

**Versuch AP8**  
**Elektronenstrahlen**

4.18, TEX: 6. April 2018

## I. Zielsetzung des Versuchs

Die Entdeckung der Welleneigenschaften von massebehafteten Teilchen war historisch von größter 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 Telexperimente durch, die Ihnen die Teilchen- bzw. Wellennatur von Elektronen demonstrieren.

Mit Hilfe eines Fadenstrahlrohres bestimmen Sie die spezifische Ladung  $e/m$  eines Elektrons, das im homogenen Magnetfeld eines Helmholtzspulenpaares auf eine Kreisbahn gezwungen wird. Die zugrundeliegende Bewegungsgleichung für massebehaftete geladene Teilchen sollte Ihnen noch aus der Schulzeit in Erinnerung geblieben sein. Erweitern Sie Ihre bisherigen Kenntnisse im Hinblick auf relativistische Eigenschaften des Elektrons in Abhängigkeit der Beschleunigungsspannung.

Die Welleneigenschaften eines Elektronenstrahles werden Sie durch Beugung von Elektronen an einer dünnen Schicht von Kohlenstoffkristallen 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 Kohlenstoffkristalle.

## II. Vorkenntnisse

Beugung von Röntgenstrahlen am Kristallgitter,

Bragg-Reflexion,

Phasen- und Gruppengeschwindigkeit von Wellenpaketen.

Welleneigenschaften von Materiestrahlen.

Die DeBroglie-Beziehung.

Grundkenntnisse der relativistischen Kinematik (Energie, Impuls, Ruhemasse).

Die Wellengleichung für Materiewellen: die Schrödingergleichung.

Das Biot-Savart'sche Gesetz.

Das Magnetfeld eines Helmholtzspulenpaares.

Bestimmung der spezifischen Ladung  $e/m$  mit einem Fadenstrahlrohr.

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

Literaturangaben, Lehrbücher:

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

Signatur Univ.-Bibliothek

91 UHI 1535(6)

91 UAP 1469(20)

91 UAP 1605(9)

### III. Versuchsprogramm

#### 1. Messung der spezifischen Elektronenladung $e/m$

Beim Aufbau der Schaltung beachten Sie bitte, daß die Vakuumröhre bei Stoß oder Fall implodieren kann, da sie mit Argon unter einem Druck von  $10^{-1}$  Pa gefüllt ist. Verwenden Sie für den Betrieb der Röhre das entsprechende Netzgerät.

Eine Bedienungsanleitung des Netzgerätes und zum Fadenstrahlrohr (technische Daten der Röhre und der Spulen, Elektrische Beschaltung usw.) finden Sie auf der Praktikumshomepage:

<http://www.atlas.uni-wuppertal.de/~kind/APPRAK.HTML> beim Abschnitt **AP8 Elektronenstrahlen**.

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

Die Helmholtzspule wird über ein weiteres Netzgerät (Spulenstrom max. 5 A) betrieben.

Stellen Sie die Spannungen (siehe Anleitung) so ein, daß Sie den Elektronenstrahl im Fadenstrahlrohr optimal sehen können.

Lenken Sie den Elektronenstrahl mit Hilfe des Helmholtzspulenstromes auf eine Kreisbahn ab. Bestimmen Sie für mindestens drei verschiedene Betriebsbedingungen (Anodenspannung, Magnetflußdichte) die spezifische Elektronenladung  $e/m$ .

Verwenden Sie dafür folgende Daten für die Helmholtzspule:

Spulendurchmesser: 400 mm

Windungszahl: je 154

Spulenwiderstand: 2,1  $\Omega$

max. Strom je Spule: 5 A (Dauerbelastung)

max. Flußdichte bei  $I = 5$  A in Helmholtz-Anordnung: 3,5 mT

Vergleichen Sie Ihr Ergebnis unter Angabe systematischer und statistischer Fehler mit Literaturwerten.

#### 2. Beugung von Elektronenstrahlen, Verifikation der DeBroglie-Beziehung

Für diesen Versuchsteil verwenden Sie eine weitere Röhre (Elektronenbeugungsröhre), bei der ein Elektronenstrahl durch eine Graphitfolie tritt.

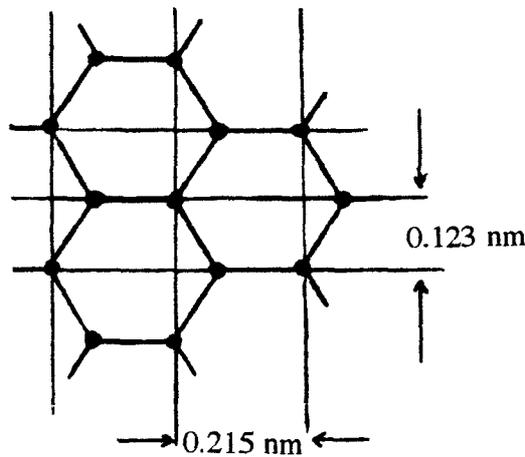
Eine Bedienungsanleitung zur Beugungsröhre (Technische Daten der Röhre, Elektrische Beschaltung usw.) finden Sie auf der Praktikumshomepage:

<http://www.atlas.uni-wuppertal.de/~kind/APPRAK.HTML> beim Abschnitt **AP8 Elektronenstrahlen**.

**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 berührungsgefährlichen 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:  $d_1 = 0,123$  nm und  $d_2 = 0,213$  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.

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 Zusammenhang<sup>1</sup> zwischen  $U_a^{-1/2}$  und dem Durchmesser  $D_i$  des i-ten Beugungsrings ergeben.

Verifizieren Sie diesen Sachverhalt mit Hilfe eines entsprechenden Diagrammes. Ermitteln Sie aus der Steigung der den beiden Beugungsringen entsprechenden Geraden die Gitterkonstanten der Kohlenstoffkristallfolie 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.

### Die Versuchsgeräte



links Fadenstrahlrohr mit Helmholzspulenpaar, unten mittig Beugungsröhre, rechts die beiden Netzteile.

<sup>1</sup> für die im Versuch auftretenden kleinen Winkel mit  $\vartheta \simeq \sin \vartheta$