Gemeinsame Abituraufgabenpools der Länder

Beispielaufgaben

Aufgabe für das Fach Physik

Kurzbeschreibung

Aufgabentitel	**Wellenlängenmessung mit einem Michelson-Interferometer (ohne Experiment)**
Anforderungsniveau	erhöht
Inhaltsbereiche	♦ mechanische und elektromagnetische Schwingungen und Wellen ♦ Überlagerung von Wellen ♦ Interferometer
Materialien	♦ M 1 Michelson-Interferometer ♦ M 2 Versuchsaufbau zur Bestimmung der Wellenlänge von Ultraschall ♦ M 3 Mögliche Materialien für Strahlteiler und Reflektor ♦ M 4 Messdaten zur Ermittlung der Wellenlänge von Ultraschall ♦ M 5 Tabellenwerte über die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in Luft von Parametern ♦ M 6 Messergebnisse zum Versuch in Wasser
Quellenangaben	♦ Abb. 1: Physikalisches Institut Universität Freiburg (2020). *Michelson-Interferometer*. Verfügbar unter: https://www.experimente.physik.uni-freiburg.de/Optik/interferenzundbeugung/interferenz/michelsoninterferometer (Zugriff am: 23.11.2020) ♦ Alle weiteren Materialien und Abbildungen wurden im Auftrag des IQB erstellt.
Hilfsmittel	♦ Wissenschaftlicher Taschenrechner ♦ Formelsammlung
zusätzliche inhaltliche und methodische Voraussetzungen	♦ Verfahren zur Abschätzung relativer Messunsicherheiten
fachpraktischer Anteil	ja ☐ nein ☒ Zeitzuschlag: -
Hinweise	♦ Hinweise für die Lehrkraft

1 Aufgabe

Wellenlängenmessung mit einem Michelson-Interferometer (ohne Experiment)

Zur Messung kleiner und kleinster Längenänderungen verwendet man oft Michelson-Interferometer. In dieser Aufgabe wird ein solches Interferometer mit Ultraschall betrachtet. 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.	
	Erläutern Sie die Funktionsweise eines Michelson-Interferometers und seiner Bauteile. (Die Funktion der Linsen und die genaue Form des Interferenzmusters auf dem Schirm müssen nicht erläutert werden.)	5
	Begründen Sie, welche der drei Gleichungen a), b) oder c) für die Verschiebungsstrecke des Spiegels 2 zwischen jeweils zwei Minima der Helligkeit in der Mitte des Interferenzmusters auf dem Schirm gilt. 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; $n = 1, 2, 3, \ldots$)	5
2	Das Prinzip des Michelson-Interferometers wird in dem in M 2 gezeigten Versuchsaufbau genutzt, um die Wellenlänge von Ultraschall zu bestimmen.	
	Vergleichen Sie die Versuchsaufbauten in M 1 und M 2.	3
	Erläutern Sie, wie gut sich die in M 3 gezeigten Materialien als Reflektor bzw. als Strahlteiler eignen.	4
	Beschreiben Sie das Vorgehen zur Messung der Wellenlänge.	3
	Bei der Durchführung des Experiments wurden die in M 4 dargestellten Messdaten bestimmt.	
	Ermitteln Sie anhand dieser Daten die Wellenlänge des Ultraschalls.	4
	Schätzen Sie dabei die Messunsicherheit begründet ab.	4
	[Kontrollwert: ca. 2,9%]	
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 kurzen Abständen neu eingestellt werden, damit wieder Messungen möglich sind. Messungen mithilfe des in M 2 gezeigten Versuchsaufbaus könnten diese Nachteile vermeiden.	
	Beurteilen Sie diesen Vorschlag unter Hinzuziehung von M 5.	6

4 Das Experiment aus Aufgabe 2 wird nun in einer Wanne mit Wasser durchgeführt. In Abb. 5 (M 6) ist das Ausgangssignal des Mikrofons in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Abb. 6 (M 6) zeigt die Schallintensität am Ort des Mikrofons in Abhängigkeit von der Verschiebung *s* des Reflektors 2.

Interpretieren Sie die Messdaten, indem Sie auf die charakteristischen Größen von Schallwellen in Wasser eingehen. 6

2 Material

Material 1

Michelson-Interferometer

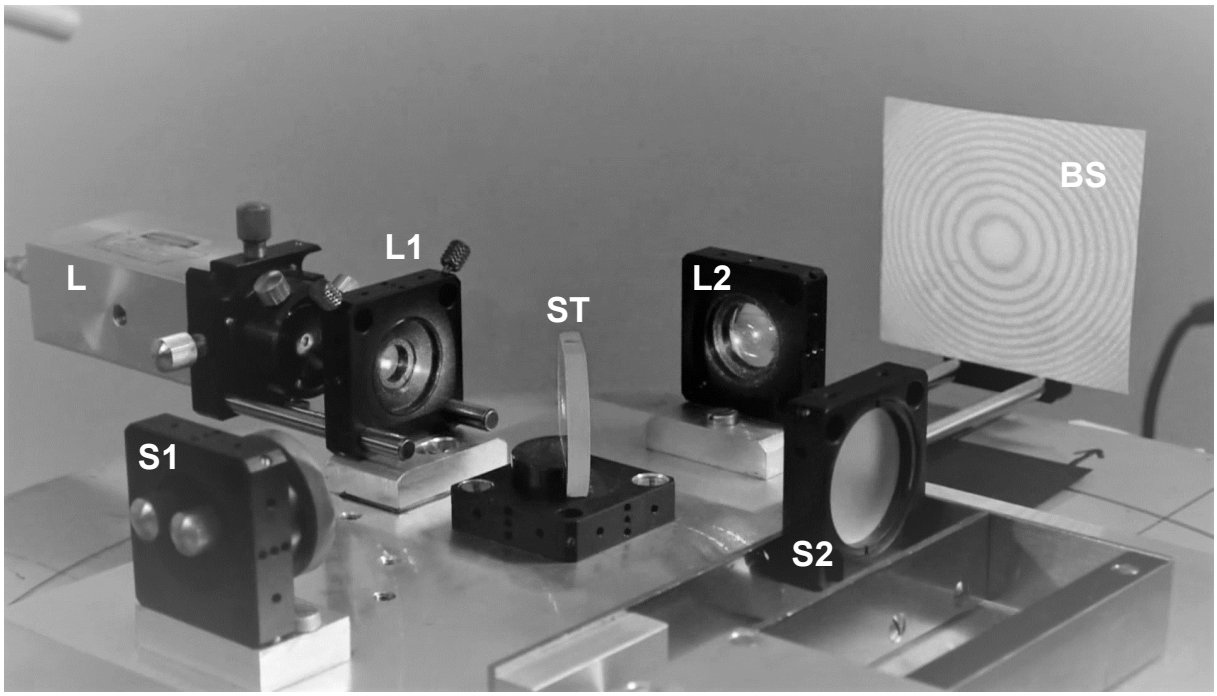
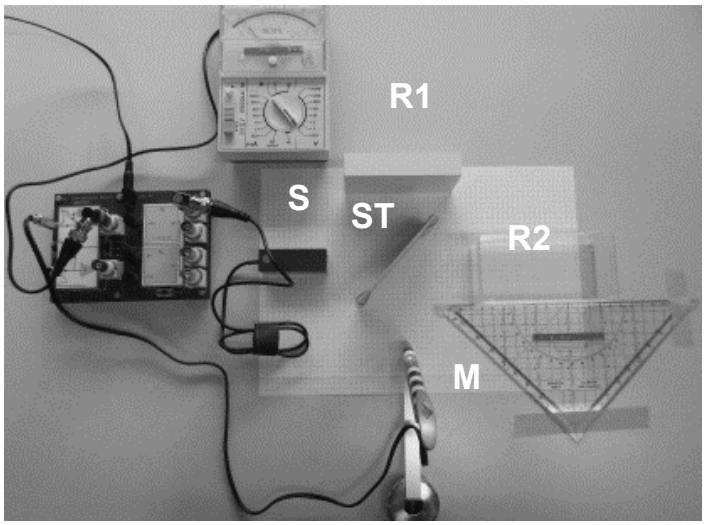


Abb. 1: Michelson-Interferometer Aufbau, Universität Freiburg, 2020.

L: Laser ST: Strahlteiler S1: Spiegel 1 (fest) S2: Spiegel 2 (verschiebbar)
BS: Beobachtungsschirm L1: Linse 1 L2: Linse 2

Material 2

Versuchsaufbau zur Bestimmung der Wellenlänge von Ultraschall



S: Ultraschallsender
(Eigenfrequenz f = (40 ± 1,0) kHz)
ST: Strahlteiler
R1: Reflektor 1 (fest)
R2: Reflektor 2 (verschiebbar)
M: Mikrofon (Ultraschall-Sonde)

Abb. 2: Versuchsaufbau zur Wellenlängenbestimmung, IQB

Material 3

Mögliche Materialien für Strahlteiler und Reflektor

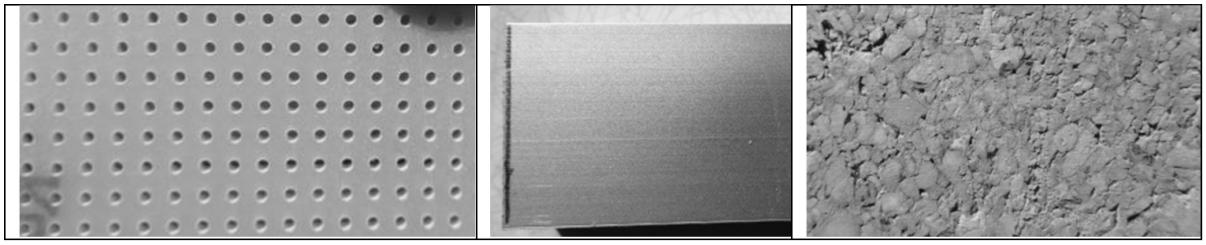


Abb. 3: Lochplatte, Aluminiumblech, Korkplatte (von links nach rechts), IQB

Material 4

Messdaten zur Ermittlung der Wellenlänge von Ultraschall

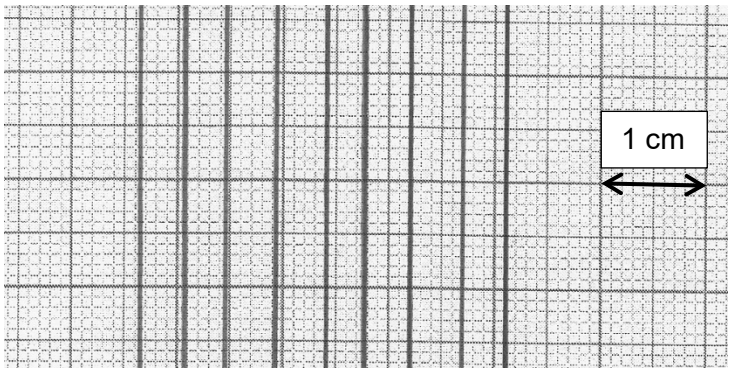


Abb. 4: Messdaten Ultraschall, IQB

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

Material 5

Tabellenwerte über die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in Luft von Parametern

Tab. 1: relative Luftfeuchtigkeit und Schallgeschwindigkeit

relative Luftfeuchtig-keit 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

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

Material 6

Messergebnisse zum Versuch in Wasser

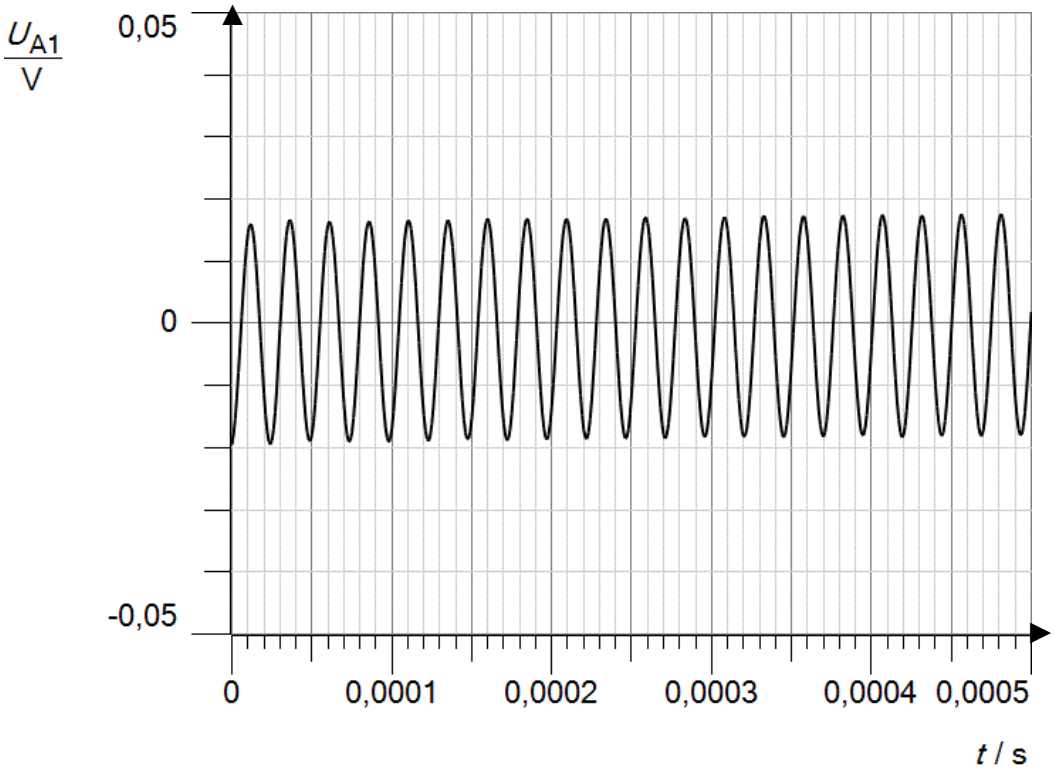


Abb. 5: Ausgangssignal in Abhängigkeit von der Zeit, Versuch in Wasser, IQB

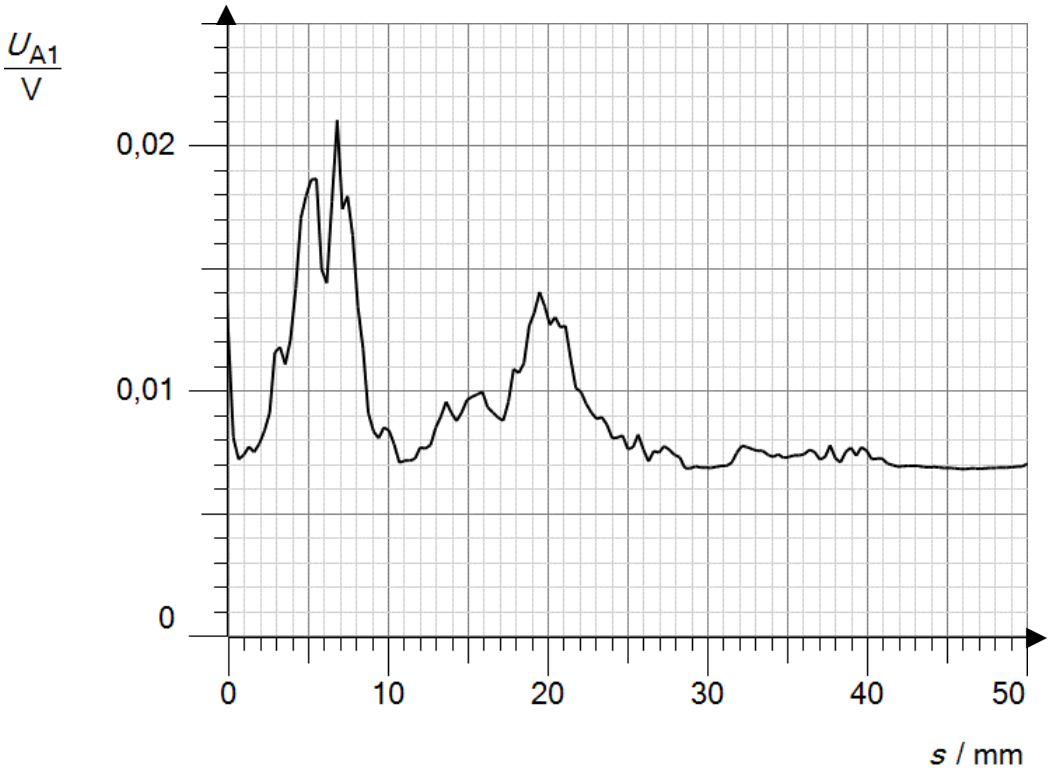


Abb. 6: Schallintensität am Ort des Mikrofons in Abhängigkeit von der Verschiebung s des Reflektors 2, Versuch in Wasser, IQB

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 die Funktionsweise eines Michelson-Interferometers und seiner Bauteile. (Die Funktion der Linsen und die genaue Form des Interferenzmusters auf dem Schirm müssen nicht erläutert werden.)* Die Lernenden … S 5 erklären bekannte Messverfahren sowie die Funktion einzelner Komponenten eines Versuchsaufbaus. Das Licht des Lasers fällt auf einen Strahlteiler, der es in zwei Teilbündel aufspaltet. Das Licht beider Bündel läuft zu jeweils einem Spiegel und wird von dort zum Strahlteiler reflektiert. Schließlich werden beide Bündel auf den Beobachtungsschirm gelenkt. Je nach Gangunterschied zwischen beiden Bündeln, der durch Verschiebung von Spiegel 2 verändert werden kann, interferiert das Licht in der Mitte der Teilbündel auf dem Schirm konstruktiv oder destruktiv.	5		
	Begründen Sie, welche der drei Gleichungen a), b) oder c) für die Verschiebungsstrecke des Spiegels 2 zwischen jeweils zwei Minima der Helligkeit in der Mitte des Interferenzmusters auf dem Schirm 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	*Vergleichen Sie die Versuchsaufbauten in M 1 und M 2.* Die Lernenden … S 5 erklären bekannte Messverfahren sowie die Funktion einzelner Komponenten eines Versuchsaufbaus. Die beiden Versuchsaufbauten haben dieselbe Struktur. Daher entsprechen einzelne Bauteile einander: Das Mikrofon entspricht einem Punkt auf dem Beobachtungsschirm beim Michelson-Interferometer, der Ultraschallsender entspricht dem Laser und die Reflektoren entsprechen den Spiegeln. In beiden Aufbauten gibt es einen Strahlteiler. Die Linsen in M 1 haben keine Entsprechung in M 2.		3	
	Erläutern Sie, wie gut sich die in M 3 gezeigten Materialien als Reflektor bzw. als Strahlteiler eignen. Die Lernenden … S 5 erklären bekannte Messverfahren sowie die Funktion einzelner Komponenten eines Versuchsaufbaus. Die Lochplatte eignet sich besonders gut als Strahlteiler, da Schall die Lochplatte zum einen durch die Löcher durchdringen kann, zum anderen aber auch am Material zwischen den Löchern reflektiert wird. Das Aluminiumblech eignet sich wegen seiner glatten Oberfläche besonders gut als Reflektor. Die Korkplatte eignet sich weder als Strahlteiler, da sie nicht durchlässig genug ist für Schall noch als Reflektor, da ihre Oberfläche zu porös ist.		4	
	Beschreiben Sie das Vorgehen zur Messung der Wellenlänge. Die Lernenden … S 5 erklären bekannte Messverfahren sowie die Funktion einzelner Komponenten eines Versuchsaufbaus. Zur Messung der Wellenlänge wird der Reflektor 2 verschoben und jeweils sein Ort markiert, wenn das Mikrofon z. B. Minima der Schallintensität misst. Die Wellenlänge ergibt sich durch Verdopplung der Strecke zwischen zwei Minima. Durch Messung des Abstands mehrerer Minima lässt sich die Genauigkeit der Messung der Wellenlänge erhöhen.		3	
	Ermitteln Sie anhand dieser Daten die Wellenlänge des Ultraschalls. Die Lernenden … S 6 erklären bekannte Auswerteverfahren und wenden sie auf Messergebnisse an. Für den Abstand von z. B. acht Minima kann man ca. 3,45 cm ablesen. Damit ergibt sich die Wellenlänge zu $\lambda = \frac{2 \cdot \Delta x}{n} = \frac{2 \cdot 3{,}45\,\text{cm}}{8} = 0{,}86\,\text{cm}$.		4	

	Schätzen Sie dabei die Messunsicherheit begründet ab. Die Lernenden … E 7 berücksichtigen Messunsicherheiten und analysieren die Konsequenzen für die Interpretation des Ergebnisses. *Abschätzen* der relativen Messunsicherheit zu etwa 3 % auf die im Unterricht vereinbarte Weise, z. B.: Aus der Breite der Linien ergibt sich eine geschätzte Unsicherheit von $u_s \approx 1$ mm, sodass die relative Messunsicherheit $\frac{1\,\text{mm}}{34{,}5\,\text{mm}} \approx 2{,}9\ \%$ beträgt.		4	
3	*Beurteilen Sie diesen Vorschlag unter Hinzuziehung von M 5.* 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 cm · 40 kHz = 344 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
4	*Interpretieren Sie die Messdaten, indem Sie auf die charakteristischen Größen von Schallwellen in Wasser eingehen.* Die Lernenden … E 6 erklären mithilfe bekannter Modelle und Theorien die in erhobenen oder recherchierten Daten gefundenen Strukturen und Beziehungen. Aus Abb. 5 kann man z. B. durch eine Ablesung von 7 Perioden eine Periodendauer von T = 2,6 ms bestimmen, was einer Frequenz von ca. 38,3 kHz entspricht. Daraus kann man schließen, dass die Frequenz von Ultraschall in Wasser (bis auf 4%) gleichbleibt. Mithilfe von Abb. 6 kann man aus dem Abstand der einzigen beiden deutlichen Maxima des Ausgangssignals eine Wellenlänge von ca. 2,70 cm bestimmen. Daraus kann man schließen, dass sowohl die Wellenlänge als auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Ultraschall in Wasser um etwa den Faktor 3 größer sind als die entsprechenden Größen in Luft.		6	

	Summe	**10**	**24**	**6**
	Anteile der Bewertungseinheiten in Prozent	**25**	**60**	**15**

4 Standardbezug

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

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 für die Lehrkraft

Die vorliegende Aufgabe illustriert, wie die Aufgabe *Interferometer mit Experiment* als Prüfungsaufgabe ohne Experiment gestaltet werden kann. Gegenstand der Aufgabe ist das Michelson-Interferometer, eine mögliche Bauform der in den *Bildungsstandards für das Fach Physik* für das erhöhte Niveau allgemein aufgeführten Interferometer. Schwerpunkte beider Varianten der Aufgabe bilden das Erklären bekannter Messverfahren (Standard S 5), das physikalische Modellieren von Phänomenen sowie das Berücksichtigen von Messunsicherheiten (Standards E 4 und E 7).

In der einleitenden Teilaufgabe soll der Aufbau bzw. die Funktion des (als Foto bzw. Prinzipskizze dargestellten) Michelson-Interferometers mit jeweils leicht unterschiedlicher Akzentuierung erläutert und die korrekte mathematische Modellierung der Messergebnisse begründet werden. Da diese Teilaufgabe auf das Wiedergeben von Sachverhalten im gelernten Zusammenhang zielt, ist sie dem Anforderungsbereich I zuzuordnen.

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

Während in der Aufgabe mit Experiment das Experiment zur Bestimmung der Wellenlänge des Ultraschalls eigenständig geplant und durchgeführt wird (Standard S 4), ist der Versuchsaufbau in der Version ohne Experiment vorgegeben. Dort soll der gegebene Aufbau mit dem Aufbau des Interferometers mit Licht verglichen und anschließend das Vorgehen zur Messung der Wellenlänge beschrieben werden. Vertiefend soll die Eignung bestimmter Materialien für den Versuchsaufbau erläutert werden. Anhand gegebener Messdaten können die Auswertung und die Abschätzung der Messunsicherheit wie in der Aufgabe mit Experiment erfolgen.

Die Teilaufgabe 3 ist in beiden Versionen identisch. Hier sollen die Prüflinge die Unsicherheiten bei der Messung der Schallgeschwindigkeit berücksichtigen, die Konsequenzen für die Interpretation des Ergebnisses der Luftfeuchtigkeit berücksichtigen und ihre Überlegungen auf die Regelung einer Klimaanlage beziehen (Standards E 7 und E 10).

Die Teilaufgabe 4 findet sich nur in der Aufgabe ohne Experiment. Sie gleicht den geringeren Zeitaufwand zur Bearbeitung der Teilaufgabe 2 aus und ist daher wie diese dem Anforderungsbereich II zugeordnet. In ihr geht es um die Interpretation des Einflusses der Schallgeschwindigkeit auf die Messergebnisse, die auf zwei Arten grafisch dargestellt sind.