta g_m)^2}} \quad \text{mit} \quad \Delta \bar{g} = \left[\frac{g}{\sum_{m=1}^9 \frac{1}{(\Delta g_m)^2}} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad \text{so dass} \quad \bar{g} = (10,04 \pm 0,45) \mu\text{m}. \quad \checkmark$$

Alle entsprechenden Werte sind in Tabelle 2 aufgeführt. Hieraus lässt sich weiter-

m	$\varphi_{m,\text{grün}} [^\circ]$	$\varphi_{m,\text{blau}} [^\circ]$	Δ	$g [\mu\text{m}]$	Δ	$\lambda_{\text{blau}} [\text{nm}]$	Δ
1	3,12	2,49	0,81	10,02	2,60	436,62	143,30
2	6,22	4,98	0,81	10,07	1,31	436,52	73,61
3	9,34	7,42	0,81	10,06	0,87	433,01	51,13
4	12,49	9,97	0,81	10,04	0,65	436,11	40,49
5	15,64	12,49	0,81	10,03	0,52	436,79	34,46
6	18,79	14,95	0,81	10,03	0,43	435,42	30,64
7	21,94	17,48	0,81	10,04	0,37	435,68	28,12
8	25,15	20,02	0,81	10,03	0,32	436,31	26,37
9	28,33	22,55	0,81	10,04	0,28	436,06	25,08

Tabelle 2- Zwischenwerte für alle gemessenen Ordnungen m

fabend die Wellenlänge der blauen Spektrallinien bestimmen. Analog zu Gl. 4 gilt:

$$\lambda = \frac{2g}{m \sin(\varphi_m/2)} \quad \text{mit} \quad \Delta \lambda = \left[\left(\frac{2}{m \sin(\varphi_m/2)} \Delta g \right)^2 + \left(\frac{2g \cos(\varphi_m/2)}{m \sin^2(\varphi_m/2)} \Delta \varphi_m \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Somit lässt sich um die varianzgewichtete Wellenlänge berechnen. Dies passt
 identisch zu \bar{g} . Man erhält dann für $\lambda = (435,90 \pm 34,81) \text{ nm}$. Der Literaturwert
 ist $\lambda_{\text{blau}} = 435,83 \text{ nm}$, was exakt mittig auf dem Konfidenzintervall liegt. (wikipedia.org/
 wiki/Quecksilberdampflampe). ✓

368. f

Man ist die Brechung des Luftysörnigens nachzuweisen: $A = \frac{\lambda}{\Delta \lambda} = mN$. Die blauen
 gelben Linien der Quecksilberlampe liegen mit $\lambda = 578,01 \text{ nm}$ und $\Delta \lambda = 2,1 \text{ nm}$ dann
 $A = 275,24$. Für die zweite und vierte Ordnung (siehe nicht länger erkennbar)
 wurde die Bildgröße B aufgenommen, wo bei der Spaltbreite G die Linien gerade
 noch getrennt erkennbar sind. Für die Zahl der Gitterspalte gilt dann:

$$N = \frac{G}{g} \quad \text{mit} \quad \Delta N = \left[\left(\frac{\Delta G}{g} \right)^2 + \left(\frac{G \Delta g}{g^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad \text{so dass anschließend:}$$

$$A = mN \quad \text{mit} \quad \Delta A = m \cdot \Delta N. \quad \text{Dann sind } G \text{ und } \Delta G \text{ berechnen sich}$$

$$\text{analog zu 368.c zu: } G|_{m=2} = \left(\frac{1,525 \pm 0,267}{2} \right) \text{ mm} \quad \& \quad G|_{m=4} = (0,525 \pm 0,263) \text{ mm}.$$

$$\text{Damit ist: } N|_{m=2} = \left(\frac{156,87 \pm 25,51}{2} \right) \quad \& \quad N|_{m=4} = \left(\frac{52,29 \pm 26,30}{4} \right),$$

und schließlich: $A|_{n=2} = (313,74 \pm 51,02)$ & $A|_{n=4} = (203,16 \pm 105,2)$. Der
varianzgemittelte Mittelwert ist schließlich: $\bar{A} = (293,83 \pm 64,92)$. Dies ist in
hervorragender Übereinstimmung mit A aus $A = 2/\lambda^2$. ✓

368.8

Durch Einbringen der Linse konnte die volle Fokussierung der Schärfe erreicht
werden. ✓

Fazit

Es wurde das Phänomen der Beugung am Einzelgitter und Gitter an Gitter
untersucht. Hierzu wurde am Einzelgittervorbeh zunächst die Wellenlänge der
Natriumlampe bestimmt zu $\lambda = (520,05 \pm 65,78) \text{ nm}$, was im Bgl. zum Referenz
 $\lambda \approx 589 \text{ nm}$ knapp jenseits des 1 σ Intervalls ist. Die Gültigkeit der Gitterbe-
dingung ($d \cdot \sin \theta \approx \lambda$) wurde in 368. c bestätigt. In d 368. d & e wurden
jeweils die Gitterkonstante und die Wellenlänge des blauen Spektrallinies
mit hoher Übereinstimmung bestimmt. Schließlich wurde das Aufeinander-
treffen des gegebenen Gitters mit unter 1 σ nahegerückt. Finito.

Oh, Fazit länger!

Bestanden

19.03.2024

