



SACHSEN-ANHALT

Ministerium für Bildung

SCHRIFTLICHE ABITURPRÜFUNG 2026

PHYSIK (ERHÖHTES ANFORDERUNGSNIVEAU)

Prüfungsaufgaben

Arbeitszeit einschließlich Auswahlzeit:

300 Minuten

Es sind drei Aufgaben zu bearbeiten.

Kreuzen Sie die drei Aufgaben an, die bewertet werden sollen.

Bestätigen Sie Ihre Auswahl mit Ihrer Unterschrift.

Aufgabe 1: Feuchtigkeitsmessung von Getreide (*Aufgabe mit fachpraktischem Anteil*) ☐

Aufgabe 2: Kalibrierung einer Hall-Sonde ☐

Aufgabe 3: Fraunhofer und der Beginn der Astrospektroskopie ☐

Aufgabe 4: Photonenantrieb ☐

Name, Vorname: _____

Unterschrift des Prüflings: _____

Aufgabe 1: Feuchtigkeitsmessung von Getreide

In dieser Aufgabe wird ein vereinfachtes Messprinzip zur Bestimmung der Feuchtigkeit von Getreide (Kornfeuchte) thematisiert. Dabei wird ein Plattenkondensator eingesetzt.

	BE
1 Fachpraktischer Teil	
Damit ein Kondensator zur Kornfeuchtemessung benutzt werden kann, muss seine Kapazität, zum Beispiel über einen Entladevorgang, bestimmt werden. Dieses Verfahren soll in einem Schülerexperiment nachvollzogen werden.	
a Bauen Sie das Experiment unter Beachtung der Hinweise im Material 1 auf und führen Sie es durch. <i>Hinweis: Falls keine Ergebnisse aus der experimentellen Untersuchung gewonnen werden konnten, können Ersatzmesswerte bei der Fachlehrkraft angefordert werden. Entsprechend den nicht erbrachten Leistungen werden bis zu 8 Bewertungseinheiten nicht gegeben.</i>	8
b Berechnen Sie unter Verwendung des Mittelwertes $\overline{t_E}$ der drei Entladezeiten die Kapazität des Kondensators (M 1). Leiten Sie die in Material 1 gegebene Gleichung zur Berechnung der Kapazität her.	6
c Nennen Sie zwei Einflussgrößen, die zu Unsicherheiten bei der Kapazitätsbestimmung führen können. Erläutern Sie deren Auswirkungen auf die berechnete Kapazität.	4
2 In einem Messgerät zur Bestimmung der Kornfeuchte wird das Messprinzip aus dem Experiment in Aufgabe 1 angewandt. Der Begriff Kornfeuchte wird im Material 2 näher erklärt.	
a Erläutern Sie unter Einbeziehung des Materials 3, dass durch die Messung der Entladezeit t_E des Kondensators indirekt die Kornfeuchte des Getreides im Bereich zwischen 8 % und 40 % ermittelt werden kann.	2
b Es wurde eine Entladezeit $t_E = 604 \mu\text{s}$ gemessen. Ermitteln Sie das Kornfeuchteintervall, das sich unter Berücksichtigung der Messunsicherheit der Kapazitätsermittlung (M 3) ergibt.	8
c Erklären Sie unter Verwendung des Materials 3, dass sich bei einer Vervielfachung der Fläche des Plattenkondensators mit dem Faktor k die Steigung in der grafischen Darstellung (Abb. 3, M 3) mit dem Faktor $\frac{1}{k}$ verändert. Erklären Sie damit, dass eine derartige Plattenvergrößerung keine Auswirkung auf das ermittelte Kornfeuchteintervall hat. Alle anderen Bedingungen sollen dabei gleich bleiben.	4

Fortsetzung auf Seite 3

3 Ein Landwirt besitzt einen großen Getreidespeicher. Der Speicher soll mit frischem Getreide gefüllt werden, das möglicherweise getrocknet werden muss. Beim Befüllen des Kunststoffgefäßes des kapazitiven Kornfeuchtemessgerätes weicht der Landwirt von der Bedienungsanleitung (M 3) ab, wodurch es

- (1) in einem Fall zu einer zu starken Verdichtung des Getreides,
- (2) in einem anderen Fall zu einer unvollständigen Getreidefüllung

im Zwischenraum des Plattenkondensators kommt.

a Erklären Sie unter Verwendung des Materials 3, dass sich im Fall (1) die Kapazität des Plattenkondensators vergrößert und sich im Fall (2) die Kapazität verkleinert. Formulieren Sie dazu unter Verwendung der Fachsprache kausal korrekt strukturiert eine Schrittfolge von Argumenten.

4

b Leiten Sie unter Verwendung der Materialien 2 und 3 für beide Fälle (1) und (2) jeweils einen Nachteil ab, der sich für den Landwirt ergeben könnte.

4

Material zur Aufgabe 1: Feuchtigkeitsmessung von Getreide

Aufgabe 1, M 1:

Hinweise zum Experiment in Aufgabe 1

◇ Folgende Geräte und Bauteile stehen zur Verfügung:

- Kondensator unbekannter Kapazität C
- Widerstand R
- Gleichspannungsquelle
- Spannungsmessgerät
- Ein-/Aus-Schalter
- Stoppuhr
- Kabel in ausreichender Anzahl

Hinweis: R und die Einstellung an der Spannungsquelle werden von der Fachlehrkraft vorgegeben.

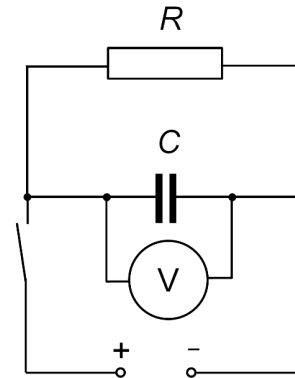


Abb. 1: Schaltplan zur Bestimmung der Kapazität eines Kondensators.

Quelle: Eigene Darstellung

- ◇ Bauen Sie das Experiment unter Verwendung des Schaltplans gemäß der Abbildung 1 auf. Achten Sie dabei auf die korrekte Polung des Kondensators.
- ◇ Stellen Sie die Betriebsspannung U_B an der Spannungsquelle ein und laden Sie den Kondensator ca. 10 s auf.
- ◇ Erfassen Sie die Spannung U_0 am Kondensator und berechnen Sie $\frac{1}{3}U_0$.
- ◇ Messen Sie diejenige Entladezeit t_E , in der sich die Spannung am Kondensator von U_0 auf $\frac{1}{3}U_0$ verringert hat.
- ◇ Führen Sie die Messung insgesamt dreimal durch.
- ◇ Protokollieren Sie alle Messwerte und sonstige Größenangaben, die zur Bestimmung der Kapazität des Kondensators erforderlich sind.

Hinweis: Für die Kapazität des Kondensators gilt: $C = \frac{t_E}{R \cdot \ln(3)}$

Aufgabe 1, M 2: Kornfeuchte

Als Kornfeuchte F wird der prozentuale Anteil des Wassers bezeichnet, der sich in einem Getreidekorn befindet.

Bevor Getreide für längere Zeit gelagert wird, muss es ausreichend getrocknet sein, sodass die Kornfeuchte weniger als 14,5 % beträgt.

Bei nicht ausreichender Trocknung des Getreides können durch Schimmelbildung und Fäulnisprozesse schädliche Substanzen für Mensch und Tier entstehen. Die Trocknung kann hohe Energiekosten erzeugen.

Quelle: in Anlehnung an: Stoll, M. (2017, 30. Juni). *Wie funktioniert die kapazitive Feuchtemessung?*
<https://www.acoweb.de/wie-funktioniert-eine-kapazitive-feuchtemessung>
(Zugriff am: 09.09.2025)

Aufgabe 1, M 3: Anordnung zur kapazitiven Messung der Kornfeuchte

Die Kornfeuchte F soll mithilfe einer Kondensator-entladung ermittelt werden.

Dazu wird ein dünnwandiges Kunststoffgefäß vollständig mit Getreide ausgefüllt. An zwei gegenüberliegenden Flächen sind außerhalb zwei Metallplatten P_1 und P_2 befestigt, wie in Abbildung 2 gezeigt. Dieses System bildet einen Plattenkondensator.

Plattenfläche: $A = 8,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$

Plattenabstand: $d = 10 \text{ mm}$

Der Plattenkondensator wird auf eine Spannung U_0 aufgeladen und dann über einen Widerstand $R = 10 \text{ M}\Omega$ entladen. Die Entladezeit t_E vom Beginn des Entladevorgangs bis zum Zeitpunkt, in dem am Plattenkondensator die Spannung $\frac{1}{3}U_0$ anliegt, ist ein Maß für die Kornfeuchte.

Bedienungsanleitung für die Befüllung der Messanordnung

Das Einfüllen der Getreidekörner in das dünnwandige Kunststoffgefäß zwischen den Platten des Plattenkondensators in Abbildung 2 muss stets in gleicher Weise erfolgen. Durch leichtes Klopfen des befüllten Gefäßes auf einer Unterlage verteilen sich die Körner gleichmäßiger und rutschen nach. Größere Lufteinschlüsse können so vermieden werden. Schließlich wird der durch das Nachfüllen von Getreidekörnern entstandene Berg am oberen Gefäßrand sauber abgestreift.

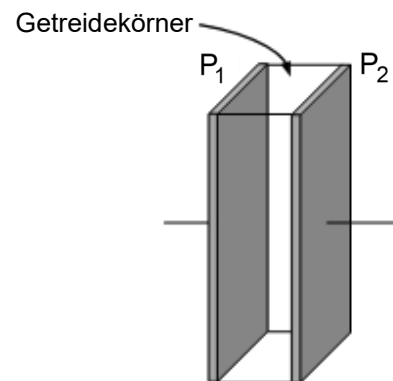


Abb. 2:
Kondensator zur Messung der Kornfeuchte mit quaderförmigem Kunststoffgefäß (schematisch).

Quelle: Eigene Darstellung

Fortsetzung auf Seite 6

Zusammenhang zwischen Kornfeuchte und Kapazität

Der Zusammenhang zwischen der Kornfeuchte und der Kapazität des Plattenkondensators ist vereinfacht in Abbildung 3 dargestellt.

Bei einer ordnungsgemäßen Befüllung mit extrem trockenem Getreide beträgt die Dielektrizitätszahl $\epsilon_r = 2,3$. Das Getreide besitzt in diesem Fall eine Kornfeuchte von 8 %.

Mit extrem feuchtem Getreide ergibt sich eine Dielektrizitätszahl $\epsilon_r = 10$ und die Kornfeuchte beträgt 40 %.

Der Einfluss des Kunststoffes als Dielektrikum wird vernachlässigt.

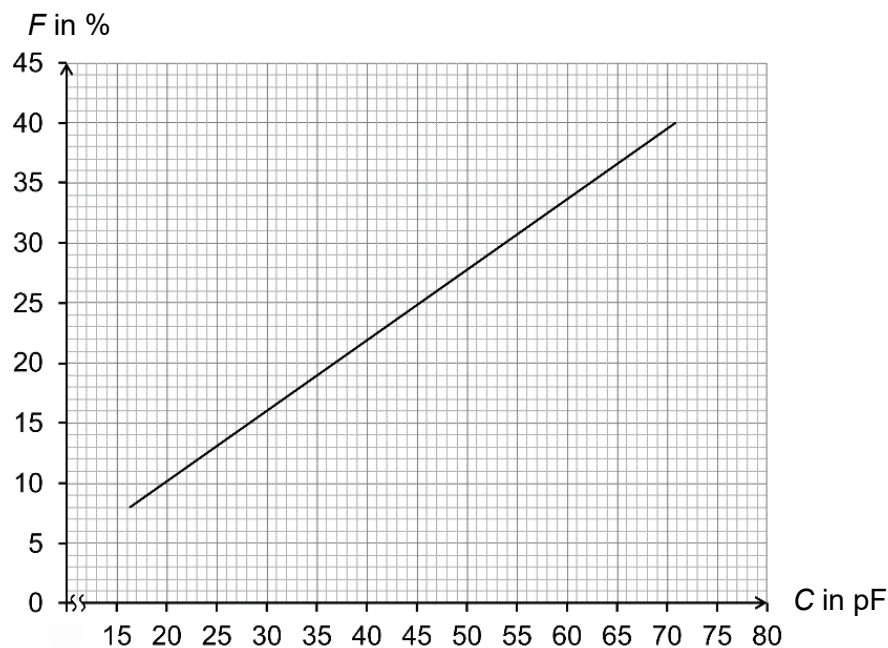


Abb. 3:

Zusammenhang $F(C)$ für den Plattenkondensator der Anordnung in Abbildung 2.

Messunsicherheit

Vereinfachend soll für alle Kapazitätsermittlungen von einer relativen Messunsicherheit von 5 % ausgegangen werden. Dies bedeutet, dass die wahren Werte für die Kapazität um 5 % von den ermittelten Werten nach oben oder unten abweichen können.

Quelle: Texte und Abbildung 3 in Anlehnung an: Stoll, M. (2017, 30. Juni). *Wie funktioniert die kapazitive Feuchtemessung?* <https://www.acoweb.de/wie-funktioniert-eine-kapazitive-feuchtemessung> (Zugriff am: 09.09.2025)

Aufgabe 2: Kalibrierung einer Hall-Sonde

Mithilfe von Hall-Sonden kann man die magnetische Flussdichte von Magnetfeldern zuverlässig bestimmen. Dafür müssen Hall-Sonden kalibriert werden. Die Kalibrierung soll sicherstellen, dass das Messgerät präzise und reproduzierbare Messergebnisse liefert.

	BE
1 Ein elektrischer Leiter wird im Inneren einer Spule senkrecht zu den Feldlinien bewegt (M 1).	
a Skizzieren Sie die wesentlichen Kräfte, die zum Zeitpunkt t_1 auf eines der in Abbildung 1 dargestellten Elektronen wirken, und benennen Sie diese. Begründen Sie mithilfe der wirkenden Kräfte, dass die maximale Spannung abhängig von der Geschwindigkeit v des Leiters ist.	8
b Berechnen Sie die maximale Spannung zwischen den Enden des bewegten Leiters im homogenen Magnetfeld.	2
2 Die Funktion der Hall-Sonde beruht ebenfalls auf der Ablenkung von Elektronen im Magnetfeld. Die Hall-Sonde dient zur Messung der magnetischen Flussdichte, gibt aber eine Spannung U_H aus.	
a Erläutern Sie mithilfe des Materials 2 die Entstehung der Hall-Spannung U_H . Die gegebene Hall-Sonde wird in einer langen Spule platziert und die Hall-Spannung in Abhängigkeit von der Stromstärke in der Spule bestimmt (M 3).	4
b Zur Überführung der gemessenen Hall-Spannungen in magnetische Flussdichten soll die in Material 4 dargestellte Skala verwendet werden. Ergänzen Sie unter Verwendung von Material 3 die Beschriftung der Skala (Abb. 4, M 4) für die magnetische Flussdichte. Beschreiben Sie Ihr Vorgehen.	8
c Wird die an der Hall-Sonde angelegte Spannung U_0 vergrößert, vergrößert sich der Anstieg des Graphen im Diagramm (s. Abb. 3). Stellen Sie eine begründete Hypothese für die Ursachen dieser Änderung auf.	3
3 Das Magnetfeld der verwendeten Spule wird im Folgenden genauer untersucht (M 5).	
a Skizzieren Sie in Abbildung 5 das zu erwartende Feldlinienbild einer langen Spule.	3
b Das Magnetfeld der Spule wurde nun mithilfe einer Hall-Sonde vermessen. Stellen Sie die Messwerte in Tabelle 1 (M 5) in einem $B(x)$ – Diagramm dar. Interpretieren Sie den Graphenverlauf im Hinblick auf zwei Eigenschaften des Magnetfeldes der stromdurchflossenen Spule.	8
c Geben Sie eine Voraussetzung an, unter der sich die verwendete Spule zur Kalibrierung der Hall-Sonde entsprechend Teilaufgabe 2b eignet. Begründen Sie Ihre Angabe.	4

Material zur Aufgabe 2: Kalibrierung einer Hall-Sonde

Aufgabe 2, M 1:

Bewegter Leiter im Magnetfeld

Ein Leiter der Länge $\ell = 2,0 \text{ cm}$ wird in das homogene Magnetfeld einer Spule senkrecht zu den Feldlinien mit der konstanten Geschwindigkeit $v = 2,0 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ bewegt (s. Abb. 1).

Die Flussdichte des Magnetfelds beträgt $B = 0,25 \text{ mT}$. Die Abbildung 1 zeigt den Leiter zu zwei verschiedenen Zeitpunkten t_0 und t_1 .

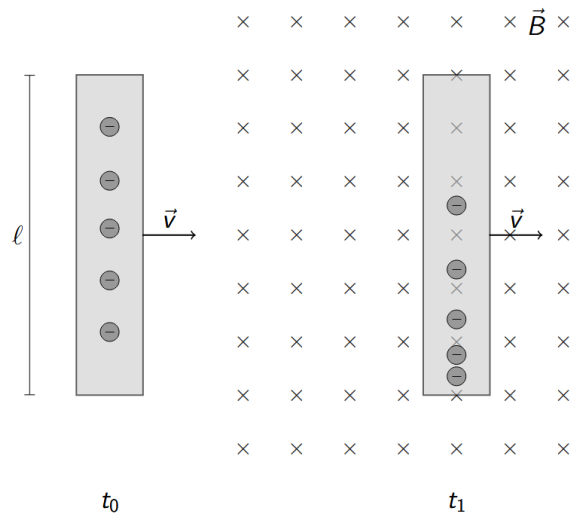


Abb. 1:

Position des Leiters zu den verschiedenen Zeitpunkten t_0 und t_1 .

Quelle: Eigene Darstellung

Aufgabe 2, M 2:

Prinzipieller Aufbau einer Hall-Sonde

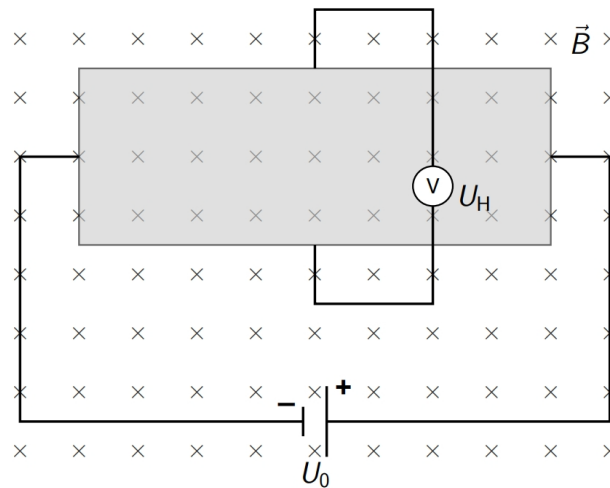


Abb. 2:

Ein Metallplättchen (grau) befindet sich in einem homogenen Magnetfeld. Am Metallplättchen liegt eine Gleichspannung U_0 an.

Quelle: Eigene Darstellung

Aufgabe 2, M 3:

Hall-Spannung in Abhängigkeit vom Spulenstrom

Ein Metallplättchen befindet sich innerhalb einer stromdurchflossenen, mit Luft gefüllten Spule.

Von der Spule sind folgende Parameter bekannt

- ◇ Länge der Spule: $\ell = 20 \text{ cm}$,
- ◇ Windungszahl: $N = 20$.

Der Strom durch die Spule wird mit I_S bezeichnet.

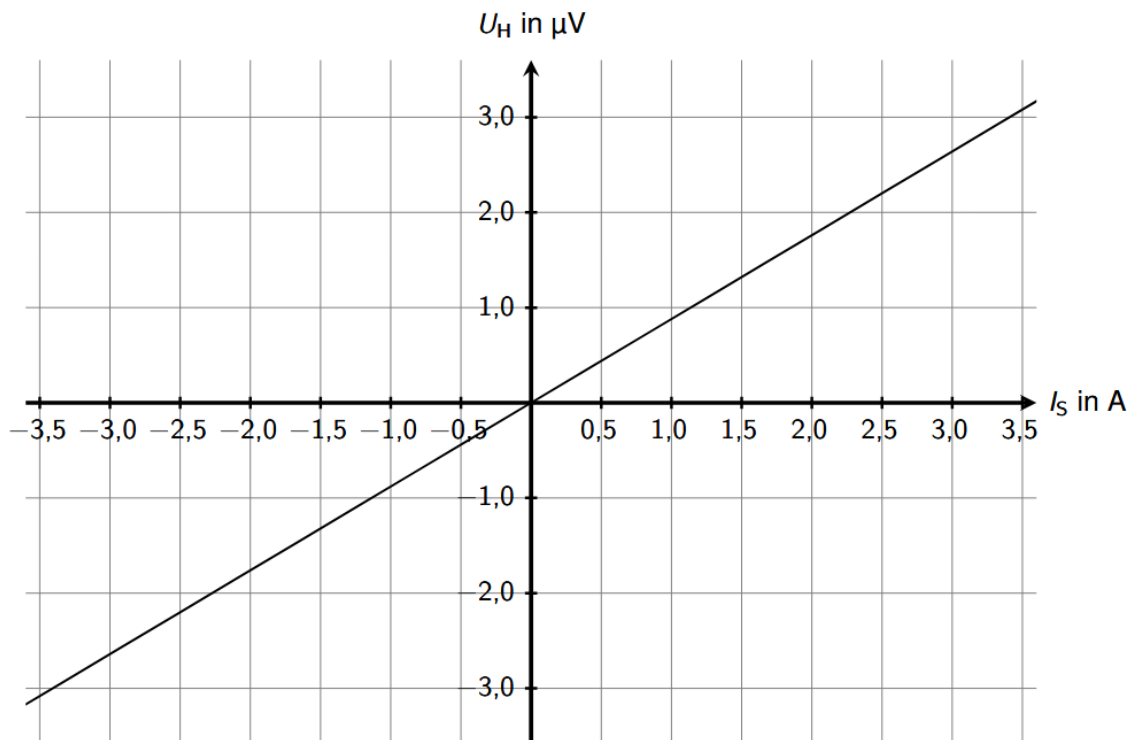


Abb. 3:

Hall-Spannung am Metallplättchen in Abhängigkeit vom Spulenstrom I_S .

Quelle: Eigene Darstellung

Aufgabe 2, M 4:

Skalierung Hall-Sonde

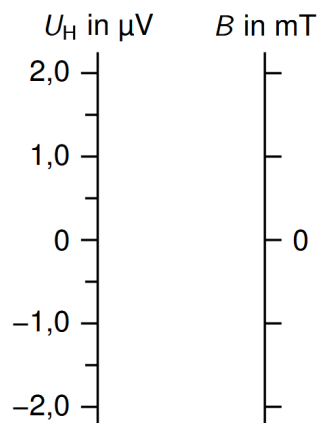


Abb. 4:

Skalierung der Hall-Sonde.

Quelle: Eigene Darstellung

Aufgabe 2, M 5:
Magnetfeld einer langen Zylinderspule

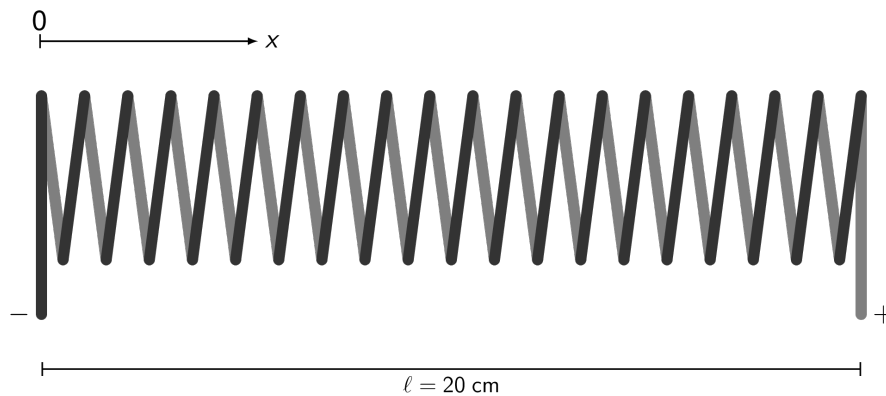


Abb. 5:

Schematische Darstellung einer stromdurchflossenen, mit Luft gefüllten Spule mit $N = 20$. Die dunkleren Windungsabschnitte liegen vor den helleren Abschnitten.

Quelle: Eigene Darstellung

Tab. 1:

Messung der magnetischen Flussdichte in Abhängigkeit von der Position des Sensors entlang der Längsachse im Inneren der Spule.

Quelle: Eigene Werte

x in mm	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
B in mT	0,180	0,227	0,259	0,273	0,279	0,280	0,281	0,272	0,261	0,231	0,168

Aufgabe 3: Fraunhofer und der Beginn der Astrospektroskopie

Die Astrospektroskopie umfasst die Analyse der Wellenlängen der Strahlung astronomischer Objekte. Ausgangspunkt war die Entdeckung vieler feiner, dunkler Linien im Spektrum der Sonne durch Joseph Fraunhofer.

	BE
1 Man kann sogenannte „Fraunhofer’sche Linien“ z. B. in Spektren beobachten, die man durch die Interferenz des Sonnenlichts an einem optischen Gitter erzeugt hat (M 1). Zur Vereinfachung wird die Interferenz von Licht an optischen Gittern zunächst für monochromatisches Licht betrachtet.	
a Die Abbildungen 2a bis 2c zeigen Interferenzmuster, die entstehen, wenn ein optisches Gitter unter sonst gleichen Bedingungen mit verschiedenfarbigem Licht bestrahlt wird (M 2). Ordnen Sie die Abbildungen 2a bis 2c den Farben Rot, Blau und Grün zu und begründen Sie Ihre Zuordnung.	4
Im Material 3 ist ein Versuch zur Interferenz monochromatischen Lichts eines Laserpointers an einem optischen Gitter dokumentiert. Auf dem Typenschild des Laserpointers ist die Wellenlänge $\lambda = 630 \text{ nm}$ angegeben. Es soll nun die Wellenlänge des im Versuch verwendeten Laserlichts experimentell bestimmt werden.	
b Ermitteln Sie diese Wellenlänge möglichst genau. Wählen Sie dazu aus Abbildung 3 zwei geeignete Leuchtpunkte begründet aus.	7
c Durch die im Material 3 angegebenen Messunsicherheiten lässt sich für das dargestellte Interferenzmuster eine kleinste und eine größte Wellenlänge des Laserlichts bestimmen. Ermitteln Sie diese und entscheiden Sie, ob die Angabe zur Wellenlänge auf dem Typenschild des Laserpointers innerhalb des sich ergebenden Intervalls liegt.	6
<i>Hinweis: Es genügt die Betrachtung der in Teilaufgabe 1b gewählten Leuchtpunkte.</i>	
2 Das kontinuierliche Spektrum der Sonne soll modellhaft behandelt werden. Durch die Bestrahlung des optischen Gitters mit dem weißen Licht einer Experimentierleuchte entsteht das in Material 4 dargestellte Schirmbild.	
a Erklären Sie das Zustandekommen des Schirmbildes im Bereich A und in den Bereichen B .	5

Fortsetzung auf Seite 12

- Im Bereich ● des Schirmbildes beobachtet man eine Veränderung des Farbeindrucks, da sich zum Beispiel die Maxima 2. Ordnung roten Lichts mit den Maxima 3. Ordnung grünen Lichts überlagern. Somit ist die Bestimmung von Wellenlängen im Bereich ● nicht mehr eindeutig.
- b Überprüfen Sie durch Betrachtung der Beugungswinkel, ob es bei der Verwendung eines Gitters der Gitterkonstante $g = 3,70 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ im Bereich ● zur beschriebenen Überlagerung von rotem Licht mit grünem Licht der Wellenlänge $\lambda = 510 \text{ nm}$ kommt. 3
- c Beurteilen Sie, ob durch Tausch des Gitters mit einem Gitter anderer Gitterkonstante das Zusammenfallen von Maxima verschiedener Farben verhindert werden kann. 4
- 3 Aus den von Joseph Fraunhofer 1814 beobachteten dunklen Linien im kontinuierlichen Spektrum der Sonne konnte darauf geschlossen werden, dass in den äußeren Schichten der Sonne Wasserstoff existieren muss.
- a Unter geeigneten Bedingungen emittiert atomarer Wasserstoff Licht einzelner Wellenlängen (M 5).
Erläutern Sie unter Verwendung eines qualitativen Energieniveauschemas die prinzipielle Entstehung eines derartigen Emissionsspektrums. 6
- b Erklären Sie unter Berücksichtigung der Materialien 5 und 6 die Entstehung der Absorptionslinien von Wasserstoff und Sauerstoff im kontinuierlichen Spektrum des Sonnenlichts, wenn es von der Erde aus beobachtet wird. 5

Material zur Aufgabe 3: Fraunhofer und der Beginn der Astrospektroskopie

Aufgabe 3, M 1: Optische Gitter

Ein Gitter ist vereinfacht gesagt eine Aneinanderreihung vieler Doppelspalte, wobei der Abstand benachbarter Spaltmitten, auch Gitterkonstante genannt, jeweils g beträgt (s. Abb. 1). Für ein Gitter mit 270 Spalte pro mm beträgt der Spaltmittenabstand

$$g = \frac{1}{270} \text{ mm}.$$

Für die Beugungswinkel α_k der Maxima k -ter Ordnung, die bei der Interferenz von Licht der Wellenlänge λ an einem Gitter mit der Gitterkonstante g entstehen, gilt die gleiche Beziehung wie beim Doppelspalt: $\sin \alpha_k = \frac{k \cdot \lambda}{g}$



Abb. 1:
Anordnung der Spalte
beim Gitter.
Quelle: Eigene Darstellung

Aufgabe 3, M 2: Interferenz von verschiedenfarbigem monochromatischen Licht

In den Abbildungen 2a bis c sind Schirmbilder für drei verschiedene Lichtfarben dargestellt. Die hellen Streifen sind die Interferenzmaxima, die für die jeweilige Farbe entstehen.



Abb. 2a:
Schirmbild für Farbe 1.
Quelle: Eigene Darstellung

Abb. 2b:
Schirmbild für Farbe 2.
Quelle: Eigene Darstellung

Abb. 2c:
Schirmbild für Farbe 3.
Quelle: Eigene Darstellung

Aufgabe 3, M 3: Interferenz von monochromatischem Licht

Das monochromatische Licht eines Laserpointers fällt senkrecht auf ein optisches Gitter mit $g = \frac{1}{270} \text{ mm}$. Auf einem Schirm, der sich im Abstand von 60,0 cm parallel zum Gitter befindet, wird ein Interferenzmuster als Abfolge heller Leuchtpunkte beobachtet (s. Abb. 3). Die Entfernung zwischen Gitter und Schirm kann bis auf $\pm 0,05 \text{ cm}$, die Abmessungen am Interferenzmuster auf $\pm 0,2 \text{ cm}$ genau bestimmt werden.

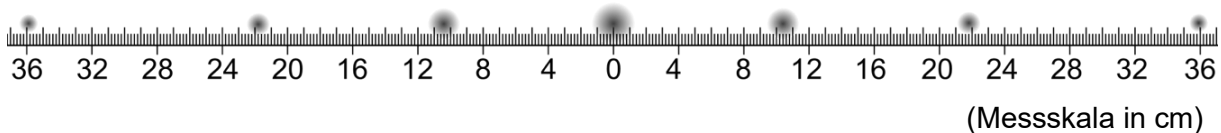


Abb. 3:
Interferenzmuster des Laserlichts auf einem Schirm mit Messskala.
Quelle: Eigene Darstellung

Aufgabe 3, M 4:
Interferenz von weißem Licht

Das Spektrum des weißen Lichts einer Experimentierleuchte wird in einem Versuchsaufbau mit einem optischen Gitter auf einem Schirm abgebildet. In der Abbildung 4 ist ein Abschnitt des dabei entstehenden Schirmbildes dargestellt, in dem die Bereiche **A**, **B** und **C** jeweils mit einem schwarzen Rahmen gekennzeichnet sind.

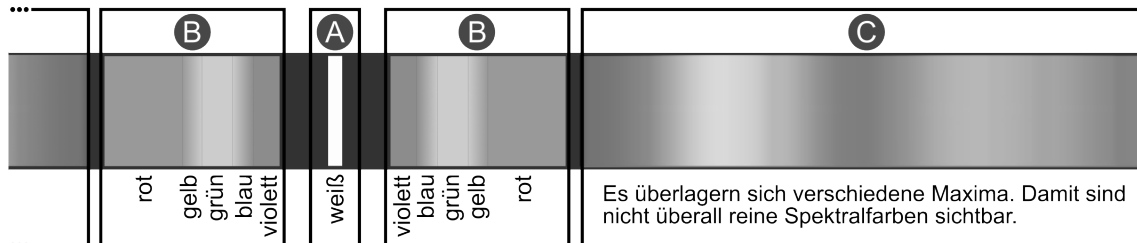


Abb. 4:
Schirmbild für die Interferenz weißen Lichts an einem Gitter (vereinfachte Darstellung). In den Bereichen **B** sind die Spektralfarben durch unterschiedliche Grautöne dargestellt.

Quelle: Eigene Darstellung

Aufgabe 3, M 5:
Emissionslinien von atomarem Wasserstoff

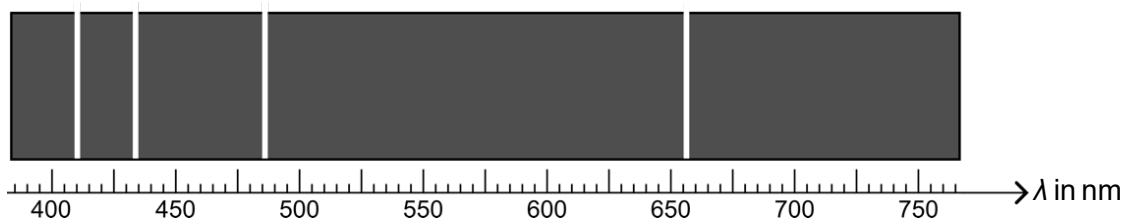


Abb. 5:
Emissionslinienspektrum von Wasserstoff.

Quelle: In Anlehnung an LEIFIphysik. *Atomarer Energieaustausch*. <https://www.leifiphysik.de/atomphysik/atomarer-energieaustausch/versuche/emissionsspektrum-von-atomarem-wasserstoff-mit-der-balmer-roehre>
(Zugriff am: 09.09.2025)

Aufgabe 3, M 6: Spektrum des Sonnenlichts

Auf dem Weg des Sonnenlichts von der Sonne zur Erde (s. Abb. 6a) kann es in verschiedenen Bereichen zur Absorption von Strahlung kommen. Das im Inneren der Sonne entstehende Licht weist ein kontinuierliches Spektrum auf, durchquert dann äußere, gasförmige Schichten im Randbereich der Sonne, in denen es bei Wechselwirkung mit Atomen zur quantenhaften Absorption kommt. Bevor es auf der Erdoberfläche detektiert wird, muss das Licht der Sonne die Erdatmosphäre durchqueren.

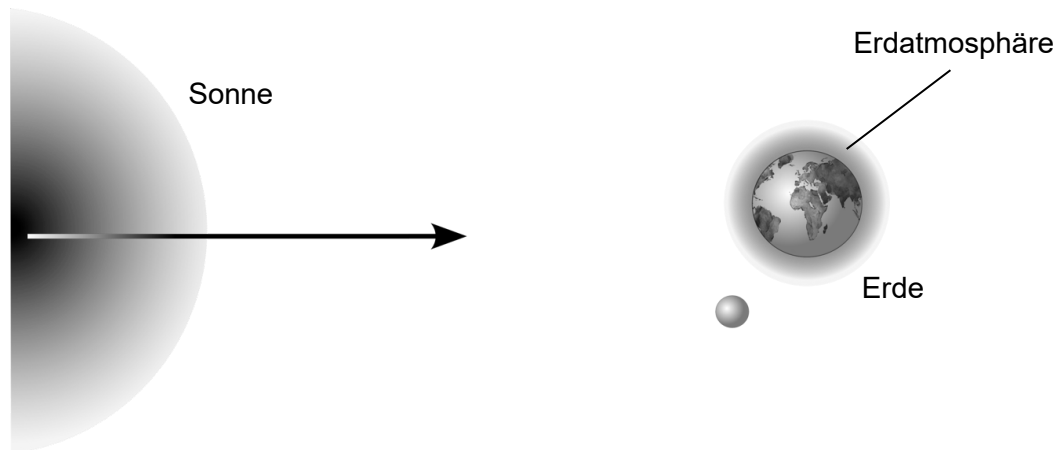


Abb. 6a:
Der Weg des Lichts der Sonne zur Erde (Abb. nicht maßstäblich).
Quelle: Eigene Darstellung

In der Abbildung 6b ist ein stark vereinfachtes Absorptionslinienspektrum der Sonne dargestellt. Die markantesten Linien bezeichnete Fraunhofer mit Buchstaben. Das Auftreten der Linien A und B kann darauf zurückgeführt werden, dass die Erdatmosphäre Sauerstoff enthält.

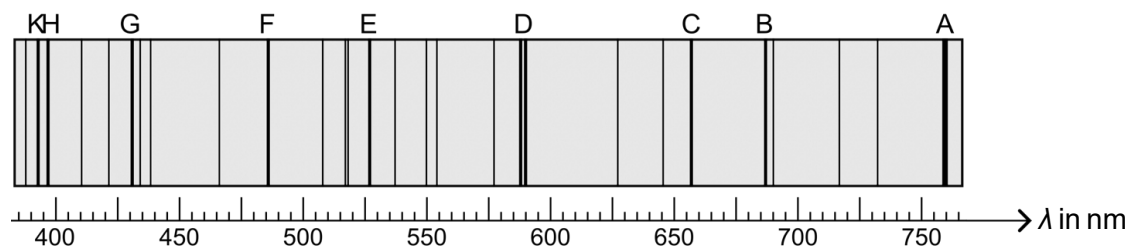


Abb. 6b:
Stark vereinfachte Darstellung des von der Erde aus aufgenommenen Absorptionslinienspektrums der Sonne.

Quelle: Text und Abb. 6b in Anlehnung an
Meschede, D. (Hrsg.) (2006). *Gerthsen Physik* (23. Aufl.). Springer-Verlag, S. 584,
NIST. *NIST Atomic Spectra Database Lines Form*. https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html
(Zugriff am: 09.09.2025)
Fraunhoferlinie (2025, 06. Januar). Wikipedia. <https://de.wikipedia.org/wiki/Fraunhoferlinie>
(Zugriff am: 09.09.2025)

Aufgabe 4: Photonenantrieb

Ein Physikteam an der Universität Santa Barbara analysiert neuartige Antriebstechnologien für die Raumfahrt. Mithilfe von leistungsstarken Lasern könnten künftig Flüge zum Mars innerhalb weniger Wochen oder sogar Flüge zu anderen Sternsystemen möglich werden.

	BE
1 Der Antrieb soll mit Photonen erfolgen.	
a Erläutern Sie mithilfe des Photonenmodells die Eigenschaften des in Material 1 beschriebenen Laserlichts.	4
b Berechnen Sie die Energie in Elektronenvolt sowie den Impuls eines Photons, das durch den in Material 1 beschriebenen Laser emittiert wird. [Kontrollwerte: $E = 1,87 \cdot 10^{-19} \text{ J}$; $p = 6,25 \cdot 10^{-28} \frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{s}}$]	6
2 Durch den Antrieb (M 1) soll Impuls übertragen werden.	
a Berechnen Sie die Anzahl und den Gesamtimpuls der Photonen, die in einer Sekunde von der Laserkanone abgegeben werden. Gehen Sie davon aus, dass die dafür bereitgestellte Laserkanone eine Leistung von 30 GW in Form von Licht abgibt.	5
b Zwei Laserkanonen sind gleich gut für den Photonenantrieb geeignet, wenn die pro Sekunde emittierten Photonen denselben Gesamtimpuls haben. Überprüfen Sie, ob diese Bedingung erfüllt ist, wenn die beiden Laserkanonen Licht mit der gleichen Leistung, aber mit unterschiedlichen Wellenlängen λ_1 und λ_2 abgeben.	5
3 Für den Betrieb sind unterschiedliche Positionen der Laserkanone denkbar.	
a Erklären Sie unter Verwendung von Material 2, dass nicht alle Wellenlängen des emittierten Lichts für den Photonenantrieb in Frage kommen, wenn sich die Laserkanone auf der Erdoberfläche befindet. Geben Sie mithilfe des Diagramms in Material 2 jeweils eine Wellenlänge an, die bei einem Betrieb von der Erdoberfläche aus besonders geeignet bzw. besonders ungeeignet für den Photonenantrieb ist.	6
b Vergleichen Sie die beiden in Material 2 beschriebenen Positionen der Laserkanone hinsichtlich der Herausforderungen bei der technischen Umsetzung. Berücksichtigen Sie zwei unterschiedliche Aspekte.	6
4 Das Projekt ist umstritten.	
a Geben Sie eine für die Weiterentwicklung des Projekts physikalisch relevante Fragestellung an, die sich aus den Angaben in Material 3 ergibt.	2
b Diskutieren Sie ausgehend von dem Online-Zeitungsartikel (M 4), ob die Entwicklung eines Photonenantriebs für Weltraummissionen zweckmäßig ist. Berücksichtigen Sie ein Argument für und ein Argument gegen die Umsetzung des Projekts.	6

Material zur Aufgabe 4: Photonenantrieb

Aufgabe 4, M 1:

Laserlicht für den Photonenantrieb

Nach den Ideen des Physikteams der Universität Santa Barbara müssten für den Antrieb leistungsstarke Laser auf ein großes Segel ausgerichtet werden, das mit einem Raumschiff verbunden ist. Laserlicht ist besonders geeignet, weil das Lichtbündel eines Lasers sich nur verhältnismäßig wenig aufweitet und eine hohe Intensität aufweist. Darüber hinaus ist es monochromatisch. In dem geplanten Projekt für den Antrieb sollen die Laser infrarotes Licht der Wellenlänge $1,06\text{ }\mu\text{m}$ emittieren. Die Photonen übertragen ihren Impuls auf das Segel und beschleunigen damit das Raumschiff.

Weil ein einzelner Laserstrahl für den Antrieb nicht intensiv genug ist, muss aus einer Vielzahl einzelner Laser eine Laserkanone aufgebaut werden.

Quelle: Lubin, P. (2016). A Roadmap to Interstellar Flight. *JBIS*, 69, 40-72. <https://arxiv.org/pdf/1604.01356>

Aufgabe 4, M 2:

Mögliche Positionen der Laserkanone

In ihrer Veröffentlichung gehen die Wissenschaftler davon aus, dass sich die Laserkanone auf einer erdnahen Kreisbahn um die Erde bewegt. Dabei muss die Laserkanone ständig neu ausgerichtet werden, um das Segel des Raumschiffs zu treffen.

Es ist auch denkbar, mehrere Laserkanonen für den Photonenantrieb auf der Erdoberfläche aufzustellen. Eines der dabei auftretenden Probleme ist, dass die Erdatmosphäre Licht nicht vollständig durchlässt, wobei der Anteil der durchgelassenen Strahlung von der Wellenlänge abhängt (s. Abb. 2).

Quelle: Lubin (2016). Roadmap to Interstellar Flight. *JBIS*, 69, 40-72. <https://arxiv.org/pdf/1604.01356>

INHALT ENTFERNT

Abb. 1:

Photonenantrieb, ausgehend von einer Kreisbahn um die Erde. Abb. nicht maßstabsgerecht

Fortsetzung auf Seite 18

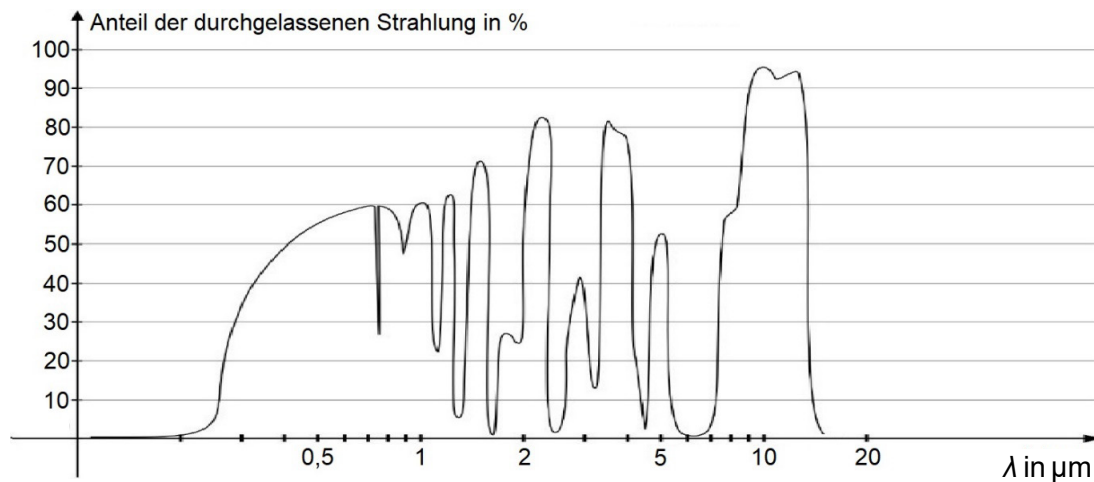


Abb. 2:

Anteil der von der Erdatmosphäre durchgelassenen elektromagnetischen Strahlung in Abhängigkeit von ihrer Wellenlänge.

Quelle: Darstellung in Anlehnung an: Carl von Ossietzky Universität Oldenburg (Hg.). SEOS eLearning Tutorials: Spektren der Erde. Verfügbar unter: <https://seos-project.eu/earthspectra/earthspectra-c04-p03.de.html> (Zugriff am 09.09.2025)

Aufgabe 4, M 3:

Die technische Umsetzung des Photonenantriebs

Ein Vorteil der Technologie ist, dass das Antriebssystem nicht in die Sonde eingebaut werden muss. Das spart Energie, weil deutlich weniger Masse beschleunigt werden muss.

Das größte Problem ist der Energiebedarf für den Antrieb. Selbst wenn nur eine ultraleichte unbemannte Sonde beschleunigt werden soll, muss die Laserkanone nach den Modellrechnungen der Wissenschaftler eine Leistung von 30 GW in Form von Licht abgeben. Um dies zu erreichen, wird eine elektrische Leistung von 70 GW benötigt. Im Vergleich dazu betrug der durchschnittliche Gesamtenergiebedarf eines privaten Haushalts im Jahr 2021 in Deutschland ca. 60 GJ.

Quelle: Text in Anlehnung an: Umweltbundesamt (2023). Energieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren. Verfügbar unter: umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren#entwicklung-des-end-energieverbrauchs-nach-sektoren-und-energietraegern (Zugriff am 09.09.2025) und Statista (2023). Anzahl der Haushalte in Deutschland nach Anzahl der Personen im Haushalt von 2000 bis 2022. de.statista.com/statistik/daten/studie/167169/umfrage/entwicklung-der-haushaltsgroessen-in-deutschland-seit-2000/ (Zugriff am 30.05.2023)

Aufgabe 4, M 4:

Auszug aus einem Zeitschriftenartikel über den Photonenantrieb

„Derart energieintensive Laserstrahlen könnten eine nur wenige Gramm schwere Minisonde dann aber binnen zehn Minuten auf ein Viertel der Lichtgeschwindigkeit beschleunigen. Danach würde die Sonde ohne weiteren Antrieb ungebremst durchs All rasen. Sie wäre nach 30 Minuten am Mars und nach [...] 20 Jahren bei Alpha Centauri. [...]“

Zuallererst aber müssten die Physiker Geldgeber finden, um ihr futuristisches Antriebskonzept erst einmal praktisch untersuchen zu können. Letztlich geht es dabei um die Frage, wie viele Milliarden die Menschheit bereit ist zu investieren, um ein paar Gramm Nutzlast zu bislang unerreichbaren Sternen schicken zu können.“

Hinweis: Bei Alpha Centauri handelt es sich um ein Sternsystem, das mit einem Abstand von ca. 4,3 Lichtjahren zu den Sternen mit dem geringsten Abstand zu unserem Sonnensystem gehört.

Quelle: Dambeck, H. (2016). In 30 Minuten zum MARS. Der Spiegel. <https://www.spiegel.de/wissenschaft/weltall/photonenantrieb-fuer-raumschiffe-in-30-minuten-zum-mars-a-1080270.html> (Zugriff am 09.09.2025)