



Freie und Hansestadt Hamburg
Behörde für Schule und Berufsbildung

Schriftliche Abiturprüfung Schuljahr 2023/2024

Physik auf erhöhtem Anforderungsniveau an allgemeinbildenden gymnasialen Oberstufen

Haupttermin
Donnerstag, 2. Mai 2024, 9:00 Uhr

Unterlagen für die Lehrkräfte

Diese Unterlagen sind nicht für die Prüflinge bestimmt.

Diese Unterlagen enthalten::

1. Allgemeines
 2. Rückmeldebogen für die Zweiddurchsicht
 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 Lese- und Auswahlzeit von **30 Minuten** ist der Arbeitszeit vorgeschaltet. In dieser Zeit darf noch nicht mit der Bearbeitung der Aufgaben begonnen werden.
- Hilfsmittel: Taschenrechner (nicht programmierbar und nicht grafikfähig), zugelassene Formelsammlung, 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 Zweitdurchsicht:

Bitte umgehend ausfüllen und

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

Information für die Zweitdurchsicht:

Fach:

Physik

auf **erhöhtem Anforderungsniveau**

Kurs-Nummer: _____

Bearbeitet wurden die folgenden Aufgaben:

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

3. Hinweise zu den Aufgaben:

- Die Lehrkraft erhält **drei** Aufgaben (**I, II und III**) zu unterschiedlichen Schwerpunkten und reicht diese an die Schülerinnen und Schüler weiter.
- Die Schülerinnen und Schüler erhalten **alle** Aufgaben (**I, II und III**).
- Die Schülerinnen und Schülern überprüfen anhand der Seitenzahlen, ob sie alle Unterlagen vollständig erhalten haben.
- Sie wählen **zwei** Aufgaben aus und bearbeiten diese.
- Sie vermerken auf der Reinschrift, welche Aufgaben sie bearbeitet haben (**I und II, I und III oder II und III**).

4. Hinweise zum Korrekturverfahren:

- Die Korrekturen werden gemäß der geltenden „Richtlinie für die Aufgabenstellung und Bewertung der Leistungen in der Abiturprüfung“ (Abiturrichtlinie) 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 „Festsetzung der Note bei einer Differenz der im Erstgutachten und im ergänzenden Gutachten erteilten Punktzahlen von mehr als drei Notenpunkten“.
- Die Bewertungsbögen sind als Download hier zu finden: <http://hamburg.de/hera>

5. Bewertung und Erwartungshorizont:

I. Hinweise zur Bewertung

Jeder Aufgabe sind 50 Bewertungseinheiten (BE) zugeordnet. In allen Teilaufgaben werden nur ganze BE vergeben. Insgesamt sind 100 BE erreichbar. Bei der Festlegung von Notenpunkten gilt die folgende Tabelle:

Erbrachte Leistung (in BE)	Notenpunkte
≥ 95	15
≥ 90	14
≥ 85	13
≥ 80	12
≥ 75	11
≥ 70	10
≥ 65	9
≥ 60	8

Erbrachte Leistung (in BE)	Notenpunkte
≥ 55	7
≥ 50	6
≥ 45	5
≥ 40	4
≥ 33	3
≥ 27	2
≥ 20	1
< 20	0

Für die Erteilung der **Note ausreichend** (5 Punkte) ist mindestens erforderlich, dass die Schülerinnen und Schüler annähernd die Hälfte der erwarteten Gesamtleistung und über den Anforderungsbereich I hinaus Leistungen in einem weiteren Anforderungsbereich erbracht haben. Es ist erforderlich, dass je nach Aufgabenstellung

- Sachverhalte korrekt wiedergegeben und in Teilen korrekt angewendet werden
- einfache Fachmethoden korrekt beschrieben und in Teilen korrekt angewendet werden
- vorgegebene Kommunikations- und Darstellungsformen korrekt angewendet werden
- einfache Bezüge aufgezeigt werden und
- die Darstellung erkennbar geordnet und sprachlich verständlich ist.

Für die Erteilung der **Note gut** (11 Punkte) ist mindestens erforderlich, dass die Schülerinnen und Schüler annähernd vier Fünftel der erwarteten Gesamtleistung sowie Leistungen in allen drei Anforderungsbereichen erbracht haben. Dabei muss die Prüfungsleistung in ihrer Gliederung, in der Gedankenführung, in der Anwendung fachmethodischer Verfahren sowie in der fachsprachlichen Artikulation den Anforderungen voll entsprechen. Es ist erforderlich, dass je nach Aufgabenstellung

- Sachverhalte und Fachmethoden korrekt dargestellt und in abgegrenzten Gebieten korrekt angewendet werden
- Kenntnisse und Fachmethoden stellenweise zur Lösung von Problemen selbstständig herangezogen werden
- Kommunikations- und Darstellungsformen korrekt angewendet und in Teilen selbstständig ausgewählt werden
- Bezüge hergestellt und Bewertungsansätze wiedergegeben werden und
- die Darstellung in ihrer Gliederung und Gedankenführung klar strukturiert und nachvollziehbar ist sowie den allgemeinen und fachsprachlichen Anforderungen voll entspricht.

Die zwei voneinander unabhängigen Aufgaben der Prüfungsaufgabe werden jeweils mit 50 Bewertungseinheiten bewertet. Die erbrachte Gesamtleistung ergibt sich aus der Summe der Bewertungseinheiten in den beiden Aufgaben.

Bei erheblichen Mängeln in der sprachlichen Richtigkeit sind bei der Bewertung der schriftlichen Prüfungsleistung je nach Schwere und Häufigkeit der Verstöße bis zu zwei Notenpunkte abzuziehen. Dazu gehören auch Mängel in der Gliederung, Fehler in der Fachsprache, Ungenauigkeiten in Zeichnungen sowie falsche Bezüge zwischen Zeichnungen und Text.

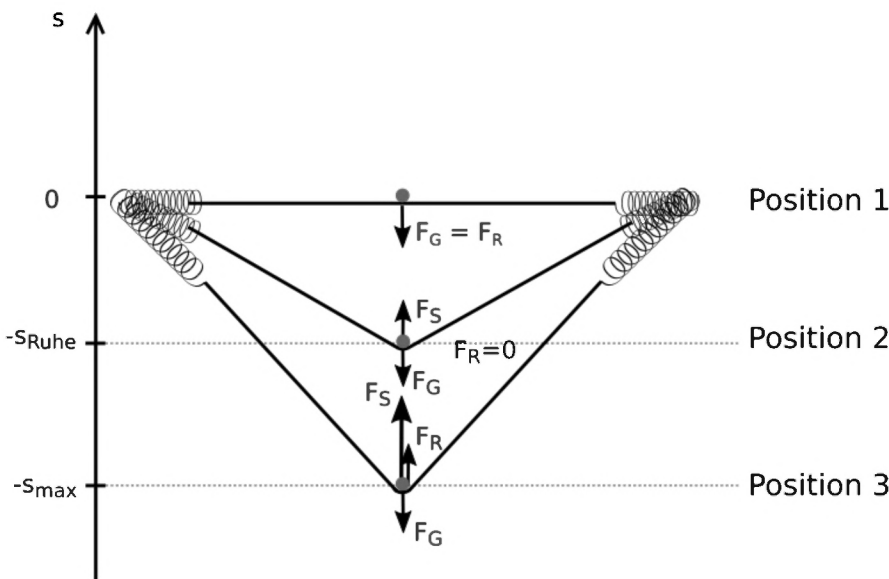
II. Erwartungshorizont

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: Das Trampolin

Schwerpunktthema: Schwingungen und Wellen

	Lösungsskizze	Zuordnung Bewertung		
		I	II	III
a)	<p>• Aus der Zeichnung muss Folgendes hervorgehen: In Position 1 wirkt nur die Gewichtskraft F_G auf den Artisten und ist damit identisch mit der rücktreibenden Kraft F_R. In der Ruhelage in Position 2 haben die Gewichtskraft und die Spannkraft F_S des Sprungtuchs den gleichen Betrag und sind entgegengerichtet. Dort ist die rücktreibende Kraft gleich null. In Position 3 überwiegt die Spannkraft des Tuchs, die rücktreibende Kraft ist die vektorielle Addition aus Spannkraft und Gewichtskraft.</p>  <p>Quelle: BSB</p>	5		
	<p>• In der Ruhelage gilt für die Spannkraft $F_S = D \cdot s_{\max}$. Mit dem Kräftegleichgewicht $F_G = F_S$ ergibt sich damit eine Richtgröße von</p> $m \cdot g = D \cdot s_{\max}$ $D = \frac{m \cdot g}{s_{\max}}$ $= \frac{75 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{0,8 \text{ m}} \approx 919,69 \frac{\text{N}}{\text{m}}$	3		
	<p>• Die Periodendauer einer idealisierten harmonischen Schwingung berechnet sich zu</p> $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{D}}$ $= 2\pi \sqrt{\frac{75 \text{ kg}}{919,69 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}}} \approx 1,79 \text{ s}$	2		

	Lösungsskizze	Zuordnung Bewertung		
		I	II	III
b)	<ul style="list-style-type: none"> Für eine Fallstrecke von $h = 10\text{ m}$ gilt im freien Fall $h = \frac{1}{2}gt_{\text{Fall}}^2$ $t_{\text{Fall}} = \sqrt{\frac{2h}{g}}$ $= \sqrt{\frac{20\text{ m}}{9,81\frac{\text{m}}{\text{s}^2}}} \approx 1,43\text{ s.}$ <p>Für Kunststücke hat der Artist also maximal die doppelte Zeit von $t = 2 \cdot t_{\text{Fall}} \approx 2,86\text{ s}$ zur Verfügung.</p> Der Artist wird während des freien Falls nach unten gleichmäßig beschleunigt, der Betrag seiner Geschwindigkeit nimmt daher auf dem Weg zum Sprungtuch linear zu. Graph Nr. III beschreibt die Bewegung daher nicht korrekt. Ab dem Erreichen des Sprungtuchs nimmt der Betrag der Geschwindigkeit zunächst noch weiter zu, bis der maximale Betrag in der Ruhelage (<i>Position 2</i>) erreicht ist. Diese Geschwindigkeitszunahme ist allerdings durch das Sprungtuch reduziert. Dadurch ist Graph Nr. II ausgeschlossen. Unterhalb der Ruhelage nimmt der Geschwindigkeitsbetrag zunehmend stärker ab, bis die Geschwindigkeit im Umkehrpunkt (<i>Position 3</i>) auf null abgebremst ist. Dann beschleunigt das Sprungtuch den Artisten umgekehrt wieder nach oben, so dass seine nun positive Geschwindigkeit immer weniger stark zunimmt. Nachdem die Ruhelage überschritten ist, überwiegt die Gewichtskraft die Spannkraft des nicht mehr stark gedehnten Sprungtuchs und die Geschwindigkeit nimmt langsam wieder ab. Nach dem Abheben vom Sprungtuch nimmt die Geschwindigkeit aufgrund der konstanten Fallbeschleunigung wieder linear ab, bis der Artist seine Absprunghöhe erreicht hat. Genau dort ist die Geschwindigkeit wieder auf null gefallen. Diese Bewegung wird in Graph Nr. I korrekt dargestellt. 		4	
			4	

	Lösungsskizze	Zuordnung Bewertung		
		I	II	III
	<p>• Im ausgewählten Diagramm können Stellen des Graphen oder die entsprechenden Zeitpunkte an der Zeitachse markiert werden. Sollte ein falsches Diagramm ausgewählt worden sein, so sind Zuordnungen als richtig zu werten, die konsistent mit der Begründung in der vorhergehenden Teilaufgabe sind.</p> <p>Quelle: BSB</p>		4	
	<p>• Da die Beschleunigung eines Körpers im freien Fall unabhängig von der Masse des Körpers ist, ist die Auftreffgeschwindigkeit für den Artisten und das Kind gleich.</p> <p>Die Schwingungsperiode auf dem Sprungtuch ist von der Masse abhängig:</p> $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{D}}$ <p>Wenn die Masse halbiert wird, ändert sich die Periodendauer um den Faktor</p> $\frac{T_{\text{Kind}}}{T_{\text{Artist}}} = \sqrt{\frac{m_{\text{Kind}}}{m_{\text{Artist}}}} = \sqrt{\frac{1}{2}} \approx 0,71$			4
c)	<p>• Die Energieformen an den drei Positionen sind:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Position A: Höhenenergie (<i>potentielle Energie des Artisten im Gravitationsfeld</i>) – Position B: Höhenenergie und Bewegungsenergie (<i>kinetische Energie der Translation des Artisten</i>) – Position C: Spannenergie (<i>potentielle Energie des gespannten Sprungtuchs und der Spiralfedern</i>) 	4		

	Lösungsskizze	Zuordnung Bewertung		
		I	II	III
	<ul style="list-style-type: none"> Mit einem Energieansatz ergibt sich eine quadratische Gleichung, deren Lösung sich z. B. mithilfe der pq-Formel bestimmen lässt: $E_{\text{Höhe,A}} = E_{\text{Spann}}$ $mg(h + s_{\text{max}}) = \frac{1}{2} D s_{\text{max}}^2$ $0 = s_{\text{max}}^2 - \frac{2mg}{D} s_{\text{max}} - \frac{2mgh}{D}$ $s_{\text{max}} = \frac{mg}{D} \pm \sqrt{\left(\frac{mg}{D}\right)^2 + \frac{2mgh}{D}}$ <p><i>Hinweis: Mit der Beziehung $s_{\text{Ruhe}} = \frac{mg}{D} = 0,8 \text{ m}$ vereinfacht sich die Lösung erheblich zu $s_{\text{max}} = s_{\text{Ruhe}} \pm \sqrt{(s_{\text{Ruhe}})^2 + 2h \cdot s_{\text{Ruhe}}}$.</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Mit $m = 75 \text{ kg}$, $h = 10 \text{ m}$ und $D = 919,69 \frac{\text{N}}{\text{m}}$ ergeben sich zwei Lösungen: $s_{\text{max}} \approx 4,88 \text{ m} \vee s_{\text{max}} \approx -3,28 \text{ m}$ <p>Die gesuchte Einsinktiefe ist $s_{\text{max}} \approx 4,88 \text{ m}$, da aufgrund der Richtung der s-Achse das positive Ergebnis unter dem unausgelenkten Sprungtuch liegt.</p> <p><i>Alternative Lösung: Die negative Lösung bezeichnet den Ort oberhalb des Trampolins, an dem die Spannenergie des Trampolins gleich der Höhenenergie von einer Fallstrecke von nur $10 \text{ m} - 3,28 \text{ m} = 6,72 \text{ m}$ ist. Die Einsinktiefe ist die Lösung mit dem größeren Betrag, also $s_{\text{max}} = 4,88 \text{ m}$.</i></p>		4	
d)	<ul style="list-style-type: none"> Im Diagramm ist zu erkennen, dass die rücktreibende Kraft im realen Fall mit größer werdender Auslenkung schneller steigt als in der linearen Näherung. Da die rücktreibende Kraft und damit auch die Beschleunigung, mit welcher der Artist nach dem Einsinken in das Sprungtuch von diesem abgebremst wird, größer ist, als in der Näherung angenommen, wird der Artist schon bei einer geringeren maximalen Einsinktiefe vollständig abgebremst worden sein. <p><i>Alternativer Lösungsweg: Die Fläche unter der Funktion $F_s(s)$ in den Grenzen von $s = 0$ bis $s = s_{\text{max}}$ entspricht der Spannenergie des Sprungtuchs. Da die reale Kurve über der genäherten Kurve liegt, ist die gleiche Fläche schon bei kleinerem s_{max} erreicht.</i></p>		3	
				3

	Lösungsskizze	Zuordnung Bewertung		
		I	II	III
e)	<p>• Die aufzubringende Energiedifferenz berechnet sich aus der Spannenergie des Sprungtuches bei der erforderlichen Einsinktiefe von $s_{\max,0} = 4,96 \text{ m}$ im Vergleich zu einer durch Reibung reduzierten Einsinktiefe von $s_{\max,1} = 4,81 \text{ m}$. Zusätzlich muss die veränderte Höhenenergie beachtet werden, die wegen der kleineren Einsinktiefe nun höherliegt und damit die Energiedifferenz reduziert. Mit $D = 919,69 \frac{\text{N}}{\text{m}}$, $m = 75 \text{ kg}$ und $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ ergibt sich</p> $\begin{aligned}\Delta E &= E_{\text{Spann},0} - E_{\text{Spann},1} - \Delta E_{\text{pot}} \\ &= \frac{1}{2} D s_{\max,0}^2 - \frac{1}{2} D s_{\max,1}^2 - mg(s_{\max,0} - s_{\max,1}) \\ &\approx 563,53 \text{ J}\end{aligned}$ <p><i>Alternativer Lösungsweg:</i> Auf dem Weg nach oben bis zur Höhe des Podestes h wird die Spannenergie des Sprungtuchs in potentielle Energie umgewandelt. Die Differenz dieser beiden Energien ist die Energie, die auf dem Weg nach oben durch Reibungseffekte in andere Energieformen umgewandelt wird:</p> $\begin{aligned}\Delta E_{\text{hoch}} &= E_{\text{Spann},0} - E_{\text{pot}} \\ &= \frac{1}{2} D s_{\max,0}^2 - mg(s_{\max,0} + h) \\ &= \frac{1}{2} D \cdot (4,96 \text{ m})^2 - mg \cdot 14,96 \text{ m} \\ &= 11312,92 \text{ J} - 11006,82 \text{ J} = 306,10 \text{ J}\end{aligned}$ <p>Auf dem Weg nach unten wird die potentielle Energie wieder in Spannenergie umgewandelt:</p> $\begin{aligned}\Delta E_{\text{hoch}} &= E_{\text{pot}} - E_{\text{Spann},0} \\ &= mg(s_{\max,1} + h) - \frac{1}{2} D s_{\max,1}^2 \\ &= mg \cdot 14,81 \text{ m} - \frac{1}{2} D \cdot (4,81 \text{ m})^2 \\ &= 10896,46 \text{ J} - 10639,02 \text{ J} = 257,44 \text{ J}\end{aligned}$ <p>(Hinweis: Diese Energiedifferenz ist etwas kleiner, da weniger Reibung in dem weniger gedehnten Tuch stattfindet.)</p> <p>Beide Differenzen zusammen ergeben eine Energie von 563,54 J, die pro Sprung durch den Artisten aufgebracht werden müssen.</p>		4	

	Lösungsskizze	Zuordnung Bewertung		
		I	II	III
	<ul style="list-style-type: none"> Die Energie, die ein Artist auf dem Trampolin aufbringen kann, lässt sich beispielsweise über die Sprunghöhe abschätzen, die er auf festem Boden erreichen könnte. Unter der Annahme, dass der Artist seinen Schwerpunkt bei einem solchen Sprung um ca. $h = 1 \text{ m}$ anheben kann, ist er in der Lage, eine Arbeit von $E = m \cdot g \cdot h = 75 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1 \text{ m} \approx 740 \text{ J}$ zu verrichten. <i>Ein alternativer Ansatz ist die Betrachtung der geschätzten Absprunggeschwindigkeit vom Tuch nach einer Beschleunigung des eigenen Schwerpunkts durch die Beine nach oben. Aus dieser Geschwindigkeit kann die kinetische Energie berechnet werden. Ebenso kann die maximale Kraft der Beine abgeschätzt werden und dann die Energie berechnet werden, die sich daraus ergibt, dass diese Kraft über eine sinnvoll geschätzte Anhubstrecke wirkt ($E = F_{\text{max}} \cdot \Delta h$). Als weiterer Ansatz kann die Höhenenergie berechnet werden, die der Artist in das System bringt, indem er auf dem Trampolin in die Hocke geht und dann seine Beine streckt. Die maximale Strecke, um die der Schwerpunkt angehoben werden kann, ergibt sich durch die Beugung und Streckung der Knie und hängt mit der Länge der Beine zusammen.</i> 			3
f)	<ul style="list-style-type: none"> Drei sinnvolle Ursachen sollen herausgearbeitet werden, einige Beispiele sind: <ul style="list-style-type: none"> Der Schwimmring wird bei jedem Sprung ins Wasser gedrückt und erzeugt dadurch Wasserwellen, die einen großen Teil der Energie aus dem Sprungsystem aufnehmen. Der Schwimmring gleitet bei seiner Auf-und-ab-Bewegung im Wasser an den Wassermolekülen vorbei und erwärmt diese durch Reibung. Sowohl der Schwimmreifen als auch das Nylonnetz werden durch die Belastung verformt und nehmen dabei Energie auf, die schließlich in Wärme umgewandelt wird. Das Sprungtuch ist zwar luftdurchlässig, das engmaschige Netz hat aber einen nicht zu vernachlässigenden Luftwiderstand. Es wird also Energie an die Bewegung der Luft abgeführt. Die springende Person bewegt sich ebenfalls durch Luft und wird von dieser abgebremst. Auch hier wird Energie an die Bewegung der Luft übertragen. 			3
Insgesamt 50 BWE		14	23	13

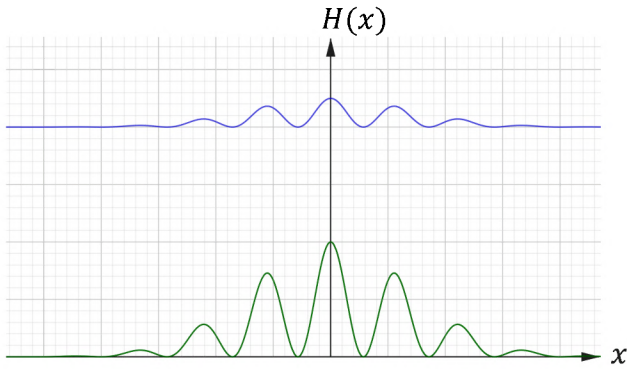
Aufgabe II: Photomultiplier und ihre Einsatzgebiete

Schwerpunktthema: Quantenphysik

	Lösungsskizze	Zuordnung Bewertung		
		I	II	III
a)	<ul style="list-style-type: none"> Nach den Vorstellungen Einsteins besteht elektromagnetische Strahlung aus Energiequanten, den sogenannten Photonen. Treffen Photonen auf die Oberfläche eines Materials, werden Elektronen aus diesem herausgelöst, sofern die Energie der einzelnen Photonen größer als die Austrittsarbeit des Materials ist. Die Energie der Photonen hängt nur von deren Frequenz (bzw. Wellenlänge) ab und je Photon wird maximal ein Elektron aus der Oberfläche gelöst. Die Energie des Photons muss größer oder gleich der Austrittsarbeit sein: $E_{Ph} = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \geq W_A \Leftrightarrow \lambda \leq \frac{h \cdot c}{W_A}$ <p>Mit $W_A = 1,5 \text{ eV} \approx 2,4 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ergibt sich:</p> $\lambda \leq \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2,4 \cdot 10^{-19} \text{ J}} \approx 8,3 \cdot 10^{-7} \text{ m}.$ <p>Die Photonen dürfen höchstens eine Wellenlänge von 827 nm haben, um Elektronen aus der Photokathode des Photomultipliers herauszulösen.</p> 	4	3	
b)	<ul style="list-style-type: none"> Es gilt: $E_{kin,0} = \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{kin,0}}{m}}$. Einsetzen der gegebenen Werte liefert: $v = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,83 \text{ eV}}{9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,33 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}} \approx 540 \frac{\text{km}}{\text{s}}.$ Die maximale Bewegungsenergie der Elektronen beträgt beim Ablösen von der Photokathode ca. 0,83 eV. Dies macht bei einer zusätzlich zugeführten Bewegungsenergie von 200 eV beim Erreichen der ersten Dynode lediglich einen Bruchteil ($\approx 0,4\%$) der gesamten Bewegungsenergie aus. Die Anzahl der 5 – 10 ausgelösten Sekundärelektronen wird sich hierdurch also nicht merklich ändern. 	4	3	

	Lösungsskizze	Zuordnung Bewertung		
		I	II	III
c)	<ul style="list-style-type: none"> Ausgehend von der Photonenenergie ergibt sich $E_{Ph} = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ $\frac{E_{Ph}}{\text{eV}} = \frac{h \cdot c}{1 \text{ eV} \cdot 1 \text{ nm}} \cdot \frac{1}{\frac{\lambda}{\text{nm}}}$ $\frac{E_{Ph}}{\text{eV}} \approx 1240 \cdot \frac{1}{\frac{\lambda}{\text{nm}}}$ $E_{Ph} \approx 1240 \text{ eV} \cdot \text{nm} \cdot \frac{1}{\lambda}$ <p>Der Proportionalitätsfaktor beträgt $\alpha \approx 1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}$.</p> <p><i>Alternativ lässt sich der Proportionalitätsfaktor α bestimmen, indem das Produkt aus der Energie eines Photons (in eV) und seiner Wellenlänge (in nm) anhand eines konkreten Zahlenbeispiels berechnet wird.</i></p>		4	
d)	<ul style="list-style-type: none"> Die Transmission des Eintrittsfensters liegt bei einer Wellenlänge von 532 nm bei rund 91 %. Die Quanteneffizienz bei derselben Wellenlänge liegt bei ca. 12,5 %. Es lösen folglich rund $0,91 \cdot 0,125 \approx 11,4\%$ der auf das Fenster treffenden Photonen ein Elektron aus der Photokathode. <p><i>Alle ermittelten Werte, die um maximal ± 3 Prozentpunkte vom hier angegebenen Wert (11,4 %) abweichen, sind als korrekt anzusehen.</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Ein Photomultiplier lässt keine genauen Rückschlüsse auf die Wellenlänge der detektierten Photonen zu. Es lässt sich lediglich ein (vergleichsweise breites) Intervall angeben, in dem die Wellenlänge des Photons liegen muss. Diese muss zum einen kurz genug sein, um ein Elektron aus der Photokathode zu lösen, und zum anderen in einem Bereich liegen, für den sowohl die Transmission des Eintrittsfensters als auch die Quanteneffizienz nicht null ist. Es ist zu erwarten, dass bei monochromatischer Strahlung die Anzahl der ausgelösten Elektronen proportional zur Anzahl der eintreffenden Photonen (also der Intensität) ist. Die Anzahl der ausgelösten Sekundärelektronen ist wiederum proportional zur Anzahl der Primärelektronen. Eine Intensitätsmessung sollte mit PMTs also bei monochromatischer Strahlung (in gewissen Grenzen) möglich sein. <p><i>Dass bei hohen Intensitäten Sättigungseffekte auftreten, die eine Intensitätsmessung nicht mehr zulassen, wird nicht als Teil der Lösung erwartet.</i></p>		3	4

	Lösungsskizze	Zuordnung Bewertung		
		I	II	III
e)	<ul style="list-style-type: none"> Mit der Rydbergformel lässt sich die Frequenz der zu einem Übergang gehörenden Spektrallinie berechnen: $f = R_H \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right).$ <p>Für die Balmer-Serie gilt $n = 2$. Der Übergang mit der kleinsten Frequenz (bzw. der größten Wellenlänge) ist durch $m = 3$ gegeben, der Übergang mit der größten Frequenz (bzw. der kleinsten Wellenlänge) durch $m \rightarrow \infty$. Einsetzen ergibt:</p> $f_{\min} = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ Hz} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right) \approx 4,57 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$ <p>bzw.</p> $f_{\max} = \lim_{m \rightarrow \infty} 3,29 \cdot 10^{15} \text{ Hz} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2} \right) \approx 8,23 \cdot 10^{14} \text{ Hz}.$ <p>Mit $\lambda = \frac{c}{f}$ ergeben sich folgende Wellenlängen:</p> $\lambda_{\max} = \frac{c}{f_{\min}} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{4,57 \cdot 10^{15} \text{ Hz}} \approx 656 \text{ nm}$ <p>bzw.</p> $\lambda_{\min} = \frac{c}{f_{\max}} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{8,23 \cdot 10^{14} \text{ Hz}} \approx 364 \text{ nm}.$ <p>Photonen mit einer dieser Wellenlängen lösen im PMT unter Berücksichtigung der Transmission des Eintrittsfensters und der Quanteneffizienz der Photokathode ein Signal aus. Da alle anderen Übergänge der Balmer-Serie Spektrallinien erzeugen, deren Wellenlänge zwischen den beiden betrachteten Grenzfällen liegt, ist der PMT zur Detektion aller Linien der Balmer-Serie geeignet.</p>		5	
f)	<ul style="list-style-type: none"> Wellenmodell: Der Neutralsichtfilter verringert die Amplitude der eintreffenden elektromagnetischen Welle. Teilchenmodell: Der Neutralsichtfilter lässt nur einen Teil der auf ihn treffenden Photonen hindurch. Bei einer Rate von 1 000 000 Photonen pro Sekunde wird im Mittel alle 10^{-6} Sekunden ein Photon durch den Filter gelangen. Mit $s = c \cdot t$ ergibt sich hieraus ein Abstand von $s \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 10^{-6} \text{ s} \approx 300 \text{ m}$ zwischen zwei aufeinanderfolgenden Photonen. Erreicht ein Photon den Doppelspalt, hat das vorangehende Photon höchstwahrscheinlich längst die Schirmebene erreicht. 	3		3

	Lösungsskizze	Zuordnung Bewertung		
		I	II	III
g)	<ul style="list-style-type: none"> Jedes Photon wird an einem bestimmten Ort in der Schirmebene registriert. Dieses Verhalten lässt sich mit dem Teilchencharakter von Photonen treffend erklären. Der Wellencharakter von Photonen zeigt sich, wenn man die Verteilung der Auftrefforte betrachtet. Diese ergibt ein Muster mit Maxima und Minima, welches sich auf die Interferenz zweier Wellen zurückführen lässt. Die Auftrefforte der einzelnen Photonen in Abb. 7 sind annähernd homogen über die gesamte Breite verteilt. Die zu erwartende signifikante Häufung von Auftrefforten im Bereich um das Hauptmaximum ist nicht erkennbar. Dass die Auswertelektronik das Experiment automatisch abbricht, ist wegen dieser Abweichung von der erwarteten Verteilung gerechtfertigt. <i>Alternativlösung: Auch in der Nähe von Interferenzminima wurden verhältnismäßig viele Photonen detektiert, was jedoch nur selten der Fall sein sollte.</i> Aus der Zeichnung sollte hervorgehen, dass sich die horizontale Lage der Maxima nicht verändert. Der Untergrund der neuen Häufigkeitsverteilung sollte die doppelte Höhe des ursprünglichen Hauptmaximums aufweisen und das neue Hauptmaximum nur 1/4 der Höhe des ursprünglichen Hauptmaximums, bezogen auf den jeweiligen Untergrund, haben. 		4	
	 <p>Quelle: BSB</p>		4	
	<ul style="list-style-type: none"> Wird der Laser ausgeschaltet, so können die Intensität und die Verteilung des Streulichts in der Detektorebene bestimmt werden. Schaltet man anschließend den Laser ein und wiederholt den Messvorgang in derselben Weise, werden zusätzlich auch die durch den Doppelspalt gelangenden Photonen detektiert. Der zuvor bestimmte Einfluss des Streulichts kann nun als „Untergrund“ von der zweiten Messung subtrahiert werden und man erhält (annähernd) die Verteilung der Photonen, die den Doppelspalt passiert haben. <p><i>Alternativ kann der Untergrund aus der Höhe der Minima der gemessenen Häufigkeitsverteilung ermittelt und subtrahiert werden.</i></p> <p>In jedem Fall muss die Messdauer groß genug sein, damit das Signal der vom Doppelspalt herrührenden Photonen sich erkennbar vom Untergrund der Streulichtphotonen abhebt.</p>			3
Insgesamt 50 BWE		14	23	13

Aufgabe III: Medizinphysik

Schwerpunktthema: Teilchen im elektromagnetischen Feld

(50 BE)

	Lösungsskizze	Zuordnung Bewertung		
		I	II	III
a)	<ul style="list-style-type: none"> Die Energie des Teilchens nach dem Durchlaufen des elektrischen Feldes ist der kinetischen Energie gleichzusetzen: $E_{\text{kin}} = E_{\text{el}}$ $\frac{1}{2}mv^2 = qU$ $v = \sqrt{\frac{2qU}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 50 \cdot 10^3 \text{ V}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}} \approx 1,3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ <ul style="list-style-type: none"> Diese Elektronengeschwindigkeit entspräche 44% der Lichtgeschwindigkeit. Hier wäre eigentlich relativistisch zu rechnen. Die tatsächliche Elektronengeschwindigkeit ist aufgrund der relativistischen Massenzunahme geringer als klassisch erwartet. 	4		
b)	<ul style="list-style-type: none"> Aus dem Durchmesser d der Spule lassen sich Radius r und Umfang U und mit diesem die Windungszahl N anhand der Gesamtlänge L des Drahtes berechnen: $N = \frac{L}{U} = \frac{L}{2\pi r} = \frac{L}{\pi d} = \frac{10 \text{ km}}{\pi \cdot 1,0 \text{ m}} \approx 3183$ <p>Für die Stromstärke, welche für die gewünschte magnetische Flussdichte B bei einer Spulenlänge ℓ benötigt wird, folgt:</p> $I = \frac{B\ell}{\mu_0 N} = \frac{1,5 \text{ T} \cdot 2,0 \text{ m}}{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m} \cdot 3183} \approx 750 \text{ A}$ <ul style="list-style-type: none"> Aus der Skizze soll zu erkennen sein, dass die Feldlinien grundsätzlich geschlossen sind, im Zentrum der Spule annähernd parallel und äquidistant verlaufen und dass ihre Dichte außerhalb der Spule deutlich abnimmt. Stromrichtung und Richtung des magnetischen Feldes sind kenntlich zu machen. <p>Das Bild wurde aus urheberrechtlichen Gründen entfernt.</p> <p>Quelle: https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/stroeme-magnetisches-feld/grundwissen/magnetfeld-von-langen-zyinderspulen, letzter Zugriff: 09.08.2023</p>	5		

	Lösungsskizze	Zuordnung Bewertung		
		I	II	III
c)	<ul style="list-style-type: none"> Wenn ein Strom in x-Richtung fließt und das Magnetfeld in z-Richtung zeigt, werden die Ladungsträger aufgrund der Lorentzkraft in y-Richtung abgelenkt. Hierdurch wird die eine Seitenfläche des Sensorplatte negativ, die gegenüberliegende positiv aufgeladen und ein elektrisches Feld baut sich zwischen diesen beiden Seitenflächen in y-Richtung auf. Die Hall-Spannung, die zwischen diesen beiden Seitenflächen gemessen werden kann, stellt sich so ein, dass an den Ladungsträgern ein Gleichgewicht zwischen der Lorentz- und der Coulomb-Kraft herrscht. Aus der Dicke d der Sensorplatten, Stromstärke I, Hall-Konstante R_H und gemessener Hall-Spannung U_H lässt sich die magnetische Flussdichte bestimmen: $B = \frac{U_H \cdot d}{R_H \cdot I}$ <p>So erhält man:</p> $B_1 = \frac{160 \text{ mV} \cdot 3 \text{ mm}}{0,3 \text{ m}^3/\text{C} \cdot 2 \text{ mA}} = 0,8 \text{ T} \quad B_2 = \frac{120 \text{ mV} \cdot 3 \text{ mm}}{0,3 \text{ m}^3/\text{C} \cdot 2 \text{ mA}} = 0,6 \text{ T}$ <p>Aus diesen orthogonalen Komponenten lässt sich der Betrag der Gesamtflussdichte mit dem Satz des Pythagoras berechnen:</p> $B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2} = \sqrt{(0,8 \text{ T})^2 + (0,6 \text{ T})^2} = 1,0 \text{ T}$ 		4	
d)	<ul style="list-style-type: none"> Die Lorentzkraft wirkt als Zentripetalkraft: $F_L = F_Z$ $qvB = \frac{mv^2}{r}$ <p>So erhält man für den Bahnradius:</p> $r = \frac{m}{qB} \cdot v$ <p>Also ist $r \propto v$. Die Geschwindigkeit kann aus der kinetischen Energie mit $E = \frac{1}{2}mv^2$ bestimmt werden, so dass $v \propto \sqrt{E}$ und deshalb $r \propto \sqrt{E}$ folgt.</p> Der Ablenkradius ist abhängig von der Geschwindigkeit (bzw. der kinetischen Energie), wie oben gezeigt. In der Praxis gelingt es nicht, alle Elektronen exakt auf die gleiche Geschwindigkeit (Energie) zu beschleunigen. Niedrigere und höhere Geschwindigkeiten (Energien) resultieren dann in einem Spektrum an kleineren und größeren Bahnraden im Umlenkmagneten. Ist die neue Energie (E_+) um 10% höher als die ursprüngliche (E), dann folgt für den neuen Radius im Verhältnis zum ursprünglichen Radius, wenn m, q und B identisch sind: $\frac{r_+}{r} = \frac{\sqrt{E_+}}{\sqrt{E}} = \frac{\sqrt{1,1 \cdot E}}{\sqrt{E}} = \sqrt{1,1} \approx 1,05$ <p>Der neue Radius ist circa 5% größer als der ursprüngliche Radius.</p> 		5	
			3	
				3

	Lösungsskizze	Zuordnung Bewertung		
		I	II	III
	<ul style="list-style-type: none"> Von Bedeutung ist der Verlauf der beiden Randstrahlen im und nach dem Umlenkmagneten. <p>Das Bild wurde aus urheberrechtlichen Gründen entfernt.</p> <p>Quelle: http://www.mabo-physik.de/elektronenstrahl_fokussierung.html, letzter Zugriff: 09.08.2023</p> <ul style="list-style-type: none"> In Abb. 5 haben die Randstrahlen im Umlenkmagneten jeweils keinen konstanten Radius und verlaufen nach der Aufweitung fälschlicherweise parallel. In der korrigierten Skizze erfährt der linke Randstrahl mit dem kleineren Bahnradius bis zum Verlassen des Magneten eine Umlenkung um mehr als 90°, der rechte Randstrahl eine Umlenkung um weniger als 90°, so dass der aufgeweitete Strahl divergent verläuft. 			3
e)	<ul style="list-style-type: none"> Als Abschätzung für eine Eindringtiefe von 15 cm wird der Mittelwert der Auftreffgeschwindigkeiten für Eindringtiefen von 13 und 17 cm verwendet. Mit Abb. 6 erhält man so, dass für eine Eindringtiefe von 15 cm eine Auftreffgeschwindigkeit von etwa $(1,09 + 1,17)/2 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 1,13 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ benötigt wird. Für die Beschleunigungsspannung folgt mit $E_{\text{kin}} = E_{\text{el}}$ (s. o.): $U = \frac{mv^2}{2q} = \frac{1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot (1,13 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}} \approx 67 \text{ MV}$ <p>Wird aufgrund von Abb. 6 eine etwas kleinere Auftreffgeschwindigkeit für eine Eindringtiefe von 15 cm abgeschätzt, ist das ebenfalls ohne Abzüge zu bewerten. Für $1,12 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ folgt beispielsweise eine Spannung von ca. 65 MV.</p> <ul style="list-style-type: none"> Für Elektronen und Protonen gilt, dass die Eindringtiefe mit der Auftreffgeschwindigkeit steigt. Bei geringeren Auftreffgeschwindigkeiten dringen die Protonen jedoch deutlich tiefer als die Elektronen ein. Abb. 6 zeigt, dass zwar ein großer Teil der Energie in einem schmalen Tiefenbereich um das Maximum abgegeben wird, dass auf der vorherigen Strecke allerdings auch bereits ein signifikanter Energieübertrag stattfindet. Bei der Bestrahlung aus nur einer Richtung wird auf dem Weg zum Zielvolumen diese Energie auf ein kleineres Volumen des immer gleichen gesunden Gewebes übertragen, während bei einer rotierenden Bestrahlung diese unerwünschte Energieabgabe auf ein größeres Volumen verteilt und das gesunde Gewebe dadurch geschont werden kann. 	4	2	3
Insgesamt 50 BWE		14	23	13