

**Profilfach Physik**

Thema: Wellen - Reduzierung von Schall durch Schall

---

**Aufgabe 1: Reduzierung von Schall durch Schall**

Die Geschwister Tim und Erik haben geräuschunterdrückende (Active-Noise-Cancelling) Kopfhörer geschenkt bekommen. Sie vermuten, dass die Geräuschunterdrückung der Kopfhörer auf eine Auslöschung bestimmter Schallwellen durch Interferenz zurückzuführen ist. Ihrer Vermutung wollen sie nachgehen und stellen den Aufbau der Kopfhörer in einem großen Wohnzimmer nach.

a) Der Aufbau von Tim und Erik ist in Material 1 in Abbildung 1 zu sehen. Sie stellen zwei Lautsprecher gegenüber einem Sofa auf. In Material 1 in Abbildung 2 sind die Schallwellen beider Lautsprecher dargestellt.

a1) Beschreiben Sie die akustische Wahrnehmung von Tim, wenn er sich von links nach rechts entlang der Sofa-Linie bewegt. Mit einem Ohr ist er den Lautsprechern zugewandt, das andere Ohr hält er zu. (2 BE)

a2) Berechnen Sie mit den Informationen aus Material 1 die Wellenlänge  $\lambda$  des Tones und markieren Sie in Abbildung 2 eine Strecke, welche die Wellenlänge repräsentiert.

[Kontrollwert:  $\lambda \approx 3,5 \text{ m}$ ] (4 BE)

b) In Material 1 in Abbildung 2 zeigt Punkt P einen Ort minimaler Lautstärke.

b1) Erklären Sie unter Bezugnahme auf Material 1, Abbildung 2, das Zustandekommen von Orten minimaler Lautstärke.

Zeichnen Sie in Abbildung 2 eine Linie mit Orten minimaler Lautstärke durch P. (4 BE)

b2) Beschreiben Sie die Änderungen im Interferenzbild in Material 1, Abbildung 2, wenn die beiden Lautsprecher die Schallwellen gegenphasig aussenden würden, sich also die Lautsprechermembranen zu jedem Zeitpunkt genau gegenläufig bewegen würden. (3 BE)

**Profilfach Physik**

Thema: Wellen - Reduzierung von Schall durch Schall

---

Die Lautsprecher schwingen für die folgenden Aufgaben gleichphasig mit gleicher Frequenz und gleicher Amplitude.

- c) Tim findet in seinem Physikbuch die folgende Gleichung zur Bestimmung der Lage der Minima bei Interferenz von Licht am Doppelspalt:

$$a_k = (2k - 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{e}{g}. \quad (1)$$

Hierbei bezeichnen (siehe Material 2, Abbildung 3)

- $a_k$  den Abstand des Minimums  $k$ -ter Ordnung von der Lage des Hauptmaximums,
- $k = 1, 2, 3, \dots$ ,
- $\lambda$  die Wellenlänge,
- $e$  den Abstand zwischen dem Doppelspalt und dem Schirm und
- $g$  den Spaltabstand.

- c1) Leiten Sie Gleichung (1) auf Basis der beiden Skizzen in Abbildung 3 in Material 2 her.

Nennen Sie die Voraussetzungen, die bei der Herleitung genutzt werden. (7 BE)

- c2) Berechnen Sie auf Basis von Gleichung (1), wo sich Erik entlang der Sofa-Linie in Material 1, Abbildung 1, positionieren muss, damit er das Lautstärkeminimum 1. Ordnung des Tones ( $f = 98 \text{ Hz}$ ) wahrnehmen kann.

In Wirklichkeit liegt das Lautstärkeminimum bei  $a_1 = 1,7 \text{ m}$ . Begründen Sie, warum die Gleichung (1) in der Situation von Tim und Erik nicht zum korrekten Ergebnis von  $a_1$  führt. (6 BE)

- d) In dem Punkt M in Material 1 in Abbildung 1 befindet sich ein Mikrofon.

- d1) Die Tonhöhe der beiden Lautsprecher wird nun variiert. Berechnen Sie die Tonhöhen (Frequenzen  $f_k$ ), bei denen das Mikrofon Lautstärkeminima registriert.

(6 BE)

- d2) Entfernt man sich von einer Schallquelle, nimmt die Lautstärke des Tones mit zunehmender Entfernung ab.

Begründen Sie, dass eine nahezu vollständige Auslöschung eines Tones nur dann stattfinden kann, wenn der Abstand eines Mikrofons zu den Lautsprechern im Vergleich zum Abstand der Lautsprecher untereinander sehr groß ist. (4 BE)

- e) Material 3 enthält Informationen zum Active-Noise-Cancelling.

Beurteilen Sie die Eignung der Modellierung von Tim und Erik in Material 1, Abbildung 1, zur Nachbildung der Funktionsweise der Active-Noise-Cancelling-Kopfhörer. (4 BE)

**Profilfach Physik**

Thema: Wellen - Reduzierung von Schall durch Schall

**Material 1: Experimenteller Aufbau**

Zwei als punktförmig angenommene Lautsprecher  $L_1$  und  $L_2$  sind gegenüber von einem Sofa in einem großen Wohnzimmer aufgestellt. Das Sofa ist mittig zwischen den Lautsprechern positioniert und ist 2,0 m lang. Es werden die Interferenzphänomene betrachtet, die in einer Ebene stattfinden, in der auch die Lautsprecher liegen. Diese Ebene ist hier die Zeichenebene. Die Lautsprecher haben einen Abstand von 4,0 m zueinander. Sie erzeugen jeweils einen (sinusförmigen) Ton mit der konstanten Frequenz  $f = 98 \text{ Hz}$  und haben die gleiche Lautstärke.

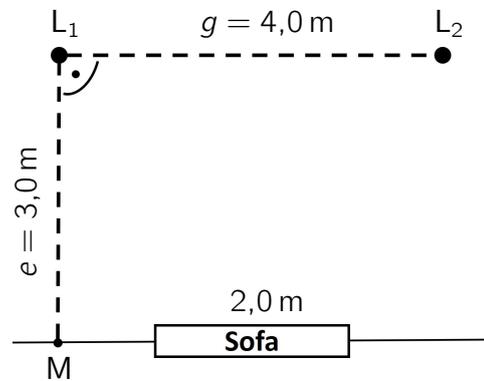


Abbildung 1: Aufbau mit Lautsprechern und Sofa (von oben)

In der Abbildung 2 ist ein Teil der sich in der Zeichenebene ausbreitenden Schallwellen zu einem festen Zeitpunkt dargestellt. Die durchgezogenen Kreise stellen „Wellenberge“ der Schallwellen dar, die gestrichelten Kreise stellen „Wellentäler“ dar. Die Zeichnung ist nicht maßstabsgetreu.

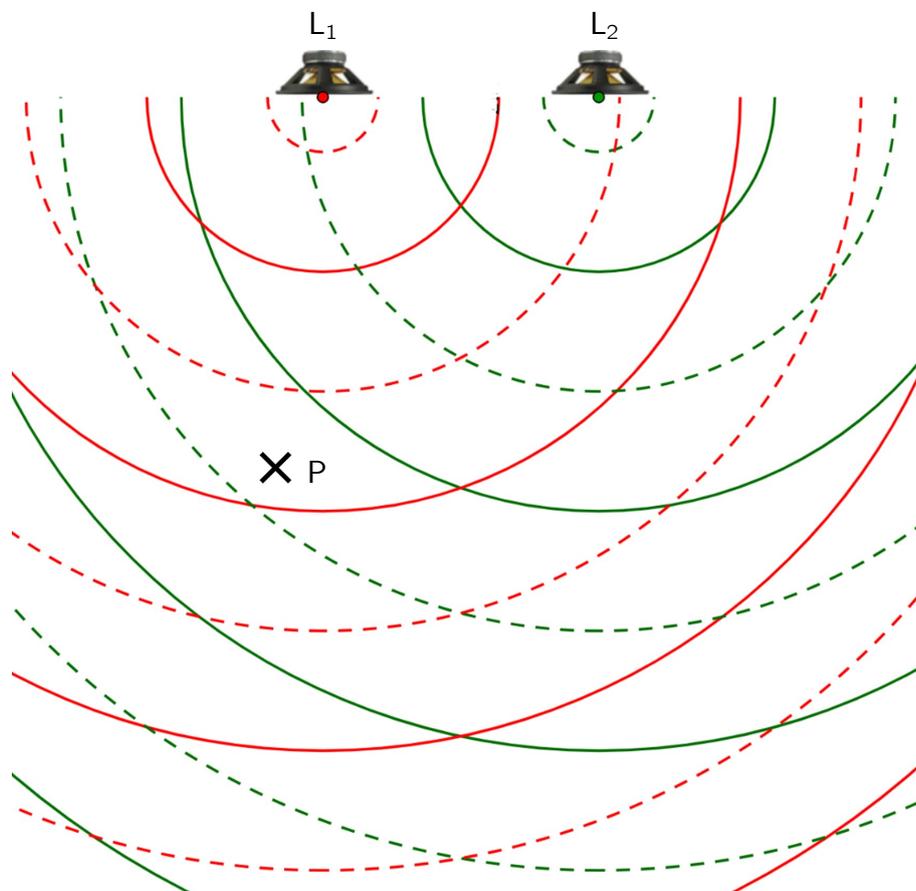


Abbildung 2: Schallwellen der beiden Lautsprecher

**Profilfach Physik**

Thema: Wellen - Reduzierung von Schall durch Schall

---

**Material 2: Interferenz von Licht am Doppelspalt**

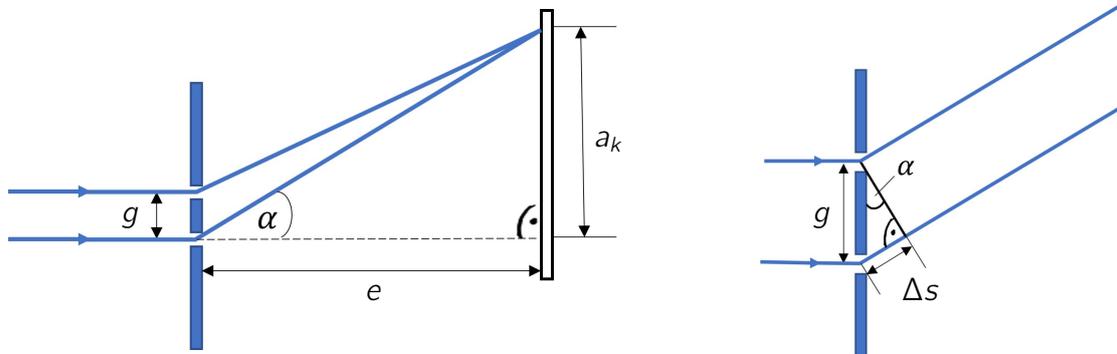


Abbildung 3: Versuchsskizzen zum Doppelspalt (nicht maßstabsgetreu)

**Material 3: Active-Noise-Cancelling**

Die aktive Geräuschunterdrückung (Active-Noise-Cancelling, kurz ANC) basiert auf dem Prinzip der destruktiven Interferenz von Schallwellen. Durch Mikrofone werden die Schallwellen eines Geräusches aufgenommen, invertiert und als Gegenschall wieder ausgesandt. Das Gegenschallsignal besitzt die gleiche Amplitude und Frequenz, ist jedoch um  $180^\circ$  phasenverschoben. Die Schallwellen des ursprünglichen Geräusches überlagern sich mit dem Gegenschall so, dass die resultierende Lautstärke (Amplitude) möglichst minimiert wird.

**Profilfach Physik**

Thema: Wellen - Reduzierung von Schall durch Schall

---

**Aufgabe 1: Reduzierung von Schall durch Schall**

Die Geschwister Tim und Erik haben geräuschunterdrückende (Active-Noise-Cancelling) Kopfhörer geschenkt bekommen. Sie vermuten, dass die Geräuschunterdrückung der Kopfhörer auf eine Auslöschung bestimmter Schallwellen durch Interferenz zurückzuführen ist. Ihrer Vermutung wollen sie nachgehen und stellen den Aufbau der Kopfhörer in einem großen Wohnzimmer nach.

a) Der Aufbau von Tim und Erik ist in Material 1 in Abbildung 1 zu sehen. Sie stellen zwei Lautsprecher gegenüber einem Sofa auf. In Material 1 in Abbildung 2 sind die Schallwellen beider Lautsprecher dargestellt.

a1) Beschreiben Sie die akustische Wahrnehmung von Tim, wenn er sich von links nach rechts entlang der Sofa-Linie bewegt. Mit einem Ohr ist er den Lautsprechern zugewandt, das andere Ohr hält er zu. (2 BE)

a2) Berechnen Sie mit den Informationen aus Material 1 die Wellenlänge  $\lambda$  des Tones und markieren Sie in Abbildung 2 eine Strecke, welche die Wellenlänge repräsentiert.

[Kontrollwert:  $\lambda \approx 3,5 \text{ m}$ ] (4 BE)

b) In Material 1 in Abbildung 2 zeigt Punkt P einen Ort minimaler Lautstärke.

b1) Erklären Sie unter Bezugnahme auf Material 1, Abbildung 2, das Zustandekommen von Orten minimaler Lautstärke.

Zeichnen Sie in Abbildung 2 eine Linie mit Orten minimaler Lautstärke durch P. (4 BE)

b2) Beschreiben Sie die Änderungen im Interferenzbild in Material 1, Abbildung 2, wenn die beiden Lautsprecher die Schallwellen gegenphasig aussenden würden, sich also die Lautsprechermembranen zu jedem Zeitpunkt genau gegenläufig bewegen würden. (3 BE)

**Profilfach Physik**

Thema: Wellen - Reduzierung von Schall durch Schall

---

Die Lautsprecher schwingen für die folgenden Aufgaben gleichphasig mit gleicher Frequenz und gleicher Amplitude.

- c) Tim findet in seinem Physikbuch die folgende Gleichung zur Bestimmung der Lage der Minima bei Interferenz von Licht am Doppelspalt:

$$a_k = (2k - 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{e}{g}. \quad (1)$$

Hierbei bezeichnen (siehe Material 2, Abbildung 3)

- $a_k$  den Abstand des Minimums  $k$ -ter Ordnung von der Lage des Hauptmaximums,
- $k = 1, 2, 3, \dots$ ,
- $\lambda$  die Wellenlänge,
- $e$  den Abstand zwischen dem Doppelspalt und dem Schirm und
- $g$  den Spaltabstand.

- c1) Leiten Sie Gleichung (1) auf Basis der beiden Skizzen in Abbildung 3 in Material 2 her.

Nennen Sie die Voraussetzungen, die bei der Herleitung genutzt werden. (7 BE)

- c2) Berechnen Sie auf Basis von Gleichung (1), wo sich Erik entlang der Sofa-Linie in Material 1, Abbildung 1, positionieren muss, damit er das Lautstärkeminimum 1. Ordnung des Tones ( $f = 98 \text{ Hz}$ ) wahrnehmen kann.

In Wirklichkeit liegt das Lautstärkeminimum bei  $a_1 = 1,7 \text{ m}$ . Begründen Sie, warum die Gleichung (1) in der Situation von Tim und Erik nicht zum korrekten Ergebnis von  $a_1$  führt. (6 BE)

- d) In dem Punkt M in Material 1 in Abbildung 1 befindet sich ein Mikrofon.

- d1) Die Tonhöhe der beiden Lautsprecher wird nun variiert. Berechnen Sie die Tonhöhen (Frequenzen  $f_k$ ), bei denen das Mikrofon Lautstärkeminima registriert.

(6 BE)

- d2) Entfernt man sich von einer Schallquelle, nimmt die Lautstärke des Tones mit zunehmender Entfernung ab.

Begründen Sie, dass eine nahezu vollständige Auslöschung eines Tones nur dann stattfinden kann, wenn der Abstand eines Mikrofons zu den Lautsprechern im Vergleich zum Abstand der Lautsprecher untereinander sehr groß ist. (4 BE)

- e) Material 3 enthält Informationen zum Active-Noise-Cancelling.

Beurteilen Sie die Eignung der Modellierung von Tim und Erik in Material 1, Abbildung 1, zur Nachbildung der Funktionsweise der Active-Noise-Cancelling-Kopfhörer. (4 BE)

**Profilfach Physik**

Thema: Wellen - Reduzierung von Schall durch Schall

**Material 1: Experimenteller Aufbau**

Zwei als punktförmig angenommene Lautsprecher  $L_1$  und  $L_2$  sind gegenüber von einem Sofa in einem großen Wohnzimmer aufgestellt. Das Sofa ist mittig zwischen den Lautsprechern positioniert und ist 2,0 m lang. Es werden die Interferenzphänomene betrachtet, die in einer Ebene stattfinden, in der auch die Lautsprecher liegen. Diese Ebene ist hier die Zeichenebene. Die Lautsprecher haben einen Abstand von 4,0 m zueinander. Sie erzeugen jeweils einen (sinusförmigen) Ton mit der konstanten Frequenz  $f = 98 \text{ Hz}$  und haben die gleiche Lautstärke.

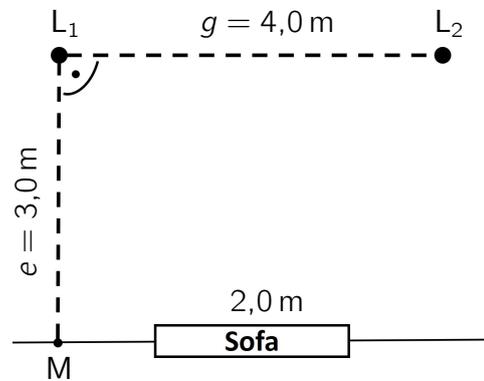


Abbildung 1: Aufbau mit Lautsprechern und Sofa (von oben)

In der Abbildung 2 ist ein Teil der sich in der Zeichenebene ausbreitenden Schallwellen zu einem festen Zeitpunkt dargestellt. Die durchgezogenen Kreise stellen „Wellenberge“ der Schallwellen dar, die gestrichelten Kreise stellen „Wellentäler“ dar. Die Zeichnung ist nicht maßstabsgetreu.

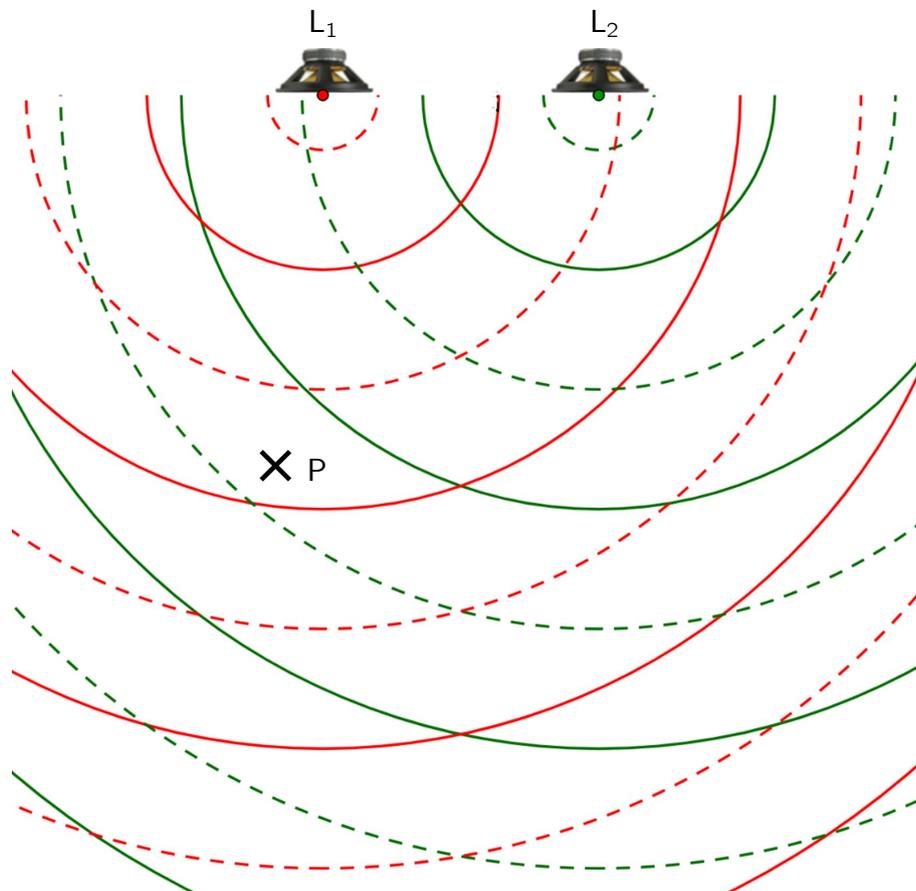


Abbildung 2: Schallwellen der beiden Lautsprecher

**Profilfach Physik**

Thema: Wellen - Reduzierung von Schall durch Schall

---

**Material 2: Interferenz von Licht am Doppelspalt**

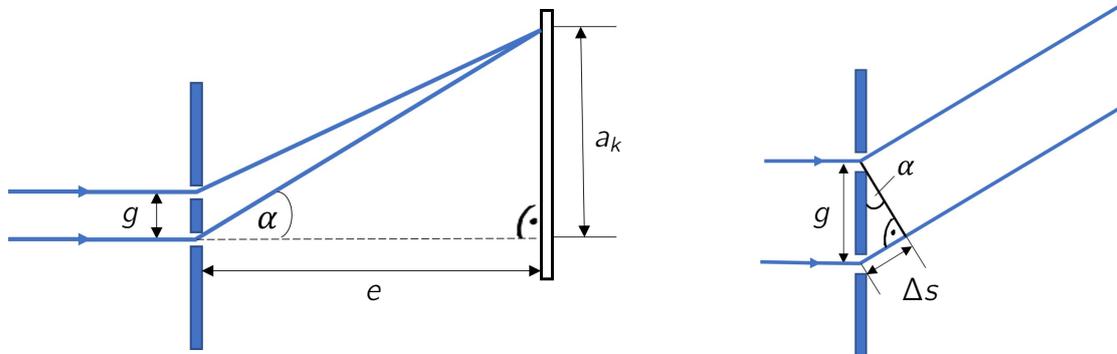


Abbildung 3: Versuchsskizzen zum Doppelspalt (nicht maßstabsgetreu)

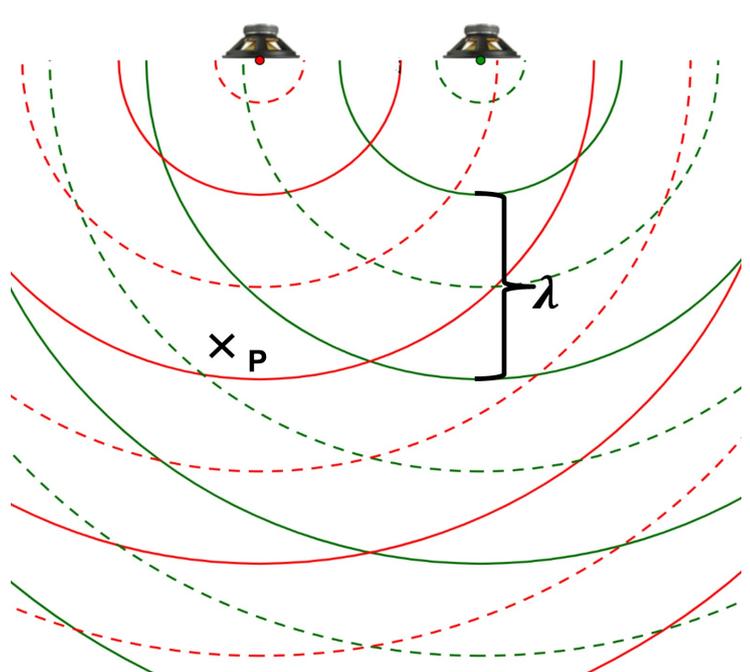
**Material 3: Active-Noise-Cancelling**

Die aktive Geräuschunterdrückung (Active-Noise-Cancelling, kurz ANC) basiert auf dem Prinzip der destruktiven Interferenz von Schallwellen. Durch Mikrofone werden die Schallwellen eines Geräusches aufgenommen, invertiert und als Gegenschall wieder ausgesandt. Das Gegenschallsignal besitzt die gleiche Amplitude und Frequenz, ist jedoch um  $180^\circ$  phasenverschoben. Die Schallwellen des ursprünglichen Geräusches überlagern sich mit dem Gegenschall so, dass die resultierende Lautstärke (Amplitude) möglichst minimiert wird.

**Profilfach Physik**

Thema: Wellen - Reduzierung von Schall durch Schall

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

Erwartete Schülerleistung	Bewertung Zuordnung		
	I	II	III
<p><b>a1)</b> Tim nimmt abwechselnd ein Lautstärkemaximum und ein Lautstärkeminimum wahr. Der Ton wird abwechselnd lauter und leiser.</p>	2		
<p><b>a2)</b></p> $\lambda = \frac{c}{f} \approx \frac{343 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{98 \text{ Hz}} = 3,5 \text{ m}$ <p>[Hinweis: Einzeichnung der Wellenlänge]</p> 	2		
	2		

**Profilfach Physik**

Thema: Wellen - Reduzierung von Schall durch Schall

Erwartete Schülerleistung	Bewertung Zuordnung		
	I	II	III
<p><b>b1)</b> Es kommt zu destruktiver Interferenz, weil beispielsweise Wellenberg auf Wellental trifft. Es kommt zu einer Auslöschung der Schallwellen und damit zur minimalen Lautstärke. <i>[Hinweis: Eine häufig auftretende, aber nicht zutreffende Vorstellung ist, dass destruktive Interferenz nur an den Maximalpunkten auftritt, wenn Wellenberg auf Wellental trifft. Bei der Korrektur kann nur dann die volle Punktzahl gegeben werden, wenn diese unzutreffende Vorstellung nicht vorliegt.]</i></p> <p><i>[Hinweis: Einzeichnung der Linie (Hyperbel)]</i></p>	2		
<p><b>b2)</b> Für den linken Lautsprecher bleibt die Darstellung wie in Abbildung 2. Für den rechten Lautsprecher werden aus den gestrichelten Linien durchgezogene Linien und aus den durchgezogenen Linien gestrichelte Linien. Aus den Orten konstruktiver Interferenz werden folglich Orte destruktiver Interferenz. Aus den Orten destruktiver Interferenz (z.B. entlang der Linie zu P) werden Orte konstruktiver Interferenz.</p>		2	
			3

**Profilfach Physik**

Thema: Wellen - Reduzierung von Schall durch Schall

Erwartete Schülerleistung	Bewertung Zuordnung		
	I	II	III
<p><b>c1)</b> Aus der linken Skizze folgt am rechtwinkligen Dreieck</p> $\tan \alpha = \frac{a_k}{e}.$ <p>Aus der rechten Skizze folgt am rechtwinkligen Dreieck</p> $\sin \alpha = \frac{\Delta s}{g}.$ <p>Mit der Kleinwinkelnäherung folgt</p> $\frac{a_k}{e} = \frac{\Delta s}{g}.$ <p>Es gilt <math>\Delta s = (2k - 1) \cdot \frac{\lambda}{2}</math> für destruktive Interferenz des Lichtes. Umformen nach <math>a_k</math> ergibt die Formel zur Bestimmung der Lage der Minima.</p> <p>Für die angegebene Formel wurden zwei Annahmen gemacht:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Paralleler Verlauf der Strahlen beim Doppelspalt unter der Voraussetzung, dass <math>e</math> (Abstand zwischen dem Doppelspalt und dem Schirm) sehr viel größer ist als <math>g</math> (Spaltabstand).</li> <li>▪ Die Kleinwinkelnäherung unter der Voraussetzung, dass <math>a_k</math> (Abstand des Minimums <math>k</math>-ter Ordnung von der Lage des Hauptmaximums) wesentlich kleiner ist als <math>e</math> (Abstand zwischen dem Doppelspalt und dem Schirm).</li> </ul>		4	
<p><b>c2)</b> Beim Lautstärkeminimum 1. Ordnung ist <math>k = 1</math> und somit</p> $a_k = \frac{(2k - 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot e}{g} = \frac{1 \cdot \frac{3,5\text{m}}{2} \cdot 3\text{m}}{4\text{m}} \approx 1,31\text{m}.$ <p>Das Hauptmaximum liegt in der Mitte des Sofas. Links und rechts des Hauptmaximums ist jeweils 1 Meter Sofa vorhanden. Erik müsste sich 0,31 m links oder rechts vom Ende des Sofas positionieren. Er säße nicht mehr auf dem Sofa.</p>	2		1

**Profilfach Physik**

Thema: Wellen - Reduzierung von Schall durch Schall

Erwartete Schülerleistung	Bewertung Zuordnung		
	I	II	III
<p><b>c2, fortgesetzt)</b>  Die Voraussetzungen der Gleichung (1) sind in der Situation von Erik und Tim nicht gegeben, weil die Abmessungen andere sind als bei Licht. Der Abstand der Lautsprecher ist nicht viel kleiner als der Abstand zwischen den Lautsprechern und der Sofa-Linie. Damit kann der parallele Verlauf wie bei Licht in Abbildung 3 nicht vorausgesetzt werden. Der Winkel <math>\alpha</math> ist bei den Lautsprechern nicht klein, da der Abstand des Minimums <math>k</math>-ter Ordnung von der Lage des Hauptmaximums nicht viel kleiner ist als der Abstand zwischen den Lautsprechern und der Sofa-Linie. Die Kleinwinkelnäherung kann nicht angewendet werden.</p>			3
<p><b>d1)</b>  Für destruktive Interferenz gilt für den Gangunterschied:</p> $\Delta s = (2k - 1) \cdot \frac{\lambda_k}{2}.$ <p>Der Gangunterschied ergibt sich aus Abbildung 1 und dem Satz des Pythagoras zu:</p> $\Delta s = \sqrt{(3,0\text{ m})^2 + (4,0\text{ m})^2} - 3,0\text{ m} = 2,0\text{ m}.$ <p>Somit ist <math>\lambda_k = \frac{4,0\text{ m}}{2k-1}</math>.  Für die Frequenzen folgt:</p> $f_k = \frac{c}{\lambda_k} = \frac{c}{\left(\frac{4,0\text{ m}}{2k-1}\right)} \approx (2k - 1) \cdot 85,8\text{ Hz}.$ <p>Das Mikrofon registriert für ungeradzahlige Vielfache von 85,8 Hz destruktive Interferenz.</p>	1	3	2
<p><b>d2)</b>  Für eine völlige Auslöschung müssen die in einem Punkt destruktiv interferierenden Wellen die gleiche Amplitude haben. Mit der Entfernung vom Lautsprecher nimmt die Amplitude der Welle ab. Ist der Abstand des Mikrofons von den Lautsprechern sehr groß gegenüber dem Abstand der Lautsprecher untereinander, sind die Amplituden der beiden Wellen als gleich groß anzunehmen, da der kleine Wegunterschied keinen großen Einfluss mehr hat.</p>		2	2

**Profilfach Physik**

Thema: Wellen - Reduzierung von Schall durch Schall

Erwartete Schülerleistung	Bewertung Zuordnung		
	I	II	III
<p>e) Die Modellierung ist eher nicht geeignet:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Die Lautsprecher in Abbildung 1 senden nur eine Frequenz aus. Bei Active-Noise-Cancelling-Kopfhörern wird hingegen in der Regel Unterhaltungsmusik abgespielt, die unterschiedlichste Frequenzen enthält. Für jede Frequenz ist der Ort konstruktiver bzw. destruktiver Interferenz an einer anderen Stelle. Die Auslöschung einzelner Frequenzen fällt bei Unterhaltungsmusik kaum auf. Würden die Geschwister Unterhaltungsmusik abspielen, wäre der Effekt von Lautstärkeminima und -maxima nicht zu beobachten.</li> <li>▪ Lautstärkeminima und -maxima liegen in Abhängigkeit von der Frequenz ggf. nahe beieinander, so dass eine Reduzierung der Lautstärke für eine bestimmte Frequenz nur für einen kleinen Bereich herstellbar ist. Für den Aufbau in Abbildung 1 bedeutet das, dass in einem größeren Bereich wie der ganzen Breite des Kopfes sowohl ein Lautstärkeminimum als auch ein Lautstärkemaximum auftreten könnten. Beim Active-Noise-Cancelling wird hingegen nur ein kleiner Bereich destruktiver Interferenz benötigt.</li> <li>▪ Beim Aufbau in Abbildung 1 treten nicht nur Lautstärkeminima auf, sondern auch Lautstärkemaxima. Beim Active-Noise-Cancelling soll hingegen ausschließlich destruktive Interferenz und damit ein Lautstärkeminimum auftreten.</li> <li>▪ Beim Aufbau in Abbildung 1 kann es zu Reflexionen des Schalls an den Zimmerwänden kommen.</li> </ul> <p><i>[Hinweis: Erwartet werden mindestens zwei Aspekte. Auch eine positive Antwort kann akzeptiert werden und zur Vergabe der vollen Anzahl von Bewertungseinheiten führen, sofern sie korrekt begründet wird.]</i></p>			
<b>Summe der Bewertungseinheiten</b>	<b>12</b>	<b>20</b>	<b>8</b>

**Profilfach Physik**

Thema: Wellen - Reduzierung von Schall durch Schall

---

**Standardbezug:**

Teilaufgabe	Kompetenzbereich			
	S	E	K	B
a1	1			
a2	7	6		
b1	1	6		
b2	1			
c1	7			
c2		8		
d1	7			
d2	1			
e		3	3	3

**Profilfach Physik**  
Thema: Felder - Füllstandsmessung

---

**Aufgabe 2: Füllstandsmessung**

Zur Messung der Füllhöhe von Tanks und Behältern können unterschiedliche Messprinzipien zum Einsatz kommen. In einem Modellversuch wird die kapazitative Füllstandsmessung untersucht.

- a) Die Abbildung 1 in Material 1 zeigt einen quaderförmigen Behälter zur Lagerung von Petroleum. Der Füllstand des Petroleums wird durch kapazitive Messung erfasst.

- a1) Zunächst wird die Kapazität des leeren Kondensators betrachtet.

Weisen Sie nach, dass die Kapazität des Plattenkondensators ohne eingefülltes Petroleum  $C = 7,97 \text{ pF}$  beträgt. (3 BE)

- a2) Wenn der Behälter vollständig mit Petroleum gefüllt ist, ist die Kapazität des Kondensators dadurch gestiegen.

Erläutern Sie ausführlich, dass weitere Ladungen auf die Kondensatorplatten geflossen sind, wenn der Behälter mit Petroleum gefüllt ist und der Kondensator während des Befüllens mit der Spannungsquelle verbunden bleibt.

Veranschaulichen Sie mithilfe einer Skizze die Polarisierung im Dielektrikum. (9 BE)

- b) Für einen teilweise befüllten Behälter kann die Kapazität des betrachteten Kondensators in Abhängigkeit von der Füllhöhe des Petroleums durch die Gleichung im Material 1 beschrieben werden.

- b1) Leiten Sie den in der Gleichung (Material 1) dargestellten Zusammenhang zwischen der Gesamtkapazität  $C_{ges}$  und der Füllhöhe  $h$  des Petroleums im Behälter unter Verwendung von Material 2 her. (6 BE)

- b2) Berechnen Sie die Füllhöhe des Petroleums im Behälter, für die sich eine Gesamtkapazität von  $10,75 \text{ pF}$  ergibt. (3 BE)

- c) Für die kapazitative Messung der Füllhöhe im Behälter wird das Entladeverhalten des Kondensators untersucht. Bei unbekannter Füllhöhe des Petroleums wird der stets mit der gleichen Spannung aufgeladene Kondensator über einen stets gleichen Ohm'schen Widerstand entladen. Material 3 zeigt den durch Messung bestimmten zeitlichen Verlauf der Stromstärke während des Entladevorgangs.

- c1) Ermitteln Sie unter Verwendung von Material 3 die Kapazität des betrachteten Kondensators. (5 BE)

**Profilfach Physik**

Thema: Felder - Füllstandsmessung

---

c2) Stellen Sie in Material 3 qualitativ den zeitlichen Verlauf der Entladestromstärke dar, der sich für eine geringere Füllhöhe des Behälters ergibt.

Erklären Sie den Unterschied der beiden Verläufe. (5 BE)

c3) Aus den Messwerten des Entladeverhaltens (Material 3) wurde als Kapazität des Kondensators  $C = 11,8 \text{ pF}$  ermittelt.

Zum Zeitpunkt  $t = 0 \text{ s}$  beträgt die Stromstärke  $15,0 \text{ }\mu\text{A}$ ; für  $t > 0 \text{ s}$  kann die Stromstärke auf  $\pm 0,1 \text{ }\mu\text{A}$  genau bestimmt werden.

Beurteilen Sie unter quantitativer Berücksichtigung dieser Messunsicherheit, ob gefolgert werden kann, dass der Behälter aus Material 1 weniger als zur Hälfte mit Petroleum befüllt ist. (5 BE)

d) In einem Betrieb werden unterschiedliche Flüssigkeiten und Feststoffe gelagert. Der Füllstand wird bei einigen dieser Materialien bereits mithilfe eines funktionierenden kapazitiven Messverfahrens (vergleiche Material 1) erfasst. Es soll nun geprüft werden, ob der Füllstand auch für andere Materialien kapazitativ bestimmt werden kann. Die Alternative dazu ist ein massenbezogenes Messverfahren, dessen Installation und Unterhalt aber mit vergleichsweise hohen Kosten verbunden ist (Material 4).

Geben Sie anhand der Materialien 1 und 4 eine begründete Empfehlung, unter welchen Voraussetzungen das massenbezogene Verfahren eingesetzt werden sollte. (4 BE)

**Profilfach Physik**  
Thema: Felder - Füllstandsmessung

**Material 1: Behälter zur kapazitiven Füllstandsmessung**

Schematischer Aufbau des Behälters:

Zwei einander gegenüberliegende Seiten des Behälters sind aus Metall und mit den Polen einer Spannungsquelle verbunden (siehe Abbildung 1). Ein elektrischer Strom zwischen diesen Platten kann nicht fließen, da die anderen Seiten des Behälters, das Petroleum und die Luft bei den gegebenen Bedingungen jeweils elektrische Nichtleiter sind.

Die beiden leitenden Seiten mit der Füllung dazwischen können modellhaft als Plattenkondensator mit Petroleum bzw. Luft als Dielektrikum betrachtet werden.

Die Dielektrizitätszahl von Petroleum beträgt  $\epsilon_{r,P} = 2,0$ , die von Luft  $\epsilon_{r,L} = 1,0$ . Für die Kapazität in Abhängigkeit von der Füllhöhe des Behälters gilt

$$C_{ges}(h) = \epsilon_0 \cdot \frac{b}{d} \cdot (h_{ges} + (\epsilon_{r,P} - 1) \cdot h).$$

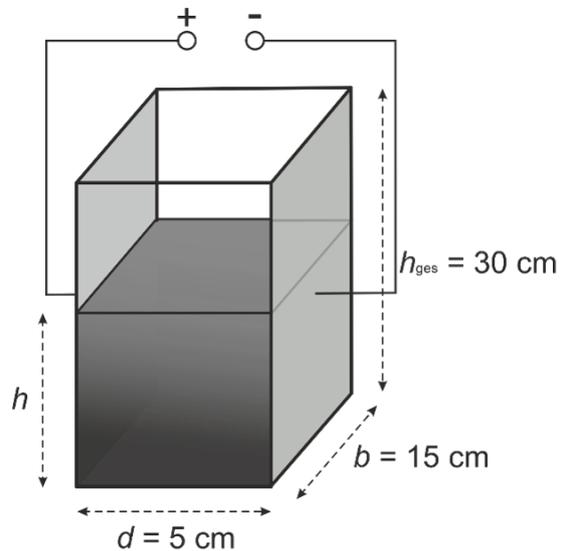


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Behälters

**Material 2: Parallelschaltung von Kondensatoren**

Die Kapazität eines Plattenkondensators, der bis zu einer bestimmten Höhe  $h$  mit einem Dielektrikum gefüllt ist, entspricht der Gesamtkapazität  $C_{ges}$  einer Parallelschaltung aus einem gefüllten und einem ungefüllten Plattenkondensator mit entsprechenden Abmessungen.

Für die Gesamtkapazität zweier parallel geschalteter Kondensatoren der Kapazitäten  $C_1$  und  $C_2$  gilt  $C_{ges} = C_1 + C_2$ .

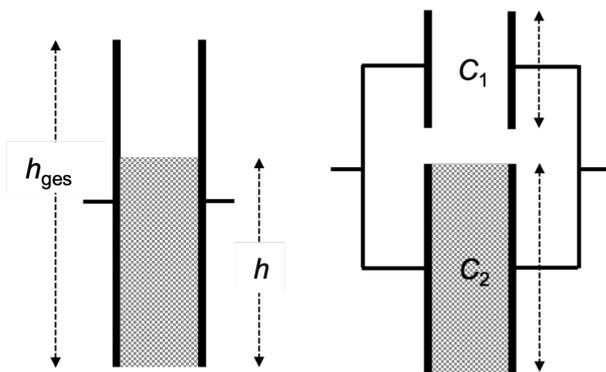


Abbildung 2: Modellierung als Parallelschaltung

**Profilfach Physik**  
Thema: Felder - Füllstandsmessung

---

**Material 3: Zeitlicher Verlauf der Entladestromstärke des Kondensators**

Zum Zeitpunkt  $0\text{ s}$  ist der Kondensator mit der Spannung  $7,5\text{ V}$  vollständig geladen und wird über den Ohm'schen Widerstand  $R = 500\text{ k}\Omega$  entladen.

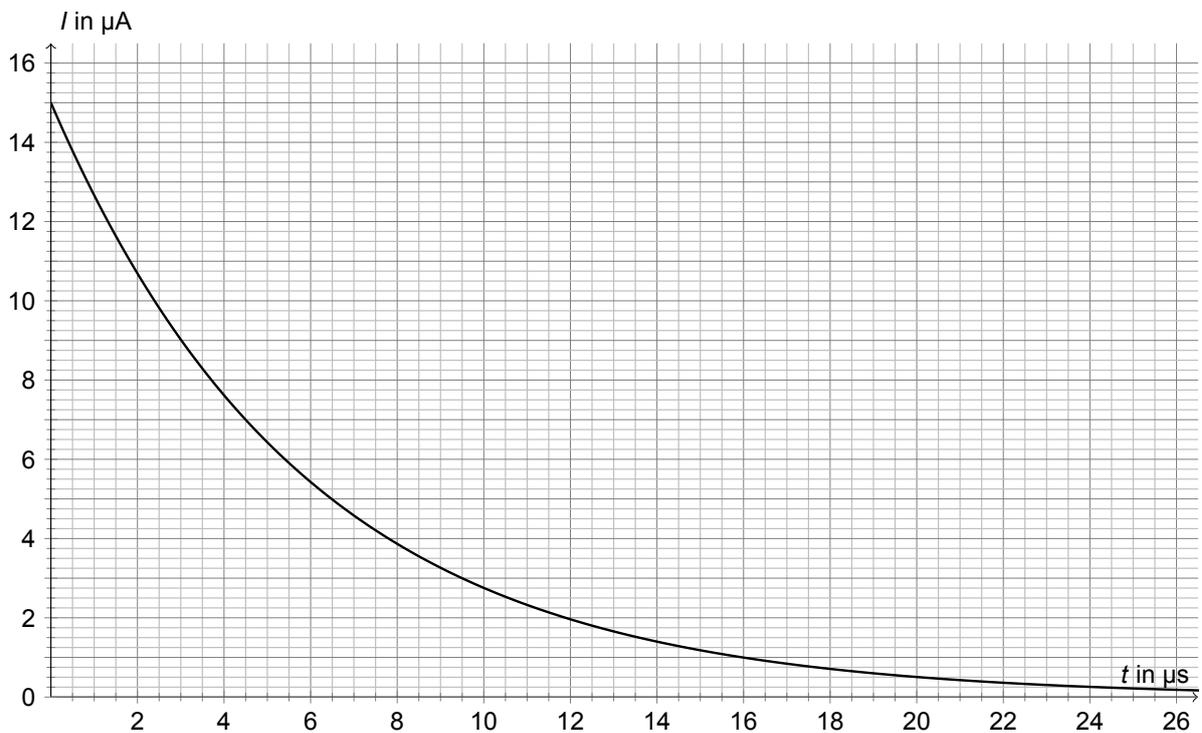


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf der Entladestromstärke des Kondensators

**Material 4: Massenbezogene Füllstandsmessung durch Verwendung von Lastsensoren**

Das Grundprinzip der massenbezogenen Füllstandsmessung basiert auf der Messung der Gewichtskraft eines Behälters durch Lastsensoren. Dabei werden die Sensoren unter dem Behälter angebracht und messen die von dem Behälter ausgeübte Kraft. Jegliche Änderung der gemessenen Kraft entspricht einer Änderung des Füllstands, solange das Füllmaterial eine einheitliche Dichte hat.

**Profilfach Physik**  
Thema: Felder - Füllstandsmessung

---

**Aufgabe 2: Füllstandsmessung**

Zur Messung der Füllhöhe von Tanks und Behältern können unterschiedliche Messprinzipien zum Einsatz kommen. In einem Modellversuch wird die kapazitative Füllstandsmessung untersucht.

- a) Die Abbildung 1 in Material 1 zeigt einen quaderförmigen Behälter zur Lagerung von Petroleum. Der Füllstand des Petroleums wird durch kapazitive Messung erfasst.

a1) Zunächst wird die Kapazität des leeren Kondensators betrachtet.

Weisen Sie nach, dass die Kapazität des Plattenkondensators ohne eingefülltes Petroleum  $C = 7,97 \text{ pF}$  beträgt. (3 BE)

a2) Wenn der Behälter vollständig mit Petroleum gefüllt ist, ist die Kapazität des Kondensators dadurch gestiegen.

Erläutern Sie ausführlich, dass weitere Ladungen auf die Kondensatorplatten geflossen sind, wenn der Behälter mit Petroleum gefüllt ist und der Kondensator während des Befüllens mit der Spannungsquelle verbunden bleibt.

Veranschaulichen Sie mithilfe einer Skizze die Polarisierung im Dielektrikum. (9 BE)

- b) Für einen teilweise befüllten Behälter kann die Kapazität des betrachteten Kondensators in Abhängigkeit von der Füllhöhe des Petroleums durch die Gleichung im Material 1 beschrieben werden.

b1) Leiten Sie den in der Gleichung (Material 1) dargestellten Zusammenhang zwischen der Gesamtkapazität  $C_{ges}$  und der Füllhöhe  $h$  des Petroleums im Behälter unter Verwendung von Material 2 her. (6 BE)

b2) Berechnen Sie die Füllhöhe des Petroleums im Behälter, für die sich eine Gesamtkapazität von  $10,75 \text{ pF}$  ergibt. (3 BE)

- c) Für die kapazitative Messung der Füllhöhe im Behälter wird das Entladeverhalten des Kondensators untersucht. Bei unbekannter Füllhöhe des Petroleums wird der stets mit der gleichen Spannung aufgeladene Kondensator über einen stets gleichen Ohm'schen Widerstand entladen. Material 3 zeigt den durch Messung bestimmten zeitlichen Verlauf der Stromstärke während des Entladevorgangs.

c1) Ermitteln Sie unter Verwendung von Material 3 die Kapazität des betrachteten Kondensators. (5 BE)

**Profilfach Physik**

Thema: Felder - Füllstandsmessung

---

- c2) Stellen Sie in Material 3 qualitativ den zeitlichen Verlauf der Entladestromstärke dar, der sich für eine geringere Füllhöhe des Behälters ergibt.

Erklären Sie den Unterschied der beiden Verläufe. (5 BE)

- c3) Aus den Messwerten des Entladeverhaltens (Material 3) wurde als Kapazität des Kondensators  $C = 11,8 \text{ pF}$  ermittelt.

Zum Zeitpunkt  $t = 0 \text{ s}$  beträgt die Stromstärke  $15,0 \text{ }\mu\text{A}$ ; für  $t > 0 \text{ s}$  kann die Stromstärke auf  $\pm 0,1 \text{ }\mu\text{A}$  genau bestimmt werden.

Beurteilen Sie unter quantitativer Berücksichtigung dieser Messunsicherheit, ob gefolgert werden kann, dass der Behälter aus Material 1 weniger als zur Hälfte mit Petroleum befüllt ist. (5 BE)

- d) In einem Betrieb werden unterschiedliche Flüssigkeiten und Feststoffe gelagert. Der Füllstand wird bei einigen dieser Materialien bereits mithilfe eines funktionierenden kapazitiven Messverfahrens (vergleiche Material 1) erfasst. Es soll nun geprüft werden, ob der Füllstand auch für andere Materialien kapazitativ bestimmt werden kann. Die Alternative dazu ist ein massenbezogenes Messverfahren, dessen Installation und Unterhalt aber mit vergleichsweise hohen Kosten verbunden ist (Material 4).

Geben Sie anhand der Materialien 1 und 4 eine begründete Empfehlung, unter welchen Voraussetzungen das massenbezogene Verfahren eingesetzt werden sollte. (4 BE)

**Profilfach Physik**

Thema: Felder - Füllstandsmessung

**Material 1: Behälter zur kapazitiven Füllstandsmessung**

Schematischer Aufbau des Behälters:

Zwei einander gegenüberliegende Seiten des Behälters sind aus Metall und mit den Polen einer Spannungsquelle verbunden (siehe Abbildung 1). Ein elektrischer Strom zwischen diesen Platten kann nicht fließen, da die anderen Seiten des Behälters, das Petroleum und die Luft bei den gegebenen Bedingungen jeweils elektrische Nichtleiter sind.

Die beiden leitenden Seiten mit der Füllung dazwischen können modellhaft als Plattenkondensator mit Petroleum bzw. Luft als Dielektrikum betrachtet werden.

Die Dielektrizitätszahl von Petroleum beträgt  $\epsilon_{r,P} = 2,0$ , die von Luft  $\epsilon_{r,L} = 1,0$ . Für die Kapazität in Abhängigkeit von der Füllhöhe des Behälters gilt

$$C_{ges}(h) = \epsilon_0 \cdot \frac{b}{d} \cdot (h_{ges} + (\epsilon_{r,P} - 1) \cdot h).$$

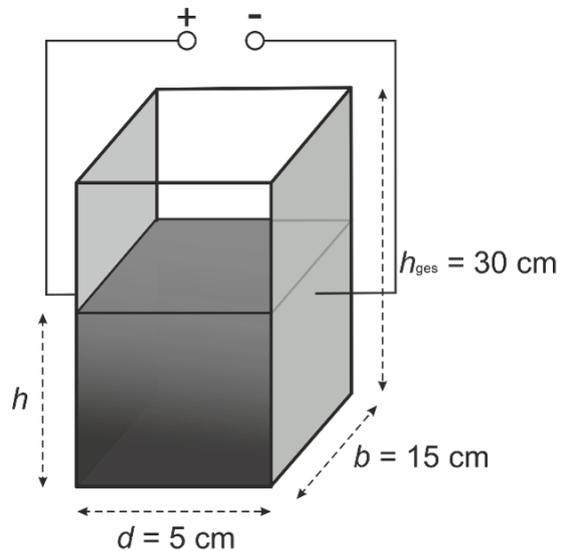


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Behälters

**Material 2: Parallelschaltung von Kondensatoren**

Die Kapazität eines Plattenkondensators, der bis zu einer bestimmten Höhe  $h$  mit einem Dielektrikum gefüllt ist, entspricht der Gesamtkapazität  $C_{ges}$  einer Parallelschaltung aus einem gefüllten und einem ungefüllten Plattenkondensator mit entsprechenden Abmessungen.

Für die Gesamtkapazität zweier parallel geschalteter Kondensatoren der Kapazitäten  $C_1$  und  $C_2$  gilt  $C_{ges} = C_1 + C_2$ .

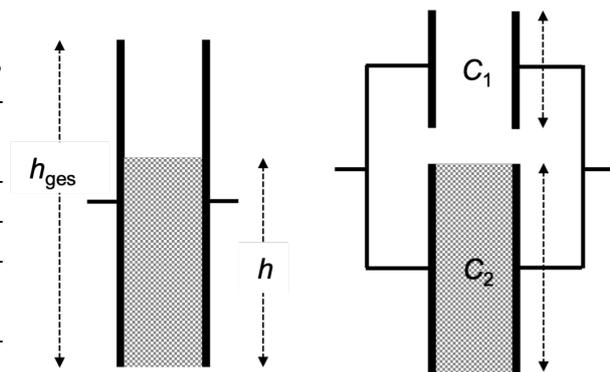


Abbildung 2: Modellierung als Parallelschaltung

**Profilfach Physik**  
Thema: Felder - Füllstandsmessung

---

**Material 3: Zeitlicher Verlauf der Entladestromstärke des Kondensators**

Zum Zeitpunkt  $0\text{ s}$  ist der Kondensator mit der Spannung  $7,5\text{ V}$  vollständig geladen und wird über den Ohm'schen Widerstand  $R = 500\text{ k}\Omega$  entladen.

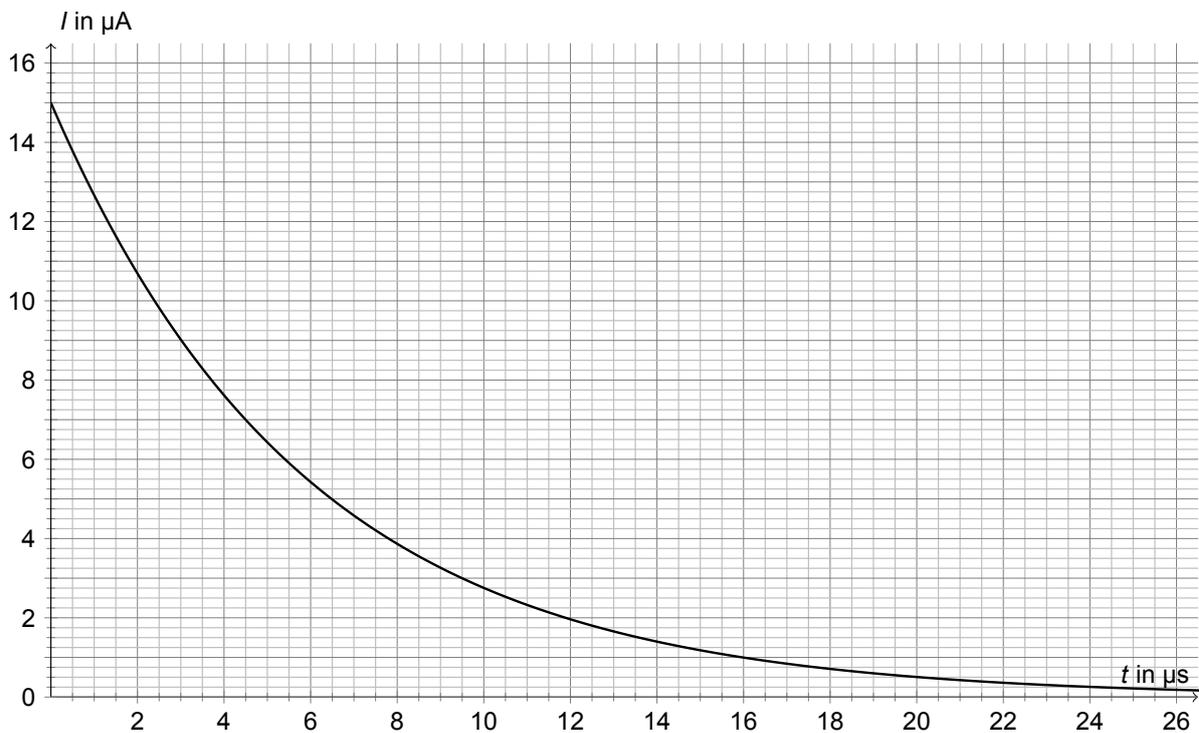


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf der Entladestromstärke des Kondensators

**Material 4: Massenbezogene Füllstandsmessung durch Verwendung von Lastsensoren**

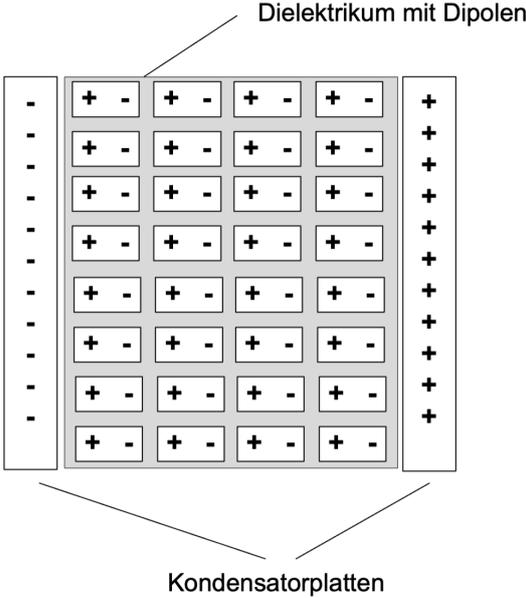
Das Grundprinzip der massenbezogenen Füllstandsmessung basiert auf der Messung der Gewichtskraft eines Behälters durch Lastsensoren. Dabei werden die Sensoren unter dem Behälter angebracht und messen die von dem Behälter ausgeübte Kraft. Jegliche Änderung der gemessenen Kraft entspricht einer Änderung des Füllstands, solange das Füllmaterial eine einheitliche Dichte hat.

**Profilfach Physik**  
Thema: Felder - Füllstandsmessung

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

<b>Erwartete Schülerleistung</b>	Bewertung Zuordnung		
	I	II	III
<p><b>a1)</b> Kapazität eines Plattenkondensators mit den gegebenen Abmessungen</p> $C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d} = \epsilon_0 \cdot 1 \cdot \frac{0,15 \text{ m} \cdot 0,3 \text{ m}}{0,05 \text{ m}} \approx 7,97 \cdot 10^{-12} \text{ F} = 7,97 \text{ pF}$	3		
<p><b>a2)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Liegt an einem Plattenkondensator eine Spannung <math>U_0</math> an, wird auf den Platten des Kondensators Ladung gespeichert und es bildet sich zwischen den Platten ein elektrisches Feld aus.</li> <li>▪ Die Kapazität des Kondensators gibt an, welche Ladungsmenge bei dieser angelegten Spannung auf einer Kondensatorplatte gespeichert wird: <math>C_0 = \frac{Q_0}{U_0}</math>.</li> <li>▪ Die im Dielektrikum vorhandenen Moleküle zeigen im elektrischen Feld Dipolcharakter und richten sich gemäß dem elektrischen Feld zwischen den Kondensatorplatten aus, siehe Skizze. Dadurch steigt die Kapazität des Kondensators <math>C = \epsilon_{r,P} \cdot C_0</math>.</li> <li>▪ Da der Plattenkondensator weiterhin mit der Spannungsquelle verbunden ist, kann sich die Ladungsmenge auf den Platten ändern.</li> <li>▪ Die gespeicherte Ladung ergibt sich für die erhöhte Kapazität aus:</li> </ul> $C = \frac{Q}{U_0} \Leftrightarrow Q = U_0 \cdot C = U_0 \cdot \epsilon_{r,P} \cdot C_0 = \epsilon_{r,P} \cdot \underbrace{U_0 \cdot C_0}_{Q_0}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Durch das Einbringen des Dielektrikums vergrößert sich folglich die Ladung auf dem Kondensator.</li> </ul> <p><i>[Hinweis: Der dargestellte Erwartungshorizont verdeutlicht die Notwendigkeit einer ausführlichen Erläuterung. Andere Schwerpunktsetzungen sind möglich.]</i></p>	7		

**Profilfach Physik**  
Thema: Felder - Füllstandsmessung

Erwartete Schülerleistung	Bewertung Zuordnung		
	I	II	III
<p><b>a2, fortgesetzt)</b> Veranschaulichung z. B. durch eine Skizze</p> 	2		
<p><b>b1)</b> Die Kapazitäten der innerhalb der Modellierung betrachteten Kondensatoren sind <math>C_1 = \epsilon_0 \cdot \epsilon_{r,L} \cdot \frac{A_1}{d}</math> und <math>C_2 = \epsilon_0 \cdot \epsilon_{r,P} \cdot \frac{A_2}{d}</math>, wobei für die jeweiligen Plattenflächen <math>A_1 = (h_{ges} - h) \cdot b</math> und <math>A_2 = h \cdot b</math> gilt. Für die Gesamtkapazität folgt aus <math>C_{ges} = C_1 + C_2</math>:</p> $C_{ges} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_{r,L} \cdot \frac{A_1}{d} + \epsilon_0 \cdot \epsilon_{r,P} \cdot \frac{A_2}{d}$ $= \frac{\epsilon_0}{d} \cdot (\epsilon_{r,L} \cdot (h_{ges} - h) \cdot b + \epsilon_{r,P} \cdot h \cdot b)$ $= \epsilon_0 \frac{b}{d} \cdot (h_{ges} \cdot \epsilon_{r,L} + h \cdot (\epsilon_{r,P} - \epsilon_{r,L}))$ $= \epsilon_0 \frac{b}{d} \cdot (h_{ges} \cdot 1 + h \cdot (\epsilon_{r,P} - 1))$ $= \epsilon_0 \frac{b}{d} \cdot (h_{ges} + h \cdot (\epsilon_{r,P} - 1))$		2	4

**Profilfach Physik**  
Thema: Felder - Füllstandsmessung

Erwartete Schülerleistung	Bewertung Zuordnung		
	I	II	III
<p><b>b2)</b></p> $C_{ges}(h) = \epsilon_0 \cdot \frac{b}{d} \cdot (h_{ges} + (\epsilon_{r,P} - 1) \cdot h) \quad (1)$ $\Leftrightarrow h = \left( \frac{C_{ges}}{\epsilon_0} \cdot \frac{d}{b} - h_{ges} \right) \cdot \frac{1}{\epsilon_{r,P} - 1}$ $h = \left( \frac{10,75 \cdot 10^{-12} \text{ F}}{\epsilon_0} \cdot \frac{0,05 \text{ m}}{0,15 \text{ m}} - 0,30 \text{ m} \right) \cdot \frac{1}{2,0 - 1}$ $\approx 0,10 \text{ m}$		3	
<p><b>c1)</b></p> <p>Der zeitliche Verlauf der Stromstärke kann beschrieben werden durch die Funktion <math>I(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{1}{RC} \cdot t}</math>.</p> <p>Für die Stromstärke zum Zeitpunkt <math>t = 0 \text{ s}</math> gilt: <math>I(0) = 15 \mu\text{A} = I_0</math>.</p> <p>Anhand der graphischen Darstellung (Material 3) lassen sich Messwertepaare ablesen, z. B. <math>I(4,1 \mu\text{s}) \approx 7,5 \mu\text{A}</math>.</p> <p>Somit liefert die Gleichung <math>I(t)</math> für die Kapazität des Kondensators</p> $C = -\frac{1}{R} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{I(t)}{I_0}\right)} \cdot t \approx -\frac{1}{500 \cdot 10^3 \Omega} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{1}{2}\right)} \cdot 4,1 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ $\approx 11,8 \cdot 10^{-12} \text{ F.}$		5	
<p><b>c2)</b></p>		1	

**Profilfach Physik**  
Thema: Felder - Füllstandsmessung

Erwartete Schülerleistung	Bewertung Zuordnung		
	I	II	III
<p><b>c2, fortgesetzt)</b> Der zeitliche Verlauf, der sich für eine geringere Füllhöhe des Behälters ergibt, ist gestrichelt dargestellt. Mit zunehmendem Füllstand steigt die Kapazität des betrachteten Kondensators (vergleiche Gleichung in Material 1). Dadurch steigt bei konstanter Spannung auch die Ladungsmenge, die auf den Platten des Kondensators gespeichert ist. Da die Entladung des Kondensators stets über den gleichen Ohm'schen Widerstand erfolgt, ist bei gleicher maximaler Stromstärke <math>I_0</math> eine größere Zeitspanne notwendig, bis der Kondensator z. B. zur Hälfte entladen ist. Aus diesem Grund verläuft der Entladevorgang des Kondensators bei hohen Füllständen im Behälter langsamer als bei kleinen Füllständen.</p>		4	
<p><b>c3)</b> Um sicherzustellen, dass der Behälter weniger als zur Hälfte mit Petroleum befüllt ist, muss ausgeschlossen werden, dass die Kapazität <math>C</math> des betrachteten Kondensators größer oder gleich <math>C(15\text{ cm}) \approx 11,95\text{ pF}</math> ist (Gleichung in Material 1). Die aus dem zeitlichen Verlauf der Entladestromstärke ermittelte Kapazität beträgt <math>11,8\text{ pF}</math>, unterliegt jedoch Unsicherheiten u. a. aufgrund der gegebenen Messunsicherheit der Stromstärke: Die Stromstärke kann auf <math>\pm 0,1\text{ }\mu\text{A}</math> genau bestimmt werden. So ergibt sich z.B. bei <math>t = 4\text{ }\mu\text{s}</math> eine Stromstärke von <math>(7,7 \pm 0,1)\text{ }\mu\text{A}</math>. Aus dem Zusammenhang <math>I(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{1}{RC} \cdot t}</math> lässt sich damit <math>11,77\text{ pF} \leq C \leq 12,23\text{ pF}</math> folgern, weshalb die tatsächliche Kapazität auch größer als <math>11,95\text{ pF}</math> sein könnte.</p>		1	
<p><b>d)</b> Im Sinne der Wirtschaftlichkeit des Betriebs ist von der Installation nicht-notwendiger Systeme, die mit Mehrkosten verbunden sind, abzusehen. Daher ist die Installation des massenbezogenen Messverfahrens nur dann sinnvoll, wenn das etablierte Messverfahren ungeeignet ist. Da die Platten des Kondensators gegeneinander isoliert sein müssen, kann das kapazitative Messverfahren auf Basis von Material 1 für Materialien, die elektrisch leitfähig sind, nicht verwendet werden. Gemäß Material 4 sollte für solche Materialien, sofern sie eine einheitliche Dichte haben, das massenbezogene Messverfahren eingesetzt werden.</p>		4	
<b>Summe der Bewertungseinheiten</b>	<b>12</b>	<b>20</b>	<b>8</b>

**Profilfach Physik**  
Thema: Felder - Füllstandsmessung

---

**Standardbezug:**

Teilaufgabe	Kompetenzbereich			
	S	E	K	B
a1	3			
a2	1		6	
b1	3,7		3	
b2	3			
c1	3			
c2	3			
c3		7		
d				3

**Profilfach Physik**

Thema: Felder - Sicherheit von Deichen

---

**Aufgabe 3: Sicherheit von Deichen**

Deiche dienen zum Schutz vor Überflutungen. Ihre Stabilität muss regelmäßig überprüft werden. Messungen des elektrischen Widerstands ermöglichen dabei Rückschlüsse darauf, ob Meerwasser in einen Deich eingedrungen ist.

- a) Bei dem in Material 1 beschriebenen Aufbau wird durch die Elektroden  $P_1$  und  $P_2$  ein zeitlich konstantes elektrisches Feld im Deich erzeugt. Nehmen Sie im Folgenden an, dass der Deichkörper überall dieselbe stoffliche Zusammensetzung besitzt. Vernachlässigen Sie elektrische Ströme, die aufgrund des elektrischen Feldes im Deichkörper entstehen.

- a1) Skizzieren Sie in Abbildung 1 die elektrischen Feldlinien durch die Punkte A und B. (4 BE)

- a2) Nehmen Sie an, dass von jeder der beiden Elektroden  $P_1$  und  $P_2$  im Punkt Z jeweils ein elektrisches Feld mit dem Betrag  $1,0 \cdot 10^{-3} \frac{\text{V}}{\text{m}}$  erzeugt wird.

Bestimmen Sie zeichnerisch in Abbildung 1 den Betrag  $E$  der Gesamtfeldstärke im Punkt Z. Geben Sie den verwendeten Maßstab an.

[Kontrollwert:  $1,7 \cdot 10^{-3} \frac{\text{V}}{\text{m}}$ ] (8 BE)

Im Punkt Z des Deiches (siehe Abbildung 1 in Material 1) befindet sich ein einfach positiv geladenes Natriumion der Masse  $3,8 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$ .

- a3) Bestimmen Sie mit dem Ergebnis aus Aufgabe a2) den Betrag der elektrischen Kraft auf dieses Ion.

Begründen Sie mithilfe einer Rechnung, dass die Gewichtskraft gegenüber den wirkenden elektrischen Feldkräften vernachlässigt werden kann. (4 BE)

- b) Zur Untersuchung, ob in einen Deich Meerwasser eingedrungen ist, wird der spezifische elektrische Widerstand  $\rho$  des Deichmaterials bestimmt (siehe Material 2).

- b1) Erklären Sie mithilfe des Zusammenhangs aus Material 3 die Veränderung der elektrischen Stromstärke  $I$ , falls Meerwasser in den Deichkörper eindringt. Gehen Sie von der Annahme einer konstanten Spannung  $U_M$  zwischen  $M_1$  und  $M_2$  aus. (4 BE)

- b2) Ermitteln Sie unter Verwendung aller geeigneten Messwerte aus Tabelle 1 in Material 3 den spezifischen elektrischen Widerstand  $\rho$  des Deichkörpers (siehe Material 2).

[Kontrollwert:  $60 \Omega \cdot \text{m}$ ] (6 BE)

- b3) Beurteilen Sie mithilfe von Material 1 und 2, ob bei dem spezifischen Widerstand von  $60 \Omega \cdot \text{m}$  Meerwasser in den Deichkörper eingedrungen sein könnte. (6 BE)

**Profilfach Physik**

Thema: Felder - Sicherheit von Deichen

---

- c) Während der Messung soll der Deich für die Zeitdauer der Überprüfung für Anwohner und Urlauber gesperrt werden. Die Sperrung wird daher in der Lokalzeitung angekündigt. Deren Redaktion erhält daraufhin einen Leserbrief, der in Material 4 ausschnittsweise abgedruckt ist.

Verfassen Sie im Namen der für die Messungen verantwortlichen Person ein Antwortschreiben, in welchem Sie auf die in Material 4 angesprochenen Risiken eingehen und physikalisch begründen, dass keine Gefährdung für diese Tiere vorliegt. (8 BE)

**Profilfach Physik**  
Thema: Felder - Sicherheit von Deichen

---

**Material 1: Querschnitt des Deichkörpers**

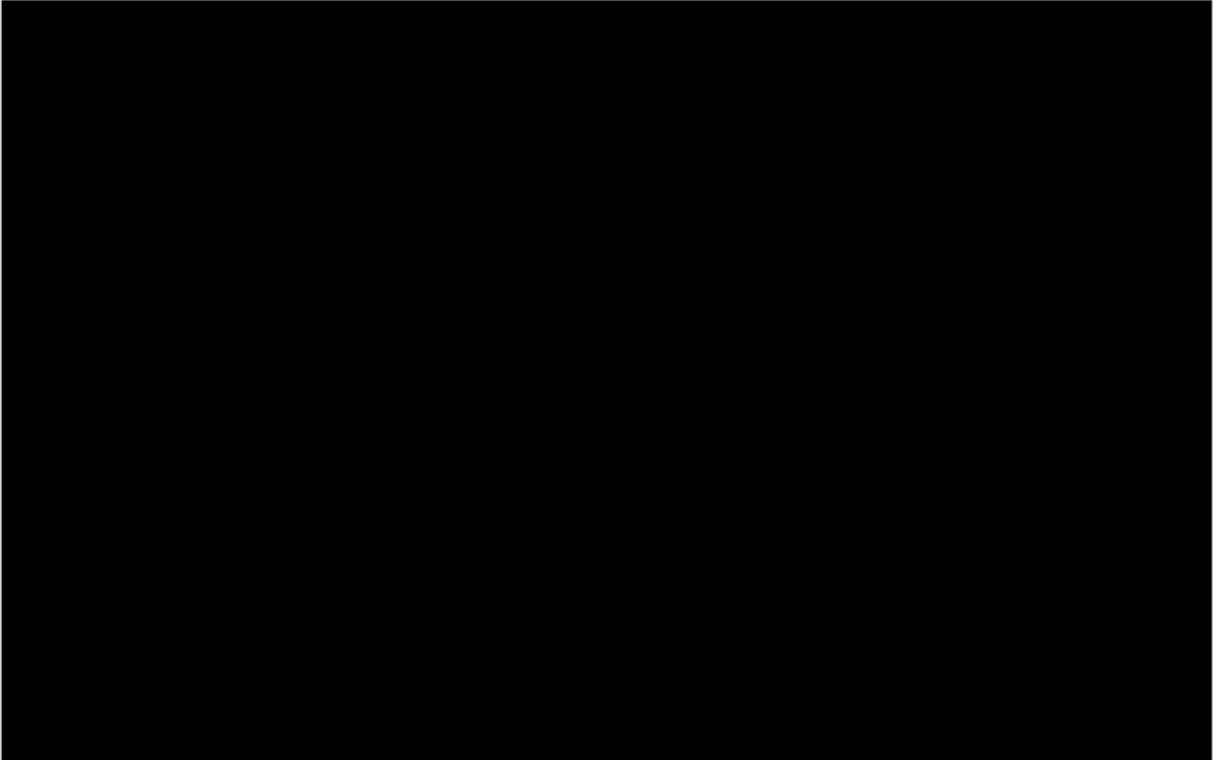


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Deiches im Querschnitt mit der äußeren angelegten Spannung

**Material 2: Spezifischer elektrischer Widerstand**



Abbildung 2: Spezifischer elektrischer Widerstand  $\rho$  für verschiedene Materialien

**Profilfach Physik**  
Thema: Felder - Sicherheit von Deichen

---

**Material 3: Messwerte zur Bestimmung des spezifischen Widerstands**

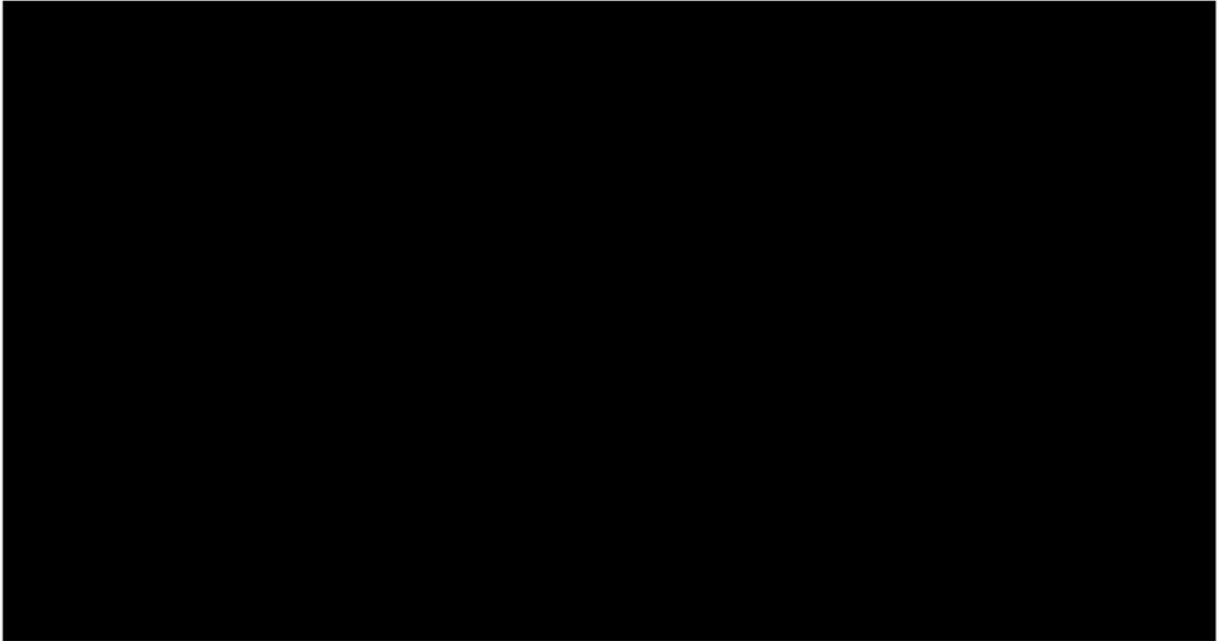
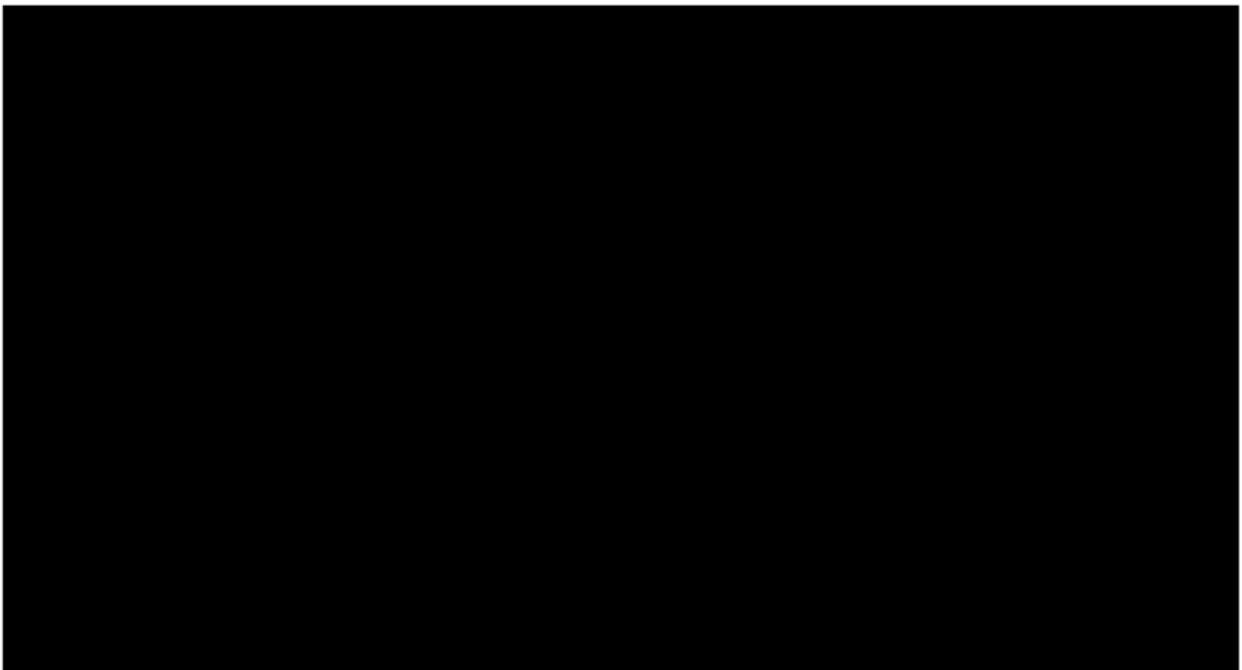


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Messung an der Deichoberfläche in der Schlumberger-Anordnung



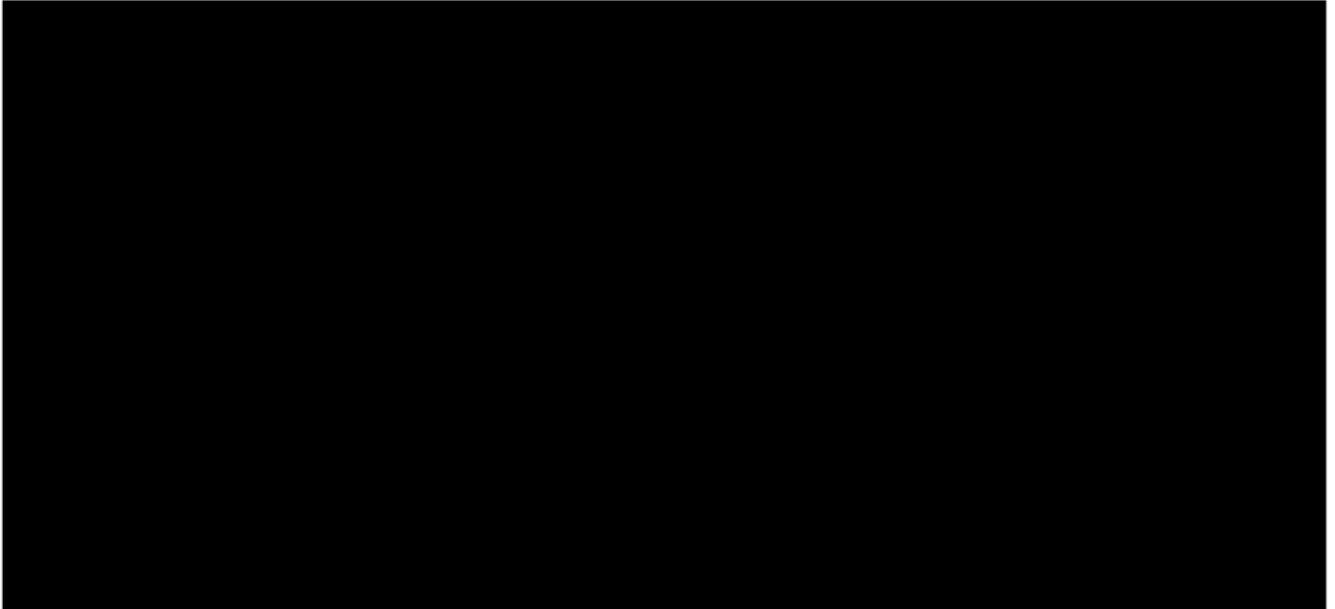
Messung Nummer	1	2	3
$L$ in m	40	100	120
$U_M$ in mV	106	10	5,0
$I$ in mA	208	129	95

Tabelle 1: Messbeispiele; zu Prüfungszwecken erstellt

**Profilfach Physik**  
Thema: Felder - Sicherheit von Deichen

---

**Material 4: Leserbrief und Sicherheitsaspekte**



**Profilfach Physik**

Thema: Felder - Sicherheit von Deichen

---

**Aufgabe 3: Sicherheit von Deichen**

Deiche dienen zum Schutz vor Überflutungen. Ihre Stabilität muss regelmäßig überprüft werden. Messungen des elektrischen Widerstands ermöglichen dabei Rückschlüsse darauf, ob Meerwasser in einen Deich eingedrungen ist.

- a) Bei dem in Material 1 beschriebenen Aufbau wird durch die Elektroden  $P_1$  und  $P_2$  ein zeitlich konstantes elektrisches Feld im Deich erzeugt. Nehmen Sie im Folgenden an, dass der Deichkörper überall dieselbe stoffliche Zusammensetzung besitzt. Vernachlässigen Sie elektrische Ströme, die aufgrund des elektrischen Feldes im Deichkörper entstehen.

- a1) Skizzieren Sie in Abbildung 1 die elektrischen Feldlinien durch die Punkte A und B. (4 BE)

- a2) Nehmen Sie an, dass von jeder der beiden Elektroden  $P_1$  und  $P_2$  im Punkt Z jeweils ein elektrisches Feld mit dem Betrag  $1,0 \cdot 10^{-3} \frac{\text{V}}{\text{m}}$  erzeugt wird.

Bestimmen Sie zeichnerisch in Abbildung 1 den Betrag  $E$  der Gesamtfeldstärke im Punkt Z. Geben Sie den verwendeten Maßstab an.

[Kontrollwert:  $1,7 \cdot 10^{-3} \frac{\text{V}}{\text{m}}$ ] (8 BE)

Im Punkt Z des Deiches (siehe Abbildung 1 in Material 1) befindet sich ein einfach positiv geladenes Natriumion der Masse  $3,8 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$ .

- a3) Bestimmen Sie mit dem Ergebnis aus Aufgabe a2) den Betrag der elektrischen Kraft auf dieses Ion.

Begründen Sie mithilfe einer Rechnung, dass die Gewichtskraft gegenüber den wirkenden elektrischen Feldkräften vernachlässigt werden kann. (4 BE)

- b) Zur Untersuchung, ob in einen Deich Meerwasser eingedrungen ist, wird der spezifische elektrische Widerstand  $\rho$  des Deichmaterials bestimmt (siehe Material 2).

- b1) Erklären Sie mithilfe des Zusammenhangs aus Material 3 die Veränderung der elektrischen Stromstärke  $I$ , falls Meerwasser in den Deichkörper eindringt. Gehen Sie von der Annahme einer konstanten Spannung  $U_M$  zwischen  $M_1$  und  $M_2$  aus. (4 BE)

- b2) Ermitteln Sie unter Verwendung aller geeigneten Messwerte aus Tabelle 1 in Material 3 den spezifischen elektrischen Widerstand  $\rho$  des Deichkörpers (siehe Material 2).

[Kontrollwert:  $60 \Omega \cdot \text{m}$ ] (6 BE)

- b3) Beurteilen Sie mithilfe von Material 1 und 2, ob bei dem spezifischen Widerstand von  $60 \Omega \cdot \text{m}$  Meerwasser in den Deichkörper eingedrungen sein könnte. (6 BE)

**Profilfach Physik**

Thema: Felder - Sicherheit von Deichen

---

- c) Während der Messung soll der Deich für die Zeitdauer der Überprüfung für Anwohner und Urlauber gesperrt werden. Die Sperrung wird daher in der Lokalzeitung angekündigt. Deren Redaktion erhält daraufhin einen Leserbrief, der in Material 4 ausschnittsweise abgedruckt ist.

Verfassen Sie im Namen der für die Messungen verantwortlichen Person ein Antwortschreiben, in welchem Sie auf die in Material 4 angesprochenen Risiken eingehen und physikalisch begründen, dass keine Gefährdung für diese Tiere vorliegt. (8 BE)

**Profilfach Physik**  
Thema: Felder - Sicherheit von Deichen

---

**Material 1: Querschnitt des Deichkörpers**

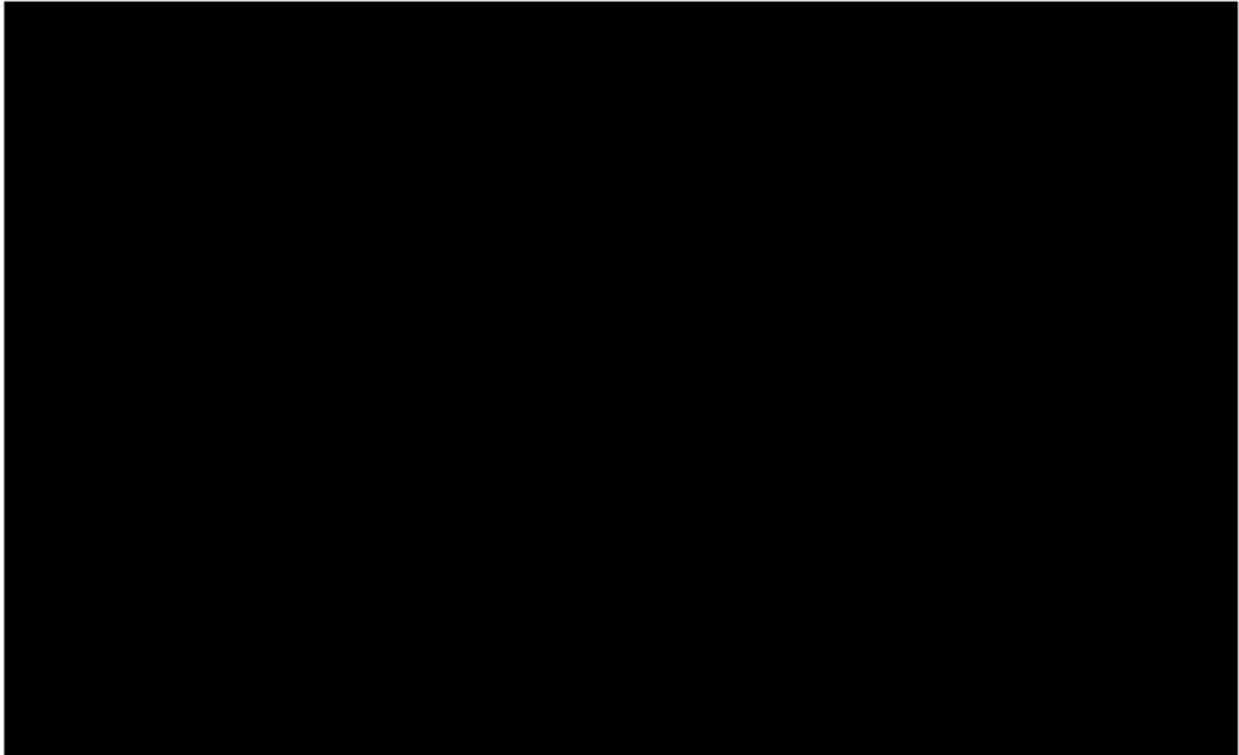


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Deiches im Querschnitt mit der äußeren angelegten Spannung

**Material 2: Spezifischer elektrischer Widerstand**

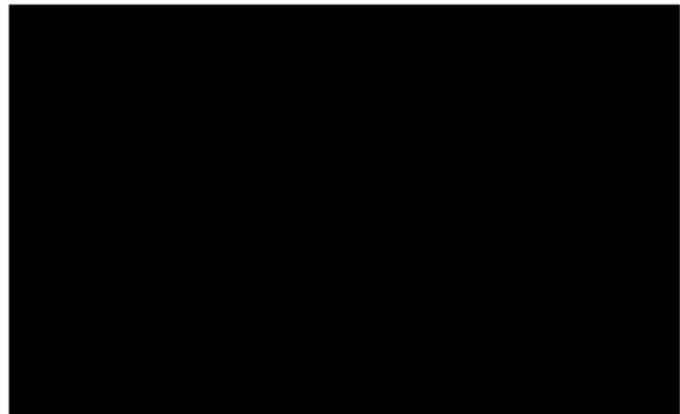
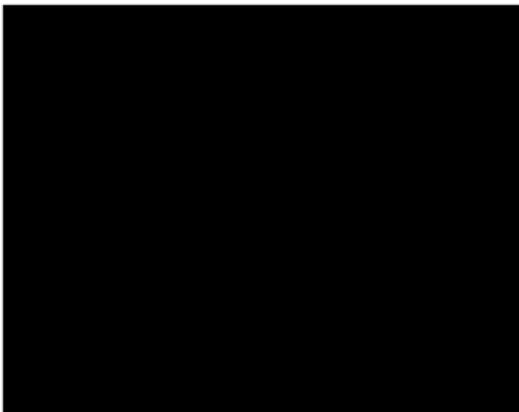


Abbildung 2: Spezifischer elektrischer Widerstand  $\rho$  für verschiedene Materialien

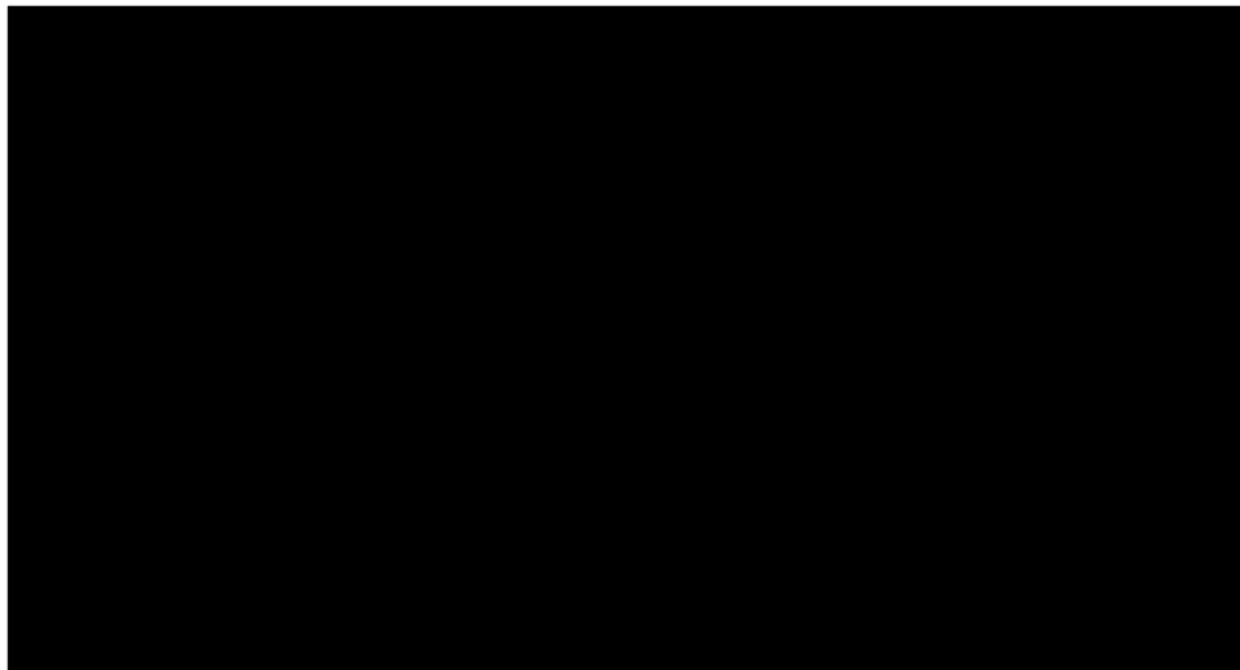
**Profilfach Physik**  
Thema: Felder - Sicherheit von Deichen

---

**Material 3: Messwerte zur Bestimmung des spezifischen Widerstands**



Abbildung 3: Schematische Darstellung der Messung an der Deichoberfläche in der Schlumberger-Anordnung



Messung Nummer	1	2	3
$L$ in m	40	100	120
$U_M$ in mV	106	10	5,0
$I$ in mA	208	129	95

Tabelle 1: Messbeispiele; zu Prüfungszwecken erstellt

**Profilfach Physik**  
Thema: Felder - Sicherheit von Deichen

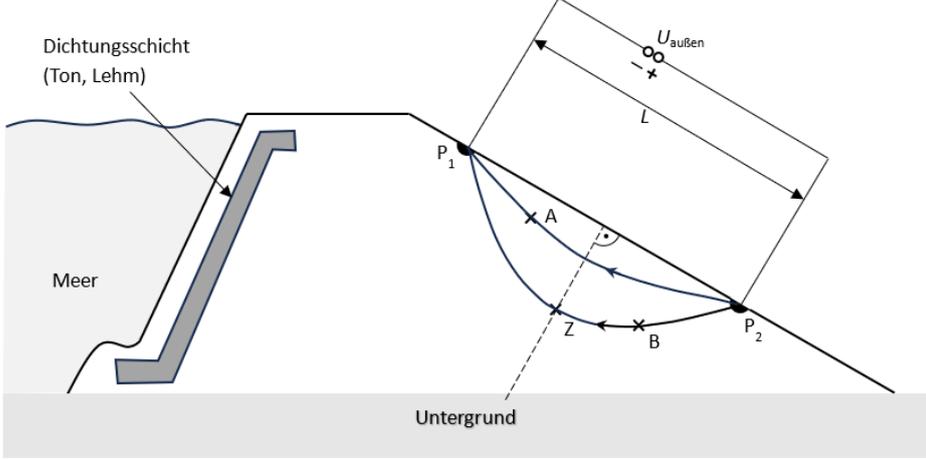
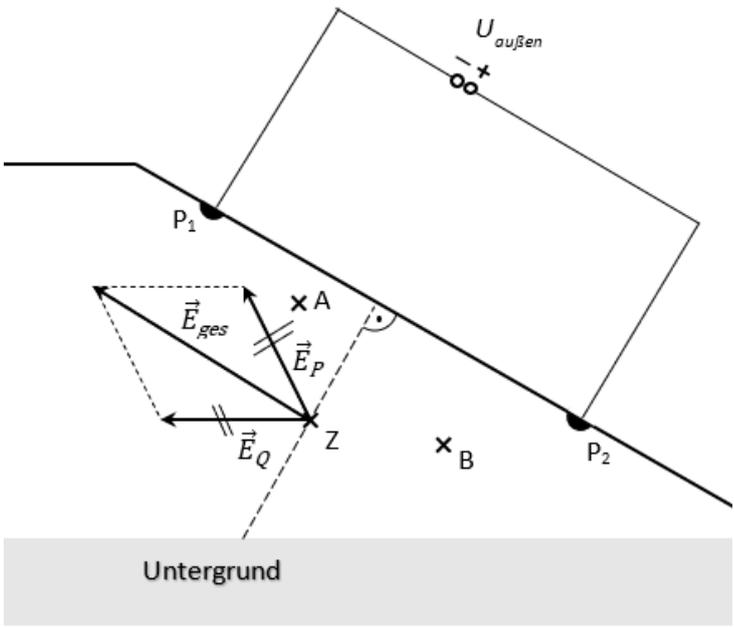
---

**Material 4: Leserbrief und Sicherheitsaspekte**



**Profilfach Physik**  
Thema: Felder - Sicherheit von Deichen

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

Erwartete Schülerleistung	Bewertung Zuordnung		
	I	II	III
<p><b>a1)</b></p> 	4		
<p><b>a2)</b></p>  <p>Maßstab im Bild (zum Beispiel): <math>2,0 \text{ cm} \hat{=} 1,0 \cdot 10^{-3} \frac{\text{V}}{\text{m}}</math> Gesamtfeldstärke: <math>E \approx 1,7 \cdot 10^{-3} \frac{\text{V}}{\text{m}}</math></p>	1 1	6	

**Profilfach Physik**

Thema: Felder - Sicherheit von Deichen

Erwartete Schülerleistung	Bewertung Zuordnung		
	I	II	III
<p><b>a3)</b>  <math>F_{el} = e \cdot E \approx e \cdot 1,7 \cdot 10^{-3} \frac{V}{m} \approx 2,7 \cdot 10^{-22} N</math>  <math>F_G = m \cdot g \approx 3,8 \cdot 10^{-26} kg \cdot g \approx 3,7 \cdot 10^{-25} N</math>                      Es folgt also, dass <math>F_G \ll F_{el}</math> ist.</p>	4		
<p><b>b1)</b>                      Meerwasser hat einen kleinen spezifischen Widerstand. Dringt Meerwasser in den Deich ein, so wird der spezifische Widerstand des Deichmaterials kleiner werden. Dies führt mit <math>I = \frac{U_M}{\rho} \cdot \frac{\pi L^2}{4a}</math> zu einer Erhöhung der Stromstärke (falls <math>U_M</math>, <math>L</math> und <math>a</math> konstant bleiben).</p>		4	
<p><b>b2)</b>                      Messung 1 kann nicht verwendet werden, da <math>L \geq 10a</math> nicht erfüllt ist. <math>\rho = \frac{U_M}{I} \cdot \frac{\pi L^2}{4a}</math> liefert mit den Messungen 2 und 3 die Werte <math>60,9 \Omega \cdot m</math> und <math>59,5 \Omega \cdot m</math>, die Mittelwertbildung liefert ca. <math>60 \Omega \cdot m</math>.</p>	2	4	
<p><b>b3)</b>                      Der Deichkörper besteht hauptsächlich aus Sand und Kies (vergleiche Material 1). Deshalb kann es sich aufgrund von Material 2 nur um nassen Sand oder nassen Kies handeln. Ein trockener Sandboden und ein trockener Kiesboden können definitiv ausgeschlossen werden.                      Der spezifische Widerstand ist sogar kleiner als bei nassem Kies. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass Meerwasser eingedrungen ist und den Widerstand reduziert hat.</p>			6

**Profilfach Physik**  
Thema: Felder - Sicherheit von Deichen

Erwartete Schülerleistung	Bewertung Zuordnung		
	I	II	III
<p><b>c)</b> zum Beispiel:</p> <p>Sehr geehrter Leser, sehr geehrte Leserin, herzlichen Dank für das Vorbringen Ihrer Sorge in dem Leserbrief. Im Folgenden wollen wir darlegen, dass keine Gefährdung der Tiere besteht. Durch die Abdeckungen der Elektroden mit der äußeren Versorgungsspannung wird sichergestellt, dass kein Tier diese berühren kann. Die Stromstärken im Deich sind nicht gefährlich für die Tiere. Die Spannungen zwischen ihren Beinen bewirken in den Körpern der Tieren Ströme. Spannungen zwischen ihren Beinen können den Grenzwert von 60 V nicht erreichen.</p> <p>Das kann ich Ihnen gerne noch begründen: Die Spannung zwischen den Beinen errechnet sich hierbei als elektrische Feldstärke multipliziert mit dem Beinabstand. Da die elektrische Feldstärke überall unter <math>10 \frac{V}{m}</math> bleibt und Tiere wie zum Beispiel Schafe einen Beinabstand von angenommenen 1 m besitzen, liegt an den Tieren eine Spannung von weniger als 10 V an. Das ist als völlig ungefährlich anzusehen. Selbst Tiere mit einem größeren Beinabstand bleiben sicher unter dem Wert von 60 V, der zu einer Gefährdung führen könnte. Deshalb ist auch das Tierwohl nicht gefährdet.</p> <p>Mit freundlichen Grüßen Ihr Messteam</p>		4	4
<b>Summe der Bewertungseinheiten</b>	<b>12</b>	<b>18</b>	<b>10</b>

**Standardbezug:**

Teilaufgabe	Kompetenzbereich			
	S	E	K	B
a1	3			
a2	3			
a3	3			
b1		4		
b2	3			
b3			3	
c			5	6

**Profilfach Physik**

Thema: Quanten - Röntgenanalyse von Kunstwerken

---

**Aufgabe 4: Röntgenanalyse von Kunstwerken**

Röntgenstrahlung kann eingesetzt werden, wenn man herausfinden will, ob ein Kunstwerk echt oder gefälscht ist. Es können beispielsweise tieferliegende Farbschichten oder die Zusammensetzung von Metallen untersucht werden.

- a) Zur Analyse von Röntgenspektren kann die Drehkristallmethode verwendet werden (siehe Material 1).
- a1) Erläutern Sie die Funktionsweise einer Röntgenröhre. (6 BE)
- a2) Leiten Sie die Bragg-Bedingung  $k \cdot \lambda = 2d \cdot \sin(\varphi)$  mit  $k \in \mathbb{N}$  unter Verwendung einer aussagekräftigen Skizze her. (6 BE)
- b) Ein Beispiel für ein Röntgenspektrum ist in Abbildung 2 (Material 2) dargestellt.
- b1) Markieren Sie im Diagramm die kontinuierliche und die charakteristische Röntgenstrahlung sowie die kurzwellige Grenze. Erläutern Sie die Entstehung kontinuierlicher und charakteristischer Röntgenstrahlung und der kurzwelligen Grenze. (9 BE)
- b2) Ermitteln Sie rechnerisch mithilfe der kurzwelligen Grenze die Beschleunigungsspannung. [Kontrollwert: ca. 33 kV] (3 BE)
- c) Die charakteristische Strahlung einer Röntgenröhre wird mithilfe eines Lithium-Fluorid-Kristalls vermessen (Material 1). Die Anode besteht aus Molybdän. Die zur  $K_\alpha$ -Linie des Anodenmaterials gehörige Strahlung wird unter dem Winkel  $\varphi$  gemessen.
- Berechnen Sie mithilfe des Moseley-Gesetzes den Winkel  $\varphi$ . (7 BE)
- d) Ein Kunsthändler hat eine Figur mit einer vergoldeten Silbermünze in der Hand angeboten bekommen. Er fragt sich, ob sich unter dem Gold tatsächlich reines Silber befindet. Die Münze soll mithilfe der Röntgenfluoreszenzanalyse untersucht werden (Material 3).
- d1) Werten Sie das Diagramm in Abbildung 3 (Material 3) aus. Erläutern Sie, warum im Diagramm kein Peak für die Vergoldung erkennbar ist. Beantworten Sie die Frage des Kunsthändlers. (7 BE)
- d2) Erläutern Sie Interpretationschwierigkeiten, wenn man zur Analyse der Münze die Röntgenröhre aus Aufgabenteil c) verwendet (siehe auch Material 2). (2 BE)

**Profilfach Physik**

Thema: Quanten - Röntgenanalyse von Kunstwerken

**Material 1: Die Drehkristallmethode zur Aufnahme von Röntgenspektren**

Bei der Drehkristallmethode trifft ein Röntgenstrahl auf einen Kristall (Abbildung 1). Die vom Kristall reflektierte Strahlung wird mit einem Zählrohr registriert. Durch das Drehen des Kristalls wird der Einstrahlungswinkel  $\varphi$  variiert und jeweils mit dem Zählrohr die Strahlung registriert.

Der hier verwendete Lithium-Fluorid-Kristall hat einen Netzebenenabstand von  $d = 201 \text{ pm}$ .

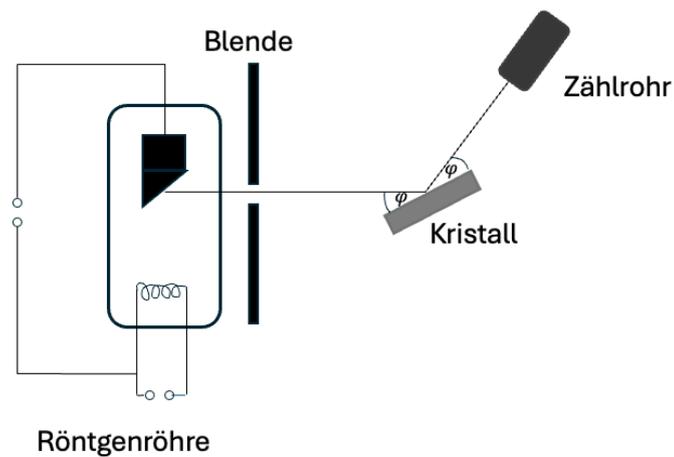


Abbildung 1: Aufbauskitze Drehkristallmethode

**Material 2: Röntgenspektrum**

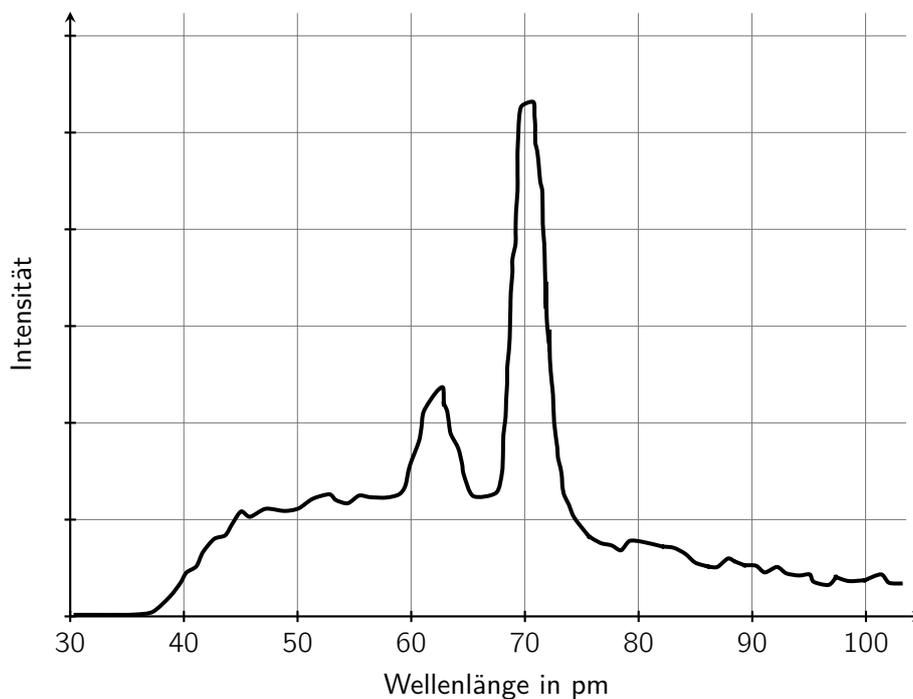


Abbildung 2: Röntgenspektrum einer Molybdän-Anode

**Profilfach Physik**

Thema: Quanten - Röntgenanalyse von Kunstwerken

---

**Material 3: Röntgenfluoreszenzanalyse**

Bei der Röntgenfluoreszenzanalyse von Kunstwerken werden Untersuchungsobjekte mit kontinuierlicher Röntgenstrahlung bestrahlt. Durch die eingestrahlten Photonen werden Atome angeregt und senden bei der Rückkehr in den ursprünglichen Zustand Photonen mit einer materialspezifischen charakteristischen Energie aus. Die vom Material emittierte Strahlung wird mit dem Zählrohr registriert und analysiert. Es gilt das Moseley-Gesetz.

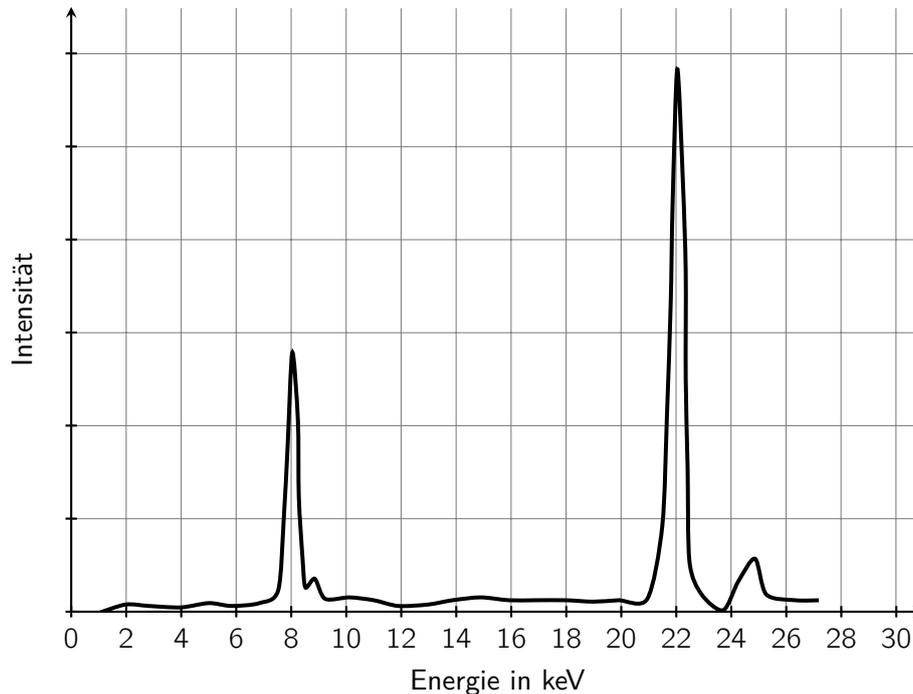


Abbildung 3: Röntgenfluoreszenzanalyse der Münze

**Profilfach Physik**

Thema: Quanten - Röntgenanalyse von Kunstwerken

---

**Aufgabe 4: Röntgenanalyse von Kunstwerken**

Röntgenstrahlung kann eingesetzt werden, wenn man herausfinden will, ob ein Kunstwerk echt oder gefälscht ist. Es können beispielsweise tieferliegende Farbschichten oder die Zusammensetzung von Metallen untersucht werden.

- a) Zur Analyse von Röntgenspektren kann die Drehkristallmethode verwendet werden (siehe Material 1).
- a1) Erläutern Sie die Funktionsweise einer Röntgenröhre. (6 BE)
- a2) Leiten Sie die Bragg-Bedingung  $k \cdot \lambda = 2d \cdot \sin(\varphi)$  mit  $k \in \mathbb{N}$  unter Verwendung einer aussagekräftigen Skizze her. (6 BE)
- b) Ein Beispiel für ein Röntgenspektrum ist in Abbildung 2 (Material 2) dargestellt.
- b1) Markieren Sie im Diagramm die kontinuierliche und die charakteristische Röntgenstrahlung sowie die kurzwellige Grenze. Erläutern Sie die Entstehung kontinuierlicher und charakteristischer Röntgenstrahlung und der kurzwelligen Grenze. (9 BE)
- b2) Ermitteln Sie rechnerisch mithilfe der kurzwelligen Grenze die Beschleunigungsspannung. [Kontrollwert: ca. 33 kV] (3 BE)
- c) Die charakteristische Strahlung einer Röntgenröhre wird mithilfe eines Lithium-Fluorid-Kristalls vermessen (Material 1). Die Anode besteht aus Molybdän. Die zur  $K_\alpha$ -Linie des Anodenmaterials gehörige Strahlung wird unter dem Winkel  $\varphi$  gemessen.
- Berechnen Sie mithilfe des Moseley-Gesetzes den Winkel  $\varphi$ . (7 BE)
- d) Ein Kunsthändler hat eine Figur mit einer vergoldeten Silbermünze in der Hand angeboten bekommen. Er fragt sich, ob sich unter dem Gold tatsächlich reines Silber befindet. Die Münze soll mithilfe der Röntgenfluoreszenzanalyse untersucht werden (Material 3).
- d1) Werten Sie das Diagramm in Abbildung 3 (Material 3) aus. Erläutern Sie, warum im Diagramm kein Peak für die Vergoldung erkennbar ist. Beantworten Sie die Frage des Kunsthändlers. (7 BE)
- d2) Erläutern Sie Interpretationschwierigkeiten, wenn man zur Analyse der Münze die Röntgenröhre aus Aufgabenteil c) verwendet (siehe auch Material 2). (2 BE)

**Profilfach Physik**

Thema: Quanten - Röntgenanalyse von Kunstwerken

---

**Material 1: Die Drehkristallmethode zur Aufnahme von Röntgenspektren**

Bei der Drehkristallmethode trifft ein Röntgenstrahl auf einen Kristall (Abbildung 1). Die vom Kristall reflektierte Strahlung wird mit einem Zählrohr registriert. Durch das Drehen des Kristalls wird der Einstrahlungswinkel  $\varphi$  variiert und jeweils mit dem Zählrohr die Strahlung registriert.

Der hier verwendete Lithium-Fluorid-Kristall hat einen Netzebenenabstand von  $d = 201 \text{ pm}$ .

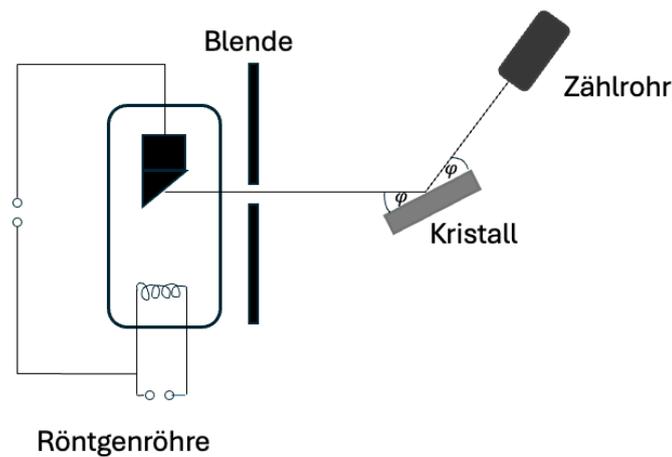


Abbildung 1: Aufbauskitze Drehkristallmethode

**Material 2: Röntgenspektrum**

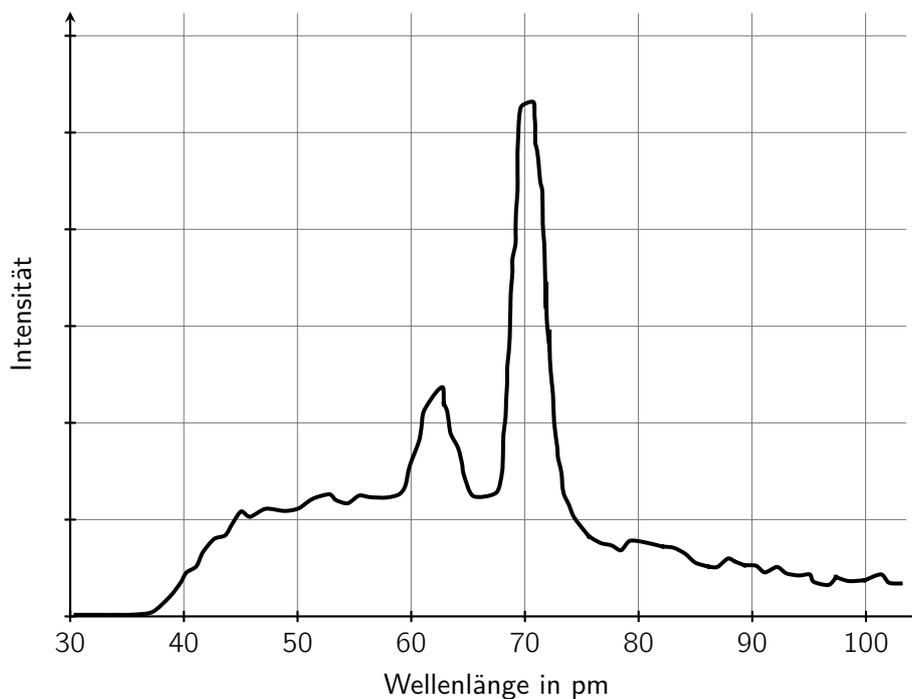


Abbildung 2: Röntgenspektrum einer Molybdän-Anode

**Profilfach Physik**

Thema: Quanten - Röntgenanalyse von Kunstwerken

---

**Material 3: Röntgenfluoreszenzanalyse**

Bei der Röntgenfluoreszenzanalyse von Kunstwerken werden Untersuchungsobjekte mit kontinuierlicher Röntgenstrahlung bestrahlt. Durch die eingestrahlten Photonen werden Atome angeregt und senden bei der Rückkehr in den ursprünglichen Zustand Photonen mit einer materialspezifischen charakteristischen Energie aus. Die vom Material emittierte Strahlung wird mit dem Zählrohr registriert und analysiert. Es gilt das Moseley-Gesetz.

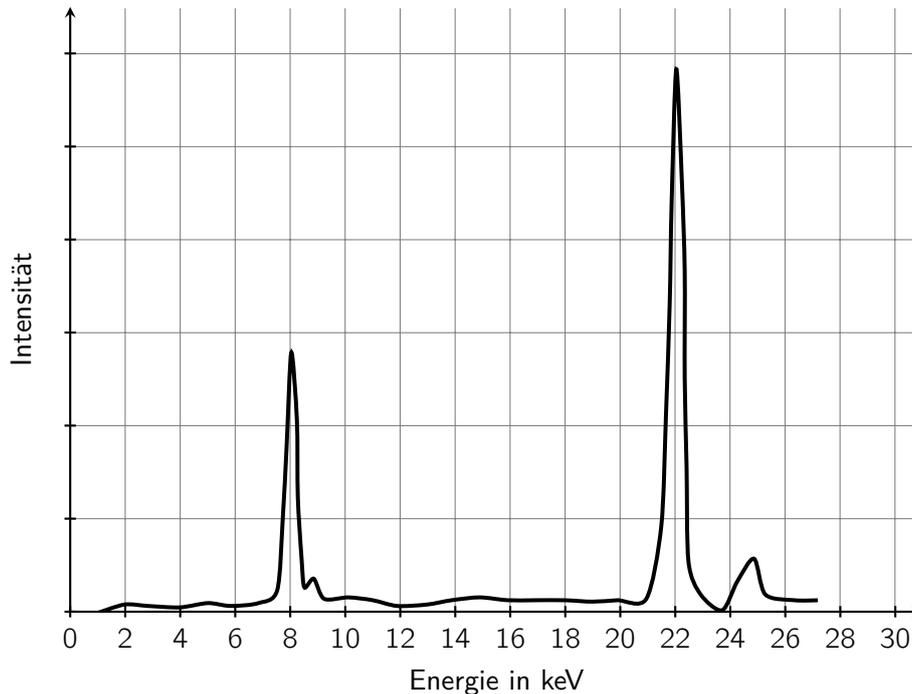
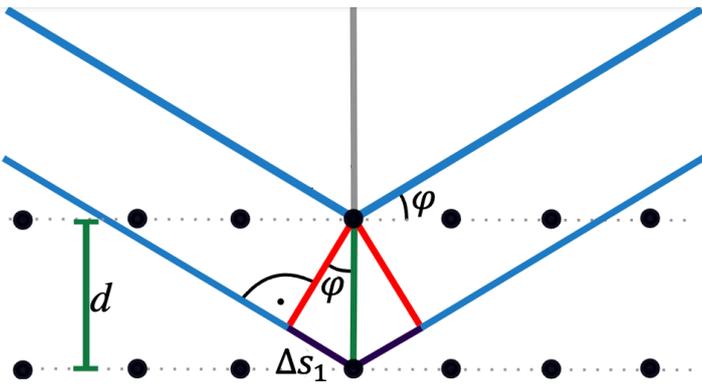


Abbildung 3: Röntgenfluoreszenzanalyse der Münze

**Profilfach Physik**

Thema: Quanten - Röntgenanalyse von Kunstwerken

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

Erwartete Schülerleistung	Bewertung Zuordnung		
	I	II	III
<p><b>a1)</b> An der Heizwendel entsteht beim Anlegen der Heizspannung eine Elektronenwolke. Zwischen Heizwendel und Anode wird eine hohe Beschleunigungsspannung angelegt. Die Elektronen werden durch das elektrische Feld in Richtung der Anode beschleunigt und treffen auf diese. An der Anode werden die Elektronen gebremst, so dass Röntgenphotonen abgestrahlt werden. Durch die schräge Form der Anode wird die Röntgenstrahlung gerichtet abgestrahlt. Der Aufbau befindet sich in einem evakuierten Glaskolben, damit Elektronen frei beweglich sind.</p>	6		
<p><b>a2)</b> Skizze:</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Für konstruktive Interferenz muss für den Gangunterschied gelten <math>\Delta s = k \cdot \lambda</math> mit <math>k \in \mathbb{N}</math>.</li> <li>▪ Der Gangunterschied <math>\Delta s</math> setzt sich aus den zwei gleich langen Katheten <math>\Delta s_1</math> zusammen: <math>\Delta s = 2 \cdot \Delta s_1</math>.</li> <li>▪ Für das rechtwinklige Dreieck gilt:             <math display="block">\sin(\varphi) = \frac{\Delta s_1}{d} \Leftrightarrow d \cdot \sin(\varphi) = \Delta s_1</math> </li> <li>▪ Aus der Bedingung <math>k \cdot \lambda = \Delta s</math> (<math>k \in \mathbb{N}</math>) für konstruktive Interferenz folgt:             <math display="block">k \cdot \lambda = \Delta s</math> <math display="block">k \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin(\varphi)</math> </li> </ul>	2		4

**Profilfach Physik**

Thema: Quanten - Röntgenanalyse von Kunstwerken

Erwartete Schülerleistung	Bewertung Zuordnung		
	I	II	III
<p><b>b1)</b> [Hinweis: Geeignete Markierung des Bremsspektrums, der charakteristischen Peaks und der kurzwelligen Grenze.]</p> <p>Kontinuierliche Strahlung/Bremsspektrum:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Die beschleunigten Elektronen werden im elektrischen Feld der Anodenanode gebremst. Dadurch entstehen Röntgenphotonen.</li> <li>▪ Die Röntgenphotonen des Bremsspektrums können alle möglichen Energiebeträge haben bis hin zur maximalen kinetischen Energie des Elektrons, welches vollständig gebremst wird.</li> <li>▪ Die Röntgenphotonen maximaler Energie haben die maximal mögliche Frequenz, also die minimal mögliche Wellenlänge. Dies erklärt die kurzwellige Grenze des kontinuierlichen Spektrums.</li> </ul> <p>Charakteristische Strahlung:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Die beschleunigten Elektronen der Röntgenröhre können einzelne, an die Atomkerne des Anodenmaterials gebundene Elektronen entfernen.</li> <li>▪ Beim Auffüllen dieser Lücken in den unteren Schalen der Elektronenhülle durch Elektronen der oberen Schalen wird die Energiedifferenz <math>\Delta E</math> in Form eines Photons abgegeben.</li> <li>▪ Es entstehen Peaks bei der Wellenlänge des Photons. Die Wellenlänge hängt von der für das Material spezifischen Energiedifferenz ab.</li> </ul>	3		
		3	
			3

**Profilfach Physik**

Thema: Quanten - Röntgenanalyse von Kunstwerken

Erwartete Schülerleistung	Bewertung Zuordnung		
	I	II	III
<p><b>b2)</b> Beschleunigungsspannung</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Die Grenzwellenlänge wird dem Diagramm entnommen: <math>\lambda_{min} \approx 38 \text{ pm}</math>.</li> <li>Hier wird die gesamte Energie <math>E_{kin} = e \cdot U</math> eines Elektrons auf ein Photon übertragen.</li> <li>Umstellen: <math>U = h \cdot \frac{c}{e \cdot \lambda_{min}}</math></li> <li>Einsetzen:</li> </ul> $U = h \cdot \frac{c}{e \cdot \lambda_{min}}$ $\approx 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} \cdot \frac{2,9979 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 38 \cdot 10^{-12} \text{ m}}$ $\approx 32\,630 \text{ V} \approx 33 \text{ kV}$		3	
<p><b>c)</b> Dem Periodensystem im Formeldokument entnimmt man, dass Molybdän die Kernladungszahl 42 hat. Gemäß Formeldokument lautet das Moseley-Gesetz:</p> $E_{K_\alpha} = 13,6 \text{ eV} \cdot \frac{3}{4} \cdot (Z - 1)^2$ $= 13,6 \text{ eV} \cdot \frac{3}{4} \cdot (42 - 1)^2$ $= 17\,146,2 \text{ eV} \approx 2,7471 \cdot 10^{-15} \text{ J}$ <p>Für ein Photon gilt:</p> $E = h \cdot f \Leftrightarrow f = \frac{E}{h}$ <p>[Zwischenergebnis: <math>f \approx 4,15 \cdot 10^{18} \text{ Hz}</math>] und es gilt: <math>c = \lambda \cdot f \Leftrightarrow \lambda = \frac{c}{f}</math>. Somit ergibt sich für die Wellenlänge der Röntgenstrahlung:</p> $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{c \cdot h}{E_{K_\alpha}}$ $\approx \frac{2,9979 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}}{2,7471 \cdot 10^{-15} \text{ J}} \approx 7,231 \cdot 10^{-11} \text{ m}$			



**Profilfach Physik**

Thema: Quanten - Röntgenanalyse von Kunstwerken

---

**Standardbezug:**

Teilaufgabe	Kompetenzbereich			
	S	E	K	B
a1	5			
a2	3			
b1	1			
b2	7	4		
c	7			
d1	3		3	
d2				6

# Auswahlbogen für Prüflinge

## Physik

Name: \_\_\_\_\_  
(in Druckbuchstaben)

Ich habe aus den vier zur Wahl gestellten Aufgaben die folgenden drei Aufgaben gewählt:

- Aufgabe 1: Wellen - Reduzierung von Schall durch Schall
- Aufgabe 2: Felder - Füllstandsmessung
- Aufgabe 3: Felder - Sicherheit von Deichen
- Aufgabe 4: Quanten - Röntgenanalyse von Kunstwerken

Hinweis: **Es müssen genau drei Kreuze gesetzt werden.** Nur die Bearbeitungen **dieser drei** angekreuzten Aufgaben fließen in die Bewertung der Abiturprüfung ein.

---

Unterschrift des Prüflings