Gemeinsame Abituraufgabenpools der Länder

Beispielaufgaben

Aufgabe für das Fach Physik

Kurzbeschreibung

Aufgabentitel	**Wellenlängenmessung mit einem Michelson-Interferometer (mit Experiment)**
Anforderungsniveau	erhöht
Inhaltsbereiche	♦ Mechanische und elektromagnetische Schwingungen und Wellen ♦ Überlagerung von Wellen ♦ Interferometer
Materialien	♦ M 1 Prinzipskizze eines Michelson-Interferometers ♦ M 2 Materialien aus dem Experimentierkasten ♦ M 3 Alternative Messdaten für den Fall, dass eigene Werte nicht gewonnen werden konnten ♦ M 4 Tabellenwerte über die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in Luft von Parametern
Quellenangaben	♦ Alle Materialien und Abbildungen wurden im Auftrag des IQB erstellt.
Hilfsmittel	♦ Wissenschaftlicher Taschenrechner ♦ Formelsammlung ♦ Geodreieck; je Prüfungsgruppe einige Rollen Klebeband ♦ Zusätzlich für jedes Mitglied der Prüfungsgruppe für die gesamte Dauer der Prüfung ein Experimentierkasten „Ultraschall“; zugehöriges Multimeter; zugehöriges Steckernetzteil; (Details dazu im Anhang)
zusätzliche inhaltliche und methodische Voraussetzungen	♦ ein im Unterricht vereinbartes Verfahren zur Abschätzung relativer Messunsicherheiten ♦ seit Beginn des Unterrichts in der Kursstufe durch wiederholtes Verwenden gewonnene Vertrautheit mit dem in Niedersachsen eingeführten Experimentierkasten „ULTRASCHALL“ zu Schwingungen und Wellen (siehe Kapitel 6).
fachpraktischer Anteil	ja ☒ nein ☐ Zeitzuschlag: -
Hinweise	♦ Hinweise zum Experiment für die Hand der Lehrkraft

1 Aufgabe

Wellenlängenmessung mit einem Michelson-Interferometer (mit Experiment)

Zur Messung kleiner und kleinster Längenänderungen verwendet man oft Michelson-Interferometer. In dieser Aufgabe wird ein solches Interferometer mit Ultraschall realisiert. Auf dieser Grundlage soll untersucht werden, ob sich ein Michelson-Interferometer mit Ultraschall zur Messung der Luftfeuchtigkeit eignet.

	BE
1 In M 1 ist der Aufbau eines Michelson-Interferometers dargestellt. Der Spiegel 2 soll verschiebbar sein.	
Erläutern Sie das Prinzip der Messung kleinster Längenänderungen mit einem Michelson-Interferometer und die Aufgaben seiner Bauteile.	6
Begründen Sie, welche der drei Gleichungen a), b) oder c) für die Verschiebungsstrecke des Spiegels 2 zwischen zwei Minima der gemessenen Helligkeit am Detektor gilt.	5
a) $\Delta x = n \cdot \frac{\lambda}{4}$; b) $\Delta x = n \cdot \frac{\lambda}{2}$; c) $\Delta x = n \cdot \lambda$ (Δx: Verschiebungsstrecke des Spiegels 2 zwischen je zwei Minima; λ: Wellenlänge; $n = 1, 2, 3, \ldots$)	
2 Die vom Ultraschallsender aus dem Experimentierkasten abgestrahlte Wellenlänge soll experimentell nach dem Prinzip eines Michelson-Interferometers bestimmt werden.	
Planen Sie die Durchführung eines geeigneten Experimentes auf der Grundlage von M 1 und M 2.	5
Zeichnen Sie auf ein quer gelegtes DIN-A4-Blatt den Grundriss für Ihren experimentellen Aufbau auf der Grundlage von M 1 in Originalgröße. Hinweis: Die Zeichnung muss mit Ihrer Lösung abgegeben werden.	4
Führen Sie das Experiment durch, wobei Sie Ihr Messergebnis angemessen dokumentieren. Hinweis: Falls Ihnen die Messung nicht gelingt, arbeiten Sie mit den Angaben aus M 3 weiter.	6
Ermitteln Sie die Wellenlänge des Ultraschalls.	4
Schätzen Sie dabei die Messunsicherheit begründet ab.	4
3 Um große Klimaanlagen optimal zu betreiben, benötigt man aktuelle Werte der relativen Luftfeuchtigkeit. Gebräuchliche Messgeräte gelten als ungenau und reagieren nur sehr langsam auf Veränderungen der Luftfeuchtigkeit. Zudem müssen diese Geräte in kürzeren Abständen neu eingestellt werden, damit wieder Messungen möglich sind.	
Beurteilen Sie unter Hinzuziehung von M 4 den Vorschlag, die relative Luftfeuchtigkeit künftig mit Hilfe eines Michelson-Interferometers auf der Basis Ihres Experimentes zu bestimmen.	6

2 Material

Material 1

Prinzipskizze eines Michelson-Interferometers

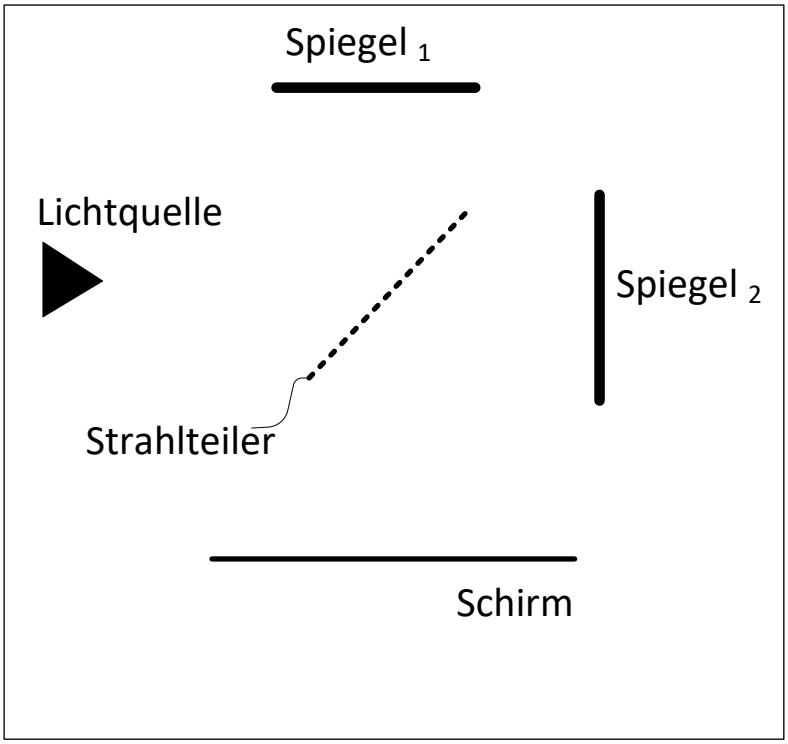


Abb. 1: Prinzipskizze eines Michelson-Interferometers, IQB

Material 2

Materialien aus dem Experimentierkasten

Als Strahlteiler dient die Lochplatte aus dem Experimentierkasten.

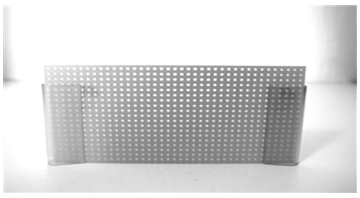


Abb. 2a: Strahlteiler, IQB

Als Spiegel 2 dient die Vorderkante einer der Aufbewahrungsschachteln aus dem Experimentierkasten.

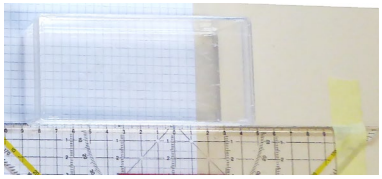


Abb. 2b: Spiegel, IQB

Material 3

Alternative Messdaten für den Fall, dass eigene Werte nicht gewonnen werden konnten

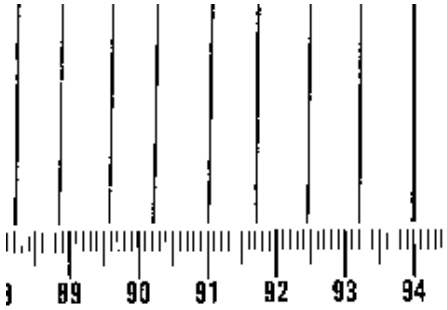


Abb. 3: Alternative Messdaten, IQB

Die Markierungen wurden in aufeinanderfolgenden Minima der Intensität an der Vorderseite des Spiegels 2 gezeichnet.

Hinweis: Diese Werte wurden mit einer deutlich anderen Ultraschallfrequenz gewonnen. Die Längen sind in cm angegeben.

Material 4

Tabellenwerte über die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in Luft von Parametern

Tab. 1: rel. Luftfeuchtigkeit und Schallgeschwindigkeit

relative Luftfeuchtigkeit in %	**Schallgeschwindigkeit *c* in m/s** bei 20°C
10	343,0
20	343,1
30	343,1
40	343,3
50	343,4
60	343,5
70	343,7
80	343,8

Quelle: IQB

Eigenfrequenz f_0 des Ultraschall-Schwingers
(40 ± 1) kHz

Tab. 2: Temperatur und Schallgeschwindigkeit

Temperatur in °C	**Schallgeschwindigkeit *c* in m/s** bei 50% relativer Luftfeuchtigkeit
10	337,5
20	343,4
30	349,2
40	354,9

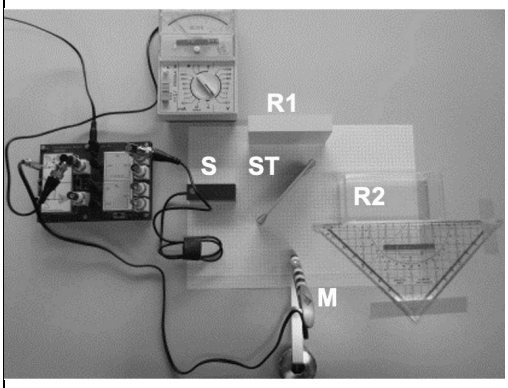
Quelle: IQB

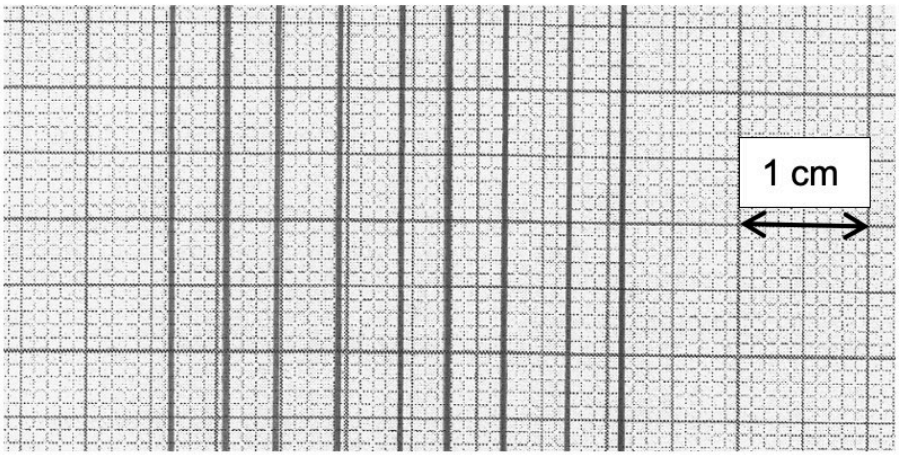
3 Erwartungshorizont

Der Erwartungshorizont stellt für jede Teilaufgabe eine mögliche Lösung dar. Nicht dargestellte korrekte Lösungen sind als gleichwertig zu akzeptieren.

		BE/AFB		
		I	II	III
1	*Erläutern Sie das Prinzip der Messung kleinster Längenänderungen mit einem Michelson-Interferometer und die Aufgaben seiner Bauteile.* Die Lernenden… S 5 erklären bekannte Messverfahren sowie die Funktion einzelner Komponenten eines Versuchsaufbaus. *Mögliche Lösung:* Die von der Lichtquelle ausgesandte Welle wird am Strahlteiler in zwei Teilwellen zerlegt: Die eine Hälfte wird reflektiert und gelangt zu Spiegel 1, die andere Hälfte tritt durch den Strahlteiler hindurch und gelangt zu Spiegel 2. Beide Wellen werden an den jeweiligen Spiegeln reflektiert und gelangen zum Strahlteiler zurück. Wieder wird ein Teil reflektiert und ein Teil durchgelassen und beide erreichen den Schirm mit einer Reflexion und einer Transmission. Sind die Abstände beider Spiegel zum Strahlteiler und damit die Wege beider Teilwellen von der Quelle zum Schirm gleich lang, interferieren die Teilwellen konstruktiv, da die zugehörigen Zeiger in Phase sind und in der Mitte des Schirmbildes ein Maximum zu erkennen ist. Verschiebt man einen der beiden Spiegel z.B. um $\lambda/4$, so legt die eine Teilwelle einen um $\lambda/2$ längeren Weg zum Schirm zurück, die Zeiger weisen dann entgegengesetzte Phasen auf und die Interferenz ist destruktiv. Folglich ist auf dem Schirm in der Mitte ein Minimum zu sehen. Da die Wellenlänge von Licht sehr klein ist, sind somit kleinste Längenänderungen messbar.	6		
	Begründen Sie, welche der drei Gleichungen a), b) oder c) für die Verschiebungsstrecke des Spiegels 2 zwischen zwei Minima der gemessenen Helligkeit am Detektor gilt. Die Lernenden… S 7 wenden bekannte mathematische Verfahren auf physikalische Sachverhalte an; E 4 modellieren Phänomene physikalisch, auch mithilfe mathematischer Darstellungen und digitaler Werkzeuge, wobei sie theoretische Überlegungen und experimentelle Erkenntnisse aufeinander beziehen. *Begründen*, dass Gleichung b) zutrifft mit den Kernpunkten: z.B. destruktive Überlagerung zweier Wellen in einem Minimum, Verschiebung um $n \cdot \frac{\lambda}{2}$ bewirkt zusätzlichen Wegunterschied von $n \cdot \lambda$, da Reflexion eintritt, tritt somit nach dieser Verschiebung erneut ein Minimum auf.			

	Mögliche Schülerlösung: Es gilt Gleichung b). Durch Verschieben des Spiegels um ganzzahlige Vielfache der halben Wellenlänge entsteht auf dem Schirm ein zusätzlicher Gangunterschied der Bündel eines ganzzahligen Vielfachen der Wellenlänge. Dies ändert die Phasendifferenz der Wellen nicht. Interferierten die Lichtbündel vor der Verschiebung des Spiegels konstruktiv, so tun sie dies auch nach der Verschiebung.	5		
2	*Planen Sie die Durchführung eines geeigneten Experimentes auf der Grundlage von M 1 und M 2.* Die Lernenden… E 5 planen geeignete Experimente und Auswertungen zur Untersuchung einer physikalischen Fragestellung; K 4 formulieren unter Verwendung der Fachsprache chronologisch und kausal korrekt strukturiert. *Planen* des Vorgehens mit zugehöriger Dokumentation. Die Dokumentation muss planmäßiges Vorgehen erkennen lassen und auf die geplante Sicherung der Messwerte eingehen. Benötigtes Material: ♦ Ultraschall-Sender statt Lichtquelle ♦ Seitenteil des Doppelspalts als Spiegel 1 ♦ Verpackungsbehälter als verschiebbarer Spiegel 2 ♦ Lochplatte als Strahlteiler ♦ Ultraschall-Messsonde (US-Pen) als Schirm bzw. Detektor ♦ Geodreieck ♦ Betriebsgerät ♦ Messgerät Aufbau: Der Behälter wird dem Sender gegenüber positioniert, die Stirnfläche befindet sich als Reflektor senkrecht zur Verbindungsachse. Zur Verschiebung wird die Längsseite entlang eines mit Klebeband fixierten Geodreiecks geführt. Etwa in der Mitte wird die Lochplatte im Winkel von 45° unter Benutzung der Klemmstücke aufgestellt, in Ablenkrichtung wird das Seitenteil des Doppelspalts als Reflektor montiert. Gegenüber wird als Detektor der US-Pen befestigt.		5	

	Sender, US-Pen und Messgerät werden mit den Anschlüssen des Betriebsgerätes verbunden.  Foto des möglichen Aufbaus (nicht erwartet) S: Ultraschallsender (Eigenfrequenz f = (40 ± 1,0) kHz) ST: Strahlteiler R1: Reflektor 1 (fest) R2: Reflektor 2 (verschiebbar) M: Messsonde (US-Pen) Durchführung: Der Behälter wird so in Position gebracht, dass die LED des US-Pens nur gering leuchtet und das Messgerät eine geringe Spannung anzeigt (Minimum – entspricht destruktive Interferenz der Wellen beider Wege am US-Pen). Die Position wird an der Vorderseite des Behälters markiert (Position 0). Anschließend wird der Behälter entlang des Geodreiecks verschoben. Dabei wird ein wiederholter Wechsel zwischen maximaler und minimaler Helligkeit der Diode im US-Pen erwartet. Bei jedem Intensitätsminimum wird die Position des Behälters markiert.			
	Zeichnen Sie auf ein quer gelegtes DIN-A4-Blatt den Grundriss für Ihren experimentellen Aufbau auf der Grundlage von M 1 in Originalgröße. *Führen Sie das Experiment durch, wobei Sie Ihr Messergebnis angemessen dokumentieren.* *Ermitteln Sie die Wellenlänge des Ultraschalls.* Die Lernenden… S 4 bauen Versuchsanordnungen auch unter Verwendung von digitalen Messwerterfassungssystemen nach Anleitung auf, führen Experimente durch und protokollieren ihre Beobachtungen; S 7 wenden bekannte mathematische Verfahren auf physikalische Sachverhalte an; S 6 erklären bekannte Auswerteverfahren und wenden sie auf Messergebnisse an. *Zeichnen* des Versuchsaufbaus mit korrekten Winkeln und nachvollziehbaren Abmessungen. (vgl. Foto oben) *Durchführen* des Experiments inklusive Dokumentation: z. B. 4,3 cm zwischen 11 Minima sowie mindestens stichwortartige Dokumentation des Vorgehens bei der Messung (wenn nicht schon in der Planung erfolgt).		4 6	

	Mögliches Messergebnis:  *Ermitteln* der Wellenlänge zu $\lambda \approx 0{,}86$ cm unter Ausnutzung mehrerer Minima (bzw. Maxima) und der Gleichung aus 1. *Hinweise:* *Aufgrund der sensiblen Messung sind größere Abweichungen möglich.* *Die Qualität des Vorgehens erweist sich vor allem in der Ausnutzung möglichst vieler Messwerte und dem Geschick in der Durchführung.*		4	
	Schätzen Sie dabei die Messunsicherheit begründet ab. Die Lernenden… E7 berücksichtigen Messunsicherheiten und analysieren die Konsequenzen für die Interpretation des Ergebnisses. *Abschätzen* der relativen Messunsicherheit zu etwa 2,3% mit Dokumentation auf die im Unterricht vereinbarte Weise *Mögliche Schülerlösung:* Um eine möglichst große Genauigkeit zu erzielen, sollte der Abstand möglichst weit auseinander liegender Markierungen gemessen werden. Bei 11 Markierungen (das entspricht zehn halben Wellenlängen wird Δs = 4,3 cm gemessen. Aus der Erfahrung beim Markieren im Experiment und der Breite der Linien ergibt sich eine geschätzte Unsicherheit von $u_s \approx$ 1mm, so dass die relative Messunsicherheit $\frac{1\,\text{mm}}{43\,\text{mm}} \approx 2{,}3\%$ beträgt.		4	
3	*Beurteilen Sie unter Hinzuziehung von M 4 den Vorschlag, die relative Luftfeuchtigkeit künftig mit Hilfe eines Michelson-Interferometers auf der Basis Ihres Experimentes zu bestimmen.*			

	Die Lernenden… E 7 berücksichtigen Messunsicherheiten und analysieren die Konsequenzen für die Interpretation des Ergebnisses; E 10 beziehen theoretische Überlegungen und Modelle zurück auf Alltagssituationen und reflektieren ihre Generalisierbarkeit. *Beurteilen* auf der Grundlage der aus den Angaben berechneten Schallgeschwindigkeit von z.B. 0,86 cm · 40 kHz ≈ 344 m/s ± 8 m/s mit dem Kernpunkt: die Messunsicherheit ist wesentlich größer als die Unterschiede zwischen den angegebenen Werten für verschiedene relative Luftfeuchtigkeiten. Das vorgeschlagene Messverfahren ist daher nicht geeignet. *Mögliche Schülerlösung:* Die Schallgeschwindigkeit berechnet man zu $c = \lambda \cdot f = 0{,}86\ \text{cm} \cdot 40\ \text{kHz} = 344\ \text{m/s}$. Die relative Messunsicherheit von etwa 2,9 % gibt eine absolute Unsicherheit von 10 m/s. Damit ist sie erheblich größer als die Unterschiede zwischen den angegebenen Werten für verschiedene relative Luftfeuchtigkeiten. Der Vorschlag, die Luftfeuchtigkeit mit dem gezeigten Versuchsaufbau zu messen, muss daher abgelehnt werden.			6
	Summe	**11**	**23**	**6**
	Anteile der Bewertungseinheiten in Prozent	**27,5**	**57,5**	**15**

4 Standardbezug

Teilaufgabe	Kompetenzbereich			
	S	E	K	B
1	5, 7	4		
2	4, 6. 7	5, 7	4	
3		7, 10		

5 Bewertungshinweise

Die Bewertung der erbrachten Prüfungsleistungen hat sich für jede Teilaufgabe nach der am rechten Rand der Aufgabenstellung angegebenen Anzahl maximal erreichbarer Bewertungseinheiten (BE) zu richten.

Für die Bewertung der Gesamtleistung eines Prüflings ist ein Bewertungsraster[1] vorgesehen, das angibt, wie die in den drei Prüfungsteilen insgesamt erreichten Bewertungseinheiten in Notenpunkte umgesetzt werden.

6 Hinweise zum Experiment für die Hand der Lehrkraft

1) Für jedes Mitglied einer Prüfungsgruppe ist folgendes Material erforderlich:

- der Experimentierkasten Ultraschall oder funktionsgleiche Ausstattung[2]
- das zugehörige Stecker-Netzteil
- das eingeführte Multimeter
- ein Geodreieck
- eine Rolle Klebeband

Informationen zum Inhalt des in Niedersachsen eingeführten Gerätesatzes „Ultraschall“ findet man auf der Homepage des Herstellers 3B-Scientific unter https://www.3bscientific.de/experimentiersatz-schwingungen-und-wellen-1014527-u61000-230-3b-scientific,p_779_25120.html?searchword=Experimentier|Ultraschall

2) Das Material muss mindestens 90 min lang zur Verfügung stehen. Je nach länderspezifischer Regelung kann diese Zeit auch länger sein.

3) Eine schriftlich ausgearbeitete Gefährdungsbeurteilung ist bei Einsatz des hier verwendeten Materials nicht erforderlich, da es sich nicht um ein Experiment mit Elektrizität, künstlicher optischer Strahlung oder mit Gefahrstoffen handelt.

   Unabhängig davon ist es sinnvoll, dass die Amplitude der Spannung am Ultraschall-Sender so gering wie möglich eingestellt und während Experimentierpausen auf Null geregelt wird.

4) Das Experiment soll in einem gesonderten Raum stattfinden.
   Eine Fachaufsicht ist nicht erforderlich.

   Hilfen sind nicht erforderlich, weil vorausgesetzt wird, dass die Prüflinge mit dem Experimentiermaterial durch Übung im Unterricht vertraut sind.

   Für den Fall des Misslingens der Messung sind im Material Ersatzwerte angegeben.

5) Die Qualität der jeweiligen Lösung zeigt sich an der Güte der Messwerte, der Abschätzung der Messunsicherheit und der erstellten Aufbau-Zeichnung.

[1] Das Bewertungsraster ist Teil des Dokuments „Beschreibung der Struktur“, das auf den Internetseiten des IQB zum Download bereitsteht.

[2] Wenn das Experiment mit anderen Ausrüstungen ausgeführt werden soll, müssen Experimentieranleitungen vorher sorgfältig erprobt werden. In der Regel gelingen komplexe Experimente mit nicht speziell ausgewähltem Ultraschall-Material nur unter genau kontrollierten Bedingungen und mit einiger experimenteller Erfahrung bei den Prüflingen.