

# Schriftliche Abiturprüfung nach neuem KLP

## Beispiel für eine abiturnahe Klausur

### *Physik, Grundkurs*

### *Vorbemerkungen zur Aufgabenstellung*

---

#### **Aufgabentitel: Teilchen- und Welleneigenschaft des Elektrons**

#### ***Zur Auswahl der Aufgabeninhalte – Bezug zu den Vorgaben Abitur 2017 Physik:***

In den Vorgaben für das Zentralabitur 2017<sup>1</sup> finden sich „Fokussierungen“ für die inhaltlichen Schwerpunkte innerhalb der Inhaltsfelder *Quantenobjekte* und *Strahlung und Materie*, die in rot-kursiver Schrift die beiden Fokussierungen „Das Wellenmodell als ein gemeinsames Beschreibungsmittel für Elektronen und Photonen“ sowie „Erkenntnisse über den Aufbau der Atome“ ausweisen (ebda, S. 3).

An dieser Stelle sei daher eine Aufgabe vorgestellt, die in einem ihrer wesentlichen Teile eine dieser beiden Spezifizierungen deutlich berührt. Sie beinhaltet das Teilchenmodell des Quantenobjekts Elektron (mit dem Teilaspekt *Masse*) und greift darüber hinaus auch noch das Wellenmodell des Elektrons auf.

#### ***Zum Fachinhalt der Aufgabe – Bezug zum KLP:***

Der Kernlehrplan Physik für die gymnasiale Oberstufe<sup>2</sup> – im weiteren Text KLP genannt – benennt für den Grundkurs im *Inhaltsfeld Quantenobjekte* die Behandlung der beiden Quantenobjekte *Photon* und *Elektron*. Im Zentrum der hier vorgestellten Abituraufgabe steht das Quantenobjekt *Elektron*.

Bei allen Quantenobjekten sind immer der *Teilchen-* und der *Wellenaspekt* gleichermaßen zu nennen. Der *Teilchen-* und der *Wellenaspekt beim Elektron* bilden die inhaltliche Grundlage der nachfolgenden Teilaufgaben.

Teil A:

Der Teilchenaspekt beim Quantenobjekt Elektron umfasst u. a. die Eigenschaft des Elektrons, eine *Ladung* und eine *Masse* zu haben. Diese Abituraufgabe beschäftigt sich in ihrem ersten Teil mit der *Masse* des Elektrons, die bei bereits bekannter Ladung (vgl. Schlüsselexperiment *Millikanversuch*) über die Bestimmung der spezifischen Ladung des Elektrons im *Fadenstrahlrohr* gewonnen werden kann.

Teil B:

Der Wellenaspekt des Elektrons wird im Unterricht bei der Behandlung des Elektronenbeugungsexperiments, das einen Zugang zur Bestimmung der den Elektronen je nach ihrer Geschwindigkeit zuzuordnenden *Wellenlänge* gestattet, vertiefend behandelt. Der Wellenaspekt ist Schwerpunkt in der zweiten Teilaufgabe.

---

<sup>1</sup> <https://www.standardsicherung.schulministerium.nrw.de/abitur-gost/fach.php?fach=22>

<sup>2</sup> <http://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/lehrplannavigator-s-ii/gymnasiale-oberstufe/physik/>

Teil C:

Die dritte und letzte Teilaufgabe nimmt direkt Bezug auf beide Eigenschaften des Elektrons als Quantenobjekt.

**Bezug zu den im KLP genannten Schlüsselexperimenten:**

Hinsichtlich der inhaltlichen Auswahl zur vorliegenden Abituraufgabe benennt der KLP die **Schlüsselexperimente *Fadenstrahlrohr* und *Elektronenbeugungsexperiment***.

Diese beiden Experimente werden explizit im Grundkursbereich in den beiden Kompetenzbeschreibungen

- „Die Schülerinnen und Schüler modellieren Vorgänge im *Fadenstrahlrohr* (Energie der Elektronen, Lorentzkraft) mathematisch, variieren Parameter und leiten dafür deduktiv Schlussfolgerungen her, die sich experimentell überprüfen lassen, und ermitteln die Elektronenmasse“ (Kompetenzbereich: Umgang mit Fachwissen),
- „Die Schülerinnen und Schüler erläutern die Aussage der de Broglie-Hypothese, wenden diese zur Erklärung des Beugungsbildes beim *Elektronenbeugungsexperiment* an und bestimmen die Wellenlänge der Elektronen“ (Kompetenzbereich: Erkenntnisgewinnung)

angesprochen.

Das *Fadenstrahlrohr* erscheint in dieser Aufgabe allerdings nicht explizit unter seinem Namen, sondern wird in seiner Funktion im Rahmen der Erkenntnisgewinnung über das Elektron durch eine *Elektronenablenkröhre* mit zusätzlich angebrachtem *Helmholtzspulenpaar* „ersetzt“<sup>3</sup>. Physikalisch inhaltlich kann damit im Wesentlichen das Fadenstrahlrohr realisiert werden. Die Prüflinge müssen hierfür zwei Aspekte erkennen:

- In der Elektronenablenkröhre ist nicht die vom Fadenstrahlrohr her bekannte vollständige Kreisbahn der Elektronen in einem homogenen Magnetfeld sichtbar, sondern lediglich ein Teil davon als Kreisbogen (bei abgeschaltetem elektrischen Querfeld).
- Die Bestimmung der spezifischen Ladung bzw. die Massenbestimmung der Elektronen geschieht durch die geeignet orientierte Überlagerung eines magnetischen und elektrischen Felds jeweils geeigneter Stärke. Die für diesen Fall für die Auswertung nötige Gleichung wird den Prüflingen in der entsprechenden Aufgabe angegeben, ist also nicht herzuleiten. Die bloße Angabe einer zu verwendenden Gleichung sollte den Prüflingen aus dem Unterricht her bekannt sein, weil im Unterrichtsverlauf in der Qualifikationsphase an einigen Stellen ebenfalls Gleichungen auftreten, die nicht immer explizit hergeleitet werden.

Dem *Elektronenbeugungsexperiment* liegt die Verwendung der *Elektronenbeugungsröhre* zugrunde. Sie sollte in jedem Fall im Unterricht besprochen sein und damit eine sofortige Wiedererkennung bieten.

Anmerkung: Beim Jönsson-Experiment handelt es sich zwar auch um ein Elektronenbeugungsexperiment an einem Doppelspalt; seine Stellung ist aber erkenntnistheoretisch eindeutig darin zu sehen, dass es mit der vielfach wiederholten Beugung einzelner Elektronen an einem Doppelspalt die statistische Verteilung der registrierten Elektronen als ein ungeteiltes Objekt (Teilchenaspekt) über ihre ihnen zugeordnete Wellenlänge (Wellenaspekt) zeigt. Dieses Experiment hat im Erkenntnisprozess der Lernenden während des Unterrichts die Funktion, die zuvor erarbeitete

<sup>3</sup> In den Implementationsveranstaltungen zum neuen KLP wurde darauf hingewiesen, dass im Zentralabitur nicht notwendigerweise die im KLP aufgelisteten Schlüsselexperimente in ihrer ursprünglichen Form erscheinen müssen, sondern dass durchaus angemessene Varianten in den Aufgaben auftreten könnten.

Kenntnis über Teilchen- und Wellennatur des Elektrons zu vereinen, nicht also die Wellennatur des Elektrons überhaupt erst zu entdecken (was mit Hilfe der in dieser Aufgabe behandelten Elektronenbeugungsröhre geschieht).

**Bezug zu den im KLP genannten Kompetenzen:**

Den **Kompetenzbeschreibungen** in Bezug auf das **Fadenstrahlrohr** („modellieren Vorgänge im Fadenstrahlrohr“) ist zu entnehmen, dass die Schülerinnen und Schüler im Unterricht Folgendes gelernt haben müssen:

- Berechnung der kinetischen Energie eines beschleunigten Elektrons:

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = E_{kin} = E_{elektr} = e \cdot U ;$$

- Berechnung der Lorentzkraft  $F_L = e \cdot v \cdot B$  (nur betragsmäßig, nicht unbedingt vektoriell, ggf. nur für rechtwinklige Anordnung, 3-Finger-Regel);

- Identifizierung der Lorentzkraft als Zentralkraft mitsamt Formeln:  $\frac{m \cdot v^2}{r} = F_z = F_L = e \cdot v \cdot B ;$

- Begründung der Konstanz des Betrags der Bahngeschwindigkeit der Elektronen, da das Wirken der Lorentzkraft (immer senkrecht zur Geschwindigkeit) keine Energiezunahme und damit keine veränderte Geschwindigkeit bewirkt und, daraus folgend, zu einer Kreisbahn als Bahnkurve führt;

- Verarbeitung der verschiedenen Gleichungen („deduktive Herleitung“);

- Diskussion der Ursachen verschiedener Bahnkurven („variieren Parameter“).

In den **Kompetenzbeschreibungen** in Bezug auf das **Elektronenbeugungsexperiment** ist zu entnehmen, dass die Schülerinnen und Schüler im Unterricht Folgendes gelernt haben müssen:

- De Broglie-Gleichung  $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$ , also die Zuordnung einer Wellenlänge zur (Ruhe-) Masse behafteten Objekten, die sich mit einer bestimmten Geschwindigkeit  $v < c$  bewegen;

- Bestimmung der Wellenlänge aus den Daten des Elektronenbeugungsexperiments (mit den notwendigen elementaren geometrischen Kenntnissen);

- Bestimmung der Geschwindigkeit der zuvor beschleunigten Elektronen aus der

Beschleunigungsspannung über  $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = E_{kin} = E_{elektr} = e \cdot U$  (s. o.).

In den **Kompetenzbeschreibungen** in Bezug auf die **Quantenobjekte** allgemein, also für das Elektron wie für das Photon gemeinsam, finden sich im KLP die folgenden Angaben:

- „Die Schülerinnen und Schüler verdeutlichen die Wahrscheinlichkeitsinterpretation für Quantenobjekte unter Verwendung geeigneter Darstellungen (Graphiken, Simulationsprogramme)“,
- „Die Schülerinnen und Schüler untersuchen, ergänzend zum Realexperiment, Computersimulationen zum Verhalten von Quantenobjekten“,
- „Die Schülerinnen und Schüler zeigen an Beispielen die Grenzen und Gültigkeitsbereiche von Wellen- und Teilchenmodellen für Licht und Elektronen auf“,

- „Die Schülerinnen und Schüler beschreiben und diskutieren die Kontroverse um die Kopenhagener Deutung und den Welle-Teilchen-Dualismus“.

### **Querverbindungen zu anderen Inhaltsfeldern**

Da zum Zeitpunkt der Abiturklausur – anders als bei den Klausuren während der Qualifikationsphase – **alle weiteren Inhaltsfelder**, die der KLP benennt, bearbeitet worden sind, können und sollen in einer Aufgabe für das Zentralabitur Erweiterungen aus anderen Inhaltsfeldern hinzukommen, die in engem fachlichen Zusammenhang mit dem Fadenstrahlrohrexperiment bzw. dem Elektronenbeugungsexperiment stehen. So bietet sich u. a. grundsätzlich an:

- Inhaltsfeld *Strahlung und Materie*:
  - Begründung der Leuchtspur über die Anregung der Elektronen in der Hülle der Gasmoleküle.
  - Entstehung von Röntgenstrahlung beim Auftreffen von Elektronen auf Materie  
Beides wird in der vorgestellten Aufgabe auch ausgeführt.
- Inhaltsfeld *Relativität von Raum und Zeit*:
  - Begründung zur Notwendigkeit bzw. zur Nichtnotwendigkeit relativistisch zu betrachtender Elektronen bei entsprechenden Geschwindigkeiten.  
Dies wird in der vorgestellten Aufgabe zwar nicht ausgeführt, wäre jedoch bei entsprechenden Kürzungen an anderer Stelle sicher möglich, wenn beispielsweise die nach Durchlaufen der Beschleunigungsstrecke erreichte Geschwindigkeit der Elektronen in den Fragehorizont gerückt wird.

### **Übersicht über die Struktur der Aufgabe**

Teil A: Der Teilchenaspekt beim Elektron

- A1 Erzeugung des Elektronenstrahls
- A2 Bestimmung der Masse des Elektrons
- A3 Kompensation der elektrischen und magnetischen Ablenkkraft

Teil B: Der Wellenaspekt beim Elektron

- B1 Ein Elektronenbeugungsexperiment und die Wellenlänge des Elektrons
- B2 Ein Elektronenbeugungsexperiment – weitere Aspekte

Teil C: Wellen- und Teilchenaspekt beim Quantenobjekt Elektron

Das einzelne Elektron als Quantenobjekt

### **Zu den Anforderungsbereichen**

Die drei Stufen der Anforderungsbereiche und ihre ungefähre (prozentuale) Verteilung für Klausuren sind für das Fach im Schulbereich hinlänglich bekannt. An dieser Verteilung orientiert sich auch die Gestaltung der hier vorliegenden Aufgabe, in der alle drei Anforderungsbereiche ungefähr in der bekannten Verteilung (AFBI:AFBII:AFBIII≈40:50:10) angesprochen werden. Da eine Benennung der Anforderungsbereiche immer die Kenntnis der konkreten Lernvoraussetzungen der betreffenden Schülerinnen und Schüler voraussetzt, kann bei landesweiten Aufgabenstellungen hier lediglich eine durchschnittliche Einschätzung des jeweiligen Schwierigkeitsgrads der einzelnen Teilaufgaben als Kriterium dienen.

Für den Anforderungsbereich III bedeutet das, dass an wenigen Stellen in der Klausur in angeleiteter Form weiterführende Ideen zu verstehen und zu verfolgen sind, die in der vorliegenden Form im Unterricht aller Voraussicht nach nicht besprochen worden sind, zu deren Bearbeitung die Schülerinnen und Schüler aber über die fachlichen Grundlagen verfügen. Dies wird in der hier vor-

gestellten Aufgabe in Teilbereichen der Aufgaben A3a), B1b) und B2b) realisiert. Selbstverständlich sind für die Bearbeitung der genannten Teilaufgaben auch wiederum die vorkommenden grundlegenden Inhalte im Unterricht behandelt worden.

**Bearbeitungszeit**

Der Umfang der gesamten Aufgabenstellung orientiert sich daran, dass die Note „sehr gut“ von einem Prüfling erreicht wird bzw. erreicht werden soll, der die verlangten fachlichen Grundlagen so gut beherrscht, dass ihm eine vollständige und richtige Lösung ohne besondere Schwierigkeiten in der angegebenen Zeit gelingt.

Die angegebene Gesamtzeit für die Bearbeitung der vollständigen Klausur wurde im vorliegenden Fall mit Hilfe einiger solcher Schülerinnen und Schülern geprüft und bestätigt.

**Bepunktung**

Der Bepunktung der einzelnen Teilaufgaben wurde eine Gesamtpunktzahl von 100 Punkten zugrunde gelegt. Die den einzelnen Teilaufgaben zugewiesene Punktzahl orientiert sich in erster Linie an der Anzahl der vom Prüfling zu absolvierenden Schritte im Lösungsgang in Relation zur vorgegebenen Gesamtpunktzahl. Es ist also prinzipiell nicht so, dass mit einer Teilaufgabe des AFB I von vornherein weniger Punkte erreicht werden als mit einer Teilaufgabe des AFB III.

**Zusammenfassende Übersicht Bearbeitungszeit/Anforderungsbereiche/Bepunktung**

Aufg.	A1a	A1b	A1c	A2a	A2b	A2c	A3a	A3b	B1a	B1b	B1c	B1d	B2a	B2b	C	Σ
Zeit (180)	10	5	10	15	15	15	10	15	10	5	5	10	10	10	10	<b>155</b>
AFB	I	II	I	II	I/II	I/II	III	I	I/II	II/III	II	II	II	III	II	
Pkt (100)	6	6	5	8	8	6	8	7	8	6	4	6	6	7	9	<b>100</b>

**Struktur der Darstellung von Aufgabentext, Anforderungsbereich, Lösung und Bepunktung**

In diesem Muster sind der leichten Lesbarkeit wegen die Einschätzung des jeweiligen Anforderungsbereichs, die Lösungen sowie die zugeordneten Punkte den einzelnen Teilaufgaben direkt nachfolgend dargestellt. In den späteren Zentralabituraufgaben ist diese Art der Darstellung selbstverständlich nicht möglich, eine Entscheidung über die konkrete Darstellung liegt derzeit aber noch nicht vor und dürfte von der bisherigen Form wohl nicht entscheidend abweichen.

# Schriftliche Abiturprüfung nach neuem KLP

## Beispiel für eine abiturnahe Klausur

### Physik, Grundkurs

### Aufgabenstellung mit Lösungen

#### Teilchen- und Welleneigenschaft des Elektrons

##### Teil A: Eine Elektronenablenkröhre zur Bestimmung der Masse des Elektrons

##### A1 Erzeugung des Elektronenstrahls

Abbildung 1 zeigt eine Elektronenstrahlableiteröhre, bei der ein erzeugter Elektronenstrahl durch ein (weitgehend) homogenes elektrisches Feld, das durch zwei Kondensatorplatten realisiert wird, abgelenkt werden kann. Zusätzlich ist vor bzw. hinter der Elektronenablenkröhre ein Helmholtzspulenpaar angebracht. Dadurch wird neben der Untersuchung der Bahn der Elektronen in einem rein elektrischen Feld die Möglichkeit gegeben, dem elektrischen Feld ein magnetisches Feld zu überlagern.

Die sich ergebenden Bahnkurven können (zumindest ausschnittsweise) auf dem Leuchtschirm sichtbar gemacht werden. Sind beide Felder abgeschaltet, bewegen sich die Elektronen geradlinig und genau auf der Mittelachse des Ablenkcondensators von rechts nach links.

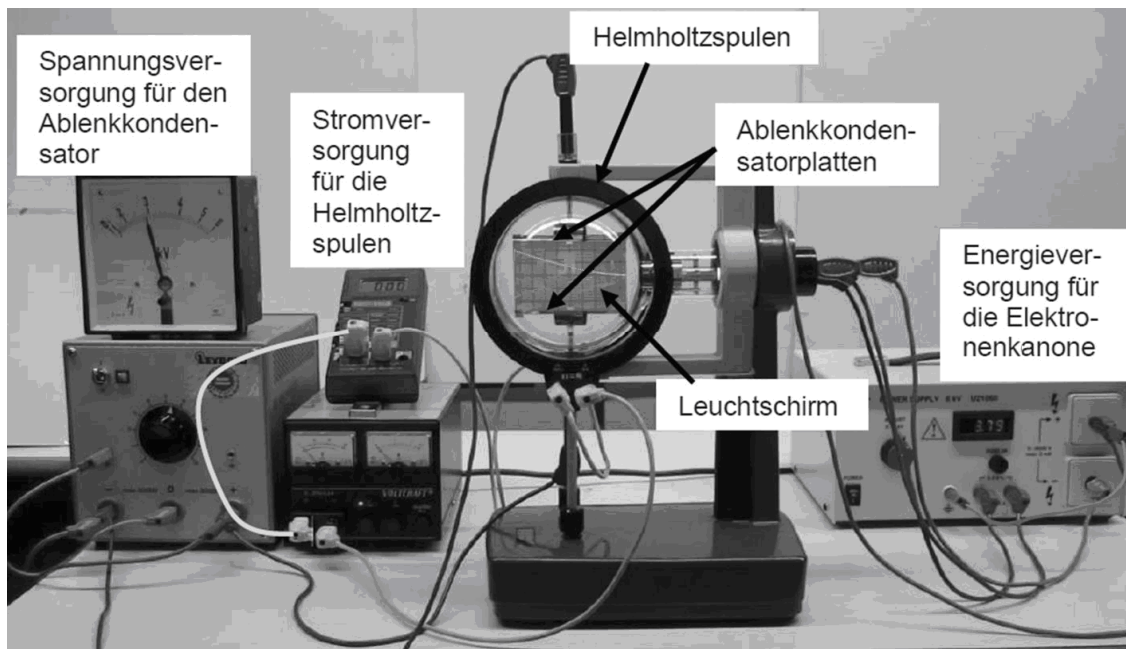


Abbildung 1: Die Elektronenablenkröhre mit elektrischen und magnetischen Feldern

- a) Beschreiben Sie diejenigen Prozesse in der „Elektronenkanone“ der Elektronenablenkröhre, mit denen man freie Elektronen erzeugen und auf eine gewünschte Geschwindigkeit bringen kann.

Man erhitzt einen Metalldraht (Heizspannung), sodass aus ihm Elektronen austreten können

und eine Elektronenwolke um ihn herum entsteht.

Diese Elektronen erfahren in einem elektrischen Feld eine beschleunigende Kraft, wenn zwischen Glühdraht und Anode die Beschleunigungsspannung (Anodenspannung) angelegt wird. Wenn die Elektronen durch eine Öffnung in der Anode aus der Beschleunigungsstrecke austreten, befinden sie sich in einem (fast) feldfreien Raum und stehen dann mit konstanter Geschwindigkeit für Untersuchungen zur Verfügung.

AFB: I

Bearbeitungszeit: ca. 10 min

Punkte: 6

- b) Zeigen Sie, dass die Elektronen bei dem Verlassen der Elektronenkanone die Geschwindigkeit

$v_0 = \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_B}$  besitzen, wobei mit  $m$  die Elektronenmasse, mit  $e$  die Elementarladung und mit  $U_B$  die Anodenspannung gegeben ist.

Der Energiegewinn der Elektronen bzw. ihre kinetische Energie  $E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2$  kommt aus der Energie des elektrischen Beschleunigungsfeldes  $E_{el} = e \cdot U_B$ , also gilt wegen  $E_{el} = E_{kin}$ :

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2 = e \cdot U_B = E_{el} \text{ und umgestellt somit } v_0 = \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_B} .$$

AFB: II

Bearbeitungszeit: ca. 5 min

Punkte: 6

- c) Erläutern Sie, wie es mit Hilfe des Leuchtschirms gelingt, die Bahn der Elektronen in der Elektronenablenkröhre sichtbar zu machen.

Dabei ist zu beschreiben, wie es zum Aussenden von Licht in den Atomen des (etwas schräg stehenden) Leuchtschirms der Elektronenstrahlableitkröhre kommt, wenn die Elektronen auf diesen auftreffen.

Die Elektronen bewegen sich zunächst (praktisch) in einem Vakuum und treffen auf den schräg gestellten Schirm. Hierbei regen sie die Atome des Schirms zum Leuchten an, indem sie eines der Hüllelektronen der Schirmatome in einen höheren Energiezustand versetzen bzw. das Atom gänzlich ionisieren, sodass dies beim anschließenden Rücksprung in einen geringeren oder auch den geringst möglichen Energiezustand ein Photon aussendet, das auch im sichtbaren Wellenlängenbereich des Lichts liegen kann.

AFB: I

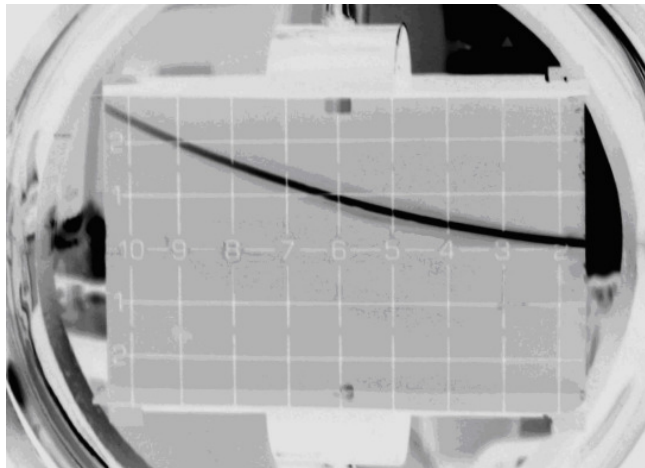
Bearbeitungszeit: ca. 10 min

Punkte: 5

(6+6+5=17 Punkte)

## A2 Bestimmung der Masse des Elektrons

Abbildung 2 zeigt die Bahnkurve, auf der sich die Elektronen bei alleiniger Ablenkung durch das magnetische Feld der Helmholtzspulen bewegen – die Spannung  $U_{Ab}$  zwischen den beiden Ablenkondensatorplatten beträgt also  $U_{Ab} = 0 \text{ V}$ .



$$\begin{aligned} U_B &= 3600 \text{ V} \\ U_{Ab} &= 0 \text{ V} \\ I_{\text{Spule}} &= 0,22 \text{ A} \\ d &= 5,4 \text{ cm} \end{aligned}$$

Für die Stärke  $B$  des Magnetfeldes der Helmholtzspulen gilt:

$$B = 4,25 \cdot 10^{-3} \frac{\text{T}}{\text{A}} \cdot I_{\text{Spule}}$$

Abbildung 2: Ablenkung durch das Magnetfeld der Helmholtzspulen

- a) Begründen Sie, warum sich der Betrag der Geschwindigkeit der Elektronen beim Durchlauf durch das Magnetfeld nicht ändert, und begründen Sie, warum sie sich auf einer kreisbogenförmigen Bahnkurve bewegen.

**Begründung der Konstanz der Bahngeschwindigkeit:** Die Elektronen erfahren im Magnetfeld die Lorentzkraft, die stets senkrecht zu ihrem Geschwindigkeitsvektor steht. Eine senkrecht zur Bewegungsrichtung orientierte Kraft führt nicht zu einer Energiezunahme, also bleibt die kinetische Energie der Elektronen und damit ihre Geschwindigkeit konstant.

**Begründung der Bahnkurve:** Da die Geschwindigkeit der Elektronen betragsmäßig konstant bleibt und die Lorentzkraft senkrecht zur Bewegungsrichtung orientiert ist, wirkt diese als Zentralkraft zu einem festen Zentrum hin. Nur bei einer Kreisbahn ist in allen Punkten eine bei konstant bleibender Geschwindigkeit senkrecht zur Bewegungsrichtung orientierte Kraft vorhanden.

AFB: II

Bearbeitungszeit: ca. 15 min

Punkte: 8

- b) Leiten Sie den Term  $\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U_B}{r^2 \cdot B^2}$  für die spezifische Ladung  $\frac{e}{m}$  des Elektrons her.

$r$  bezeichnet dabei den Krümmungsradius der Bahnkurve,  $B$  die magnetische Feldstärke und  $U_B$  die Beschleunigungsspannung.

**Herleitung der Gleichung:**

i) Am Ende der Beschleunigungsstrecke gilt:  $E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2 = e \cdot U_B = E_{el}$  (\*).

ii) Auf der Kreisbahn gilt:  $F_z = \frac{m \cdot v_0^2}{r} = e \cdot v_0 \cdot B = F_L$  (\*\*), da die Lorentzkraft die Zentralkraft realisiert.

Stellt man Gleichung (\*\*) nach  $v_0$  um und setzt den Term in (\*) ein, ergibt sich:

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot \left( \frac{r \cdot e \cdot B}{m} \right)^2 = e \cdot U_B \text{ und daraus durch Umstellung } \frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U_B}{r^2 \cdot B^2}.$$

AFB: I/II

Bearbeitungszeit: ca. 15 min

Punkte: 8



- c) Zu der kreisförmigen Bahnkurve in Abbildung 2 gehört ein Radius von  $r = 20 \text{ cm}$ . Berechnen Sie mit Hilfe dieses Wertes und der in Abbildung 2 gegebenen Betriebsdaten der Elektronenablenkröhre die spezifische Ladung und (mit der bekannten Elementarladung) die Masse  $m$  des Elektrons.

Berechnung von  $\frac{e}{m}$  mit den gegebenen Zahlenwerten:

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot 3600 \text{ V}}{(0,20 \text{ m})^2 \cdot (4,25 \cdot 10^{-3} \frac{\text{T}}{\text{A}} \cdot 0,22 \text{ A})^2} = \frac{7,2 \cdot 10^3 \text{ V}}{0,040 \text{ m}^2 \cdot 0,874 \cdot 10^{-6} \text{ T}^2} = 2,1 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$$

Berechnung der Elektronenmasse mit bekannter Elementarladung  $e$  und dem soeben bestimmten Wert  $e/m$  der spezifischen Ladung:

$$\text{Damit ergibt sich für die Masse } m = \frac{e}{e/m} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}}{2,1 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}} = 7,6 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

AFB: I/II

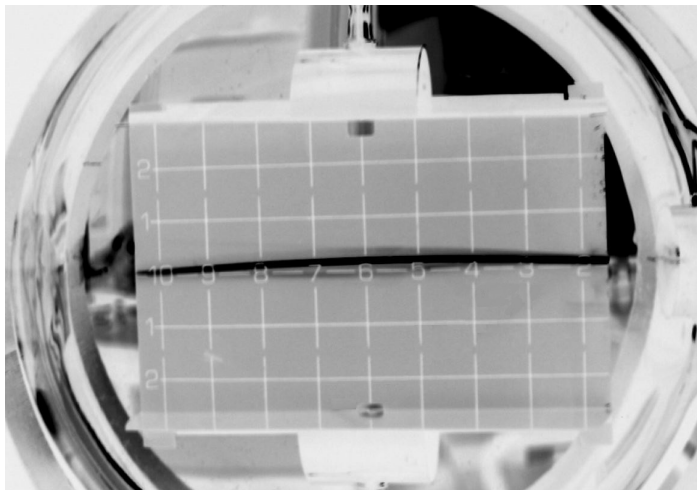
Bearbeitungszeit: ca. 15 min

Punkte: 6

(8+8+6=22 Punkte)

### A3 Kompensation der elektrischen und magnetischen Ablenkkräfte

Durchläuft der Elektronenstrahl sowohl das elektrische als auch das magnetische Feld, so wird er bei geeigneter Wahl der Feldstärken  $B$  und  $E$  (fast) nicht aus seiner ursprünglichen geradlinigen Bewegungsrichtung abgelenkt (siehe Abbildung 3).



$U_B$	= 3600 V
$U_{Ab}$	nicht bekannt
$I_{Spule}$	= 0,22 A
$d$	= 5,4 cm

Für die Stärke  $B$  des Magnetfeldes der Helmholtzspulen gilt:

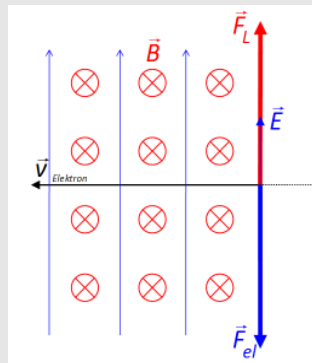
$$B = 4,25 \cdot 10^{-3} \frac{\text{T}}{\text{A}} \cdot I_{Spule}$$

Abbildung 3: „Nicht-Ablenkung“ durch geeignet gewählte Feldstärken für das elektrische sowie das magnetische Feld

Hinweis: Bei der Bearbeitung dieser Aufgabe darf angenommen werden, dass sich das elektrische und das magnetische Feld auf den gleichen Raumbereich erstrecken und dass stets gilt:  $\vec{E} \perp \vec{B}$ . Von Inhomogenitäten in den Randbereichen der Felder ist abzusehen.

- a) Skizzieren Sie für den in Abbildung 3 erkennbaren geradlinigen Weg der Elektronen von rechts nach links die erforderliche Orientierung von  $\vec{B}$ - und  $\vec{E}$ -Feld zueinander sowie die auf die Elektronen in den beiden Feldern wirkenden Kräfte und erläutern Sie Ihre Überlegungen dazu.

Orientierung der Felder:



Voraussetzung: Die Elektronen bewegen sich geradlinig von rechts nach links. Da die Elektronen unter alleinigem Einfluss des B-Feldes anfangs nach oben abgelenkt werden, ist die Lorentzkraft  $\vec{F}_L$  nach oben gerichtet. Die elektrische Kraft  $\vec{F}_{el}$  muss daher nach unten gerichtet und betragsmäßig gleich groß sein. Für die Felder bedeutet das: Das  $\vec{B}$ -Feld ist in die Zeichenebene hinein gerichtet („3-Finger-Regel“), das  $\vec{E}$ -Feld von unten nach oben („von Plus nach Minus“).

AFB: III

Bearbeitungszeit: ca. 10 min

Punkte: 8

- b) Für den Fall des geradlinigen Verlaufs der Bahnkurve bei geeigneter Größe des elektrischen

und des magnetischen Feldes kann man die Gleichung herleiten:  $\frac{e}{m} = \frac{1}{2 \cdot U_B} \cdot \left( \frac{U_{AB}}{d \cdot B} \right)^2$ .

Berechnen Sie mit Hilfe der gegebenen Gleichung und mit dem Literaturwert für die spezifische Ladung  $\frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$  die zwischen den Kondensatorplatten erforderliche Ablenkspannung.

$$\text{Aus } \frac{e}{m} = \frac{1}{2 \cdot U_B} \cdot \left( \frac{U_{AB}}{d \cdot B} \right)^2 \text{ folgt durch Umstellung } U_{AB} = d \cdot B \cdot \sqrt{2 \cdot U_B \cdot \frac{e}{m}}.$$

Der Literaturwert der spezifischen Ladung ist  $\frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$ . Mit den weiteren gegebenen Zahlenwerten folgt:

$$U_{AB} = 0,054 \text{ m} \cdot (4,25 \cdot 10^{-3} \frac{\text{T}}{\text{A}} \cdot 0,22 \text{ A}) \cdot \sqrt{2 \cdot 3600 \text{ V} \cdot 1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}} = 1,8 \cdot 10^3 \text{ V} = 1800 \text{ V}.$$

AFB: I

Bearbeitungszeit: ca. 15 min

Punkte: 7

(8+7=15 Punkte)

## Teil B: Der Wellenaspekt beim Elektron

### B1 Ein Elektronenbeugungsexperiment und die Wellenlänge des Elektrons

In der Elektronenbeugungsröhre werden Elektronen, die aus einer Kathode austreten, durch die Hochspannung zwischen Anode und Kathode beschleunigt und treffen danach auf eine sehr dünne Graphitfolie, in der die einzelnen Kristalle völlig ungeordnet liegen. Sie durchdringen diese Folie und treffen auf einen Leuchtschirm.

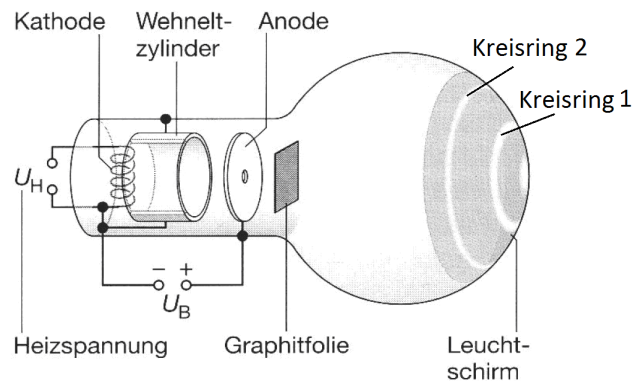


Abbildung 4: Elektronenbeugungsröhre  
(Quelle: Impulse Physik 2, Klett-Verlag Stuttgart 1997, S. 190)

Bei der Versuchsdurchführung sind nach Anlegen der Beschleunigungsspannung  $U_B$  von einigen wenigen kV auf dem Leuchtschirm konzentrische Kreise zu erkennen (s. Abbildung 4 mit den beiden dort gekennzeichneten Kreisringen um den zentralen hellen Fleck beim geradlinigen Verlauf).

- a) Erklären Sie, warum auf dem Leuchtschirm abwechselnd Stellen hoher bzw. niedriger Intensität zu beobachten sind.

Die in der Elektronenkanone beschleunigten Elektronen haben alle (ungefähr) dieselbe Geschwindigkeit und damit gemäß der de Broglie'schen Beziehung  $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$  auch dieselbe

ihnen zugeordnete Wellenlänge  $\lambda$ . Die Auftreffpunkte der Elektronen in der Graphitschicht können gemäß dem Modell der Huygens'schen Theorie als Zentren von Elementarwellen angesehen werden, die sich im weiteren Verlauf überlagern und zu Interferenzerscheinungen führen. An den Stellen mit ganzzahligem Gangunterschied der Elementarwellen entstehen Maxima, dazwischen Minima. Der helle Fleck im direkten geradlinigen Durchgang entsteht durch Elektronen mit Gangunterschied  $0 = 0 \cdot \lambda$ .

1. Erklärungsmöglichkeit für die beiden Ringe: Der erste (innerste) echte Kreisring entsteht durch den Gangunterschied  $1 \cdot \lambda$ , der weiter außen liegende durch den Gangunterschied  $2 \cdot \lambda$ .

2. Erklärungsmöglichkeit für die beiden Ringe: Der erste (innerste) echte Kreisring entsteht durch den Gangunterschied  $1 \cdot \lambda$  durch Beugung an einer bestimmten Gitternetzebene, der weiter außen liegende ebenfalls durch den Gangunterschied  $1 \cdot \lambda$  durch Beugung an einer Gitternetzebene mit einem anderen Netzebenenabstand.

Hinweis: Beide Antwortmöglichkeiten sind als richtig zu werten, da die Prüflinge aufgrund fehlender quantitativer Auswertung nicht erkennen können; welche der beiden Alternativen die richtige ist.

AFB: I/II

Bearbeitungszeit: ca. 10 min

Punkte: 8

- b) Erklären Sie ggf. unter Verwendungen geeigneter Skizzen, warum diese Stellen kreisförmig angeordnet sind.

Die Graphitschicht besteht aus polykristallinem Material: Hier liegen also für die Bragg'sche Reflexion praktisch für alle Raumrichtungen kleine Kristalle vor, an denen Bragg-Reflexion entsteht. Aus geometrischen Gründen folgt daher, dass unter einem bestimmten Winkel die Elektronen einen Gangunterschied von  $1 \cdot \lambda$  haben, wobei die einzelnen Kristalle, die unter diesem gleichen Winkel rotationssymmetrisch um die Achse angeordnet sind, konstruktiv interferierende Elektronen ergeben, die unter dem gleichen Winkel gegen die Achse zu beobachten sind.

Gleiches gilt für die weiteren Gangunterschiede bzw. weitere Netzebenenabstände, bei denen konstruktive Interferenz auftritt.

AFB: II/III

Bearbeitungszeit: ca. 5 min

Punkte: 6

- c) Bei einer gegebenen Beschleunigungsspannung von ca.  $U_b = 1800 \text{ V}$  erreichen die Elektronen die Graphitfolie gemäß der Gleichung in Aufgabe 1.1b mit einer Geschwindigkeit von  $v = 2,5 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

Ermitteln Sie die Wellenlänge, die man Elektronen dieser Geschwindigkeit zuordnet.

Nach de Broglie ist  $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$ . Mit den bekannten Zahlenwerten ergibt sich:

$$\lambda = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 2,5 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,29 \cdot 10^{-10} \text{ m}.$$

AFB: I

Bearbeitungszeit: ca. 5 min

Punkte: 4

- d) Die Beschleunigungsspannung wird von  $U_b = 0 \text{ kV}$  auf  $U_b = 5 \text{ kV}$  langsam hochgeregelt.

Erklären Sie, wie sich durch diese Spannungserhöhung die Wellenlänge der Elektronen und dabei das Bild auf dem Leuchtschirm verändern.

Anfangs ( $U_b \approx 0 \text{ kV}$ ) kann man nichts beobachten. Mit zunehmend größerer Spannung erscheinen Beugungsringe, die immer heller werden.

Die den Elektronen zuzuordnenden Wellenlängen werden bei zunehmender Spannung gemäß

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} \text{ immer kleiner, sodass auch die Radien der Beugungsringe immer kleiner werden.}$$

Die Ringe „ziehen sich also von außen nach innen zusammen“.

AFB: II

Bearbeitungszeit: ca. 10 min

Punkte: 6

(8+6+4+6=24 Punkte)

**B2 Ein Elektronenbeugungsexperiment – weitere Aspekte**

- a) Das Elektronenbeugungsrohr darf nach der Strahlenschutzverordnung nur bis zu einer Beschleunigungsspannung von  $U_B = 5 \text{ kV}$  betrieben werden, da ansonsten beim Auftreffen der Elektronen auf die Graphitschicht Röntgenphotonen zu großer Energie entstehen.

*Erläutern Sie, welche Vorgänge beim Auftreffen von Elektronen auf Materie dazu führen, dass Röntgenphotonen entstehen.*

Röntgenstrahlen entstehen durch Auftreffen von Elektronen auf das Anodenmaterial in einer Röntgenröhre. Dabei können die ankommenden Elektronen Hüllelektronen der Anodenatome heraus schlagen, sodass beim Wiederauffüllen der frei gewordenen Energiezustände Photonen abgegeben werden, deren Energie aufgrund der Energieniveaus in den Hüllen der Anodenatome im Röntgenbereich ( $\approx 10^4 \text{ keV}$ ) liegt.

[Hinweis: Kenntnisse über die Entstehen des Bremsspektrums werden lt. KLP nicht erwartet.]

AFB: II

Bearbeitungszeit: ca. 10 min

Punkte: 6

- b) Jemand behauptet, die beim Auftreffen der Elektronen auf die Graphitschicht entstandenen Röntgenstrahlen seien, da es sich um elektromagnetische Strahlung handelt, die Ursache des Beugungsbilds auf dem Leuchtschirm.

*Erläutern Sie, wie durch ergänzende Experimente nachgewiesen werden kann, dass das Beugungsbild nicht durch die Röntgenstrahlung, sondern durch Elektronen hervorgerufen wird.*

Zur Verfügung stehen Ihnen (neben den üblichen Anschlussmaterialien) dafür Kondensatoren, Permanentmagnete, eine Spannungs- bzw. eine Stromquelle und Spulen.

In der Tat können beim Auftreffen der Elektronen auf die Graphitschicht Röntgenstrahlen entstehen. Aber: Nähert man einen Permanentmagneten (vorsichtig) der Elektronenablenkröhre an, dann beobachtet man eine deutliche Veränderung des Beugungsbildes: Das Beugungsbild wird folglich durch das Magnetfeld beeinflusst. Da sich Röntgenstrahlen als elektromagnetische Strahlen nicht in dieser Weise von Magnetfeldern beeinflussen lassen, wird hierdurch ausgeschlossen, dass die Röntgenstrahlen die Ursache des Beugungsbildes sind.

AFB: III

Bearbeitungszeit: ca. 10 min

Punkte: 7

(6+7=13 Punkte)

**Teil C: Wellen- und Teilchenaspekt beim Quantenobjekt Elektron:  
Das einzelne Elektron als Quantenobjekt**

Die gleichzeitig beobachtbaren Wellen- und Teilchenaspekte bei Quantenobjekten werden in einem Experiment sehr deutlich, bei dem Elektronen einzeln einen Doppelspalt passieren.

*Beschreiben Sie das Experiment des vielfach wiederholten Durchgangs eines einzelnen Elektrons durch einen Doppelspalt, seine Durchführung und sein Ergebnis, bei dem sowohl der Teilchen- wie auch der Wellenaspekt des Elektrons gleichermaßen deutlich hervortritt.*

Geht wiederholt ein einzelnes Elektron durch einen Doppelspalt, dann lokalisiert man es auf dem Beobachtungsschirm (bestehend aus einer „Wand aus Detektoren“) an einer ganz be-

stimmten Stelle bzw. innerhalb eines kleinen Flächenelementes auf der Detektorwand. Die Anordnung der beobachteten Elektronen zeigt zunächst ein sehr ungeordnet erscheinendes Muster. Je mehr Elektronen beobachtet werden, desto mehr zeigt sich ein typisches Interferenzmuster. Die Wahrscheinlichkeit, an einer bestimmten Stelle auf der Detektorwand zu erscheinen, wird durch die den Elektronen zugeordneten Wellenlänge bestimmt.

AFB: II

Bearbeitungszeit: ca. 10 min

Punkte: 9

(9 Punkte)

(Gesamtsumme 100 Punkte)

### ***Zugelassene Hilfsmittel***

- Physikalische Formelsammlung
- Wissenschaftlicher Taschenrechner (ohne oder mit Grafikfähigkeit)
- Wörterbuch zur deutschen Rechtschreibung
- Muttersprachliches Wörterbuch für Studierende, deren Muttersprache nicht Deutsch ist

Bearbeitungszeit: 3 Zeitstunden

# Schriftliche Abiturprüfung nach neuem KLP Beispiel für eine abiturnahe Klausur

## Physik, Grundkurs

### Weitere Unterlagen für die Lehrkraft

---

#### 1. Aufgabenart

Bearbeitung einer Aufgabe, die fachspezifisches Material enthält.

#### 2. Aufgabenstellung

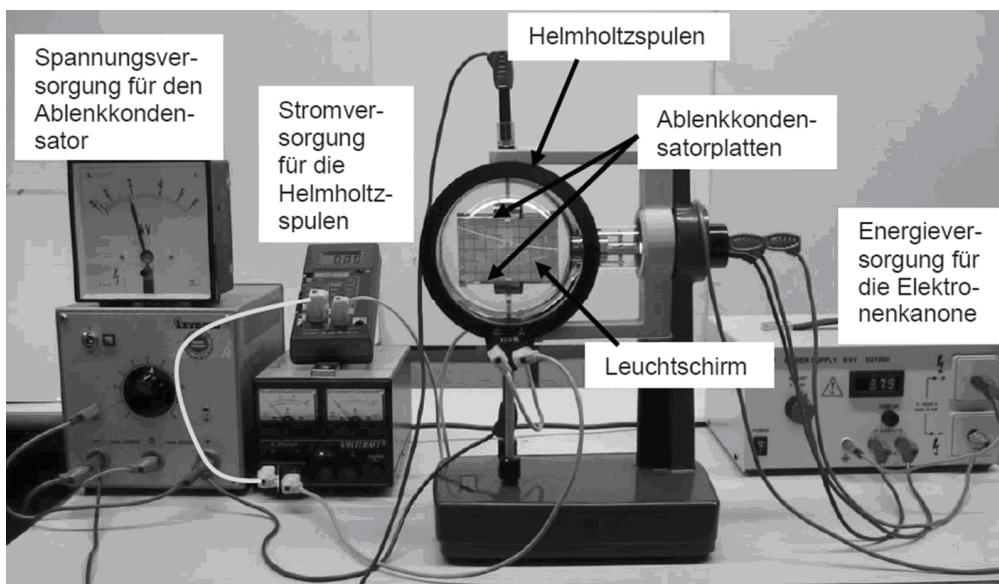
Aufgabe: Teilchen- und Welleneigenschaft des Elektrons

(100 Punkte)

#### 3. Versuchsmaterial

##### **Hinweise zum Experiment:**

Das Experiment gemäß Abbildung 1 im Aufgabentext sollte, wenn eben möglich, aufgebaut und qualitativ vorgeführt werden:



Versuchsaufbau zur Elektronenablenkröhre

Es ist die Wirkung des Magnetfelds (über die Helmholtzspulen) sowie des anschließend dazu geschalteten elektrischen Felds in der Art zu demonstrieren, dass zunächst das Magnetfeld allein

eingeschaltet wird und danach das elektrische Feld, von null beginnend, so stark hoch geregelt wird, dass die vorherige Ablenkung der Elektronen nach oben (also anders gerichtet als im Foto oben) zu ihrem dann geradlinigen Verlauf erkennbar wird.

Die dafür nötigen Richtungen des B- und E-Felds sind in der Vorbereitung bzw. Bereitstellung des Experiments, also ohne die Anwesenheit der Prüflinge, einzustellen und experimentell zu überprüfen, damit in der Demonstration allein der durch das B-Feld hervorgerufene Kreisbogen nach oben und anschließend die Kompensation durch das E-Feld gezeigt werden.

Es dürfen keine – inhaltlichen – Kommentare von der Lehrkraft gegeben werden. Lediglich beim Einschalten des Spulenstroms darf auf das dadurch hervorgerufene Magnetfeld hingewiesen werden und beim Anlegen der Spannung an die Kondensatorplatten auf den Aufbau des elektrischen Feldes.

#### **4. Bezüge zum KLP SII und den Vorgaben 2017**

##### *1. Inhaltliche Schwerpunkte*

Elektron und Photon (Teilchenaspekt/Wellenaspekt)

- Bewegung von Ladungsträgern in homogenen E- und B-Feldern
- Lorentzkraft
- Energie bewegter Elektronen
- Elementarladung und Elektronenmasse
- Streuung von Elektronen an Festkörpern
- De-Broglie-Wellenlänge

##### *2. Medien/Materialien*

-/-

#### **5. Zugelassene Hilfsmittel**

- Physikalische Formelsammlung
- Taschenrechner (GTR / CAS)
- Deutsches Wörterbuch
- Muttersprachliches Wörterbuch für Studierende, deren Muttersprache nicht Deutsch ist

#### **6. Modelllösung:**

Die Modelllösungen finden sich (der besseren Lesbarkeit wegen) unmittelbar im Anschluss an die jeweiligen Aufgabenstellungen in den grau hinterlegten Abschnitten.



## 7. Grundsätze für die Bewertung (Notenfindung)

Für die Zuordnung der Notenstufen zu den Punktzahlen ist folgende Tabelle zu verwenden.

### Notenzuordnung:

Note	ab %	ab Pkt
1+ 15	95,00	95,00
1 14	90,00	90,00
1- 13	85,00	85,00
2+ 12	80,00	80,00
2 11	75,00	75,00
2- 10	70,00	70,00
3+ 9	65,00	65,00
3 8	60,00	60,00
3- 7	55,00	55,00
4+ 6	50,00	50,00
4 5	45,00	45,00
4- 4	40,00	40,00
5+ 3	33,33	33,33
5 2	26,67	26,67
5- 1	20,00	20,00
6 0	0,00	0,00