

2020

# Abitur

Original-Prüfungen  
mit Lösungen

Gymnasium

MEHR  
ERFAHREN

## Physik

- + Schwerpunktthemen
- + Zusätzliche Aufgaben als PDF

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 Abitusklausur . . . . .	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 2020 – Leistungskurs

---

1. Das Zyklotron . . . . .	1
2. Hochenergetische Elektronen ( $\beta^-$ -Teilchen). . . . .	9
3. Der Doppelspalt . . . . .	18
4. Untersuchung von Spektren mithilfe optischer Gitter . . . . .	31
5. Experimente am Doppelspalt – Eigenschaften von Quantenobjekten . . . . .	42
6. Röntgenstrahlung – Entstehung, Analyse, Spektrum, Bragg-Reflexion . . . . .	51
7. Radioaktive Strahlung . . . . .	62
8. Radioaktivität von Natrium-22 . . . . .	74
9. Eigenschaften der Röntgenstrahlung und ein Experiment zur Unteilbarkeit von Photonen. . . . .	85
10. Der radioaktive Zerfall des Caesium-137 . . . . .	98

## **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



### Zentrale Abiturprüfungsaufgaben 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

### 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 2019

### 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.

# Vorwort

**Liebe Schülerin, lieber Schüler,**

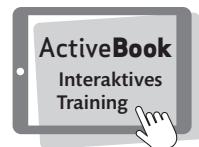
Sie haben Physik in Nordrhein-Westfalen als Grund- oder Leistungskurs belegt und planen, in diesem Fach ihr Abitur abzulegen. Für die schriftliche Abiturprüfung in Nordrhein-Westfalen bearbeiten seit 2007 die Schülerinnen und Schüler aller Gymnasien und Gesamtschulen – und seit 2008 auch die der Weiterbildungskollegs – 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 **Schwerpunktthemen 2020** 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**:

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



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

Sollten nach Erscheinen dieses Bandes noch wichtige Änderungen in der Abiturprüfung 2020 vom Ministerium für Schule und Weiterbildung bekannt gegeben werden, finden Sie aktuelle Informationen dazu im Internet unter:

[www.stark-verlag.de/pruefung-aktuell](http://www.stark-verlag.de/pruefung-aktuell)

Wir wünschen Ihnen viel Erfolg bei der Abiturprüfung!

Ihr Stark Verlag



# 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/](http://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](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 **fachspezifischen inhaltlichen Schwerpunkte und Fokussierungen für das Physikabitur 2019** zeigen die beiden nachfolgenden Tabellen für Leistungs- und Grundkurs.

*Leistungskurs: Inhaltliche Schwerpunkte 2019 und Fokussierungen 2019 (fett-kursiv)*

Relativitätstheorie	Elektrik	Quantenphysik	Atom-, Kern- und Elementarteilchenphysik
Konstanz der Lichtgeschwindigkeit	Eigenschaften elektr. Ladungen und ihrer Felder	Licht und Elektronen als Quantenobjekte	Atomaufbau
Problem der Gleichzeitigkeit	Bewegung von Ladungsträgern in elektrischen und magnetischen Feldern	Welle-Teilchen-Dualismus und Wahrscheinlichkeitsinterpretation <i>Durchgang eines Quantenobjekts durch einen Doppelspalt</i>	Ionisierende Strahlung <i>Eigenschaften ionisierender Strahlung und ihre Nutzung in Wissenschaft und Medizin</i>

Zeitdilatation und Längenkontraktion	Elektromagnetische Induktion	Quantenphysik und klassische Physik <i>Durchgang eines Quantenobjekts durch einen Doppelspalt</i>	Radioaktiver Zerfall
Relativistische Massenzunahme	Elektromagnetische Schwingungen und Wellen		Kernspaltung und Kernfusion <i>Eigenschaften ionisierender Strahlung und ihre Nutzung in Wissenschaft und Medizin</i>
Energie-Masse-Beziehung <i>Vorgänge in Beschleunigern</i>			Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen
Einfluss d. Gravitation auf die Zeitmessung			

*Grundkurs: Inhaltliche Schwerpunkte 2019 und Fokussierungen 2019 (fett-kursiv)*

Quantenobjekte	Elektrodynamik	Strahlung u. Materie	Relativität v. Raum u. Zeit
Elektron und Photon (Teilchen-/Wellen- aspekt) <i>Gewinnung von Erkenntnissen über das Elektron</i>	Spannung und elektrische Energie	Spektrum der elektromagnetischen Strahlung	Konstanz der Lichtgeschwindigkeit
Quantenobjekte und ihre Eigenschaften <i>Gewinnung von Erkenntnissen über das Elektron</i>	Induktion	Energiequantelung in der Atomhülle	Zeitdilatation
	Spannungswandlung	Ionisierende Strahlung <i>Ionisierende Strahlung in Wissenschaft u. Medizin</i>	Veränderlichkeit der Masse
		Kernumwandlung <i>Ionisierende Strahlung in Wissenschaft u. Medizin</i>	Energie-Masse-Äquivalenz
		Standardmodell der Elementarteilchen	

In der folgenden tabellarischen **Inhaltsübersicht** zu den Abiturprüfungen der vergangenen Jahre im Leistungskurs sind die Inhaltsfelder mit Fokussierungen 2019 dunkelgrau hervorgehoben. Beachten Sie, dass die Aufgaben des Zentralabiturs 2016 nach den Vorgaben des alten Lehrplans konstruiert wurden. Änderungen betreffen insbesondere den Grundkurs, da hier nur noch eine Gesamtaufgabe gestellt wird (statt bis 2016 zwei voneinander unabhängige Aufgaben).



**Abiturprüfung Physik 2018 (Nordrhein-Westfalen) – Leistungskurs**  
**Aufgabe 2: Teilchen- und Welleneigenschaften von Licht**

## 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

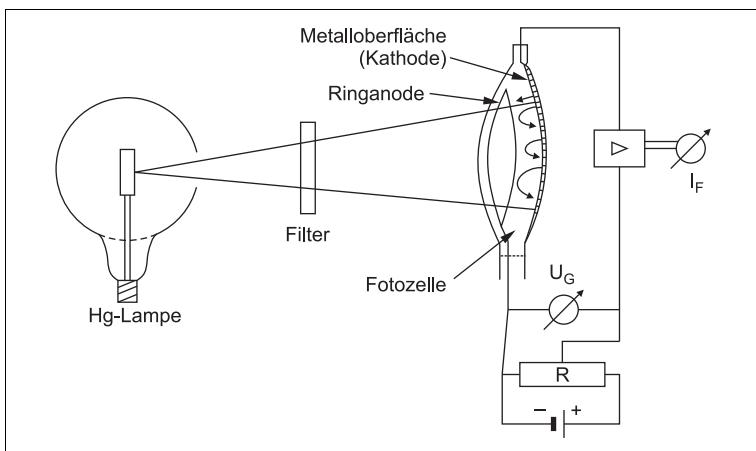


Abb. 1: Experiment zum äußeren Fotoeffekt

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:

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

Für die kinetische Energie der schnellsten Photoelektronen 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 eingestrahlten Lichts und  $E_A$  die Austrittsarbeit bzw. Ablöseenergie des Elektrons.

Albert Einstein interpretierte im Jahr 1905 den Photoeffekt 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 Photoelektronen 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 Photoelektronen (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 $f_G$	$4,69 \cdot 10^{14}$ Hz	$7,74 \cdot 10^{14}$ Hz	$1,14 \cdot 10^{14}$ 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  $\lambda$  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 verwendeten 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

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

#### Teilaufgabe 2.1 b

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

#### *Teilaufgabe 2.2 a*

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

#### *Teilaufgabe 2.2 b*

- ➊ Beachten Sie die geforderte Einheit für die kinetische Energie, eine Rechnung ist somit eigentlich gar nicht notwendig.
- ➋ 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*

- ➊ Beachten Sie, dass Sie die Achsen korrekt beschriften.
- ➋ Beachten Sie auch die folgenden Aufgabenteile (Bestimmung der Austrittsarbeit), damit Sie das Koordinatensystem hinreichend groß zeichnen.
- ➌ 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*

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

#### *Teilaufgabe 2.2 e*

- ➊ Die Formel zur Berechnung von  $h$  finden Sie (nach leichten Umformungen) etwas weiter oben.
- ➋ 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 Sekundärstufe 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 Photoelektronen mit der Intensität des Lichts ansteigen, da durch die höhere Intensität mehr Energie transportiert und übertragen werden müsste, wodurch die maximale Energie der Photoelektronen 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 Photoelektronen 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  $E_{kin} = e \cdot U_{G,max}$  erreichen die schnellsten Elektronen den Anodenring gerade nicht mehr, der Fotostrom ist also null. Somit ist  $U_{G,max}$  ein Maß für die kinetische Energie dieser Elektronen.

- b) Entsprechend der angegebenen Formel  $E_{kin} = e \cdot U_{G,max}$  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:

$\lambda$ in nm	578	491	436	405
$U_{G,max}$ 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<sub>kin</sub>-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:

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

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:

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

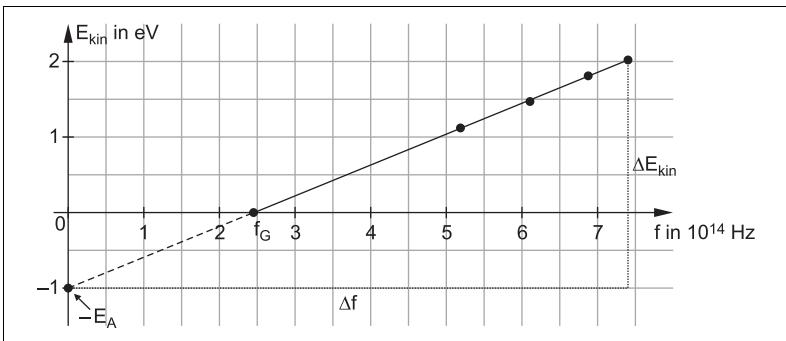


Abb. 3

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 Steigungsrichtungsdreiecks 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<sub>kin</sub>-Verläufe** von z. B. drei Kathodenmaterialien skizziert.

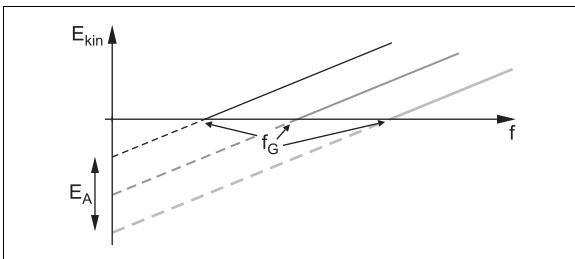


Abb. 4

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,  $E_{kin} = 0$ . Einsetzen dieser Bedingung in die angegebene Formel und Umformen nach  $E_A$  ergibt:

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

### 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 $f_G$	$4,69 \cdot 10^{14}$ Hz	$7,74 \cdot 10^{14}$ Hz	$1,14 \cdot 10^{14}$ Hz
Ablöseenergie $E_A$	1,94 eV	3,20 eV	4,71 eV
$h$	$4,136 \cdot 10^{-15}$ eVs $6,627 \cdot 10^{-34}$ Js	$4,134 \cdot 10^{-15}$ eVs $6,623 \cdot 10^{-34}$ Js	$4,132 \cdot 10^{-15}$ eVs $6,619 \cdot 10^{-34}$ 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  $6,626 \cdot 10^{-34}$  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:

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

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

Bei dem Experiment setzt sich die Gesamtenergie eines Photons einerseits zusammen aus der Photonenergie  $E_{ph} = h \cdot f$  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  $E_{ph} = h \cdot f$  vergrößern muss.



© **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**