

Versuch AP9 Ablenkung und Beugung von Elektronen

1. September 2020

1 Zielsetzung des Versuchs

Die Entdeckung der Welleneigenschaften von massebehafteten Teilchen war historisch von großer Bedeutung für die Entwicklung der Quantenmechanik. Dabei nimmt die Schrödingergleichung als charakteristische Wellengleichung einen besonderen Stellenwert ein, da sie die Grundlage für die nicht-relativistische Quantenmechanik bildet. In diesem Versuch führen Sie zwei Teilexperimente durch, die Ihnen die Teilchen- bzw. Wellennatur von Elektronen demonstrieren.

Im ersten Teil untersuchen Sie mit Hilfe einer Oszillographenröhre die Bewegung von Elektronen unter dem Einfluß äußerer Felder. Dazu beschäftigen Sie sich zunächst mit dem Grundprinzip eines Oszillographen, der Ablenkung von Elektronenstrahlen durch elektrische Felder. Ebenso können Elektronenstrahlen durch magnetische Felder abgelenkt werden, hierzu verwenden Sie das Magnetfeld eines Helmholtz-Spulenpaares. Zum Schluß versuchen Sie, mit diesem Effekt Richtung und Größe des Erdmagnetfeldes zu bestimmen.

Die Welleneigenschaften eines Elektronenstrahles werden Sie durch Beugung von Elektronen an einer kristallinen Schicht aus Kohlenstoffatomen untersuchen. Mit Hilfe der bekannten Gitterkonstanten dieser Kristalle sollen Sie die Gültigkeit der DeBroglie-Beziehung nachweisen. Berücksichtigen Sie dabei die Grenzen nicht-relativistischer Beschreibungsweise sowie den Einfluß von Wechselwirkungen zwischen den Elektronen und dem inneren Potential der Kohlenstoffatomen.

2 Vorkenntnisse

2.1 Allgemeine Vorkenntnisse

- Lorentzkraft
- Bewegungsgleichung von Elektronen im homogenen elektrischen und magnetischen Feld
- Magnetfeld einer Zylinderspule

Literatur: Jedes Lehrbuch zum Elektromagnetismus

2.2 Spezielle Vorkenntnisse

- Funktionsweise einer Oszillographenröhre (= Braunsche Röhre = Kathodenstrahlröhre)
- Beugung von Röntgenstrahlen am Kristallgitter
- Bragg-Reflexion

Literaturbeispiele / Lehrbücher

H. HAKEN UND H. C. WOLF: Atom- und Quantenphysik, Kap. 6, 7.1 und 9.2

H. VOGEL: GERTHSEN, Physik, Kap. 7.2.5, 15.1, 15.2 und 15.3.4

BERGMANN-SCHAEFER, Band 3, Optik, Kap. 8.1- 8.3

GERTHSEN KNESER VOGEL, Physik: ein Lehrbuch zum Gebrauch neben Vorlesungen

ALONSO FINN, Fundamental university physics, 2: Fields and waves

Bedienungsanleitungen der Geräte (siehe URL-Angaben im Text unten)

3 Theorie zum Versuch

In einem konstanten elektromagnetischen Feld wird die auf ein Elektron wirkende Kraft durch die allgemeine Lorentzkraft beschrieben:

$$\vec{F} = \vec{F}_e + \vec{F}_m = -e\vec{E} - e(\vec{v} \times \vec{B}). \quad (1)$$

e : Elementarladung

$\vec{E}$: elektrisches Feld

$\vec{v}$: Geschwindigkeit der Elektronen

$\vec{B}$: magnetische Flussdichte

Das erste Glied auf der rechten Seite stellt die vom elektrischen Feld bewirkte Kraft dar, das zweite die vom Magnetfeld. Diese Kraft ist proportional zur Geschwindigkeit des Elektrons und zur magnetischen Flussdichte in einem vorgegebenen Punkt.

Zur Bestimmung der Energieabhängigkeit des Elektrons im elektromagnetischen Feld multiplizieren wir Gl. (1) skalar mit $\vec{v}$:

$$\vec{v} \frac{d}{dt}(m\vec{v}) = \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}mv^2\right) = -e(\vec{E}\vec{v}) - e(\vec{v}(\vec{v} \times \vec{B})). \quad (2)$$

Da der zweite Term Null ist, folgt daraus:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}mv^2\right) = -e(\vec{E}\vec{v}). \quad (3)$$

Das heißt, dass die kinetische Energie des Elektrons nur durch ein elektrisches Feld geändert werden kann. Die Kraft, die das Magnetfeld ausübt, steht immer senkrecht zu $\vec{v}$ (Kreuzprodukt!) und kann deshalb keine Arbeit leisten, dass heißt das Magnetfeld ändert die kinetische Energie nicht, wohl aber die Bewegungsrichtung des Elektrons.

Die Energieerhaltung ergibt sich mathematisch direkt aus Gleichung (3) durch Integration

$$\frac{1}{2}mv^2 = +eU + \text{const.} \quad U = \text{Spannung,}$$

$$E_k + E_p = \text{const.} \quad (4)$$

Anmerkung: mit $E = -\text{grad } U = -(\frac{\partial U}{\partial x}, \frac{\partial U}{\partial y}, \frac{\partial U}{\partial z})$ folgt:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}mv^2\right) &= -e(E_x v_x + E_y v_y + E_z v_z) \\ &= +e\left(\frac{\partial U}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial U}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial U}{\partial z} \frac{dz}{dt}\right) = e \frac{dU}{dt}. \end{aligned}$$

Die Integrationskonstante in Gl. (4) ist aus den Anfangsbedingungen zu bestimmen. Für einen Bewegungsablauf folgt für zwei Zeitpunkte folgende Energiebilanz:

$$\frac{1}{2}mv_2^2 - eU_2 = \frac{1}{2}mv_1^2 - eU_1 \quad \text{oder} \quad \frac{1}{2}m(v_2^2 - v_1^2) = e(U_2 - U_1).$$

Dass heißt wird das Elektron von einem Punkt mit dem Potential U_1 in einen Punkt mit dem Potential U_2 überführt, und ist $U_2 - U_1 = U$, dann gilt:

$$\frac{mv^2}{2} = eU \quad \text{wobei} \quad \vec{v}_1 = 0 \quad \text{und} \quad \vec{v}_2 = \vec{v} \quad \text{ist.}$$

Die Energie einzelner Teilchen wird meist in Elektronenvolt (eV) angegeben. 1 eV ist die Energie, die ein mit der Elementarladung $1,610^{-19}$ C (Coulomb) behaftetes Teilchen gewinnt bzw. verliert auf dem Weg zwischen zwei Orten eines elektrischen Feldes, zwischen denen die Potentialdifferenz 1 Volt besteht.

$$1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C} \times 1 \text{ V} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ Ws.}$$

Ablenkung eines Elektrons im transversalen homogenen elektrostatischen Feld

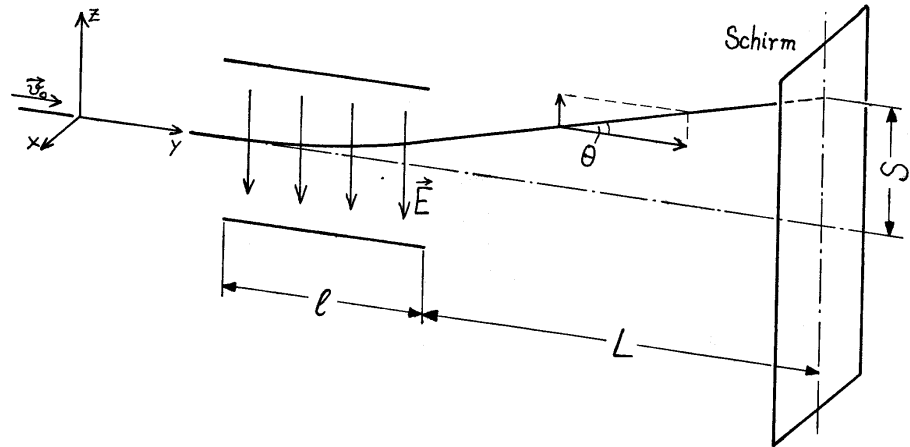


Abb. 1: Schematische Zeichnung einer Oszillographenröhre mit Koordinatensystem, Anfangsgeschwindigkeit $\vec{v}_0$, elektrischem Feld $\vec{E}$, Ablenkwinkel θ , Länge l der Ablenkplatten, Abstand L zwischen Ablenkplatten und Schirm und abgelenkter Strecke S .

Mit $\vec{B} = 0$ und bei geeigneter Wahl des Koordinatensystems (Abb. 1) gilt: $E_x = E_y = 0$. Das Feld hat in Fig. 1 die Richtung der negativen z-Achse. Wenn das Elektron die Beschleunigungsspannung U_B durchlaufen hat, besitzt es eine Anfangsgeschwindigkeit $\vec{v}_0$. Im Augenblick des Eintritts in den Ablenkcondensator liegt der Vektor $\vec{v}_0$ in der y-z-Ebene. Die Gleichung für die Elektronenbewegung kann jetzt in folgender Form geschrieben werden:

$$\begin{aligned} m\ddot{z} &= eE_z, \\ m\ddot{y} &= 0. \end{aligned}$$

Die allgemeine Lösung dieses Systems für $t = 0$ im Koordinatenursprung erhält man durch zweifache Integration:

$$\begin{aligned} y &= c_{y1}t + c_{y2}, \\ z &= \frac{1}{2} \frac{e}{m} E_z t^2 + c_{z1}t + c_{z2}. \end{aligned}$$

Die Integrationskonstanten erhält man aus den Anfangsbedingungen

$$\begin{aligned} y(0) = 0 & \Rightarrow c_{y2} = 0, \\ \dot{y}(0) = v_0 \cos \phi_0 & \Rightarrow c_{y1} = v_0 \cos \phi_0, \\ z(0) = 0 & \Rightarrow c_{z2} = 0, \\ \dot{z}(0) = v_0 \sin \phi_0 & \Rightarrow c_{z1} = v_0 \sin \phi_0. \end{aligned}$$

Damit haben die Lösungen folgende Form:

$$\begin{aligned} y &= v_0 t \cos \phi_0, \\ z &= \frac{1}{2} \frac{e}{m} E_z t^2 + v_0 t \sin \phi_0. \end{aligned}$$

Als weitere Spezialisierung kann man annehmen, daß $\vec{v}_0$ senkrecht zu $\vec{E}$ steht, dass heißt $\vec{v}_0 = v_0 |\frac{\vec{y}}{|\vec{y}|}|$ und $\phi_0 = 0$, wobei $|\frac{\vec{y}}{|\vec{y}|}|$ = Einheitsvektor in y-Richtung. Dies führt zu:

$$y = v_0 t \quad z = \frac{1}{2} \frac{e}{m} E_z t^2.$$

Durch Elimination der Zeit t erhalten wir eine Parabelbahn

$$z = \frac{1}{2} \frac{e}{m} \frac{E_z}{v_0^2} y^2.$$

Nach den Ablenkplatten sind die Elektronen bezüglich der z-Achse um den Winkel Θ verschoben, den man berechnen kann, wenn die Steigung bekannt ist (siehe Figur 1):

$$\begin{aligned} \tan \Theta &= \left(\frac{dz}{dy} \right)_{y=l} \simeq \frac{S}{L} \quad \text{für} \quad L \gg S, \\ \tan \Theta &= \frac{e}{m} \frac{E_z}{v_0^2} l. \end{aligned}$$

Unser transversales elektrisches Feld zwischen den Ablenkplatten ist

$$E_z = \frac{1}{d} U_0 (d = \text{Plattenabstand}, U_0 = \text{anliegende Spannung}), \quad (5)$$

und mit Hilfe des Energiesatzes $\frac{1}{2} m v^2 = e U_B$ folgt:

$$\tan \Theta = \frac{1}{2 U_B} \frac{U_0}{d} l.$$

Ablenkung im transversalen Magnetfeld

Wir betrachten nun den einfachsten Fall, dessen Bedingungen den üblichen Laborexperimenten entsprechen: die Ablenkung eines parallelen Elektronenstrahlbündels im magnetischen Feld. Transversales Magnetfeld:

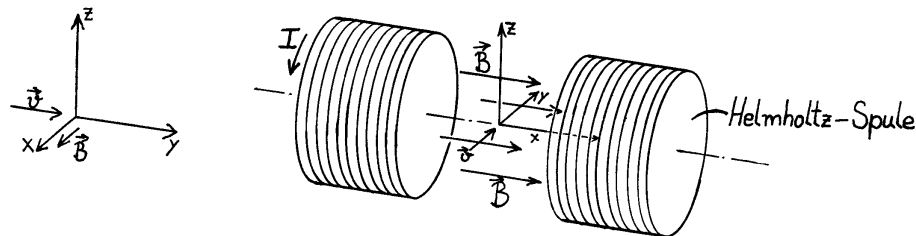


Abb. 2: Schematische Darstellung einer Helmholtz-Spule mit zugehörigem Koordinatensystem, magnetischer Flussdichte $\vec{B}$, Strom I und Geschwindigkeit $\vec{v}$.

Zur Zeit $t = 0$ habe die Geschwindigkeit des Teilchens die Richtung der y-Achse, d.h. bei $t = 0$ sei $v_x = v_z = 0$ und $v_y = |\vec{v}|$.

Für das magnetische Feld nehmen wir an, daß es homogen und zeitlich konstant ist und die Richtung der x-Achse hat.

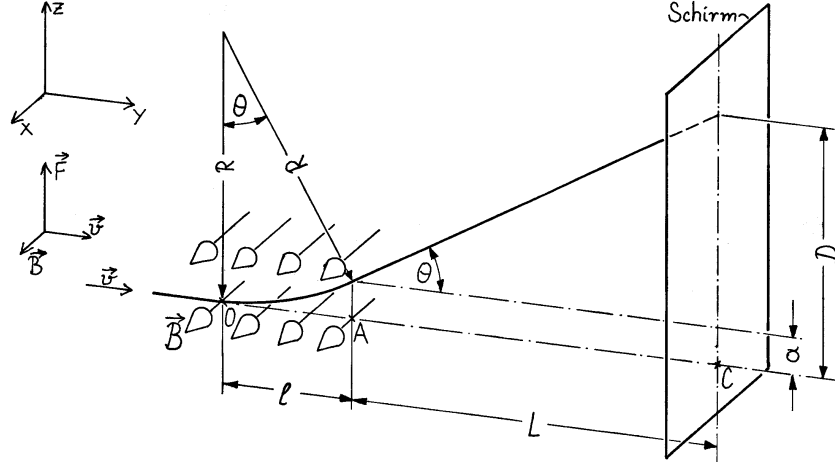


Abb. 3: Schematische Zeichnung der Ablenkung eines Elektrons in einem magnetischen Feld mit einem koordinatensystem, Anfangsgeschwindigkeit $\vec{v}$, Radius der Kreisbahn R , Rotationswinkel θ , magnetischer Flussdichte $\vec{B}$, Abstand l in dem das Feld wirkt, Abstand L zum Schirm, Austrittsabstand zur x-Achse α und abgelenkte Strecke D .

Das Feld wirke in dem Abschnitt $OA = l$. Im Abstand $OC = l + L$ ist ein Fluoreszenzschirm angebracht, auf dem die Ablenkung D gemessen wird. Die Lorentzkraft ist stets senkrecht zu $\vec{v}$ gerichtet, das heißt die Richtung von $\vec{v}$ wird geändert, nicht aber der Betrag; das Elektron bewegt sich deshalb auf einer Kreisbahn, deren Radius man durch Gleichsetzen der Lorentzkraft und der Zentrifugalkraft erhält:

$$e|\vec{v}|B = \frac{1}{R}mv^2 \quad m = \text{Masse des Elektrons} \quad \Rightarrow \quad R = \frac{mv}{eB}.$$

Nach Abb. 3 bewegt sich das Elektron nach Verlassen des Magnetfeldes geradlinig weiter zum Schirm unter Beibehaltung des Ablenkungswinkels Θ bezüglich der y-Achse. Es folgt daraus:

$$\sin \Theta = \frac{l}{R} = \frac{leB}{mv}.$$

Der Abstand a läßt sich berechnen durch

$$a = R - R \cos \Theta = R(1 - \cos \Theta) = \frac{mv}{Be}(1 - \cos \Theta).$$

Die Elektronen treffen auf den Schirm im Abstand D vom ursprünglich unabgelenkten Strahl:

$$D = L \tan \Theta + a = L\Theta + R\left(\frac{1}{2}\Theta^2\right),$$

unter der Annahme, daß der Ablenkungswinkel Θ klein ist, und damit gilt:

$$\sin \Theta = \tan \Theta = \Theta,$$

$$\cos \Theta = 1 - \frac{\Theta^2}{2}.$$

Mit Hilfe von

$$\Theta = \frac{l}{R} = \frac{leB}{mv},$$

und der Energiebilanz

$$\frac{m}{2}v^2 = eU_B,$$

folgt für die Ablenkung D :

$$D = \frac{leB}{\sqrt{2emU_B}}(L + \frac{1}{2}l) \quad U_B = \text{Beschleunigerspannung}$$

4 Versuchsdurchführung

Beachten Sie vor Versuchsbeginn unbedingt die Hinweise zur Schaltung im Anhang!

4.1 Ablenkung im transversalen elektrischen Feld

1. Setzen Sie die Oszillographenröhre mit Hilfe des Schaltplans (Anhang) in Betrieb und stellen Sie einen scharfen Leuchtfleck ein $\Leftrightarrow U_{D12} = U_{D34} = 0$, d.h. verbinden Sie die Anschlüsse D12 und D34 mit G245. D34 bleibt über den ganzen Versuch mit G245 verbunden.
2. Messen Sie für eine feste Beschleunigungsspannung U_B die Ablenkung S_{12} als Funktion der Ablenkspannung U_{D12} . Tragen Sie S_{12} als Funktion von U_{D12} in einem Diagramm auf.
3. Ändern Sie die Beschleunigungsspannung U_B , optimieren Sie die Fokussierung und wiederholen Sie die Messungen und für zwei weitere Werte von U_B . Stellen Sie auch diese zwei Messungen graphisch dar.
4. Als graphische Darstellung dieser 3 Messungen erwarten Sie Ursprungsgeraden, $S_{12} = k_{12} \cdot U_{D12}$ (warum? Welche Ursache könnte es haben, wenn sich keine exakte Ursprungsgerade ergibt?). Bestimmen Sie die drei Steigungen k_{12} und berechnen Sie für alle 3 Steigungen das Produkt $U_B \cdot k_{12}$ mit der entsprechenden Beschleunigungsspannung. Die drei Produkte $U_B \cdot k_{12}$ sollten etwa gleich sein (warum?).
5. Berechnen Sie den Mittelwert der drei Produkte $U_B \cdot k_{12}$. Aus diesem Mittelwert können Sie mit den Abständen $L_{12} = (75 \pm 2)$ mm und $l_{12} = (35 \pm 2)$ mm den Plattenabstand d_{12} bestimmen (nach welcher Formel?). Vergleichen Sie den so erhaltenen Wert mit dem gegebenen Wert von $d_{12} = (3,5 \pm 0,5)$ mm.
6. Diskutieren Sie die Fehler, mit denen Ihre Messungen behaftet sind.

4.2 Ablenkung im transversalen Magnetfeld

1. Die Röhre wird betrieben wie in 4.1. Die Ablenkplatten werden nicht benutzt, werden aber an die Anode (G245) angeschlossen. So wird eine statische Aufladung der Platten verhindert, die eine ungewollte Ablenkung zur Folge haben kann. Da Sie im weiteren Verlauf des Versuchs keine Ablenkspannungen U_{12} und U_{34} mehr benötigen, **schalten Sie bitte den 90-V-Batterieblock ab!** (entfernen sie den Drahtbügel an der Seite des Steuerkastens.)
Die beiden Spulen sind in Serie geschaltet, so daß sich die beiden Magnetfelder addieren. Gemessen wird die an den Spulen angelegte Spannung U_S . Sie ist proportional zum Strom, der durch die Spulen fließt, und damit proportional zum Magnetfeld.
2. Messen Sie die Strahlablenkung S_S als Funktion der Spulenspannung U_S für feste Beschleunigungsspannung U_B und stellen Sie die Messung graphisch dar.
3. Wiederholen Sie die Messung und graphische Darstellung für eine weitere Beschleunigungsspannung.
4. Sie erwarten Ursprungsgeraden $S_S = k_S \cdot U_S$ (wieso?). Bestimmen Sie die 2 Steigungen k_S . Berechnen Sie für jedes k_S das entsprechende Produkt $k_S \cdot \sqrt{U_B}$. Vergleichen Sie diese 2 Produkte miteinander. Was erwarten Sie (warum?).

4.3 Beugung von Elektronenstrahlen, Verifikation der DeBroglie-Beziehung

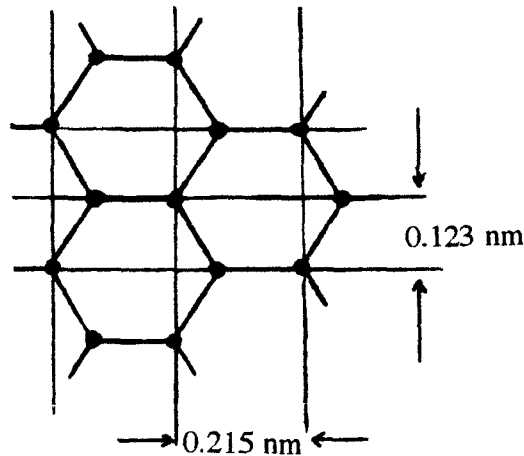
Für diesen Versuchsteil verwenden Sie die Elektronenbeugungsröhre, bei der ein Elektronenstrahl durch eine Graphitfolie tritt. Eine Bedienungsanleitung zur Beugungsröhre (technische Daten der Röhre, elektrische Beschaltung usw.) finden Sie auf der Praktikumshomepage:

<http://www.atlas.uni-wuppertal.de/~kind/APPRAK.HTML>

beim Abschnitt AP9-Ablenkung und Beugung von Elektronen.

Lesen Sie diese Anleitung unbedingt bei der Versuchsvorbereitung! Sie enthält wichtige Informationen zur Bedienung der Geräte, zur Optimierung der Betriebsparameter und zum physikalischen Hintergrund.

Schützen Sie die Hochvakuumröhre vor Stoß und Fall (Implosionsgefahr!). Da Sie mit berührungsfährlichen Spannungswerten umgehen, bauen Sie die Schaltung so auf, dass leitende Steckerenden nicht frei zugänglich sind. Gehen Sie wie in der Bedienungsanleitung näher beschrieben vor. Da die Kohlenstoffkristalle — wie in der Abbildung angedeutet — eine hexagonale Geometrie aufweisen, existieren zwei relevante Gitterkonstanten: $d_1 = 0,123 \text{ nm}$ und $d_2 = 0,213 \text{ nm}$, die im Verhältnis $1 : \sqrt{3}$ zueinander stehen.



Symmetrie der Kohlenstoffkristalle

Beobachten Sie die beiden entstehenden Beugungsringe in einem verdunkelten Raum und bestimmen Sie deren Durchmesser als Funktion der Beschleunigungsspannung.

Für die De-Broglie Wellenlänge λ und den Impuls der Elektron p gilt:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (6)$$

$$E = eU_a = \frac{p^2}{2m_e} \quad (7)$$

$$\Rightarrow \lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_e U_a}} = \sqrt{\frac{h^2}{2m_e} \frac{1}{U_a}} \quad (8)$$

Die beiden erkennbaren Ringe genügen der Bragg-Bedingung.

$$2 d_{1,2} \sin \vartheta_{1,2} = \lambda = \sqrt{\frac{1500 \text{ kV}}{U_a}} \text{ pm}$$

wobei $\vartheta_{1,2}$ die von der Anodenspannung U_a abhängigen Beugungswinkel des Elektronenstrahl darstellen (siehe Abb. 5 in der PHYWE-Anleitung). Die Beugungswinkel können nach der Bestimmungsgleichung

$$\vartheta = \frac{1}{4} \arcsin \frac{2r}{D}$$

aus den jeweiligen Durchmessern D_i oder Radien r_i der Beugungsringe ermittelt werden. D ist der Glaskolbendurchmesser (siehe Abb. 5 in der PHYWE-Anleitung).

Daher sollte sich bei Gültigkeit der DeBroglie-Beziehung $\lambda = h/p$ ein linearer Zusammenhang¹ zwischen $U_a^{-1/2}$ und dem Durchmesser D_i des i-ten Beugungsringes ergeben.

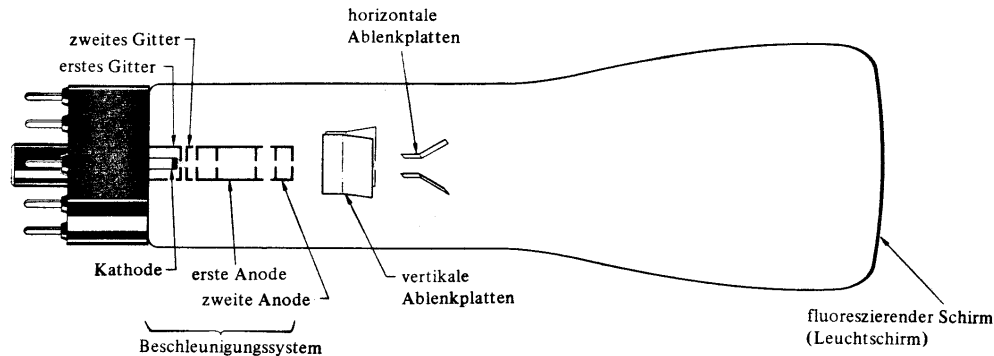
Verifizieren Sie diesen Sachverhalt mit Hilfe eines entsprechenden Diagrammes. Ermitteln Sie aus der Steigung der den beiden Beugungsringen entsprechenden Geraden die Gitterkonstanten der Kohlenstoffolie und vergleichen Sie Ihre Resultate mit den erwarteten Werten. Diskutieren Sie mögliche systematische Fehler (z.B. Vernachlässigung der Wechselwirkung zwischen Elektronen und Kohlenstoffkristallen oder Einfluß relativistischer Effekte) sowie die statistischen Unsicherheiten Ihrer Meßreihen.

¹für die im Versuch auftretenden kleinen Winkel mit $\vartheta \simeq \sin \vartheta$

Schaltplan für die Oszillographenröhre



Aufsicht einer Oszillographenröhre



Hinweise zur Messung und zum Schaltbild:

Zwischen K und G1 wird eine regelbare Spannungsquelle (z.B. 0 ... 25 V oder 0 ... 300 V) direkt angeschlossen. Wenn hierfür keine Spannungsquelle zur Verfügung steht, können K und G1 auch einfach miteinander verbunden werden. Die Fokussierung ist dann aber schlechter.

Das Symbol für die Gitter G1 bis G5 (dicker Strich mit Unterbrechung) soll eine Metallplatte mit Loch in der Mitte darstellen. Das bedeutet insbesondere, daß die obere „Hälfte“ von G5 (sowie von G2, G4 und eine Platte von D12 und D34) mit der unteren „Hälfte“ von G5 (und dem Knotenpunkt aus 10 M Ω und zweimal 1,5 M Ω) verbunden ist. Die Spannung für die Kathodenheizung beträgt 6,0 V bis 6,3 V (Wechselstrom).

Die Beschleunigungsspannung wird in erster Linie mit dem Potentiometer (für G245) verändert. Sie können aber auch an dem regelbaren Hochspannungsnetzgerät die Spannung etwas erhöhen oder verringern. Ein Wert von 1500 V sollte jedoch für die Beschleunigungsspannung nicht überschritten werden.

Die Hochspannung zwischen G1 und G245 (= Beschleunigungsspannung der Elektronen) wird über hochohmige Widerstände der Röhre zugeführt. Daher kann diese Spannung nur mit einem sehr hochohmigen Gerät gemessen werden. Auch dann vermindert aber der Anschluss des Messgerätes die Spannung. Daher muss während des gesamten Versuchs das Spannungsmessgerät angeschlossen bleiben, um größere Messfehler der Beschleunigungsspannung zu vermeiden. Zur Messung der Ablenk- oder Spulenspannung steht Ihnen ein weiteres Messgerät zur Verfügung. **Die Hochspannung darf niemals mit Digitalmultimetern gemessen werden. Ihre Elektronik wird häufig durch geringste Überspannungen weitgehend zerstört!** Außerdem ist der Innenwiderstand (10 M Ω) kleiner als bei einigen Analogmultimetern (Unavo9e: 29 M Ω bei Messbereich DC 1500 V).

Es gibt neue Hochspannungsnetzgeräte (Leybold 522 37); diese haben einen Tastschalter, mit dem der linke oder rechte Ausgang oder beide Ausgänge eingeschaltet werden können (angezeigt durch Leuchtdioden an der Frontplatte). Die Digitalanzeige im Gerät ist natürlich nicht die Beschleunigungsspannung der Röhre. Stellen Sie die Elektronenröhre nicht zu nahe an die Netzgeräte (Strahlstörung durch magnetische Streufelder der Trafos).

Setzen sie den Drahtbügel zum Einschalten der Ablenkspannung (90V aus Batterien) nur während des Versuchs ein (Batterie schonen!). Sorgen Sie bitte dafür, dass der Bügel nach Versuchsende entfernt ist! (Es ist nicht möglich, die Ablenkspannung aus Netzgeräten zu beziehen. Die Anode (G245) liegt ja bezüglich der Kathode auf Hochspannung, das führt zu Isolationsproblemen bei verschiedenen Netzgeräten. Außerdem produzieren die vorhandenen Netzgeräte zu großen Störungen durch kapazitiv eingekoppeltes Netzbrummen.) Beim Strahlfokussieren und wenn nur mit horizontaler oder vertikaler Ablenkung gemessen wird, sollten die Anschlüsse D12 und/oder D34 mit der Anode (G245) verbunden werden.