

# Klassische Experimentalphysik WS 2025/26

## Klausur 1

Montag, 02.03.2026

---

Name:

Matrikelnr.:

---

Aufgabe 1	/ 6 Punkte
Aufgabe 2	/ 5 Punkte
Aufgabe 3	/ 6 Punkte
Aufgabe 4	/ 6 Punkte
Aufgabe 5	/ 4 Punkte
Aufgabe 6	/ 3 Punkte
Gesamt	/ 30 Punkte
Note	

### Bitte beachten Sie:

- Schreiben Sie leserlich Ihren Namen und Matrikelnummer
  - auf dieses Deckblatt in die dafür vorgesehenen Felder
  - oben auf jedes Bearbeitungsblatt

**Es werden nur Blätter gewertet, auf denen Name und Matrikelnummer stehen.**

- Maximale Bearbeitungszeit: 2 Stunden
- Legen Sie ihren Studentenausweis neben sich auf den Tisch, sodass er während der Klausur kontrolliert werden kann.
- Bearbeiten Sie jede Aufgabe auf einem eigenen Blatt.
- Es sind keine Hilfsmittel wie Formelsammlung oder Taschenrechner erlaubt.
- Es bietet sich immer an, so lange wie möglich symbolisch zu rechnen und erst am Ende, sofern verlangt, Zahlen einzusetzen.

- Bitte schreiben Sie leserlich und vergessen Sie nicht die Angabe der Einheiten.
- Falls Sie ein Zwischenergebnis benötigen, dieses jedoch nicht haben, rechnen Sie symbolisch mit der Größe weiter.
- Klausureinsicht wird am **05.03.26 um 14 Uhr in Raum 3/1 statt finden.**

**Aufgabe 1 – Der harmonische Oszillator zweier Massen****(6 Punkte)**

Wir betrachten den harmonischen Oszillator, der durch die beiden Massen  $m_1$  und  $m_2$  gebildet wird, die mit einer Feder der Federkonstante  $k$  verbunden sind. Ihr Abstand ist in Ruhe  $l_0$ . Der Aufbau befindet sich im kräftefreien Raum (keine Gravitation, keine Reibung). Die beiden Massen sollen nicht umeinander rotieren, sondern nur auf der Verbindungsachse schwingen.

- (a) Stellen Sie die Bewegungsgleichungen für beide Massen auf.
- (b) Wie lautet die Bewegungsgleichung im Schwerpunktsystem?
- (c) Berechnen Sie die Schwingungsfrequenz  $\omega$  in Abhängigkeit von  $m_1$  und  $m_2$ . Was passiert, wenn eine der Massen unendlich groß wird und was, wenn beide Massen gleich groß sind?

**Lösung**

- (a) *Stellen Sie die Bewegungsgleichungen für beide Massen auf.*

Die Schwingungskoordinate sei in x-Richtung definiert. Für die Federkraft die zwischen beiden Massen  $m_1$  und  $m_2$  aufgespannt ist, gilt folgendes

$$F_{12} = -F_{21} = -k(x_1 - x_2 - l_0)$$

und mit dieser Kraft als einzige wirkende Kraft ergeben sich folgende Bewegungsgleichungen

$$m_1 \ddot{x}_1 + F_{12} = m_1 \ddot{x}_1 - k(x_1 - x_2 - l_0) = 0 \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + F_{21} = m_2 \ddot{x}_2 + k(x_1 - x_2 - l_0) = 0 \quad (2)$$

- (b) *Wie lautet die Bewegungsgleichung im Schwerpunktsystem?*

Für Bewegungsgleichung im Schwerpunktsystem kann man Gleichung 1 umstellen zu

$$\ddot{x}_1 = -\frac{k}{m_1}(x_1 - x_2 + l_0) = \frac{k}{m_1}q$$

und Gleichung 2 zu

$$\ddot{x}_2 = -\frac{k}{m_2}(x_2 - x_1 - l_0) = -\frac{k}{m_2}q.$$

Hier wurde die neue Variable  $q = (x_2 - x_1 - l_0)$  eingeführt.

Wenn man sich nun die Relativbewegung über den Abstand anschaut  $r = x_2 - x_1$ , bzw.  $\ddot{r} = \ddot{x}_2 - \ddot{x}_1 = \ddot{q}$ , da  $l_0$  eine Konstante ist, erhält man folgende Gleichung

$$\ddot{r} = -\frac{k}{m_2}q - \frac{k}{m_1}q = -kq \left( \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)$$

$$\ddot{q} = -kq \cdot \frac{1}{\mu} \quad \text{mit} \quad \mu = \left( \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \right)$$

$$\mu \ddot{q} + kq = 0$$

- (c) Berechnen Sie die Schwingungsfrequenz  $\omega$  in Abhängigkeit von  $m_1$  und  $m_2$ . Was passiert, wenn eine der Massen unendlich groß wird und was, wenn beide Massen gleich groß sind? Dies entspricht der allgemeinen Lösung eines harmonischen Oszillators, dass auch über den Exponentialansatz berechnet werden könnte als

$$\ddot{q} + \frac{k}{\mu}q = 0 = \ddot{q} + \omega_0^2 q$$

Die Formel für  $\omega_0$  betrachtet werden und man erhält

$$\omega_0^2 = k \left( \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)$$

$$\omega_0 = \sqrt{k \left( \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \right)} = \sqrt{\frac{k}{m_2} \left( 1 + \frac{m_2}{m_1} \right)}.$$

Für die Betrachtung der Fälle gilt

- Wenn  $m_1 \rightarrow \infty$  :  $\omega_0 \rightarrow \sqrt{\frac{k}{m_2}}$
- Wenn  $m_2 \rightarrow \infty$  :  $\omega_0 \rightarrow \sqrt{\frac{k}{m_1}}$
- Wenn beide Massen gleich groß sind,  $m_1 = m_2 = m$  dann gilt  $\omega_0 = \sqrt{\frac{2k}{m}}$

## Aufgabe 2 – Kugel-Umlenker

(5 Punkte)

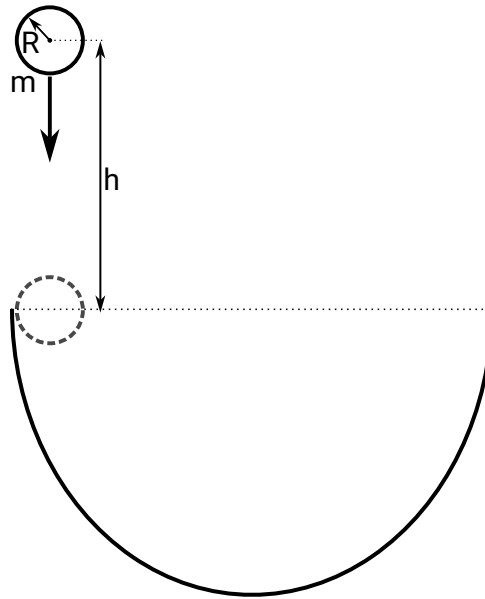
Eine ruhende Kugel der Masse  $m$  und des Radius  $R$  wird losgelassen und fällt im freien Fall (Erdbeschleunigung  $g$ , keine Reibung) eine Höhe  $h$  bis sie auf eine U-förmige Bahn fällt, die die Bewegung der Kugel wieder nach oben umlenkt (siehe Bild). Die Kugel rollt dabei auf der Bahn. Am anderen Ende der Bahn fliegt sie wieder frei nach oben.

- Handelt es sich bei den auftretenden Kräften um konservative Kräfte? Argumentieren Sie.
- Stellen Sie die Gesamtenergie der Kugel in Abhängigkeit der physikalischen Parameter des Systems dar.
- Wie hoch fliegt die Kugel nach der Umlenkung?

## Lösung

- Handelt es sich bei den auftretenden Kräften um konservative Kräfte? Argumentieren Sie.

Da keine dissipativen Kräfte wirken (keine Gleitreibung, kein Luftwiderstand), bleibt die mechanische Gesamtenergie des Systems erhalten. Die Gewichtskraft ist konservativ und kann durch das Potential  $U = mgh$  beschrieben werden. Die zusätzlich auftretenden Kontaktkräfte der Bahn (Normalkraft und ggf. Haftreibung) verrichten beim reinen Rollen keine Arbeit: Die Normalkraft steht senkrecht zur Bewegungsrichtung und die Haftreibung leistet bei Rollbedingung keine Arbeit, da der Berührungspunkt relativ zur Bahn momentweise



in Ruhe ist. Daher wird die potenzielle Energie ausschließlich in mechanische Energieformen umgewandelt (Translations- und Rotationsenergie), ohne dass Energie in Wärme oder andere innere Energieformen übergeht. Somit ist die mechanische Gesamtenergie konstant.

- (b) Stellen Sie die Gesamtenergie der Kugel in Abhängigkeit der physikalischen Parameter des Systems dar.

Die Gesamtenergie ist gegeben als

$$E_{ges} = E_{pot} + E_{kin} + E_{rot} = mgh + \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}\Theta\omega^2$$

$\omega$  kann hier als  $\omega = \frac{v}{r}$  ersetzt werden und Theta kann entweder gewusst sein oder aufwändig berechnet werden über

$$\begin{aligned}\Theta &= \int r^2 dm \\ &= \rho \int_0^R \int_0^{2\pi} \int_0^\pi dr d\varphi d\theta r^2 \sin(\theta) \cdot r^2 \sin^2 \theta \\ &= \rho \frac{1}{5} R^5 2\pi \int_0^\pi d\theta \sin^3 \theta.\end{aligned}$$

Das Integral über Theta kann durch Substitution als  $u = \cos \theta$  und  $du = -\sin \theta d\theta$  und den neuen Grenzen  $u \in [1, -1]$  gelöst werden

$$\begin{aligned}\int_0^\pi d\theta \sin^3 \theta &= \int_0^\pi d\theta \sin \theta (1 - \cos^2 \theta) \\ &= \int_{-1}^1 du (1 - u^2) = \left[ u - \frac{1}{3}u^3 \right]_{-1}^1 \\ &= 1 - \frac{1}{3} + 1 - \frac{1}{3} = \frac{4}{3}.\end{aligned}$$

Damit folgt für  $\Theta$  durch Einsetzen von  $V = \frac{4}{3}\pi R^3$

$$\Theta = \rho \frac{R^5}{5} 2\pi \frac{4}{3} = \frac{2}{5}mR^2$$

(c) *Wie hoch fliegt die Kugel nach der Umlenkung?*

Am Ende des Umlenkens hat sich die potenzielle Energie in kinetische Energie und Rotation umgewandelt. Hieraus folgt für die Geschwindigkeit der Kugel

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2} \frac{2}{5} mR^2 \frac{v^2}{R^2} = \frac{7}{10}mv^2$$

$$v^2 = \frac{10}{7}gh.$$

Die Höhe ist ab diesem Punkt durch die Umwandlung von kinetischer in potenzielle Energie gegeben als

$$mgH = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \frac{10}{7}mgh$$

$$H = \frac{5}{7}h$$

### Aufgabe 3 – Gravitation

(6 Punkte)

Im Sonnensystem bewegen sich die Planeten unter dem Einfluss der Gravitationskraft der Sonne auf nahezu elliptischen Bahnen. Die Erde benötigt für einen Umlauf um die Sonne ein Jahr, der Jupiter etwa 12 Jahre.

Im Folgenden können die Bahnen näherungsweise als Keplerbahnen betrachtet werden.

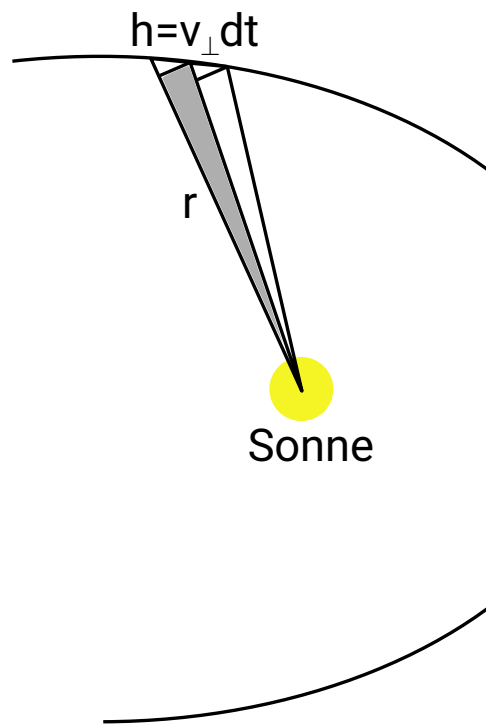
- Nennen Sie die drei Keplerschen Gesetze.
- Zeigen Sie, dass das 2. Keplersche Gesetz die Erhaltung des Drehimpulses ist. Für die Rechnung fertigen Sie dazu eine Skizze an, die die infinitesimale Flächenänderung  $dA$  mit der infinitesimalen Zeitänderung  $dt$  verknüpft.
- Wie weit ist der Jupiter im Vergleich zur Erde von der Sonne entfernt? Leiten Sie die Formel her und geben Sie den auf eine ganze Zahl gerundeten Zahlenwert an.

### Lösung

(a) *Nennen Sie die drei Keplerschen Gesetze.*

- Die Planeten bewegen sich auf Ellipsen, in deren Brennpunkt die Sonne steht.
  - Der Radiusvektor (Fahrstrahl) von der Sonne zum Planeten überstreicht in gleicher Zeit gleiche Fläche.
  - Die Quadrate der Umlaufzeiten der Planeten verhalten sich wie die dritten Potenzen ihrer großen Halbachsen.
- (b) *Zeigen Sie, dass das 2. Keplersche Gesetz die Erhaltung des Drehimpulses ist. Für die Rechnung fertigen Sie dazu eine Skizze an, die die infinitesimale Flächenänderung  $dA$  mit der infinitesimalen Zeitänderung  $dt$  verknüpft.*

Die infinitesimale Fläche kann als Dreieck genähert werden, wobei wie in Skizze gezeigt Grundseite der Radius sei und die Höhe der darauf senkrecht stehende Geschwindigkeitsbetrag pro infinitesimalen Zeitabschnitt wiedergibt. Daraus folgt



$$\begin{aligned} \text{konst.} &= \frac{dA}{dt} = \frac{rv_{\perp}dt}{2dt} = \frac{rv_{\perp}}{2} \\ &= \frac{mrv_{\perp}}{2m} = \frac{L}{2m} \end{aligned}$$

Dabei wurde genutzt das für senkrechte Vektoren das Kreuzprodukt sich vereinfacht zu

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} \rightarrow L = rmv_{\perp}$$

Der Drehimpuls ist dabei erhalten. Lösung aus der Vorlesung ist gegeben über die Kreuzprodukte mit

In  $dt$  überstrichene Fläche  $d\vec{A}$

$$\begin{aligned} d\vec{A} &= \frac{1}{2}(\vec{r} \times \vec{v}dt) = \frac{1}{2m}(\vec{r} \times m\vec{v}dt) \\ d\vec{A} &= \frac{1}{2m}(\vec{r} \times \vec{p}dt) = \frac{1}{2m}\vec{L}dt \end{aligned}$$

(c) *Wie weit ist der Jupiter im Vergleich zur Erde von der Sonne entfernt? Leiten Sie die Formel her und geben Sie den auf eine ganze Zahl gerundeten Zahlenwert an.*

Die große Halbachse zwischen Erde und Sonne ist gegeben als  $a_E = 1 \text{ AE}$ . Das Verhältnis ist gegeben durch

$$\begin{aligned} \frac{T_E^2}{T_J^2} &= \frac{a_E^3}{a_J^3} \\ a_J &= \sqrt[3]{a_E^3 \cdot \frac{T_J^2}{T_E^2}} \\ a_J &= \sqrt[3]{(1 \text{ AE})^3 \cdot \frac{(12 \text{ Jahre})^2}{(1 \text{ Jahr})^2}} = \sqrt[3]{144} \approx 5 \text{ AE} \end{aligned}$$

**Aufgabe 4 – Vergleich Lot und freier Fall****(6 Punkte)**

Ein 490.5 m hoher Turm steht am Äquator auf Meereshöhe ( $h_0 = 0$ ). Im Inneren des Turms hängt ein Lot vom oberen Ende bis zum Boden. Mithilfe des Lots markieren wir die Senkrechte und kennzeichnen den Auftreffpunkt am Boden durch ein Kreuz. Anschließend wird das Lot entfernt. Eine Kugel wird nun vom ehemaligen Aufhängepunkt des Lots ohne Anfangsgeschwindigkeit fallen gelassen ( $g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ ).

- Wird die Kugel das Kreuz treffen? Argumentieren Sie.
- Berechnen Sie eine mögliche Abweichung des Treffpunkts vom Kreuz am Boden (Formel) und schätzen die Größenordnung der Abweichung ab.
- Würde sich die Situation ändern, wenn der Turm am Nordpol stehen würde? Argumentieren Sie.

**Lösung**

- Wird die Kugel das Kreuz treffen? Argumentieren Sie.*

Die Kugel trifft das markierte Kreuz nicht, sondern landet leicht östlich davon. Im mit rotierendem Bezugssystem der Erde wirkt auf die fallende Kugel die Corioliskraft. Diese ist proportional zur Geschwindigkeit der Kugel und steht senkrecht zur Bewegungsrichtung. Während des Falls nimmt die vertikale Geschwindigkeit zu, wodurch eine horizontale Beschleunigung nach Osten entsteht. Die Kugel wird daher seitlich abgelenkt. Anschaulich kann man das auch im Inertialsystem erklären: Am oberen Ende des Turms besitzt die Kugel aufgrund der Erdrotation eine größere Tangentialgeschwindigkeit als der Boden, da sie sich weiter vom Erdmittelpunkt entfernt befindet. Beim Loslassen behält sie diese größere Ostgeschwindigkeit bei. Da der Boden sich mit geringerer Geschwindigkeit bewegt, eilt die Kugel ihm während des Falls nach Osten voraus. Das zuvor verwendete Lot zeigt die Richtung der effektiven Schwerebeschleunigung (Gravitation plus Zentrifugalanteil). Es hängt daher entlang der lokalen Vertikalen. Die fallende Kugel wird jedoch zusätzlich durch die Corioliskraft beeinflusst und folgt deshalb nicht exakt dieser Lotrichtung.

- Berechnen Sie eine mögliche Abweichung des Treffpunkts vom Kreuz am Boden (Formel) und schätzen die Größenordnung der Abweichung ab.*

Zwei Lösungsvarianten werden als richtig anerkannt: Im rotierenden System über die Corioliskraft und dann Integration für  $x$  oder im Inertialsystem über die Tangentialgeschwindigkeiten mit konstanter Geschwindigkeit in  $x$  Richtung. **Fall 1:** Die Fallzeit der Kugel ist durch eine gleichmäßige beschleunigte Bewegung mit Beschleunigung als Erdbeschleunigung gegeben. Es gilt

$$z(t_F) = h = \frac{1}{2}gt^2$$

$$t_F = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

$$t_F = \sqrt{\frac{2 \cdot 490.5 \text{ m}}{9.81 \text{ m/s}^2}} = 10 \text{ s}$$

Mit dieser Zeit können wir die Beschleunigung in  $x$  Richtung durch die Corioliskraft berechnen als

$$F = m \cdot \ddot{x} = F_C = ma_C = -2m\omega \times \dot{z}$$

$\omega$  und  $z$  stehen am Äquator senkrecht aufeinander. Des Weiteren ist  $\dot{z}$  gegeben als  $\dot{z} = -gt$  (negativ aufgrund der Richtung in unserem System. und daraus folgt durch Integrieren der Beschleunigung für  $x$

$$\ddot{x} = 2\omega gt$$

$$\dot{x} = \omega gt^2$$

$$x = \frac{1}{3}\omega gt^3$$

$$x = \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{2\pi}{24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s}} \right) \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot (10 \text{ s})^3 \approx 0.25 \text{ m}$$

**Fall 2:** Die Geschwindigkeit in  $x$  Richtung ist gegeben als

$$v_x = r \times \omega$$

Die konstante Geschwindigkeitsänderung kann dann über die Höhe berechnet werden zu

$$\Delta v_x = h \cdot \omega$$

Die Fallzeit lässt sich wie in Fall 1 berechnen als

$$z = \frac{1}{2}gt^2 \rightarrow t = \sqrt{\frac{2h}{g}} = 10 \text{ s}$$

und die Abweichung in  $x$  Richtung folgt dann daraus als

$$x = \Delta v_x \cdot t = 490.5 \text{ m} \cdot \left( \frac{2\pi}{24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s}} \right) \cdot 10 \text{ s} = 0.35 \text{ m}$$

(c) *Würde sich die Situation ändern, wenn der Turm am Nordpol stehen würde? Argumentieren Sie.*

Ja, die Situation würde sich ändern. Die Kugel würde das Kreuz treffen, da in diesem Fall Bewegungsrichtung und  $\omega$  in die gleiche Richtung zeigen und somit das Kreuzprodukt für die Corioliskraft 0 wäre. Es wirkt also keine Kraft, die die Kugel aus der Vertikalen ablenkt.

## Aufgabe 5 – Seilwellen

(4 Punkte)

Jimmy Hendriks spielt seine E-Gitarre. Die A-Saite ist vorgespannt mit einer Kraft von 50 N und hat eine Länge von 50 cm. Er spielt einen A-Dur-Akkord. Dabei schwingt die A-Saite mit einer Frequenz von 100 Hz in der Grundschiwingung.

- Geben Sie die Wellengleichung einer gespannten Saite an.
- Bestimmen Sie die lineare Massendichte  $\mu$  der Saite.
- Jimmy Hendriks zieht den Tremolo-Hebel der E-Gitarre und der Akkord wird von einem A-Dur Akkord zu einem H-Dur Akkord. Dabei erhöht sich die Frequenz um einen ganzen Ton, was einem Faktor  $\sqrt[6]{2}$  entspricht. Um welchen Faktor vergrößert sich die Kraft auf der A-Saite?

## Lösung

---

- (a) Geben Sie die Wellengleichung einer gespannten Saite an.

Die Wellengleichung einer gespannten Saite ist gegeben als

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}, x \in (0, L)$$

mit  $c = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$ , wobei  $F$  die Kraft und  $\mu$  die lineare Massendichte beschreibt.

- (b) Bestimmen Sie die lineare Massendichte  $\mu$  der Saite.

Die Formel folgt der Herleitung aus der Vorlesung

$$\begin{aligned} f &= \frac{\omega}{2\pi} \\ f_n &= \frac{ck_n}{2\pi} \\ f_n &= \frac{cn\pi}{2L\pi} \\ f_1 &= \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \\ \mu &= \frac{F}{(2Lf_1)^2} \\ \mu &= \frac{50 \text{ N}}{(2 \cdot 0.5 \text{ m} \cdot 100 \text{ Hz})^2} = 5 \times 10^{-3} \text{ kg/m} \end{aligned}$$

- (c) Jimmy Hendriks zieht den Tremolo-Hebel der E-Gitarre und der Akkord wird von einem A-Dur Akkord zu einem H-Dur Akkord. Dabei erhöht sich die Frequenz um einen ganzen Ton, was einem Faktor  $\sqrt[6]{2}$  entspricht. Um welchen Faktor vergrößert sich die Kraft auf der A-Saite?

Für die Proportionalität zwischen Kraft und Frequenz gilt aus der Formel  $f \propto \sqrt{F}$

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{F_2}{F_1}} &= \frac{f_2}{f_1} \\ F_2 &= \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2 \cdot F_1 = \left(\sqrt[6]{2}\right)^2 \cdot F_1 \\ F_2 &= \sqrt[3]{2} \cdot F_1 \approx 1.26 \cdot F_1. \end{aligned}$$

Die Kraft  $F_2$  ist 26 % größer als  $F_1$ .

## Aufgabe 6 – Blitz und Donner

(3 Punkte)

Es zieht ein Gewitter auf. Es blitzt und Sie hören den Donner 3 Sekunden nach dem Sie den Blitz gesehen haben. Die Schallgeschwindigkeit ist gegeben als  $c=340 \text{ m/s}$ .

- (a) Wie weit sind Sie ungefähr von dem Blitz entfernt?
- (b) Wir nehmen an, dass zusätzlich ein starker Wind mit der Geschwindigkeit  $100 \text{ km/h}$  aus Richtung des Gewitters weht. Erläutern Sie qualitativ den Einfluss des Windes und bestimmen Sie (falls vorhanden) die korrigierte Entfernung des Blitzes.

- (c) Um wie viel unterscheidet sich die Tonhöhe (Frequenz  $f$ ), des Donners für den Fall, mit und ohne Wind (Formel)?

## Lösung

---

- (a) *Wie weit sind Sie ungefähr von dem Blitz entfernt?*

Die Entfernung des Blitzes ist gegeben über die Schallgeschwindigkeit  $c$  und die Zeit  $t$  als

$$x = c \cdot t = 340 \text{ m/s} \cdot 3 \text{ s} = 1020 \text{ m}$$

- (b) *Wir nehmen an, dass zusätzlich ein starker Wind mit der Geschwindigkeit 100 km/h aus Richtung des Gewitters weht. Erläutern Sie qualitativ den Einfluss des Windes und bestimmen Sie (falls vorhanden) die korrigierte Entfernung des Blitzes.*

Durch den Wind der in die gleiche Richtung wie der Schall weht erhöht sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit zu

$$\begin{aligned} v_n &= c + v_{\text{Wind}} = 340 \text{ m/s} + 28 \text{ m/s} = 368 \text{ m/s} \\ \rightarrow x_n &= v_n \cdot t = 368 \text{ m/s} \cdot 3 \text{ s} = 1104 \text{ m.} \end{aligned}$$

Der Blitz ist also 84 m weiter weg.

- (c) *Um wie viel unterscheidet sich die Tonhöhe (Frequenz  $f$ ), des Donners für den Fall, mit und ohne Wind (Formel)?*

Hierfür kann man die Dopplerformel für sich bewegenden Empfänger verwenden, da die Quelle als Donner sich nicht bewegt und damit auch die ausgesendete Wellenlänge gleich bleibt. Die Formel hierfür ist

$$f_E = f_S \left( 1 + \frac{340 \text{ m/s}}{28 \text{ m/s}} \right)$$

Die Frequenz des Tons erhöht sich beim Empfänger. Alternativ lässt sich das Ganze auch berechnen über die Formel der Frequenz

$$\begin{aligned} f &= \frac{v}{\lambda} \\ \frac{f_2}{f_1} &= \frac{\frac{v_n}{\lambda}}{\frac{c}{\lambda}} = \frac{v_n}{c} \\ f_2 &= f_1 \cdot \frac{v_n}{c} = f_1 \cdot \frac{368 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s}} \end{aligned}$$

Die Frequenz des Tons wird 8% höher.