



Hamburg

Behörde für Schule,
Familie und Berufsbildung

Schriftliche Abiturprüfung Schuljahr 2025/2026

Physik auf erhöhtem Anforderungsniveau an allgemeinbildenden gymnasialen Oberstufen

Haupttermin
Donnerstag, 23. April 2026, 09:00 Uhr

Unterlagen für die Lehrkräfte

Diese Unterlagen sind nicht für die Prüflinge bestimmt.

Diese Unterlagen enthalten:

1. Allgemeines
 2. Rückmeldebogen für die Zweidurchsicht
 3. Hinweise zu den Aufgaben
 4. Hinweise zum Korrekturverfahren
 5. Bewertung und Erwartungshorizont
-

1. Allgemeines¹

- Weisen Sie bitte die Prüflinge auf die allgemeinen Arbeitshinweise hin.
- Die Arbeitszeit beträgt **300 Minuten**.
- Eine gesonderte Lese- oder Auswahlzeit wird nicht gewährt.
- Hilfsmittel: Taschenrechner (nicht programmierbar, nicht grafikfähig), zugelassene Formelsammlung, Zeichenhilfsmittel, Rechtschreibwörterbuch

¹ Entsprechend der „Richtlinie über die Gewährung von Erleichterungen für neu zugewanderte Schülerinnen, Schüler und Prüflinge bei Sprachschwierigkeiten in der deutschen Sprache“ (MBISchul Nr. 08, 7. Oktober 2016, S. 60) werden für die betroffenen Prüflinge die folgenden Erleichterungen gewährt:

- Die Bearbeitungszeit wird um 30 Minuten auf **330 Minuten** erhöht.
- Ein nicht-elektronisches Wörterbuch Deutsch – Herkunftssprache / Herkunftssprache – Deutsch wird bereitgestellt.

2. Rückmeldebogen für die Zweيتدurchsicht

Bitte umgehend ausfüllen und

- a) an die Schule senden, die die externe Zweيتدurchsicht übernimmt,
oder ggf.
- b) an die Kollegin/den Kollegen geben, die/der die interne Zweيتدurchsicht übernimmt.

Information für die Zweيتدurchsicht

Fach:

Physik
auf erhöhtem Anforderungsniveau

Kurs-Nummer: _____

Bearbeitet wurden die folgenden Aufgaben:

Aufgaben-Nr.		Anzahl	
I	von		Prüflingen
II	von		Prüflingen
III	von		Prüflingen
IV	von		Prüflingen

3. Hinweise zu den Aufgaben

- Die Lehrkraft erhält **vier** Aufgaben und reicht diese an die Prüflinge weiter.
- Die Prüflinge wählen **drei** Aufgaben aus und bearbeiten diese.
- Sie vermerken auf dem Deckblatt und der Reinschrift, welche Aufgaben sie bearbeitet haben.

4. Hinweise zum Korrekturverfahren

- Die Korrekturen werden gemäß der „Richtlinie für die Aufgabenstellung und Bewertung der Leistungen in der Abiturprüfung“ (Abiturrichtlinie) in der geltenden Fassung vorgenommen.
- Die für das Fach zuständige Lehrkraft begutachtet die Arbeiten unter Beachtung zentraler Bewertungsvorgaben und unter Kennzeichnung ihrer Vorzüge und Mängel, der richtigen Lösungen und der Fehler und bewertet jede Arbeit mit einer Punktzahl (siehe Erstkorrekturbogen). Entwürfe können ergänzend zur Bewertung herangezogen werden.
- Jede Arbeit wird sodann von der zweiten Fachlehrkraft durchgesehen, die sich entweder (auf dem Erstkorrekturbogen) der Bewertung durch die für das Fach zuständige Lehrkraft anschließt oder (auf dem Zweidurchsichtbogen) ein ergänzendes Gutachten mit Bewertung anfertigt.
- Die oder der Vorsitzende des Fachprüfungsausschusses legt die endgültige Punktzahl fest. Beträgt die Differenz der im Erstgutachten und im ergänzenden Gutachten erteilten Punktzahlen nicht mehr als drei Punkte, bildet sie oder er den Mittelwert beider Punktzahlen; eine gebrochene Zahl wird zur nächsten vollen Punktzahl aufgerundet. Beträgt die Differenz der im Erstgutachten und im ergänzenden Gutachten erteilten Punktzahlen mehr als drei Punkte, legt die oder der Vorsitzende des Fachprüfungsausschusses die endgültige Punktzahl in Auseinandersetzung mit den erstellten Gutachten entsprechend dem Erfordernis der Einheitlichkeit und Vergleichbarkeit der Bewertung der Prüfungsleistungen fest und begründet die Entscheidung auf dem Formular „Festlegung der Note bei einer Differenz der im Erstgutachten und im ergänzenden Gutachten erteilten Punktzahlen von mehr als drei Notenpunkten“.
- Die Bewertungsbögen sind als Download zu finden auf der Plattform Prüfungen (vormals HERA) in LMS.

5. Bewertung und Erwartungshorizont

I. Bewertung

Jeder Aufgabe sind 40 Bewertungseinheiten (BE) zugeordnet. In allen Teilaufgaben werden nur ganze oder halbe BE vergeben. Die erbrachte Gesamtleistung ergibt sich aus der Summe der Bewertungseinheiten in den drei Aufgaben. Insgesamt sind somit 120 BE erreichbar. Bei der Festlegung von Notenpunkten gilt die folgende Tabelle:

Notenpunkte	mindestens zu erreichender Anteil an den insgesamt zu erreichenden Bewertungseinheiten	erreichte Bewertungseinheiten
15	95 %	114 – 120
14	90 %	108 – 113,5
13	85 %	102 – 107,5
12	80 %	96 – 101,5
11	75 %	90 – 95,5
10	70 %	84 – 89,5
9	65 %	78 – 83,5
8	60 %	72 – 77,5
7	55 %	66 – 71,5
6	50 %	60 – 65,5
5	45 %	54 – 59,5
4	40 %	48 – 53,5
3	33 %	40 – 47,5
2	27 %	32,5 – 39,5
1	20 %	24 – 32
0	0 %	0 – 23,5

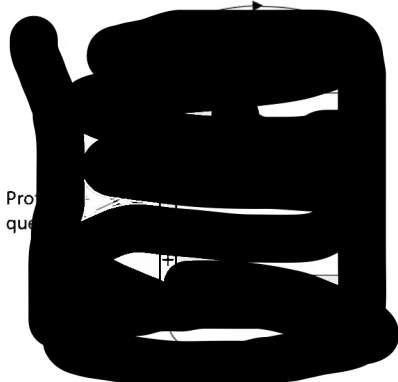
Schwerwiegende und gehäufte Verstöße gegen die sprachliche Richtigkeit oder gegen die äußere Form führen zu einem Abzug von bis zu zwei Notenpunkten in einfacher Wertung. Mangelhafte Gliederung, Fehler in der Fachsprache, Ungenauigkeiten in Zeichnungen oder unzureichende oder falsche Bezüge zwischen Zeichnungen und Text sind als fachliche Fehler zu werten. Ein Abzug für Verstöße gegen die sprachliche Richtigkeit soll nicht erfolgen, wenn diese bereits Gegenstand der fachspezifischen Bewertungsvorgaben sind.

II. Erwartungshorizont

Bei den auf den folgenden Seiten dargestellten erwarteten Schülerleistungen handelt es sich um Lösungsskizzen. Oft sind aber Lösungsvarianten möglich, die in der Skizze nur zum Teil beschrieben werden konnten. Grundsätzlich gilt deshalb, dass alle Varianten, die zu richtigen Lösungen führen, mit voller Punktzahl bewertet werden, unabhängig davon, ob die gewählte Variante in der Lösungsskizze aufgeführt ist oder nicht. Kursiv gedruckte Passagen sind Hinweise an die korrigierenden Lehrkräfte. Sie sind nicht Bestandteile der erwarteten Schülerleistung.

Aufgabe I: Linearbeschleuniger für den Einsatz in der medizinischen Strahlentherapie

Schwerpunkt: Elektrische und magnetische Felder

	Lösungsskizze	Zuordnung Bewertung		
		I	II	III
I.1	a 	4		
	b Die maximale Geschwindigkeit ist bei der maximal möglichen Spannung von 90 kV am Kondensator zu erreichen. Aus einem Energieerhaltungsansatz folgt: $E_{\text{el}} = E_{\text{kin}}$ $e \cdot U = \frac{1}{2} m_p \cdot v^2$ $v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U_{\text{max}}}{m_p}} = 4,2 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ Die Protonen erreichen eine Geschwindigkeit von höchstens $4,2 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.	5		
I.2	a Die Beschleunigungsspannung wird beim Kondensator nur einmal durchlaufen, im LINAC jedoch mehrfach zwischen jeweils aufeinanderfolgenden Röhren. Es kann also ein Vielfaches der Protonenenergie und damit auch eine höhere Geschwindigkeit der Teilchen erreicht werden.	3		
	b Ein Proton verlässt die positiv geladene Teilchenquelle und wird von der negativ geladenen ersten Röhre angezogen und somit beschleunigt. Da das elektrische Feld zwischen den Röhren homogen ist, ist die Kraft, die auf das Proton wirkt, konstant und damit ist die Beschleunigung gleichmäßig. Tritt das Proton in die feldfreie erste Röhre ein, wirkt keine beschleunigende Kraft und es durchfliegt diese mit konstanter Geschwindigkeit.		5	
	c Wenn das Proton das Ende einer Röhre erreicht, muss ein Wechsel der Polung stattgefunden haben, damit das Proton im folgenden Spalt weiter beschleunigt wird. Die Längen der Röhren müssen durch die weitere		4	

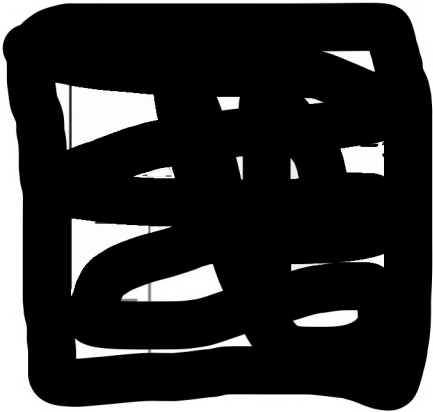
	Zunahme der Geschwindigkeit der Protonen nach jedem Spalt verlängert werden, da die Periodendauer der Spaltspannung konstant bleibt und die Röhren innerhalb dieser Zeit durchlaufen werden müssen.			
	d Innerhalb der Röhren ist die Geschwindigkeit konstant und der dargestellte Graph verläuft hier horizontal. Die Zunahme der Geschwindigkeit der gleichmäßig beschleunigten Bewegung in den Spalten zwischen den Röhren erfolgt linear. Da das elektrische Feld in jedem Spalt den gleichen Betrag hat, ist die Steigung der linearen Abschnitte überall gleich groß. Da alle Spalte gleich breit sind, die Geschwindigkeit der Protonen aber von Spalt zu Spalt zunimmt, nimmt die Zeit der Beschleunigung innerhalb der Spalte ab. Daher nimmt die Geschwindigkeit in den aufeinanderfolgenden Spalten immer weniger zu. Die Zeit, in der die Protonen einen Spalt und die darauffolgende Röhre durchlaufen, muss der konstanten Periode der Umpolung entsprechen. Die kinetische Energie der Protonen nimmt in jedem Spalt um denselben Betrag zu.			5
I.3	a Die Länge der n-ten Röhre berechnet sich mit der Geschwindigkeit v_n nach der n-ten Beschleunigungsstrecke zu $E_{\text{el},n} = E_{\text{kin},n}$ $n \cdot q \cdot U_{\text{Spalt}} = \frac{1}{2} m \cdot v_n^2$ $v_n = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot U_{\text{Spalt}}}{m} \cdot n}$ $L_n = \frac{1}{2} T \cdot v_n = \frac{1}{2f} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot U_{\text{Spalt}}}{m} \cdot n}$		5	
	b Da die Kohlenstoffionen die zwölfwache Masse der Protonen haben, muss entweder die Frequenz um den Faktor $\sqrt{12}$ verkleinert werden oder die Spaltspannung um den Faktor 12 erhöht werden, damit L_n für jedes n den gleichen Wert hat.		5	
I.4	Befinden sich leitende Gegenstände wie zum Beispiel Metalle in der Nähe des Protonenstrahls, so entsteht durch Influenz eine Ladungsverschiebung in dem Metall. Durch diese Ladungsverschiebung entsteht ein elektrisches Feld. Protonen sind geladene Teilchen, die in elektrischen Feldern abgelenkt werden. Die Protonen werden in diesem Feld abgelenkt. Weitere sinnvolle Hypothesen sind denkbar, beispielsweise über ♦ Induktion im Implantat durch das veränderliche Magnetfeld des vorbeifliegenden Protons, ♦ die Streuung von Protonen an Metallatomen im Strahlengang, ♦ die Absorption bei Lage des Implantats im Strahlengang oder ♦ die Magnetisierung von ferromagnetischen Materialien im Magnetfeld der bewegten Protonen und der daraus resultierenden Ablenkung im Magnetfeld			4
	Insgesamt 40 BE	12	19	9

Aufgabe II: Fraunhofer und der Beginn der Astrospektroskopie

Schwerpunkt: Mechanische und elektromagnetische Schwingungen und Wellen

	Lösungsskizze	Zuordnung Bewertung		
		I	II	III
II.1 a	Bei der Interferenz an einem Gitter nimmt, genau wie beim Doppelspalt, der Winkel zwischen benachbarten Maxima mit zunehmender Wellenlänge des Lichtes zu. Da $\lambda_{\text{blau}} < \lambda_{\text{grün}} < \lambda_{\text{rot}}$ gilt und man den größten Abstand zwischen benachbarten Maxima in Abb. 2b, den kleinsten in Abb. 2c misst, kann Abb. 2a dem grünen Licht, Abb. 2b dem roten Licht und Abb. 2c dem blauen Licht zugeordnet werden.		4	
b	Der Abstand der Maxima höherer Ordnung zum Maximum 0. Ordnung ist genauer bestimmbar, da diese Maxima auf dem Schirm weniger ausgedehnt abgebildet werden und dadurch ihre Mitten leichter bestimmt werden können als bei den Maxima niedriger Ordnung. Zudem ist durch die größeren Abstände zum Maximum 0. Ordnung die relative Messunsicherheit geringer als bei niedrigeren Ordnungen. Aus diesem Grund wird das Maximum 3. Ordnung für die Bestimmung der Wellenlänge ausgewählt und der Abstand dieses Maximums zum Maximum 0. Ordnung gemessen. <i>Hinweis: Es wird ein Aspekt der Begründung erwartet.</i> Aus Material 3 lässt sich für $k = 3$ der Abstand $a_3 = 35,9 \text{ cm}$ bestimmen. Der Winkel α_3, unter dem dieses Maximum auftritt, kann trigonometrisch über die Entfernung $\ell = 60,0 \text{ cm}$ zwischen Gitter und Schirm berechnet werden. Damit ergibt sich die Wellenlänge des verwendeten Laserlichtes aus der Winkelbeziehung $\sin \alpha_k = \frac{k \cdot \lambda}{g}$ für konstruktive Interferenz an Doppelspalt bzw. Gitter: $\lambda = \frac{1}{3} \cdot g \cdot \sin \alpha_3 = \frac{1}{3} \cdot g \cdot \sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{a_3}{\ell} \right) \right)$ $= \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{270} \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{35,9 \text{ cm}}{60,0 \text{ cm}} \right) \right) = 634 \text{ nm}$ Die aus der Messung ermittelte Wellenlänge des verwendeten Laserlichtes beträgt $\lambda = 634 \text{ nm}$.	2	5	
c	Unter Berücksichtigung der angegebenen Messunsicherheiten ergeben sich die nachfolgenden Intervalle für den Abstand des Maximums 3. Ordnung vom Maximum 0. Ordnung a_3 sowie für den Abstand ℓ zwischen Gitter und Schirm: ♦ $35,7 \text{ cm} \leq a_3 \leq 36,1 \text{ cm}$ ♦ $59,95 \text{ cm} \leq \ell \leq 60,05 \text{ cm}$		2	4

	Die kleinste Wellenlänge ergibt sich für den kleinsten möglichen Abstand a_3 und den größten möglichen Abstand ℓ zwischen Gitter und Schirm aus der Gleichung $\lambda = \frac{1}{k} \cdot g \cdot \sin \alpha_k = \frac{1}{3} \cdot g \cdot \sin \alpha_3$ mit $\alpha_k = \tan^{-1} \left(\frac{a_k}{\ell} \right)$ Die größte Wellenlänge ergibt sich analog zu 637 nm. Damit lässt sich das Intervall $631 \text{ nm} \leq \lambda \leq 637 \text{ nm}$ für die bestimmbare Wellenlänge finden. Die auf dem Typenschild angegebene Wellenlänge $\lambda = 630 \text{ nm}$ liegt nicht innerhalb des durch die Messunsicherheiten bestimmten Intervalls. <i>Hinweis: Je nach gewählten Leuchtpunkten kann auch ein anderer Schluss zulässig sein.</i>			
II.2 a	Im auf das Gitter auftreffenden weißen Licht kommen verschiedene Wellenlängen vor. ♦ Bereich A: Da gemäß der Winkelbeziehung die Winkel, unter denen die Maxima 0. Ordnung erscheinen, für alle Wellenlängen 0° betragen, fallen diese Maxima an einem Ort zusammen. Die Überlagerung aller Wellenlängen führt zum weißen Lichtstreifen. ♦ Bereiche B: Der Winkel, unter dem ein Maximum erscheint, hängt gemäß $\sin \alpha_k = \frac{k \cdot \lambda}{g}$ von der Wellenlänge ab. Dabei entstehen die Maxima 1. Ordnung verschiedener Spektralfarben nicht am gleichen Ort, sondern nebeneinander. Der Beugungswinkel ist umso größer, je größer die Wellenlänge ist. Die Spektralfarben des sichtbaren Lichts erstrecken sich von Rot bis Violett, wobei rotes Licht die größte und violette Licht die kleinste Wellenlänge hat. Daher erscheint an den inneren Rändern der Bereiche B Violett und an den äußeren Rändern Rot. Die beiden Kontinua des Bereiches B sind folglich zueinander gespiegelt.	2	3	
b	Für die konstruktive Interferenz am Gitter gilt die Winkelbeziehung $\sin \alpha_k = \frac{k \cdot \lambda}{g}$. Für das Maximum 3. Ordnung des gegebenen grünen Lichtes ergibt sich daraus der Winkel $\alpha_{3,\text{grün}} = 24,4^\circ$. Gemäß Formelsammlung umfasst rotes Licht Wellenlängen bis maximal 780 nm. Aus der Winkelbeziehung kann man für die größtmögliche Wellenlänge den größtmöglichen Winkel $\alpha_{2,\text{rot}}$ ermitteln, unter dem das Maximum 2. Ordnung auftritt, und es gilt: $\alpha_{2,\text{rot}} = 24,9^\circ > \alpha_{3,\text{grün}}$ Da das rote Licht einen großen Wellenlängenbereich umfasst, kommt es für die gegebene Wellenlänge des grünen Lichts somit zur beschriebenen Überlagerung.		3	
c	Das Zusammenfallen der Maxima zweier verschiedener Wellenlängen (z. B. rotes Licht der Wellenlänge λ_{rot} und andersfarbiges Licht der Wellenlänge λ_{rot}) bedeutet, dass die Winkel $\alpha_{k,\lambda}$, unter denen die jeweiligen Maxima entstehen, übereinstimmen. Für die zweite bzw. dritte			4

	Ordnung wäre dann $\alpha_{2,\lambda_{\text{rot}}} = \alpha_{3,\lambda_{\text{rot}}}$ und somit $\sin \alpha_{2,\lambda_{\text{rot}}} = \sin \alpha_{3,\lambda_{\text{rot}}}$. Aus der Winkelbeziehung lässt sich für die zweite bzw. dritte Ordnung die Bedingung $\frac{2 \cdot \lambda_{\text{rot}}}{g} = \frac{3 \cdot \lambda_{\text{rot}}}{g}$ und damit $\lambda_{\text{rot}} = \frac{3}{2} \lambda_{\text{rot}}$ folgern. Damit kann es unabhängig von der Wahl der Gitterkonstanten und damit des Gitters stets zur Überlagerung von Maxima verschiedenfarbigen Lichtes kommen.			
II.3 a	Ein Atom kann nur bestimmte Energiezustände annehmen. Diese bezeichnet man als die Energieniveaus des Atoms ($E_1, E_2, \dots, E_n$). Das Energieniveau mit der geringsten Energie ist der sogenannte Grundzustand (E_1). Bei der Rückkehr dieses Atoms in einen niedrigeren Anregungszustand oder den Grundzustand wird die Energiedifferenz beider Zustände in Form eines Photons emittiert. Diese besitzen gemäß $E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ ausschließlich diskrete Wellenlängen, die als Linien im Emissionslinienspektrum (vgl. Abb. 5) dargestellt werden können. 	6		
b	Dem Material 6 ist zu entnehmen, dass im Inneren der Sonne ein kontinuierliches Spektrum entsteht. Im Randbereich der Sonne absorbiert der dort befindliche Wasserstoff diejenige Energie, die seinen eigenen Emissionslinien entspricht (M 5). Da die absorbierte Energie nachfolgend in zufällige Richtungen emittiert wird, treten an diesen Stellen Absorptionslinien im kontinuierlichen Spektrum auf, z. B. die Linien C und F. Wenn das Licht der Sonne die Erdatmosphäre durchquert, kommt es zur Absorption durch Sauerstoff und es kommen weitere Absorptionslinien (Linien A und B) hinzu.	2	3	
	Insgesamt 40 BE	12	20	8

Aufgabe III: Anwendung des Potenzialtopfmodells auf Moleküle

Schwerpunkt: Quantenphysik und Materie

	Lösungsskizze	Zuordnung Bewertung		
		I	II	III
III.1	a Berechnung: $E = h \cdot \frac{c}{\lambda}$ $E = h \cdot \frac{c}{440 \text{ nm}}$ $E = 2,82 \text{ eV}$	3		
	b Ein Atom hat diskrete Energieniveaus. Ein Atom in einem angeregten Zustand kehrt in einen energetisch niedrigeren Zustand zurück. Dabei gibt es Energie in Form eines Photons ab. Die Energie des Photons entspricht der Differenz ΔE zwischen den beiden Energieniveaus.	4		
III.2	a Die Energien der betrachteten Acene lassen sich gemäß $E_n = \frac{h^2}{8 \cdot m \cdot L_k^2} n^2$ berechnen. Hierbei ist $L_k = k \cdot 0,246 \text{ nm}$ Für 4-A mit $k = 4$ ergibt sich: $E_3 - E_2 = 1,94 \text{ eV}$. Mit $\lambda = \frac{hc}{E}$ folgt $\lambda = 639 \text{ nm}$. Das entspricht der Farbe Rot. Für 5-A mit $k = 5$ gilt: $E_6 - E_5 = 2,73 \text{ eV}$. Mit $\lambda = \frac{hc}{E}$ folgt $\lambda = 453 \text{ nm}$. Das entspricht der Farbe Blau.	5		
	b Für 6-A mit $k = 6$ gilt: $E_7 - E_6 = 2,24 \text{ eV}$ mit $\lambda = 553 \text{ nm}$. Das entspricht der Farbe Grün. Somit liefert dieser Übergang die gewünschte Farbe.		5	
III.3	a Mögliche Annahmen: Acen-Moleküle bilden Ketten, die man als die Länge des Potenzialtopfes annehmen kann. Die Ausdehnung der Moleküle in die beiden anderen Raumrichtungen muss vernachlässigbar klein sein.		6	

	Das Elektron muss entlang des Moleküls über die Länge des Potenzialtopfes frei bewegbar sein. Wechselwirkungen des Elektrons z. B. mit anderen Elektronen sind ausgeschlossen. Das Elektron kann sich nicht vom Molekül trennen.			
	b Ionisierung bedeutet, dass ein Elektron durch Anregung des Moleküls mit geeignet hoher Energie das Acen-Molekül verlässt. Wegen der unendlich hohen Wände im Modell würde also eine unendlich hohe Energie benötigt, damit das Elektron den Potenzialtopf verlassen kann und das Acen somit ionisiert würde. Dies ist physikalisch nicht möglich. c Das Integral $\int_L^\infty \psi(x) ^2 dx$ ist die Wahrscheinlichkeit, das Elektron bei einer Ortsmessung rechts außerhalb des Potentialtopfes $x \in [L; \infty[$ vorzufinden. Diese Wahrscheinlichkeit ist beim Potenzialtopf mit endlich hohen Wänden größer als null. Dies bedeutet, dass ein ursprünglich im Molekül gebundenes Elektron auch außerhalb des Moleküls nachgewiesen werden könnte.		3	4
III.4	a Zur Anregung der Gasatome in einem Plasma-Bildschirm werden einige Hundert bis zu 1000 Volt erforderlich sein, denn $E_{\text{ionisation}} = 20 \text{ eV}$. Für die Ionisation von 10 Gasatomen benötigt das Elektron also eine Energie von 200 eV, bei Ionisation von 50 Gasatomen 1000 eV. Diese Energie kann es durch Durchlaufen einer Beschleunigungsspannung von 200 V bis 1000 V erhalten haben. b LED Bildschirme sind nachhaltiger, weil sie eine geringere Eingangsleistung aufweisen. Diese Schlussfolgerung ist unvollständig, weil im Hinblick auf Nachhaltigkeit auch andere Aspekte als nur die Eingangsleistung eine Rolle spielen. LED-Bildschirme sind geeigneter, wenn es auf eine hohe Auflösung ankommt. Diese Schlussfolgerung ist zutreffend. Aus der Tabelle in Material 3 ergibt sich eine Auflösung von 4000 Pixeln im Vergleich zu 1080 Pixeln. Plasma-Bildschirme sind besser geeignet, wenn es auf schnelle Bewegungen (z. B. bei schnellen PC-Spielen) ankommt. Diese Aussage könnte zutreffend sein. Allerdings weiß ich nicht, ob man einen Unterschied zwischen 120 Hz und 600 Hz überhaupt noch wahrnehmen kann.		6	4
	Insgesamt 40 BE	12	20	8

Aufgabe IV: Photonenantrieb

Schwerpunkt: Quantenphysik und Materie

	Lösungsskizze	Zuordnung Bewertung		
		I	II	III
IV.1	a Allen Photonen des monochromatischen Laserlichts wird dieselbe Frequenz zugeordnet. Daher haben sie dieselbe Energie und denselben Impuls. Dass sich der Laserstrahl verhältnismäßig wenig aufweitet, bedeutet, dass sich alle Photonen nahezu in dieselbe Richtung bewegen. Eine hohe Intensität entspricht einer hohen Anzahl emittierter Photonen pro Zeit. b Wellenlänge (s. M 1): $\lambda = 1,06 \mu\text{m} = 1,06 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ Energie des Photons: $E_{\text{Photon}} = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{h \cdot c}{1,06 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = 1,87 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,17 \text{ eV}$ Impuls des Photons: $p_{\text{Photon}} = \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{1,06 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = 6,25 \cdot 10^{-28} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$	4	6	
IV.2	a ◆ Lichtleistung der Laserkanone: $P = 30 \text{ GW} = 30 \cdot 10^9 \text{ W}$ ◆ Lichtenergie der Laserkanone: $E_{\text{Laser}} = P \cdot t$ ◆ Anzahl N der pro Sekunde emittierten Photonen: $N = \frac{E_{\text{Laser}}}{E_{\text{Photon}}} = \frac{P \cdot t}{E_{\text{Photon}}} = \frac{30 \cdot 10^9 \text{ Ws}}{1,87 \cdot 10^{-19} \text{ J}} = 1,6 \cdot 10^{29}$ ◆ Gesamtimpuls p_{ges} der in einer Sekunde emittierten Photonen: $p_{\text{Ges}} = N \cdot p_{\text{Photon}} = 1,60 \cdot 10^{29} \cdot 6,25 \cdot 10^{-28} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}} = 100 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$ b Berechnung des Gesamtimpulses für einen Laser mit der Wellenlänge λ_1: $p_{\text{ges}} = N \cdot p_{\text{Photon}} = \frac{E_{\text{Laser}}}{E_{\text{Photon}}} \cdot p_{\text{Photon}} = \frac{P \cdot t \cdot \lambda_1}{h \cdot c} \cdot \frac{h}{\lambda_1} = \frac{P \cdot t}{c}$ Da die Wellenlänge herausgekürzt werden kann, erhält man für einen Laser der Wellenlänge λ_2 dasselbe Ergebnis. Der Gesamtimpuls der emittierten Photonen ist in beiden Fällen gleich groß.		5	5

IV.3	a Abbildung 2 zeigt, dass die Durchlässigkeit der Erdatmosphäre für Licht in Abhängigkeit von der Wellenlänge sehr stark schwankt. Da beim Betrieb des Photonenantriebs der Verlust an Strahlungsleistung möglichst gering sein soll, kommen nur Wellenlängenbereiche infrage, in denen die Durchlässigkeit für das Licht hoch ist. Besonders geeignet ist z. B. eine Wellenlänge von 10 μm. Besonders ungeeignet ist z. B. eine Wellenlänge von 6 μm. b Es werden an zwei Aspekten die Herausforderungen bei der technischen Umsetzbarkeit vergleichend betrachtet, beispielsweise: ♦ Energiebedarf: In beiden Fällen ist der Energiebedarf sehr hoch. Beim erdgebundenen Betrieb ist der Energiebedarf sogar noch höher, da ein Teil des Laserlichts nicht von der Erdatmosphäre durchgelassen wird. Dies macht einen noch leistungsstärkeren Laser erforderlich. ♦ Energieversorgung: In beiden Fällen werden Kraftwerke hoher Leistung benötigt. Das scheint nur beim erdgebundenen Betrieb möglich zu sein. Beim Betrieb in der Umlaufbahn müssten auch die Kraftwerke auf die Umlaufbahn gebracht werden. ♦ Ausrichtung der Laserkanone: In beiden Fällen muss die Laserkanone immer wieder neu ausgerichtet werden, da sie sich auf einer Kreisbahn (auf der Erdoberfläche oder auf der Umlaufbahn) bewegt. Zusätzlich kann es zu längeren Phasen kommen, in denen die Erde den Lichtweg unterbricht. ♦ Risiken des Betriebs: Beim Betrieb von der Erdoberfläche aus besteht die Gefahr, dass z. B. Vögel oder Flugzeuge durch den Laserstrahl getroffen werden. Dies entfällt auf einer Umlaufbahn, allerdings sind dort Kollisionen mit anderen Satelliten oder mit Himmelskörpern möglich. ♦ Reparaturen an der Laserkanone: Beim erdgebundenen Betrieb ist die Laserkanone leichter erreichbar. Beim Betrieb auf der Umlaufbahn müssten auch Techniker und Ersatzteile auf die Umlaufbahn gebracht werden.	2	4	6
------	---	---	---	---

IV.4	a Es wird eine passende Fragestellung mit Bezug zum Energiebedarf des Antriebs oder zur Masse der Sonde (M_2) formuliert, beispielsweise: ♦ Wie kann die Versorgung der Anlage mit einer elektrischen Leistung von 70 GW sichergestellt werden? ♦ Welche Möglichkeiten gibt es, Energie einzusparen? ♦ Wie kann die Effizienz des Antriebs durch Änderungen an der Sonde gesteigert werden? ♦ Wie kann eine nutzbare Sonde mit möglichst geringer Masse konstruiert werden?		2	
	b Es werden zwei gegensätzliche Argumente genannt und abwägend betrachtet, beispielsweise: ♦ Argument 1 (pro): Das Antriebskonzept könnte der Menschheit die Erkundung anderer Planeten des Sonnensystems oder sogar von Exoplaneten ermöglichen. <i>Alternative: Die Entwicklung des Antriebskonzepts könnte technische Fortschritte ermöglichen, die auch in anderen Bereichen nutzbar wären, z. B. Entwicklung leistungsstarker Laser.</i> ♦ Argument 2 (contra): Die hohen Bau- und Entwicklungskosten und der Energiebedarf werden zur Lösung aktueller Probleme auf der Erde benötigt und sind daher nicht tragbar. <i>Alternative: Die Sonde bewegt sich mit hoher Geschwindigkeit am Zielort vorbei und lässt sich dort nicht abbremsen.</i> ♦ Abschließende Bewertung durch Gewichtung der Argumente, z. B.: Ich halte die Entwicklung eines Photonenantriebs zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht für zweckmäßig, weil einer erfolgreichen Umsetzung erhebliche Hindernisse und ein hoher Energiebedarf im Wege stehen. Die Bewältigung aktueller Probleme und insbesondere eine Sicherstellung der Energieversorgung auf der Erde sollten Priorität haben, um Lebensbedingungen für die Menschheit zu sichern.		3	3
	Insgesamt 40 BE	12	20	8



Hamburg

Behörde für Schule,
Familie und Berufsbildung

Name / Kurs-Nr.

Schriftliche Abiturprüfung Schuljahr 2025/2026

Physik auf erhöhtem Anforderungsniveau an allgemeinbildenden gymnasialen Oberstufen

Haupttermin
Donnerstag, 23. April 2026, 09:00 Uhr

Unterlagen für die Prüflinge

Allgemeine Arbeitshinweise

- Überprüfen Sie diese Unterlagen auf Vollständigkeit.
- Schreiben Sie auf alle Prüfungsunterlagen Ihren Namen und zusätzlich auf dieses Deckblatt Ihre Kursnummer.
- Kennzeichnen Sie Ihre Entwurfsblätter (Kladde) und Ihre Reinschrift.

Fachspezifische Arbeitshinweise¹

- Die Arbeitszeit beträgt **300 Minuten**.
- Eine gesonderte Lese- oder Auswahlzeit wird nicht gewährt.
- Hilfsmittel: Taschenrechner (nicht-programmierbar, nicht-grafikfähig), Zeichenhilfsmittel, zugelassene Formelsammlung, Rechtschreibwörterbuch

Aufgabenauswahl

- Sie erhalten **vier** Aufgaben zu unterschiedlichen Schwerpunkten.
- Wählen Sie **drei** Aufgaben aus und bearbeiten Sie diese.
- Vermerken Sie auch auf der Reinschrift, welche Aufgaben Sie bearbeitet haben.

Bearbeitet wurden die folgenden Aufgaben (Bitte kreuzen Sie an):

I	Linearbeschleuniger für den Einsatz in der medizinischen Strahlentherapie	
II	Fraunhofer und der Beginn der Astrospektroskopie	
III	Anwendung des Potenzialtopfmodells auf Moleküle	
IV	Photonenantrieb	

¹ Entsprechend der „Richtlinie über die Gewährung von Erleichterungen für neu zugewanderte Schülerinnen, Schüler und Prüflinge bei Sprachschwierigkeiten in der deutschen Sprache“ (MBISchul Nr. 08, 7. Oktober 2016, S. 60) werden für die betroffenen Prüflinge die folgenden Erleichterungen gewährt:

- Die Bearbeitungszeit wird um 30 Minuten auf **330 Minuten** erhöht.
- Ein nicht-elektronisches Wörterbuch Deutsch – Herkunftssprache / Herkunftssprache – Deutsch wird bereitgestellt.

Bewertung

Jeder Aufgabe sind 40 Bewertungseinheiten (BE) zugeordnet. In allen Teilaufgaben werden nur ganze oder halbe BE vergeben. Die erbrachte Gesamtleistung ergibt sich aus der Summe der Bewertungseinheiten in den drei Aufgaben. Insgesamt sind somit 120 BE erreichbar. Bei der Festlegung von Notenpunkten gilt die folgende Tabelle:

Notenpunkte	mindestens zu erreichender Anteil an den insgesamt zu erreichenden Bewertungseinheiten	erreichte Bewertungseinheiten
15	95 %	114 – 120
14	90 %	108 – 113,5
13	85 %	102 – 107,5
12	80 %	96 – 101,5
11	75 %	90 – 95,5
10	70 %	84 – 89,5
9	65 %	78 – 83,5
8	60 %	72 – 77,5
7	55 %	66 – 71,5
6	50 %	60 – 65,5
5	45 %	54 – 59,5
4	40 %	48 – 53,5
3	33 %	40 – 47,5
2	27 %	32,5 – 39,5
1	20 %	24 – 32
0	0 %	0 – 23,5

Schwerwiegende und gehäufte Verstöße gegen die sprachliche Richtigkeit oder gegen die äußere Form führen zu einem Abzug von bis zu zwei Punkten in einfacher Wertung. Mangelhafte Gliederung, Fehler in der Fachsprache, Ungenauigkeiten in Zeichnungen oder unzureichende oder falsche Bezüge zwischen Zeichnungen und Text sind als fachliche Fehler zu werten. Ein Abzug für Verstöße gegen die sprachliche Richtigkeit soll nicht erfolgen, wenn diese bereits Gegenstand der fachspezifischen Bewertungsvorgaben sind.

Aufgabe I: Linearbeschleuniger für den Einsatz in der medizinischen Strahlentherapie

40 BE

Schwerpunkt: Elektrische und magnetische Felder

Seit 2009 werden am Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrum (HIT) Patientinnen und Patienten erfolgreich mit schnellen Protonen oder deutlich massereicheren Kohlenstoffionen behandelt.

Vereinfachend werden relativistische Effekte und der Einfluss der Gravitation in dieser Aufgabe vernachlässigt.

Teilaufgaben

- I.1** Eine einfache Möglichkeit, ein Proton zu beschleunigen, ist in Material 1 dargestellt.
- a** Skizzieren Sie den in Material 1 beschriebenen Plattenkondensator zur Beschleunigung von Protonen. Skizzieren Sie das elektrische Feld im Inneren und im Randbereich und geben Sie die Polung der Platten an. 4 BE
 - b** Berechnen Sie die maximal mögliche Geschwindigkeit eines anfänglich ruhenden Protons nach dem Durchlaufen des Kondensators (M 1). 5 BE
- I.2** Mit einem Hochfrequenz-Linearbeschleuniger (LINAC) lassen sich besonders hohe Teilchenenergien erreichen (siehe M 2).
- a** Erklären Sie, dass in einem LINAC insgesamt höhere Protonengeschwindigkeiten erreicht werden können als in einem Plattenkondensator, wenn zwischen benachbarten Röhren die gleiche Spannung wie am Plattenkondensator aus Aufgabe 1 angelegt wird. 3 BE
 - b** Erläutern Sie qualitativ und ausgehend von den jeweils wirkenden Kräften die zeitliche Veränderung der Geschwindigkeit eines einzelnen Protons
 - ♦ im ersten Spalt zwischen der Teilchenquelle und der ersten Röhre und
 - ♦ innerhalb der ersten Röhre. 5 BE
 - c** Erklären Sie, dass die Röhren entlang der Beschleunigungsstrecke länger werden müssen. 4 BE
 - d** Erklären Sie den in Material 3 dargestellten Geschwindigkeitsverlauf. Beachten Sie dabei auch die konstante Frequenz f der Umpolung der Spaltspannung U_{Spalt} und gehen Sie auf die Zunahme der kinetischen Energie eines Protons beim Durchlaufen der Spalte des LINAC ein. 5 BE
- I.3** Am HIT können Patientinnen und Patienten auch mit Kohlenstoffionen bestrahlt werden.
- a** Zeigen Sie, dass für die Länge der n -ten Röhre die in Material 4 angegebene Beziehung gilt. 5 BE
 - b** Untersuchen Sie ausgehend von der Formel in Material 4, um welchen Faktor entweder die Spaltspannung oder deren Frequenz jeweils verändert werden muss, wenn in demselben LINAC (M 2) statt Protonen einfach positiv geladene Kohlenstoffionen mit der zwölffachen Masse eines Protons beschleunigt werden sollen. Die Rohrlängen müssen dabei gleich bleiben. 5 BE
- I.4** Die Protonentherapie kann leider nicht bei allen Patienten eingesetzt werden (M 5). Stellen Sie eine Hypothese auf, wie die Bewegung der Protonen im Körper durch die Wechselwirkung mit Metallimplantaten beeinflusst werden könnte. 4 BE

Anlage zur Aufgabe Linearbeschleuniger für den Einsatz in der medizinischen Strahlentherapie

Material 1 Beschleunigung eines Teilchens im elektrischen Feld eines Plattenkondensators

In der linken Platte eines Plattenkondensators ist mittig eine Protonenquelle eingebaut. Vereinfachend wird angenommen, dass die Protonen sich nach ihrer Erzeugung am Ort der linken Platte befinden und eine vernachlässigbare Anfangsgeschwindigkeit haben. In der rechten Platte des Kondensators ist ein kleines Loch, durch das die beschleunigten Teilchen austreten können.

Aufgrund von Spannungsüberschlägen ist es nicht möglich, Spannungen an derartige Plattenkondensatoren anzulegen, die 90 kV überschreiten.

Material 2 Hochfrequenz Linearbeschleuniger (LINAC)

Am Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrum (HIT) werden Protonen für den medizinischen Einsatz auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigt.

Eine technische Lösung zum Erreichen hoher Protonengeschwindigkeiten ist der „Hochfrequenz-Linearbeschleuniger (LINAC)“.

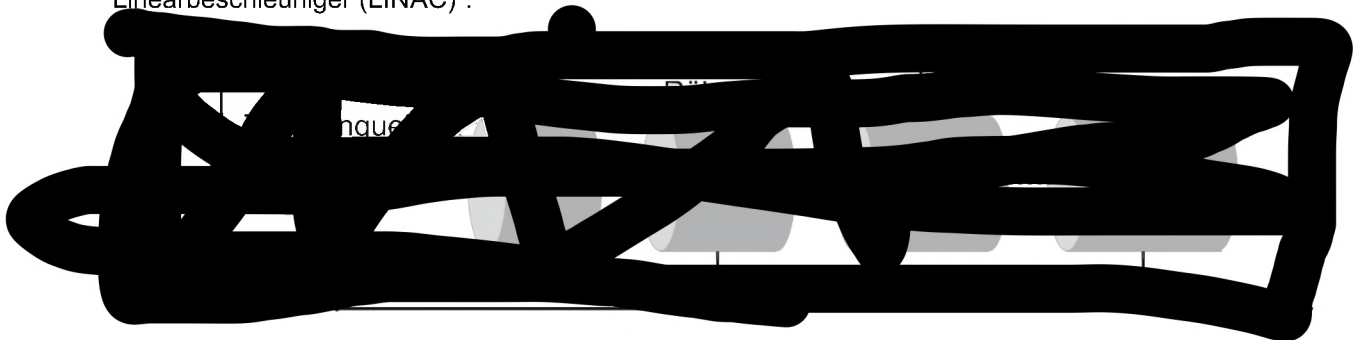


Abb. 1: schematischer Aufbau eines LINAC

Die gesamte Anordnung befindet sich im Vakuum. In der Teilchenquelle werden Protonen mit vernachlässigbarer Anfangsgeschwindigkeit erzeugt. Die Abstände (Spalte) zwischen den Röhren bzw. zwischen der Teilchenquelle und der ersten Röhre sind gleich groß.

Vereinfacht wird angenommen, dass die Spannung U_{Spalt} zwischen benachbarten, elektrisch leitenden Röhren einen konstanten Betrag hat und mit konstanter Frequenz umgepolt wird. Es handelt sich somit um eine Rechteckspannung (siehe Abb.2). Benachbarte Röhren sind stets unterschiedlich gepolt.

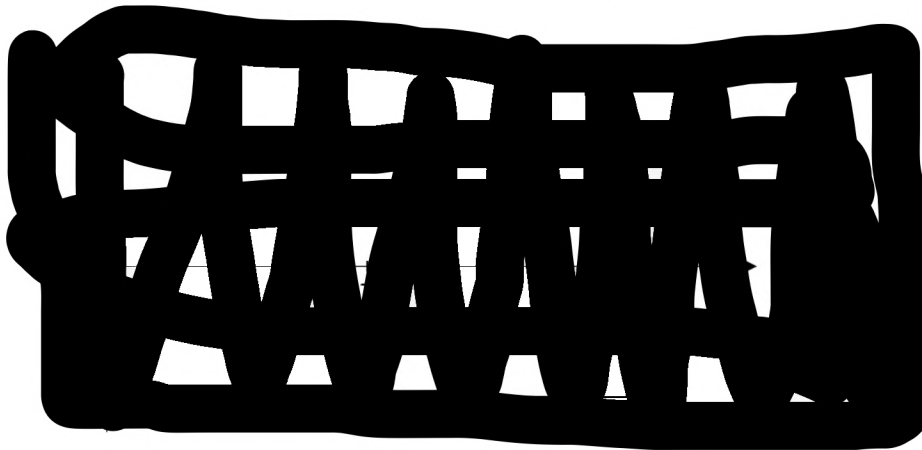


Abb. 2: Die Spannung zwischen benachbarten Röhren wechselt mit konstanter Frequenz das Vorzeichen.

Vereinfachend wird angenommen, dass das elektrische Feld in allen Spalten homogen ist. Das Innere der Röhren ist hingegen feldfrei.

Im Rahmen dieser Aufgabe wird nur ein einziges Proton betrachtet, welches die Quelle zu einem Zeitpunkt verlässt, an dem die erste Röhre negativ gegenüber der Teilchenquelle gepolt wird. Der Betrag der Spaltspannung U_{spalt} und die Frequenz f sind so gewählt, dass das Proton eine Röhre genau dann durchquert hat, wenn die nächste Röhre negativ gepolt wird.

Material 3 Geschwindigkeitsverlauf eines Protons im LINAC

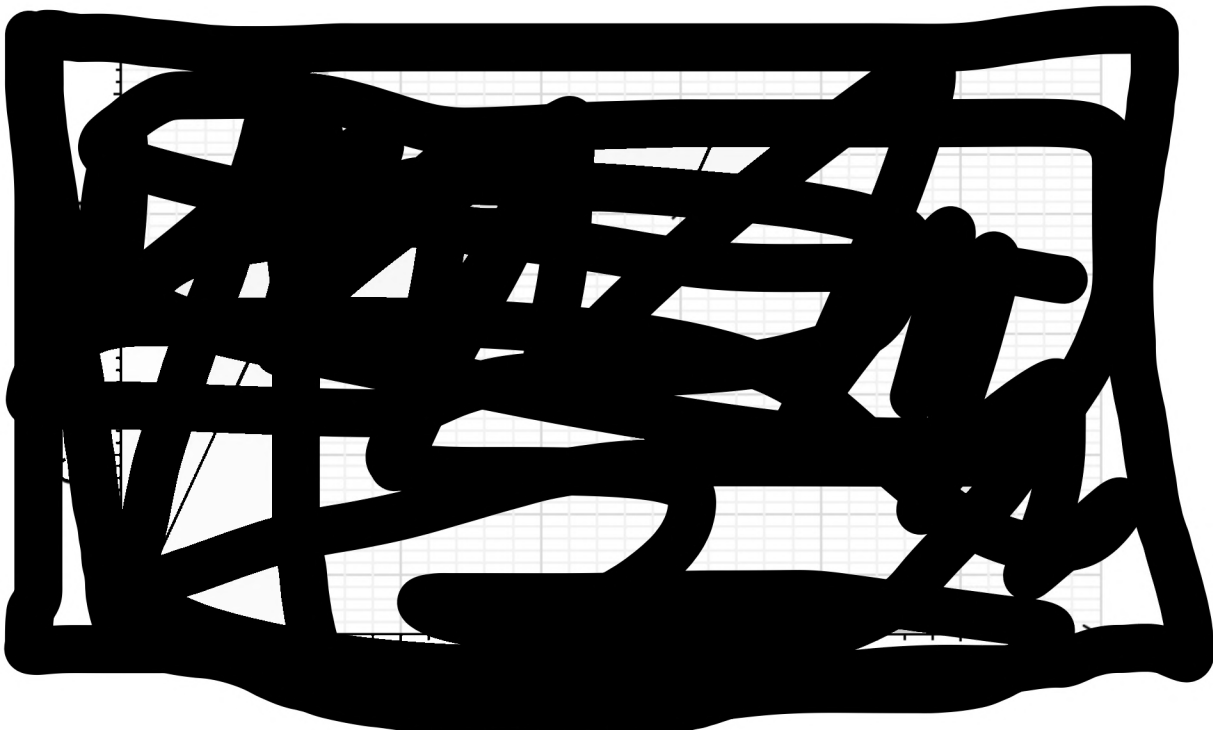


Abb. 3: qualitativer Geschwindigkeitsverlauf eines Protons beim Durchlauf durch die ersten drei Röhren des LINAC

Material 4 Länge der Röhren

Die Zeit, die die Ionen in den Spalten verbringen wird gegenüber der Flugzeit innerhalb der Röhren im Folgenden vernachlässigt. Mit dieser Näherung ergibt sich für die benötigte Länge der n -ten Röhre folgende Beziehung:

$$L_n = \frac{1}{2f} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot U_{\text{Spalt}}}{m}} \cdot n.$$

Dabei bezeichnet m die Masse der verwendeten Ionen, q die Ladung der Ionen und f die Frequenz der Wechselspannung.

Material 5 Gegenanzeigen bei der Behandlung von Tumorpatientinnen und -patienten mit Protonenstrahlung

Die Protonentherapie hat in der medizinischen Forschung bisher gute Heilungschancen bei der Behandlung von Patientinnen und Patienten mit Krebstumoren gezeigt. Die Protonen werden dabei auf den schädlichen Tumor im Inneren des Körpers gelenkt und zerstören ihn dort lokal, ohne das umliegende gesunde Gewebe übermäßig zu schädigen. Diese Technik erfordert eine millimetergenaue Präzision.

Leider gibt es eine ganze Reihe von Gegenanzeigen, bei denen eine Protonentherapie nicht möglich ist. Auf der Patienteninformationsseite eines Therapiezentrums steht, dass eine Behandlung unter anderem dann nicht möglich ist, wenn sich Metalle in der Behandlungsregion befinden. Implantate wie beispielsweise künstliche Gelenke, Knochenschrauben oder Herzschrittmacher können Metalle enthalten.

Literatur- und Quellenverzeichnis zu Aufgabe I

Material 5

In Anlehnung an: Universitätsklinikum Carl Gustav Carus. *Tumorarten für Protonen*.
<https://www.uniklinikum-dresden.de/de/das-klinikum/kliniken-polikliniken-institute/universitaets-protonen-therapie-dresden/tumorarten-fuer-protonen> (Zugriff am: 21.12.2024)

Aufgabe II: Fraunhofer und der Beginn der Astrospektroskopie

40 BE

Schwerpunkt: Mechanische und elektromagnetische Schwingungen und Wellen

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.

Teilaufgaben

- II.1** Man kann sogenannte Fraunhofer'sche Linien z. B. in Spektren beobachten, die man durch die Interferenz des Sonnenlichtes 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-c zeigen Interferenzmuster, die entstehen, wenn ein optisches Gitter unter sonst gleichen Bedingungen mit verschiedenfarbigem Licht bestrahlt wird (M 2). Ordnen Sie die Abbildungen 2a-c den Farben Rot, Blau und Grün zu und begründen Sie Ihre Zuordnung. 4 BE
- In Material 3 ist ein Versuch zur Interferenz monochromatischen Lichtes 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 Laserlichtes experimentell bestimmt werden.
- b** Ermitteln Sie diese Wellenlänge möglichst genau. Wählen Sie dazu aus Abbildung 3 zwei geeignete Leuchtpunkte begründet aus. 7 BE
- c** Durch die in Material 3 angegebenen Messunsicherheiten lässt sich für das dargestellte Interferenzmuster eine kleinste und eine größte Wellenlänge des Laserlichtes bestimmen. Ermitteln Sie diese und entscheiden Sie, ob die Angabe zur Wellenlänge auf dem Typenschild des Laserpointers innerhalb des sich ergebenden Intervalls liegt. 6 BE
Hinweis: Es genügt die Betrachtung der in Teilaufgabe 1b gewählten Leuchtpunkte.
- II.2** Das kontinuierliche Spektrum der Sonne soll modellhaft behandelt werden. Durch die Bestrahlung eines 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 das Zustandekommen des Schirmbildes in den Bereichen **B**. 5 BE
- Im Bereich **C** des Schirmbildes beobachtet man eine Veränderung des Farbeindrucks, da sich zum Beispiel die Maxima 2. Ordnung roten Lichtes mit den Maxima 3. Ordnung grünen Lichtes überlagern. Somit ist die Bestimmung von Wellenlängen im Bereich **C** 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 **C** zur beschriebenen Überlagerung von rotem Licht mit grünem Licht der Wellenlänge $\lambda = 510 \text{ nm}$ kommt. 3 BE
- c** Beurteilen Sie, ob durch Tausch des Gitters mit einem Gitter anderer Gitterkonstante das Zusammenfallen von Maxima verschiedener Farben verhindert werden kann. 4 BE

II.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 BE
- b** Erklären Sie unter Berücksichtigung der Materialien 5 und 6 die Entstehung der Absorptionslinien von Wasserstoff und Sauerstoff im kontinuierlichen Spektrum des Sonnenlichtes, wenn es von der Erde aus beobachtet wird. 5 BE

Anlage zur Aufgabe Fraunhofer und der Beginn der Astrospektroskopie

Material 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 Spalten pro mm beträgt der Spaltmittenabstand $g = \frac{1}{270}$ 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

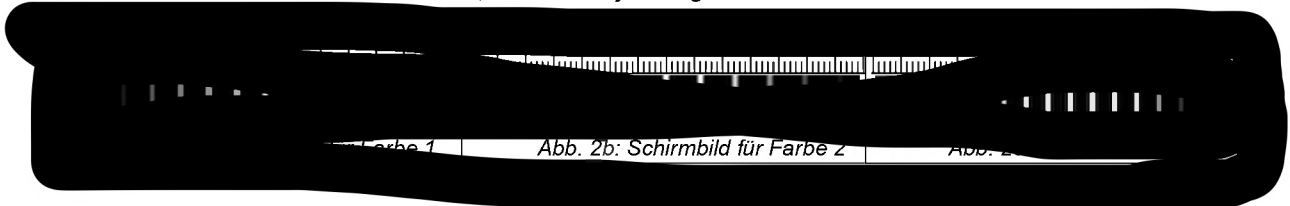
wie beim Doppelspalt: $\sin \alpha_k = \frac{k \cdot \lambda}{g}$



Abb. 1: Anordnung der Spalte beim Gitter

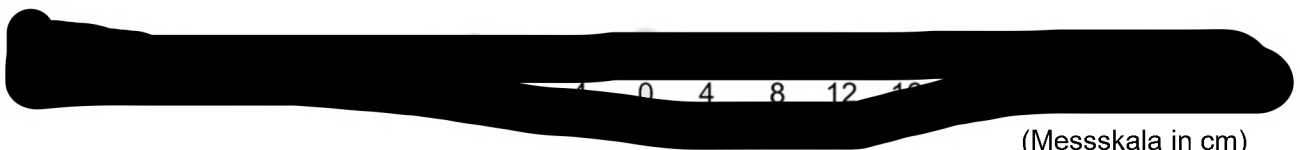
Material 2 Interferenz von verschiedenfarbigem monochromatischem Licht

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



Material 3 Interferenz von monochromatischem Licht

Das monochromatische Licht eines Laserpointers fällt senkrecht auf ein optisches Gitter mit $g = \frac{1}{270}$ 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 $\pm 0,05$ cm, die Abmessungen am Interferenzmuster auf $\pm 0,2$ cm genau bestimmt werden.



(Messskala in cm)

Abb. 3: Interferenzmuster des Laserlichtes auf einem Schirm mit Messskala.

Material 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.

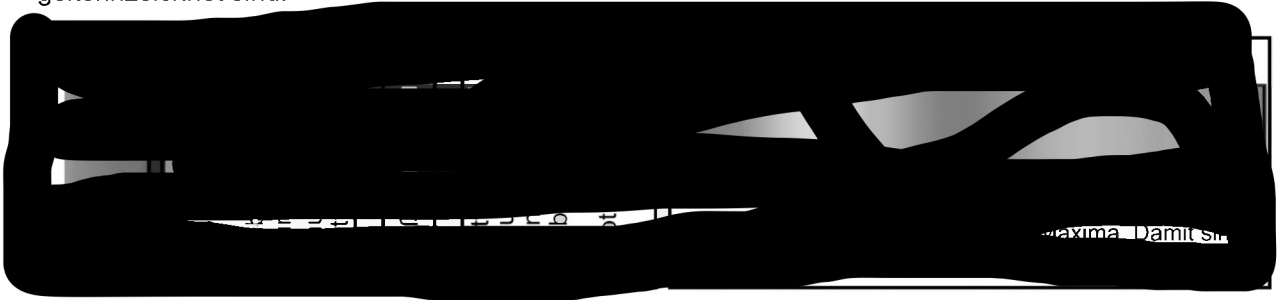


Abb. 4: Schirmbild für die Interferenz weißen Lichtes an einem Gitter (vereinfachte Darstellung). In den Bereichen **B** sind die Spektralfarben durch unterschiedliche Grautöne dargestellt.

Material 5 Emissionslinien von atomarem Wasserstoff



Abb. 5: Emissionslinienspektrum von Wasserstoff

Material 6 Spektrum des Sonnenlichtes

Auf dem Weg des Sonnenlichtes 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. Ehe es auf der Erdoberfläche detektiert wird, muss das Licht der Sonne die Atmosphäre der Erde durchqueren.

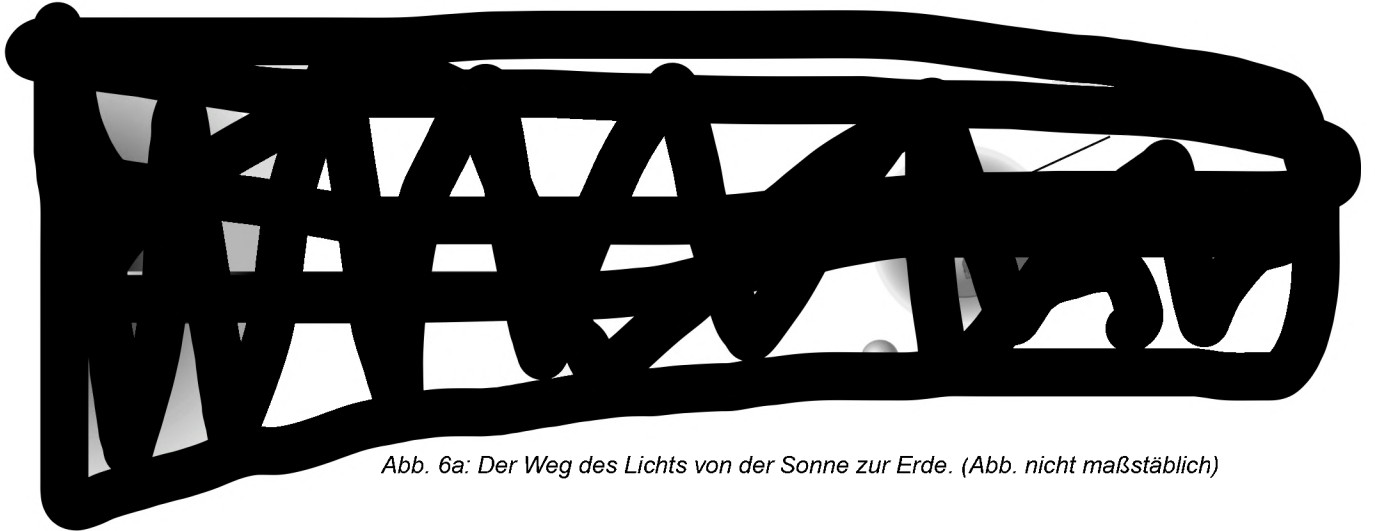


Abb. 6a: Der Weg des Lichts von der Sonne zur Erde. (Abb. nicht maßstäblich)

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.

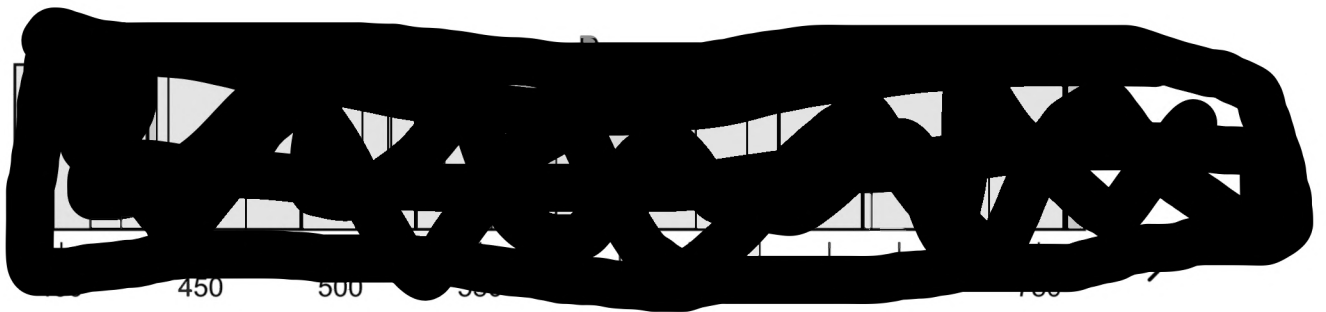


Abb. 6b: stark vereinfachte Darstellung des von der Erde aus aufgenommenen Absorptionslinienspektrums der Sonne

Literatur- und Quellenverzeichnis zu Aufgabe II

Material 5

In Anlehnung an LEIFIphysik. *Atomarer Energieaustausch*.

<https://www.leifiphysik.de/atomphysik/atomarer-energieaustausch/versuche/emissionsspektrum-von-atomarem-wasserstoff-mit-der-balmer-roehre> (Zugriff am: 06.01.2025)

Material 6

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: 06.01.2025)

Fraunhoferlinie (2025, 06. Januar). Wikipedia. <https://de.wikipedia.org/wiki/Fraunhoferlinie> (Zugriff am: 06.01.2025)

Aufgabe III: Anwendung des Potenzialtopfmodells auf Moleküle

40 BE

Schwerpunkt: Quantenphysik und Materie

Acene sind organische Moleküle. Sie sind beispielsweise für den Einsatz in Bildschirmen interessant und aktuell Gegenstand der Forschung.

Teilaufgaben

- III.1** Damit Acene (M 1) für Bildschirme verwendet werden können, müssen sie Photonen mit gewisser Energie aussenden, um bestimmte Farben darzustellen.
- a** Ermitteln Sie die Photonenenergie, die einer Wellenlänge von 440 nm entspricht. 3 BE
 - b** Erklären Sie mithilfe eines quantenmechanischen Atommodells, dass Atome ein diskretes Emissionsspektrum aufweisen. 4 BE
- III.2** In Bildschirmen können Acene (insbesondere 4-A, 5-A und 6-A, siehe M 1) zur Darstellung gewisser Farben verwendet werden. Interessant sind in diesem Zusammenhang insbesondere die Farben Rot, Blau und Grün. Verwenden Sie bei den folgenden Berechnungen stets das Modell des eindimensionalen Potenzialtopfes mit unendlich hohen Wänden.
- a** Begründen Sie rechnerisch, dass bei den folgenden Übergängen in 4-A- bzw. 5-A-Molekülen Photonen emittiert werden, deren Energien den Farben Rot bzw. Blau entsprechen:
4-A: E_3 nach E_2
5-A: E_6 nach E_5 5 BE
 - b** Ermitteln Sie durch eine Rechnung, ob bei einem Übergang in 6-A-Molekülen Photonen emittiert werden, deren Energie der Farbe Grün entspricht.
Dabei sollen nur Übergänge zwischen benachbarten Niveaus betrachtet werden. 5 BE
- III.3** Das Modell des eindimensionalen Potenzialtopfes mit unendlich hohen Wänden liefert eine gute Beschreibung für die Lichtemission von Acenen.
- a** Nennen Sie drei Annahmen, die in Bezug auf ein Acen-Molekül bei der Anwendung des Modells gemacht werden. 6 BE
 - b** Begründen Sie, dass die Modellierung der Acene mittels eines Potenzialtopfes mit unendlich hohen Wänden keine Ionisierung erklären kann. 3 BE
- Eine Erweiterung stellt das Modell des eindimensionalen Potenzialtopfes mit endlich hohen Wänden dar (M 2).
- c** Interpretieren Sie die für die Wellenfunktion $\psi(x)$ des Elektrons im Potenzialtopf mit endlich hohen Wänden gültige Beziehung 4 BE

$$\int_L^\infty |\psi(x)|^2 dx > 0.$$

III.4 Vor dem Aufkommen von LED-Displays waren Plasma-Displays die beliebteste Wahl bei Flachbildschirmen (M 3).

- a** Sowohl LEDs als auch die Gasatome in Plasma-Bildschirmen werden elektrisch zum Leuchten gebracht. Zum Betrieb der LEDs ist hierbei eine Spannung von wenigen Volt ausreichend. Stellen Sie eine Hypothese auf, welcher Spannungsbereich erforderlich ist, um die Gasatome in Plasma-Bildschirmen zum Leuchten anzuregen. 4 BE
- b** Beurteilen Sie die Güte der vom Verkäufer in Material 4 getroffenen Aussagen. 6 BE

Anlage zur Aufgabe Anwendung des Potenzialtopfmodells auf Moleküle

Material 1 Acene

Acene sind organische Verbindungen, die aus mehreren Benzolringen (regelmäßige Sechsecke) bestehen und verschieden lange Ketten bilden.

Je nach Anzahl der Ringe k unterscheidet man 3-A mit 3 Ringen, 4-A mit 4 Ringen, 5-A mit 5 Ringen usw.

Die Länge des eindimensionalen Potenzialtopfes für ein k -A-Molekül kann näherungsweise durch $L_k = k \cdot 0,246 \text{ nm}$ berechnet werden.



Abb. 1: schematische Darstellung eines 3-A-Moleküls

Material 2 Modellerweiterung: Potenzialtopf mit endlich hohen Wänden

Das Modell des eindimensionalen Potenzialtopfes mit unendlich hohen Wänden liefert nicht die korrekten Energieniveaus eines linearen Moleküls. Insbesondere ergäben sich daraus unendlich viele gebundene Zustände mit über alle Grenzen wachsenden Energien. Eine Verfeinerung des Modells ist möglich, wenn die Höhe der Wände des Potenzialtopfes der Realität angepasst wird.

Abbildung 2a zeigt den Verlauf der potenziellen Energie für einen eindimensionalen Potenzialtopf mit endlich hohen Wänden. Somit sind hier nur gebundene Zustände mit Energien kleiner als E_{max} möglich. Weiterhin ist hier die Ionisierung schematisch dargestellt.

Abbildung 2b zeigt den Graphen der Nachweiswahrscheinlichkeitsdichte $|\psi(x)|^2$ eines Elektrons im Grundzustand.

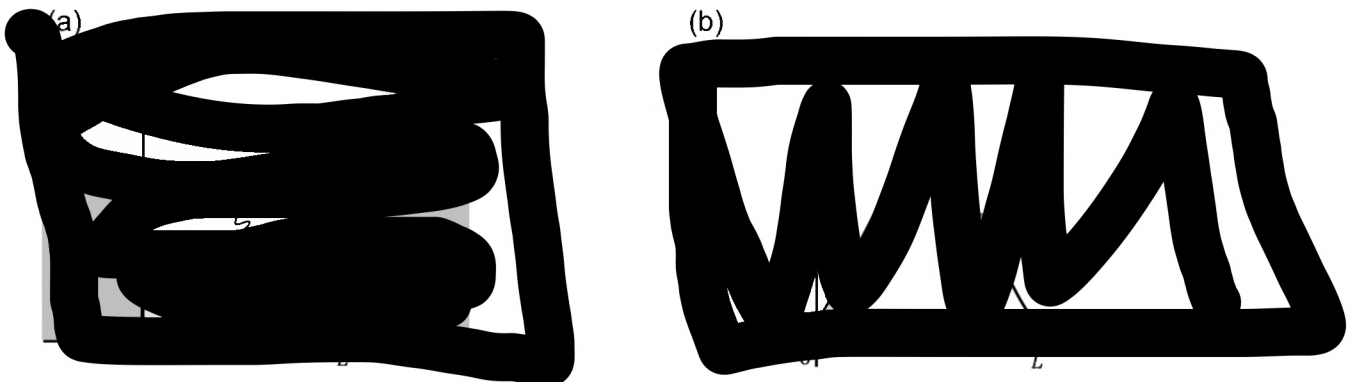


Abb. 2: potenzielle Energie und schematische Darstellung der Ionisierung (a) sowie Nachweiswahrscheinlichkeitsdichte eines Elektrons (b) im linearen Potenzialtopf mit endlich hohen Wänden

Material 3 Vergleich von LED- und Plasma-Bildschirm

Plasma-Bildschirme erzeugen Bilder, indem ein Edelgas durch Stoßanregung mit Elektronen ionisiert wird. Die hierfür notwendige Ionisierungsenergie beträgt etwa 20 eV. Ein Elektron stößt während seiner Bewegung durch das Edelgas je nach Gerät mit etwa 10 bis 50 Gasatomen zusammen. Das ionisierte Gas („Plasma“) emittiert ultraviolettes Licht, welches die Phosphorbeschichtung des Bildschirms anregt, wodurch sichtbares Licht entsteht.

Moderne LED-Bildschirme enthalten in jedem Pixel eine Leuchteinheit, die durch das Anlegen einer elektrischen Spannung separat zum Leuchten angeregt wird und Licht in bestimmten Farben emittiert.

	LED-Bildschirm	Plasma-Bildschirm
Elektrische Eingangsleistung	150 W	300 W
Bildwiederholrate (dargestellte Einzelbilder pro Sekunde)	120 Hz	600 Hz
Horizontale Bildschirmauflösung	4000 Pixel	1080 Pixel

Tab. 1: typische Kennwerte von LED- und Plasma-Bildschirmen gleicher Größe

Material 4 Verkaufsberatung zu LED- und Plasma-Bildschirmen

Im Rahmen eines Verkaufsgesprächs macht ein Verkäufer die folgenden drei Aussagen:

- ♦ LED-Bildschirme sind nachhaltiger, weil sie eine geringere Eingangsleistung aufweisen.
- ♦ LED-Bildschirme sind geeigneter, wenn es auf eine hohe Auflösung ankommt.
- ♦ Plasma-Bildschirme sind besser geeignet, wenn es auf schnelle Bewegungen (z. B. bei schnellen PC-Spielen) ankommt.

Literatur- und Quellenverzeichnis zu Aufgabe III

Material 4

In Anlehnung an: Demers, C. & Di Giovanni, N. (2024, 07. April). *Plasma vs LED vs LCD TVs*. <https://www.rtings.com/tv/learn/lcd-vs-led-vs-plasma> (Zugriff am: 03.12.2024)

Aufgabe IV: Photonenantrieb

40 BE

Schwerpunkt: Quantenphysik und Materie

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.

Teilaufgaben

IV.1 Der Antrieb soll mit Photonen erfolgen (vgl. M 1).

a Erläutern Sie mithilfe des Photonenmodells die Eigenschaften des in Material 1 beschriebenen Laserlichts. 4 BE

b Berechnen Sie die Energie in Elektronenvolt sowie den Impuls eines Photons, das durch den in Material 1 beschriebenen Laser emittiert wird. 6 BE

[Kontrollwerte: $E = 1,87 \cdot 10^{-19} \text{ J}$; $p = 6,25 \cdot 10^{-28} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$]

IV.2 Durch den Antrieb 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 BE

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 BE

IV.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 BE

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 BE

IV.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 BE

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 BE

Anlage zur Aufgabe Photonenantrieb

Material 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 $1,06 \mu\text{m}$ 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.

Material 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 (vgl. Abb. 2).

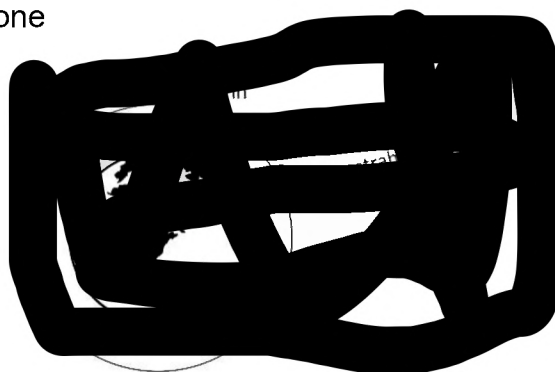


Abb. 1: Photonenantrieb, ausgehend von einer Kreisbahn um die Erde (nicht maßstabsgerecht).

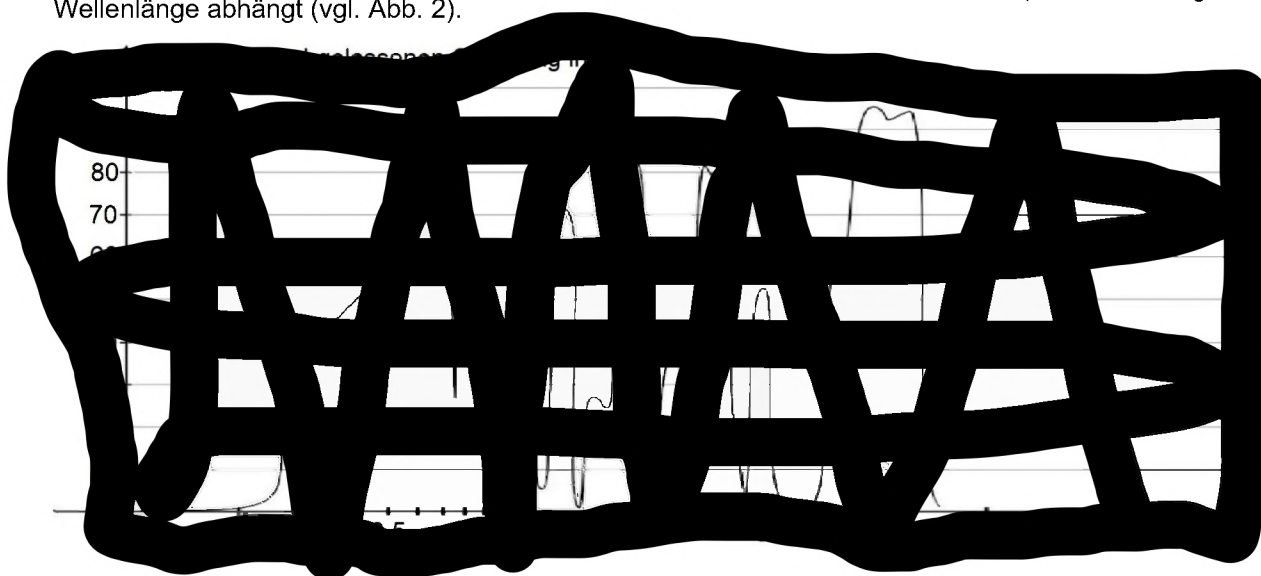


Abb. 2: Anteil der von der Erdatmosphäre durchgelassenen elektromagnetischen Strahlung in Abhängigkeit von ihrer Wellenlänge

Material 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.

Material 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.“

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.

Literatur- und Quellenverzeichnis zu Aufgabe IV

Material 2

[Clicke-Free-Vector-Images] (2023). Pixabay. pixabay.com/de/vectors/globus-welt-erde-schwarz-wei%C3%9F-308065/ (Zugriff am 01.06.2022)

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 11.02.2024)

Material 3

In Anlehnung an:

Umweltbundesamt (2023). *Energieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren*. Verfügbar unter: www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren#entwicklung-des-endenergieverbrauchs-nach-sektoren-und-energietraegern (Zugriff am 30.05.2023)

Statista (2023). *Anzahl der Haushalte in Deutschland nach Anzahl der Personen im Haushalt von 2000 bis 2022*. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167169/umfrage/entwicklung-der-haushaltsgroessen-in-deutschland-seit-2000/> (Zugriff am 30.05.2023)

Material 4

M 4 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 22.11.2023)