

2021

Abitur

Original-Prüfungen
mit Lösungen

**MEHR
ERFAHREN**

Gymnasium Nordrhein-Westfalen

Physik

- + Schwerpunktthemen 2021
- + Zusätzliche Aufgaben als PD

ActiveBook
• Interaktives
Training



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	V
3 Zum Aufbau der Prüfungsaufgaben	VI
4 Durchführung der schriftlichen Abiturprüfung	VIII
5 Bewertung der Prüfungsarbeiten	VIII
Methodische Hinweise für die Anfertigung der Abiturklausur	IX
Wie man richtig für die Abiturprüfung lernt	X
1 Umgang mit Operatoren	X
2 Anlage von Mindmaps während des Unterrichts in der Oberstufe	XII
3 Anlage eines Arbeitsheftes für die Oberstufe	XIV
4 Eigene kleine Formelsammlung	XV
5 Lernen aus den Klausuren der Oberstufe	XVI
Zum Umgang mit diesem Buch	XVI

Übungsaufgaben zu den Schwerpunktthemen 2021 – Leistungskurs

1. Hochenergetische Elektronen (β^- -Teilchen).	1
2. Elektrischer Schwingkreis.	10
3. Elektromagnetische Schwingungen und Resonanz	20
4. Aspekte zur experimentellen Überprüfung des Induktionsgesetzes.	36
5. Induktion bei der Torlinientechnik	49
6. Radioaktivität	65
7. Radioaktiver Zerfall von Uran und das Alter der Erde	75
8. Das Bohr'sche Atommodell und seine experimentelle Bestätigung.	84
9. Der radioaktive Zerfall des Caesium-137	95

Zentrale Abiturprüfungsaufgaben – Leistungskurs

Abiturprüfungsaufgaben 2017

1. Der Linearbeschleuniger (Linac) in der medizinischen Therapie . . . LK 2017-1
2. Der Fotoeffekt und seine Bedeutung für die Physik LK 2017-15
3. Von Teilchen und Wellen zu Quantenobjekten LK 2017-30
4. Der Positronen-Emissions-Tomograph „PET“ LK 2017-44

Abiturprüfungsaufgaben 2018

1. Elektromagnetische Induktion LK 2018-1
2. Teilchen- und Welleneigenschaften von Licht LK 2018-16
3. Messung sehr langer Lebensdauern LK 2018-29
4. Radonexposition LK 2018-41

Abiturprüfungsaufgaben 2019

1. Experimentelle Untersuchung schneller Elektronen – ein direkter
Nachweis einer Grenzgeschwindigkeit LK 2019-1
2. Durchgang eines Quantenobjekts durch einen Doppelspalt LK 2019-16
3. Röntgenstrahlung LK 2019-29
4. Radionuklidbatterie LK 2019-44

Abiturprüfungsaufgaben 2020

Online als PDF zum Download. **www.stark-verlag.de/mystark**

Das Corona-Virus hat im vergangenen Schuljahr auch die Prüfungsabläufe durcheinandergebracht und manches verzögert. Daher sind die Aufgaben und Lösungen zur Prüfung 2020 in diesem Jahr nicht im Buch abgedruckt, sondern erscheinen in digitaler Form. Sobald die Original-Prüfungsaufgaben 2020 zur Veröffentlichung freigegeben sind, können Sie sie als PDF auf der Plattform MyStark herunterladen. Den Zugangscode finden Sie auf den Farbseiten vorne im Buch.



Zentrale Abiturprüfungsaufgaben Jahrgang 2020 im Leistungskurs

Zentrale Abiturprüfungsaufgaben im Grundkurs

Jahrgang 2008	1
Jahrgang 2009	31
Jahrgang 2010	63
Jahrgang 2013	92
Jahrgang 2014	133
Jahrgang 2015	168
Jahrgang 2016	205
Jahrgang 2017	249
Jahrgang 2018	286
Jahrgang 2019	325
Jahrgang 2020	360

Übungsaufgaben

1. Interferenzen an einer CD	1
2. Elektronenstrahlbeugung	5
3. Elektromagnetische Induktion	12
4. Radioaktivität und Kernphysik	19
5. Elektrisch geladene Teilchen in E- und B-Feldern	24
6. Wellenoptik	31

Übersicht: Prüfungsaufgaben und Sachgebiete, Grundkurs 2013 bis 2020

Zusatzblätter: Farbspektren

- LK 2013, Aufgabe 2, Abbildung 3 bis 7
- LK 2017, Aufgabe 3.2, Abbildung 1

Jeweils zu Beginn des neuen Schuljahres erscheinen die neuen Ausgaben der Abiturprüfungsaufgaben mit Lösungen.

Autoren der Tipps und Lösungen

Bis Jahrgang 2019: Stark Verlag

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 vollständigen **Original-Prüfungsaufgaben** der Jahrgänge 2017 bis 2019 für den **Leistungskurs**.
- Er enthält zudem einen **Übungsteil** mit LK-Prüfungsaufgaben älterer Jahrgänge, die speziell auf die **Schwerpunkthemen 2021** 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 ist dieses Buch ein **ActiveBook** – das bedeutet, Sie erhalten zusätzliches Übungsmaterial **online auf MyStark**:

- **Interaktives Training** mit Aufgaben und Lernvideos zu allen relevanten Themengebieten des Physikabiturs.
- **Original-Prüfungsaufgaben 2020** im Grund- und Leistungskurs zum Download.
- Die für das Abitur 2021 relevanten **Original-Prüfungsaufgaben** früherer Jahrgänge für den **Grundkurs** sowie zusätzliche **Übungsaufgaben** zum Download.



Ausführliche Infos inkl. Zugangscode finden Sie auf den Farbseiten vorne im Buch.

Sollten nach Erscheinen dieses Bandes noch wichtige Änderungen in der Abiturprüfung 2021 vom Ministerium für Schule und Weiterbildung bekannt gegeben werden, finden Sie aktuelle Informationen dazu im Internet ebenfalls auf MyStark.

Wir wünschen Ihnen viel Erfolg bei der Abiturprüfung!

Udo Mühlendorf

Udo Mühlendorf

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 2013 und setzt die allgemeinen verbindlichen Bedingungen für das Abitur ab dem Jahr 2017. 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/physik/

Die Adresse für die Vorgaben lautet:

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 **fachspezifischen inhaltlichen Schwerpunkte und Fokussierungen für das Physikabitur 2021** zeigen die beiden nachfolgenden Tabellen für Leistungs- und Grundkurs.

Leistungskurs: Inhaltliche Schwerpunkte 2021 und Fokussierungen 2021 (fett-kursiv)

Relativitätstheorie	Elektrik	Quantenphysik	Atom-, Kern- und Elementarteilchenphysik
Konstanz der Lichtgeschwindigkeit <i>Nachweis relativistischer Phänomene</i>	Eigenschaften elektr. Ladungen und ihrer Felder	Licht und Elektronen als Quantenobjekte	Atomaufbau <i>Erkenntnisse über den Aufbau der Materie</i>
Problem der Gleichzeitigkeit	Bewegung v. Ladungsträgern in elektrischen und magnetischen Feldern	Welle-Teilchen-Dualismus und Wahrscheinlichkeitsinterpretation	Ionisierende Strahlung

Zeitdilatation und Längenkontraktion <i>Nachweis relativistischer Phänomene</i>	Elektromagn. Induktion <i>Experimentelle und theoretische Untersuchung zu induktiven Vorgängen</i>	Quantenphysik und klassische Physik	Radioaktiver Zerfall <i>Erkenntnisse über den Aufbau der Materie</i>
Relativistische Massenzunahme <i>Nachweis relativistischer Phänomene</i>	Elektromagn. Schwingungen u. Wellen <i>Experimentelle und theoretische Untersuchung zu induktiven Vorgängen</i>		Kernspaltung und Kernfusion
Energie-Masse-Beziehung			Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen <i>Erkenntnisse über den Aufbau der Materie</i>
Einfluss d. Gravitation auf die Zeitmessung			

Grundkurs: Inhaltliche Schwerpunkte 2021 und Fokussierungen 2021 (fett-kursiv)

Quantenobjekte	Elektrodynamik	Strahlung u. Materie	Relativität v. Raum u. Zeit
Elektron und Photon (Teilchen-/Wellenaspekt)	Spannung und elektrische Energie <i>Spannungserzeugung, Bereitstellung und Transport von elektrischer Energie</i>	Spektrum der elektromagnetischen Strahlung <i>Erkenntnisse über den Aufbau der Materie</i>	Konstanz der Lichtgeschwindigkeit
Quantenobjekte und ihre Eigenschaften	Induktion <i>Spannungserzeugung, Bereitstellung und Transport von elektrischer Energie</i>	Energiequantelung in der Atomhülle <i>Erkenntnisse über den Aufbau der Materie</i>	Zeitdilatation
	Spannungswandlung <i>Spannungserzeugung, Bereitstellung und Transport von elektrischer Energie</i>	Ionisierende Strahlung	Veränderlichkeit der Masse
		Kernumwandlung	Energie-Masse-Äquivalenz
		Standardmodell der Elementarteilchen <i>Erkenntnisse über den Aufbau der Materie</i>	

In der folgenden tabellarischen **Inhaltsübersicht** zu den Abiturprüfungen der vergangenen drei Jahre im Leistungskurs sind die Inhaltsfelder mit Fokussierungen 2021 dunkelgrau hervorgehoben.

2.1 Welleneigenschaften und Fotoeffekt

Die Natur des Lichts ist seit langer Zeit Forschungsgegenstand in der Physik. Am Ende des 19. Jahrhunderts hatte sich die Beschreibung des Lichts als elektromagnetische Welle vielfach experimentell bestätigen lassen und war allgemein anerkannt. Neue experimentelle Erkenntnisse führten zu Anfang des 20. Jahrhunderts jedoch zu einer Weiterentwicklung der physikalischen Beschreibung von Licht.

- a) • Beschreiben Sie kurz ein mögliches Experiment zum Nachweis der Welleneigenschaften von Licht.
- Geben Sie an, welche Beobachtungen bei dem von Ihnen beschriebenen Experiment sich nur durch die Welleneigenschaften von Licht erklären lassen.

4 P.

Als eines der ersten Experimente am Anfang des 20. Jahrhunderts, die zu neuen Erkenntnissen zur Natur des Lichts führten, wurde der Versuch zum äußeren Fotoeffekt durchgeführt: Bei der Bestrahlung einer Metalloberfläche mit Licht treten Elektronen aus dieser Metalloberfläche heraus.

- b) Erläutern Sie mindestens zwei Beobachtungen des äußeren Fotoeffekts, welche nicht vom Wellenmodell erklärt werden.

4 P.

2.2 Experimentelle Untersuchung des äußeren Fotoeffekts

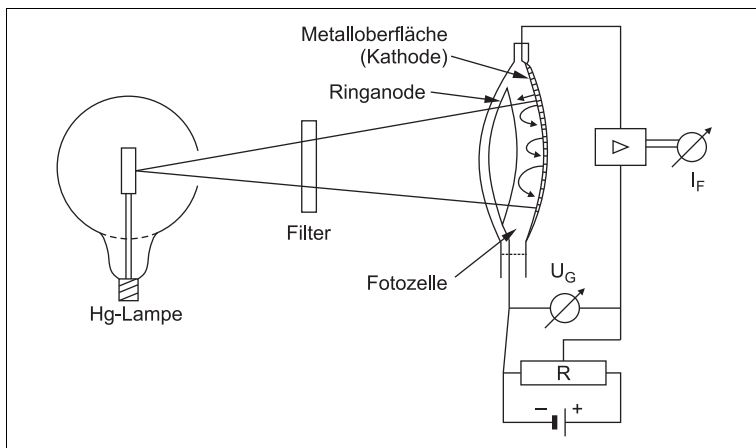


Abb. 1: Experiment zum äußeren Fotoeffekt

Quelle: Hans W. Kirchhoff, Materialien-Handbuch, Quanten- und Kernphysik, Band 6, 1994, Aulis Verlag

Mit dem in Abbildung 1 skizzierten Versuchsaufbau kann die kinetische Energie der beim äußeren Fotoeffekt ausgelösten Elektronen bestimmt werden. Hierzu wird die Metalloberfläche (Kathode) in der Fotozelle mit Licht aus einer Hg-Dampflampe bestrahlt. Durch verschiedene Filter, die in den Strahlengang gebracht werden, wird das Licht monochromatisiert und es können verschiedene Wellenlängen des Lichts ausgewählt werden. In der skizzierten Anordnung kommt es durch die Bestrahlung zu einem Fotostrom I_F . Die Spannung U_G wird durch Veränderung des Widerstandes R so lange erhöht, bis der Fotostrom bei einer Spannung $U_{G, \max}$ auf null abgesunken ist.

Bei einer konkreten Durchführung des Versuchs ergaben sich die folgenden Messwerte:

λ / nm	578	491	436	405
$U_{G, \max} / \text{V}$	1,12	1,47	1,81	2,02

Für die kinetische Energie der schnellsten Fotoelektronen gilt, wie durch die obenstehende Messung bestätigt wird, die Formel:

$$E_{\text{kin}} = h \cdot f - E_A$$

Hierbei bezeichnet h das Planck'sche Wirkungsquantum, f die Frequenz des eingestrahnten Lichts und E_A die Austrittsarbeit bzw. Ablöseenergie des Elektrons.

Albert Einstein interpretierte im Jahr 1905 den Fotoeffekt und die obenstehende Formel mithilfe von Lichtquanten.

- a) • Erklären Sie die Entstehung des Fotostroms I_F und sein Absinken bei einer Erhöhung der Spannung U_G .
 • Erläutern Sie, dass die kinetische Energie der schnellsten Fotoelektronen über die Formel $E_{\text{kin}} = e \cdot U_{G, \max}$ berechnet werden kann. 6 P.
- b) • Geben Sie für die oben angegebenen Messwerte die kinetischen Energien der schnellsten Fotoelektronen (in eV) an
 • Berechnen Sie für die oben angegebenen Messwerte die jeweilige Frequenz des Lichts. 4 P.
- c) • Stellen Sie die maximalen kinetischen Energien dieser Elektronen (in eV) in Abhängigkeit von der Frequenz des Lichts in einem Koordinatensystem mit geeigneter Skalierung grafisch dar.
 • Bestimmen Sie anhand einer grafischen Auswertung
 - die Grenzfrequenz f_G ,
 - die Austrittsarbeit E_A des verwendeten Kathodenmaterials,
 - das Planck'sche Wirkungsquantum h .

[Kontrollergebnis: $h \approx 6,55 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$] 10 P.

Das bisher beschriebene und ausgewertete Experiment kann auch mit anderen Kathodenmaterialien (und eventuell anderen Lichtquellen) durchgeführt werden.

- d) • Skizzieren Sie **qualitativ** die (theoretischen) Verläufe der maximalen kinetischen Energie in Abhängigkeit von der Frequenz des verwendeten Lichts für unterschiedliche Kathodenmaterialien in ein gemeinsames Koordinatensystem.
- Beschreiben Sie qualitativ den Zusammenhang zwischen der Grenzfrequenz f_G und der Ablöseenergie E_A des Materials.
- Leiten Sie begründet folgende Gleichung her: $E_A = h \cdot f_G$.

9 P.

Aus einer Untersuchung verschiedener Kathodenmaterialien resultieren die folgenden Ergebnisse:

Material	Cäsium	Calcium	Gold
Grenzfrequenz f_G	$4,69 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$	$7,74 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$	$1,14 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$
Austrittsarbeit E_A	1,94 eV	3,20 eV	4,71 eV

- e) • Berechnen Sie den Mittelwert für das Planck'sche Wirkungsquantum h , welcher sich aus den obigen Messwerten ergibt.
- Vergleichen Sie den Mittelwert und das Ergebnis für h aus Teilaufgabe c mit dem Literaturwert.

5 P.

2.3 Ein weiterer Nachweis für die Teilcheneigenschaften von Photonen

Den Lichtquanten können auch Teilcheneigenschaften wie Masse und Impuls zugeschrieben werden.

- a) Leiten Sie begründet her, dass bei Licht mit einer Frequenz f bzw. einer Wellenlänge λ die relativistische Masse eines Lichtquants mit folgenden Gleichungen berechnet werden kann:

$$m = \frac{h \cdot f}{c^2} = \frac{h}{c \cdot \lambda}$$

4 P.

Im Jahr 1960 führten Robert Pound und Glen Rebka ein Experiment durch, mit dem sie nachweisen konnten, dass die Photonen aufgrund ihrer Masse dem Gravitationsfeld der Erde unterliegen. Sie konnten bei einer Veränderung der Höhe im Gravitationsfeld eine Frequenzänderung der Photonen nachweisen. Ihre Versuchsanordnung bauten sie in einen Turm an der Harvard-Universität ein.

- d) In der Regel werden zur Bestimmung von Frequenzen Spektrometer eingesetzt, die auf Beugungseffekten beruhen. Um den Einfluss der Gravitation auf die Photonen messen zu können, muss der eingesetzte Detektor zwischen den Frequenzen der (oben) erzeugten und der (unten) detektierten unterscheiden können. In der Schule eingesetzte Spektrometer haben im Bereich der von Pound und Rebka verwendete Strahlung ein maximales Auflösungsvermögen von etwa $\frac{f}{\Delta f} \approx 10^2$.
- Berechnen Sie die relative Änderung der Frequenz mit der Formel aus Teilaufgabe c.
 - Beurteilen Sie das Ergebnis hinsichtlich der Anforderungen an das Auflösungsvermögen des eingesetzten Detektors beim Pound-Rebka-Experiment.

5 P.

Tipps und Hinweise zur Lösung von Aufgabe 2

Vorbemerkung: Die Aufgabe setzt grundlegende Kenntnisse aus dem Bereich des LK-Inhaltsfelds 3 „Quantenphysik“ voraus. Gemäß den Fokussierungen des Abiturjahrgangs 2018 steht „das Teilchenmodell als ein gemeinsames Beschreibungsmittel für Elektronen und Photonen“ im Mittelpunkt dieser Aufgabe, auch wenn bei dieser Aufgabe nur das Photon betrachtet wird. Das Hallwachsexperiment und die h-Bestimmung mit der Gegenfeldmethode stellen wichtige Schlüsselexperimente im Zusammenhang mit dem Fotoeffekt dar und sollten bekannt sein. Ergänzt wird diese Aufgabe durch Überlegungen zu Bereichen aus dem gleichen Inhaltsfeld, die aber nicht der Fokussierung zuzuordnen sind (Welleneigenschaften von Licht), und durch Aufgabenteile, die einem ganz anderen Inhaltsfeld (Relativitätstheorie) zuzuordnen sind.

Teilaufgabe 2.1 a

- ▣ Beachten Sie, dass die Aufgabe aus zwei Aufgabenteilen besteht und Sie beide Teile explizit beantworten.
- ▣ Vergleichen Sie die verschiedenen Arten von Wellen, die Sie kennen gelernt haben (Wasserwellen, Mikrowellen, elektromagnetische Wellen), und überlegen Sie, welche Eigenschaften alle gemeinsam haben.
- ▣ Wählen Sie ein möglichst einfaches Experiment, welches sich leicht und eindeutig beschreiben lässt.

Teilaufgabe 2.1 b

- ▣ Beachten Sie den Operator: Gefordert ist eine „Erläuterung“, d. h., eine bloße Benennung der Beobachtungen reicht hier nicht aus.
- ▣ Beachten Sie, dass (mindestens) zwei Beobachtungen zu nennen sind.
- ▣ Erinnern Sie sich an die wesentlichen Unterschiede zwischen „Wellen“ und „Photonen“.

Teilaufgabe 2.2 a

- Erinnern Sie sich daran, was ein Physiker unter „Strom“ versteht.
- Beachten Sie die angegebene Skizze. Die dort eingezeichneten Pfeile geben einen wichtigen Hinweis.
- Beachten Sie, dass nicht alle Elektronen senkrecht aus der Metalloberfläche austreten.
- Erinnern Sie sich daran, was Sie auch in anderen Inhaltsfeldern über das Beschleunigen und Abbremsen von geladenen Teilchen im elektrischen Feld gelernt haben.

Teilaufgabe 2.2 b

- Beachten Sie die geforderte Einheit für die kinetische Energie, eine Rechnung ist somit eigentlich gar nicht notwendig.
- Der Zusammenhang zwischen Frequenz, Wellenlänge und Ausbreitungsgeschwindigkeit sollte Ihnen bekannt sein, da er sehr oft benötigt wird. Sie finden ihn aber auch in der Formelsammlung.

Teilaufgabe 2.2 c

- Beachten Sie, dass Sie die Achsen korrekt beschriften.
- Beachten Sie auch die folgenden Aufgabenteile (Bestimmung der Austrittsarbeit), damit Sie das Koordinatensystem hinreichend groß zeichnen.
- Gehen Sie möglichst effizient bei der Bestimmung von h vor, eine rechnerische Bestimmung ist sehr zeitaufwendig. Nutzen Sie Ihre grafische Darstellung.

Teilaufgabe 2.2 d

- Beachten Sie, dass die entscheidenden Aspekte in Ihrer Skizze eindeutig zu erkennen sind. Geben Sie diese gegebenenfalls zusätzlich an.
- Den Zusammenhang zwischen Auslösearbeit und Grenzfrequenz können Sie auch an Ihrer Skizze erkennen.
- Beachten Sie, in welche Richtung sich die Gerade verschiebt, wenn die Auslösearbeit größer wird.
- Überlegen Sie, wie groß die kinetische Arbeit ist, wenn das Metall mit Licht mit der Grenzfrequenz beleuchtet wird.

Teilaufgabe 2.2 e

- Die Formel zur Berechnung von h finden Sie (nach leichten Umformungen) etwas weiter oben.
- Führen Sie den Vergleich mit dem Literaturwert möglichst konkret durch.

Lösungen zu Aufgabe 2

2.1 a) Experimenteller Nachweis der Welleneigenschaften von Licht

Es gibt mehrere Eigenschaften, die typisch für Wellen sind, z. B. Brechung, Beugung und Interferenz, wobei sich insbesondere die Interferenzphänomene auf keinen Fall mehr mit dem aus der Sekundarstufe I bekannten Strahlenmodell deuten lassen. Somit bietet sich ein Experiment an, bei dem man ein Interferenzbild beobachten kann, um die Welleneigenschaften von Licht nachzuweisen.

Nachweis durch Interferenz: Hierzu bestrahlt man z. B. ein Gitter oder einen Doppelspalt geeigneter Abmessungen mit kohärentem Licht. Hinter dem Gitter bzw. Doppelspalt lässt sich dann auf einem Schirm das für Wellen typische Interferenzbild mit Stellen maximaler (Interferenzmaxima) und minimaler Lichtintensität (Interferenzminima) beobachten.

Das Auftreten dieser hellen und dunklen Stellen, also das **Auftreten eines Interferenzbilds**, lässt sich nur mit dem Wellenmodell erklären.

b) Mit dem Wellenmodell unvereinbare Beobachtungen beim Fotoeffekt

- Der Fotoeffekt tritt je nach Material erst ab einer gewissen materialabhängigen **Grenzfrequenz** auf: Nach der klassischen Wellentheorie müssten die Elektronen nach einer bestimmten Zeit unabhängig von der Frequenz des eingestrahlten Lichts ausreichend Energie erhalten haben und aus der Metalloberfläche austreten.
- **Unabhängigkeit der maximalen Energie der ausgelösten Fotoelektronen von der Lichtintensität:** Aus Sicht der klassischen Wellentheorie musste die maximale Energie der ausgelösten Fotoelektronen mit der Intensität des Lichts ansteigen, da durch die höhere Intensität mehr Energie transportiert und übertragen werden müsste, wodurch die maximale Energie der Fotoelektronen ebenfalls steigen müsste.
- Der Fotoeffekt tritt **verzögerungsfrei** auf: Nach der Wellentheorie wäre davon auszugehen, dass der Fotoeffekt bei (sehr) geringen Intensitäten erst zeitverzögert auftritt, da erst ausreichend Energie „angesammelt“ werden muss, bevor die Fotoelektronen das Metall verlassen können.

2.2 a) Entstehung des Fotostroms

Das Licht, welches auf die Kathode fällt, löst dort durch den Fotoeffekt Elektronen aus der Metalloberfläche aus. Diese besitzen entsprechend der angegebenen Formel eine kinetische Energie und bewegen sich in Richtung des Anodenrings, wodurch der Fotostrom I_{ph} in der skizzierten Schaltung entsteht.

Absinken des Fotostroms bei Erhöhung der Spannung U_G

Durch die Spannung U_G wird zwischen dem Anodenring und der Kathode ein elektrisches Gegenfeld der Energie $E_G = e \cdot U_G$ erzeugt, das die Elektronen abbremst. Die kinetische Energie E_{kin} der Elektronen muss zum Überwinden des Gegenfelds daher mindestens so groß wie E_G sein. Wird die Gegenspannung erhöht, besitzen immer weniger Elektronen die nötige Mindestenergie E_G , sodass der Fotostrom kontinuierlich abnimmt.

Kinetische Energie der schnellsten Fotoelektronen

Die schnellsten Elektronen der kinetischen Energie E_{kin} sind diejenigen, die senkrecht zur Oberfläche austreten und sich somit parallel zu den Feldlinien des elektrischen Gegenfelds bewegen. Für sie ist die nötige Bremsenergie am größten. Im Grenzfall $E_{\text{kin}} = e \cdot U_{G,\text{max}}$ erreichen die schnellsten Elektronen den Anodenring gerade nicht mehr, der Fotostrom ist also null. Somit ist $U_{G,\text{max}}$ ein Maß für die kinetische Energie dieser Elektronen.

- b) Entsprechend der angegebenen Formel $E_{\text{kin}} = e \cdot U_{G,\text{max}}$ können die **kinetischen Energien** der schnellsten Elektronen berechnet bzw. angegeben werden. Der Betrag von Gegenspannung und maximaler kinetischer Energie ist bei der geforderten Einheit eV identisch.
Mithilfe der Formel $c = \lambda \cdot f \Leftrightarrow f = \frac{c}{\lambda}$ werden die **Frequenzen** berechnet.
So gilt für den ersten Tabellenwert:

$$f = \frac{2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{578 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 5,19 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

Erweiterte Wertetabelle:

λ in nm	578	491	436	405
$U_{G,\text{max}}$ in V	1,12	1,47	1,81	2,02
E_{kin} in eV	1,12	1,47	1,81	2,02
f in 10^{14} Hz	5,19	6,11	6,88	7,40

- c) Das **f- E_{kin} -Diagramm** (Messpunkte mit Ausgleichsgerade) zeigt Abb. 3.

Die **Grenzfrequenz f_G** gibt die Frequenz an, bei der die Energie des Lichts gerade ausreicht, um Elektronen aus dem Metall auszulösen. In diesem Fall ist die kinetische Energie der ausgelösten Elektronen null. Zu bestimmen ist somit der Schnittpunkt mit der f-Achse, also die Nullstelle:

$$f_G \approx \underline{\underline{2,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}}}$$

Die **Austrittsarbeit E_A** ist die Energie, die notwendig ist, um die Elektronen aus dem Metall zu lösen. Im Diagramm entspricht dies dem Betrag der Ordinate des Schnittpunkts mit der E_{kin} -Achse:

$$E_A \approx \underline{\underline{1 \text{ eV}}}$$

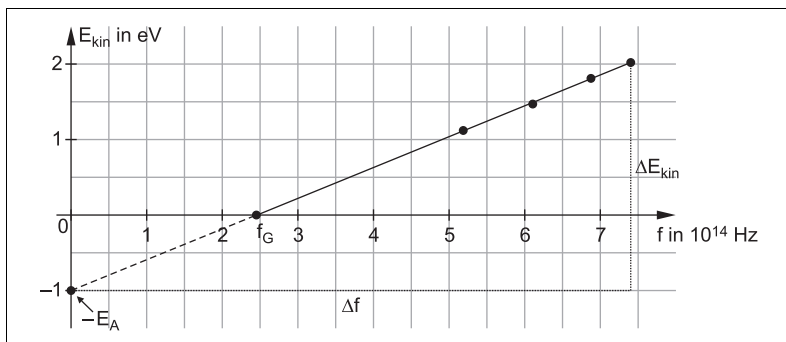


Abb. 3

Das **Planck'sche Wirkungsquantum h** ist durch die Steigung der im Diagramm dargestellten Ausgleichsgeraden gegeben, die durch die im Aufgabentext genannte Gleichung $E_{\text{kin}} = h \cdot f - E_A$ beschrieben wird. Mithilfe des eingezeichneten Steigungsdreiecks erhält man:

$$h = \frac{\Delta E_{\text{kin}}}{\Delta f} = \frac{2 \text{ eV} - (-1 \text{ eV})}{7,4 \cdot 10^{14} \text{ Hz}} = 4,054 \cdot 10^{-15} \text{ eVs} = \underline{\underline{6,5 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}}$$

- d) In Abb. 4 sind die **f - E_{kin} -Verläufe** von z. B. drei Kathodenmaterialien skizziert.

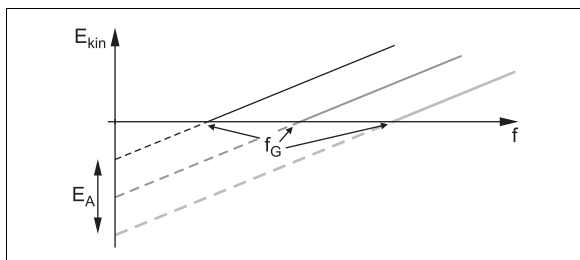


Abb. 4

Wichtig ist, dass der parallele Verlauf der drei Geraden eindeutig zu erkennen ist, da alle drei Geraden dieselbe Steigung h haben müssen. Außerdem ist wichtig, dass alle drei Geraden die y -Achse im negativen Bereich schneiden, da sonst eine negative Austrittsarbeit vorliegen würde

Zusammenhang Grenzfrequenz und Ablösearbeit (Austrittsarbeit)

Der Vergleich der parallelen Geraden zeigt, dass die Grenzfrequenz f_G bei steigender Ablöseenergie E_A ebenfalls ansteigt. Dies ist auch plausibel, da bei größerer Ablösearbeit auch mehr Energie zum Auslösen notwendig ist und somit eine höhere Lichtfrequenz benötigt wird.

Herleitung der Gleichung $E_A = h \cdot f_G$

Wird das Metall mit Licht der Grenzfrequenz f_G beleuchtet, reicht die Energie der Photonen gerade aus, um Elektronen aus der Metalloberfläche zu lösen. In diesem Fall beträgt die kinetische Energie der ausgelösten Elektronen null, $E_{\text{kin}} = 0$. Einsetzen dieser Bedingung in die angegebene Formel und Umformen nach E_A ergibt:

$$E_{\text{kin}} = 0 = h \cdot f_G - E_A \Leftrightarrow \underline{\underline{E_A = h \cdot f_G}}$$

e) Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums

Umformen der bei Teilaufgabe 2.2.d angegebenen Formel ergibt:

$$E_A = h \cdot f_G \Leftrightarrow h = \frac{E_A}{f_G}$$

Damit erhält man für die Tabellenwerte die folgenden Einzelwerte für h :

Material	Cäsium	Calcium	Gold
Grenzfrequenz f_G	$4,69 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$	$7,74 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$	$1,14 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$
Ablöseenergie E_A	1,94 eV	3,20 eV	4,71 eV
h	$4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}$ $6,627 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$	$4,134 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}$ $6,623 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$	$4,132 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}$ $6,619 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

Der Mittelwert beträgt:

$$\bar{h} = \frac{6,627 + 6,623 + 6,619}{3} \cdot 10^{-34} \text{ Js} = \underline{\underline{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}}$$

Vergleich mit Literaturwert: \bar{h} weicht um weniger als 1 % vom Literaturwert $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ ab liegt damit noch näher am Literaturwert als der in Teilaufgabe 2.2.c bestimmte Wert. (Dieser liegt für sich genommen mit einer Abweichung von ca. 2 % auch schon sehr nah am Literaturwert.)

2.3 a) Photonenmasse

Mit der Einstein'schen Masse-Energie-Äquivalenz $E = m \cdot c^2$ kann jedem Lichtquant der Energie $E = h \cdot f$ eine Masse zugeschrieben werden. Durch Gleichsetzen der beiden Terme folgt:

$$m \cdot c^2 = h \cdot f \quad \diamond \quad m = \frac{h \cdot f}{c^2} = \frac{h \cdot \frac{c}{\lambda}}{c^2} = \underline{\underline{\frac{h}{c \cdot \lambda}}}$$

b) Warum ändert sich beim „Fallen“ die Frequenz?

Bei dem Experiment setzt sich die Gesamtenergie eines Photons einerseits zusammen aus der Photonenenergie $E_{\text{ph}} = h \cdot f$ und andererseits aus der potenziellen Energie, die von der Höhe, in der sich das Photon befindet, abhängt. Beim Durchfallen einer Höhendifferenz H nimmt die potenzielle Energie des Photons ab, wodurch sich gemäß Energieerhaltungssatz die Energie des Photons $E_{\text{ph}} = h \cdot f$ vergrößern muss.



© **STARK Verlag**

www.stark-verlag.de
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