Schriftliche Abiturprüfung

Physik

Hinweise und Beispiele zu den
zentralen schriftlichen Prüfungsaufgaben

Freie und Hansestadt Hamburg
Behörde für Schule und Berufsbildung

Impressum

Herausgeber:
Freie und Hansestadt Hamburg
Behörde für Schule und Berufsbildung
Hamburger Straße 31, 22083 Hamburg

Referat:	Mathematisch-naturwissenschaftlich-technischer Unterricht
Referatsleitung:	Monika Seiffert
Fachreferent Physik:	Jay Wiese
Redaktion:	Tobias Schlegelmilch
	Ingke Menzel-Riebandt
	Thomas Michalsky
	Henning Sievers

Veröffentlicht auf: www.li.hamburg.de/publikationen/abiturpruefung

Hamburg 2016

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

Sehr geehrte Kolleginnen und Kollegen,

seit dem Schuljahr 2013/2014 ist die Zahl der Fächer mit zentral gestellten Aufgaben in der Abiturprüfung u.a. um die MINT-Fächer Biologie, Chemie, Informatik und Physik erweitert worden.
Die schriftlichen Abituraufgaben für diese Fächer werden zentral von der Schulbehörde erstellt. Sie beziehen sich auf Themen, die etwa 50 % des Unterrichts in der Studienstufe ausmachen und in den Rahmenplänen bereits verbindlich geregelt sind. Damit bleibt in der Profiloberstufe eine vernünftige Balance zwischen schulisch geprägten Themen und zentralen Leistungsanforderungen erhalten. Die fachspezifischen Hinweise im so genannten A-Heft, den „Regelungen für die zentralen schriftlichen Prüfungen“ für das Abitur (für das Abitur 2017 siehe http://www.hamburg.de/contentblob/4428498/data/abitur-a-heft-2017.pdf) informieren über die Schwerpunkte und Anforderungen der Prüfungsaufgaben. Sie ermöglichen damit eine langfristige Unterrichtsplanung.

Neu seit dem Abitur 2014 ist zudem die Wahlmöglichkeit für die zu bearbeitenden Prüfungsaufgaben durch die Schülerinnen und Schüler in allen MINT-Fächern. In den naturwissenschaftlichen Fächern und Informatik werden jeweils drei Aufgaben vorgelegt, von denen die Schülerinnen und Schüler zwei zur Bearbeitung auswählen.

Auf den nachfolgenden Seiten finden Sie zu Ihrer Orientierung Beispiele für zentrale Prüfungsaufgaben im Fach Physik, in denen neben der Aufgabenstellung auch der Erwartungshorizont und die zugeordneten Bewertungseinheiten beschrieben sind.

In der Hoffnung, dass die vorliegende Handreichung hilfreich für Sie und Ihre Unterrichtsarbeit ist, wünsche ich Ihnen und Ihren Schülerinnen und Schülern eine erfolgreiche Vorbereitung auf die schriftliche Abiturprüfung.

Den Mitgliedern der Arbeitsgruppe, die diese Handreichung erstellte, danke ich herzlich für die geleistete Arbeit.

Monika Seiffert

1 Regelungen für die schriftliche Abiturprüfung

Der Fachlehrerin, dem Fachlehrer werden **drei** Aufgaben (I, II und III) zu unterschiedlichen Schwerpunkten (s. u.) vorgelegt.

Die Abiturientin, der Abiturient

- erhält alle **drei** Aufgaben,
- wählt davon **zwei** Aufgaben aus und bearbeitet diese,
- vermerkt auf der Reinschrift und dem Aufgabendeckblatt, welche Aufgabe sie/er bearbeitet hat,
- ist verpflichtet, die Vollständigkeit der vorgelegten Aufgaben vor Bearbeitungsbeginn zu überprüfen (Anzahl der Blätter, Anlagen usw.).

Arbeitszeit:	Grundlegendes Anforderungsniveau:	**240** Minuten
	Erhöhtes Anforderungsniveau:	**300** Minuten
	Eine Lese- und Auswahlzeit von **30** Minuten ist der Arbeitszeit vorgeschaltet. In dieser Zeit darf noch nicht mit der Bearbeitung begonnen werden.	
Hilfsmittel:	Taschenrechner (nicht programmierbar, nicht grafikfähig), Formelsammlung „Das große Tafelwerk interaktiv“ (Cornelsen-Verlag), Zeichenhilfsmittel, Rechtschreibwörterbuch	

Die in den zentralen schriftlichen Abituraufgaben verwendeten **Operatoren** werden im nächsten Abschnitt genannt und erläutert.

Grundlage der schriftlichen Abiturprüfung ist der Rahmenplan Physik, gymnasiale Oberstufe, in der Fassung von 2009 mit den folgenden curricularen Vorgaben, Konkretisierungen und Schwerpunktsetzungen. Für die Schwerpunktthemen ist jeweils eine Unterrichtszeit von der Hälfte, höchstens aber von zwei Dritteln eines Semesters vorgesehen.

Es besteht grundsätzlich Themengleichheit zwischen Kursen auf grundlegendem und erhöhtem Niveau. Für das erhöhte Niveau wird ein – auch qualitatives – Additum angegeben.

Es werden drei Schwerpunktthemen benannt, die verschiedene Bereiche der Physik abdecken. Eine Prüfungsaufgabe erstreckt sich auf alle vier im Rahmenplan Physik beschriebenen Kompetenzbereiche. Die Aufgaben gehen von möglichst lebensnahen Kontexten aus, von denen sich die physikalisch relevanten Themen und Fragestellungen ableiten.

2 Liste der Operatoren

Die in den zentralen schriftlichen Abituraufgaben verwendeten Operatoren werden in der folgenden Tabelle definiert. Entsprechende Formulierungen in den Klausuren der Studienstufe sind ein wichtiger Teil der Vorbereitung der Schülerinnen und Schüler auf das Abitur.
Neben Definitionen und Beispielen enthält die Tabelle auch Zuordnungen zu den Anforderungsbereichen (AB) I, II und III, wobei die konkrete Zuordnung auch vom Kontext der Aufgabenstellung abhängen kann und eine scharfe Trennung der Anforderungsbereiche nicht immer möglich ist.

Operatoren	**AB**	**Definitionen**
abschätzen	II-III	Durch begründete Überlegungen Größenordnungen physikalischer Größen angeben
analysieren, untersuchen	II-III	Unter gezielten Fragestellungen Elemente und Strukturmerkmale herausarbeiten und als Ergebnis darstellen
angeben, nennen	I	Ohne nähere Erläuterungen wiedergeben oder aufzählen
anwenden, übertragen	II	Einen bekannten Sachverhalt, eine bekannte Methode auf eine neue Problemstellung beziehen
aufbauen	II-III	Objekte und Geräte zielgerichtet anordnen und kombinieren

Operatoren	**AB**	**Definitionen**
aufstellen	II	Einen Vorgang als eine Folge von Symbolen und Wörtern formulieren
auswerten	II	Daten oder Einzelergebnisse zu einer abschließenden Gesamtaussage zusammenführen
begründen	II-III	Einen angegebenen Sachverhalt auf Gesetzmäßigkeiten bzw. kausale Zusammenhänge zurückführen
benennen	I	Elemente, Sachverhalte, Begriffe oder Daten (er)kennen und angeben
berechnen	I-II	Ergebnisse von einem Ansatz ausgehend durch Rechenoperationen gewinnen
beschreiben	I-II	Strukturen, Sachverhalte oder Zusammenhänge unter Verwendung der Fachsprache in eigenen Worten veranschaulichen
bestimmen	II	Einen Lösungsweg darstellen und das Ergebnis formulieren
beurteilen	II-III	Hypothesen bzw. Aussagen sowie Sachverhalte bzw. Methoden auf Richtigkeit, Wahrscheinlichkeit, Angemessenheit, Verträglichkeit, Eignung oder Anwendbarkeit überprüfen
bewerten	II-III	Eine eigene Position nach ausgewiesenen Normen oder Werten vertreten
diskutieren	II-III	Physikalische Systeme oder Zusammenhänge hinsichtlich ihres Verhaltens bei Größenänderungen analysieren
durchführen	I-II	An einer Experimentieranordnung zielgerichtete Messungen und Änderungen vornehmen
einordnen, zuordnen	II	Mit erläuternden Hinweisen in einen Zusammenhang einfügen
entwerfen, planen	II-III	Zu einem vorgegebenen Problem eine Experimentieranordnung finden
entwickeln	II-III	Eine Skizze, eine Hypothese, ein Experiment, ein Modell oder eine Theorie schrittweise weiterführen und ausbauen
erklären, erläutern	II-III	Ergebnisse, Sachverhalte oder Modelle nachvollziehbar und verständlich veranschaulichen
erörtern	III	Im Zusammenhang mit Sachverhalten, Aussagen oder Thesen unterschiedliche Positionen und Pro- und Kontra- Argumente einander gegenüberstellen und abwägen
herausarbeiten	II-III	Die wesentlichen Merkmale darstellen und auf den Punkt bringen
herleiten, nachweisen, zeigen	II	Aus Größengleichungen durch logische Folgerungen eine physikalische Größe bestimmen
interpretieren	II-III	Phänomene, Strukturen, Sachverhalte oder Versuchsergebnisse auf Erklärungsmöglichkeiten untersuchen und diese gegeneinander abwägend darstellen
protokollieren	I-II	Beobachtungen oder die Durchführung von Experimenten detailgenau zeichnerisch einwandfrei bzw. fachsprachlich richtig wiedergeben
prüfen, überprüfen, testen	II-III	Sachverhalte oder Aussagen an Fakten oder innerer Logik messen und eventuelle Widersprüche aufdecken
skizzieren	I-II	Sachverhalte, Strukturen oder Ergebnisse kurz und übersichtlich darstellen mithilfe von z. B. Übersichten, Schemata, Diagrammen, Abbildungen, Tabellen und Texten
vergleichen, gegenüberstellen	II-III	Nach vorgegebenen oder selbst gewählten Gesichtspunkten Gemeinsamkeiten, Ähnlichkeiten und Unterschiede ermitteln und darstellen
zeichnen	I-II	Eine hinreichend exakte bildhafte Darstellung anfertigen

3 Aufgabenbeispiele

3.1 grundlegendes Anforderungsniveau

Aufgabe 1: Gravitation

a) ● Benennen Sie die drei Kepler'schen Gesetze und
● erläutern Sie diese kurz mit eigenen Worten. (9 BE)

Experimentelle Aufgabe: Im hinteren Teil des Raums finden Sie Experimentiermaterial: verschiedene Schraubenfedern (Federkonstante bekannt), Fäden, Massestücke, eine Waage, Stativmaterial, Messmaterial, eine Stoppuhr...

b) ● Bestimmen Sie auf mindestens einem Weg experimentell den Ortsfaktor *g* in Ihrem Prüfungsraum. Dokumentieren Sie Ihr Vorgehen in angemessener Form und diskutieren Sie Fehlerquellen. (10 BE)

2006 definierte die Internationale Astronomische Union (IAU) den Begriff des Planeten neu: Demnach bewegen sich Planeten auf einer Bahn um die Sonne, besitzen genügend Masse, um die Form einer Kugel anzunehmen, und haben alle Objekte um sich herum angezogen, so dass ihre Bahn bereinigt ist. Lesen Sie den Text in der Anlage und

c) ● diskutieren Sie, ob es sich bei dem 2002 entdeckten Himmelskörper Quaoar um einen Planeten handelt. (4 BE)

Erde und Quaoar umrunden beide die Sonne. Die Erde braucht für eine Umrundung nur 365,25 Tage, der neue Planet wesentlich länger.

d) ● Bestimmen Sie mit Hilfe der Daten von Quaoar und Erde den Abstand von Quaoar zur Sonne und die Masse der Sonne. (Falls Sie kein Ergebnis für den Abstand Quaoar-Sonne finden, rechnen Sie mit dem Wert $r = 6{,}5 \cdot 10^{12}$ m weiter.) (9 BE)

Ein Astronaut ($m_A = 75$ kg) besucht den neuen Himmelskörper. Eine mitgebrachte Waage zeigt auf dem Äquator eine andere Gewichtskraft an als auf dem Pol.

e) ● Erläutern Sie dieses Phänomen und berechnen Sie die Anzeige der Waage an beiden Orten. (8 BE)

Quaoar besitzt einen 2006 entdeckten Mond namens Weywot. Dieser befindet sich auf einer Bahn mit dem Radius 11000 km. Er umrundet Quaoar in 12,4 Tage und er hat eine Masse von $8{,}5 \cdot 10^{17}$ kg. Es gibt die Theorie, Quaoar habe früher Ringe wie der Saturn besessen, aus denen der Mond entstanden sei.

f) ● Erläutern Sie, wie und unter welchen Umständen dieser Entstehungsprozess hätte stattfinden können. (10 BE)

Anlage zur Aufgabe „Gravitation“

Die Astronomen Michael Brown und Chadwick Trujillo vom California Institute of Technology (Pasadena, USA) entdeckten das lichtschwache Gebilde erst mit dem Teleskop auf dem Mount Palomar. Später nutzten sie die "Advanced Camera for Surveys" des Hubble-Weltraum-Teleskops, das den Durchmesser des Objekts bestimmen konnte. Das kugelförmige Objekt mit dem offiziellen Namen "2002 LM60" hat einen Durchmesser von 1300 km (mehr als die Hälfte des Pluto-Durchmessers). Seine Umlaufbahn ist fast exakt kreisförmig (im Gegensatz zu der extrem exzentrischen Bahn von Pluto), und der Planet umrundet die Sonne in 288 Jahren (Pluto: 248 Jahre). Er dreht sich um sich selbst in 6 Stunden. Der Himmelskörper ist das größte Objekt im Kuiper-Gürtel, der aus Eis- und Gesteinsobjekten besteht.
Es ist noch unbekannt, aus welchem Material der neue Planet besteht, es wird jedoch vermutet, dass er eine Masse von etwa $2{,}5 \cdot 10^{22}$ kg besitzt. Mit Quaoar wurde zum ersten Mal seit der Entdeckung Plutos im Jahre 1930 ein Himmelskörper mit vergleichbarer Größe gefunden – ein zehnter Planet.

Erwartungshorizont

	Lösungsskizze	Zuordnung, Bewertung I	II	III
a)	Die drei Kepler'schen Gesetze werden kurz mit eigenen Worten erläutert, die Aufgabe erfordert eine eigenständige Darstellung.	3	6	
b)	Die Schülerinnen und Schüler sollen eines von zwei Experimenten durchführen. 1. Die Schwingungsdauer eines Fadenpendels $T_1 = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}$ experimentell bestimmen und nach *g* auflösen. 2. Die Auslenkung einer Feder (*D* bekannt) durch eine bekannte Masse bestimmen und $F_g = m \cdot g = -D \cdot s$ nach *g* auflösen. Eine Fehlerrechnung wird nicht erwartet. Beide Experimente sollen angemessen beschrieben und dargestellt werden.	1	9	
c)	Die Aufgabenstellung erfordert Textverständnis, die notwendigen Informationen sind allerdings gut erkennbar: Quaoar ist kugelförmig und befindet sich auf einer Bahn um die Sonne – somit sind zwei Kriterien für die Einstufung als Planet erfüllt. Da Quaoar Teil des Kuiper-Gürtels ist, kann davon ausgegangen werden, dass seine Bahn nicht bereinigt ist, wobei diese Information nicht explizit gegeben ist und der Interpretation durch die Schüler bedarf. Somit kommt es auf eine schlüssige Argumentation an. Die gegebenen Informationen entsprechen übrigens nicht alle dem aktuellen Forschungsstand. Wenn Schüler über den Text hinausgehende Informationen liefern, ist dies natürlich positiv zu bewerten.	4		
d)	Der erste Teil dieser Aufgabe wird mit dem 3. Kepler'schen Gesetz gelöst: $\frac{T_E^2}{T_Q^2} = \frac{a_E^3}{a_Q^3}$, also ist $a_Q = \sqrt[3]{a_E^3 \cdot \frac{T_Q^2}{T_E^2}}$ = 6,5·10⁹ km Teil 2: Die Gravitationskraft zwischen Sonne und Quaoar bringt die Zentripetalkraft der Kreisbewegung auf: $\gamma \cdot \frac{m_Q \cdot m_S}{r^2} = \frac{m_Q \cdot v^2}{r}$, d. h. $m_S = \frac{v^2 \cdot r}{\gamma}$ = $1{,}97 \cdot 10^{30}$ kg		7	2
e)	Die Gewichtskraft errechnet sich nach: $F_\gamma = \gamma \cdot \frac{m \cdot m_Q}{r^2}$ = 296 N Auf dem Äquator ist die Anzeige der Waage aufgrund der Drehung des Planeten um den Wert der Zentripetalkraft reduziert. $F_Ä = F_G - F_Z = \gamma \cdot \frac{m \cdot m_Q}{r^2} - \frac{m \cdot v^2}{r}$ = 291,9 N Am Pol ist der Wert nicht reduziert, also F_P = 296 N	5	3	

	Lösungsskizze	Zuordnung, Bewertung		
		I	II	III
f)	Die Entstehung von Himmelskörpern aus Staubwolken ist eine gängige Theorie zur Entstehung etwas der Planeten des Sonnensystems. Die Überlegungen zur Verklumpung von Materie werden sinnvoll dargestellt, die Argumentation ist nachvollziehbar.			10
	Insgesamt 50 BE	13	25	12

3.1 grundlegendes Anforderungsniveau

Aufgabe 2: Mechanische Schwingungen

In den Abbildungen 1 - 8 sind Momente verschiedener Bewegungen erkennbar festgehalten worden.

a) ● Beschreiben Sie die zugrunde liegenden Bewegungen, indem Sie insbesondere auf deren Gemeinsamkeiten eingehen.

● Erläutern Sie die Bewegungsvorgänge anhand eines Beispiels und verwenden Sie dazu die Begriffe harmonische Bewegung, Periode, Auslenkung, Frequenz, Amplitude, Rückstellkraft und Ruhelage. (7 BE)

Ein Fahrzeug (Abb. 3) der Masse m = 0,1 kg ist an einer Feder mit der Federkonstanten D = 7,5 N/m befestigt. Feder und Fahrzeug sind so abgestimmt, dass das Fahrzeug in horizontaler Richtung eine reibungsfreie harmonische Schwingung vollzieht.

b) Die Feder wird um s = 0,05 m aus der Gleichgewichtslage ausgelenkt.

● Berechnen Sie die Kraft, die dazu erforderlich ist.

Wird der Körper freigegeben, setzt eine Schwingung ein.

● Begründen Sie, weshalb es sich um eine harmonische Schwingung handelt.

● Berechnen Sie die Geschwindigkeit des Körpers beim Durchgang durch die Ruhelage.

● Bestimmen Sie, um wie viel Prozent sich die Schwingungsdauer des Pendels verlängert, wenn die Masse des schwingenden Körpers um 0,02 kg vergrößert wird. (13 BE)

An einem Fadenpendel hängt ein Massestücke mit der Masse m = 2 kg, der Faden ist l = 2,40 m lang. Das Pendel wird nur wenig ausgelenkt.

c) ● Berechne die Periodendauer für einen Ort, an dem die Erdbeschleunigung g = 9,81 m/s^2 beträgt.

An einem anderen Ort misst man mit demselben Pendel eine Schwingungsdauer von T = 3,12 s.

● Bestimme die Erdbeschleunigung an diesem Ort. (7 BE)

Experimentelle Aufgabe: Im Experimentierraum finden Sie Experimentiermaterial zum Thema Schwingungen.

d) ● Bestimmen Sie experimentell die Federkonstante einer der Federn auf zwei verschiedenen Wegen.

● Bestimmen Sie experimentell die Masse der Figur. (Ersatzwert für die Federkonstante: 3,5 N/m). Dokumentieren Sie Ihr Vorgehen in angemessener Form und diskutieren Sie Fehlerquellen. (11 BE)

In Abb. 4 sieht man ein Pendel mit der Länge l = 0,5 m. 0,30 m unter dem Aufhängepunkt befindet sich ein fester Stift im Punkt P, an den sich der Faden während des Schwingens vorübergehend anlegt.

e) ● Bestimmen Sie, wie viele Schwingungen das Pendel in einer Sekunde ausführt. (12 BE)

Anlage zur Aufgabe „Mechanische Schwingungen“

Abb. 1 © Tobilander #27926076/ Fotolia.com

Abb. 2 © Foto-Ruhrgebiet #30270558/ Fotolia.com

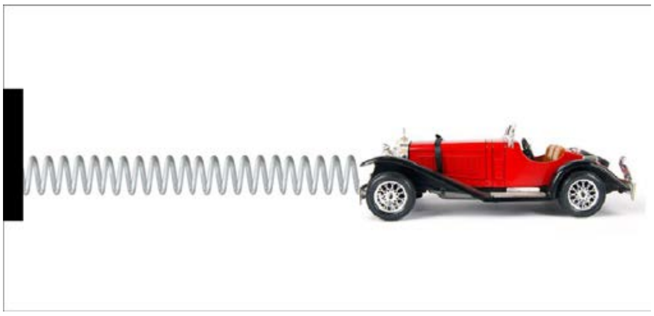


Abb. 3 © Flexmedia #26797271/ Fotolia.com

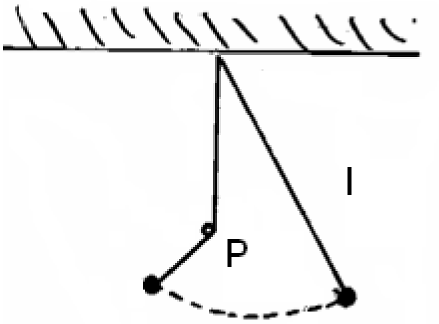


Abb. 4

Abb. 5 ©Joachim Wendler #31842789/ Fotolia.com

Abb. 6 © laska_love #27926076/ Fotolia.com

Abb. 7 © Igor Yaruta #31449046/ Fotolia.com

Abb. 8 © Klaus Eppele #26797271/ Fotolia.com

Erwartungshorizont

	Lösungsskizze	Zuordnung, Bewertung		
		I	II	III
a)	Die Periodizität aller Vorgänge soll diskutiert werden, die Begriffe harmonische Bewegung, Periode, Auslenkung, Frequenz, Amplitude, Rückstellkraft und Ruhelage werden an den Beispielen in angemessener Weise erläutert.	4	3	
b)	(1) $F = D \cdot s = 0{,}375\ N$ (2) Eine harmonische Schwingung liegt vor, wenn die rücktreibende Kraft proportional zur Auslenkung ist. Für das Federpendel gilt $F = D \cdot s$, also gilt bei konstantem D: $F \sim s$. (3) Diese Aufgabe lässt sich über eine Energiebetrachtung (Spannenergie ist gleich kinetischer Energie: $\frac{1}{2} D \cdot s^2 = \frac{1}{2} m \cdot v_m^2$, $\mathrm{v_m = s_m \cdot \omega = \frac{2\pi}{T} = 0,43 \frac{m}{s}}$) oder über die Kenntnis der Bewegungsgleichungen ($\mathrm{v(t) = s_m \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t)}$, also $v_m = s_m \cdot \omega = \frac{2\pi}{T} = 0{,}43 \frac{m}{s}$) lösen. (4) Die Formel für die Schwingungsdauer lautet: $\mathrm{T = 2 \cdot \sqrt{\frac{m}{D}}}$. Es können beide Werte errechnet und verglichen werden, oder über einen direkten Vergleich ($T_1 = 2 \cdot \sqrt{\frac{m_1}{D}}$; $\mathrm{T_2 = 2 \cdot \sqrt{\frac{m_2}{D}}}$) der Unterschied von 9,5 % ermittelt werden.	5	6	2
c)	(1) Die Periodendauer beträgt $T = 2 \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}$ = 3,108 s (2) Die Erdbeschleunigung beträgt an dem anderen Ort $g = \frac{4l}{T^2}$ ·= 9,73 m/s^2	1	6	
d)	Die Schülerinnen und Schüler sollen die Federkonstante einerseits über $T = 2 \cdot \sqrt{\frac{m}{D}}$ andererseits über $F = D \cdot s$ bestimmen. Eine Fehlerrechnung wird nicht erwartet. Die Masse der Figur kann dann mit der bekannten Federkonstante bestimmen. Neben einer angemessenen Dokumentation ist eine möglichst genaue Bestimmung der Federkonstante und der Masse der Figur erforderlich. Anmerkung: Verwendet wird eine in der Schule vorhandene Feder (z.B. D = 3 N/m). Als Figur wird ein beliebiger, in der Schule vorhandener Gegenstand (z.B. der Masse 50g – 100g) gewählt, der an der Feder befestigt werden kann.	3	8	

	Lösungsskizze	Zuordnung, Bewertung I	II	III
e)	Um die gesuchte Frequenz zu erhalten, ist die Schwingungsdauer einer Schwingung zu bestimmen. Eine Schwingung setzt sich aus zwei halben Schwingungen zusammen: die mit der langen Fadenlänge und die mit der kurzen Fadenlänge. $T = \frac{T_1}{2} + \frac{T_2}{2}$ Mit der Gleichung für die Schwingungsdauer eines Fadenpendels erhält man dann die Gesamtschwingungsdauer: $T = \frac{T_1}{2} + \frac{T_2}{2}$ $T = \frac{2 \cdot \pi \sqrt{\frac{l_1}{g}}}{2} + \frac{2 \cdot \pi \sqrt{\frac{l_2}{g}}}{2} = \pi \cdot \left(\sqrt{\frac{l_1}{g}} + \sqrt{\frac{l_2}{g}} \right)$ $T = \frac{\pi}{\sqrt{g}} \cdot \left(\sqrt{l_1} + \sqrt{l_2} \right) = 1{,}158 s$ Damit kann nun die Frequenz berechnet werden: $f = \frac{1}{T} = 0{,}863 \frac{1}{s}$		3	9
	Insgesamt 50 BE	13	26	11

3.1 grundlegendes Anforderungsniveau

Aufgabe 3: Wellen

Das schönste Experiment aller Zeiten

Im September 2002 haben die Leserinnen und Leser der Zeitschrift „Physics World" das schönste Experiment aller Zeiten gewählt. Gewonnen hat ein Experiment, das von Claus Jönsson 1960 in Tübingen durchgeführt wurde: Elektronen werden an Doppel- und Mehrfachspalten gebeugt. Das Experiment ist auch deshalb faszinierend, weil es eine große Ähnlichkeit zu den entsprechenden Experimenten hat, die man mit Licht durchführen kann. Es zeigt dadurch besonders klar, dass Materie durch eine Wellentheorie beschrieben werden muss. Im Folgenden geht es um das optische Doppelspaltexperiment, das die Grundlage für Jönssons Elektronen-Experiment liefert.

Das Doppelspaltexperiment mit Licht wurde 1802 von Thomas Young durchgeführt. Damals wurde kontrovers darüber diskutiert, ob Licht besser durch eine Theorie der Teilchenstrahlung oder als ein Wellenphänomen erklärt werden könnte. Der Legende nach ist Thomas Young die Idee zu diesem Experiment gekommen, als er zwei nebeneinander her schwimmende Enten in einem Teich beobachtet hat.

a) ● Beschreiben Sie den Aufbau eines optischen Doppelspaltexperiments.

● Erklären Sie, wie das Interferenzmuster beim Doppelspaltexperiment zustande kommt.

● Nennen Sie die Voraussetzungen, die erfüllt sein müssen, damit sich ein Interferenzmuster beobachten lässt.

● Begründen Sie, dass Wasserwellen als Modell für ein optisches Doppelspaltexperiment aufgefasst werden können. (16 BE)

Kohärentes und monochromatisches Licht fällt auf eine Blende mit zwei gleichen, sehr schmalen Spalten, deren Abstand *d* beträgt. Die Abbildung rechts zeigt das Interferenzmuster, das auf einem in großer Entfernung parallel zur Blende aufgestellten Schirm zu sehen ist. Die Punkte P und Q zeigen Maxima der Helligkeit, R ist ein Minimum.

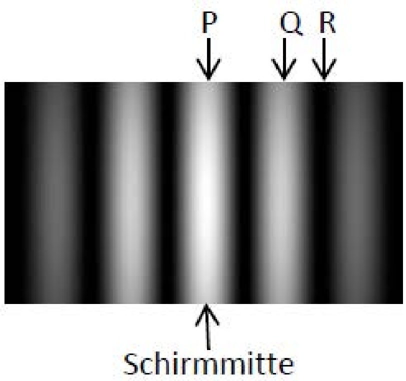


Abbildung gemeinfrei aus Wikimedia Commons; bearbeitet

b) ● Geben Sie den Gangunterschied an, der zwischen den von den beiden Spalten ausgehenden Lichtwellen an den Punkten P, Q und R besteht. Drücken Sie Ihre Antwort als Vielfaches oder Bruchteil der Wellenlänge aus.

Nun wird Licht gleicher Intensität, aber halber Wellenlänge verwendet.

● Begründen Sie, dass am Punkt R nun ein Maximum der Helligkeit entsteht. (9 BE)

Ein Doppelspalt mit dem Spaltabstand 1,2 mm wird mit monochromatischem Licht beleuchtet. Auf dem 2,70 m entfernten Schirm können 5 helle Streifen auf einer Strecke von 6,3mm beobachtet werden.

c) ● Berechnen Sie die Wellenlänge des Lichts. (6 BE)

Im Anhang finden Sie Messdaten zu einem Doppelspaltversuch. Gemessen wird die Intensität des Lichts (als Ausgangsspannung einer Fotodiode) in Abhängigkeit von der Position auf dem Schirm. Die Mitte des Schirms befindet sich bei 4,5 cm. Der Spaltabstand beträgt d = 0,15 mm, die Wellenlänge des Lichts λ = 635 nm.

d) ● Skizzieren Sie die im Anhang dargestellten Messdaten in einem angemessenen Graphen. (6 BE)

e) ● Geben Sie an, auf wieviel Prozent der Intensität des 0. Maximums die Intensität des 3. Maximums gefallen ist.

Unter der Voraussetzung, dass die Entfernung Spalt–Schirm l viel größer als der Abstand der einzelnen Maxima ist, hängt der Abstand der Maxima Δe untereinander nicht von ihrer Ordnung ab.

● Zeigen Sie, dass dieser Abstand Δe durch die Formel $\Delta e = \frac{l \cdot \lambda}{d}$ berechnet werden kann.

● Prüfen Sie, ob dieser Zusammenhang die Messdaten angemessen beschreibt.

● Berechnen Sie, wie weit der Schirm vom Doppelspalt entfernt ist. (13 BE)

Quellen:
McDermott, Shaffer: Tutorien zur Physik. Pearson Studium, 2008.
Claus Jönsson: Elektroneninterferenzen an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten. Zeitschrift für Physik 161 S. 454-474, 1961.

Anlage zur Aufgabe „Das schönste Experiment aller Zeiten“

Doppelspalt-Messdaten

Position/cm	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4
Intensität/Skalenteil	1,06	1,56	1,78	1,52	1,01	0,48	0,21	0,48	0,94	1,4	1,61	1,37

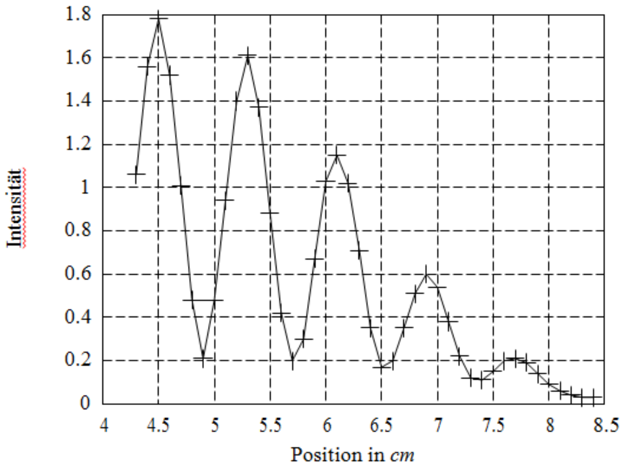
Position/cm	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9	6,0	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5	6,6
Intensität/Skalenteil	0,88	0,42	0,2	0,3	0,67	1,03	1,15	1,02	0,71	0,35	0,17	0,2

Position/cm	6,7	6,8	6,9	7,0	7,1	7,2	7,3	7,4	7,5	7,6	7,7	7,8
Intensität/Skalenteil	0,35	0,51	0,6	0,54	0,38	0,22	0,12	0,11	0,15	0,2	0,21	0,19

Position/cm	7,9	8,0	8,1	8,2	8,3	8,4
Intensität/Skalenteil	0,14	0,09	0,06	0,04	0,03	0,03

Erwartungshorizont

	Lösungsskizze	Zuordnung, Bewertung		
		I	II	III
a)	• Lichtquelle → Doppelspalt → Schirm.	4		
	• Wellen werden an einem Hindernis abgelenkt. Diesen Vorgang bezeichnet man als Beugung. Mit dem Huygens'schen Prinzip kann die Entstehung des Interferenzmusters erklärt werden: Von jedem Spalt geht eine Elementarwelle aus. Die Elementarwellen überlagern sich. Je nachdem, wie groß der Gangunterschied an einem bestimmten Punkt auf dem Schirm ist, kommt es zu konstruktiver oder destruktiver Interferenz.		4	
	• Spaltabstand > λ, kohärente Beleuchtung. Damit das Interferenzmuster gut beobachtbar ist, müssen darüber hinaus Spaltabstand und Wellenlänge in der gleichen Größenordnung sein. Monochromatisches Licht führt zu definierten Zonen maximaler und minimaler Intensität.	4		
	• Wasserwellen überlagern sich ungestört. Auch hier addieren sich die Auslenkungen und können sich verstärken oder schwächen bzw. auslöschen.			4
b)	• In *P* besteht kein Gangunterschied. Der Gangunterschied in *Q* beträgt $\Delta s_Q = \lambda$, in *R* $\Delta s_R = \frac{3}{2}\lambda$.	4		
	• Wird mit $\tilde{\lambda} = \frac{\lambda}{2}$ die veränderte Wellenlänge bezeichnet, ist der Gangunterschied bei *R* durch $\Delta s_R = \frac{3}{2}\lambda = 3\tilde{\lambda}$ gegeben. Das bedeutet, dass hier eine Aufhellung verglichen zum vorherigen Zustand stattfindet. Es liegt nun ein Maximum vor.			5
c)	• Da der Abstand der Maxima gering gegenüber dem Abstand Doppelspalt– Schirm ist, kann für den Winkel α, unter dem das erste Maximum erscheint, mit der Näherung tan(α) = sin(α) gerechnet werden. Das ergibt $$\frac{\frac{6{,}3}{4}\,mm}{2700mm} = \frac{\Delta s}{d}.$$ Mit dem Spaltabstand *d* und dem Gangunterschied $\Delta s = \lambda$ für das erste Maximum findet man $\lambda = 700\,nm$.		6	

	Lösungsskizze	Zuordnung, Bewertung I	II	III
d)	• *Der Graph sollte etwa so aussehen:*  Abbildung: BSB		6	
e)	• Die Intensität kann in relativen Einheiten angegeben werden, die der Ausgangsspannung der Photodiode entsprechen. 100% entsprechen dabei der Intensität beim 0. Maximum, also 1,78. Beim dritten Maximum ist die Intensität auf 33,7% abgefallen.	3		
	• Unter der genannten Voraussetzung ist der Winkelabstand α klein, unter dem die Maxima auf dem Schirm auftreten. Dann gilt $\sin(\alpha) = \tan(\alpha)$, also $\frac{e_n}{l} = \frac{\Delta s_n}{d}$ mit dem Gangunterschied Δs_n. Für die Differenz der Positionen des $(n+1)$ten und $n$ten Maximums ergibt sich $$\Delta e = e_{n+1} - e_n = \frac{l}{d}((n+1)\lambda - n\lambda) = \frac{l \cdot \lambda}{d}.$$			4
	• In den Daten findet man einen konstanten Abstand von 0,8 *cm* zwischen den Maxima. Damit ist der Zusammenhang bestätigt.		4	
	• Man berechnet *l* zu: $$l = \Delta e \cdot \frac{d}{\lambda} = 1{,}89m$$		2	
	Insgesamt 50 BE	15	22	13

3.2 erhöhtes Anforderungsniveau

Aufgabe 1: Gravitation

a) ● Bestimmen Sie die Masse der Erde auf einem einfachen Weg über den mittleren Abstand des Mondes und seine Umlaufzeit. Vergleichen Sie die Masse mit dem Wert aus dem Tafelwerk.
● Beurteilen sie die Abweichungen und
● erläutern Sie, warum sich die Erdmasse mit Hilfe von künstlichen Satelliten genauer berechnen lässt. (8 BE)

Experimentelle Aufgabe: Im hinteren Teil des Raums finden Sie Experimentiermaterial: verschiedene Schraubenfedern (Federkonstante bekannt), Fäden, Massestücke, eine Waage, Stativmaterial, Messmaterial, eine Stoppuhr...

b) ● Bestimmen Sie auf mindestens einem Weg experimentell den Ortsfaktor g in Ihrem Prüfungsraum. Dokumentieren Sie Ihr Vorgehen in angemessener Form und diskutieren Sie Fehlerquellen. (10 BE)

2006 definierte die Internationale Astronomische Union (IAU) den Begriff des Planeten neu: Demnach bewegen sich Planeten auf einer Bahn um die Sonne, besitzen genügend Masse, um die Form einer Kugel anzunehmen, und haben alle Objekte um sich herum angezogen, so dass ihre Bahn bereinigt ist. Lesen Sie den Text in der Anlage und

c) ● diskutieren Sie, ob es sich bei dem 2002 entdeckten Himmelskörper Quaoar um einen Planeten handelt. (4 BE)

Erde und Quaoar umrunden beide die Sonne. Die Erde braucht für eine Umrundung nur 365,25 Tage, der neue Planet wesentlich länger.

d) ● Bestimmen Sie mit Hilfe der Daten von Quaoar und Erde den Abstand von Quaoar zur Sonne und die Masse der Sonne. (Falls Sie kein Ergebnis für den Abstand Quaoar-Sonne finden, rechnen Sie mit dem Wert $r = 6{,}5\cdot 10^{12}$ m weiter.) (9 BE)

Ein Astronaut ($m_A = 75$ kg) besucht den neuen Himmelskörper. Eine mitgebrachte Waage zeigt auf dem Äquator eine andere Gewichtskraft an als auf dem Pol.

e) ● Erläutern Sie dieses Phänomen und berechnen Sie die Anzeige der Waage an beiden Orten. (7 BE)

Untersuchungen aus dem Jahr 2003 stellen die Hypothese auf, Quaoar sei größtenteils hohl und habe nur eine Masse von etwa $1{,}0\cdot 10^{16}$ kg. Angenommen, diese Theorie wäre richtig:

f) ● Schätzen Sie ab, ob es dann möglich wäre, dass unser Astronaut aus eigener Kraft das Gravitationsfeld des Himmelskörpers verlassen kann. (12 BE)

Anlage zur Aufgabe „Gravitation“

Die Astronomen Michael Brown und Chadwick Trujillo vom California Institute of Technology (Pasadena, USA) entdeckten das lichtschwache Gebilde erst mit dem Teleskop auf dem Mount Palomar. Später nutzten sie die "Advanced Camera for Surveys" des Hubble-Weltraum-Teleskops, das den Durchmesser des Objekts bestimmen konnte. Das kugelförmige Objekt mit dem offiziellen Namen "2002 LM60" hat einen Durchmesser von 1300 km (mehr als die Hälfte des Pluto-Durchmessers). Seine Umlaufbahn ist fast exakt kreisförmig (im Gegensatz zu der extrem exzentrischen Bahn von Pluto), und der Planet umrundet die Sonne in 288 Jahren (Pluto: 248 Jahre). Er dreht sich um sich selbst in 6 Stunden. Der Himmelskörper ist das größte Objekt im Kuiper-Gürtel, der aus Eis- und Gesteinsobjekten besteht.
Es ist noch unbekannt, aus welchem Material der neue Planet besteht, es wird jedoch vermutet, dass er eine Masse von etwa $2{,}5 \cdot 10^{22}$ kg besitzt. Mit Quaoar wurde zum ersten Mal seit der Entdeckung Plutos im Jahre 1930 ein Himmelskörper mit vergleichbarer Größe gefunden – ein zehnter Planet.

Erwartungshorizont

	Lösungsskizze	Zuordnung, Bewertung		
		I	II	III
a)	Gleichsetzung der Terme für die Radialkraft, die den Mond auf seiner Kreisbahn hält, $F_r = M_{Mond} \cdot \omega^2 \cdot r$, und für die Gravitationskraft , $F_\gamma = \gamma \cdot \frac{m_{Mond} \cdot m_{Erde}}{r^2}$ · Auflösen nach M_{erde} : $M_{Erde} = \frac{4\pi^2 \cdot r^3}{\gamma \cdot T^2}$ = 6,03 ·10^{24} kg (Masse der Erde lt. Tabelle: 5,97 ·10^{24} kg, Abweichung über 1%) Durch die relativ große Masse des Mondes dreht sich der Mond nicht um den Mittelpunkt der Erde, sondern beide drehen sich um einen gemeinsamen Schwerpunkt, der außerhalb des Erdmittelpunktes liegt. Dies führt auf eine komplexere Berechnung. Eine entsprechende Berechnung mit einem Satelliten, der eine deutlich geringere Masse als der Mond hat, umgeht dieses Problem und liefert noch genauere Ergebnisse.	3	5	
b)	Die Schülerinnen und Schüler sollen zwei Experimente durchführen. 1. Die Schwingungsdauer eines Fadenpendels $T_1 = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}$ experimentell bestimmen und nach *g* auflösen. 2. Die Auslenkung einer Feder (*D* bekannt) durch eine bekannte Masse bestimmen und $F_g = m \cdot g = -D \cdot s$ nach *g* auflösen. Eine Fehlerrechnung wird nicht erwartet. Beide Experimente sollen angemessen beschrieben und dargestellt werden.	1	9	
c)	Die Aufgabenstellung erfordert Textverständnis, die notwendigen Informationen sind allerdings gut erkennbar: Quaoar ist kugelförmig und befindet sich auf einer Bahn um die Sonne – somit sind zwei Kriterien für die Einstufung als Planet erfüllt. Da Quaoar Teil des Kuiper-Gürtels ist, kann davon ausgegangen werden, dass seine Bahn nicht bereinigt ist, wobei diese Information nicht explizit gegeben ist und der Interpretation durch die Schüler bedarf. Somit kommt es auf eine schlüssige Argumentation an. Die gegebenen Informationen entsprechen übrigens nicht alle dem aktuellen Forschungsstand. Wenn Schüler über den Text hinausgehende Informationen liefern, ist dies natürlich positiv zu bewerten.	4		
d)	Der erste Teil dieser Aufgabe wird mit dem 3. Kepler'schen Gesetz gelöst: $\frac{T_E{}^2}{T_Q{}^2} = \frac{a_E{}^3}{a_Q{}^3}$, also ist $a_Q = \sqrt[3]{a_E{}^3 \cdot \frac{T_Q{}^2}{T_E{}^2}}$ = 6,5·10^9 km Teil 2: Die Gravitationskraft zwischen Sonne und Quaoar bringt die Zentripetalkraft der Kreisbewegung auf: $\gamma \cdot \frac{m_Q \cdot m_S}{r^2} = \frac{m_Q \cdot v^2}{r}$, d. h. $m_S = \frac{v^2 \cdot r}{\gamma}$ = 1,97·10^{30} kg		7	2

	Lösungsskizze	Zuordnung, Bewertung I	II	III
e)	Die Gewichtskraft errechnet sich nach: $F_\gamma = \gamma \cdot \frac{m \cdot m_Q}{r^2}$ = 296 N Auf dem Äquator ist die Anzeige der Waage aufgrund der Drehung des Planeten um den Wert der Zentripetalkraft reduziert. $F_{\ddot{A}} = F_G - F_Z = \gamma \cdot \frac{m \cdot m_Q}{r^2} - \frac{m \cdot v^2}{r}$ = 291,9 N Am Pol ist der Wert nicht reduziert, also F_P = 296 N	5	2	
f)	Die Fluchtgeschwindigkeit soll berechnet werden und anhand von Erfahrungswerten aus dem Alltag abgeschätzt werden, ob ein Mensch diese aus eigener Kraft aufbringen kann. Die Fluchtgeschwindigkeit berechnet sich aus der potentiellen Energie am Pol $E_{pot} = -\gamma m_Q m_A / r$ und der aufzubringenden kinetischen Energie $W_{kin} = \frac{1}{2} m v^2$, d. h. $\mathrm{v} = \sqrt{\frac{2\gamma \mathrm{m_Q}}{\mathrm{r}}} = 1{,}43\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ Ein normal trainierter Mensch kann auf der Erde h = 0,5 m hoch springen. Aus $v = (2hg)^{1/2}$ ergibt sich v = 3,1 m/s, somit sollte der bestens trainierte Astronaut aus eigener Kraft die Fluchtgeschwindigkeit erreichen können. *Alternative Überlegungen (bspw. tangentialer Absprung vom Planeten), sind selbstverständlich erwünscht und ebenso richtig.*		3	9
	Insgesamt 50 BE	13	26	11

3.2 erhöhtes Anforderungsniveau

Aufgabe 2: Mechanische Schwingungen

In den Abbildungen 1 - 8 sind Momente verschiedener Bewegungen erkennbar festgehalten worden.

a) ● Beschreiben Sie die zugrunde liegenden Bewegungen, indem Sie insbesondere auf deren Gemeinsamkeiten eingehen.

● Erläutern Sie die Bewegungsvorgänge anhand eines Beispiels und verwenden Sie dazu die Begriffe harmonische Bewegung, Periode, Auslenkung, Frequenz, Amplitude, Rückstellkraft und Ruhelage. (7 BE)

Ein Fahrzeug (Abb. 3) der Masse m = 0,1 kg ist an einer Feder mit der Federkonstanten D = 7,5 N/m befestigt. Feder und Fahrzeug sind so abgestimmt, dass das Fahrzeug in horizontaler Richtung eine reibungsfreie harmonische Schwingung vollzieht.

b) Die Feder wird um s = 0,05 m aus der Gleichgewichtslage ausgelenkt.

● Berechnen Sie die Kraft, die dazu erforderlich ist.

Wird der Körper freigegeben, setzt eine Schwingung ein.

● Begründen Sie, weshalb es sich um eine harmonische Schwingung handelt.

● Berechnen Sie die Geschwindigkeit des Körpers beim Durchgang durch die Ruhelage.

● Bestimmen Sie, um wie viel Prozent sich die Schwingungsdauer des Pendels verlängert, wenn die Masse des schwingenden Körpers um 0,02 kg vergrößert wird. (13 BE)

In Abbildung 2 sieht man eine in der Ruhelage befindliche schwimmende Flaschenpost. Wird sie etwas tiefer eingetaucht und dann losgelassen, schwingt es um ihre Ruhelage.

c) ● Zeigen Sie, dass die Bewegung harmonisch ist.
Hinweis: Nach Archimedes ist die Auftriebskraft F_A eines Körpers gleich der Gewichtskraft F_G des von ihm verdrängten Wassers, also $F = \rho V g$. (9 BE)

Experimentelle Aufgabe: Im Experimentierraum finden Sie Experimentiermaterial zum Thema Schwingungen.

d) ● Bestimmen Sie experimentell die Federkonstante einer der Federn auf zwei verschiedenen Wegen.

● Bestimmen Sie experimentell die Masse der Figur. (Ersatzwert für die Federkonstante: 3,5 N/m). Dokumentieren Sie Ihr Vorgehen in angemessener Form und diskutieren Sie Fehlerquellen. (11 BE)

In Abb. 4 sieht man ein Pendel mit der Länge l = 0,5 m. 0,30 m unter dem Aufhängepunkt befindet sich ein fester Stift im Punkt P, an den sich der Faden während des Schwingens vorübergehend anlegt.

e) ● Bestimmen Sie, wie viele Schwingungen das Pendel in einer Sekunde ausführt. (10 BE)

Anlage zur Aufgabe „Mechanische Schwingungen“

Abb. 1 © Tobilander #27926076/ Fotolia.com

Abb. 2 © Foto-Ruhrgebiet #30270558/ Fotolia.com

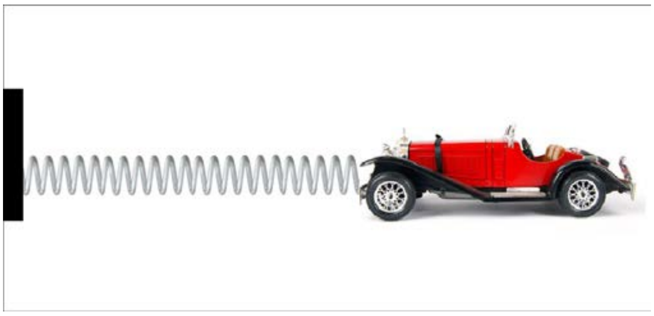


Abb. 3 © Flexmedia #26797271/ Fotolia.com

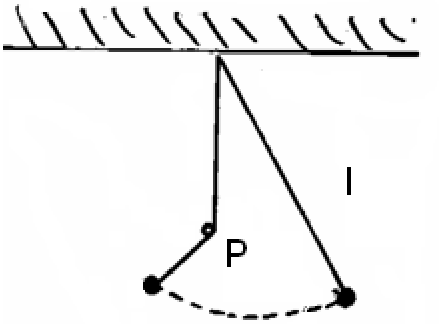


Abb. 4

Abb. 5 ©Joachim Wendler #31842789/ Fotolia.com

Abb. 6 © laska_love #27926076/ Fotolia.com

Abb. 7 © Igor Yaruta #31449046/ Fotolia.com

Abb. 8 © Klaus Eppele #26797271/ Fotolia.com

Erwartungshorizont

<table>
<tr><th rowspan="2"></th><th rowspan="2">Lösungsskizze</th><th colspan="3">Zuordnung, Bewertung</th></tr>
<tr><th>I</th><th>II</th><th>III</th></tr>
<tr><td>a)</td><td>Die Periodizität aller Vorgänge soll diskutiert werden, die Begriffe harmonische Bewegung, Periode, Auslenkung, Frequenz, Amplitude, Rückstellkraft und Ruhelage werden an den Beispielen in angemessener Weise erläutert.</td><td>4</td><td>3</td><td></td></tr>
<tr><td>b)</td><td>(1) $F = D \cdot s = 0{,}375\ N$
(2) Eine harmonische Schwingung liegt vor, wenn die rücktreibende Kraft proportional zur Auslenkung ist. Für das Federpendel gilt $F = D \cdot s$, also gilt bei konstantem D: $F \sim s$.
(3) Diese Aufgabe lässt sich über eine Energiebetrachtung (Spannenergie ist gleich kinetischer Energie: $\frac{1}{2} D \cdot s^2 = \frac{1}{2} m \cdot v_m^2$, $v_m = s_m \cdot \omega = \frac{2\pi}{T} = 0{,}43 \frac{m}{s}$) oder über die Kenntnis der Bewegungsgleichungen ($v(t) = s_m \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t)$, also $v_m = s_m \cdot \omega = \frac{2\pi}{T} = 0{,}43 \frac{m}{s}$) lösen.
(4) Die Formel für die Schwingungsdauer lautet: $T = 2 \cdot \sqrt{\frac{m}{D}}$. Es können beide Werte errechnet und verglichen werden, oder über einen direkten Vergleich ($\mathrm{T}_1 = 2 \cdot \sqrt{\frac{\mathrm{m}_1}{\mathrm{D}}}$; $\mathrm{T}_2 = 2 \cdot \sqrt{\frac{\mathrm{m}_2}{\mathrm{D}}}$) der Unterschied von 9,5 % ermittelt werden.</td><td>5</td><td>8</td><td></td></tr>
<tr><td>c)</td><td>Die Auftriebskraft beträgt $F = \rho \cdot V \cdot g$. (g ist die Erdbeschleunigung, ρ die Dichte des Wassers, V das verdrängte Flüssigkeitsvolumen). Das Volumen eines Zylinders beträgt $V = A \cdot h$
Beim Eintauchen des Glases um Δs vergrößert sich das eingetauchte Volumen um $\Delta V = A \cdot \Delta s$, also auch die zusätzliche Auftriebskraft, die auch als Rückstellkraft wirkt: $F_R = \rho \cdot \Delta V \cdot g = \rho \cdot \Delta s \cdot A \cdot g$. Also ist die Rückstellkraft proportional zur Auslenkung.</td><td></td><td>4</td><td>5</td></tr>
<tr><td>d)</td><td>Die Schülerinnen und Schüler sollen die Federkonstante einerseits über $T = 2 \cdot \sqrt{\frac{m}{D}}$ andererseits über $F = D \cdot s$ bestimmen. Eine Fehlerrechnung wird nicht erwartet. Die Masse der Figur kann dann mit der bekannten Federkonstante bestimmen.
Neben einer angemessenen Dokumentation ist eine möglichst genaue Bestimmung der Federkonstante und der Masse der Figur erforderlich.
Anmerkung: Verwendet wird eine in der Schule vorhandene Feder (z.B. D = 3 N/m). Als Figur wird ein beliebiger, in der Schule vorhandener Gegenstand (z.B. der Masse 50g – 100g) gewählt, der an der Feder befestigt werden kann.</td><td>3</td><td>8</td><td></td></tr>
</table>

<table>
<tr><th rowspan="2"></th><th rowspan="2">Lösungsskizze</th><th colspan="3">Zuordnung, Bewertung</th></tr>
<tr><th>I</th><th>II</th><th>III</th></tr>
<tr><td>e)</td><td>Um die gesuchte Frequenz zu erhalten, ist die Schwingungsdauer einer Schwingung zu bestimmen. Eine Schwingung setzt sich aus zwei halben Schwingungen zusammen: die mit der langen Fadenlänge und die mit der kurzen Fadenlänge.

$$T = \frac{T_1}{2} + \frac{T_2}{2}$$

Mit der Gleichung für die Schwingungsdauer eines Fadenpendels erhält man dann die Gesamtschwingungsdauer:

$$T = \frac{T_1}{2} + \frac{T_2}{2}$$

$$T = \frac{2 \cdot \pi \sqrt{\frac{l_1}{g}}}{2} + \frac{2 \cdot \pi \sqrt{\frac{l_2}{g}}}{2} = \pi \cdot \left(\sqrt{\frac{l_1}{g}} + \sqrt{\frac{l_2}{g}} \right)$$

$$T = \frac{\pi}{\sqrt{g}} \cdot \left(\sqrt{l_1} + \sqrt{l_2} \right) = 1{,}158 s$$

Damit kann nun die Frequenz berechnet werden:

$$f = \frac{1}{T} = 0{,}863 \frac{1}{s}$$</td><td>1</td><td>3</td><td>6</td></tr>
<tr><td colspan="2" align="right">Insgesamt 50 BE</td><td>13</td><td>26</td><td>11</td></tr>
</table>

3.2 erhöhtes Anforderungsniveau

Aufgabe 3: Wellen

Das schönste Experiment aller Zeiten

Im September 2002 haben die Leserinnen und Leser der Zeitschrift „Physics World“ das schönste Experiment aller Zeiten gewählt. Gewonnen hat ein Experiment, das von Claus Jönsson 1960 in Tübingen durchgeführt wurde: Elektronen werden an Doppel- und Mehrfachspalten gebeugt. Das Experiment ist auch deshalb faszinierend, weil es eine große Ähnlichkeit zu den entsprechenden Experimenten hat, die man mit Licht durchführen kann.

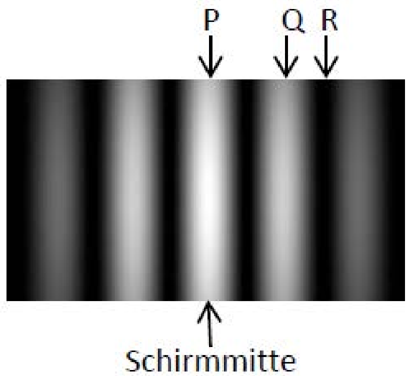
Das Doppelspaltexperiment mit Lichtwellen

Das Doppelspaltexperiment mit Licht wurde 1802 von Thomas Young durchgeführt. Damals wurde kontrovers darüber diskutiert, ob Licht besser durch eine Theorie der Teilchenstrahlung oder als ein Wellenphänomen erklärt werden könnte. Der Legende nach ist Thomas Young die Idee zu diesem Experiment gekommen, als er zwei nebeneinander her schwimmende Enten in einem Teich beobachtet hat.

a) ● Beschreiben Sie den Aufbau eines optischen Doppelspaltexperiments.
● Erklären Sie, wie das Interferenzmuster beim Doppelspaltexperiment zustande kommt.
● Nennen Sie die Voraussetzungen, die erfüllt sein müssen, damit sich ein Interferenzmuster beobachten lässt.
● Begründen Sie, dass Wasserwellen als Modell für ein optisches Doppelspaltexperiment aufgefasst werden können. (12 BE)

Kohärentes und monochromatisches Licht fällt auf eine Blende mit zwei gleichen, sehr schmalen Spalten, deren Abstand *d* beträgt. Die Abbildung rechts zeigt das Interferenzmuster, das auf einem in großer Entfernung parallel zur Blende aufgestellten Schirm zu sehen ist. Die Punkte P und Q zeigen Maxima der Helligkeit, R ist ein Minimum.

Abbildung gemeinfrei aus Wikimedia Commons; bearbeitet



b) ● Geben Sie den Gangunterschied an, der zwischen den von den beiden Spalten ausgehenden Lichtwellen an den Punkten P, Q und R besteht. Drücken Sie Ihre Antwort als Vielfaches oder Bruchteil der Wellenlänge aus.

Nun wird Licht gleicher Intensität, aber halber Wellenlänge verwendet.

● Beschreiben Sie, ob und wie sich die Helligkeit an den Punkten P, Q und R verändert und
● begründen Sie ihre Aussage. (9 BE)

Ein Doppelspalt mit dem Spaltabstand 1,2 mm wird mit monochromatischem Licht beleuchtet. Auf dem 2,70 m entfernten Schirm können 5 helle Streifen auf einer Strecke von 6,3mm beobachtet werden.

c) ● Berechnen Sie die Wellenlänge des Lichts. (3 BE)

Nun wird der Übergang zu Mehrfachspalten untersucht, mit der ursprünglichen, unveränderten Wellenlänge. Links finden Sie nochmal das Interferenzbild des Doppelspalts. Es wird nun ein dritter Spalt rechts des Doppelspalts geöffnet. Der Abstand zum dritten Spalt ist der gleiche wie der zwischen den ersten beiden Spalten.

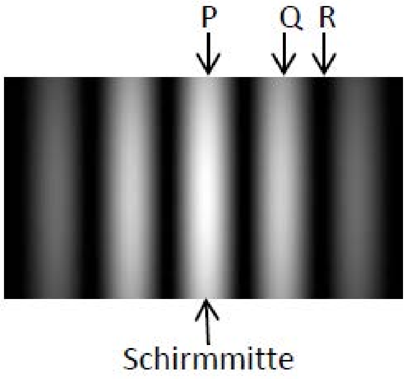


Abbildung gemeinfrei; bearbeitet

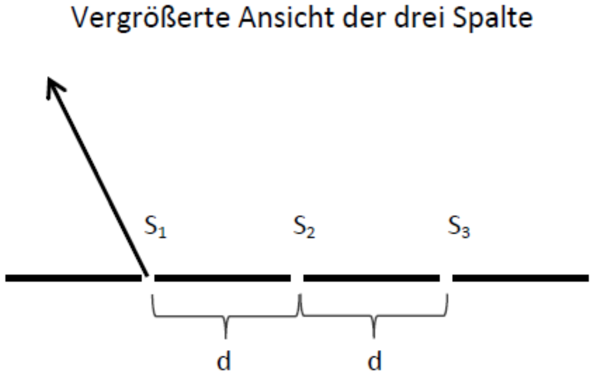


Abbildung J. Wiese

d) ● Beschreiben Sie, ob und wie sich die Helligkeit am Punkt R verändert.

● Begründen Sie ihre Angaben. (4 BE)

Das Doppelspaltexperiment mit Elektronen

Bei der Interferenz von Elektronen am Doppelspalt wurden Elektronen beim Durchlaufen einer Spannung von 50 kV beschleunigt und dann auf einen Doppelspalt mit dem Spaltabstand 2 µm gelenkt. Neben der kohärenten Ausleuchtung des Spalts und der Vergrößerung des Beugungsbilds war die Herstellung so feiner Spalte eine der Hauptschwierigkeiten bei dem Versuch.

e) ● Berechnen Sie, welche de-Broglie-Wellenlänge die Elektronen haben. Gehen Sie davon aus, dass die Berechnung ohne Verwendung von Formeln aus der speziellen Relativitätstheorie hinreichend genau ist.

● Vergleichen Sie die de-Broglie-Wellenlänge der Elektronen von ca. $5 \cdot 10^{-12}$ m mit den Dimensionen eines typischen Atoms.

● Berechnen Sie, welchen Abstand die Interferenzmaxima in der 350 mm entfernten Beobachtungsebene haben.

● Begründen Sie, dass das Interferenzbild mit elektronen- und lichtoptischen Mitteln um einen Faktor 1000 vergrößert werden musste. Verwenden Sie dabei die Information, dass das Auflösungsvermögen des Auges bei gutem Kontrast Punkte unterscheiden kann, deren Winkelabstand weniger als zwei Bogenminuten beträgt. Gehen Sie weiterhin davon aus, dass das Interferenzbild aus einem Abstand von ca. 20 cm betrachtet wird. (12 BE)

Die geringe Wellenlänge stellt bei dem beschriebenen Doppelspaltexperiment mit Elektronen eine besondere Herausforderung dar. Um dies zu verdeutlichen, kann man die Dimensionen mit dem Aufbau vergleichen, der für optische Experimente verwendet wird.

f) ● Schätzen Sie ab, welchen Spalt- und Schirmabstand der analoge Versuch mit sichtbarem Licht hätte, wenn die Verhältnisse des elektronenoptischen Versuchsaufbaus zugrunde gelegt werden. (4 BE)

Der Versuch von Jönsson wurde nicht nur mit einem Doppelspalt, sondern auch mit Dreifach-, Vierfach- und Fünffachspalten durchgeführt. Auf der folgenden Grafik sehen Sie die theoretisch erwartete Intensitätsverteilung und das Interferenzbild für die Elektronenbeugung an einem Dreifachspalt.

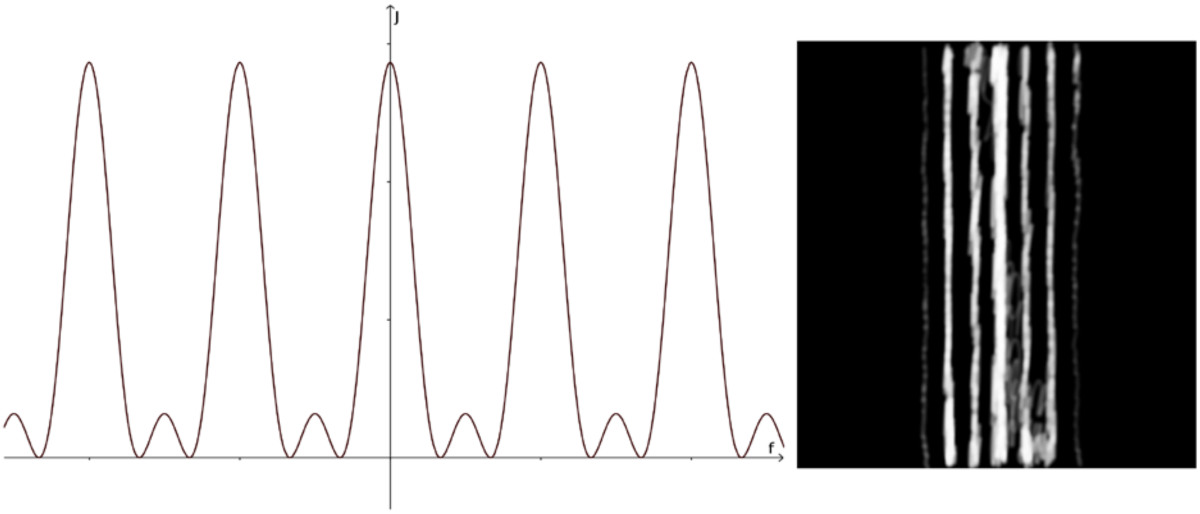


Abbildung: BSB

g) ● Vergleichen Sie die gemessene Intensitätsverteilung mit der theoretischen Erwartung.
● Erklären Sie die Unterschiede. (6 BE)

Quellen:
McDermott, Shaffer: Tutorien zur Physik. Pearson Studium, 2008.
Claus Jönsson: Elektroneninterferenzen an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten. Zeitschrift für Physik 161 S. 454-474, 1961.

Erwartungshorizont

	Lösungsskizze	Zuordnung, Bewertung I	II	III
a)	• Lichtquelle → Doppelspalt → Schirm.	3		
	• Wellen werden an einem Hindernis abgelenkt. Diesen Vorgang bezeichnet man als Beugung. Mit dem Huygens'schen Prinzip kann die Entstehung des Interferenzmusters erklärt werden: Von jedem Spalt geht eine Elementarwelle aus. Die Elementarwellen überlagern sich. Je nachdem, wie groß der Gangunterschied an einem bestimmten Punkt auf dem Schirm ist, kommt es zu konstruktiver oder destruktiver Interferenz.		3	
	• Spaltabstand > λ, kohärente Beleuchtung. Damit das Interferenzmuster gut beobachtbar ist, müssen darüber hinaus Spaltabstand und Wellenlänge in der gleichen Größenordnung sein. Monochromatisches Licht führt zu definierten Zonen maximaler und minimaler Intensität.	4		
	• Wasserwellen überlagern sich ungestört. Auch hier addieren sich die Auslenkungen und können sich verstärken oder schwächen bzw. auslöschen.		2	
b)	• In *P* besteht kein Gangunterschied. Der Gangunterschied in *Q* beträgt $\Delta s_Q = \lambda$, in *R* $\Delta s_R = \frac{3}{2}\lambda$.	3		
	• Bei *P* und *Q* bleibt die Helligkeit maximal. Am Punkt *R* ändert sich die Helligkeit. Hier entsteht auch ein Maximum.		2	
	• *P* bezeichnet die Schirmmitte. Hier ist das 0. Maximum, unabhängig von der Wellenlänge. Wird mit $\tilde{\lambda} = \frac{\lambda}{2}$ die veränderte Wellenlänge bezeichnet, ist der Gangunterschied bei *Q* nun $\Delta s_Q = \lambda = 2\tilde{\lambda}$, also wieder ein Maximum. Bei *R* hingegen findet man $\Delta s_R = \frac{3}{2}\lambda = 3\tilde{\lambda}$, also eine Aufhellung zum Maximum gegenüber den vorherigen Zustand.		3	1
c)	• Da der Abstand der Maxima gering gegenüber dem Abstand Doppelspalt– Schirm ist, kann für den Winkel α, unter dem das erste Maximum erscheint, mit der Näherung tan(α) = sin(α) gerechnet werden. Das ergibt $$\frac{\frac{6{,}3}{4}mm}{2700mm} = \frac{\Delta s}{d}$$ Mit dem Spaltabstand *d* und dem Gangunterschied $\Delta s = \lambda$ für das erste Maximum findet man $\lambda = 700\,nm$.		3	
d)	• Bei *R* steigt die Beleuchtungsintensität an.		2	
	• Am Punkt R beträgt der Gangunterschied in Hinblick auf benachbarte Spalte $\Delta s = \frac{3}{2}\lambda$. Die Elementarwellen löschen sich also aus. Allerdings ist der Gangunterschied der Elementarwellen aus Spalt 1 und 3 doppelt so groß: $2\Delta s = 3\lambda$. Hier ist die Bedingung für konstruktive Interferenz erfüllt. Es entsteht ein Zwischenmaximum geringerer Intensität.			2

<table>
<tr><th rowspan="2"></th><th rowspan="2">Lösungsskizze</th><th colspan="3">Zuordnung, Bewertung</th></tr>
<tr><th>I</th><th>II</th><th>III</th></tr>
<tr><td>e)</td><td>

- Die de-Broglie-Wellenlänge ergibt sich zu
$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_e \cdot e \cdot U}} = 5,48 \cdot 10^{-12}\,m.$$
- Aus dem Tafelwerk entnimmt man, dass sich viele Atomradien im Bereich ~100 · 10^{-12} m befinden. Die de-Broglie-Wellenlänge der betrachteten Elektronen ist etwa um einen Faktor 100 kleiner.
- Der Abstand *a* der Maxima ergibt sich zu
$$a = 0,35m \cdot \frac{5,48 \cdot 10^{-12}\,m}{2\mu m} = 9,6 \cdot 10^{-7}\,m$$
- Wenn man davon ausgeht, dass zwei Punkte den Winkelabstand 2 Bogenminuten haben und aus einer Entfernung von 0,2 m betrachtet werden, haben sie den Abstand
$$0,2m \cdot \frac{2\pi \cdot 2}{360° \cdot 60} = 1,2 \cdot 10^{-4}\,m$$
Dieser Abstand ist kleiner als der vergrößerte Abstand 1000 · e = 9,6 · 10^{-4} m. Daher ist zu erwarten, dass man in der Vergrößerung den Abstand der Maxima erkennen kann.

</td><td>4</td><td>2
2</td><td>4</td></tr>
<tr><td>f)</td><td>

- Wenn man den Spaltabstand *d* eines optischen Doppelspaltexperiments in dem Verhältnis vergrößert, in dem die de-Broglie-Wellenlänge λ_e und die Wellenlänge von sichtbarem Licht stehen, erhält man einen Spaltabstand von ca. $20\,cm$. Mit $\lambda = 500\,nm$ folgt:
$$\frac{\lambda_e}{d_e} = \frac{\lambda}{d} \Rightarrow \lambda = d \cdot \frac{\lambda_e}{d_e} = 0,2m.$$
Entsprechend berechnet man den Abstand *l* zwischen Doppelspalt und Schirm zu $l = 35\,km$.

</td><td></td><td></td><td>4</td></tr>
<tr><td>g)</td><td>

- Vergleich: Gemeinsam haben die theoretische und die gemessene Intensitätsverteilung den gleichmäßigen Abstand zwischen den Maxima. Unterschiede sind beispielsweise die Abnahme der maximalen Intensität und das Fehlen der Zwischenmaxima.
- Die Abnahme der Intensität kann mit der Überlagerung des Doppelspalt-Interferenzmusters mit dem Beugungsbild des Einzelspalts erklärt werden. Die Abschwächung der Zwischenmaxima entsteht durch die zusätzlichen Interferenzbedingungen, die mit den dritten Spalt auftreten. Die Intensität der Zwischenmaxima ist zu gering, um sichtbar zu sein. Die Zwischenmaxima führen aber zu einem steileren Abfall der Intensität der Interferenzstreifen, die so deutlicher abgegrenzt erscheinen.

</td><td></td><td>4</td><td>2</td></tr>
<tr><td></td><td>Insgesamt 50 BE</td><td>14</td><td>23</td><td>13</td></tr>
</table>