

|                    |        |                        |
|--------------------|--------|------------------------|
| Zentralabitur 2024 | Physik | Material für Prüflinge |
| Aufgabe I          | gA     | Prüfungszeit*: 250 min |

\*einschließlich Auswahlzeit.

## Thema: Verschiedene Geschwindigkeiten

Im Mittelpunkt der ersten Aufgabe steht die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit. In der zweiten Aufgabe werden Quantenobjekte mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten betrachtet und die dritte Aufgabe thematisiert beschleunigte Elektronen in elektrischen Feldern.

### Aufgabenstellung

#### Aufgabe 1

In dieser Aufgabe wird die Ausbreitung von harmonischen Wellen und deren kennzeichnenden Größen thematisiert. Eine Betrachtung von Phasenbeziehungen ermöglicht die Messung der Schallgeschwindigkeit.

- 1.1** Beschreiben Sie den Unterschied zwischen longitudinalen und transversalen Wellen und geben Sie jeweils ein Beispiel dafür an. **[3 BE]**

- 1.2** Die Ausbreitung einer harmonischen Welle ist in Material 1a (M1a) schematisch dargestellt. Ermitteln Sie aus der Abbildung die Frequenz und die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle sowie die Differenz der Phasen zwischen den Oszillatoren an den Stellen 2 cm und 4 cm. Zeichnen Sie ein Zeit-Auslenkung-Diagramm, das die Schwingung des 1. Oszillators bei  $x = 0$  cm in Abhängigkeit von der Zeit für die ersten 4 Sekunden darstellt. **[7 BE]**

- 1.3** In einem Experiment wird das Signal eines Ultraschallsenders von zwei Empfängern registriert, welche an einem Oszilloskop angeschlossen sind. Der Aufbau ist in M1b dargestellt. M1c zeigt das Oszilloskopbild für zwei feste Positionen der Empfänger.

Ermitteln Sie alle möglichen Phasen, um die das Signal am Empfänger E1 dem Signal am Empfänger E2 in M1c vorseilt, wobei Sie zunächst die Phasen der beiden Signale anhand der Hilfslinien bestimmen.

Zeichnen Sie in M1d das Oszilloskopbild für den Fall ein, dass durch Verschieben des Empfängers E2 die Differenz der Phasen zwischen den Empfängern  $180^\circ$  beträgt. **[5 BE]**

- 1.4** Um die Schallgeschwindigkeit zu ermitteln, wird der Empfänger E2 von Empfänger E1 soweit weggezogen, bis sich der untere Graph im Oszilloskopbild (M1c) zum zehnten Mal wiederholt hat. Die Strecke, um die E2 dabei verschoben wurde, beträgt  $\Delta x = 87$  mm.

Ermitteln Sie mit diesen Angaben und mit M1b die Schallgeschwindigkeit.

In M1e ist die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Temperatur dargestellt.

Bestätigen Sie folgende Aussage: „Wenn die Temperatur im Experimentierraum von  $24^\circ\text{C}$  auf  $34^\circ\text{C}$  zunimmt, dann vergrößert sich die oben beschriebene Verschiebestrecke  $\Delta x$  um etwa 1,5 mm.“

Hinweis: Die Frequenz des Ultraschalls (hier  $f = 40,0$  kHz) ist bei Temperaturänderung konstant.

**[5 BE]**

|                    |        |                        |
|--------------------|--------|------------------------|
| Zentralabitur 2024 | Physik | Material für Prüflinge |
| Aufgabe I          | gA     | Prüfungszeit*: 250 min |

## Aufgabe 2

Jönsson gelang es 1961 Quanteneigenschaften von Elektronen mit einem Doppelspaltexperiment zu zeigen. Mit ähnlichen Aufbauten konnte dieser Nachweis auch für Objekte mit größerer Masse, z. B. für Neutronen und für Moleküle gezeigt werden. Die Beobachtungen und die Ergebnisse sind mit denen von Elektronen vergleichbar.

- 2.1** In M2a ist der Aufbau und in M2b und M2c sind die Ergebnisse eines Doppelspaltexperiments mit Elektronen dargestellt.

Beschreiben Sie das Schirmbild in M2b.

Deuten Sie die Schirmbilder in M2c stochastisch.

**[5 BE]**

- 2.2** Das in M2a dargestellte Experiment wurde analog mit Farbstoffmolekülen und einem geeigneten Gitter durchgeführt. Ein Ausschnitt des Schirmbildes ist in M2d abgebildet.

Für die Lage der Maxima bei Interferenz am Gitter gilt die Bedingung:

$$n \cdot \lambda = g \cdot \sin \left( \arctan \left( \frac{a_n}{e} \right) \right) \quad \left| \begin{array}{l} n: \text{Ordnung des Maximums}; \lambda: \text{Wellenlänge}; \\ g: \text{Gitterkonstante}; a_n: \text{Abstand zwischen dem} \\ \text{Maximum 0. Ordnung und dem Maximum} \\ n\text{-ter Ordnung}; e: \text{Abstand zwischen Gitter und Schirm} \end{array} \right.$$

Bestätigen Sie unter Verwendung dieser Gleichung und M2d, dass die Farbstoffmoleküle bei einer Geschwindigkeit von  $v = 250 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  eine Wellenlänge von  $\lambda \approx 3,0 \text{ pm}$  besitzen.

In M2e sind weitere Werte für die Wellenlänge  $\lambda$  in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit  $v$  angegeben.

Bestätigen Sie den funktionalen Zusammenhang  $\lambda = k \cdot \frac{1}{v}$  unter Angabe eines Wertes für die Konstante  $k$  und dokumentieren Sie Ihr Vorgehen in der vereinbarten Form.

Die de-Broglie-Gleichung lautet:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} \quad \left| \begin{array}{l} h: \text{Planck-Konstante}; m: \text{Masse}; v: \text{Geschwindigkeit} \end{array} \right.$$

Ermitteln Sie auf Grundlage aller Messwerte einen Wert für die Planck-Konstante  $h$ . **[12 BE]**

- 2.3** Die Farbstoffmoleküle aus dem in 2.2 beschriebenen Experiment verlassen die Quelle mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Berücksichtigt ist das in einer erweiterten Darstellung des Aufbaus in M2f und dem vollständigen Schirmbild in M2g.

Auf dem Schirmbild in M2g nimmt der Abstand der hellen Streifen von oben nach unten zu.

Erläutern Sie diese Zunahme.

**[3 BE]**

|                    |        |                        |
|--------------------|--------|------------------------|
| Zentralabitur 2024 | Physik | Material für Prüflinge |
| Aufgabe I          | gA     | Prüfungszeit*: 250 min |

### Aufgabe 3

Zur Erzeugung eines Elektronenstrahls wird ein Aufbau wie in M3a verwendet. Solche Röhren werden auch Elektronenstrahlröhren genannt. In dieser Röhre wurde ein Vakuum erzeugt.

#### 3.1 Beschreiben Sie die Funktionsweise einer Elektronenstrahlröhre (M3a).

Für die Geschwindigkeit  $v_0$  von Elektronen an der Anode gilt die Gleichung:

$$v_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot U_B \cdot e}{m_e}} \quad \left| \begin{array}{l} U_B: \text{Beschleunigungsspannung;} \\ e: \text{Elementarladung;} \\ m_e: \text{Masse des Elektrons} \end{array} \right.$$

Berechnen Sie für eine Beschleunigungsspannung von  $U_B = 500 \text{ V}$  die Geschwindigkeit der beschleunigten Elektronen.

Leiten Sie die obige Gleichung begründet her.

[8 BE]

#### 3.2 Zur Untersuchung des glühelektrischen Effekts wird in einem Versuch die Stromstärke $I_A$ an der Anode in Abhängigkeit der Heizspannung $U_H$ , die an der Kathode anliegt, gemessen. Die Beschleunigungsspannung $U_B$ wird konstant bei 500 V gehalten. Die Messwerte sind in M3b angegeben.

Zeichnen Sie das  $U_H$ - $I_A$ -Diagramm.

Deuten Sie die Zunahme der Anodenstromstärke bei zunehmender Heizspannung ab  $U_H = 4,5 \text{ V}$ .

[7 BE]

#### 3.3 In einem veränderten Versuchsaufbau befindet sich nun zwischen der Kathode und der Anode ein Gitter. Zwischen dem Gitter und der Anode wird eine Gitterspannung $U_G$ angelegt und wie in 3.2 die Stromstärke $I_A$ an der Anode gemessen (M3c).

Erläutern Sie den Einfluss der Gitterspannung  $U_G$  auf die Geschwindigkeit der Elektronen in M3c.

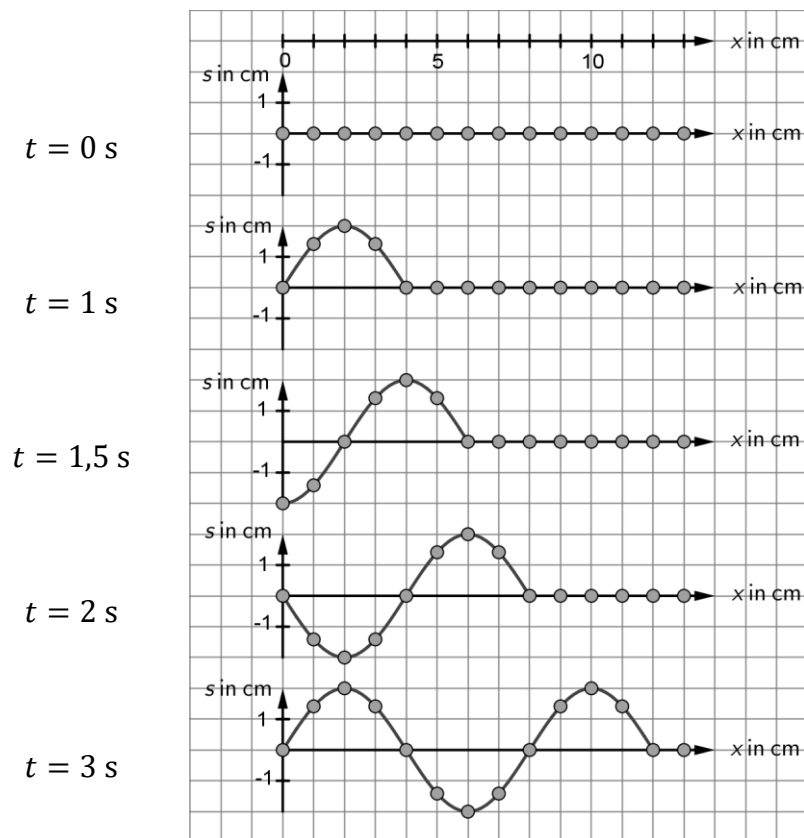
Die Beschleunigungsspannung sei  $U_B = 30 \text{ V}$ . Legt man zwischen Gitter und Anode zunächst eine Gitterspannung von  $U_G = 0 \text{ V}$  an, so ist eine maximale Geschwindigkeit  $v_{\max}$  der Elektronen an der Anode der Röhre möglich.

Die Elektronen sollen nun mit der Hälfte der maximalen Geschwindigkeit  $\frac{v_{\max}}{2}$  an der Anode ankommen. Hierzu wird die Gitterspannung  $U_G = 22,5 \text{ V}$  zwischen Gitter und Anode eingestellt.

Bestätigen Sie den Wert von  $U_G$  für die Elektronen mit  $\frac{v_{\max}}{2}$ .

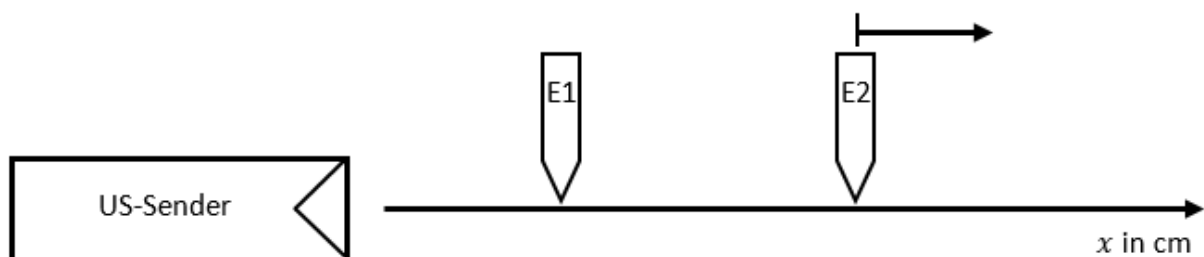
[5 BE]

## Material



**M1a:** Schematische Darstellung der Ausbreitung einer harmonischen Welle

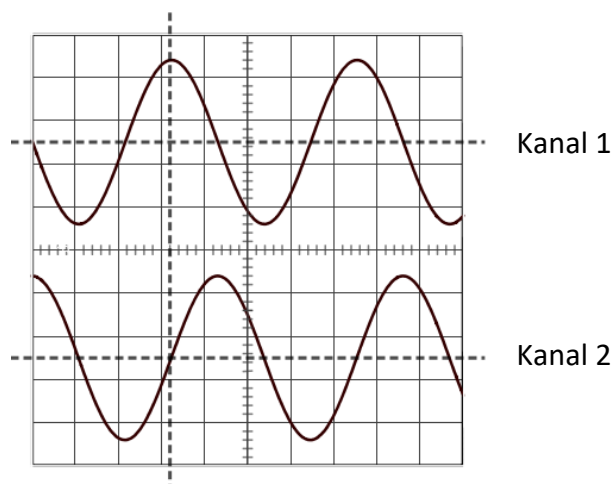
Dargestellt ist zu fünf verschiedenen Zeitpunkten die Elongation  $s$  in Abhängigkeit des Ortes  $x$ .



**M1b:** Aufbau des Experiments mit Ultraschall (US)

Die Frequenz des Ultraschalls (US) beträgt 40,0 kHz. Die Empfänger E1 und E2 registrieren den Ultraschall des Senders und sind an einem Oszilloskop angeschlossen (Oszilloskopbild siehe M1c). Der Empfänger E1 ist für alle Experimente in Aufgabe 1 am gleichen Ort.

Zur experimentellen Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Aufgabe 1.4 wird der Empfänger E2 entlang der  $x$ -Achse von Empfänger E1 weggezogen.



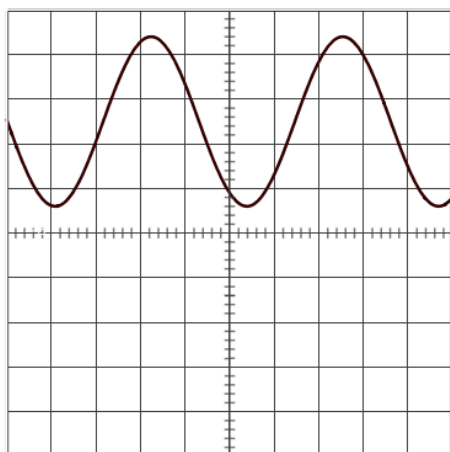
Das Oszilloskop ist hier so eingestellt, dass Kanal 1 beim Unterschreiten eines bestimmten Wertes mit der Darstellung der Messung beginnt. Die obere Kurve startet somit auf der linken Seite stets wie hier abgebildet.

Zu genau dieser Zeit beginnt auch die zeitliche Darstellung der unteren Kurve.

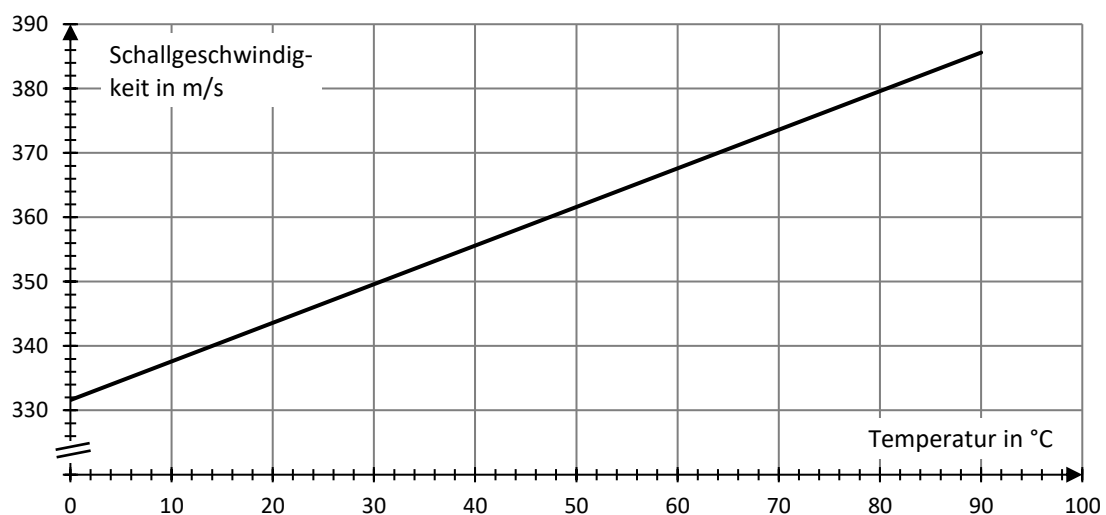
Die Abnahme der Amplitude durch zunehmende Entfernung wird hier vernachlässigt.

**M1c:** Oszilloskopbild - Messung der Signale von Empfänger E1 (Kanal 1) und Empfänger E2 (Kanal 2)

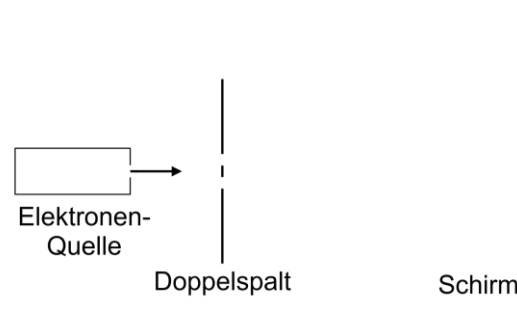
E1 und E2 befinden sich für dieses Oszilloskopbild jeweils an einem festen Ort  $x$ . Der Abbildung wurden Hilfslinien (-----) zur Vereinfachung der Auswertung hinzugefügt.



**M1d:** Zu ergänzendes Oszilloskopbild (Aufgabe 1.3)

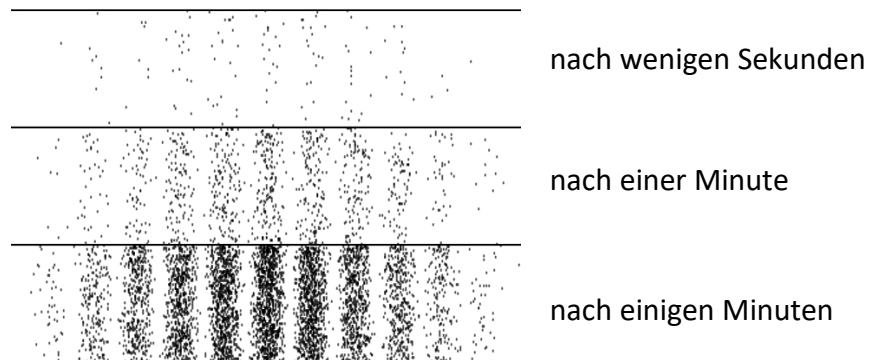


**M1e:** Schallgeschwindigkeit in Luft in Abhängigkeit von der Temperatur



**M2a:** Skizze des sehr stark vereinfachten Versuchsaufbaus zum Experiment mit Elektronen am Doppelspalt nach Jönsson (Ansicht von oben)

Quellenangabe s.u.



**M2b:** Schirmbild beim Experiment mit Elektronen am Doppelspalt nach Jönsson

**M2c:** Simulation eines Doppelspaltversuchs mit Elektronen  
Die einzelnen Bilder wurden zu verschiedenen Zeiten aufgenommen.

Quellenangabe s.u.

**M2d:** Ein Ausschnitt des Schirmbilds des Experiments mit Farbstoffmolekülen am Gitter mit  $v = 250 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ,  $g = 105 \text{ nm}$ ,  $e = 59 \text{ cm}$

Die Interferenzstreifen verlaufen in diesem Ausschnitt in ungewohnter Weise nicht senkrecht zur Achse. Beschränken Sie sich daher beim Ablesen auf den unteren Bereich der Interferenzstreifen.

|                                           |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| $v \text{ in } \frac{\text{m}}{\text{s}}$ | 150  | 200  | 220  | 250  | 300  | 350  |
| $\lambda \text{ in pm}$                   | 5,19 | 3,87 | 3,46 | 2,97 | 2,55 | 2,22 |

**M2e:** Wellenlänge  $\lambda$  bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten  $v$

Die Farbstoffmoleküle haben eine Masse von  $m \approx 8,53 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$ .

|                    |        |                        |
|--------------------|--------|------------------------|
| Zentralabitur 2024 | Physik | Material für Prüflinge |
| Aufgabe I          | gA     | Prüfungszeit*: 250 min |

Quellenangabe s.u.

**M2f:** Skizze des vereinfachten Versuchsaufbaus zum Experiment mit Farbstoffmolekülen am Gitter (Ansicht von der Seite)

Die Farbstoffmoleküle verlassen die Quelle mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Die schnellsten Moleküle treffen an höchster Stelle auf dem Schirm auf und die langsamsten Moleküle am unteren Rand.

Quellenangabe s.u.

**M2g:** Das vollständige Schirmbild des Experiments mit Farbstoffmolekülen am Gitter

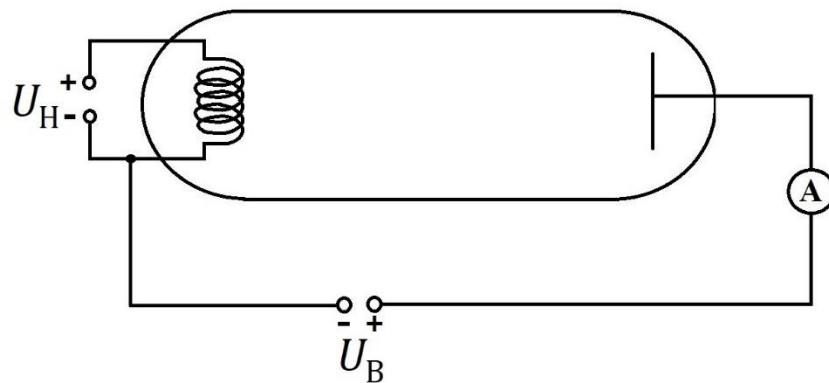
Die Hochachse ist nicht linear skaliert.

Quellenangaben:

M2b verändert aus: <https://www.unimuseum.uni-tuebingen.de/de/sammlungen/physikalische-sammlung.html> (11.12.2023)

M2d, M2f und M2g zusammengestellt und verändert aus:

Brand C., Eibenberger S., Sezer U., Arndt M.: Matter-wave physics with nanoparticles and biomolecules. arXiv:1703.02129v1 [quant-ph] 6 Mar 2017 (2017).

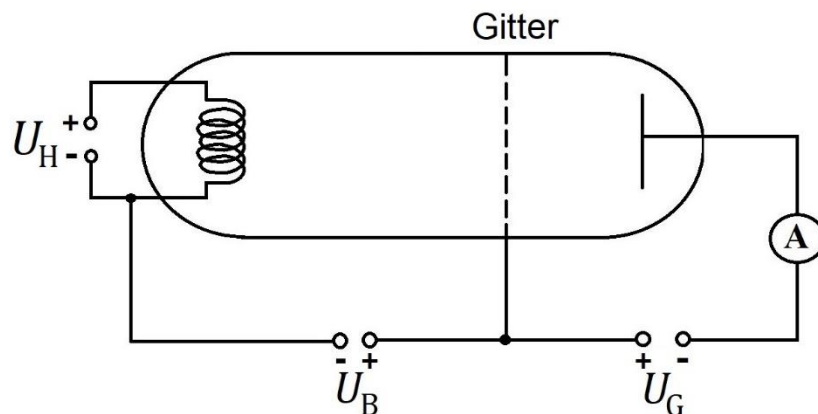


**M3a:** Grundaufbau einer Elektronenstrahlröhre

$U_H$ : Heizspannung;  $U_B$ : Spannung zwischen Kathode und Anode

|             |      |      |      |      |      |      |      |     |      |      |      |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|
| $U_H$ in V  | 4,5  | 4,6  | 4,8  | 5,0  | 5,2  | 5,4  | 5,5  | 5,6 | 5,8  | 6,0  | 6,3  |
| $I_A$ in mA | 0,13 | 0,18 | 0,28 | 0,43 | 0,71 | 0,98 | 1,15 | 1,5 | 2,03 | 2,75 | 4,25 |

**M3b:** Messreihe zur Heizspannung  $U_H$  und der Stromstärke  $I_A$  an der Anode



**M3c:** Elektronenstrahlröhre mit Gitter

Dieser Aufbau und der des Franck-Hertz-Versuchs ähneln sich, hier ist aber ein Vakuum vorhanden.

$U_B$ : Spannung zwischen Kathode und Gitter;  $U_G$ : Spannung zwischen Gitter und Anode

### Hilfsmittel

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