

## Thema: Experimente mit Wellen und Quantenobjekten

Im Mittelpunkt stehen Vermessungen regelmäßiger Strukturen. In der ersten Aufgabe wird dazu ein historisches Experiment mit Hilfe von Ultraschall nachgestellt. In der zweiten Aufgabe wird das Originalexperiment ausgewertet, das mit Heliumatomen durchgeführt wurde. In der dritten Aufgabe geht es mit Untersuchungen rund um ein WIEN-Filter (auch Geschwindigkeits-Filter genannt) um eine wesentliche Voraussetzung dieses Original-Experimentes.

### Aufgabenstellung

#### Aufgabe 1

Diese Aufgabe bildet das erste Interferenz-Experiment nach, das mit Heliumatomen durchgeführt wurde. Das Prinzip dieses Experiments ist in Material 1 (M1) dargestellt. Es soll mit Hilfe von Ultraschall nachgebildet werden.

- 1.1** Für die Durchführung des Experimentes benötigt man die Kenntnis der Wellenlänge des verwendeten Ultraschalls.

Beschreiben Sie ein Experiment zur Bestimmung der Wellenlänge von Ultraschall mit zwei Sendern und einem Mikrofon, indem Sie eine geeignete Skizze hinzuziehen. **[5 BE]**

- 1.2** Eine andere Methode, eine unbekannte Wellenlänge zu bestimmen ist die Messung der Frequenz des Senders.

Ermitteln Sie die Frequenz des Ultraschalls aus dem Diagramm in M2 so genau wie möglich.

Beurteilen Sie unter der Annahme, dass die Schallgeschwindigkeit  $c = 345 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  beträgt, die Herstellerangabe für die Wellenlänge:  $\lambda = 0,83 \text{ cm}$ . **[6 BE]**

- 1.3** Analog zum Vorgehen im Original wird ein Experiment mit Ultraschall gemäß M3 durchgeführt. Wenn man das Mikrofon längs des Kreisbogens vom Sender weg bewegt, beobachtet man abwechselnd Minima und Maxima der Amplitude.

Erklären Sie diese Erscheinung in der Zeigerdarstellung oder einer anderen geeigneten Darstellung. Ihre Erklärung soll von mindestens einer Skizze begleitet sein.

Für die Lage der Maxima in diesem Experiment gilt näherungsweise die Gleichung

$$n \cdot \lambda = d \cdot \sin(\alpha).$$

Leiten Sie diese Gleichung auf der Grundlage Ihrer Skizze her. **[11 BE]**

- 1.4** Stellen Sie die Messdaten aus M4 in einem geeigneten Diagramm dar.

Überprüfen Sie auf dieser Grundlage die Gültigkeit der in 1.3 genannten Gleichung.

Erklären Sie, wie dieses Experiment zur Messung des Abstandes  $d$  verwendet werden kann. **[10 BE]**

#### Aufgabe 2

In dem Original-Experiment mit Heliumatomen wurde ein Atom-Strahl aus einer Druckgasflasche auf einen Kristall aus Lithium-Fluorid (LiF) gerichtet. Die für die Erscheinungen wesentlichen Vorgänge finden genau wie im Ultraschallexperiment nur an der obersten Schicht von Atomen statt. Die Atome sind in dieser Schicht regelmäßig angeordnet und weisen einen konstanten Abstand von  $d = 201 \text{ pm}$  auf. Hinweis: Die Tatsache, dass ein LiF-Kristall genau genommen aus einer abwechselnden Folge von Lithium- bzw. Fluorid-Ionen besteht, spielt für die Bearbeitung der Aufgabe keine Rolle.

- 2.1** Ermitteln Sie aus den Messdaten in M5 und der Gleichung aus 1.3 die Wellenlänge, die den Heliumatomen in diesem Experiment zukommt.

Ordnen Sie dieser Wellenlänge mit Hilfe von M6 einen Temperatur-Bereich zu. **[5 BE]**

Zentralabitur 2017	Physik	Schülermaterial
Aufgabe I	eA	Bearbeitungszeit: 300 min

**2.2** Erläutern Sie, dass es in gleichartigen Experimenten selbst dann zur Interferenz kommt, wenn in jedem Zeitintervall jeweils nur ein einzelnes Quantenobjekt in der Apparatur unterwegs ist. **[4 BE]**

**2.3** Mit Hilfe von M6 lässt sich der funktionale Zusammenhang  $\lambda = f(T)$  zwischen Temperatur  $T$  und Wellenlänge  $\lambda$  quantitativ ermitteln.  
Ermitteln Sie diesen Zusammenhang aus den Messdaten in M6 und dokumentieren Sie Ihre Arbeitsschritte in der im Unterricht vereinbarten Weise.  
Leiten Sie aus den Informationen in M7 eine Gleichung für den Zusammenhang  $\lambda = f(T)$  her, indem Sie in einem Zwischenschritt die Geschwindigkeit  $v(T)$  bestimmen. **[12 BE]**

**2.4** Aus einer Druckgasflasche ausströmende Heliumatome weisen keine einheitliche Geschwindigkeit auf; die oben angegebenen Werte sind daher jeweils nur Mittelwerte über eine Verteilung, die sowohl größere als auch kleinere Geschwindigkeiten enthält.  
Stellen Sie eine begründete Hypothese darüber auf, wie sich das Diagramm in M5 ändern würde, wenn es gelingen würde, nur Heliumatome einer einheitlichen Geschwindigkeit zu verwenden. **[2 BE]**

### Aufgabe 3

Wenn man Helium-Kerne verwenden würde, könnte zur Geschwindigkeitsmessung ein WIEN-Filter verwendet werden, dessen Prinzip in M8 dargestellt ist.

**3.1** Erläutern Sie, auf welche Weise die in einem WIEN-Filter vorliegenden Felder eine Messung der Geschwindigkeit der Kerne erlauben, wobei Sie insbesondere die Skizze in M8 um die für Ihre Erläuterung notwendigen physikalischen Größen ergänzen. **[6 BE]**

**3.2** Zur Messung der magnetischen Flussdichte kann man eine Hallsonde verwenden. Als Maß für die magnetische Flussdichte  $B$  dient die mit der Sonde gemessene Hallspannung  $U_H$ .  
Für die Hallspannung  $U_H$  gilt die Gleichung  $U_H = v \cdot B \cdot h$ .  
 $U_H$ : Hall-Spannung,  $v$ : Driftgeschwindigkeit der Elektronen,  $B$ : magnetische Flussdichte (magnetische Feldstärke),  
 $h$ : Höhe der Sonde.

Leiten Sie begründet anhand einer anzufertigenden Skizze die Gleichung für  $U_H$  her. **[6 BE]**

**3.3** Um ein geeignetes Magnetfeld für den Geschwindigkeitsfilter zu erzeugen, könnte eine Anordnung aus zwei Spulen verwendet werden. Zunächst sei nur die rechte der beiden Spulen nach M9 von Strom durchflossen. Mit einer Hallsonde wird nun die magnetische Flussdichte  $B$  in axialer Richtung in Abhängigkeit von der  $x$ -Koordinate gemessen. M10 zeigt einige Messergebnisse.

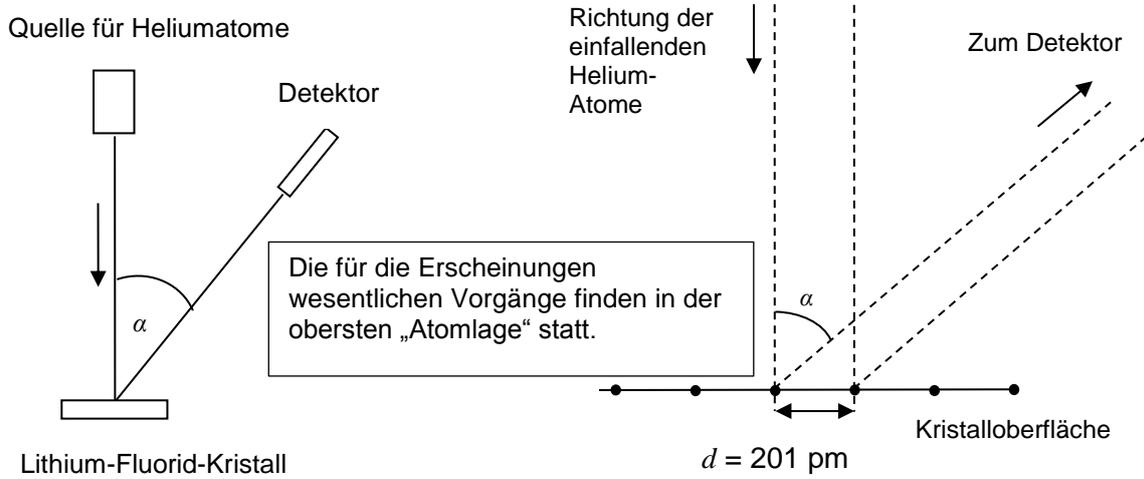
Zeichnen Sie auf der Grundlage der Messdaten aus M10 ein  $x$ - $B$ -Diagramm.

In einem Experiment (M9) werden Werte der magnetischen Flussdichte  $B$  zwischen zwei Spulen entlang der Spulenchse gemessen. Dabei sind die Felder der beiden Spulen entgegengesetzt gerichtet.

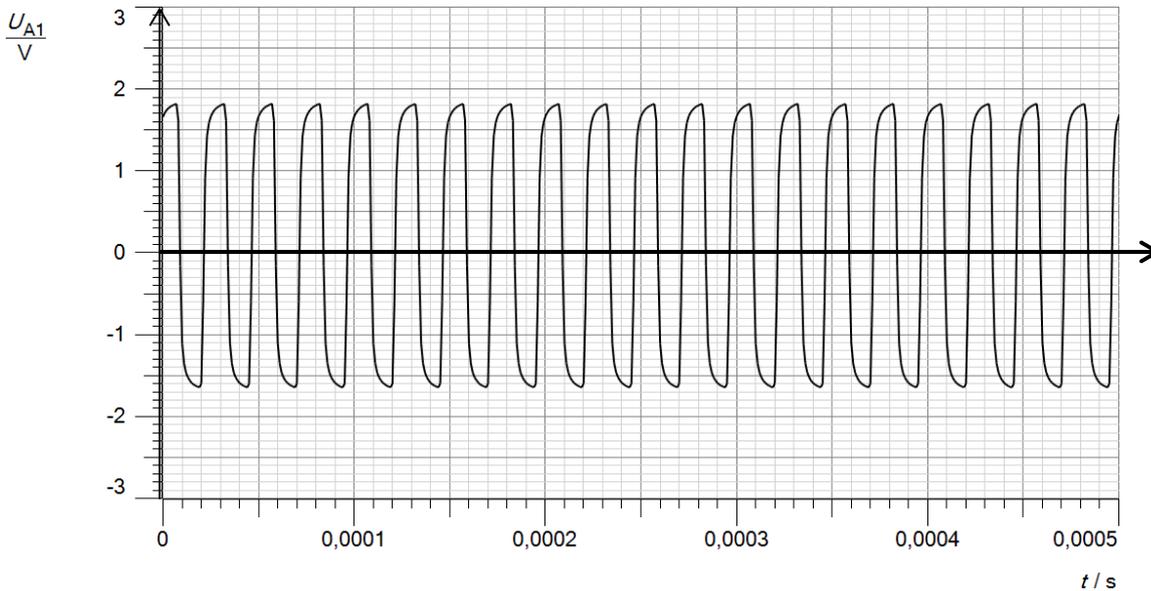
Ermitteln Sie aus den Messwerten in M11 den zwischen  $x$  und  $B$  bestehenden funktionalen Zusammenhang  $B = f(x)$ , wobei Sie ihr Vorgehen in der aus dem Unterricht bekannten Weise dokumentieren.

Stellen Sie eine begründete Hypothese zur Entstehung des Messwertes bei 2 cm auf. **[13 BE]**

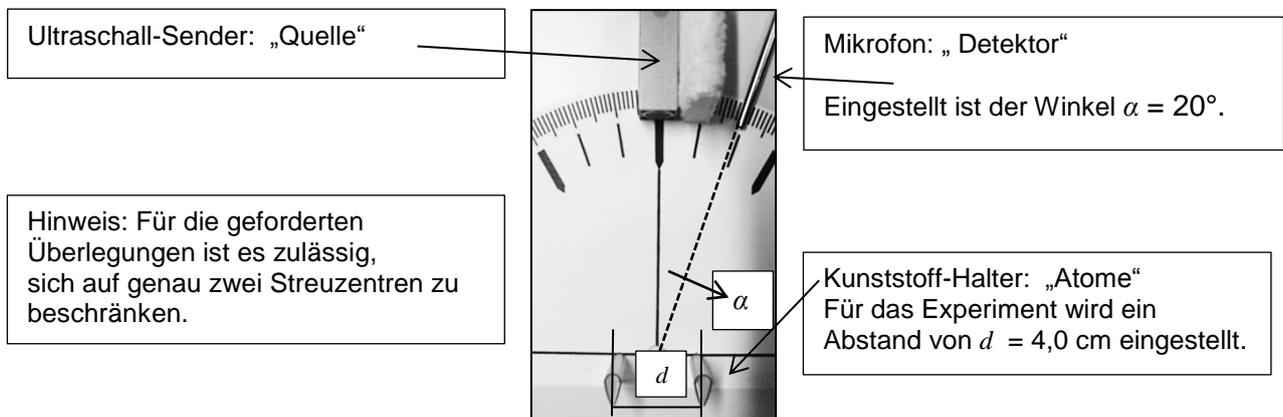
**Material**



**M1:** Links: Prinzip-Skizze des Versuchsaufbaus, rechts: Detailansicht der Kristalloberfläche.



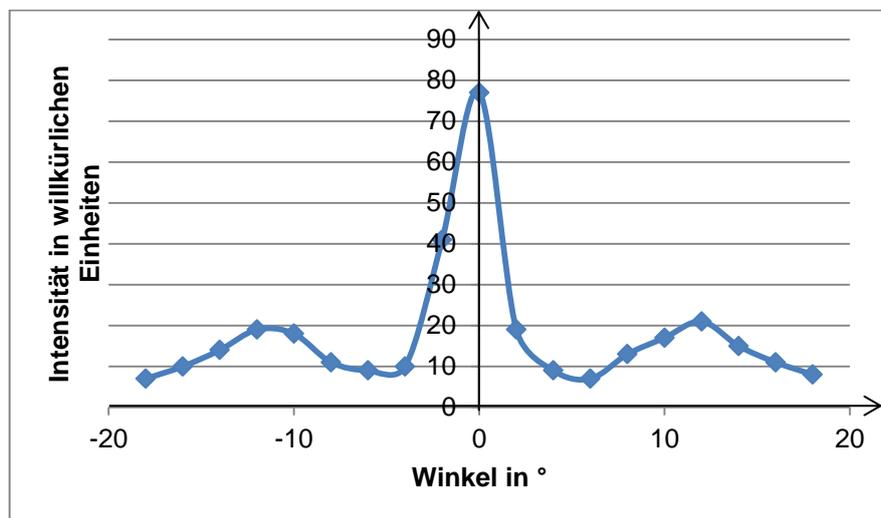
**M2:** Zeit-Spannungs-Diagramm am Ausgang des Ultraschall-Generators.



**M3:** Ausschnitt aus dem Versuchsaufbau mit Ultraschall. Rechts neben dem Ultraschall-Sender steht ein mit Stoff überzogener Absorber. Er verhindert direkte Schallübertragung zum Mikrofon.

Winkel in °	Amplitude in mV
5	29,7
8	52,8
10	133,7
13	141,1
15	102,7
17	60,0
18	11,3
20	62,4
23	119,6
25	141,1
28	111,0
30	44,5
31	12,0
33	48,0
35	105,5
38	136,8
40	140,0

**M4:** Messdaten aus dem Analogexperiment mit Ultraschall für  $d = 4,0$  cm.



**M5:** Messdaten aus dem Originalexperiment für  $d = 201$  pm.

Das Originalexperiment wurde im Jahr 1931 von ESTERMANN und STERN durchgeführt.

T in K	$\lambda$ in pm
100	126
180	94,2
205	88,3
255	79,1
290	74,2
510	56,0
580	52,5
820	44,1
910	41,9

Informationen:

Die mittlere kinetische Energie eines Teilchens in einem Gas der Temperatur  $T$  beträgt

$$E_{kin} = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T .$$

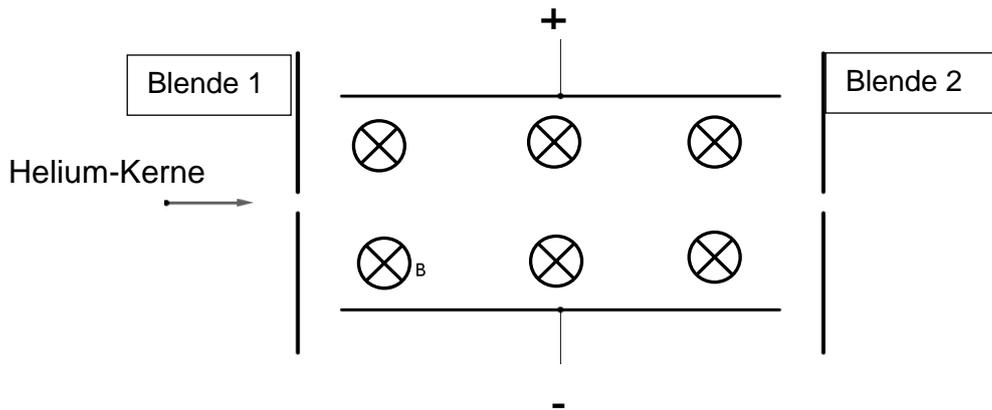
Darin sind  $k$  die sogenannte BOLTZMANN-Konstante  $k \approx 1,381 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$  und  $T$  die Temperatur in K.

Auch für Helium-Atome gilt die DEBROGLIE-Gleichung

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} .$$

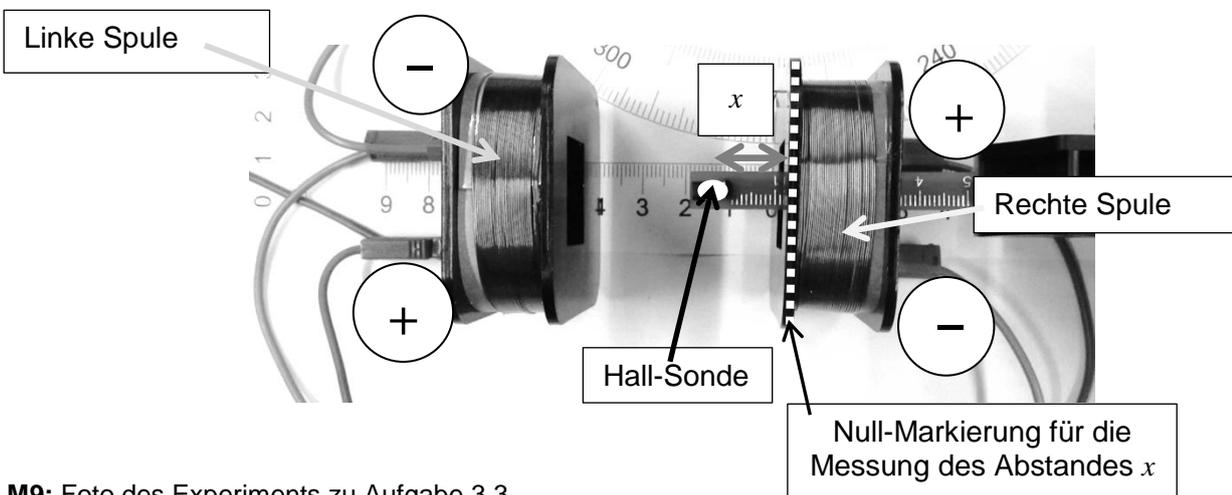
**M6:** Die den Heliumatomen bei verschiedenen Temperaturen zugeordnete Wellenlänge.

**M7:** Informationen für die theoretische Herleitung des gesuchten Zusammenhangs.



**M8:** Messeinrichtung zur Bestimmung der Geschwindigkeit der Helium-Kerne.

Das magnetische Feld mit der Flussdichte  $B$  (Feldstärke  $B$ ) ist im gesamten Bereich der Anordnung gleich stark und gleich gerichtet.



**M9:** Foto des Experiments zu Aufgabe 3.3.

$x$ in cm	-4,5	-4,0	-3,5	-3,0	-2,5	-2,0	-1,5	-1,0	-0,5
$B$ in mT	0,18	0,24	0,36	0,56	0,80	1,20	1,58	1,82	1,60

$x$ in cm	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
$B$ in mT	1,25	0,88	0,57	0,38	0,25	0,18

**M10:** Messwerte für die Abhängigkeit der magnetischen Flussdichte  $B$  einer Einzelspule von der  $x$ -Koordinate.

Position $x$ zwischen den beiden Spulen in cm	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
$B$ in mT	-1,14	-0,82	-0,50	-0,22	0,00	0,20	0,52	0,80	1,12

**M11:** Messwerte zum Experiment aus M9 mit zwei Spulen.

### Hilfsmittel

- Taschenrechner
- Eine von der Schule eingeführte für das Abitur zugelassene physikalische Formelsammlung
- Eine von der Schule eingeführte für das Abitur zugelassene mathematische Formelsammlung