

2025  
2026

# Abitur

Original-Prüfungsaufgaben  
mit Lösungen

**MEHR  
ERFAHREN**

Gymnasium · Gesamtschule

## Physik

- + Aktuelle Original-Prüfungsaufgaben  
im Leistungskurs zum Download
- + Übungsaufgaben zu den Schwer-  
punktthemen 2025 und 2026



**STARK**

# Inhalt

Vorwort  
Stichwortverzeichnis

## **Hinweise und Tipps zum Zentralabitur**

---

Allgemeine Hinweise zum schriftlichen Abitur im Fach Physik . . . . .	I
1 Die inhaltlichen Vorgaben für die schriftliche Prüfung . . . . .	I
2 Organisatorisches . . . . .	VII
3 Zum Aufbau der Prüfungsaufgaben . . . . .	VII
4 Durchführung der schriftlichen Abiturprüfung . . . . .	X
5 Bewertung der Prüfungsarbeiten . . . . .	X
Methodische Hinweise zum Bearbeiten von Klausur- u. Prüfungsaufgaben . .	XI
1 Fehler vermeiden! . . . . .	XI
2 Operatoren beachten! . . . . .	XII
Zum Umgang mit diesem Buch . . . . .	XIV

## **Übungsaufgaben zu den Schwerpunktthemen 2025 und 2026 – Leistungskurs**

---

1 Plattenkondensator – Kondensatoren als Energiespeicher . . . . .	1
2 Ladungen in elektrischen und magnetischen Feldern . . . . .	11
3 Der Linearbeschleuniger (Linac) in der medizinischen Therapie . . . . .	22
4 Experimente am Doppelspalt – Eigenschaften von Quantenobjekten . . . .	36
5 Von Teilchen und Wellen zu Quantenobjekten . . . . .	45
6 Teilchen- und Welleneigenschaften von Licht . . . . .	59
7 Anregung von Vanadium und Silber durch Neutronen . . . . .	72
8 Der Positronen-Emissions-Tomograph „PET“ . . . . .	89
9 Radonexposition . . . . .	101
10 Elektromagnetische Schwingungen und Resonanz . . . . .	118
11 Der Doppelspalt . . . . .	133

## Zentrale Abiturprüfungsaufgaben – Leistungskurs

---

### Abiturprüfungsaufgaben 2022

- 1 Experimentelle und theoretische Untersuchung von induktiven Vorgängen ..... LK 2022-1
  - 3 Nachweis und Eigenschaften extrem seltener Elemente . . . . . LK 2022-21
- Bitte beachten Sie: Aus urheberrechtlichen Gründen ist die Aufgabe 2 „Welleneigenschaften von Farbstoffmolekülen“ nicht in diesem Buch enthalten.

### Abiturprüfungsaufgaben 2023

- 1 Bestimmung des Planck’schen Wirkungsquantums auf zwei verschiedene Arten . . . . . LK 2023-1
- 2 Das Rasterelektronenmikroskop . . . . . LK 2023-17
- 3 Neutrinomassenbestimmung . . . . . LK 2023-34

**Abiturprüfungsaufgaben 2024 (online)** . . . . . [www.stark-verlag.de/mystark](http://www.stark-verlag.de/mystark)  
Sobald die Original-Prüfungsaufgaben 2024 freigegeben sind, können sie als PDF auf der Plattform MySTARK heruntergeladen werden (Zugangscode: siehe vordere Umschlaginnenseite in diesem Buch).

**MySTARK: Aufgaben zum Download** 

---

**Zentrale Abiturprüfungsaufgaben Jahrgang 2024 im Leistungskurs**

**Zentrale Abiturprüfungsaufgaben Jahrgänge 2008 bis 2023 im Grundkurs**

**Übersicht:** Prüfungsaufgaben und Sachgebiete, Grundkurs 2013 bis 2023

### **Autoren der Tipps und Lösungen**

---

Bis Jahrgang 2019: STARK Verlag; seit Jahrgang 2020: Udo Mühlenfeld

# Vorwort

**Liebe Schülerin, lieber Schüler,**

Sie haben Physik in Nordrhein-Westfalen als Grund- oder Leistungskurs belegt und planen, in diesem Fach ihr Abitur abzulegen. Für die schriftliche Abiturprüfung in Nordrhein-Westfalen bearbeiten seit 2007 die Schülerinnen und Schüler aller Gymnasien und Gesamtschulen – und seit 2008 auch die der Weiterbildungskollegs – dieselben **zentral gestellten Aufgaben**.

Mit diesem Buch möchten wir Ihnen helfen, sich effektiv auf dieses Zentralabitur vorzubereiten:

- Der Band enthält die **Original-Prüfungsaufgaben** der Jahrgänge 2022 und 2023 für den **Leistungskurs**.
- Er enthält zudem einen umfangreichen **Übungsteil** mit LK-Prüfungsaufgaben älterer Jahrgänge, die speziell auf die **Schwerpunktthemen 2025 und 2026** hin ausgewählt sind.
- Auf sämtliche Aufgaben folgen **vollständige, kommentierte Lösungsvorschläge** sowie separate **Tipps zum Lösungsansatz**, die Ihnen das selbstständige Lösen der Aufgaben erleichtern.
- Sie erhalten im ersten Teil des Buches zahlreiche **Informationen zum Abitur** sowie viele praktische Hinweise, die Ihnen sowohl in der Vorbereitung auf das Abitur als auch während der Prüfung dazu verhelfen, Prüfungsaufgaben gut zu lösen.

Zudem finden Sie **digitale Inhalte** zu diesem Buch **online auf MySTARK**:

- **Interaktives Training** mit Aufgaben und Lernvideos zu allen relevanten Themengebieten des Physikabiturs.
- **Original-Prüfungsaufgaben 2024** im Leistungskurs zum Download.
- Die für die Abiturprüfungen 2025 und 2026 relevanten **Original-Prüfungsaufgaben** früherer Jahrgänge für den **Grundkurs** zum Download.



Den Zugangscode finden Sie auf der vorderen Umschlaginnenseite in diesem Buch.

Sollten nach Erscheinen dieses Bandes noch wichtige Änderungen in der Abiturprüfung 2025 oder 2026 vom Ministerium für Schule und Weiterbildung bekannt gegeben werden, finden Sie aktuelle Informationen dazu im Internet auf MySTARK.

Wir wünschen Ihnen viel Erfolg bei der Abiturprüfung!

*Udo Kleinfeld*



# Hinweise und Tipps zum Zentralabitur

## Allgemeine Hinweise zum schriftlichen Abitur im Fach Physik

---

### 1 Die inhaltlichen Vorgaben für die schriftliche Prüfung

Der derzeit gültige Kernlehrplan Physik, wie der für alle anderen Fächer, stammt aus dem Jahre 2022 und setzt die allgemeinen verbindlichen Bedingungen für das Abitur ab dem Jahr 2025. Darüber hinaus spezifizieren sogenannte *Vorgaben Abitur 20xx – Physik* nicht nur die inhaltlichen Schwerpunkte aus den Inhaltsfeldern des Kernlehrplans, sondern konkretisieren vor allem in den von Jahr zu Jahr veränderten *Fokussierungen* diejenigen inhaltlichen Aspekte, die schwerpunktmäßig in den jeweiligen Abituraufgaben des betreffenden Jahrgangs behandelt werden. Diese inhaltlichen Fokussierungen sind für den Grundkurs und Leistungskurs in der Regel unterschiedlich und unbedingt zu beachten; sie können auf den Internetseiten des Schulministeriums von jedermann eingesehen werden.

Die Internet-Adresse für den Kernlehrplan Physik lautet:

[www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/lehrplannavigator-s-ii/gymnasiale-oberstufe-neue-klp/](http://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/lehrplannavigator-s-ii/gymnasiale-oberstufe-neue-klp/)

Die Adresse für die Vorgaben lautet:

[www.standardsicherung.schulministerium.nrw.de/cms/zentralabitur-gost/faecher/fach.php?fach=22](http://www.standardsicherung.schulministerium.nrw.de/cms/zentralabitur-gost/faecher/fach.php?fach=22)

Es wird in den Darstellungen des Schulministeriums explizit darauf hingewiesen, dass selbstverständlich alle im Lehrplan festgelegten Kompetenzen während des Unterrichts in der Oberstufe erworben sein müssen und in den Aufgaben der schriftlichen Abiturprüfung abgeprüft werden können – eine alleinige Beschränkung in der Abiturvorbereitung auf die oben genannten Fokussierungen darf daher nicht stattfinden.

Die Tabellen auf den folgenden zwei Seiten zeigen für Leistungs- und Grundkurs die im Kapitel 2 des Kernlehrplans festgelegten **fachspezifischen inhaltlichen Schwerpunkte** sowie die **Fokussierungen für das Physikabitur** in den Jahren **2025 und 2026**. In der sich anschließenden tabellarischen **Inhaltsübersicht** zu den Abiturprüfungen der in diesem Buch abgedruckten Jahrgänge im Leistungskurs sind die Inhaltsfelder mit Fokussierungen 2025/26 dunkelgrau hervorgehoben.

*Leistungskurs: Inhaltliche Schwerpunkte und Fokussierungen 2025/26 (fett-kursiv)*

<b>Ladungen, Felder und Induktion</b>	<b>Schwingende Systeme und Wellen</b>	<b>Quantenphysik</b>	<b>Atom- und Kernphysik</b>
<p><i>Elektrische Ladungen und Felder:</i> Ladungen, elektr. Felder, elektr. Feldstärke; Coulomb-Gesetz, elektr. Potenzial, elektr. Spannung, Kondensator und Kapazität; magn. Felder, magn. Flussdichte</p> <p><b><i>Experimentelle u. theoretische Untersuchung der Ursachen und Wirkungen elektr. und magn. Felder</i></b></p>	<p><i>Schwingungen und Wellen:</i> harmonische Schwingungen und ihre Kenngrößen; Huygens-Prinzip, Reflexion, Brechung, Beugung; Polarisation und Superposition von Wellen; Michelson-Interferometer</p> <p><b><i>Beschreibung, Eigenschaften und Anwendungsbeispiele von harmonischen Schwingungen und Wellen</i></b></p>	<p><i>Teilchenaspekte von Photonen:</i> Energiequantelung von Licht, Photoeffekt, Bremsstrahlung</p> <p><b><i>Erkenntnisse zu Eigenschaften von Quantenobjekten</i></b></p>	<p><i>Atomaufbau:</i> Atommodelle, eindimensionaler Potenzialtopf, Energieniveauschema; Röntgenstrahlung</p> <p><b><i>Untersuchungen zur Struktur, Stabilität und zum Zerfall von Materie</i></b></p>
<p><i>Bewegungen in Feldern:</i> geladene Teilchen in elektr. Längs- und Querfeldern; Lorentzkraft; geladene Teilchen in gekreuzten elektr. und magn. Feldern</p> <p><b><i>Experimentelle u. theoretische Untersuchung der Ursachen und Wirkungen elektr. und magn. Felder</i></b></p>	<p><i>Schwingende Systeme:</i> Federpendel, Fadenpendel, Resonanz; Schwingkreis, Hertz'scher Dipol</p> <p><b><i>Beschreibung, Eigenschaften und Anwendungsbeispiele von harmonischen Schwingungen und Wellen</i></b></p>	<p><i>Photonen und Elektronen als Quantenobjekte:</i> Doppelspaltexperiment, Bragg-Reflexion, Elektronenbeugung; Wahrscheinlichkeitsinterpretation, Delayed-Choice-Experiment; Kopenhagener Deutung</p> <p><b><i>Erkenntnisse zu Eigenschaften von Quantenobjekten</i></b></p>	<p><i>Ionisierende Strahlung:</i> Strahlungsarten, Nachweismöglichkeiten ionisierender Strahlung, Eigenschaften ionisierender Strahlung, Absorption ionisierender Strahlung</p> <p><b><i>Untersuchungen zur Struktur, Stabilität und zum Zerfall von Materie</i></b></p>
<p><i>Elektromagnetische Induktion:</i> magn. Fluss, Induktionsgesetz, Regel von Lenz; Selbstinduktion, Induktivität</p> <p><b><i>Experimentelle u. theoretische Untersuchung der Ursachen und Wirkungen elektr. und magn. Felder</i></b></p>			<p><i>Radioaktiver Zerfall:</i> Kernaufbau, Zerfallsreihen, Zerfallsgesetz, Halbwertszeit; Altersbestimmung</p> <p><b><i>Untersuchungen zur Struktur, Stabilität und zum Zerfall von Materie</i></b></p>
			<p><i>Kernspaltung und -fusion:</i> Bindungsenergien, Massendefekt; Kettenreaktion</p> <p><b><i>Untersuchungen zur Struktur, Stabilität und zum Zerfall von Materie</i></b></p>

Grundkurs: Inhaltliche Schwerpunkte und Fokussierungen 2025/26 (fett-kursiv)

<b>Klassische Wellen und geladene Teilchen in Feldern</b>	<b>Quantenobjekte</b>	<b>Elektrodynamik und Energieübertragung</b>	<b>Strahlung und Materie</b>
<p><i>Klassische Wellen:</i> Federpendel, mechanische harmonische Schwingungen und Wellen; Huygens'sches Prinzip, Reflexion, Brechung, Beugung; Superposition und Polarisierung von Wellen</p> <p><b>Untersuchungen zu Schwingungen, Wellen u. Teilchen in Feldern</b></p>	<p><i>Teilchenaspekte von Photonen:</i> Energiequantelung von Licht, Photoeffekt</p> <p><b>Grundlegende Erkenntnisse zu Teilchen- und Welleneigenschaften</b></p>	<p><i>Elektrodynamik:</i> magn. Fluss, el.-magn. Induktion, Induktionsgesetz; Wechselspannung; Auf- u. Entladevorgang am Kondensator</p> <p><b>Spannungserzeugung, Bereitstellung und Transport von elektrischer Energie</b></p>	<p><i>Strahlung:</i> Spektrum der elektromagnetischen Strahlung; ionisierende Strahlung, Geiger-Müller-Zählrohr, biologische Wirkungen</p> <p><b>Untersuchung d. Entstehung und Eigenschaften v. Strahlung</b></p>
<p><i>Teilchen in Feldern:</i> elektr. u. magn. Felder; elektr. Feldstärke, elektr. Spannung; magn. Flussdichte; Bahnformen von geladenen Teilchen in homogenen Feldern</p> <p><b>Untersuchungen zu Schwingungen, Wellen u. Teilchen in Feldern</b></p>	<p><i>Wellenaspekt von Elektronen:</i> De-Broglie-Wellenlänge, Interferenz von Elektronen am Doppelspalt</p> <p><b>Grundlegende Erkenntnisse zu Teilchen- und Welleneigenschaften</b></p>	<p><i>Energieübertragung:</i> Generator, Transformator; elektromagnetische Schwingung</p> <p><b>Spannungserzeugung, Bereitstellung und Transport von elektr. Energie</b></p>	<p><i>Atomphysik:</i> Linienspektrum, Energieniveauschema, Kern-Hülle-Modell, Röntgenstrahlung</p> <p><b>Untersuchung d. Entstehung und Eigenschaften v. Strahlung</b></p>
	<p><i>Photon und Elektron als Quantenobjekte:</i> Wellen- und Teilchenmodell, Kopenhagener Deutung</p> <p><b>Grundlegende Erkenntnisse zu Teilchen- und Welleneigenschaften</b></p>		<p><i>Kernphysik:</i> Nukleonen; Zerfallsprozesse u. Kernumwandlungen, Kernspaltung und -fusion</p> <p><b>Untersuchung d. Entstehung und Eigenschaften v. Strahlung</b></p>



**Abiturprüfung Physik 2022 (Nordrhein-Westfalen) – Leistungskurs**  
**Aufgabe 3: Nachweis und Eigenschaften extrem seltener Elemente**

Insgesamt 10 chemische Elemente waren bereits in der Antike bekannt und bis zum Ende des 19. Jahrhunderts wurden 73 weitere chemische Elemente entdeckt. Zwar gelang in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts eine immer bessere Sortierung dieser Elemente aufgrund ihrer Atommasse und wiederkehrender ähnlicher chemischer Eigenschaften, aber es fehlte dem damals noch unvollständigen Periodensystem eine zuverlässige „Nummerierung“ dieser Elemente. Erst zu Beginn des 20. Jahrhunderts gelang es Physikerinnen und Physikern, durch die Entwicklung erklärungsstarker Atommodelle und neuer experimenteller Methoden, die Reihenfolge der Elemente im Periodensystem durch ihre „Ordnungszahl  $Z$ “ eindeutig festzulegen. Einen wesentlichen Beitrag dazu lieferte die zu dieser Zeit entwickelte Röntgenspektroskopie.

### 3.1 Physikalische Grundlagen der Röntgenspektroskopie

- a) Röntgenstrahlung wird in dafür optimierten Vakuumröhren erzeugt.
- Zeichnen Sie eine beschriftete Skizze zum Aufbau einer Röntgenröhre sowie ihrer elektrischen Beschaltung.
  - Erläutern Sie die Funktionsweise einer Röntgenröhre, ohne dabei auf die atomaren Prozesse der Erzeugung der Röntgenstrahlung einzugehen.
- b) Abbildung 1 zeigt ein typisches Röntgenspektrum. Es besitzt zwei spektrale Anteile: das kontinuierliche Spektrum der Bremsstrahlung sowie die Linien der charakteristischen Röntgenstrahlung.

6 P.

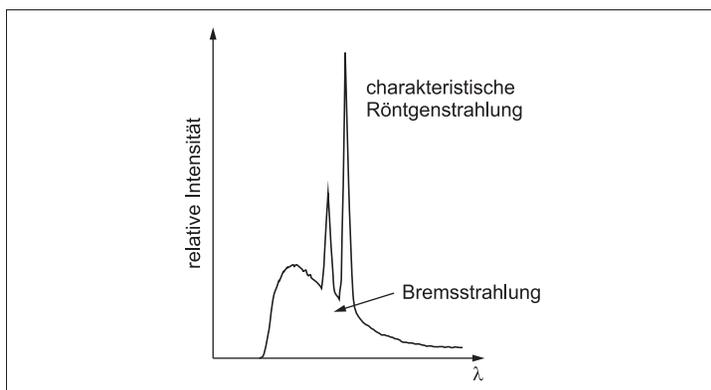


Abb. 1: Spektrum einer Röntgenröhre

Quelle: LD Handblätter Physik, Nr. P.6.3.3.1, LD Didactic GmbH

4 P.

Erklären Sie die Entstehung der Bremsstrahlung sowie der charakteristischen Röntgenstrahlung anhand der zugehörigen elementaren Prozesse sowie einer geeigneten Modellvorstellung vom atomaren Aufbau des Anodenmaterials.

- c) Eine einfache Möglichkeit der Aufnahme eines Röntgenspektrums ist die Drehkristallmethode. Abbildung 2 zeigt einen typischen Aufbau zur Durchführung dieser Messmethode.

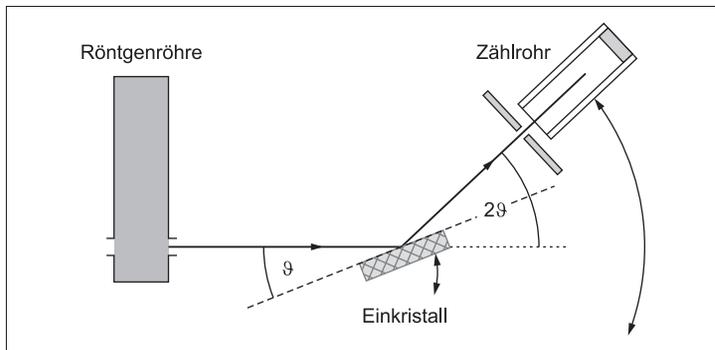


Abb. 2: Drehkristallmethode zur Aufnahme eines Röntgenspektrums  
 Quelle: LD Handblätter Physik, Nr. P.6.3.3.1, LD Didactic GmbH (verändert)

Bei der Messung des Röntgenspektrums mit dieser Methode trifft die gebündelte Strahlung unter einem Winkel  $\vartheta$  auf einen Einkristall, dessen Oberfläche parallel zu seinen Netzebenen verläuft. Unter dem Winkel  $2\vartheta$  zur Einfallsrichtung der Röntgenstrahlung misst ein Zählrohr die vom Einkristall gestreute Strahlung. Für die Wellenlänge  $\lambda$  der dort nachgewiesenen Röntgenstrahlung gilt die sogenannte Bragg-Bedingung:

$$n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin \vartheta \quad \text{mit } n = 1, 2, 3, \dots$$

Dabei bezeichnet  $d$  den Abstand benachbarter Netzebenen des Einkristalls.

- Leiten Sie die Bragg-Bedingung anhand einer geeigneten Skizze her.

Bei der Messung eines Röntgenspektrums mit einem typischen Schulröntengerät wird bei der Drehkristallmethode der Einkristall in gleichmäßigen Drehschritten  $\Delta\vartheta$ , beginnend bei kleinen Winkeln bis zu  $\vartheta = 45^\circ$ , bewegt. Das Zählrohr wird dabei entsprechend um den doppelten Drehwinkel mitgeführt. Nach jedem Drehschritt wird für eine immer gleiche Zeit  $\Delta t$  die Zahl der Strahlungsereignisse im Zählrohr gemessen und für den jeweiligen Winkel  $\vartheta$  registriert.

- Erklären Sie, warum für die Aufnahme eines Röntgenspektrums bei jedem Messwert die Messzeit  $\Delta t$  gleich sein muss.

Bei einer konkreten Messung mit einem LiF-Kristall (Netzebenenabstand  $d=0,201\text{ nm}$ ) beträgt die Drehschrittweite  $\Delta\vartheta=0,2^\circ$ . Die Messung beginnt bei  $\vartheta=3,0^\circ$ .

- Geben Sie an, wie viele Messpunkte bei dieser Messung erfasst werden.
- Zeigen Sie, dass bei dieser Messung in erster Ordnung  $n=1$  der Wellenlängenbereich zwischen  $\lambda_{\min}=2,10 \cdot 10^{-11}\text{ m}$  und  $\lambda_{\max}=2,84 \cdot 10^{-10}\text{ m}$  abgedeckt wird.

Die Messung erfolgt bei einer Beschleunigungsspannung an der Röntgenröhre von  $U_B=25,0\text{ kV}$ .

- Untersuchen Sie begründet, ob das kurzwellige Ende des Röntgenspektrums unter den Bedingungen dieser Messung erfasst werden kann.

14 P.

### 3.2 Sortierung des Periodensystems durch Bestimmung der Ordnungszahlen der Elemente

Nachdem sich in den 1910er-Jahren das Kern-Hülle-Atommodell etabliert hatte, gelang es, den Aufbau des Periodensystems mit der schrittweisen Auffüllung von Elektronenschalen in der Atomhülle zu verstehen. Die Ordnungszahl  $Z$  eines Elements bezeichnete dabei die Zahl der Elektronen in der Atomhülle und damit die Zahl der positiven Elementarladungen im Atomkern.

Anhand der zu dieser Zeit erstmals systematisch untersuchten charakteristischen Röntgenstrahlung verschiedener Elemente konnten die Energiedifferenzen zwischen den inneren Elektronenschalen eines Elements bestimmt werden. Damals wurde die heute noch verwendete Bezeichnung „K-, L-, M- ... Schale“ für die inneren Elektronenschalen eines Atoms eingeführt.

- a) Abbildung 3 zeigt das Spektrum der Röntgenstrahlung des Kupfers. Die beiden Linien in dem Spektrum sind die  $K_\alpha$ - und die  $K_\beta$ -Linie des Kupfers. Die genaue Wellenlänge der  $K_\alpha$ -Linie in diesem Spektrum beträgt  $\lambda_{K_\alpha}=0,154\text{ nm}$ . Abbildung 4 zeigt das vereinfachte Niveauschema eines Atoms mit den Übergängen der charakteristischen Röntgenlinien.

### Tipps und Hinweise zur Lösung von Aufgabe 3

*Vorbemerkungen:* Die Aufgabe setzt einzig und allein grundlegende Kenntnisse aus dem Inhaltsfeld 5 „Atom-, Kern- und Elementarteilchenphysik“ voraus. Die inhaltlichen Schwerpunkte „Atomaufbau“ und „Radioaktiver Zerfall“ realisieren gleichzeitig Aspekte der für den Jahrgang 2022 formulierten Fokussierung „Erkenntnisse über den Aufbau der Materie“. Dabei greifen das Kern-Hülle-Modell, die Strahlungsarten und die Zerfallsprozesse das Basiskonzept Struktur der Materie auf.

Die ersten beiden Teilaufgaben thematisieren physikalische Grundlagen der Röntgenspektroskopie und der Röntgenstrahlung. Die beiden letzten Teilaufgaben setzen sich mit extrem seltenen Elementen und ihrer Entstehung sowie ihrem Vorkommen auseinander.

Der Fokus bei den Aufgabenstellungen liegt auf physikalisch fundierten Argumentationen, die quantitative Auswertung von Experimenten tritt in den Hintergrund.

#### *Teilaufgabe 3.1 a*

- ▣ Der Aufbau der Röntgenröhre ist Ihnen aus dem Unterricht bekannt.
- ▣ Beschriften Sie die wesentlichen Bauteile, wobei der Wehneltzylinder entbehrlich ist.
- ▣ Erwartet wird, dass Sie die Schaltung der Spannungsquellen richtig einzeichnen.
- ▣ Soweit erforderlich, müssen Sie auch die für den Betrieb passende Polung der Spannungsquellen einzeichnen.
- ▣ Achten Sie bei der Erläuterung der Funktionsweise der Röntgenröhre darauf, die Bedeutung aller Bauteile in der Röhre zu erklären.
- ▣ In der Aufgabe steht, dass Sie auf die atomaren Prozesse in der Anode nicht eingehen sollen.

#### *Teilaufgabe 3.1 b*

- ▣ Strukturieren Sie Ihre Lösung, indem Sie beide Effekte getrennt betrachten: einerseits die Bremsstrahlung, andererseits die charakteristische Röntgenstrahlung.
- ▣ Es wird nicht erwartet, dass Sie darauf eingehen, dass die Bremsstrahlung ein kontinuierliches Spektrum aufweist.
- ▣ Zu den in der Aufgabe genannten elementaren Prozessen gehört die Wechselwirkung zwischen Elektronen und Atomen wie auch die Energiebilanz.
- ▣ Zu der in der Aufgabe genannten geeigneten Modellvorstellung gehört das Schalenmodell mit der damit verbundenen Emission oder Absorption von Quanten.

#### *Teilaufgabe 3.1 c*

- ▣ Die Skizze sollte zwei Netzebenen im passenden Abstand sowie eine jeweils auftretende Wellennormale enthalten.
- ▣ Ermitteln Sie den gesamten Gangunterschied nach der Reflexion der Wellennormalen.
- ▣ Suchen Sie in einem passenden Dreieck einen Zusammenhang zwischen dem Wegunterschied  $\Delta s$  und dem Winkel  $\vartheta$ .
- ▣ Denken Sie an die Bedingung für das Auftreten konstruktiver Interferenz.

- ▣ Die Vergleichbarkeit der Messergebnisse stellt Anforderungen an die jeweilige Messzeit.
- ▣ Der Operator „angeben“ verlangt keine Rechnung. Andererseits ist diese hilfreich. Dabei müssen Sie daran denken, dass Sie schon ohne Drehschritt eine Messung, nämlich bei  $\vartheta = 3^\circ$ , vorliegen haben.
- ▣ Die Wellenlängen  $\lambda_{\min}$  und  $\lambda_{\max}$  werden mit der Bragg-Bedingung berechnet.
- ▣ Überlegen Sie, was „kurzwelliges Ende“ mit Blick auf die Frequenz bedeutet.
- ▣ Betrachten Sie das beschleunigte Elektron und das entstehende Photon unter Energiegesichtspunkten und nutzen Sie den Energieerhaltungssatz, um die Grenzwellenlänge zu berechnen.
- ▣ Kontrollieren Sie die Einheiten mithilfe einer Umrechnung.
- ▣ Ordnen Sie das Ergebnis in das vorher bestimmte Intervall für die möglichen Wellenlängen ein.

#### *Teilaufgabe 3.2 a*

- ▣ Nutzen Sie das Niveauschema in Abb. 4, um die gesuchte Energiedifferenz  $\Delta E_{ML}$  mithilfe der  $K_\alpha$ - und  $K_\beta$ -Linien zu berechnen.
- ▣ Die Frequenzen der Photonen sind nicht bekannt, also müssen Sie auftretende Energien mithilfe der Wellenlängen ausdrücken.
- ▣ Notwendige Werte für die Wellenlängen entnehmen Sie dem Text und Abb. 3.
- ▣ Denken Sie daran, das Ergebnis in der Einheit keV anzugeben. Bei der Umrechnung hilft die Formelsammlung weiter.

#### *Teilaufgabe 3.2 b*

- ▣ Überlegen Sie zunächst, welche Größen auf den Achsen aufgetragen werden.
- ▣ Berechnen Sie diese und stellen Sie die Ergebnisse übersichtlich in einer Tabelle zusammen.
- ▣ Denken Sie daran, wie sich die Proportionalität zweier Größen im Diagramm widerspiegelt.
- ▣ Die Proportionalitätskonstante wird erst im Anschluss bestimmt.
- ▣ Dazu sollen Sie unbedingt die vorliegende grafische Auswertung verwenden. Eine Verwendung des GTR scheint an dieser Stelle ausgeschlossen zu sein.
- ▣ Die Wellenlänge der  $K_\alpha$ -Linie ist aus dem Text aus Teilaufgabe 3.2a bekannt.
- ▣ Somit können Sie den Wert auf der Hochachse ausrechnen und den Wert auf der Rechtsachse im Diagramm ablesen.
- ▣ Da bei der letzten Teilaufgabe nicht zwingend die grafische Auswertung verwendet werden soll, können Sie auch die Funktionsgleichung benutzen und diese nach Z umstellen.



## Lösungen zu Aufgabe 3

- 3.1 a) Abb. 8 zeigt eine **Skizze einer Röntgenröhre** mit den wesentlichen Bauteilen und den notwendigen Spannungen zum Betrieb der Röhre.

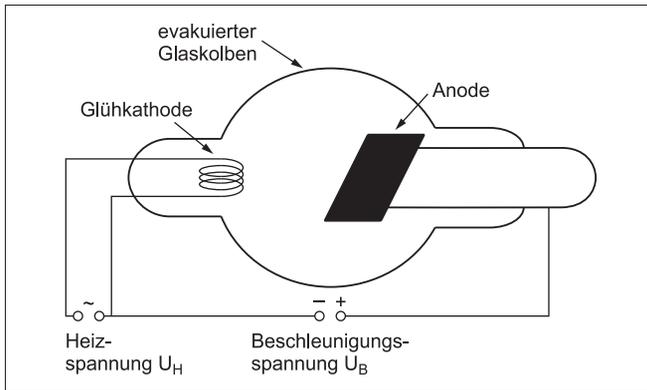


Abb. 8

Es wird erwartet, dass die Polung der Beschleunigungsspannung korrekt angegeben wird, nicht aber die Tatsache, dass eine Wechselspannung als Heizspannung verwendet wird.

Legt man an die **Glühkathode** eine **Heizspannung  $U_H$**  an, werden durch Glühemission Elektronen freigesetzt, die dann eine Raumladungswolke um die Glühkathode bilden. Diese werden durch die zwischen Glühkathode und **Anode** liegende **Beschleunigungsspannung  $U_B$**  in Richtung der Anode beschleunigt. Da der Glaskolben evakuiert ist, können die Elektronen nicht durch Zusammenstöße mit den Luftteilchen abgebremst werden. Wenn die Elektronen auf die Anode treffen, entsteht die Röntgenstrahlung, welche die Röhre dann verlassen kann.

b) **Entstehung der Bremsstrahlung**

Tritt ein schnelles Elektron in das Anodenmaterial ein, wird es dort im **Coulombfeld eines Atomkerns** abgelenkt und abgebremst. Dadurch verliert das Elektron einen Teil seiner Energie und gibt diese in Form eines Röntgenquants ab (Abb. 9).

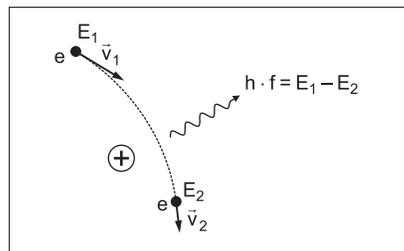


Abb. 9

## Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung

Ein freies Elektron mit hinreichend großer Energie schlägt nach dem Eintritt in das Anodenmaterial dort aus der inneren Schale eines Atoms ein Elektron heraus. Die Lücke wird dadurch geschlossen, dass ein anderes Elektron von einer weiter außen liegenden Schale auf diesen freien Platz übergeht. Dabei gibt das höherenergetische Elektron der weiter außen liegenden Schale beim Wechsel auf eine weiter innen liegende Schale die zu diesem Übergang gehörige Energiedifferenz in Form eines Photons ab, das abgestrahlt wird (Abb. 10).

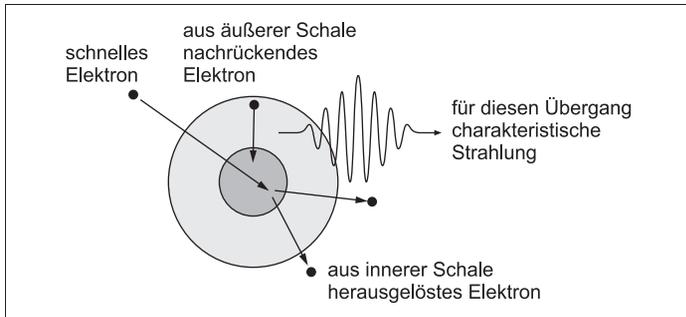


Abb. 10

- c) Für die **Herleitung der Bragg-Bedingung** wird die Streuung der einlaufenden Röntgenwellen an den Netzebenen des Einkristalls untersucht (Abb. 11).

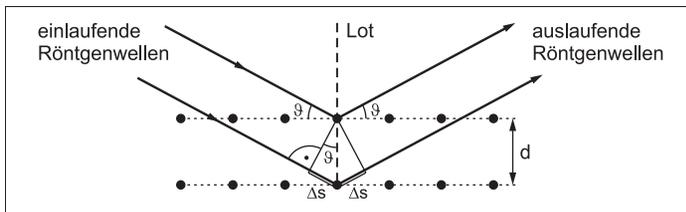


Abb. 11

Der Wegunterschied, den eine einlaufende Wellenfront bis zur Streuung an der nächst tiefer gelegenen Netzebene des Einkristalls zurücklegt, ist  $\Delta s$ . Die Skizze in Abb. 11 zeigt, dass in dem kleinen Dreieck, dessen Hypotenuse der Netzebenenabstand  $d$  ist, die Beziehung  $\sin \vartheta = \frac{\Delta s}{d}$  gilt. Daraus folgt für den Wegunterschied:

$$\Delta s = d \cdot \sin \vartheta$$

Nach Streuung an der nächst tiefer gelegenen Netzebene unter Berücksichtigung des Reflexionsgesetzes (Einfallswinkel = Reflexionswinkel =  $\vartheta$ ) muss die auslaufende Wellenfront ebenso den Wegunterschied  $\Delta s$  zurücklegen.

Der gesamte Gangunterschied zwischen den beiden an benachbarten Netzebenen reflektierten Wellenfronten beträgt also

$$2\Delta s = 2d \cdot \sin \vartheta.$$

Ist dieser ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge  $\lambda$ , kommt es zur konstruktiven Interferenz der reflektierten Wellenfronten:

$$2\Delta s = n \cdot \lambda \quad \text{mit } n = 1, 2, 3, \dots$$

Durch Gleichsetzen der beiden Terme für  $2\Delta s$  folgt die Bragg-Bedingung:

$$\underline{n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin \vartheta} \quad \text{mit } n = 1, 2, 3, \dots$$

### **Konstanz der Messzeit $\Delta t$**

Bei der beschriebenen Drehkristallmethode muss die Zahl der registrierten Strahlungsereignisse – und damit die gemessene Intensität – bei allen Winkeleinstellungen miteinander vergleichbar sein. Das ist nur gewährleistet, wenn bei jeder Winkeleinstellung die Messdauer  $\Delta t$  konstant ist.

### **Anzahl der Messpunkte**

Für den Drehwinkel  $\vartheta$  gilt:  $3^\circ \leq \vartheta \leq 45^\circ$ . Die Schrittweite beträgt  $\Delta\vartheta = 0,2^\circ$ . Dann folgt für die Anzahl  $n$  der aufgenommenen Messungen:

$$n = \frac{45^\circ - 3^\circ}{0,2^\circ} + 1 = \underline{\underline{211}}$$

Das Ergebnis „210 Messungen“ wird ebenfalls als korrekt bewertet.

### **Wellenlängenbereich bei Messung 1. Ordnung**

Die Wellenlängen  $\lambda_{\min}$  und  $\lambda_{\max}$  werden mit der Bragg-Bedingung

$$n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin \vartheta$$

berechnet. Mit  $n = 1$  ergibt sich:

$$\lambda_{\min} = 2d \cdot \sin \vartheta_{\min} = 2 \cdot 0,201 \text{ nm} \cdot \sin 3^\circ = 0,0210 \text{ nm} = \underline{\underline{2,10 \cdot 10^{-11} \text{ m}}}$$

$$\lambda_{\max} = 2d \cdot \sin \vartheta_{\max} = 2 \cdot 0,201 \text{ nm} \cdot \sin 45^\circ = 0,284 \text{ nm} = \underline{\underline{2,84 \cdot 10^{-10} \text{ m}}}$$

### **Kurzwelliges Ende des Röntgenspektrums**

Dem kurzwelligen Ende  $\lambda_g$  des Röntgenspektrums entspricht die obere Grenzfrequenz  $f_g = c/\lambda_g$ , was wiederum bedeutet, dass die zugehörigen Photonen wegen  $E_{\text{Ph}} = h \cdot f$  die maximal mögliche Energie besitzen. Dafür ist es erforderlich, dass ein Elektron nach Durchlaufen der Beschleunigungsspannung  $U_B$  seine komplette kinetische Energie  $E_{\text{kin, max}} = e \cdot U_B$  verliert. Die Energiebilanz des Vorgangs lautet in diesem Fall:

$$E_{\text{Ph}} = E_{\text{kin, max}} \Leftrightarrow h \cdot \frac{c}{\lambda_g} = e \cdot U_B \Rightarrow \lambda_g = \frac{h \cdot c}{e \cdot U_B}$$

Die Messung erfolgt bei  $U_B = 25,0 \text{ kV}$ . Damit ergibt sich für die Grenzwellenlänge  $\lambda_g$ :

$$\lambda_g = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 2,50 \cdot 10^4 \text{ V}} = 4,97 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

Einheitenkontrolle:

$$1 \frac{\text{Js} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\text{C} \cdot \text{V}} = 1 \frac{\text{J} \cdot \text{m}}{\text{As} \cdot \frac{\text{W}}{\text{A}}} = 1 \frac{\text{J} \cdot \text{m}}{\text{W} \cdot \text{s}} = 1 \frac{\text{J} \cdot \text{m}}{\text{J}} = 1 \text{ m}$$

Der Vergleich mit den oben berechnetem Wellenlängenintervall zeigt:

$$\lambda_{\min} \leq \lambda_g \leq \lambda_{\max}$$

Das bedeutet: Das **kurzwellige Ende des Röntgenspektrums** wird bei dieser Messung in 1. Ordnung **erfasst**.

- 3.2 a) Die **Energiedifferenz  $\Delta E_{ML}$  zwischen der L- und der M-Schale** wird mithilfe der Energiedifferenz  $\Delta E_{MK}$  des  $K_{\beta}$ -Übergangs zwischen der K- und der M-Schale und der Energiedifferenz  $\Delta E_{LK}$  des  $K_{\alpha}$ -Übergangs zwischen der L- und der K-Schale berechnet:

$$\begin{aligned} \Delta E_{ML} &= \Delta E_{MK} - \Delta E_{LK} \\ &= h \cdot f_{K_{\beta}} - h \cdot f_{K_{\alpha}} = h \cdot (f_{K_{\beta}} - f_{K_{\alpha}}) = h \cdot c \cdot \left( \frac{1}{\lambda_{K_{\beta}}} - \frac{1}{\lambda_{K_{\alpha}}} \right) \end{aligned}$$

Die Wellenlänge  $\lambda_{K_{\alpha}} = 0,154 \text{ nm} = 1,54 \cdot 10^{-10} \text{ m}$  ist im Aufgabentext angegeben, die Wellenlänge  $\lambda_{K_{\beta}} = 0,14 \text{ nm} = 1,4 \cdot 10^{-10} \text{ m}$  wird in Abb. 3 abgelesen. Einsetzen ergibt:

$$\begin{aligned} \Delta E_{ML} &= 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \left( \frac{1}{1,4 \cdot 10^{-10} \text{ m}} - \frac{1}{1,54 \cdot 10^{-10} \text{ m}} \right) \\ &= 1,3 \cdot 10^{-16} \text{ J} \end{aligned}$$

Die Energie wird in die geforderte Einheit keV umgerechnet:

$$\Delta E_{ML} = \frac{1,3 \cdot 10^{-16}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ eV} = 8,1 \cdot 10^2 \text{ eV} = \underline{\underline{0,81 \text{ keV}}}$$

- b) **Bestätigung des Moseley-Gesetzes durch grafische Auswertung**

Für eine grafische Auswertung ist es zunächst erforderlich, die Werte für die Variablen  $Z-1$  und  $\sqrt{\frac{1}{\lambda_{K_{\alpha}}}}$  in einer Tabelle festzuhalten:

$Z-1$	12	19	23	26	29	39
$\lambda_{K_{\alpha}}$ in $10^{-10} \text{ m}$	8,36	3,37	2,30	1,80	1,45	0,794
$\sqrt{\frac{1}{\lambda_{K_{\alpha}}}}$ in $1 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{1}{\text{m}}}$	3,46	5,45	6,59	7,45	8,30	11,2



© **STARK Verlag**

[www.stark-verlag.de](http://www.stark-verlag.de)  
[info@stark-verlag.de](mailto:info@stark-verlag.de)

Der Datenbestand der STARK Verlag GmbH ist urheberrechtlich international geschützt. Kein Teil dieser Daten darf ohne Zustimmung des Rechteinhabers in irgendeiner Form verwertet werden.

**STARK**