

Schallwellen bei einer Orgel

Die sogenannten Labialpfeifen einer Orgel erzeugen Töne, indem Luft von unten an einer Öffnung vorbei in die Pfeife geblasen wird. Innerhalb der Pfeife bilden sich stehende Wellen aus, wobei die Frequenz der erzeugten Töne abhängig von den Abmessungen der Pfeife ist. Weiterhin überlagern sich die von der Pfeife ausgehenden Schallwellen im Kirchenraum, wodurch es zu verschiedenen Phänomenen im Höreindruck kommt. Die physikalischen Grundlagen dieser Phänomene werden im Folgenden betrachtet.

Verwenden Sie, sofern nicht anders angegeben, für die Schallgeschwindigkeit in Luft $c_{\text{Luft}} = 340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Aufgaben

- 1.1 In Material 1 sind das Ort-Elongation-Diagramm und das Zeit-Elongation-Diagramm einer sich ausbreitenden Schallwelle dargestellt.
Geben Sie die Wellenlänge und die Schwingungsdauer dieser Welle an und berechnen Sie ihre Frequenz.
Zeigen Sie, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwelle den oben angegebenen Wert für die Schallgeschwindigkeit hat.

(5 BE)

- 1.2 Organisten nehmen einen deutlich bemerkbaren Zeitunterschied zwischen dem Drücken einer Taste und dem Eintreffen des Tons am Ohr wahr. Verzögerungen durch die Mechanik der Orgel sollen vernachlässigt werden.
Berechnen Sie die Zeit, die ein Ton für einen Abstand von 15 m zwischen der Pfeife und dem Ohr des Organisten benötigt.

(2 BE)

- 1.3 Eine Orgel muss in regelmäßigen Abständen nachgestimmt werden. Neben Veränderungen der Pfeifenlänge durch Feuchtigkeits- oder Temperaturschwankungen verändert sich auch die Schallgeschwindigkeit mit der Temperatur ϑ in $^{\circ}\text{C}$ nach der Gesetzmäßigkeit

$$c(\vartheta) = c_0 \cdot \sqrt{1 + \frac{\vartheta}{273,15^{\circ}\text{C}}}.$$

Dabei entspricht c_0 der Schallgeschwindigkeit in Luft bei 0°C mit $c_0 = 331,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Berechnen Sie die Schallgeschwindigkeit bei einer Raumtemperatur von 18°C .

Bestimmen Sie den Temperaturbereich, in dem die Abweichung der Schallgeschwindigkeit maximal 2 % zur Schallgeschwindigkeit bei 0°C beträgt.

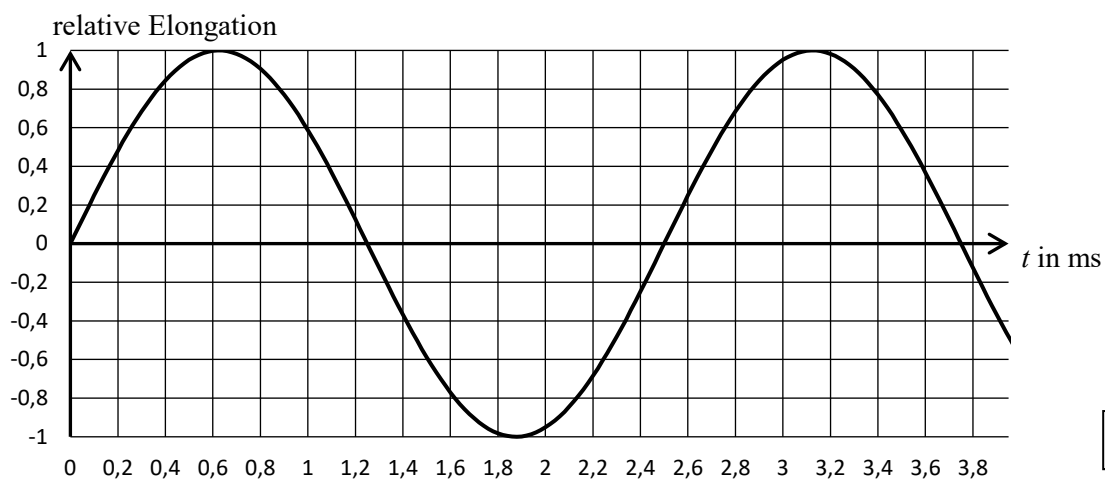
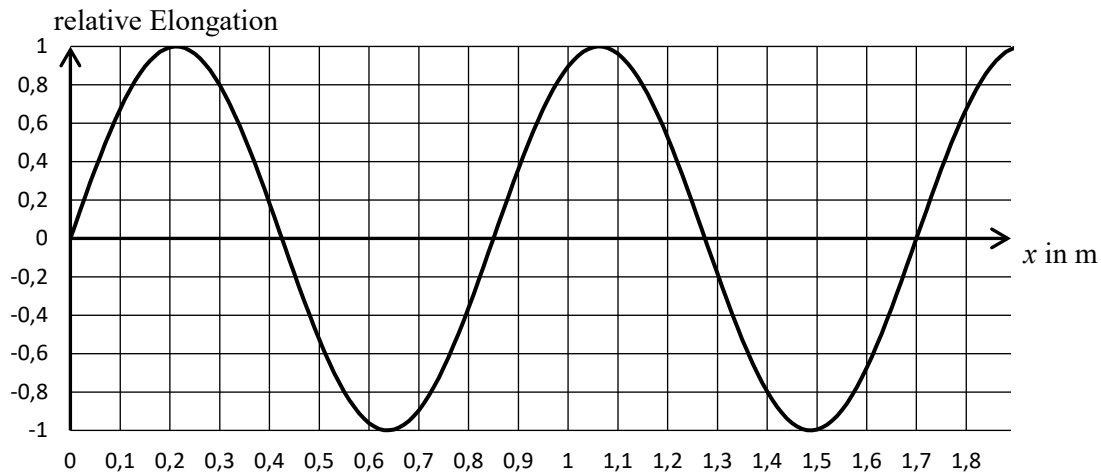
(6 BE)

- 2 Die sich in einer Orgelpfeife (Material 2) ausbildenden stehenden Wellen besitzen auf der linken Seite einen Geschwindigkeitsbauch. Auf der rechten Seite unterscheidet man zwischen gedackten und offenen Pfeifen. Bei einer gedackten Pfeife ist das obere Ende mit einem Deckel verschlossen und daher befindet sich dort ein Geschwindigkeitsknoten. Der charakteristische Klang einer Orgelpfeife entsteht durch die Mischung von Grundton und Obertönen mit unterschiedlichen Intensitäten. Grundton und Obertöne werden üblicherweise als Grundschwingung und Oberschwingungen bezeichnet.

- 2.1 Skizzieren Sie die Grundschiwingung und die ersten beiden Oberschwingungen einer gedackten Pfeife in Material 2.
Ermitteln Sie die Wellenlängen der Grundschiwingung und der ersten beiden Oberschwingungen einer stehenden Welle in einer gedackten Pfeife der Länge $L = 1,5 \text{ m}$.
(8 BE)
- 2.2 Ermitteln Sie den prozentualen Längenunterschied einer offenen Pfeife zu einer gedackten Pfeife bei gleicher Frequenz der Grundschiwingung f_0 .
Begründen Sie, dass bei einer gedackten Pfeife keine Oktave (Schwiwingung mit doppelter Frequenz) als Oberschwiwingung zum Grundton erzeugt werden kann.
(5 BE)
- 2.3 In der Praxis des Pfeifenbaus zeigt sich, dass sich der Durchmesser einer offenen Pfeife auf die Wellenlänge der Grundschiwingung auswirkt. Es wurde nun der Einfluss des Pfeifendurchmessers d auf die Wellenlänge λ der Grundschiwingung einer $1,5 \text{ m}$ langen Pfeife untersucht. Die Daten der Messreihe sind im Durchmesser-Wellenlängen-Diagramm in Material 3 abgebildet. Bestimmen Sie die Gleichung der Ausgleichsgeraden durch die Messpunkte.
Deuten Sie die beiden Parameter der Geradengleichung im Sachzusammenhang.
Entscheiden und begründen Sie, ob der Ton mit zunehmendem Durchmesser einer Pfeife durch den in Material 3 dargestellten Effekt höher oder tiefer wird.
(8 BE)
- 3 Da der Ton einer bestimmten einzelnen Pfeife im Orgelklang zu leise ist, wird eine zweite gleiche Pfeife zusätzlich aufgebaut. In Material 4 ist die Situation in einem Kirchenraum dargestellt, in dem die zwei Pfeifen mit derselben Frequenz $f = 1760 \text{ Hz}$ ertönen. Nehmen Sie für die Aufgaben 3.1 bis 3.3 an, dass die beiden Pfeifen in Phase schwingen.
- 3.1 Obwohl sich Person 2 näher an den Pfeifen befindet als Person 3, kann die Lautstärke für Person 3 größer sein als die Lautstärke für Person 2.
Erklären Sie den Lautstärkeunterschied qualitativ.
(4 BE)
- 3.2 Berechnen Sie den Abstand a zwischen Person 1 und Person 3, wenn diese beiden Personen im Lautstärkemaximum 1. bzw. 2. Ordnung sitzen. Dabei kann $e \gg d_{\text{pf}}$ angenommen werden.
(5 BE)
- 3.3 Untersuchen Sie die Auswirkung der Verringerung des Abstands d_{pf} der zwei Pfeifen auf die Lage der Maxima und Minima am Ort der Sitzbank.
(2 BE)
- 3.4 Erklären Sie mithilfe von Material 5, wie es dazu kommen kann, dass bei der Verwendung von zwei Pfeifen eine Verringerung der Lautstärke auftritt. Untersuchen Sie, wie sich der Höreindruck verändert, wenn sich der Graph B der Schwiwingung der zweiten Pfeife geringfügig nach links verschiebt.
(5 BE)

Material 1

Ort-Elongation-Diagramm und Zeit-Elongation-Diagramm



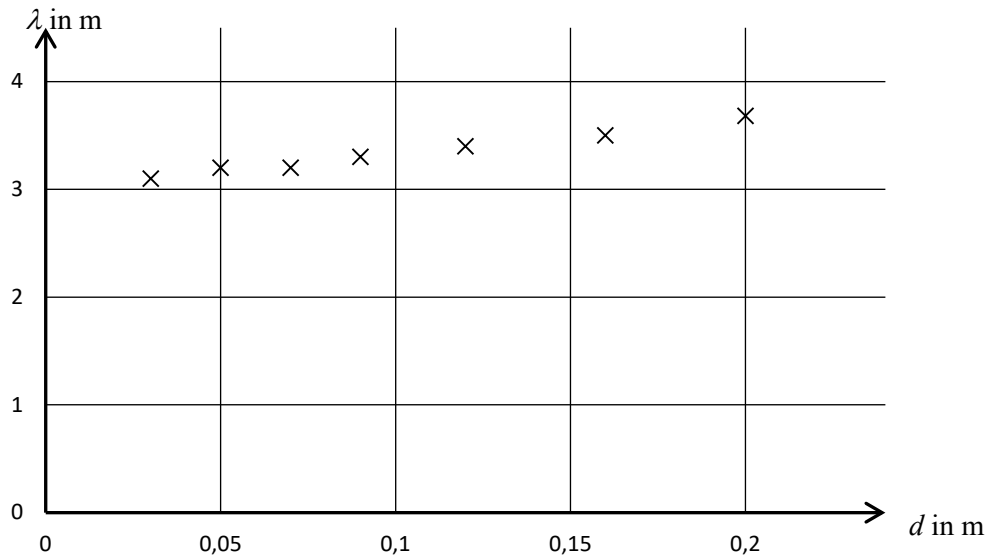
Material 2

Abbildungen einer gedackten Orgelpfeife zum Einzeichnen der stehenden Wellen

| | |
|-------------------|--|
| Grundschwingung | |
| 1. Oberschwingung | |
| 2. Oberschwingung | |

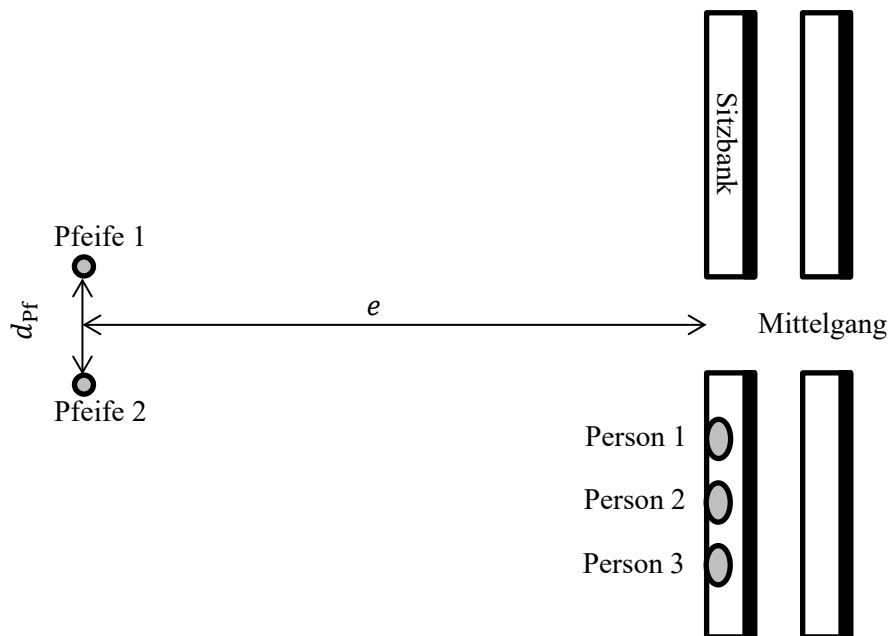
Die Orgelpfeife ist um 90° gedreht dargestellt. Das obere Ende der Orgelpfeife ist hier rechts.

Material 3

Abhängigkeit der Wellenlänge λ vom Durchmesser d der Pfeife

Material 4

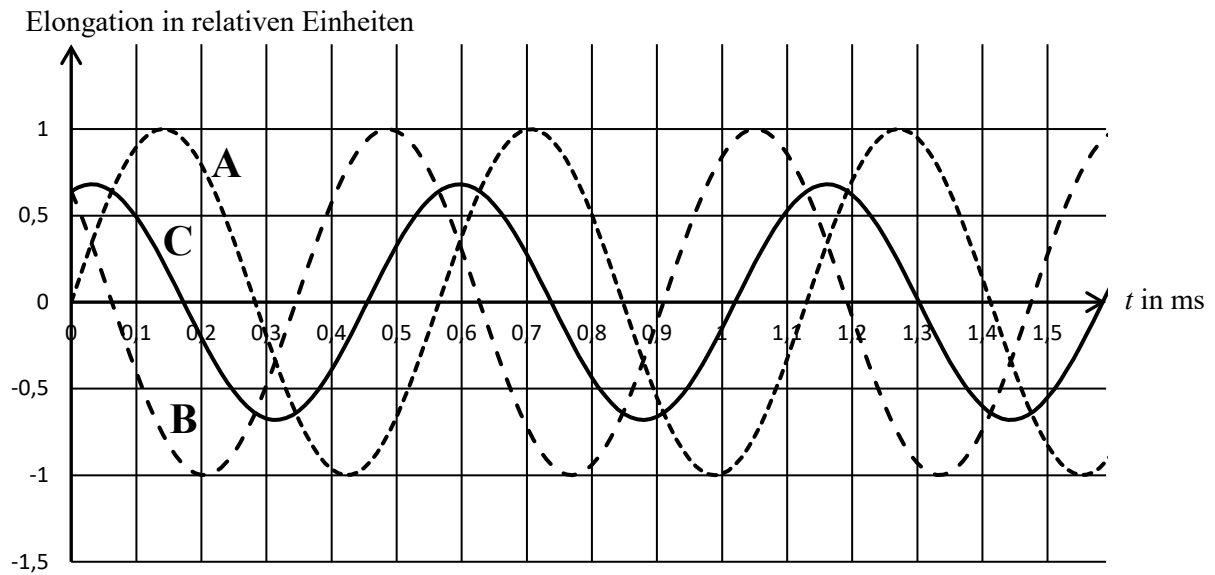
Anordnung von Pfeifen und Personen in einer Kirche



Abstand der beiden Pfeifen: $d_{pf} = 1,5 \text{ m}$
 Abstand Pfeife–Sitzbank: $e = 16 \text{ m}$

Material 5

Elongation der Schwingung an einem Ort in der Kirche



- A: nur erste Pfeife ertönt
B: nur zweite Pfeife ertönt
C: beide Pfeifen ertönen gleichzeitig