

cosh-Katalog Physik

Version 3.1

Für einen guten Start in ein
naturwissenschaftlich-technisches Studium

von Schulen und Hochschulen
in Baden-Württemberg



www.cosh-physik.de

Oktober 2026

cosh-Katalog Physik

Version 3.1.0, Oktober 2026

Die erste Auflage – Version 3.0 vom Oktober 2021 – wurde bei der cosh-Jahrestagung Physik am 21. Oktober 2021 ohne Erwartungshorizonte veröffentlicht. Die Erwartungshorizonte wurden zunächst nur in der Online-Version des Kataloges bereitgestellt. Bis Auflage 3.0.3 gab es lediglich geringfügige Änderungen in Text und Layout. Mit der vorliegenden Version erfolgt die Änderung des Titels von „Mindestanforderungskatalog Physik“ in „cosh-Katalog Physik“ und im Untertitel werden Wirtschaft, Mathematik und Informatik nicht mehr genannt.

Inhaltsverzeichnis

Vorworte **iii**

. . . zur Verwendung **ix**

1 Grundlagen **1**
1.1 Kompetenzen 1
1.1.1 Physikalisch kommunizieren und argumentieren . . 1
1.1.2 Probleme lösen 2
1.1.3 Systematisches Vorgehen 3
1.1.4 Plausibilitätsüberlegungen anstellen 3
1.1.5 Experiment 3
1.2 Illustrierende Aufgaben 4
1.3 Erwartungshorizonte 22

2 Mechanik **51**
2.1 Kompetenzen 51
2.1.1 Kinematik 51
2.1.2 Statik und Dynamik 52
2.1.3 Erhaltungssätze 53
2.1.4 Schwingungen und Wellen 53
2.2 Illustrierende Aufgaben 54
2.3 Erwartungshorizonte 62

3 Elektrizitätslehre und Magnetismus **77**
3.1 Kompetenzen 77
3.1.1 Elektrostatik 77
3.1.2 Gleichströme 78
3.1.3 Magnetismus 78
3.1.4 Lorentzkraft und magnetische Induktion 79
3.2 Illustrierende Aufgaben 79
3.3 Erwartungshorizonte 95

4 Wärmelehre **117**
4.1 Kompetenzen 117
4.1.1 Temperatur 117
4.1.2 Aggregatzustände 117
4.1.3 Wärmekapazität 118
4.1.4 Wärme und Energieaustausch 118
4.2 Illustrierende Aufgaben 119
4.3 Erwartungshorizonte 121

5 Optik **129**
5.1 Kompetenzen 129
5.1.1 Geometrische Optik 129
5.1.2 Wellenoptik 130
5.2 Illustrierende Aufgaben 131
5.3 Erwartungshorizonte 135

A Formeln, Naturkonstanten, Materialgrößen **145**

B Zwischenergebnisse und Zahlendarstellung **149**

C Vektorgrößen bei 1D-Fragestellungen **153**

D Empfehlungen für das Selbststudium **157**

Vorworte

... zur Version 3.1

In dieser Version 3.1 wurde gegenüber der vorhergehenden vor allem der seither verwendete Titel „Mindestanforderungskatalog Physik“ in „cosh-Katalog Physik“ abgeändert. Der frühere Titel war analog zu dem des etablierten „Mindestanforderungskatalog Mathematik“ der cosh-Gruppe Mathematik gewählt. Schon bei Übergabe der damaligen Katalog-Version 02 zur Weiterentwicklung an das 2019 neu gegründete Kernteam cosh-Physik wurde er kontrovers diskutiert. Mit entsprechenden Erläuterungen im Vorwort der Version 3.0 aus dem Jahr 2021 wurde der Titel aber noch beibehalten.

Die Gegebenheiten in Physik und Mathematik unterscheiden sich jedoch erheblich. Die schulische Vorbildung in Physik ist im Bereich der in den Katalogen aufgeführten Kompetenzen auch bei angehenden Studierenden technisch-naturwissenschaftlicher Fächer sehr uneinheitlich. Die aufgeführten Kompetenzen können den Einstieg in das Studium erleichtern. Grundsätzlich ist ein Studienbeginn jedoch auch dann möglich, wenn die Kompetenzen zu Studienbeginn noch nicht vorliegen, aber im Verlauf der ersten Semester erarbeitet werden. Vor diesem Hintergrund und auch aufgrund verschiedener Rückmeldungen wird nun den unterschiedlichen Verhältnissen durch die Anpassung des Titels Rechnung getragen.

Bei dieser Gelegenheit wurde auch der Untertitel „für ein Studium von WiMINT-Fächern“ nun in „für ein naturwissenschaftlich-technisches Studium“ geändert. Natürlich helfen grundlegende Kompetenzen aus der Physik auch für ein Studium der Wirtschaftswissenschaften oder der Informatik, aber hier überwiegt die Bedeutung der Mathematik.

Abgesehen davon wurden lediglich kleine Modifikationen vorgenommen, beispielsweise bei Aufgabe W3 zu den Aggregatzuständen von Wasser.

Kernteam cosh-Physik[1], 2026

… zur Version 3.0

Die Physik stellt eine wesentliche Grundlage zum Verständnis natürlicher Phänomene und zur Erklärung und Beurteilung technischer Systeme und Prozesse dar. Die Kenntnis physikalischer Begriffe und Gesetze sowie Erfahrungen in grundlegenden experimentellen und theoretischen Verfahren sind für alle technischen Studiengänge und Berufsfelder von großer Bedeutung.

Das Fach Physik wird von Studierenden an Hochschulen in der Regel als schwierig empfunden. Zudem sind ihre Vorkenntnisse zu Studienbeginn, also beim Übergang von der Schule zur Hochschule, sehr unterschiedlich. In den Lehrveranstaltungen zur Physik an den Hochschulen können diese Unterschiede im Kenntnisstand nicht alle ausgeglichen werden. Daher existieren vielerorts unterstützende und ergänzende Angebote wie Vorkurse vor Studienbeginn, vorlesungsbegleitende Tutorien, Selbstlernmaterial auf elektronischen Plattformen und vieles andere mehr.

Grundlegendes Problem bei der Konzeption sowohl von Lehrveranstaltungen an den Hochschulen als auch von Hilfsangeboten ist, dass die Erwartungen an die von den Studienanfängerinnen und Studienanfängern mitgebrachten Vorkenntnisse durch den generalisierenden Begriff *Schulphysik* nicht hinreichend genau beschrieben sind.

In einem ersten Schritt haben daher Hochschuldozentinnen und Hochschuldozenten, die an verschiedenen Hochschulen für Angewandte Wissenschaften (HAW) in Baden-Württemberg Physik lehren, aus ihrer Sicht als Lehrende diejenigen Kenntnisse, Fertigkeiten und Kompetenzen im Bereich Physik zusammengestellt, die Studienanfängerinnen und Studienanfänger für einen erfolgreichen Studienbeginn in einem WiMINT-Studiengang an einer HAW besitzen sollten. Schon dabei wurden Physiklehrerinnen und Physiklehrer aus dem Schulbereich in die Diskussionen und Überlegungen einbezogen.

[1] Tilmann Berger, Manuela Boin, Ralf Dehlen, Oliver Fechtig, Kim Fujan, Marc Güßmann, Edme Hardy, Hanno Käß, Gerrit Nandi, Ronny Nawrodt, Carsten Raudzis, Ina Rieck, Florian Schifferer, Stefan Schwarzwälder, Stefanie Walz

In einem zweiten Schritt wurde dann das Ergebnis mit Lehrerinnen und Lehrern für Physik an verschiedensten Schularten in Baden-Württemberg - von beruflichen Schulen bis hin zu allgemeinbildenden Gymnasien - diskutiert, ergänzt und modifiziert. Auch die Hochschularten Universität und DHBW waren durch eigene Vertreterinnen und Vertreter daran aktiv beteiligt.

Ziel dabei war ein von beiden Seiten - Schulen und Hochschulen - in gleicher Weise und aus Überzeugung getragener Konsens über die Vorbildung im Bereich Physik, die Studierende zu Beginn eines WiMINT-Studiengangs haben sollten, um ihr Studium ohne große Schwierigkeiten erfolgreich aufnehmen zu können. So entstand dieser **Mindestanforderungskatalog Physik**.

Der Physikunterricht an den Schulen ist nach Ansicht der am Zustandekommen dieses Katalogs Beteiligten von zentraler Bedeutung für den technischen Bereich der Schulbildung und leistet wesentliche Beiträge zum Handlungs- und Orientierungswissen der Schülerinnen und Schüler. Physik stellt in der Regel das erste Fach dar, in dem Schülerinnen und Schüler systematisch und quantitativ mit technischen Fragestellungen in Kontakt kommen. Abstraktionsvermögen und funktionales Denken, die Anwendung physikalischer Methoden, wie etwa das Aufstellen und Prüfen von Hypothesen sowie das Experimentieren ermöglichen das Verstehen und Beherrschen physikalisch-technischer Aufgabenstellungen. Dabei besitzen das Formalisieren und das Mathematisieren von physikalischen und technischen Sachverhalten einen hohen Stellenwert.

Bei der Behandlung verschiedener Inhalte ist die Verdeutlichung übergreifender Konzepte der Physik von besonderer Wichtigkeit. Hierdurch kann den Schülerinnen und Schülern eine systematische Wissensaneignung erleichtert werden, die sich nicht vordergründig an physikalischen Inhalten, sondern an den wesentlichen Prinzipien und Konzepten der Physik orientiert.

Sollte diese physikalische Vorbildung nicht im erforderlichen Umfang vorhanden sein, können die an einem WiMINT-Studiengang einer Hochschule Interessierten anhand des Mindestanforderungskatalogs die fehlenden Kenntnisse nachvollziehen und selbstverantwortlich aufarbeiten. Er wird

daher in seiner aktuellen Version allgemein zugänglich auf einer Internetpräsenz[2] der Arbeitsgruppe zur Verfügung gestellt.

Nachfolgend werden diese Mindestanforderungen beschrieben und beispielhaft mit Aufgaben konkretisiert. Dies erfolgt in Bereichen, die wesentlicher Inhalt der Lehre in Physik an den Hochschulen im Land sind:

- Grundlagen
- Mechanik
- Elektrizitätslehre und Magnetismus
- Wärmelehre
- Optik

Dieses Dokument ist als Vorschlag und Ausgangsbasis für weiterführende Diskussionen mit allen Beteiligten und Interessierten zu betrachten. Rückmeldungen können zum Beispiel über E-Mail[3] erfolgen.

Beteiligte Kolleginnen und Kollegen

An dem ersten Schritt der Arbeiten am Mindestanforderungskatalog Physik waren viele engagierte Personen beteiligt, die sich regelmäßig bei Arbeitstreffen in großer Runde ausgetauscht haben. Dazwischen arbeiteten kleinere Gruppen an den einzelnen Teilbereichen:

Grundlagen: Manuela Boin, Bernd Jödicke, Hanno Käß, Günther Kurz, Jürgen Sum, Talea Wenzel, Joachim Werner

Mechanik: Ulrich Harten

Elektrizitätslehre und Magnetismus: Karl Heinz Dambacher, Hanno Käß, Stefan Vinzelberg

Wärmelehre: Ulrich Harten, Ulrich Braunmiller

Optik: Dominik Giel, Stephan Pitsch

Weitere Beteiligte: Frank Allmendinger, Volker Bucher, Michael Glunk, Richard Huber, Arndt Jaeger, Axel Löffler, Carsten Raudzis, Ole Wartlick

[2] www.cosh-physik.de/materialien/
[3] info@cosh-physik.de

Für den zweiten Schritt wurde die weitere Bearbeitung des Katalogs dem im Sommer 2019 gegründeten cosh-Physik-Kernteam übergeben.

cosh-Physik-Kernteam (**CO**operation **S**chule **H**ochschule):

Berufliche Schulen: Kim Fujan, Ina Rieck, Stefanie Walz, Florian Schifferer, Stefan Schwarzwälder

Allgemeinbildende Gymnasien: Tilmann Berger, Marc Güßmann, Florian Karsten

Universität, DHBW: Ronny Nawrodt, Edme Hardy, Gerrit Nandi

HAW: Manuela Boin, Hanno Käß, Carsten Raudzis

***Danksagung**: Alle Beteiligten danken für die anhaltende Unterstützung der Studienkommission für Hochschuldidaktik an den HAW in Baden-Württemberg, welche die vielen Arbeitstreffen ermöglicht hat. Seit 2019 wurden die Arbeiten außerdem durch das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst in Baden-Württemberg über den Fonds „Erfolgreich Studieren in Baden-Württemberg - FESt-BW“ (2. Tranche) im Rahmen der Förderlinie 4 „Eignung und Auswahl“ gefördert.*

. . . zur Verwendung

Aufbau der Kapitel

Der Aufbau der einzelnen Kapitel des cosh-Kataloges Physik ist jeweils gleich, sie bestehen aus folgenden Abschnitten:

(1) Definition der jeweils damit verbundenen **Kompetenzen**

(2) Beispielhafte **Aufgaben** zur Verdeutlichung des Inhalts dieser Kompetenzen

(3) **Erwartungshorizonte** zu den Aufgaben

Einige Aufgaben gehören zum Bereich **erweiterter Grundkenntnisse**, sie sind in der Überschrift entsprechend gekennzeichnet:

A1 Standardaufgabe

Diese Aufgabe erfordert Grundkenntnisse.

A2 Ergänzende Aufgabe **(K)**

Diese Aufgabe erfordert erweiterte Grundkenntnisse („Kann“-Aufgabe).

Formeln, Naturkonstanten, Materialgrößen

Um Berechnungen durchführen zu können, sollte die Bedeutung und Anwendung einiger Formeln bekannt sein. Sie sind für die jeweiligen Themengebiete in den Tabellen A.1 bis A.4 in Anhang A zusammengefasst.

Des weiteren werden verschiedene Naturkonstanten und Materialgrößen benötigt, die in Tabelle A.5 in Anhang A aufgelistet sind.

Schließlich sei darauf hingewiesen, dass in einer Reihe von Lehrbüchern aus dem Schul- und Hochschulbereich die in Berechnungen verwendeten Größenbuchstaben nicht der nach DIN zu verwendenden Nomenklatur entsprechen. Zur Orientierung sind die wichtigsten davon in Tabelle A.6 in Anhang A einander gegenüber gestellt.

Zwischenergebnisse und Zahlendarstellung

In den genannten Tabellen, in den Aufgabenstellungen und in den Erwartungshorizonten sind die Zahlenwerte in der Regel mit drei gültigen Ziffern angegeben, in wissenschaftlicher Schreibweise also mit zwei Nachkommastellen. Bei der Verwendung von Zwischenergebnissen sollten natürlich ein paar Ziffern zusätzlich mitgenommen werden. Die Schülerinnen und Schüler sollten dafür sensibilisiert sein, dass ohne konkretere Angaben die Anzahl der verwendeten Stellen als Hinweis auf den Rahmen der Genauigkeit verstanden werden kann. Näheres dazu in Anhang B.

Vektorgrößen bei 1D-Fragestellungen

Ein grundlegendes Verständnis für vektorielle physikalische Größen und deren Unterschied zu skalaren Größen sollte vorhanden sein. Allerdings kann noch kein sicheres Rechnen bei allgemeineren zwei- oder höherdimensionalen Fragestellungen erwartet werden. Bei eindimensionalen oder einfachen zweidimensionalen Problemen wird oft eine vereinfachte Notation verwendet, bei der nicht zwischen Vektor, Koordinatendarstellung, Komponenten, Norm (Länge) oder Betrag unterschieden wird. Dann ist darauf zu achten, gegebenenfalls durch zusätzliche Hinweise Unklarheiten zu vermeiden. Beispiele hierzu finden sich in Anhang C.

In diesem cosh-Katalog Physik werden vektorielle Größen bei eindimensionalen Fragestellungen im Text, in den Formeln und in den Skizzen ohne Pfeil notiert, also z. B. F für einen Kraftvektor. Bei Aufgaben, in denen mindestens zwei Dimensionen berücksichtigt werden müssen, erfolgt die Notation in Text, Formel und Skizze mit Vektorpfeil, also also z. B. $\vec{F}$ für einen Kraftvektor.

Empfehlungen für das Selbststudium

Um festgestellte Lücken im Selbststudium zu schließen, können Schulbücher und Angebote im Internet genutzt werden. Vielleicht mag an der ehemaligen Schule die Physiklehrerin oder der Physiklehrer ein Buch zur Verfügung stellen. Dabei sollten Aufgaben mit Lösungen vorhanden sein, um zu prüfen, ob das Gelernte auch angewendet werden kann.

Eine Auswahl an empfehlenswerten Büchern und Quellen im Internet findet sich in Anhang D.

Nachnutzung

Die Inhalte dieses cosh-Kataloges Physik stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY-SA 4.0. Das bedeutet, sie können kopiert oder nach Bearbeitung weiterverwendet werden, solange der Ursprung (dieser Katalog) in angemessener Weise zitiert wird und darauf aufbauende Inhalte unter derselben Lizenz veröffentlicht werden. Einfache Zitatangabe:

„Aus: **cosh-Katalog Physik, Version 3.1, 2026, www.cosh-physik.de/materialien/**“.

Näheres dazu unter **creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/** und den dort angegebenen Informationen.

1 Grundlagen

Das Studium von naturwissenschaftlichen und technischen Fächern erfordert zusätzlich zur allgemeinen Studierfähigkeit und zu mathematischen Kompetenzen die Bereitschaft, auch komplexe Fragestellungen naturwissenschaftlich-technischer Gebiete ohne Scheu anzugehen, daran sorgfältig und ausdauernd zu arbeiten und dabei die strenge Exaktheit der Fachsprache und Fachsymbolik zu akzeptieren.

Die Nutzung elektronischer Hilfsmittel – insbesondere auch Simulationssoftware – wird immer selbstverständlicher. Ihr sinnvoller Einsatz erfordert Kontrolle durch Plausibilitätsbetrachtungen, die eine besondere Vertrautheit im Umgang mit physikalischen Größen sowie eine vertiefte Kenntnis physikalischer Konzepte und Gesetzmäßigkeiten voraussetzen. Diese muss durch nachhaltiges Üben wachgehalten werden.

Da Experimente unverzichtbarer Bestandteil der Natur- und Technikwissenschaften sind, ergibt sich die Notwendigkeit, Experimente zur Überprüfung von Hypothesen zielgerichtet planen und durchführen zu können sowie Experimente in Theorie und Praxis erklären zu können.

1.1 Kompetenzen

1.1.1 Physikalisch kommunizieren und argumentieren

Für das Begreifen der Fragestellungen, das Lösen physikalischer Probleme sowie die Wertung der Ergebnisse ist es unerlässlich, dass die Studienanfängerinnen und Studienanfänger ...

- Fachsprache und Fachsymbolik verstehen und verwenden,
  - wissen, dass der Wert jeder physikalischen Größe aus einer

Maßzahl und einer Einheit besteht und sie der Größe eine Einheit zuordnen können und umgekehrt (G1),

- wissen, dass jede physikalische Größe mit einem Symbol abgekürzt wird und dass sie mit den damit formulierten Größengleichungen rechnen können (G1, G2),
- mit Einheiten rechnen und verschiedene Darstellungsformen ineinander umwandeln können (G3, G4, G5),
- Einheitenanalysen durchführen können, um Einheiten unbekannter Größen zu bestimmen oder Fehler in Formeln aufzuzeigen (G6, G7, G8),
- wissen, dass es skalare und vektorielle physikalische Größen gibt (G9),

- physikalische Grundprinzipien (Superpositionsprinzip, Erhaltungssätze) verstehen und anwenden können (G10, G11, G19a, G26b, G30, M19, M20, M22, E11, W8),
- physikalische Sachverhalte mit Worten erklären können (G12, G13, G14, G15, G16, G17),
- physikalische Aussagen mithilfe unterschiedlicher Darstellungsformen wie etwa Worten, Skizzen, Tabellen, Berechnungen begründen oder widerlegen können (G16, G18, G19),
- Zusammenhänge (mit und ohne Hilfsmittel) visualisieren können (G20),
- mathematische Darstellungen (wie Grafiken und Formeln) physikalisch interpretieren können (G16, G21, G22, G23, G24),
- eigene sowie fremde Lösungswege nachvollziehen können (G25).

1.1.2 Probleme lösen

Naturwissenschaftlich-technische Sachverhalte oder Probleme können in unterschiedlichen Darstellungsarten vorliegen, zum Beispiel als Text, Grafik, Tabelle, Bild, Modell usw. Manchmal können Probleme auch offen formuliert sein.

Die Studienanfängerinnen und Studienanfänger können ...

- dazu nützliche Fragen stellen (G26),
- die gegebenen Sachverhalte skizzieren, physikalisch modellieren und in geeigneter Form mathematisch beschreiben (G18, G27),
- die Randbedingungen und Näherungen eines verwendeten Modells verstehen und dessen Gültigkeitsbereich einschätzen (G19),
- Strategien des Problemlösens anwenden (M13),
- Hilfsmittel (Formelsammlung, Tabellenwerke, elektronische Hilfsmittel) angemessen nutzen (G28).

1.1.3 Systematisches Vorgehen

Die Studienanfängerinnen und Studienanfänger können systematisch arbeiten. Sie ...

- können komplexe Sachverhalte in einfachere Probleme zerlegen (G23, G29, M13),
- können Fallunterscheidungen vornehmen (G30),
- arbeiten sorgfältig und gewissenhaft (G31, G32).

1.1.4 Plausibilitätsüberlegungen anstellen

Zur Kontrolle ihrer Arbeit können die Studienanfängerinnen und Studienanfänger ...

- Fehler identifizieren und erklären (G19, G33),
- Größenordnungen abschätzen (G34, G35, G36, G37),
- mittels Überschlagsrechnung, Einheitenprobe und Plausibilitätsanalysen ihre Ergebnisse kontrollieren (G38, G39),

1.1.5 Experiment

Zur Durchführung physikalischer Experimente können die Studienanfängerinnen und Studienanfänger ...

- geeignete Messverfahren und Messgeräte beurteilen (G40),

- einfache experimentelle Aufbauten planen und herstellen (G41),
- Messergebnisse in Diagrammen geeignet darstellen und auswerten (G42),
- Fehlerquellen identifizieren und erklären sowie Fehlergrößenordnungen abschätzen (G32, G40, G42).

1.2 Illustrierende Aufgaben

G1 Symbole und Einheiten

Füllen Sie die folgende Tabelle aus.

Größe	Typisches Symbol	Einheit
Länge		
	t	
Beschleunigung		
		kg
Kraft		
Temperatur		

G2 Größengleichung

Ein Fahrzeug mit der Masse m fährt mit der Geschwindigkeit v. Sie kennen die kinetische Energie $E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$. Bestimmen Sie daraus die Berechnungsformel für die Geschwindigkeit.

G3 Einheitenumrechnung

Geben Sie die folgenden physikalischen Größen in den jeweils geforderten Einheiten an:

a) Eine Dichte von $7{,}2\,\mathrm{g/cm^3}$ in $\mathrm{kg/m^3}$
Eine Fläche von $1{,}65\,\mathrm{m^2}$ in $\mathrm{cm^2}$
Eine Zeitdauer von $3{,}5\,\mathrm{h}$ in min
Eine Geschwindigkeit von $0{,}018\,\mathrm{km/h}$ in mm/s
Einen Druck von $1013\,\mathrm{hPa}$ in Pa
Eine Beschleunigung von $17\,\mathrm{g}$ in $\mathrm{m/s^2}$

b) Eine Leistung von 1800 kJ/h in W
Einen Druck von 2 kN/mm^2 in Pa
Eine Arbeit von 98 kW h in MJ

G4 Einheitenkonversion (K)

Stellen Sie die folgenden physikalischen Größen als Kombinationen von SI-Basiseinheiten dar:

Die Dichte von Wasser von 1 kg/L
Eine Energie von 10 kW h
Eine Kraft von 120 N

G5 Sortierung nach Größe

Ordnen Sie folgende Längen der Größe nach (ohne Verwendung eines Taschenrechners). Beginnen Sie mit dem kleinsten Wert:

1 µm, 1 km, $1 \cdot 10^6$ m, $1 \cdot 10^2$ m, 30 mm, 1 cm, $2 \cdot 10^{-2}$ m, $1 \cdot 10^{-3}$ m .

G6 Einheiten (K)

Die Geschwindigkeit v eines Gegenstandes wird durch die folgende Funktion beschrieben, in der a die Einheit der Beschleunigung hat und t für die Zeit steht:

$$v = \frac{a}{\gamma^2} \cdot t^3 \cdot \cos\left(\beta \cdot t^2\right) - \frac{\delta}{t} \, .$$

Welche Einheiten haben die Konstanten β, γ und δ?

G7 Einheitensystem

In der Mechanik gelten für eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung ohne Anfangsgeschwindigkeit und mit Anfangsort $x_0 = 0$ die folgenden Beziehungen:

$$x = \frac{a}{2} \cdot t^2 \qquad v = a \cdot t \, .$$

a) Welche Einheit hätten die Geschwindigkeit v und die Beschleunigung a in einer Welt, in der die folgenden Einheiten festgelegt sind?

x Weg	$[x]$ = Ga (Galilei)
m Masse	$[m]$ = Ob (Obelix)
t Zeit	$[t]$ = Na (Napoleon)

b) Welche Einheit hätte die Kraft?

G8 Einheitenanalyse

In einer Formelsammlung wird die folgende Beziehung für den Weg s in Abhängigkeit von der Beschleunigung a, der Geschwindigkeit v und der Zeit t angegeben:

$$s = 2 \cdot a \cdot t + v \cdot t \, .$$

Begründen Sie mittels Einheitenanalyse, warum sie nicht stimmen kann.

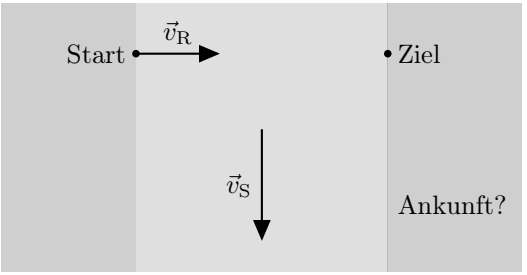
G9 Vektorgrößen

Physikalische Größen können eine Richtung haben, dann werden sie vektorielle Größen oder kurz Vektorgrößen genannt. Physikalische Größen ohne Richtung werden als skalare Größen bezeichnet. Geben Sie in der Tabelle an, welche der Größen vektoriell (v) und welche skalar (s) sind.

Größe	v	s	Größe	v	s
Masse			Geschwindigkeit		
Kinetische Energie			Lageenergie		
Gravitationskraft			Coulombkraft		
Impuls			Druck		
Temperatur			Wärme		

G10 Überlagerung

Ein Boot soll quer über einen Fluss gerudert werden. Bei seiner Überfahrt überlagert sich allerdings die Geschwindigkeit des Ruderboots $\vec{v}_\mathrm{R}$ senkrecht zur Strömung mit der Strömungsgeschwindigkeit $\vec{v}_\mathrm{S}$ des Flusses. Die Beträge der Geschwindigkeiten sind $v_\mathrm{R} = 3\,\mathrm{m/s}$ und $v_\mathrm{S} = 4\,\mathrm{m/s}$.



a) Stellen Sie die daraus resultierende Bewegung des Ruderboots zeichnerisch dar.

b) Welchen Betrag hat die Gesamtgeschwindigkeit des Ruderboots?

c) Um welchen Winkel wird das Ruderboot im Verhältnis zum angestrebten Kurs abgetrieben?

d) Verlängert die Strömung die Dauer der Überfahrt? Bitte begründen Sie Ihre Antwort.

G11 Kräfte

An einem Seil, das sich nicht bewegt, ziehen fünf Kinder: Max mit einer Kraft von $F_M = 160\,N$ und Jana mit $F_J = 180\,N$ auf der linken Seite sowie auf der rechten Seite Tom mit einer Kraft von $F_T = 200\,N$ und Lisa mit $F_L = 100\,N$. Die fünfte Person, die am Seil zieht, ist Lisas kleiner Bruder Anton.

a) Mit welcher Kraft und auf welcher Seite zieht Anton?

b) Skizzieren Sie die auf das Seil wirkenden Kräfte.

G12 Masse und Gewicht

Der Begriff „Gewicht“ wird im Alltag für zwei unterschiedliche physikalische Größen verwendet: Die Gewichtskraft und die Masse.

a) Erläutern Sie diese physikalischen Größen und ihren Zusammenhang.

b) Was ändert sich bei diesen Größen, wenn ein Gegenstand von der Erde auf den Mond gebracht wird?

G13 Aktionsprinzip

Was besagt das Aktionsprinzip $F = m \cdot a$ in eigenen Worten? Erläutern Sie es an einem konkreten Beispiel.

G14 Newton

Erklären Sie die Wirkung einer Kraft $F = 1\,\mathrm{N}$. Welche der nachstehenden Aussagen ist dabei richtig?

a) Sie erteilt der Masse $m = 9{,}81\,\mathrm{kg}$ die Beschleunigung a mit $a = 9{,}81\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$.

b) Sie erteilt der Masse $m = 1\,\mathrm{kg}$ die Beschleunigung $a = 9{,}81\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$.

c) Sie erteilt der Masse $m = 9{,}81\,\mathrm{kg}$ die Beschleunigung $a = 1\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$.

d) Sie erteilt der Masse $m = 1\,\mathrm{kg}$ die Beschleunigung $a = 1\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$.

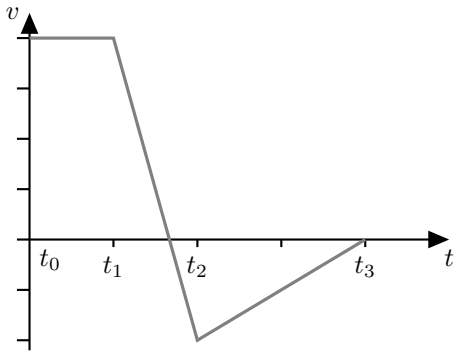
e) Keine der Aussagen a) bis d) ist richtig.

G15 Rutschvorgang (K)

Ein Päckchen rutscht in einem Paketverteilzentrum auf einer Schräge mit einer Anfangsgeschwindigkeit v_0 in Richtung Förderband hinunter. Nach einem bestimmten Weg bleibt es stehen. Erklären Sie diesen Vorgang physikalisch.

G16 Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm

Im folgenden Diagramm ist die Geschwindigkeit eines Gegenstandes in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt.

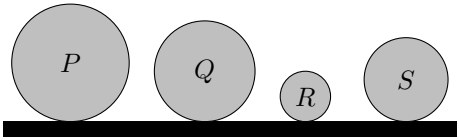


a) Beschreiben Sie die Bewegung des Gegenstandes.

b) Skizzieren Sie die Beschleunigung, die auf diesen Gegenstand wirkt, in Abhängigkeit von der Zeit.

G17 Dichte

Die vier abgebildeten Kugeln P, Q, R und S haben jeweils die gleiche Masse. Die Kugeln bestehen aus verschiedenen Materialien. Sie sind homogen.



Sortieren Sie die vier Kugeln nach ihrer Dichte vom kleinsten zum größten Wert. Begründen Sie Ihre Wahl physikalisch.

G18 Weg-Zeit-Diagramm

Lisa will Anja fangen. Lisa startet zum Zeitpunkt $t_0 = 0\,\mathrm{s}$ mit konstanter Geschwindigkeit $v_\mathrm{L} = 4{,}00\,\mathrm{m/s}$. Anja startet 5,00 m vor ihr mit einer konstanten Geschwindigkeit von $v_\mathrm{A} = 3{,}50\,\mathrm{m/s}$.

a) Stellen Sie das Problem in einem Weg-Zeit-Diagramm dar.

b) Schafft es Lisa, Anja innerhalb der ersten 50,0 m einzuholen?

G19 Fallbewegung (K)

Felix Baumgartner wurde durch seinem Stratosphärensprung vom 14.10.2012 aus annähernd 39 km Höhe weltweit bekannt.

a) Er befand sich dabei laut der Messergebnisse über 36 403 m im freien Fall (www.fai.org/record/16671). Schätzen Sie mit Hilfe der Energieerhaltung die Geschwindigkeit am Ende des freien Falls in km/h ab.

b) Sein dabei aufgestellter Rekord für die Geschwindigkeit eines frei fallenden Menschen wurde mit 1357,6 km/h gemessen. Vergleichen Sie das mit Ihrem Ergebnis und erklären Sie den Unterschied physikalisch.

G20 Schwingung

Betrachten Sie eine Feder mit einer Eisenkugel am Ende, die mit einer Periodendauer $T = 0{,}500\,\mathrm{s}$ schwingt. Zu Beginn wird sie um 10,0 cm aus der Nullposition ausgelenkt und dann aus der Ruhe losgelassen. Die Kugel schwingt parallel zur x-Achse, ihre Position in Abhängigkeit von der Zeit t wird durch die folgende Funktion beschrieben:

$$x(t) = \hat{x} \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot t}{T}\right) .$$

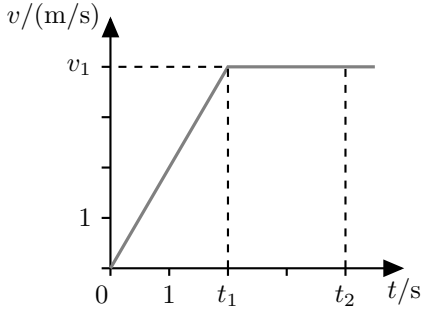
a) Mit welcher Amplitude $\hat{x}$ und welcher Frequenz f schwingt die Kugel?

b) Zeichnen Sie die Position in Abhängigkeit von der Zeit im Zeitraum von $t_0 = 0\,\mathrm{s}$ bis $t_1 = 1{,}50\,\mathrm{s}$.

c) An welcher Position befindet sich die Kugel zu dem späteren Zeitpunkt $t_2 = 0{,}750\,\mathrm{s}$?

G21 Beschleunigung

Betrachten Sie das nachfolgend dargestellte schematische Diagramm der Geschwindigkeit eines Fußgängers in Abhängigkeit von der Zeit.



a) Welche Beschleunigung hat der Fußgänger nach dem Start bei der Zeit $t_0 = 0\,\mathrm{s}$ bis zu der Zeit $t_1 = 2\,\mathrm{s}$? Welche Beschleunigung hat er zwischen t_1 und $t_2 = 4\,\mathrm{s}$? Die Endgeschwindigkeit ist $v_1 = 4\,\mathrm{m/s}$.

b) Berechnen Sie die Wegstrecke, die der Fußgänger von t_0 bis t_2 zurückgelegt hat.

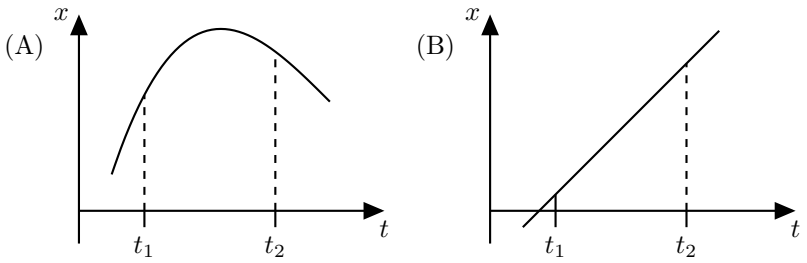
c) Bestimmen Sie grafisch die bis t_2 zurückgelegte Wegstrecke.

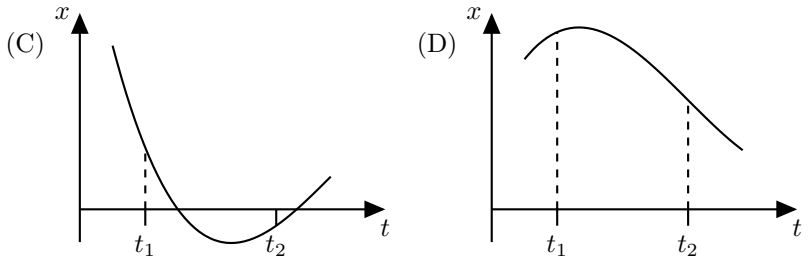
G22 Weg-Zeit-Diagramme

Betrachten Sie für jedes der vier untenstehenden Weg-Zeit-Diagramme die Geschwindigkeiten zum Zeitpunkt t_1 und t_2 und beantworten Sie für jedes Diagramm die folgenden beiden Fragen.

a) Ist die Geschwindigkeit bei t_2 größer oder kleiner als die Geschwindigkeit bei t_1 oder sind beide gleich?

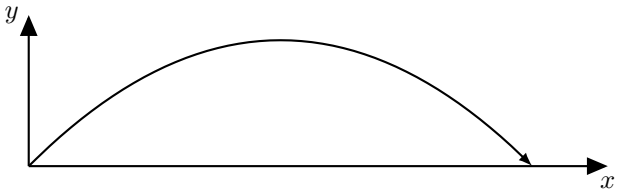
b) Ist der Betrag der Geschwindigkeit bei t_2 größer oder kleiner als der Betrag der Geschwindigkeit bei t_1 oder sind beide gleich?



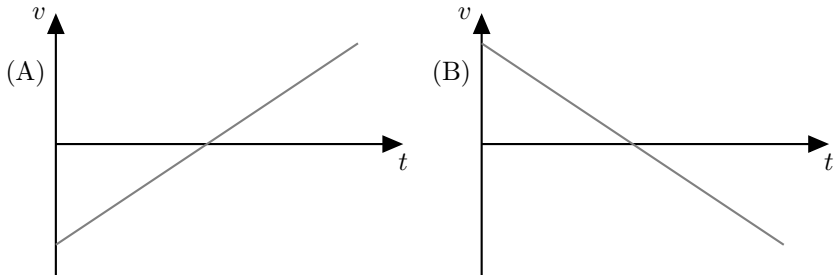


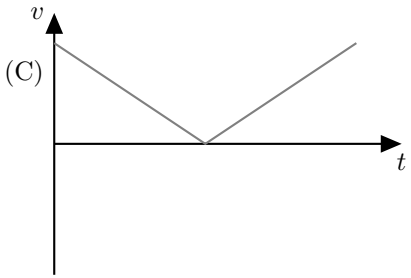
G23 Geschwindigkeits-Zeit-Diagramme

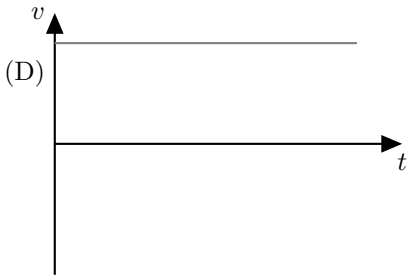
Ein Stein wird geworfen und hat die folgende Flugbahn:

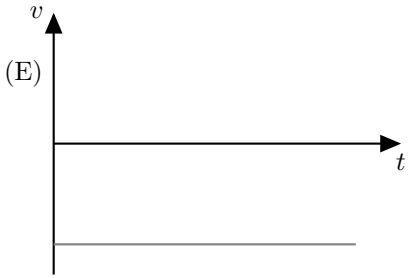


Welches der fünf nachstehenden v-t-Diagramme beschreibt die zugehörige Geschwindigkeit $v_x(t)$ und welches beschreibt $v_y(t)$?



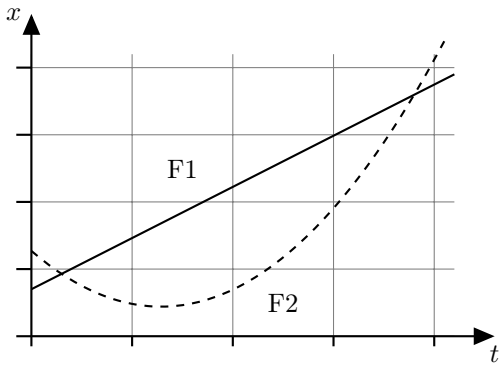






G24 Parallelfahrt

Die folgende Abbildung zeigt die Bewegung zweier Fahrzeuge F1 und F2 entlang paralleler Fahrspuren auf einem Testfeld. Die folgenden Fragen betreffen nur den abgebildeten Zeitbereich.



a) Sind beide Fahrzeuge irgendwann gleichauf?

b) Bewegen sich die Fahrzeuge immer in die gleiche Richtung oder gibt es Zeiten, während denen sie in entgegengesetzte Richtung fahren?

c) Fahren sie irgendwann mit gleicher Geschwindigkeit?

d) Wann erreichen die beiden Fahrzeuge F1 und F2 jeweils ihre höchste Geschwindigkeit?

e) Zu welchem Zeitpunkt sind die Autos am weitesten voneinander entfernt?

Markieren Sie jeweils den oder die Zeitpunkte im Diagramm, wenn dies möglich ist.

G25 Berechnungen

Anna, Bibi und Clemens lösen jeweils die folgende Aufgabe zum freien Fall:

> Eine Kugel fällt aus 10 m Höhe auf den Boden. Berechnen Sie die Fallzeit und die Aufprallgeschwindigkeit.

Versetzen Sie sich in die Rolle der Korrektoren und prüfen Sie die Lösungen.

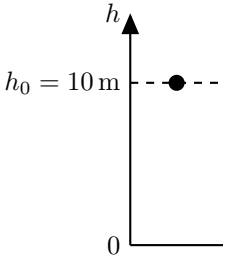
Annas Lösung:

$$
\begin{aligned}
s &= v \cdot t \\
v &= 9{,}81\,\mathrm{m/s} \\
t &= \frac{s}{v} = \frac{10{,}0\,\mathrm{m}}{9{,}81\,\mathrm{m/s}} = 1{,}02\,\mathrm{s}
\end{aligned}
$$

Bibis Lösung:

$$
\begin{aligned}
E_{\mathrm{pot,\,A}} &= E_{\mathrm{kin,E}} \\
m \cdot g \cdot h &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_{\mathrm{E}}^2 \\
v_{\mathrm{E}} &= \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \sqrt{2 \cdot 9{,}81\,\mathrm{m/s^2} \cdot 10\,\mathrm{m}} = 14{,}0\,\mathrm{m/s} \\
v_{\mathrm{E}} &= g \cdot t_{\mathrm{E}} \\
t_{\mathrm{E}} &= \frac{v_{\mathrm{E}}}{g} = \frac{14{,}0\,\mathrm{m/s}}{9{,}81\,\mathrm{m/s^2}} = 1{,}43\,\mathrm{s}
\end{aligned}
$$

Clemens' Lösung:



$$h = -\frac{g}{2} \cdot t^2 + h_0$$

$$0 = -\frac{g}{2} \cdot t_\mathrm{E}^2 + h_0$$

$$t_\mathrm{E} = \sqrt{\frac{2 \cdot h_0}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10{,}0\,\mathrm{m}}{9{,}81\,\mathrm{m/s^2}}} = 1{,}43\,\mathrm{s}$$

$$v_\mathrm{E} = -g \cdot t_\mathrm{E} = -9{,}81\,\mathrm{m/s^2} \cdot 1{,}43\,\mathrm{s} = -14{,}0\,\mathrm{m/s}$$

G26 Treppensteigen

Jan mit einer Masse von 35 kg und Max mit einer Masse von 40 kg steigen in verschiedenen Häusern die Treppen hoch. Jan bleibt bei einer Stockwerkhöhe von 2,50 m im sechsten Stockwerk stehen. Max bleibt bereits ein Stockwerk früher stehen, wobei die Stockwerke in seinem Haus eine Höhe von 3,00 m haben.

Welche der folgenden Aufgaben kann man mit den gegebenen Größen unmittelbar lösen? Geben Sie bei den nicht lösbaren Aufgaben an, welche zusätzlichen Größen für die Lösung benötigt werden!

a) Berechnen Sie die Änderung der Lageenergie der beiden beim Aufstieg in das jeweilige oberste Stockwerk!

b) Oben angekommen, lassen beide gleichzeitig eine Murmel senkrecht aus dem Fenster herunterfallen. Berechnen Sie die Geschwindigkeit, die die Murmeln beim Auftreffen auf dem Boden haben.

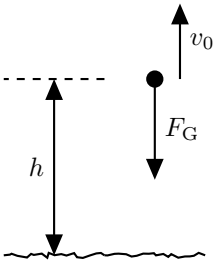
c) Wie viele Stockwerke muss Jan nach oben gehen, damit seine Murmel mindestens 0,3 s später als die von Max unten ankommt?

d) Bestimmen Sie die mechanische Leistung, die von Max und Jan jeweils beim Hinaufsteigen aufgebracht wurde.

e) Wer von beiden ist zuerst oben angekommen?

G27 Aufgabenstellung

Betrachten Sie die folgende Abbildung:

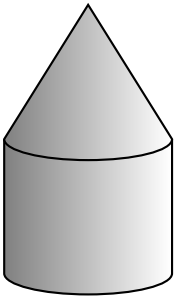


a) Welche reale Situation wird hier skizziert?

b) Welche Größen könnten mit Hilfe der als bekannt vorausgesetzten Größen h, F_G und v_0 berechnet werden?

G28 Dichtebestimmung

Der im folgenden Bild dargestellte zusammengesetzte Körper wurde gewogen. Seine Masse beträgt 1 kg. Der Durchmesser und die Höhe des Zylinders sowie die Höhe des Kegels betragen jeweils 10 cm.



a) Bestimmen Sie die Dichte des Körpers.

b) Bestimmen Sie, aus welchem der folgenden Stoffe er bestehen könnte: Holz, PE (Polyethylen), Aluminium oder Eisen?

G29 Zugfahrt

Ein Zug fährt nach dem Halt in einem Bahnhof mit konstanter Beschleunigung an, bis er seine Reisegeschwindigkeit erreicht. Dann fährt er eine bestimmte Strecke mit dieser Geschwindigkeit. Vor einer Langsamfahrstrecke bremst er konstant auf die halbe Geschwindigkeit ab, durchfährt die Langsamfahrstrecke und beschleunigt danach wieder konstant auf die Reisegeschwindigkeit.

a) Skizzieren Sie seine Geschwindigkeit qualitativ über der Zeit.

b) Skizzieren Sie seine Beschleunigung qualitativ über der Zeit.

c) Beschreiben Sie ein Verfahren, wie der zurückgelegte Weg aus dem Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm berechnet werden kann.

G30 Stoßvorgänge (K)

Ein Waggon der Masse M fährt in der Ebene mit der Geschwindigkeit v auf einen vor ihm in gleicher Richtung fahrenden Waggon mit der Masse $3M/2$ und der Geschwindigkeit $v/2$ auf. Bei dem Stoß kommt es zum Ankoppeln.

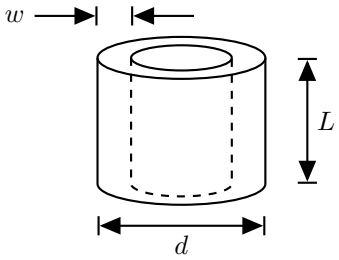
a) Erläutern Sie, welche Art von Stoß hier vorliegt, elastisch oder unelastisch?

b) Welche Erhaltungssätze sind hier anwendbar?

c) Mit welcher Geschwindigkeit beziehungsweise mit welchen Geschwindigkeiten fahren die Waggons nach dem Stoß weiter?

G31 Schlauchstück

Ein Schlauch habe den Außendurchmesser $d = 2{,}0\,\mathrm{cm}$ und die Wandstärke $w = 3\,\mathrm{mm}$. Ein Stück der Länge $L = 20\,\mathrm{cm}$ wurde gewogen. Seine Masse beträgt $m = 50\,\mathrm{g}$.

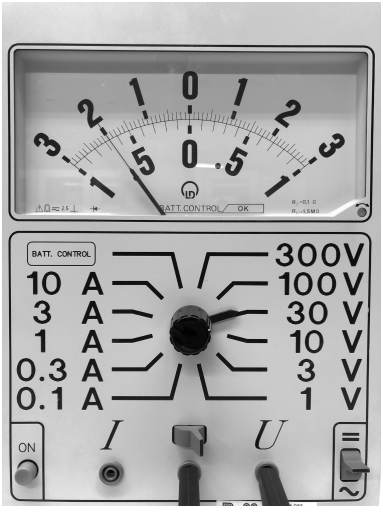


a) Bestimmen Sie daraus die Dichte des Schlauchstücks in der Einheit $\mathrm{kg/dm^3}$.

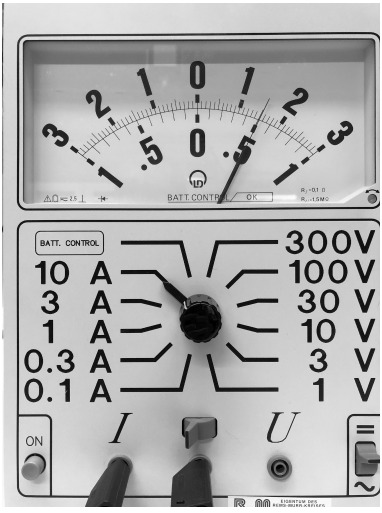
b) Bestimmen Sie, ob das Schlauchstück in Öl der Dichte $0{,}85\,\mathrm{g/cm^3}$ schwimmt.

G32 Multimeter

Die untenstehenden Abbildungen zeigen ein analoges Multimeter, mit dem zwei verschiedene Messungen in elektrischen Schaltungen durchgeführt wurden.



Messung 1



Messung 2

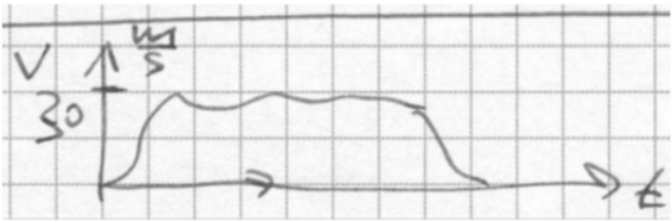
a) Welche physikalische Größe wird im jeweiligen Fall gemessen?

b) Lesen Sie den Messwert der jeweiligen Größe ab!

G33 Schulweg

Ein Schüler hat für ein Projekt die Geschwindigkeit eines zur Schule laufenden Freundes aufgezeichnet.

Ist das Diagramm plausibel? Erläutern Sie, warum oder warum nicht.



G34 Schätzwert

Schätzen Sie die Größenordnung ab (ohne Taschenrechner):

$$\frac{0{,}037 \cdot 10^{29} \cdot \pi^2 + \sin\left(0{,}083 \cdot 10^{47}\right)}{\left(0{,}002\,32 \cdot 10^{-22}\right)^2} \,.$$

G35 Weltbevölkerung (K)

Welchen Durchmesser hat ein Kreis, auf dessen Grundfläche alle Menschen der Welt gerade noch Platz fänden?

Notieren Sie sämtliche zur Berechnung gemachten Annahmen.

G36 Schnappschuss

Das nebenstehende Foto wurde mit einer Belichtungszeit von 1/50 Sekunde aufgenommen. Schätzen Sie die Geschwindigkeit des Radfahrers.



G37 Tennisbälle

Schätzen Sie ab, wie hoch eine Kiste der Grundfläche $50\,\text{cm} \times 40\,\text{cm}$ mindestens sein muss, damit 200 Tennisbälle hinein passen.

Notieren Sie alle zur Berechnung gemachten Annahmen.

G38 Ruderer

Ein Ruderer rudert einen zum See angestauten, d.h. strömungsfreien Fluss 1 km hinab und dann wieder zurück. Er erreicht dabei eine durchschnittliche Geschwindigkeit von $v = 10\,\text{km/h}$. Nun wird die Staustufe geöffnet und der Fluss strömt mit der Geschwindigkeit v_S.

a) Ändert sich die Zeit, die der Ruderer nun für die gleiche Strecke, bezogen auf das Ufer, benötigt?

b) Überprüfen Sie Ihre Antwort, in dem Sie sich einen geeigneten Grenzfall überlegen.

G39 Feuerwerk

Ein Reporter beobachtet ein Feuerwerk. Er berichtet, dass er 2 km entfernt gewesen sei und den Knall jeweils 3 s nach dem zugehörigen Lichtblitz gehört habe.

Prüfen Sie diese Angabe auf Plausibilität.

G40 Schwingungsmessung

Sie haben die Aufgabe, die Periodendauer eines Pendels zu messen, die etwa 0,5 s beträgt. Sie haben nur eine Stoppuhr zur Verfügung.

a) Ist die Messung damit möglich? Wenn ja, beschreiben Sie Ihre Messung?

b) Wie würden Sie vorgehen, wenn die Periodendauer stattdessen nur etwa 0,01 s beträgt?

G41 Höhenmessung

Sie haben die Aufgabe, die Höhe eines Gebäudes zu messen. Sie haben kein Maßband zur Verfügung. Beschreiben Sie eine Versuchsanordnung und das zu Grunde liegende physikalische Prinzip.

G42 Federkonstante

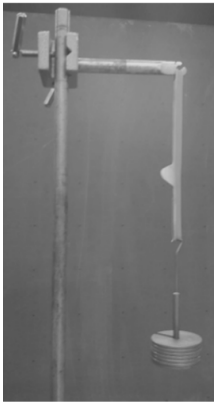
Die untenstehende Grafik zeigt die in einem einfachen, im Bild dargestellten Experiment gemessene Kraft-Ausdehnungskurve eines handelsüblichen Einweckgummis.

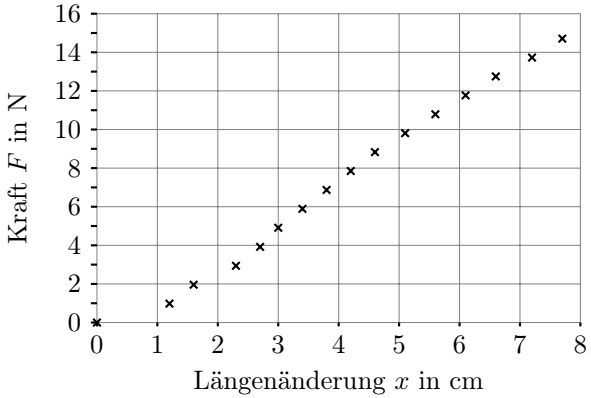
a) In welchem Bereich kann ein lineares Kraftgesetz für die Feder angewandt werden?

b) Wie groß ist die Federkonstante in diesem Bereich?

c) Schätzen Sie die Genauigkeit der berechneten Federkonstante ab.

d) Wodurch kann es zu Fehlern bei der Messung gekommen sein?





1.3 Erwartungshorizonte

Erwartungshorizont G1 Symbole und Einheiten

Größe	Typisches Symbol	Einheit
Länge	s (oder L)	m
Zeit	t	s
Beschleunigung	a	$\mathrm{m/s^2}$
Masse	m	kg
Kraft	F	$\mathrm{N = kg\,m/s^2}$
Temperatur	T	K

Ergänzungen

Da in der Aufgabenstellung nicht explizit nach den SI-Basiseinheiten beziehungsweise nach abgeleiteten Einheiten, d. h. Potenzprodukte der Basiseinheiten gefragt ist, sind auch andere Einträge in der letzten Spalte möglich. So könnte für die Länge auch km angegeben werden, eine sogenannte nicht kohärente SI-Einheit. Für die Zeit könnte auch h angegeben werden, eine zur Verwendung mit dem SI zugelassene Einheit. Zu kg sei angemerkt, dass dies die kohärente SI-Einheit der Basisgröße Masse ist, die einzige Basiseinheit mit einem Vorsatz (Präfix). Das N ist eine

der 22 abgeleiteten SI-Einheiten mit besonderem Namen, die wichtigsten sollten bekannt sein. Zu diesen wird auch Radiant, rad oder das Grad Celsius gezählt, °C. Das Winkelgrad, ° ist wiederum eine zugelassene Einheit. Eine möglichst gute Kenntnis dieser wichtigen Zusammenhänge wäre wünschenswert, aber das Wissen um alle Einzelheiten übersteigt natürlich die für einen guten Studienstart wichtigen Kompetenzen.

Erwartungshorizont G2 Größengleichung

Die Berechnungsformel für die Energie wird nach der Geschwindigkeit aufgelöst:

$$\begin{aligned} & E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 && \left| \; \cdot \frac{2}{m} \right. \\ \Leftrightarrow \quad & v^2 = \frac{2 \cdot E_{\text{kin}}}{m} && \mid \text{ Wurzel ziehen} \\ \Leftrightarrow \quad & v = \pm\sqrt{\frac{2 \cdot E_{\text{kin}}}{m}} \; . \end{aligned}$$

Für den Betrag der Geschwindigkeit gilt das positive Vorzeichen.

Ergänzungen

Das Auflösen der ersten Gleichung nach v^2 sollte gekonnt werden. Was kann üblicherweise für den letzten Schritt erwartet werden?

Grundsätzlich sollte bekannt sein, dass die Geschwindigkeit eine vektorielle Größe ist und in die kinetische Energie als skalare Größe nur der Betrag der Geschwindigkeit eingeht, genauer das Skalarprodukt der Geschwindigkeit mit sich selbst. Es wäre gut zu wissen, dass v hier also grundsätzlich den Betrag der Geschwindigkeit bezeichnet, wie er beispielsweise vom Fahrradcomputer gemessen wird, und dass Beträge positive Größen sind.

Wie wäre eine Lösung mit beiden Vorzeichen und einem Hinweis der Art „vorwärts oder rückwärts“ zu bewerten? Da es hier keine allgemeingültige Vereinbarung gibt, sollte diese Antwort ebenfalls als richtig gewertet werden, siehe auch Anhang C.

Erwartungshorizont G3 Einheitenumrechnung

In der ersten Teilaufgabe sollen Angaben unter Beibehaltung

der jeweils verwendeten Einheitenkombination – wie zum Beispiel [Masseneinheit]/[Längeneinheit]^3 oder [Längeneinheit]/[Zeiteinheit] – in eine andere Größenordnung umgerechnet werden. Bei der zweiten Teilaufgabe sollen die Größenangaben statt mit der jeweils verwendeten Einheitenkombination nach Umrechnung unter Verwendung der passenden SI-Einheit mit besonderem Namen erfolgen.

a) Eine Dichte von $7{,}2\,\mathrm{g/cm^3}$ in $\mathrm{kg/m^3}$:

$$7{,}2\,\frac{\mathrm{g}}{\mathrm{cm^3}} = 7{,}2 \cdot \frac{10^{-3}\,\mathrm{kg}}{(10^{-2}\,\mathrm{m})^3} = 7{,}2 \cdot \frac{10^{-3}\,\mathrm{kg}}{10^{-6}\,\mathrm{m^3}} = 7{,}2 \cdot 10^3\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m^3}}\ .$$

Eine Fläche von $1{,}65\,\mathrm{m^2}$ in $\mathrm{cm^2}$:

$$1{,}65\,\mathrm{m^2} = 1{,}65 \cdot (100\,\mathrm{cm})^2 = 1{,}65 \cdot (10^2\,\mathrm{cm})^2 = 1{,}65 \cdot 10^4\,\mathrm{cm^2}\ .$$

Eine Zeitdauer von $3{,}5\,\mathrm{h}$ in min:

$$3{,}5\,\mathrm{h} = 3{,}5 \cdot 60\,\mathrm{min} = 210\,\mathrm{min}\ .$$

Eine Geschwindigkeit von $0{,}018\,\mathrm{km/h}$ in mm/s :

$$0{,}018\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}} = 0{,}018 \cdot \frac{1000\,\mathrm{m}}{3600\,\mathrm{s}} = 18 \cdot 10^{-3}\,\frac{10\,\mathrm{m}}{36\,\mathrm{s}} = 5{,}0\,\frac{\mathrm{mm}}{\mathrm{s}}\ .$$

Einen Druck von $1013\,\mathrm{hPa}$ in Pa :

$$1013\,\mathrm{hPa} = 1013 \cdot 100\,\mathrm{Pa} = 1{,}013 \cdot 10^5\,\mathrm{Pa}\ .$$

Eine Beschleunigung von 17 g in $\mathrm{m/s^2}$:

Die Erdbeschleunigung beträgt $g = 9{,}81\,\mathrm{m/s^2}$. In der Aufgabenstellung wird dieser Wert als Einheit der Beschleunigung interpretiert, was durch das nicht kursiv geschriebene „g“ symbolisiert wird. Somit

$$17 \cdot 9{,}81\,\mathrm{m/s^2} = 167\,\mathrm{m/s^2}\ .$$

b) Eine Leistung von $1800\,\mathrm{kJ/h}$ in W:

$$1800\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{h}} = 1800 \cdot \frac{1000\,\mathrm{J}}{3600\,\mathrm{s}} = 500\,\mathrm{W}\ .$$

Ein Druck von $2\,\mathrm{kN/mm^2}$ in Pa:

$$2\,\frac{\mathrm{kN}}{\mathrm{mm^2}} = 2 \cdot \frac{1000\,\mathrm{N}}{(10^{-3}\,\mathrm{m})^2} = 2 \cdot \frac{1000\,\mathrm{N}}{10^{-6}\,\mathrm{m^2}} = 2 \cdot 10^9\,\mathrm{Pa}\,.$$

Eine Arbeit von $98\,\mathrm{kW\,h}$ in MJ:

$$98\,\mathrm{kW\,h} = 98{\cdot}10^3\,\mathrm{W}{\cdot}1\,\mathrm{h} = 98{\cdot}10^3\,\mathrm{J/s}{\cdot}3600\,\mathrm{s} = 353{\cdot}10^6\,\mathrm{J} = 353\,\mathrm{MJ}\,.$$

Ergänzungen

Diese Art von Umrechnungen sollte unbedingt erlernt werden:

- Umrechnungen mit Vorsilben (Präfixen), auch mit Potenzen,
- Umrechnungen mit den zugelassenen Einheiten min und h.

Da Beschleunigungen manchmal vereinfachend als Vielfache der Erdbeschleunigung angegeben werden - etwa bei Crashtests - wurde eine entsprechende Umrechnung hier mit aufgenommen.

Erwartungshorizont G4 Einheitenkonversion (K)

Dichte von Wasser von $1\,\mathrm{kg/L}$:

$$1\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{L}} = 1\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{dm^3}} = 1\frac{\mathrm{kg}}{(0{,}1\,\mathrm{m})^3} = 1\frac{\mathrm{kg}}{0{,}001\,\mathrm{m^3}} = 1000\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m^3}}\,.$$

Eine Energie von $10\,\mathrm{kW\,h}$:

$$10\,\mathrm{kW\,h} = 10 \cdot 10^3\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s}} \cdot 3600\,\mathrm{s} = 1 \cdot 10^4\,\mathrm{J} \cdot 3{,}6 \cdot 10^3 = 3{,}6 \cdot 10^7\,\frac{\mathrm{kg\,m^2}}{\mathrm{s^2}}\,.$$

Eine Kraft von $120\,\mathrm{N}$:

Für die Kraft gilt $F = m \cdot a$, somit

$$120\,\mathrm{N} = 120\,\mathrm{kg} \cdot 1\,\mathrm{m/s^2} = 120\,\frac{\mathrm{kg\,m}}{\mathrm{s^2}}\,.$$

Ergänzungen

Nach der Norm DIN 1301-1 *Einheiten - Teil 1: Einheitennamen, Einheitenzeichen* können für die Angabe eines Volumens in Liter die folgenden, gleichberechtigten Einheitenzeichen verwendet werden: L, L.

Also $1\,\mathrm{L} = 1\,\mathrm{dm}^3 = 1\,\mathrm{L}$.

Erwartungshorizont G5 Sortierung nach Größe

$1\,\mu\mathrm{m}$, $1 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{m}$, $1\,\mathrm{cm}$, $2 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{m}$, $30\,\mathrm{mm}$, $1 \cdot 10^{2}\,\mathrm{m}$, $1\,\mathrm{km}$, $1 \cdot 10^{6}\,\mathrm{m}$.

Ergänzungen

Für die Sortierung ist es hilfreich, die Längen in wissenschaftlicher Notation ohne Präfixe zu schreiben:

$$\begin{aligned}
1\,\mu\mathrm{m} &= 1 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{m} \\
1 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{m} &= 1 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{m} \\
1\,\mathrm{cm} &= 1 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{m} \\
2 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{m} &= 2 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{m} \\
30\,\mathrm{mm} &= 3 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{m} \\
1 \cdot 10^{2}\,\mathrm{m} &= 1 \cdot 10^{2}\,\mathrm{m} \\
1\,\mathrm{km} &= 1 \cdot 10^{3}\,\mathrm{m} \\
1 \cdot 10^{6}\,\mathrm{m} &= 1 \cdot 10^{6}\,\mathrm{m}
\end{aligned}$$

Erwartungshorizont G6 Einheiten (K)

β:	$1/\mathrm{s}^2$	... da das Argument des Kosinus dimensionslos (Einheit 1) sein muss.
γ:	s	... damit sich für die Geschwindigkeit m/s ergibt. Der Kosinus selbst ist dimensionslos mit einem Wert zwischen -1 und 1.
δ:	m	... damit der zweite Summand ebenfalls die Einheit m/s hat.

Erwartungshorizont G7 Einheitensystem

a) Die Einheiten der kinematischen Größen v und a wären:

$$[v] = \frac{[x]}{[t]} = 1\,\mathrm{Ga/Na} \quad \text{und}$$

$$[a] = \frac{[v]}{[t]} = 1\,\mathrm{Ga/Na}^2 \,.$$

b) Die Einheit der Kraft wäre:

$$[F] = [m] \cdot [a] = 1\,\mathrm{Ob\,Ga/Na}^2 \,.$$

Ergänzungen

Konventionsgemäß bedeutet ein Größensymbol in eckigen Klammern die Einheit der betreffenden physikalischen Größe. So steht zum Beispiel $[F]$ nicht für die Kraft selbst, sondern für die Einheit der Kraft, also Newton oder kurz N.

Für die Geschwindigkeit sollte der Zusammenhang „Weg pro Zeit“ genutzt werden, hier also Galilei pro Napoleon.

Für die Beschleunigung kann eine der angegebenen Beziehungen nach a aufgelöst werden, $a = v/t$ und $a = 2 \cdot x/t^2$ liefern gleichermaßen für die Einheit Galilei pro Quadrat-Napoleon.

Für die Bestimmung der Einheit der Kraft muss eine Beziehung bekannt sein, die ihren Zusammenhang mit anderen Größen beschreibt. Aus der Mechanik ist bekannt „Kraft gleich Masse mal Beschleunigung“ . Zu der Einheit der Beschleunigung kommt also die Einheit Obelix für die Masse als Faktor hinzu.

Erwartungshorizont G8 Einheitenanalyse

Beschleunigung mal Zeit ergibt die SI-Einheit m/s und damit keine Strecke, sondern eine Geschwindigkeit. Der zweite Summand Geschwindigkeit mal Zeit hat zwar die richtige SI-Einheit Meter; man kann aber keine zwei Terme mit unterschiedlichen Einheiten addieren.

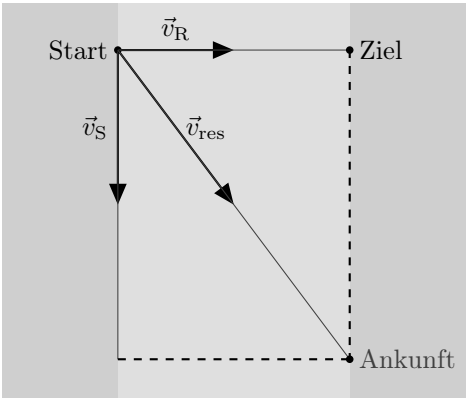
Erwartungshorizont G9 Vektorgrößen

Größe	v	s	Größe	v	s
Masse		×	Geschwindigkeit	×	
Kinetische Energie		×	Lageenergie		×
Gravitationskraft	×		Coulombkraft	×	
Impuls	×		Druck		×
Temperatur		×	Wärme		×

Erwartungshorizont G10 Überlagerung

a) In der folgenden Skizze ist die Geschwindigkeit des Ruderboots relativ zum Fluss nach rechts und die Geschwindigkeit der Strömung

nach unten dargestellt. Der Fluss ströme dabei über seine gesamte Breite hinweg mit gleicher Geschwindigkeit. Der schräge Pfeil zeigt die resultierende Geschwindigkeit als Überlagerung, das heißt als Vektorsumme.



b)

$$v = \sqrt{v_\mathrm{R}^2 + v_\mathrm{S}^2} = 5\,\mathrm{m/s}\,.$$

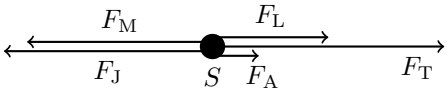
c) Der Tangens des Winkels ist das Verhältnis von Gegenkathete und Ankathete: $\tan(\alpha) = \frac{v_\mathrm{S}}{v_\mathrm{R}} = \frac{4}{3}$. In Gradmaß ergibt sich $\alpha = \arctan\left(\frac{4}{3}\right) \approx 53{,}1°$.

d) Die Überfahrt verlängert sich zeitlich nicht, da nur der Anteil $\vec{v}_\mathrm{R}$ die Zeitdauer bestimmt. Es gibt aber einen räumlichen Versatz am gegenüberliegenden Ufer.

Erwartungshorizont G11 Kräfte

a) Keine Bewegung des Seils bedeutet, dass seine Beschleunigung a gleich Null ist. Wegen $F = m \cdot a$ beträgt die resultierende Kraft dann $F = 0\,\mathrm{N}$. Insgesamt ziehen $F_\mathrm{M} + F_\mathrm{J} = 340\,\mathrm{N}$ nach links und ohne Anton $F_\mathrm{T} + F_\mathrm{L} = 300\,\mathrm{N}$ nach rechts. Also muss Anton mit $F_\mathrm{A} = 40\,\mathrm{N}$ nach rechts ziehen.

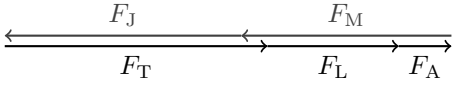
b) In der folgenden Skizze sind die Kräfte als im Schwerpunkt S angreifend eingezeichnet:



Alternativ kann das Seil in die Skizze aufgenommen werden:



Die Vektorsumme zu Null kann durch Aneinanderhängen der Pfeile gebildet werden:



Ergänzungen

Es handelt sich um ein näherungsweise eindimensionales Problem und die angegebenen Kräfte sind die Beträge der Kraftkomponenten in Richtung des Seils. Die Kräftebilanz für die Beträge lautet

$$F_\mathrm{M} + F_\mathrm{J} = F_\mathrm{T} + F_\mathrm{L} + F_\mathrm{A}\,.$$

Die Kräftebilanz für die vorzeichenbehafteten Komponenten beziehungsweise die Kräftevektoren lauten

$$F_\mathrm{M} + F_\mathrm{J} + F_\mathrm{T} + F_\mathrm{L} + F_\mathrm{A} = 0\,,$$
$$\vec{F}_\mathrm{M} + \vec{F}_\mathrm{J} + \vec{F}_\mathrm{T} + \vec{F}_\mathrm{L} + \vec{F}_\mathrm{A} = \vec{0}\,.$$

Erwartungshorizont G12 Masse und Gewicht

a) Die Gewichtskraft bezeichnet die Kraft, die ein Körper im Schwerefeld eines Himmelskörpers erfährt.

Die Masse ist eine Eigenschaft eines Körpers, die nicht von dem Ort abhängt.

An einem festen Ort auf der Erde sind die Gewichtskraft F_G und die Masse m proportional zueinander, die Proportionalitätskonstante g ist die Erdbeschleunigung: $F_\mathrm{G} = m \cdot g$.

Unabhängig vom Ort bedingt die Masse die Trägheit, mit der sich ein Körper einer Änderung der Bewegung widersetzt.

Beispiel: Es anstrengender, mit einem schweren Fahrrad bergauf zu fahren und es braucht mehr Kraft, ein massiges Fahrrad zu beschleunigen.

b) Die Masse eines Gegenstandes ist die gleiche auf der Erde und auf dem Mond.

Die Gewichtskraft eines Gegenstandes auf dem Mond beträgt etwa ein Sechstel des Wertes auf der Erde, aber auch auf der Erde ist die Gewichtskraft eines Körper nicht an jedem Ort genau gleich.

Ergänzungen

Dass trotz der alltagssprachlichen Bezeichnungen ein Unterschied zwischen Masse und Gewichtskraft besteht, sollte bekannt sein. So gibt es ja schon einen Unterschied bezüglich des Vektorcharakters, der in G9 abgefragt wird. Eine Unterscheidung zwischen träger und schwerer Masse wäre wünschenswert.

Bezüglich des Verhältnisses der Gewichtskraft auf der Erde und dem Mond sollte zumindest bekannt sein, dass die Gewichtskraft auf dem Mond deutlich kleiner ist als auf der Erde.

Dass auf der Erdoberfläche g einen Wert von etwa 9,81 N/kg beziehungsweise 9,81 $\mathrm{m/s^2}$ hat und der genaue Wert vom Ort abhängt, wäre gut zu wissen. Eine Kenntniss der Zusammenhänge zum Beispiel mit der Form der Erde, der Dichteverteilung oder dem rotatorischen Anteil geht über das Erwartbare hinaus.

Erwartungshorizont G13 Aktionsprinzip

Wenn man eine Kraft auf einen Körper ausübt, wird dieser je nach Masse beschleunigt, eine große Masse weniger, eine kleine Masse mehr.

Beispiel: Anschieben eines Einkaufswagens. Je mehr er beladen ist, desto langsamer gewinnt er an Geschwindigkeit bei gleich starkem Anschieben.

Erwartungshorizont G14 Newton

Die richtige Antwort ist d), denn $F = m \cdot a$ umgestellt auf $a = F/m$

ergibt:

$$a = \frac{1\,\mathrm{N}}{1\,\mathrm{kg}} = 1\,\mathrm{m/s^2}\ .$$

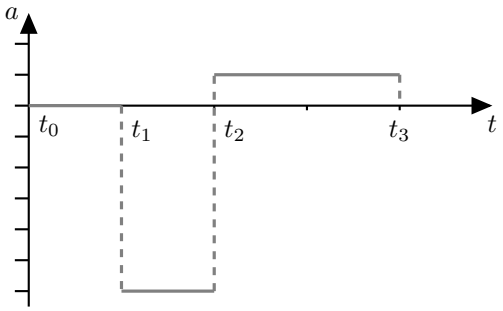
Erwartungshorizont G15 Rutschvorgang (K)

Die Gleitreibung des Päckchens ist eine Kraft entgegen der Bewegungsrichtung und in diesem Fall groß genug, das Päckchen auf der zur Verfügung stehenden Strecke auf die Geschwindigkeit Null abzubremsen. Die Gleitreibungskraft muss also vom Betrag her größer als die Hangabtriebskraft sein. Nach dem Anhalten des Päckchens wirkt die Haftreibungskraft, die in diesem Fall die Hangabtriebskraft gerade kompensiert.

Erwartungshorizont G16 Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm

a) Der Körper bewegt sich von t_0 bis t_1 gleichförmig, also mit konstanter Geschwindigkeit. Danach wird er ab t_1 gleichmäßig verzögert, bis er sich zwischen t_1 und t_2 kurzzeitig in Ruhe befindet, $v = 0$. Dann wird er weiter, ohne Unterbrechung, in Gegenrichtung zur ursprünglichen Bewegungsrichtung mit der gleichen Kraft beschleunigt. Die Änderung der Geschwindigkeit zeigt jetzt in die gleiche Richtung wie die Geschwindigkeit und der Körper bewegt sich im Vergleich zur bisherigen Bewegung rückwärts. Anschließend wird er von t_2 bis t_3 gleichmäßig verzögert, bis er sich in Ruhe befindet. Der Betrag der dabei wirkenden verzögernden Beschleunigung ist kleiner als der Betrag der Beschleunigung im zweiten Zeitabschnitt, vgl. „Steigung im v-t-Diagramm entspricht der Beschleunigung“.

b) Skizze der Beschleunigung als Funktion der Zeit:



Erwartungshorizont G17 Dichte

Die Dichte ist definiert als „Masse pro Volumen“: $\varrho = m/V$. Da alle Kugeln die gleiche Masse haben, muss die Kugel mit dem kleinsten Volumen die größte Dichte haben und umgekehrt, also gilt

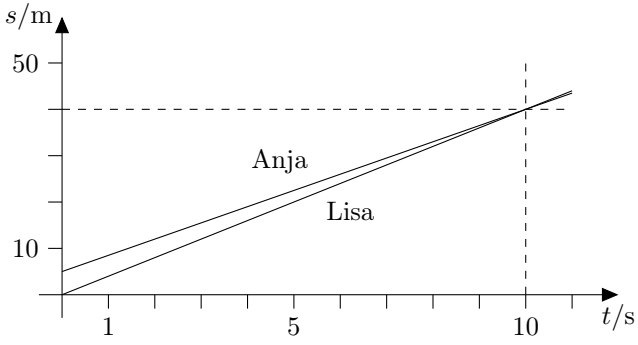
$$\varrho_P < \varrho_Q < \varrho_S < \varrho_R\,.$$

Erwartungshorizont G18 Weg-Zeit-Diagramm

a) Weg-Zeit-Diagramm:

Geg.:	Lisa:	$s_{\mathrm{L}0} = 0\,\mathrm{m}$	$v_{\mathrm{L}} = 4{,}00\,\mathrm{m/s}$
	Anja:	$s_{\mathrm{A}0} = 5{,}00\,\mathrm{m}$	$v_{\mathrm{A}} = 3{,}50\,\mathrm{m/s}$

Die Geschwindigkeiten entsprechen den Steigungen im Weg-Zeit-Diagramm, die Startpositionen den Achsenabschnitten auf der Weg-Achse:



b) Ja, Lisa schafft es, Anja innerhalb der ersten 50,0 m einzuholen. Nach 10,0 s hat Lisa mit 40,0 m zurückgelegter Strecke den Vorsprung eingereicht.

Mögliche Lösungswege:

i) Anja hat 5,00 m Vorsprung, Lisa schafft pro Sekunde 0,500 m mehr, braucht also 10,0 s zum Aufholen.

ii) Formale Rechnung:

$$s_\mathrm{L} = v_\mathrm{L} \cdot t \; ;$$
$$s_\mathrm{A} = v_\mathrm{A} \cdot t + s_\mathrm{A0} \; .$$

Gleichsetzen ergibt $t_1 = 10{,}0\,\mathrm{s}$ und $s_1 = 40{,}0\,\mathrm{m}$ für beide.

Erwartungshorizont G19 Fallbewegung (K)

a) Berechnung für die vollständige Umwandlung von Lageenergie in kinetische Energie:

$$\begin{aligned} E_\mathrm{pot} &= E_\mathrm{kin} \\ m \cdot g \cdot \Delta h &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \\ v &= \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} \\ &= 845\,\mathrm{m/s} \\ &\approx 3000\,\mathrm{km/h} \; . \end{aligned}$$

b) Seine gemessene Geschwindigkeit ist mit $v_\mathrm{Messung} = 1357{,}6\,\mathrm{km/h}$ weniger als die Hälfte des oben errechneten Wertes. Der große Unterschied lässt sich vor allem durch die in der Rechnung nicht berücksichtigte Luftreibung erklären.

Ergänzungen

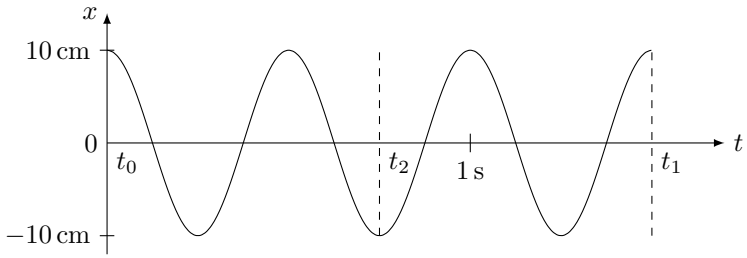
Die Abnahme der Erdbeschleunigung mit der Höhe spielt hier eine untergeordnete Rolle. Das Verhältnis der Erdbeschleunigung in der Höhe h über der Erde zu dem Wert auf dem Erdboden kann mit dem Erdradius r_E zu $g(r_\mathrm{E} + h)/g(r_\mathrm{E}) \approx 1/(1 + 2 \cdot h/r_\mathrm{E})$ abgeschätzt werden und hat mit 39 km und 6400 km knapp den Wert 0,99. Wird bei dieser Aufgabe der Wert der Erdbeschleunigung auf der Absprunghöhe mit

$0{,}99 \cdot 9{,}81\,\mathrm{m/s^2} \approx 9{,}71\,\mathrm{m/s^2}$ berechnet wird klar, dass das Ergebnisse unserer Berechnung mit einem festen Wert für g mit höchstens zwei Ziffern angegeben werden sollte. Die fünf Ziffern bei der Fallhöhe und Geschwindigkeit deuten auf extrem genaue Messungen hin.

Erwartungshorizont G20 Schwingung

a) $\hat{x} = 10{,}0\,\mathrm{cm}$ und $f = 1/0{,}500\,\mathrm{s} = 2{,}00\,\mathrm{Hz}$.

b) Elongation über Zeit



c) Zum Zeitpunkt $t_2 = 0{,}750\,\mathrm{s}$ befindet sich die Kugel nach anderthalb Periodendauern im zweiten unteren Umkehrpunkt bei $-10{,}0\,\mathrm{cm}$.

Erwartungshorizont G21 Beschleunigung

Da die Bewegung des Fußgängers sicher nicht exakt wie in dem schematischen Diagramm verläuft, wird hier das Ergebnis nur auf eine Stelle genau angegeben.

a) Die hier abschnittsweise konstante Beschleunigung entspricht der Steigung im v-t-Diagramm. Für die konstante Beschleunigung aus der Ruhe beim Zeitpunkt $t_0 = 0\,\mathrm{s}$ auf die Geschwindigkeit v_1 zum Zeitpunkt $t_1 = 2\,\mathrm{s}$ ergibt sich der Wert

$$a_1 = \frac{v_1}{t_1 - t_0} = \frac{4\,\mathrm{m/s}}{2\,\mathrm{s}} = 2\,\mathrm{m/s^2}\,.$$

Nach dem Zeitpunkt t_1 ist die Beschleunigung konstant Null:

$$a_2 = 0\,\mathrm{m/s^2}\,.$$

b) Während der ersten Zeitspanne $t_1 - t_0 = t_1 = 2\,\mathrm{s}$ legt der Fußgänger bei gleichmäßiger Beschleunigung aus der Ruhe die Strecke

$$s_1 = \frac{1}{2} \cdot a_1 \cdot t_1^2 = \frac{1}{2} \cdot 2\,\mathrm{m/s^2} \cdot (2\,\mathrm{s})^2 = \frac{1}{2} \cdot 2\,\mathrm{m/s^2} \cdot 4\,\mathrm{s^2} = 4\,\mathrm{m}$$

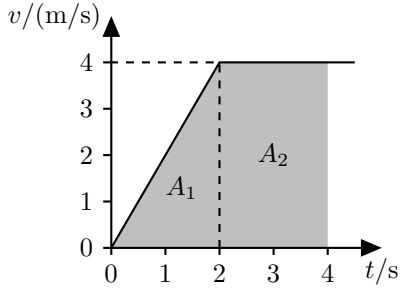
zurück. In der nachfolgenden Zeitspanne von $t_2 - t_1 = 2\,\mathrm{s}$ Dauer kommen bei gleichförmiger Bewegung

$$s_2 = v_1 \cdot (t_2 - t_1) = 4\,\mathrm{m/s} \cdot 2\,\mathrm{s} = 8\,\mathrm{m}$$

hinzu. Die insgesamt zurück gelegte Wegstrecke beträgt also

$$s_{\mathrm{ges}} = s_1 + s_2 = 12\,\mathrm{m}.$$

c) Grafisch lässt sich die zum Zeitpunkt $t_2 = 4\,\mathrm{s}$ zurückgelegte Wegstrecke als „Fläche A_{ges}“ im v-t-Diagramm bestimmen:



mit $A_1 = (1/2) \cdot 2\,\mathrm{s} \cdot 4\,\mathrm{m/s} = 4\,\mathrm{m}$, $A_2 = 2\,\mathrm{s} \cdot 4\,\mathrm{m/s} = 8\,\mathrm{m}$ und daraus $A_{\mathrm{ges}} = A_1 + A_2 = 12\,\mathrm{m}$.

Ergänzungen

Die gleichfömige Bewegung kann auch als „Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit“ bezeichnet werden.

Die gleichmäßig beschleunigte Bewegung bei kann auch als „Bewegung mit konstanter Beschleunigung“ bezeichnet werden.

Erwartungshorizont G22 Weg-Zeit-Diagramme

Die Geschwindigkeit entspricht der Steigung im x-t-Diagramm.

a) Vergleich der Geschwindigkeiten $v_1 = v(t_1)$ und $v_2 = v(t_2)$:
   (A) $v_1 > v_2$,
   (B) $v_1 = v_2$,
   (C) $v_1 < v_2$,
   (D) $v_1 > v_2$.

b) Vergleich der Geschwindigkeitsbeträge $|v_1|$ und $|v_2|$:
   (A) $|v_1| > |v_2|$,
   (B) $|v_1| = |v_2|$,
   (C) $|v_1| > |v_2|$,
   (D) $|v_1| < |v_2|$.

Erwartungshorizont G23 Geschwindigkeits-Zeit-Diagramme

Diagramm (B) erfüllt die Voraussetzungen für $v_y(t)$:

Positive Anfangsgeschwindigkeit (nach oben), Umkehrpunkt ganz oben, Symmetrie der Auf- und Abwärtsbewegung, linearer Geschwindigkeitsverlauf $\Rightarrow$ erfüllt konstante Erdbeschleunigung.

Diagramm (D) erfüllt die gleichförmige Bewegung für $v_x(t)$:

Konstante und positive Geschwindigkeit über den gewünschten Zeitraum.

Erwartungshorizont G24 Parallelfahrt

a) An den Schnittpunkten der beiden Graphen befinden sich die Fahrzeuge „am gleichen Ort“, sind also gleichauf.

b) F2 fährt rückwärts in dem Zeitraum mit negativer Steigung bis zum Minimum der Kurve. Da F1 sich mit konstanter Geschwindigkeit in die andere Richtung bewegt (positive Steigung des Graphen), bewegen sich die beiden Fahrzeuge in dieser Zeit entgegengesetzt.

c) Ungefähr ein Kästchen rechts vom Minimum hat der Graph F2 die gleiche Steigung wie der Graph von F1, also haben beide auch die gleiche Geschwindigkeit.

d) F1 fährt gleichförmig, hat also immer seine höchste Geschwindig-

keit. F2 erreicht seine höchste Geschwindigkeit am Ende des Beobachtungszeitraums.

e) Die Fahrzeuge sind am Punkt der gleichen Geschwindigkeit aus c) am weitesten voneinander entfernt (Visualisierung: Vertikaler Abstand der Funktionswerte, oder Erklärung über Geschwindigkeitsunterschied knapp vorher und knapp nach diesem Zeitpunkt - Extrempunkt in der Differenzfunktion, da Ableitung dort null).

Erwartungshorizont G25 Berechnungen

Annas Lösung ist falsch: Sie hat mit einer gleichförmigen Bewegung gerechnet, obwohl diese in Wirklichkeit gleichmäßig beschleunigt ist. Außerdem hat sie die Erdbeschleunigung (den Ortsfaktor) mit der Geschwindigkeit verwechselt.

Bibis Lösung ist richtig: Sie hat mit dem Erhaltungssatz für die mechanische Energie gerechnet, dem zufolge die beim Start vorhandene Lageenergie vollständig in Bewegungsenergie umgewandelt wird. Diese Rechnung liefert nur eine Aussage über den Betrag der Geschwindigkeit. Das Vorzeichen der Geschwindigkeit könnte positiv oder negativ sein. Es steht für die Bewegungsrichtung und kann aus dieser Berechnung allein, ohne Festlegung eines Koordinatensystems, nicht bestimmt werden.

Clemens' Lösung ist ebenfalls richtig: Sehr gut ist dabei seine Skizze, aus der hervorgeht, wie die Höhenwerte entlang der von ihm festgelegten Koordinatenachse ansteigen. Zur Berechnung verwendet er dann die Bewegungsgleichung und erhält so das korrekte negative Vorzeichen der Geschwindigkeit, das die Bewegungsrichtung „nach unten“ bezüglich dieser Achse beschreibt.

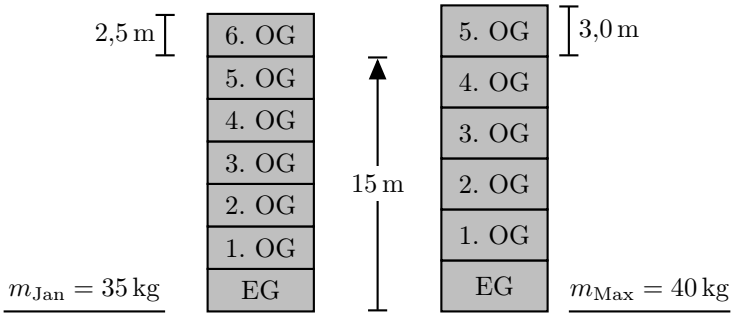
Erwartungshorizont G26 Treppensteigen

Die Aufgaben a), b) und c) sind lösbar.

Bei d) und e) fehlen jeweils Angaben zu der für das Hinaufsteigen benötigten Zeit, die Aufgabe e) macht das nochmals besonders deutlich.

Die Ergebnisse - soweit berechenbar - im Einzelnen:

a) Jan und Max steigen beide die gleiche Höhe von $h = 15{,}0\,\text{m}$ hinauf. Ihre Massen unterscheiden sich. Dies ist in der Skizze angedeutet.



Die Lageenergie berechnet sich aus $E_{\mathrm{Lage}} = m \cdot g \cdot h$. Dies ergibt für die beiden Jungen

$$E_{\mathrm{Jan}} = m_{\mathrm{Jan}} \cdot g \cdot h = 35{,}0\,\mathrm{kg} \cdot 9{,}81\,\mathrm{m/s^2} \cdot 15{,}0\,\mathrm{m} = 5{,}15\,\mathrm{kJ}\ .$$

und

$$E_{\mathrm{Max}} = m_{\mathrm{Max}} \cdot g \cdot h = 40{,}0\,\mathrm{kg} \cdot 9{,}81\,\mathrm{m/s^2} \cdot 15{,}0\,\mathrm{m} = 5{,}89\,\mathrm{kJ}\ .$$

b) Die Murmeln fallen die gleiche Strecke h und treffen gleichzeitig auf dem Boden auf. Unter Vernachlässigung der Luftreibung folgt die Auftreffgeschwindigkeit v_{Boden} aus dem Energieerhaltungssatz, die Masse m der Murmeln ist dabei unerheblich:

$$E_{\mathrm{pot}} = m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_{\mathrm{Boden}}^2 = E_{\mathrm{kin}}\ .$$

Daraus

$$v_{\mathrm{Boden}} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \sqrt{2 \cdot 9{,}81\,\mathrm{m/s^2} \cdot 15{,}0\,\mathrm{m}} = 17{,}2\,\mathrm{m/s}\ .$$

c) Die Fallzeit t_{Max} der Murmel von Max berechnet sich aus:

$$h = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t_{\mathrm{Max}}^2$$

zu

$$t_{\mathrm{Max}} = \sqrt{2 \cdot h/g} = \sqrt{2 \cdot 15{,}0\,\mathrm{m}/9{,}81\,\mathrm{m/s^2}} = 1{,}75\,\mathrm{s}\ .$$

Die Fallzeit t_{Jan} der Murmel von Jan soll mindestens 0,3 s größer sein. Also $t_{\text{Jan}} > t_{\text{Max}} + 0{,}3\,\text{s} = 2{,}05\,\text{s}$. Somit

$$t_{\text{Jan}} = \sqrt{2 \cdot h_{\text{Jan}}/g} > 2{,}05\,\text{s} \quad \text{daraus}$$

$$h_{\text{Jan}} > \frac{1}{2} \cdot 4{,}2025\,\text{s}^2 \cdot g$$

$$h_{\text{Jan}} > \frac{1}{2} \cdot 4{,}2025\,\text{s}^2 \cdot 9{,}81\,\text{m/s}^2 = 20{,}6\,\text{m}\ .$$

Jan müsste also mindestens $h_{\text{Jan}} - h = 5{,}6\,\text{m}$ weiter nach oben steigen als Max. Da die Höhe der Stockwerke in Jans Haus nur 2,5 m beträgt, bedeutet dies weitere drei Stockwerke Aufstieg.

d) Die mechanische Leistung P berechnet sich allgemein aus der in einer Zeitspanne Δt aufgebrachten Arbeit ΔW zu $P = \Delta W/\Delta t$. Im Fall von Jan und Max wäre diese Zeitspanne die jeweilige Dauer des Aufstiegs, die jedoch nicht angegeben ist.

e) Dass keine Zeitangaben vorliegen, wird hier nochmals deutlich.

Erwartungshorizont G27 Aufgabenstellung

a) Es wird sich um den senkrechten Wurf eines Körpers nach oben handeln. Die Startgeschwindigkeit ist dabei v_0 und der Startpunkt liegt in einer Höhe h über dem Erdboden. Auf den Körper wirkt die Schwerkraft F_{G}.

b) Daraus könnten verschiedene Größen berechnet werden:

- Flugdauer bis zum Erreichen des höchsten Punkts,
- Flugdauer bis zum Aufprall auf dem Erdboden,
- maximale Steighöhe,
- Aufprallgeschwindigkeit am Boden,
- Masse des Körpers,
- Steighöhe mit halber kinetischer Energie oder halber Startgeschwindigkeit,
- ...

Erwartungshorizont G28 Dichtebestimmung

Sollten die folgenden Formeln oder Dichtebereiche nicht bekannt sein, sind diese zuerst nachzuschlagen.

a) Mit den Formeln für das Volumen von Kreiskegel und Zylinder

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h + \pi \cdot r^2 \cdot h \\ &= \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h \\ &= \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (0{,}5\,\mathrm{dm})^2 \cdot 1\,\mathrm{dm} \\ &= 1{,}047\,\mathrm{L} \end{aligned}$$

folgt die Dichte

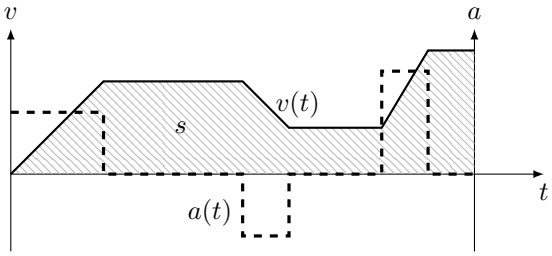
$$\begin{aligned} \varrho &= \frac{m}{V} \\ &= \frac{1\,\mathrm{kg}}{1{,}047\,\mathrm{L}} \\ &= 955\,\mathrm{kg/m^3}\ . \end{aligned}$$

b) Der Körper wird aus Holz oder Polyethylen bestehen. Polyethylen hat eine Dichte im Bereich von $870\,\mathrm{kg/m^3}$ bis $970\,\mathrm{kg/m^3}$. Die Dichte von Holz schwankt in einem großen Bereich, je nach Holzart und Feuchtigkeit.

Erwartungshorizont G29 Zugfahrt

a) Geschwindigkeit $v(t)$: durchgezogene Kurve in der folgenden Skizze

b) Beschleunigung $a(t)$: gestrichelte Kurve in der folgenden Skizze



c) Die insgesamt zurückgelegte Strecke entspricht der schraffierten Fläche s unter dem Verlauf von $v(t)$ im v-t-Diagramm zwischen Start- und Endzeitpunkt. Diese Fläche im Diagramm gilt es zu bestimmen. Im vorliegenden Fall lässt sie sich in einfache geometrische Komponenten - Rechtecke und Dreiecke - zerlegen, die ausgemessen, deren Flächenanteile dann berechnet und die am Ende aufsummiert werden. In Basiseinheiten hat diese Fläche dann die Einheit $[v] \cdot [t] = \mathrm{m/s} \cdot \mathrm{s} = \mathrm{m}$.

Erwartungshorizont G30 Stoßvorgänge (K)

Für die Bewegung der Waggons wird Reibungsfreiheit angenommen.

a) Der vorliegende Stoß ist inelastisch. Die Waggons können nicht elastisch voneinander abprallen, sondern bleiben durch das Ankoppeln aneinander hängen. Dies kann als eine Art Verkeilen der Waggons ineinander aufgefasst werden.

b) Das Verkeilen kostet mechanische Energie. Somit bliebt während dieses Vorgangs die mechanische Energie nicht erhalten. Der Impulserhaltungssatz gilt dagegen, denn es wirken nur innere Kräfte zwischen den Waggons.

c) Aus dem Impulserhaltung folgt

$$\begin{aligned} p_{\text{vorher}} &= p_{\text{nachher}} \\ M \cdot v + \frac{3}{2} \cdot M \cdot \frac{1}{2} \cdot v &= \left(M + \frac{3}{2} \cdot M \right) \cdot u \quad \text{daraus} \\ \frac{7}{4} \cdot v &= \frac{5}{2} \cdot u \\ u &= \frac{7}{10} \cdot v \,. \end{aligned}$$

Beide Waggons fahren nach dem Ankoppeln zusammen mit 70 % der Geschwindigkeit des zu Beginn schnelleren Waggons weiter.

Ergänzungen

Die Bezeichnung von Stoßvorgängen ist in der Literatur nicht einheitlich. Beim Stoß erfolgt in aller Regel eine Deformation der beiden Stoßpartner.

Ist diese Deformation vollkommen reversibel, geht also keinerlei mechanische Energie durch den Stoßvorgang verloren, liegt ein **elastischer** Stoß

vor. Manchmal wird dieser auch als *vollkommen elastisch* oder kurz *vollelastisch* bezeichnet.

Werden die Stoßpartner bei dem Stoßvorgang bleibend deformiert, wird ein Teil der anfangs vorhandenen mechanische Energie in Deformationsarbeit verwandelt. Dann liegt ein **unelastischer** Stoß vor.

Bewegen sich die beiden Stoßpartner nach dem Stoß voneinander getrennt weiter, finden sich dafür oft die folgenden Bezeichnungen: *anelastisch*, *inelastisch*, *teilelastisch*, *teilplastisch* oder *teilweise plastisch*.

Der hier beschriebene Fall, dass die beiden Stoßpartner sich nach dem Stoß zusammen weiterbewegen, wird oft einfach als **unelastisch** oder **plastisch**, manchmal aber auch als *vollkommen unelastisch*, *vollkommen plastisch* oder *vollplastisch* bezeichnet.

Erwartungshorizont G31 Schlauchstück

Der Außenradius des Schlauchstücks ist gleich dem halben Außendurchmesser: $r_{\text{außen}} = d/2$. Für den Innenradius ist hiervon die Wandstärke abzuziehen.

a) Die Dichte ist der Quotient aus Masse m und Volumen V. Sie wird zuerst in $\mathrm{g/cm^3}$ berechnet:

$$\begin{aligned} V &= \pi \cdot \left(r_{\text{außen}}^2 - r_{\text{innen}}^2\right) \cdot L \\ &= \pi \cdot \left((1{,}0\,\mathrm{cm})^2 - (0{,}7\,\mathrm{cm})^2\right) \cdot 20\,\mathrm{cm} \\ &= 32{,}04\,\mathrm{cm^3}\ ; \\ \varrho &= \frac{m}{V} = \frac{50\,\mathrm{g}}{32{,}04\,\mathrm{cm^3}} = 1{,}56\,\mathrm{g/cm^3} \\ &= 1{,}6 \cdot \frac{10^{-3}\,\mathrm{kg}}{(10^{-1}\,\mathrm{dm})^3} = 1{,}6 \cdot \frac{10^{-3}\,\mathrm{kg}}{10^{-3}\,\mathrm{dm}} = 1{,}6\,\mathrm{kg/dm^3}\ . \end{aligned}$$

b) Das Schlauchstück wird im Öl nicht schwimmen. Seine Dichte von $1{,}6\,\mathrm{g/cm^3}$ ist deutlich höher als die Dichte des Öls von $0{,}85\,\mathrm{g/cm^3}$.

Ergänzungen

Damit ein Objekt in einer Flüssigkeit (einem Fluid) schwimmt, muss die darin auf das Objekt einwirkende Auftriebskraft seiner Gewichtskraft F_{G} das Gleichgewicht halten (Prinzip von Archimedes). Diese Auftriebskraft

F_A ist wiederum gleich der Gewichtskraft des von dem Objekt verdrängten Flüssigkeitsvolumens V_Fluid. Die Bedingung für Schwimmen ist, dass Kräftegleichgewicht herrscht:

$$F_\mathrm{G} = \varrho_\mathrm{Objekt} \cdot V_\mathrm{Objekt} \cdot g = \varrho_\mathrm{Fluid} \cdot V_\mathrm{Fluid} \cdot g = F_\mathrm{A} \ .$$

Ein Objekt kann maximal, das heißt bei vollständigem Eintauchen, sein Eigenvolumen an Flüssigkeit verdrängen. Im Grenzfall gilt also $V_\mathrm{Fluid} = V_\mathrm{Objekt}$. Dann vereinfacht sich die Gleichgewichtsbedingung zu $\varrho_\mathrm{Objekt} = \varrho_\mathrm{Fluid}$. Sie ist im Fall des Schlauchstücks in Öl nicht erfüllt.

Erwartungshorizont G32 Multimeter

a) Bei Messung 1 im linken Bild wird mit dem Multimeter eine Spannung gemessen, bei Messung 2 im rechten Bild ein Strom.

b) Messung 1 liefert einen Spannungswert von $-20{,}0\,\mathrm{V}$ (oder auch $20{,}0\,\mathrm{V}$). Ohne weitere Informationen über die Polung des Messgeräts in der Schaltung ist keine Aussage über das Vorzeichen und seine Bedeutung möglich. Messung 2 ergibt einen Stromwert von $5{,}0\,\mathrm{A}$.

Ergänzungen

In diesem Multimeter dient ein analoges Zeigerinstrument zur Anzeige. Am Drehschalter wird der jeweils aktive Messbereich eingestellt. Der damit eingestellte Wert steht dabei für den Endwert der betreffenden Skala, also für den Vollausschlag des Zeigers. Bei der Ablesung ist zu beachten, dass je nach Messbereich besser die obere oder die untere Skala zu verwenden ist. In Messbereichen mit den Endwerten 300, 30, 3, ... wird sinnvollerweise auf der oberen Skala abgelesen während in den Messbereichen mit dekadischen Endwerten besser die untere Skala verwendet wird. Schließlich sind die beiden Skalen symmetrisch. Das heißt, sie haben die Null in der Mittelstellung, so dass das Messgerät unabhängig von seiner Polung in der Schaltung bis zum jeweiligen Endwert des Messbereichs eingesetzt werden kann.

Im linken Bild ist der Messbereich $30\,\mathrm{V}$ eingestellt. Demnach ist der Messwert auf der oberen Skala abzulesen, ihr Endwert 3 entspricht also einem Messwert von $30\,\mathrm{V}$ für die Spannung. Der Zeiger steht in der linken Hälfte der Skala auf 2, also formal bei $-20{,}0\,\mathrm{V}$.

Im rechten Bild ist der Messbereich 10 A eingestellt. Demnach ist der Messwert auf der unteren Skala abzulesen, ihr Endwert 1 entspricht also einem Messwert von 10 A für den Strom. Der Zeiger steht bei $0,5$ in der rechten Hälfte der Skala, also formal bei 5,0 A.

Erwartungshorizont G33 Schulweg

Die Skala ist nicht plausibel, die Geschwindigkeit von etwa 30 m/s, also umgerechnet über 100 km/h, ist beim Laufen nicht erreichbar.

Erwartungshorizont G34 Schätzwert

Der Sinus schwankt zwischen -1 und 1, ist also vernachlässigbar verglichen mit dem anderen Summanden. Es ist $\pi^2 \approx 10$. Mit diesen Näherungen und umgeschriebenen Zehnerpotenzen erhalten wir zunächst

$$\begin{aligned}\frac{0{,}037 \cdot 10^{29} \cdot \pi^2 + \sin\left(0{,}083 \cdot 10^{47}\right)}{\left(0{,}002\,32 \cdot 10^{-22}\right)^2} &\approx \frac{3{,}7 \cdot 10^{28}}{\left(2{,}32 \cdot 10^{-25}\right)^2} \\ &= \frac{3{,}7}{\left(2{,}32\right)^2} \cdot 1 \cdot 10^{78}\,.\end{aligned}$$

Der letzte Bruch ist etwas kleiner als $4/2^2 = 1$ und deutlich größer als $0{,}1 < 3/3^2$. Die Zahl ist also von der Größenordnung 10^{77}.

Erwartungshorizont G35 Weltbevölkerung (K)

Hier ist eine quantitative Abschätzung gefragt, keine exakte Berechnung („Fermi-Problem“). Wir gehen von stehenden Menschen aus, um möglichst wenig Fläche pro Person zu belegen. Ein erwachsener Mann hat eine Schulterbreite von etwa 40 cm und von Brust zu Rücken eine „Tiefe“ von etwa 25 cm. Damit benötigt er eine Standfläche von 0,1 m^2. Mehr als zwei kleine Kinder passen sicherlich nicht auf diese Fläche. Die Weltbevölkerung wird der Einfachheit halber auf 8 Milliarden geschätzt, ohne die Anteile von Kindern und Erwachsenen noch näher zu gewichten. Somit wird die abgeschätzte Fläche tendenziell eher zu hoch sein. Unter diesen Annahmen müsste der benötigte Kreis also eine Fläche von 800 Millionen m^2 aufweisen, das entspricht einem Radius von ziemlich genau 16 km oder einem Durchmesser von 32 km.

Erwartungshorizont G36 Schnappschuss

Der Fahrradfahrer hat wohl den üblichen Reifendurchmesser von 28 bis 29 Zoll oder ca. 70 bis 75 cm. Ziemlich genau ein Viertel dieses Durchmessers scheint er sich während der 1/50 Sekunde bewegt zu haben, d.h. in einer Sekunde das 50-fache eines Viertels von 75 cm oder ca. 9 bis 9,5 m/s. Das entspricht etwa 30 bis 35 km/h und damit einer durchaus realistischen, wenn auch sportlichen Fahrradgeschwindigkeit.

Erwartungshorizont G37 Tennisbälle

a) Ein ganz einfache Abschätzung ist über die Berechnung des Volumens von 200 Tennisbällen möglich:

   Ein Ball hat einen Durchmesser von etwa 7 cm und damit das Volumen $\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 = 179{,}6\,\mathrm{cm}^3$. Demnach haben 200 Bälle ein Volumen von $V_{200} = 35\,919\,\mathrm{cm}^3$.

   Das Volumen der Kiste beträgt $V_{\mathrm{Kiste}} = A \cdot h$ und muss auf jeden Fall gleich dem Volumen der Bälle sein. Also ist $V_{\mathrm{Kiste}} = V_{200}$ und daraus folgt die erforderliche Höhe h der Kiste zu

$$h = \frac{V_{\mathrm{Kiste}}}{A} = \frac{V_{200}}{A} = \frac{35\,919\,\mathrm{cm}^3}{50\,\mathrm{cm} \times 40\,\mathrm{cm}} = 18{,}0\,\mathrm{cm}\ .$$

b) Eine etwas realistischere Abschätzung berücksichtigt den freien Raum zwischen den Bällen durch eine anschauliche Überlegung:

   Auf die 50 cm Länge der Grundfläche der Kiste passen etwa 7 Tennisbälle, auf die 40 cm Breite dann 5 oder im besten Fall 6 Reihen, wenn diese etwas ineinander greifen. Dies bedeutet etwa 40 Tennisbälle pro Schicht und damit werden insgesamt 5 Schichten benötigt, die wohl ebenfalls ein wenig ineinander greifen werden. Diese knapp 5 Tennisbälle entsprechen einer Höhe zwischen 30 cm und 35 cm für die Kiste.

c) Die Theorie der dichtesten Kugelpackung liefert eine Faustregel, der zufolge etwa 75 % oder 3/4 des erforderlichen Volumens von den Kugeln selbst eingenommen werden.

   Nach dieser Regel sollte die Kiste ein Volumen von $V_{200}/0,75 = 47\,892\,\mathrm{cm}^3$ haben. Geteilt durch ihre Grundfläche ergibt dies eine erforderliche Höhe von etwa 24 cm.

Ergänzungen

Die Theorie der endlichen Kugelpackungen ist mathematisch recht anspruchsvoll...

Erwartungshorizont G38 Ruderer

a) Ja, die Zeit ändert sich.

b) Der einfachste Grenzfall liegt dann vor, wenn die Strömungsgeschwindigkeit des Flusses ebenfalls 10 km/h beträgt. Der Ruderer wird dann nie ankommen, weil er auf dem Hin- oder Rückweg gar nicht gegen die Strömung vorankommt.

Erwartungshorizont G39 Feuerwerk

Die Schallgeschwindigkeit in Luft beträgt etwa $c = 340\,\mathrm{m/s}$. Damit kann die Laufzeit t_{Knall} des Knallgeräuschs über die Entfernung s berechnet werden:

$$c = \frac{s}{t_{\mathrm{Knall}}} \qquad \text{umgewandelt zu} \qquad t_{\mathrm{Knall}} = \frac{s}{c}\,.$$

Bei einer Entfernung von 2 km hat der Schall also $t_{\mathrm{Knall}} \approx 6\,\mathrm{s}$ Laufzeit.

Der Reporter berichtet jedoch, die Laufzeit habe nur 3 s betragen. Seine Aussage ist demnach nicht plausibel. Entweder stand er nur einen Kilometer entfernt oder seine Zeitmessung war unzutreffend.

Ergänzungen

Als Faustregel für Abschätzungen kann angenommen werden, dass sich Luftschall mit etwa „3 s pro Kilometer“ Strecke ausbreitet.

Sie wird häufig bei Gewittern verwendet: Wird nach einem Blitz die Zeit, bis der zugehörige Donner zu hören ist, in Sekunden gemessen, kann daraus die Entfernung des Blitzes vom eigenen Standort abgeschätzt werden. Dazu ist die Anzahl der gemessenen Sekunden durch drei zu teilen, dieser Zahlenwert ergibt die gesuchte Entfernung in Kilometern.

Auch das Licht des Blitzes hat eine Laufzeit bis zum Beobachter. Es breitet sich allerdings mit der Lichtgeschwindigkeit $c = 3{,}00 \cdot 10^8\,\mathrm{m/s}$ aus, die um sechs Größenordnungen höher als die Schallgeschwindigkeit ist. Darum kann seine Laufzeit meistens in sehr guter Näherung vernachlässigt werden.

Erwartungshorizont G40 Schwingungsmessung

a) Ja, die Messung ist noch möglich, man sollte aber mindestens 10 oder 20 Periodendauern messen, um die Zeit halbwegs genau stoppen zu können.

b) Eine Schwingung mit einer Periodendauer von 0,01 s beziehungsweise einer Frequenz von 100 Hz kann das menschliche Auge nicht auflösen, die Stoppuhr ist dann nicht mehr verwendbar.

   Eine andere Möglichkeit wäre die Aufzeichnung durch eine digitale Kamera mit bekannter und ausreichend hoher Bildrate (englisch: frame-rate).

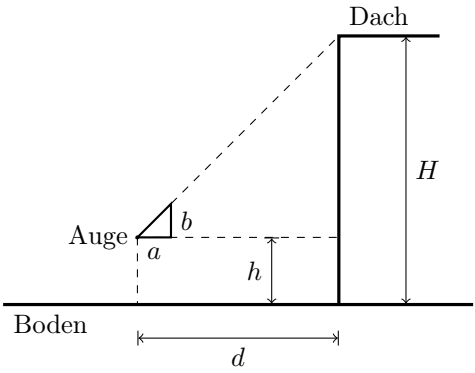
   Alternativ könnte auch eventuell bei der Schwingung entstehender Schall auf seine Frequenz untersucht werden, entweder mit dem menschlichen Gehör oder mit einem Oszilloskop oder einem Frequenzmesser. Auch ein Stroboskop könnte genutzt werden.

Ergänzungen

Anstatt ‚Periodendauer' wird oft auch der Begriff ‚Schwingungsdauer' verwendet.

Erwartungshorizont G41 Höhenmessung

Mit dem Prinzip der geradlinigen Ausbreitung von Lichtstrahlen kann eine Bestimmung über den Strahlensatz erfolgen. Dazu wird das Gebäude über ein Dreieck mit bekannter horizontaler Kantenlänge a und bekannter vertikaler Kantenlänge b angepeilt. Weiterhin müssen der Abstand d zwischen Auge und Gebäude und die Höhe h des Auges über dem Boden bekannt sein:



Dann ist $(H-h)/b$ das gleiche wie d/a oder $H = h + d \cdot (b/a)$. Bei einem Geodreieck mit $a = b$ ist die Höhe einfach die Summe aus dem Abstand und der Höhe der Augen, $H = d + h$.

Andere Möglichkeiten wären eine barometrische Höhenbestimmung oder eine Fallzeitmessung, wobei man auf das Dach gelangen muss und ein Barometer beziehungsweise eine Uhr benötigt.

Ergänzungen

Das bei dem hier prinzipiell beschriebenen Vorgehen verwendete Dreieck ist als Arbeitsgerät unter der Bezeichnung **Försterdreieck** bekannt und wird zur Bestimmung der Höhe von Bäumen im Wald verwendet.

Erwartungshorizont G42 Federkonstante

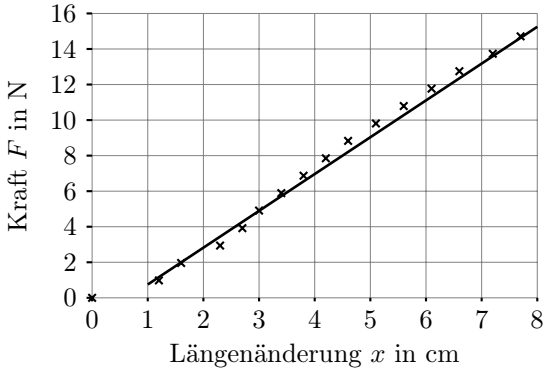
a) Ein lineares Kraft-Dehnungs-Gesetz kann etwa in einem Längenänderungsbereich von 1 cm bis 8 cm angenommen werden.

b) In diesem Bereich nimmt die Länge aufgrund einer Krafterhöhung von etwa 0,8 N auf 15,2 N um 7,0 cm zu. Die Federkonstante beträgt also etwa

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta x} = \frac{15{,}2\,\mathrm{N} - 0{,}8\,\mathrm{N}}{8{,}0\,\mathrm{cm} - 1{,}0\,\mathrm{cm}} = \frac{14{,}4\,\mathrm{N}}{7{,}0\,\mathrm{cm}} = 2{,}1\,\mathrm{N/cm}\ .$$

Das gleiche Ergebnis erhält man, wenn man näherungsweise eine Gerade durch die Punkte im näherungsweise linearen Bereich legt

und an dieser das Steigungsdreieck auswertet. Diese Gerade nennt man Ausgleichsgerade.



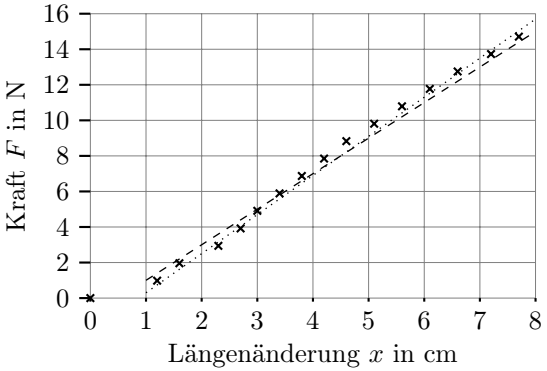
c) Die Messpunkte liegen nicht ganz linear auf einer Kurve. Dies ist unter anderem durch Messfehler verursacht. Das kann dazu führen, dass die Steigung leicht unter- oder überschätzt wird. Eintragen etwas steilerer oder flacherer Geraden ergibt etwa folgende Grenzen für den Bereich des Steigungswerts:

$k_{\min} = 2{,}0\,\mathrm{N/cm}$ und

$k_{\max} = 2{,}2\,\mathrm{N/cm}$.

Das ergibt einen relativen Fehlerbereich von etwa $\pm 5\,\%$.

Hinzu kommt, dass die Annahme eines linearen Verhaltens in diesem Bereich nicht beliebig gut passt.



d) Ohne Belastung hängt das Einweckgummi nicht gerade. Erst mit einer Belastung durch das Aufbringen einer Last von etwa 1 N streckt es sich. Ab da sieht man die nahezu lineare Kraft-Dehnungs-Kurve. Da 1 N immerhin etwa der Gewichtskraft einer Tafel Schokolade entspricht, sollte es anschließend halbwegs gerade hängen. Erfolgt die Messung der Längenänderung durch Anlegen eines Lineals, ist das natürlich nicht beliebig genau. Falls die Kraft über die Gewichtskraft präzise gefertigter Massestücke eingestellt wird, sollte das vergleichsweise genau sein. Andererseits ist denkbar, dass die Längenänderung nicht ganz linear mit der Belastung zunimmt und auch nicht vollständig beim Entfernen der Belastung verschwindet. Die Bedingungen wie Temperatur oder Luftfeuchtigkeit sollten konstant gehalten werden und es sollte nach dem Aufbringen einer neuen Last jeweils eine bestimmte Zeit vor der Messung der Längenänderung gewartet werden.

2 Mechanik

2.1 Kompetenzen

2.1.1 Kinematik

Die Studienanfängerinnen und Studienanfänger sind vertraut mit den Begriffen der Translationsbewegung in einer Dimension, das heißt, sie können ...

- eine dem Problem angepasste Koordinatenachse wählen, Positionen anhand dieser Koordinatenachse angeben und daraus Verschiebungen (Δx) und zurückgelegte Strecken berechnen. Das Vorzeichen der Verschiebung gibt ihre Richtung an (M1),
- die Geschwindigkeit als Quotient aus Verschiebung und Zeitdauer nach $v = \Delta x/\Delta t$ berechnen (M2),
- Momentan- und Durchschnittsgeschwindigkeit unterscheiden und eine Relativgeschwindigkeit als Geschwindigkeitsdifferenz berechnen (M2),
- die Beschleunigung als Quotient aus Geschwindigkeitsdifferenz und Zeitdauer nach $a = \Delta v/\Delta t$ berechnen (M3), (G21a),
- Bewegungsdiagramme (Ort-Zeit, Geschwindigkeit-Zeit, Beschleunigung-Zeit) interpretieren, auswerten und für einfache Bewegungen mit konstanter Beschleunigung zeichnen (G16, G21, G22, G23, G24, G29), (M4),
- Bewegungen mit konstanter Geschwindigkeit beziehungsweise konstanter Beschleunigung mathematisch beschreiben und unbekannte Größen berechnen (G18, G21b), (M5),
- zweidimensionale Bewegungen als Überlagerung zweier eindimen-

sionaler Bewegungen erkennen und daraus abgeleitet Berechnungen durchführen (G10, G23), (M6, M7).

2.1.2 Statik und Dynamik

Die Studienanfängerinnen und Studienanfänger kennen die Kraft als gerichtete Größe und wissen, dass Kräfte die Wechselwirkungen zwischen Gegenständen beschreiben. Sie wissen, dass bei der Addition von Kräften ihre Richtung berücksichtigt werden muss (Überlagerungsprinzip) und verstehen den Begriff resultierende Kraft. Sie wissen, dass in der Statik Kräftegleichgewicht herrscht und dass Kräfte am Hebelarm eine Drehwirkung haben. Sie kennen die Größe Druck und das archimedische Prinzip. Sie kennen die drei Newtonschen Gesetze (Trägheitssatz, Aktionsprinzip und Wechselwirkungsprinzip).

Sie können ...

- die folgenden Kräfte berechnen:
  - Gewichtskraft (M8),
  - Federkraft (M8),
  - Reibungskraft (nur qualitativ) (G15),
  - Auftriebskraft (M9),
- in einfachen Fällen eine resultierende Kraft berechnen (G11),
- bei Kräftegleichgewicht die Kraftpfeile maßstabsgerecht in eine Skizze eintragen und die Kraftsumme bilden (M10),
- wenn mehrere Kräfte einwirken, die Kräftesumme grafisch ermitteln (M11),
- einfache Aufgaben zum Hebelgesetz lösen (M12, M13),
- den Auflagedruck eines Körpers auf eine Fläche berechnen (M14),
- den Schweredruck in einer Flüssigkeit berechnen (M15),
- die Newtonschen Gesetze in einfachen Problemstellungen anwenden (G13, G14), (M16, M17).

2.1.3 Erhaltungssätze

Die Studienanfängerinnen und Studienanfänger kennen die Erhaltungsgrößen Energie und Impuls. Sie kennen die Vorstellung eines abgeschlossenen Systems und wissen, dass die Gesamtenergie und der Gesamtimpuls darin erhalten bleiben. Sie wissen, dass sich die Energie von einer Energieform in andere umwandeln kann, insbesondere auch durch Reibung in thermische Energie. Sie können ...

- die mechanische Arbeit anwenden, um Energieänderungen zu berechnen (M18, M19),
- die kinetische Energie, Lageenergie und elastische Energie[1] berechnen (M19, M20),
- die Erhaltung der Energie in einfachen Beispielen anwenden (G19a), (M20),
- die Leistung als Arbeit pro Zeit berechnen (G26c), (M21),
- den Impulserhaltungssatz für Rückstoß und vollständig inelastischen Stoß in einer Dimension quantitativ anwenden, für elastische Stöße qualitativ (G30), (M22, M23).

2.1.4 Schwingungen und Wellen

Die Studienanfängerinnen und Studienanfänger kennen die folgenden grundlegenden Größen zur Beschreibung harmonischer Schwingungen und Wellen: Amplitude, Periodendauer, Frequenz, Wellenlänge und Ausbreitungsgeschwindigkeit. Sie kennen den Unterschied zwischen transversalen und longitudinalen Wellen.

Sie können ...

- harmonische Schwingungen qualitativ und quantitativ beschreiben (G20), (M24),
- eindimensionale harmonische Wellen qualitativ und quantitativ beschreiben (G39), (M25, M26, M27, M28), (O10).

[1] Alternativ dafür verwendete Begriffe sind: Potenzielle Energie, Federspannenergie.

2.2 Illustrierende Aufgaben

M1 Koordinaten

Ein Käfer krabbelt auf einem Tisch 10 cm weit Richtung Süden, kehrt um und krabbelt 3,0 cm zurück. Beschreiben Sie den Startpunkt, den Punkt, an dem der Käfer umkehrt und den Endpunkt der Bewegung als Koordinaten auf einer Koordinatenachse. Wie berechnet sich aus diesen Koordinaten der Abstand zwischen Startpunkt und Endpunkt?

M2 Geschwindigkeiten

a) Ein Käfer krabbelt in 5,0 Sekunden 10 cm Richtung Süden, ruht zwei Sekunden aus und krabbelt dann in einer Sekunde 3,0 cm weiter. Skizzieren Sie ein Weg-Zeit-Diagramm für seine Bewegung und geben Sie die Geschwindigkeiten in den drei Zeitintervallen an. Wie groß ist die Durchschnittsgeschwindigkeit in den 8,0 Sekunden, die der beschriebene Bewegungsablauf insgesamt gedauert hat?

b) Während der ersten 5,0 Sekunden krabbelt ihm ein zweiter Käfer 2,0 cm entgegen. Wie groß ist die Relativgeschwindigkeit des ersten Käfers relativ zu dem zweiten Käfer während dieser 5,0 Sekunden?

M3 Bremsvorgang

Ein Lastwagen fährt auf der Autobahn mit 100 km/h. Der Fahrer sieht vor sich das Ende eines Staus und bremst. Er braucht 20,0 s, um zum Stillstand zu kommen. Wie groß ist der Betrag der durchschnittlichen Beschleunigung des Lastwagens in SI-Einheiten?

M4 Fall

Ein Stein wird in der Höhe h über dem Boden in Ruhe gehalten und von dort fallen gelassen. Zeichnen Sie qualitativ das Orts-Zeit-, das Geschwindigkeits-Zeit- und das Beschleunigungs-Zeit-Diagramm für diesen freien Fall.

M5 Konstante Beschleunigung

Ein PKW fährt mit einer konstanten Geschwindigkeit von 70 km/h an einem stehenden Polizeiauto vorbei. In dem Moment, in dem er das Po-

lizeiauto passiert, startet dieses mit einer Beschleunigung von $3{,}0\,\mathrm{m/s^2}$, um den PKW einzuholen. Nach welcher Fahrstrecke hat das Polizeiauto den PKW eingeholt?

M6 Wurfweite

Ein Junge steht auf einem horizontalen Boden und schleudert einen Ball waagerecht in einer Höhe von 1,50 m mit der Geschwindigkeit 13,0 m/s von sich weg. In welcher Entfernung zu dem Jungen trifft der Ball auf dem Boden auf? Die Luftreibung ist zu vernachlässigen.

M7 Wurf **(K)**

Ein Junge wirft einen Ball mit 10 m/s waagerecht gegen eine 4,0 m entfernte Wand. In welcher Höhe relativ zur Abwurfhöhe trifft der Ball auf die Wand? Die Luftreibung ist zu vernachlässigen.

M8 Feder

Ein Gegenstand mit einer Masse von 1,0 kg wird an eine Schraubenfeder gehängt, die sich daraufhin elastisch um 10 cm verlängert. Wie groß ist die Federkonstante der Schraubenfeder?

M9 Auftrieb

Ein Klotz aus Teakholz hat ein Volumen von einem Liter und eine Masse von 1,1 kg. Er wird vollständig in Wasser eingetaucht und dann losgelassen.

a) Wird der Klotz auftauchen?

b) Welche Kräfte wirken auf ihn ein und welche Richtung hat die resultierende Kraft auf den Klotz?

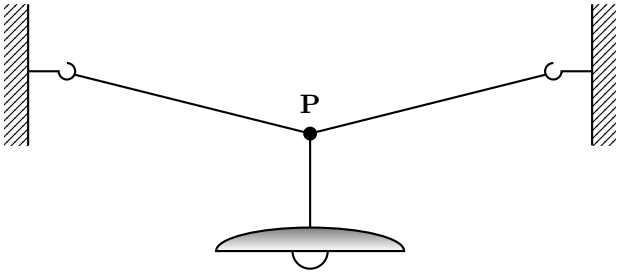
M10 Kraftpfeile

Eine Leuchte hängt, wie nachstehend skizziert, in der Mitte eines gespannten Seils und bewegt sich nicht.

a) Welche Kräfte greifen in Punkt P an?

b) Welcher Zusammenhang besteht zwischen ihnen?

c) Zeichnen Sie die Kräfte als Kraftpfeile in die Skizze ein!

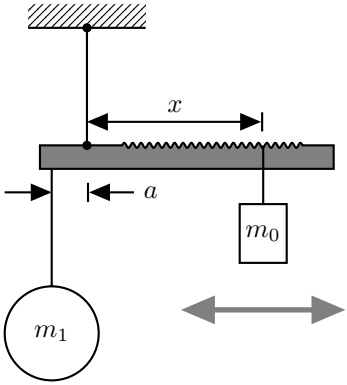


M11 Seilkraft **(K)**

Die Leuchte aus Aufgabe M10 hat eine Masse von 3,0 kg. Das Seil hängt auf beiden Seiten mit einem Winkel von 10° zur Horizontalen nach unten durch. Berechnen Sie die Kraft, die das Seil jeweils auf die Haken in den Wänden ausübt.

M12 Schnellwaage

Nachfolgend ist der Aufbau einer Schnellwaage skizziert. Die zu bestimmende Masse m_1 hängt in festem Abstand a zum Drehpunkt des Waagebalkens. Das Laufgewicht mit der bekannten Masse m_0 wird auf dem Waagebalken so weit verschoben, bis die Waage im Gleichgewicht ist. Die Masse m_1 folgt dann aus dem Abstand x des Laufgewichts zum Drehpunkt.

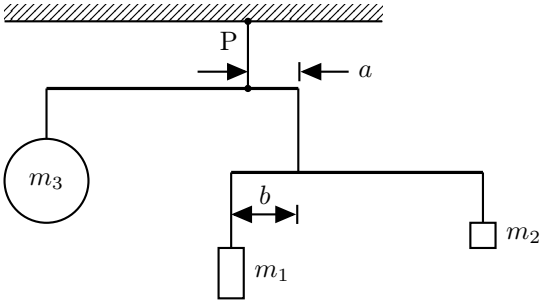


a) Geben Sie eine Formel an, um m_1 aus den Größen m_0, a und x zu berechnen (der Balken sei masselos).

b) Bei der Schnellwaage kann der Abstand x von 5,0 cm bis 50,0 cm verändert werden. Die Masse m_0 beträgt 150 g und der Abstand a 8,0 cm. Welcher Messbereich folgt daraus für m_1?

M13 Gleichgewicht (K)

Ein Mobile besteht aus Massen beziehungsweise Gewichten, waagrechten Stäben und senkrechten Fäden (siehe Skizze). Die beiden Stäbe sind jeweils 30,0 cm lang, der Abstand a beträgt 6,0 cm und die Massen sind $m_1 = 60\,\text{g}$ und $m_2 = 30\,\text{g}$. Stäbe und Fäden werden als masselos angenommen. Das Mobile befindet sich im Gleichgewicht.



a) Wie groß ist die Masse m_3?

b) Wie groß ist die Kraft, mit der das gesamte Mobile an dem Aufhängepunkt P an der Decke zieht?

M14 Kraft pro Fläche

Die Platte eines Tischs hat eine Länge von 140 cm und eine Breite von 80 cm, seine Masse beträgt 25 kg. Er hat vier Beine mit kreisrundem Querschnitt, deren jeweils gleiche Kontaktfläche mit dem Boden einen Durchmesser von 2,0 cm besitzt.

a) Der Tisch steht auf seinen Beinen. Welcher Druck wird innerhalb der Kontaktflächen auf den Boden ausgeübt, wenn sich die Last gleichmäßig auf die Beine des Tischs verteilt?

b) Der Tisch wird umgedreht und liegt nun mit seiner Platte auf dem Boden. Welchen Druck übt jetzt die Tischplatte auf den Boden aus, wenn auch hier wieder eine Gleichverteilung der Last vorliegt?

M15 Druck (K)

Wie groß ist der Druck 5,0 m unter der Oberfläche einer Flüssigkeit, die eine Dichte von 750 $\mathrm{kg/m^3}$ hat?

M16 Zugkraft

Eine Lokomotive mit einer Masse von 80 000 kg zieht einen Waggon von 40 000 kg in der Ebene mit konstanter Geschwindigkeit über das Gleis. Sie übt eine Kraft von 3000 N auf den Waggon aus. Wie groß ist die Reibungskraft, die auf den Waggon wirkt?

M17 Beschleunigungskräfte (K)

Eine Lokomotive zieht zwei Waggons mit einer Masse von je 40 000 kg in der Ebene. Sie beschleunigt mit 0,1 $\mathrm{m/s^2}$. Welche Kraft übt die Lokomotive auf den ersten Waggon aus? Welche Kraft übt der erste Waggon auf die Lokomotive aus? Welche Kraft übt der zweite Waggon auf den ersten aus? Die Reibung ist zu vernachlässigen.

M18 Arbeit und Energie

Ein Schrank wird aus der Raummitte über eine Strecke von 2,0 m an die Wand geschoben. Um ihn gegen die Reibung am Gleiten zu halten,

wird eine Kraft von 450 N benötigt. Welche Arbeit ist für diesen Vorgang mindestens erforderlich und wieviel Wärme entsteht dabei?

M19 Reibung

Ein Kind mit einer Masse von 20 kg rutscht eine 2,0 m hohe Rutsche mit konstantem Steigungswinkel von 45° hinunter. Es wird von einer Reibungskraft von 50 N gebremst. Wieviel Energie liegt am Ende in Form von Wärme vor? Wie groß ist die Endgeschwindigkeit?

M20 Energieumwandlung

Ein Körper mit einer Masse von 1,0 kg liegt auf einem Tisch lose vor einer gespannten Feder, der Körper berührt dabei die Feder. Die Feder ist 5,0 cm eingedrückt und hat eine Federkonstante von 200 N/m. Die Feder entspannt sich und beschleunigt dabei den Körper, der danach über den Tisch gleitet. Mit welcher Geschwindigkeit bewegt sich der Körper? Die Reibung ist zu vernachlässigen.

M21 Leistung

Ein Kran hebt Steine der Masse 1000 kg mit konstanter Geschwindigkeit in einer Zeit von 5,0 s um 20 m hoch. Wie groß ist dabei die mechanische Leistung des Windenmotors? Danach stoppt der Motor, der Kran hält aber weiter das Gewicht. Wie groß ist nun seine mechanische Leistung?

M22 Impulserhaltung

Ein Kind steht ruhend auf einem Skateboard (Gesamtmasse 30 kg) und fängt einen Ball (0,30 kg), der horizontal mit einer Geschwindigkeit von 5,0 m/s angeflogen kommt. Mit welcher Geschwindigkeit rollt das Kind auf dem Skateboard los, nachdem es den Ball gefangen hat? Die Reibung ist zu vernachlässigen.

M23 Rückstoß

Eine Person steht - vorsichtig - auf einem ruhenden Longboard der Masse $m_1 = 3{,}0\,\text{kg}$, die Person hat eine Masse von $m_2 = 60\,\text{kg}$. Nun springt die Person - ganz vorsichtig - mit einer horizontalen Geschwindigkeit von

$v_2 = 0{,}50\,\mathrm{m/s}$ von dem Brett. Welche Geschwindigkeit v_1 hat das Board unmittelbar nach dem Absprung?

M24 Harmonische Schwingung

Ein Ball schwingt harmonisch auf und ab. Der Abstand zwischen höchstem und tiefstem Ort der Bewegung beträgt 10 cm und der Ball benötigt 0,5 s, um vom höchsten zum niedrigsten Punkt zu kommen. Bestimmen Sie die Amplitude und Frequenz und schreiben Sie einen mathematischen Ausdruck für die Zeitabhängigkeit des Ortes des Balls auf.

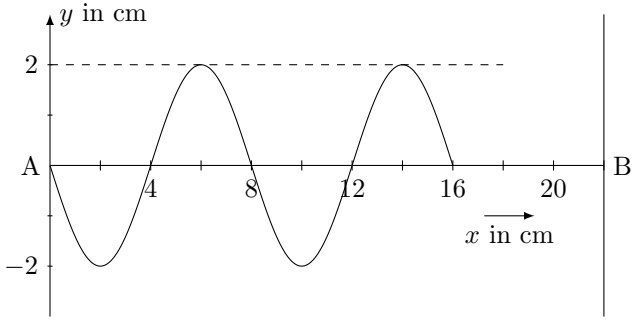
M25 Wellenarten

Eine Gitarrensaite wird angeschlagen, dabei entsteht ein hörbarer Ton. Von welcher Art - longitudinal oder transversal - sind die Seilwelle auf der Saite und die Schallwelle in Luft? Erklären Sie den Unterschied zwischen diesen beiden Wellentypen.

M26 Fortschreitende Welle

Durch einen harmonischen Schwinger in der Position (A) werden auf einem Wellenträger AB lineare Transversalwellen erzeugt.

Das Momentbild dieser Welle zu dem Zeitpunkt $t = 0{,}125\,\mathrm{s}$ nach Beginn der Schwingung ist in der Abbildung dargestellt.

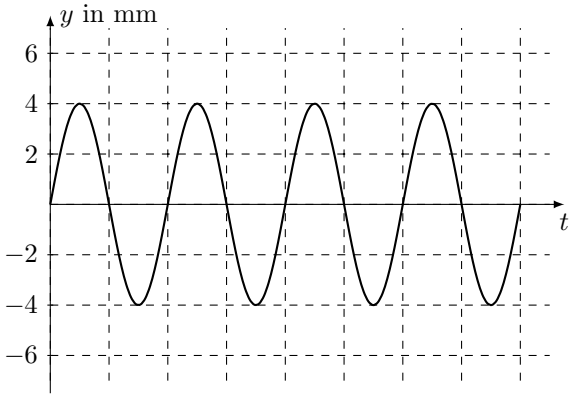


Bestimmen Sie mit Hilfe der Abbildung die Wellenlänge und die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle sowie die Frequenz des Schwingers.

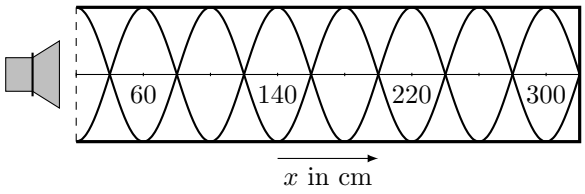
M27 Stehende Welle (K)

Die Schwingung eines Lautsprechers ist in einem $y(t)$-Diagramm dargestellt, siehe Abbildung (A). Ein Kästchen entspricht in x-Richtung $1{,}175 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{s}$. Die Schallwelle des Lautsprechers tritt in ein halboffenes Rohr. In dem Rohr überlagern sich die Schallwelle und ihr Echo zu einer stehenden Welle, siehe Abbildung (B).

(A)



(B)



Bestimmen Sie mit Hilfe der Abbildungen die Frequenz, die Wellenlänge und die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwelle.

M28 Wellenfunktion (K)

Für eine eindimensionale harmonische Welle wird als Ausbreitungsfunktion

$$y\,(x,t) = 12\,\mathrm{cm} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \left(\frac{x}{78{,}0\,\mathrm{cm}} - \frac{t}{2{,}27\,\mathrm{ms}}\right)\right)$$

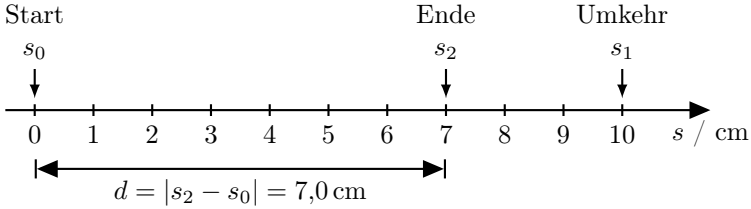
angegeben. Bestimmen Sie daraus die Größen Amplitude, Periodendauer, Frequenz, Wellenlänge und Ausbreitungsgeschwindigkeit.

2.3 Erwartungshorizonte

Erwartungshorizont M1 Koordinaten

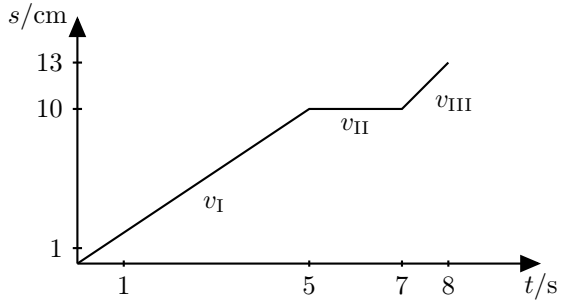
Die Position des Käfers kann auf einer Koordinatenachse dargestellt werden, die in Südrichtung zeigt. Besonders übersichtlich wird die Darstellung, wenn der Startpunkt s_0 auf dieser Achse die Koordinate 0 cm hat. Der Umkehrpunkt s_1 hat dann die Koordinate 10 cm. Der Endpunkt der Bewegung s_2 hat die Koordinate 7,0 cm. Der Abstand d von s_0 und s_2 ist der Betrag der Differenz dieser beiden Koordinatenwerte:

$$d = |s_2 - s_0| = |7{,}0\,\text{cm} - 0\,\text{cm}| = 7{,}0\,\text{cm}\ .$$



Erwartungshorizont M2 Geschwindigkeiten

a) Weg-Zeit-Diagramm:



$v_{\mathrm{I}} = \frac{10\,\mathrm{cm}}{5{,}0\,\mathrm{s}} = 2{,}0\,\mathrm{cm/s}$,

$v_{\mathrm{II}} = \frac{0\,\mathrm{cm}}{2{,}0\,\mathrm{s}} = 0{,}0\,\mathrm{cm/s}$,

$v_{\mathrm{III}} = \frac{3{,}0\,\mathrm{cm}}{1{,}0\,\mathrm{s}} = 3{,}0\,\mathrm{cm/s}$ und

$\bar{v} = \frac{13\,\mathrm{cm}}{8{,}0\,\mathrm{s}} = 1{,}6\,\mathrm{cm/s}$.

b) Sei v_2 die Geschwindigkeit des zweiten Käfers. Da sich die Käfer aufeinander zubewegen, addieren sich deren Geschwindigkeiten zu der Relativgeschwindigkeit:

$v_{\mathrm{Relativ}} = v_{\mathrm{I}} + v_2 = 2{,}0\,\mathrm{cm/s} + \frac{2{,}0\,\mathrm{cm}}{5{,}0\,\mathrm{s}} = 2{,}4\,\mathrm{cm/s}$.

Ergänzungen

Die Relativgeschwindigkeit des ersten Käfers relativ zu dem zweiten Käfer ist die Geschwindigkeit des ersten Käfers minus der Geschwindigkeit des zweiten Käfers, letztere ist in dem für den ersten Käfer gewählten Koordinatensystem negativ:

$v_{\mathrm{Relativ}} = 2{,}0\,\mathrm{cm/s} - (-0{,}4\,\mathrm{cm/s})$.

Erwartungshorizont M3 Bremsvorgang

Anfangsgeschwindigkeit des Lastwagens in m/s:

$v_0 = 100\,\mathrm{km/h} = 100\,000\,\mathrm{m}/3600\,\mathrm{s} = 27{,}8\,\mathrm{m/s}$.

Endgeschwindigkeit des Lastwagens: $v_{\mathrm{end}} = 0\,\mathrm{m/s}$.

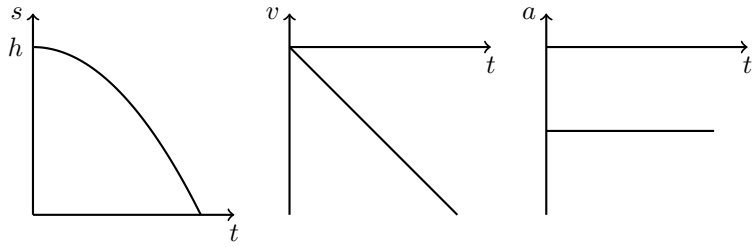
$$a = \left|\frac{\Delta v}{\Delta t}\right| = \left|\frac{v_{\mathrm{end}} - v_0}{\Delta t}\right| = \left|\frac{-27{,}8\mathrm{m/s}}{20{,}0\,\mathrm{s}}\right| = \left|-1{,}39\,\mathrm{m/s^2}\right| = 1{,}39\,\mathrm{m/s^2}\,.$$

Ergänzungen

Beschleunigungswerte mit negativem Vorzeichen werden oft auch als Bremsbeschleunigung oder Bremsverzögerung bezeichnet. Manchmal wird dann im Fall solcher Bremsvorgänge das negative Vorzeichen bei der Angabe weggelassen.

Erwartungshorizont M4 Fall

Die drei Diagramme sehen qualitativ wie folgt aus:



Wenn der Ort s nach oben positiv gezählt wird, von 0 m beim Boden bis h, dann wird s mit zunehmender Zeit kleiner, Geschwindigkeit und Beschleunigung sind negativ.

Erwartungshorizont M5 Konstante Beschleunigung

Die Zeit t und die Strecken s werden ab dem ersten Treffen gerechnet:

$$s_{\text{PKW}} = v \cdot t \qquad \text{und} \qquad s_{\text{Polizei}} = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \,.$$

$$s_{\text{PKW}} = s_{\text{Polizei}} \Leftrightarrow v \cdot t = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \underset{t>0}{\Leftrightarrow} v = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t \Leftrightarrow t = \frac{2 \cdot v}{a} \,.$$

Dieses Zwischenergebnis kann zu $t = 2 \cdot \frac{(70/3{,}6)\text{m/s}}{3{,}0\,\text{m/s}^2} = 13{,}0\,\text{s}$ berechnet werden. Einsetzen des Zwischenergebnisses oder des Ausdrucks für t z.B. in die Gleichung des PKWs liefert für die gesuchte Fahrstrecke

$$s = (70/3{,}6)\,\text{m/s} \cdot 13{,}0\,\text{s} = 250\,\text{m} \,.$$

Erwartungshorizont M6 Wurfweite

Die Dauer der vertikalen Fallbewegung aus der Höhe h folgt aus

$$h = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \underset{t>0}{\Leftrightarrow} t = \sqrt{2 \cdot h/g} \,.$$

Zwischenergebnis: $t = \sqrt{2 \cdot \frac{1{,}50\,\text{m}}{9{,}81\,\text{m/s}^2}} = 0{,}553\,\text{s}$.
Daraus folgt die Wurfweite

$$s = v \cdot t = 13{,}0\,\text{m/s} \cdot 0{,}553\,\text{s} = 7{,}19\,\text{m} \,.$$

Es wird eine ungestörte Überlagerung der beiden Bewegungsanteile in vertikaler und horizontaler Richtung angenommen (Überlagerungs- oder Superpositionsprinzip).

Ergänzungen

Das Überlagerungsprinzip kann auch dann noch angewandt werden, wenn eine Reibung proportional zu der Geschwindigkeit angenommen wird. Es gilt nicht mehr, wenn der Betrag der Reibungskraft als proportional zum Betragsquadrat der Geschwindigkeit betrachtet wird.

Erwartungshorizont M7 Wurf (K)

Mit dem Überlagerungsprinzip wird die Flugzeit t aus der Horizontalgeschwindigkeit v und dem Abstand s zur Wand berechnet: $t = s/v$. Diese kann als Zwischenergebnis zu $t = \frac{4{,}0\,\mathrm{m}}{10\,\mathrm{m/s}} = 0{,}40\,\mathrm{s}$ berechnet werden. Damit ist die gesuchte Fallstrecke

$$y = -\frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 = -\frac{1}{2} \cdot 9{,}81\,\mathrm{m/s^2} \cdot (0{,}40\,\mathrm{s})^2 = -0{,}78\,\mathrm{m}\,.$$

Ergänzungen

Da nach der *Höhe* relativ zu der Abwurfhöhe gefragt ist, kann mit einer nach oben gerichteten y-Achse die Fallstrecke mit negativem Vorzeichen angegeben werden. Ohne das Vorzeichen wäre das Ergebnis der Betrag der Fallstrecke. Bei der Fallbeschleunigung wird mit g hier der Betrag bezeichnet, so dass in der obigen Rechnung mit nach oben gerichteter y-Achse $-g$ eingesetzt wird.

Erwartungshorizont M8 Feder

Die Federkonstante k ist das Verhältnis aus der Gewichtskraft $F_\mathrm{G} = m \cdot g$ und der Elongation x, hier

$$k = \frac{F_\mathrm{G}}{x} = \frac{1{,}0\,\mathrm{kg} \cdot 9{,}81\,\mathrm{N/kg}}{0{,}10\,\mathrm{m}} = 98\,\mathrm{N/m}\,.$$

Ergänzungen

Statt *Elongation* wird oft auch der gleichbedeutende Begriff *Auslenkung* verwendet

Erwartungshorizont M9 Auftrieb

a) Die Dichte des Klotzes ist höher als die Dichte des Wassers,

$$\varrho_{\text{Klotz}} = 1{,}1\,\text{kg/L} > \varrho_{\text{Wasser}} = 1{,}0\,\text{kg/L}\,,$$

der Klotz wird daher nicht auftauchen, sondern sinken.

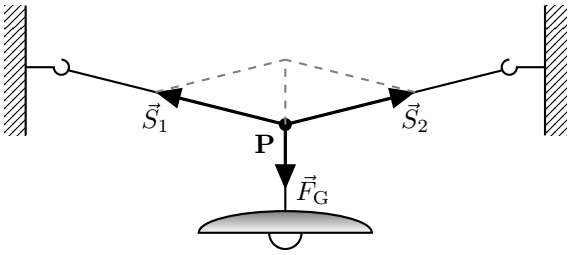
b) Der Klotz erfährt eine nach unten gerichtete Gewichtskraft. Die Auftriebskraft ist nach oben gerichtet und hat als Betrag die Gewichtskraft des verdrängten Wasservolumens. Da die Auftriebskraft hier etwas kleiner ist als die Gewichtskraft des Klotzes, zeigt die resultierende Kraft senkrecht nach unten.

Erwartungshorizont M10 Kraftpfeile

a) Es sind drei Kräfte: Kraft $\vec{S}_1$ in Seilrichtung zum linken Haken, Kraft $\vec{S}_2$ in Seilrichtung zum rechten Haken, Gewichtskraft $\vec{F}_{\text{G}}$ nach unten.

b) Die Leuchte hängt in Ruhe, der Punkt P bewegt sich nicht. Demnach sind die drei genannten Kräfte im Gleichgewicht und addieren sich zur einer auf den Punkt wirkenden Gesamtkraft von Null. Für diese resultierende Kraft gilt also
$\vec{F}_{\text{res}} = \vec{S}_1 + \vec{S}_2 + \vec{F}_{\text{G}} = \vec{0}\,.$

c) Skizze mit Kraftpfeilen:

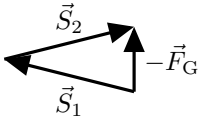


Ergänzungen

Für die Konstruktion der Skizze kann die Kräftebilanz in der Form

$$\vec{S}_1 + \vec{S}_2 = -\vec{F}_{\text{G}}$$

betrachtet werden:



Erwartungshorizont M11 Seilkraft (K)

Bilanz der vertikalen Kraftkomponenten, nach unten positiv gezählt:

$$-S_1 \cdot \sin(10°) - S_2 \cdot \sin(10°) + F_\mathrm{G} = 0\,.$$

Aus der Symmetrie oder auch der horizontalen Kräftebilanz folgt, dass die Beträge der Seilkräfte gleich sind, $S_1 = S_2 = S$. Damit:

$$\begin{aligned} -2 \cdot S \cdot \sin(10°) + m \cdot g = 0 \Leftrightarrow S &= \frac{m \cdot g}{2 \cdot \sin(10°)} \\ &= \frac{3{,}0\,\mathrm{kg} \cdot 9{,}81\,\mathrm{N/kg}}{2 \cdot \sin(10°)} \\ &= 85\,\mathrm{N}\,. \end{aligned}$$

Erwartungshorizont M12 Schnellwaage

Zuerst ist eine allgemeine Formel gesucht, damit sind dann konkrete Zahlenwerte zu berechnen.

a) Die Hebelarme sind gerade a und x, die Drehmomentbilanz um den Drehpunkt lautet

$$a \cdot m_1 \cdot g = x \cdot m_0 \cdot g \Leftrightarrow m_1 = \frac{x}{a} \cdot m_0\,.$$

b) Die einzustellende Verschiebung x wächst mit der zu bestimmenden Masse, die kleinste messbare Masse ist also für $x = 5{,}0\,\mathrm{cm}$

$$m_{1,\mathrm{min}} = \frac{5{,}0\,\mathrm{cm}}{8{,}0\,\mathrm{cm}} \cdot 150\,\mathrm{g} = 94\,\mathrm{g}$$

und die größte messbare Masse ist

$$m_{1,\mathrm{max}} = \frac{50{,}0\,\mathrm{cm}}{8{,}0\,\mathrm{cm}} \cdot 150\,\mathrm{g} = 940\,\mathrm{g}$$

für $x = 50{,}0\,\text{cm}$.

Erwartungshorizont M13 Gleichgewicht (K)

Für die Aufgabe wird von dem unteren Teil des Mobiles lediglich dessen Gesamtmasse $m_1 + m_2 = 90\,\text{g}$ benötigt, dessen Stablänge oder der Abstand b hingegen nicht.

a) Sei l die Länge des oberen Stabes. Die Hebelarme sind gerade $a = 6{,}0\,\text{cm}$ und $l - a = 30{,}0\,\text{cm} - 6{,}0\,\text{cm} = 24{,}0\,\text{cm}$. Die Drehmomentbilanz um den Aufhängepunkt P geteilt durch g lautet

$$\begin{aligned}(l-a)\cdot m_3 = a\cdot(m_1+m_2) &\Leftrightarrow m_3 = (m_1+m_2)\,\frac{a}{l-a}\\ &\Leftrightarrow m_3 = 90\,\text{g}\cdot\frac{6{,}0\,\text{cm}}{24{,}0\,\text{cm}}\\ &\Leftrightarrow m_3 = 0{,}25\cdot 90\,\text{g} = 23\,\text{g}\,.\end{aligned}$$

b) Das Mobile belastet die Aufhängung mit dem Gesamtgewicht

$$\begin{aligned}F_\text{G} &= (m_3+m_1+m_2)\cdot g\\ &= (22{,}5+90)\cdot 10^{-3}\,\text{kg}\cdot 9{,}81\,\frac{\text{N}}{\text{kg}}\\ &= 1{,}1\,\text{N}\,.\end{aligned}$$

Erwartungshorizont M14 Kraft pro Fläche

Der Druck ist hier das Verhältnis von Gewichtskraft und Standfläche, $p = F_\text{G}/A$:

a) Mit dem Beindurchmesser d ist die Standfläche $4\cdot\pi\cdot(d/2)^2 = \pi\cdot d^2$:

$$\begin{aligned}p_\text{Beine} &= \frac{m\cdot g}{\pi\cdot d^2}\\ &= \frac{25\,\text{kg}\cdot 9{,}81\,\text{N/kg}}{\pi\cdot(2{,}0\cdot 10^{-2}\,\text{m})^2} = \frac{25\cdot 9{,}81}{\pi\cdot 4{,}0\cdot 10^{-4}}\,\text{Pa}\\ &= 0{,}20\,\text{MPa}\,.\end{aligned}$$

b) Mit der Länge l und der Breite b ist die Standfläche $l \cdot b$:

$$\begin{aligned} p_{\text{Platte}} &= \frac{m \cdot g}{l \cdot b} \\ &= \frac{25\,\text{kg} \cdot 9{,}81\,\text{N/kg}}{1{,}4\,\text{m} \cdot 0{,}80\,\text{m}} = \frac{25 \cdot 9{,}81}{1{,}4 \cdot 0{,}80}\,\text{Pa} \\ &= 220\,\text{Pa}\,. \end{aligned}$$

Ergänzungen

Zum Vergleich: Die Druckfestigkeit von Holz in Faserrichtung beträgt etwa $50\,\text{N/mm}^2$ bzw. 50 MPa, gegenüber einem Versagen durch Druck besteht also bei Holzbeinen eine üppige Sicherheit.

Die Zugfestigkeit von Holz beträgt etwa das Doppelte. Stähle weisen höhere Festigkeiten auf, allerdings bei deutlich höheren Dichten.

Erwartungshorizont M15 Druck (K)

In der Tiefe h unter der Oberfläche einer Flüssigkeit der Dichte ϱ herrscht bei konstanter Erdbeschleunigung g der Schweredruck $\varrho \cdot g \cdot h$. Zu dem Schweredruck kommt der Umgebungsdruck p_0 an der Oberfläche hinzu:

$$\begin{aligned} p &= \varrho \cdot g \cdot h + p_0 \\ &= 750\,\text{kg/m}^3 \cdot 9{,}81\,\text{N/kg} \cdot 5{,}0\,\text{m} + p_0 \\ &= 37\,\text{kPa} + p_0\,. \end{aligned}$$

Für einen atmosphärischen Druck von $p_0 = 101\,\text{kPa}$ an der Oberfläche lautet das Ergebnis daher $p = 138\,\text{kPa}$.

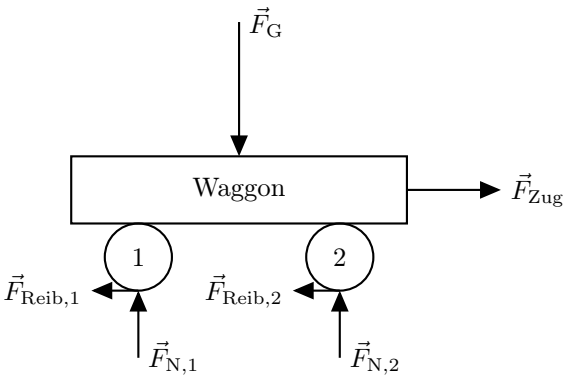
Erwartungshorizont M16 Zugkraft

Da die Geschwindigkeit konstant ist, heben sich die Reibungs- und Zugkraft auf. Der Betrag der Reibungskraft ist 3000 N.

Die Richtung der Reibungskraft ist entgegen der Richtung der Zugkraft.

Ergänzungen

Skizze der auf den Waggon wirkenden Kräfte:



Die Reibungs- und Normalkraftvektoren sind nicht maßstabsgerecht.

Erwartungshorizont M17 Beschleunigungskräfte (K)

Die Beschleunigung a einer Masse m erfolgt durch die Kraft $F = m{\cdot}a$. Lokomotive und Waggons haben die gleiche Beschleunigung $a = 0{,}1\,\mathrm{m/s^2}$. An der Kupplung zwischen Lokomotive und erstem Waggon hängen indirekt beide Waggons, das Kraft-Gegenkraft-Paar hat den Betrag

$$F_{\mathrm{Lok}} = 80\,000\,\mathrm{kg} \cdot 0{,}1\,\mathrm{m/s^2} = 8\,\mathrm{kN}\ .$$

An der Kupplung zwischen beiden Waggons hängt lediglich der zweite Waggon, hier hat das Kräftepaar den Betrag

$$F_{\mathrm{Waggon}} = 40\,000\,\mathrm{kg} \cdot 0{,}1\,\mathrm{m/s^2} = 4\,\mathrm{kN}\ .$$

Erwartungshorizont M18 Arbeit und Energie

Die erforderliche Arbeit W beziehungsweise entstehende Wärme Q ist das Produkt aus der konstanten Kraft F und dem Weg Δs:

$$\begin{aligned} W = Q &= F \cdot \Delta s \\ &= 450\,\mathrm{N} \cdot 2{,}0\,\mathrm{m} = 0{,}90\,\mathrm{kJ}\ . \end{aligned}$$

Ergänzungen

Kraft und Weg sind vektorielle Größen, die skalare Größe Arbeit wird über das Skalarprodukt von Kraft und Weg berechnet. Da hier Kraft

und Weg die gleiche Richtung haben, wird mit deren Beträgen gerechnet. Sowohl die an dem Schrank verrichtete Arbeit als auch die dabei abgegebene Wärme sind positiv. Bei einer wegabhängigen Kraft wäre mit dem Wegintegral des Skalarproduktes zu rechnen.

Erwartungshorizont M19 Reibung

Das Kind rutscht über eine Strecke von $s = \sqrt{2} \cdot 2{,}0\,\mathrm{m} = 2{,}828\,\mathrm{m}$, da die Rutsche mit der Horizontalen und Vertikalen ein gleichschenkliges rechtwinkliges Dreieck bildet:  . Die am Ende in Form von Wärme vorliegende Energie ist die Arbeit der Reibungskraft:

$$W_{\mathrm{Reib}} = F_{\mathrm{Reib}} \cdot s = 50\,\mathrm{N} \cdot \sqrt{2} \cdot 2{,}0\,\mathrm{m} = 140\,\mathrm{J}\,.$$

Diese ist von der abgebauten Lageenergie abzuziehen, um die kinetische Energie zu erhalten:

$$E_{\mathrm{kin}} = m \cdot g \cdot h - W_{\mathrm{Reib}} = 20\,\mathrm{kg} \cdot 9{,}81\,\mathrm{N/kg} \cdot 2{,}0\,\mathrm{m} - 141{,}2\,\mathrm{J} = 251{,}0\,\mathrm{J}\,.$$

Hieraus berechnet sich der Betrag der Endgeschwindigkeit zu

$$v_{\mathrm{max}} = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{\mathrm{kin}}}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 251{,}0\,\mathrm{J}}{20\,\mathrm{kg}}} = 5{,}0\,\mathrm{m/s} = 18\,\mathrm{km/h}\,.$$

Erwartungshorizont M20 Energieumwandlung

Die elastische Energie wird in kinetische Energie umgewandelt:

$$\frac{1}{2} \cdot k \cdot x^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad \Leftrightarrow \quad v = \sqrt{\frac{k}{m}} \cdot x\,.$$

Einsetzen ergibt

$$v = \sqrt{\frac{200\,\mathrm{N/m}}{1{,}0\,\mathrm{kg}}} \cdot 0{,}05\,\mathrm{m} = 0{,}71\,\mathrm{m/s} = 2{,}5\,\mathrm{km/h}\,.$$

Ergänzungen

In die elastische beziehungsweise kinetische Energie gehen Skalarprodukte des Weges beziehungsweise der Geschwindigkeit mit sich selbst ein, x

und v bedeuten also hier die Beträge des Weges beziehungsweise der Geschwindigkeit.

Erwartungshorizont M21 Leistung

Es wird hier lediglich die zeitlich konstante Hubleistung betrachtet:

$$P = m \cdot g \cdot v = 1000\,\mathrm{kg} \cdot 9{,}81\,\mathrm{N/kg} \cdot (20\,\mathrm{m}/5{,}0\,\mathrm{s}) = 39\,\mathrm{kW}\ .$$

Bei gestopptem Motor und ruhender Masse ist die mechanische Leistung null.

Ergänzungen

Nicht betrachtet werden hier beispielsweise die Masse einer Haltevorrichtung oder die variable Masse des hängenden Seils oder auch Reibungsverluste. Hier nicht thematisiert ist die Tatsache, dass der Motor beim Anfahren der hängenden Last deren kinetische Energie aufbringen muss. Technisch ist also eine Leistungsreserve vorzusehen. Wird das Gewicht über eine Bremsvorrichtung gehalten, ist lediglich Leistung zu deren Betätigung erforderlich. Mit entsprechender Auslegung und Regelung kann das Gewicht auch mit dem Motor gehalten werden, wobei dieser allerdings elektrische Leistung aufnehmen würde und zum Beispiel in Form von Wärme abgeben würde.

Erwartungshorizont M22 Impulserhaltung

Sei m_{ges} die Gesamtmasse des ruhenden Kindes und Skateboards und v_{vor} die Geschwindigkeit des anfliegenden Balles der Masse m_{Ball}. Vor dem Fangen hat das System aus Kind, Skateboard und Ball als Gesamtimpuls lediglich den Impuls des Balles von

$$p_{\mathrm{vor}} = m_{\mathrm{Ball}} \cdot v_{\mathrm{vor}} = 0{,}3\,\mathrm{kg} \cdot 5\,\mathrm{m/s} = 1{,}5\,\mathrm{kg\,m/s}\,.$$

Nach dem Fangen hat das System mit der Masse $m_{\mathrm{ges}} + m_{\mathrm{Ball}}$ den Impuls

$$p_{\mathrm{nach}} = (m_{\mathrm{ges}} + m_{\mathrm{Ball}}) \cdot v_{\mathrm{nach}}\ .$$

Aufgrund der Impulserhaltung ist $p_{\mathrm{nach}} = p_{\mathrm{vor}}$:

$$(m_{\mathrm{ges}} + m_{\mathrm{Ball}}) \cdot v_{\mathrm{nach}} = m_{\mathrm{Ball}} \cdot v_{\mathrm{vor}}$$

$$\begin{aligned} \Longleftrightarrow \quad v_{\text{nach}} &= \frac{m_{\text{Ball}} \cdot v_{\text{vor}}}{(m_{\text{ges}} + m_{\text{Ball}})} \\ &= \frac{1{,}5\,\text{kg}\,\text{m/s}}{30\,\text{kg} + 0{,}30\,\text{kg}} \\ &= 0{,}050\,\text{m/s} = 0{,}18\,\text{km/h}\,. \end{aligned}$$

Im Rahmen der Unsicherheiten und der verwendeten zwei Stellen spielt die Masse des Balles im Nenner hier keine Rolle.

Erwartungshorizont M23 Rückstoß

Da der Gesamtimpuls vor dem Absprung null war, muss unmittelbar nach dem Absprung der Impuls des Boards betragsmäßig gleich dem Impuls der Person sein:

$$m_1 \cdot v_1 = m_2 \cdot v_2\,.$$

Auflösen und Einsetzen ergibt

$$\begin{aligned} v_1 &= v_2 \cdot m_2/m_1 \\ &= 0{,}50\,\text{m/s} \cdot 60\,\text{kg}/3{,}0\,\text{kg} \\ &= 10\,\text{m/s} \\ &= 36\,\text{km/h}\,. \end{aligned}$$

Ergänzungen

Vektoriell lautet die Impulserhaltung hier

$$m_1 \cdot \vec{v}_1 + m_2 \cdot \vec{v}_2 = \vec{0}\,.$$

Die Komponente der Board-Geschwindigkeit, gezählt in der Bewegungsrichtung der Person, ist $-10\,\text{m/s}$.

Erwartungshorizont M24 Harmonische Schwingung

Die Amplitude beträgt $\hat{y} = 10\,\text{cm}/2 = 5\,\text{cm}$, die Frequenz ist der Kehrwert der Periode von $T = 2 \cdot 0{,}5\,\text{s} = 1{,}0\,\text{s}$ und daher $f = 1/T = 1{,}0\,\text{Hz}$:

$$y(t) = \hat{y} \cdot \cos\left(2\pi \cdot f \cdot t\right) = 5\,\text{cm} \cdot \cos\left(2\pi \cdot 1{,}0\,\text{Hz} \cdot t\right)\,.$$

Ergänzungen

Der angegebene mathematische Ausdruck geht davon aus, dass die Ortsachse ihren Ursprung bei der Ruhelage hat und nach oben positiv gezählt wird und dass der Oszillator sich zu dem Zeitpunkt $\mathrm{t} = 0\,\mathrm{s}$ an dem oberen Umkehrpunkt befindet.

Bei dieser Aufgabe ist zu beachten, dass die Amplitude die Hälfte des angegebenen Spitze-Tal- oder auch Spitze-Spitze-Wertes ist und die Periode entsprechend das Doppelte des angegebenen Zeitwertes.

Erwartungshorizont M25 Wellenarten

Die Seilwelle auf einer Gitarrensaite ist eine Transversalwelle, genauer eine eindimensional stehende Transversalwelle. Die beim Anschlagen erzeugte Schallwelle ist eine Longitudinalwelle. Im „Fluid“ Luft können sich keine Transversalwellen ausbreiten.

Bei einer Transversalwelle erfolgt die Auslenkung der schwingenden Teile, hier von Abschnitten der Gitarrensaite, senkrecht zu der Ausbreitung in Richtung der Gitarrensaite. Bei einer Longitudinalwelle erfolgt die Auslenkung, hier der bewegten „Luftbereiche“ in Richtung der Ausbreitung.

Erwartungshorizont M26 Fortschreitende Welle

Auf den ersten 16,0 cm sind zwei vollständige räumliche Schwingungen zu sehen, die Wellenlänge beträgt also $\lambda = 0{,}080\,\mathrm{m}$.

Die Ausbreitung um $x = 16{,}0\,\mathrm{cm}$ erfolgte in $t = 0{,}125\,\mathrm{s}$, was eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von

$$c = \frac{x}{t} = \frac{0{,}160\,\mathrm{m}}{0{,}125\,\mathrm{s}} = 1{,}28\,\mathrm{m/s}$$

bedeutet. Die Frequenz des Schwingers kann aus der Periode, also der Hälfte der 0,125 s bestimmt werden:

$$T = \frac{t}{2}\,; \quad f = \frac{1}{T} = \frac{2}{t} = \frac{2}{0{,}125\,\mathrm{s}} = 16{,}0\,\mathrm{Hz}\,.$$

Ebenso kann der Zusammenhang $c = \lambda \cdot f$ nach der Frequenz umgestellt werden:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{1{,}28\,\mathrm{m/s}}{0{,}080\,\mathrm{m}} = 16{,}0\,\mathrm{Hz}\,.$$

Ergänzungen

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit auf dem Wellenträger wird als konstant angenommen. Von Störungen und Dämpfung der Wellen wird abgesehen.

Erwartungshorizont M27 Stehende Welle (K)

Die Darstellung der Lautsprecherschwingung wiederholt sich nach zwei Kästchen, die Periodendauer ist also $T = 2 \cdot 1{,}175 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{s} = 2{,}35 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{s}$. Das ergibt für die Frequenz der Schallwelle

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2{,}35 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{s}} = 426\,\mathrm{Hz}\,.$$

Bei der stehenden Welle ist der Abstand der Wellenbäuche oder, besser zu bestimmen, Wellenknoten die halbe Wellenlänge. In der Skizze ist für den Abstand zum übernächsten Wellenbauch jeweils $\lambda = 0{,}80\,\mathrm{m}$ abzulesen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwelle oder Schallgeschwindigkeit ist demnach $c = \lambda \cdot f = 340\,\mathrm{m/s}$.

Erwartungshorizont M28 Wellenfunktion (K)

Aus der Ausbreitungsfunktion können direkt die Periodendauer T und die Wellenlänge λ abgelesen werden:

$$T = 2{,}27\,\mathrm{ms} = 2{,}27 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{s} \quad \text{und}$$
$$\lambda = 78{,}0\,\mathrm{cm} = 7{,}80 \cdot 10^{-1}\,\mathrm{m}\,.$$

Die Frequenz f ist der Kehrwert der Periodendauer und die Ausbreitungsgeschwindigkeit c kann zu λ/T oder $\lambda \cdot f$ berechnet werden:

$$f = \frac{1000}{2{,}27}\,\mathrm{Hz} = 441\,\mathrm{Hz} \quad \text{und}$$
$$c = \frac{7{,}80}{2{,}27} \cdot 10^2\,\mathrm{m/s} = 344\,\mathrm{m/s}\,.$$

Ergänzungen

Hat die Wellenfunktion - wie bei dieser Aufgabe - die Form $y\,(x,t) = \hat{y} \cdot \cos\,(2\pi \cdot (x/\lambda - t/T))$, dann handelt es sich um eine in die *positive* x-Richtung laufende Welle. Stünde im Argument der Kosinus-Funktion dagegen eine Summe, hätte sie also die Form $y\,(x,t) = \hat{y} \cdot \cos\,(2\pi \cdot (x/\lambda + t/T))$, dann liefe die Welle in die *negative* x-Richtung.

3 Elektrizitätslehre und Magnetismus

3.1 Kompetenzen

3.1.1 Elektrostatik

Die Studienanfängerinnen und Studienanfänger haben Grundkenntnisse über die Eigenschaften und das Vorkommen elektrischer Ladungen. Diese umfassen die Themenbereiche Leiter und Nichtleiter, Ladungserhaltung, Plattenkondensator und elektrisches Feld, Elementarladungen, Influenz, Coulombgesetz, Atombau, Elementarteilchen.

Sie können ...

- das Konzept der Ladungserhaltung anwenden (E1),
- vorhersagen, welche Feldstärke von elektrischen Ladungen erzeugt wird (E2),
- die Kraft auf einen Ladungsträger berechnen, die durch umgebende Ladungsträger verursacht wird (E3, E4),
- die Kraft auf einen Ladungsträger in einem elektrischen Feld berechnen (E5, E6),
- elektrische Feldlinienbilder verstehen und interpretieren (E7),
- die Influenz und die sich daraus entwickelnden Kraftwirkungen verstehen (E8).

3.1.2 Gleichströme

Die Studienanfängerinnen und Studienanfänger haben Grundkenntnisse über die Größen zur quantitativen Beschreibung einfacher Stromkreise. Sie kennen und verstehen die Größen elektrische Stromstärke, elektrische Spannung, elektrischer Widerstand, elektrische Arbeit und elektrische Leistung. Sie kennen Spannungsquellen mit Innenwiderständen sowie einfache Reihen- und Parallelschaltungen von ohmschen Widerständen.

Sie können ...

- den elektrischen Strom als eine Bewegung von Ladungsträgern identifizieren und die Stromstärke als transportierte Ladung pro Zeit berechnen (E9, E10),
- den Zusammenhang zwischen Spannung und Arbeit verstehen (E11),
- das Ohmsche Gesetz in einfachen Fällen anwenden und einen Drahtwiderstand berechnen (E12, E13, E14, E15),
- den Innenwiderstand einer Spannungsquelle im Stromkreis berücksichtigen (E12),
- einfache Leistungsberechnungen von Verbrauchern durchführen (E14, E16, E17, E18),
- die in einem Verbraucher umgesetzte Energie berechnen und den Wirkungsgrad dabei berücksichtigen (E18),
- einfache Parallel- und Reihenstromkreise berechnen (E18, E19, E20).

3.1.3 Magnetismus

Die Studienanfängerinnen und Studienanfänger haben Grundkenntnisse über die Eigenschaften und das Vorkommen von Magneten und Magnetfeldern. Dazu gehören phänomenologische Grundkenntnisse zu den Begriffen Permanentmagnet, magnetischer Dipol, Magnetnadel, Elementarmagnet, Strom und Magnetfeld, magnetischer Fluss, magnetische Flussdichte und Elektromagnet.

Sie können ...

- die Ausrichtung einer Magnetnadel im Magnetfeld zuordnen (E21),
- die Wirkung von Permanentmagneten aufeinander oder gegenüber ferromagnetischem Material beschreiben (E21, E22, E23),
- magnetische Feldlinienbilder verstehen und interpretieren (E23, E24).

3.1.4 Lorentzkraft und magnetische Induktion

Die Studienanfängerinnen und Studienanfänger haben Grundkenntnisse über die Wechselwirkung zwischen Magnetfeld und elektrischem Strom. Diese umfassen die Themenfelder Kraftwirkung auf bewegte Ladungsträger, Kraftwirkung auf stromdurchflossene Leiter, magnetisches Feld und magnetische Induktion.

Sie können ...

- die Lorentzkraft berechnen, wenn die Bewegungsrichtung der Ladung und das Magnetfeld senkrecht aufeinander stehen (E25, E26),
- zwischen magnetischem Fluss und magnetischer Flussdichte unterscheiden und diese für eine einfache lange Spule berechnen (E27, E28),
- eine Induktionsspannung über die zeitliche Änderung eines magnetischen Flusses berechnen (E29, E30).

3.2 Illustrierende Aufgaben

E1 Ladungserhaltung

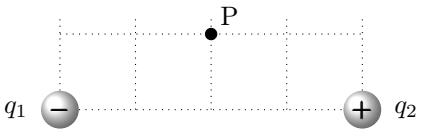
Ein Glasstab wird an einem Katzenfell gerieben.

a) Stab und Fell seien anfangs jeweils neutral. Nach dem Reiben hat der Glasstab eine Ladung von 2,0 nC. Wie groß ist nun die Ladung des Fells?

b) Angenommen, Stab und Fell tragen zu Beginn des Reibvorgangs jeweils eine Ladung von $-0{,}5$ nC. Nach dem Reiben hat der Glasstab eine Ladung von 2,0 nC. Wie groß ist jetzt die Ladung des Fells?

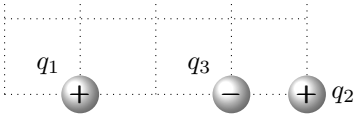
E2 Ladungsanordnungen 1

Zwei Ladungen q_1 und q_2 haben den gleichen Betrag von 1,0 nC und werden entsprechend der folgenden Skizze positioniert. Zeichnen Sie die Richtung des durch diese Anordnung im Punkt P erzeugten elektrischen Feldes ein.



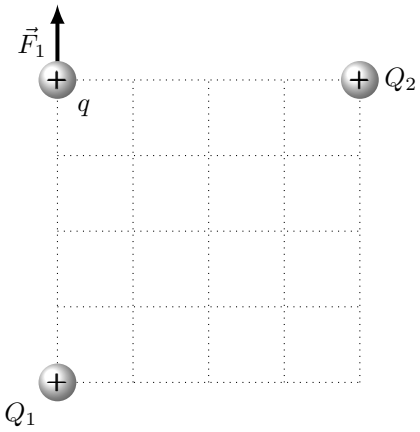
E3 Ladungsanordnungen 2

Drei Ladungen $q_1 = q_2 = 1{,}0\,\text{nC}$ und $q_3 = -2{,}0\,\text{nC}$ sind, wie nachstehend skizziert, in einer Linie angeordnet. Der Abstand zwischen q_1 und q_2 beträgt 3,0 cm. Berechnen Sie die resultierende Kraft auf q_3 und geben Sie ihre Richtung an.



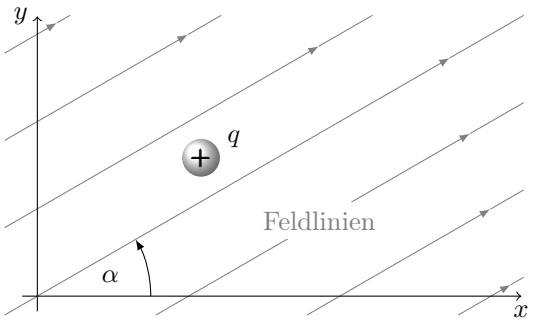
E4 Kräfte zwischen Ladungen (K)

Drei positiv geladene Ladungsträger befinden sich an den Ecken eines Quadrats, wie in der folgenden Abbildung dargestellt. Die Kraft F_1, welche durch $Q_1 = 3{,}0\,\text{nC}$ auf q ausgeübt wird, beträgt 3,0 µN. Wie groß ist die Ladung Q_2, wenn der Betrag der Gesamtkraft auf q gerade 6,0 µN beträgt?



E5 Kraft im E-Feld

Ein kleines Kügelchen trägt eine Ladung von $q = 4{,}0\,\mathrm{nC}$. Es befindet sich in einem konstanten elektrischen Feld mit einer Feldstärke von $8{,}0\,\mathrm{V/m}$. Die elektrischen Feldlinien schließen mit der x-Achse des verwendeten Koordinatensystems den Winkel $\alpha = 30°$ ein. Wie groß sind die Kraftkomponenten in x- und y-Richtung auf das Kügelchen?

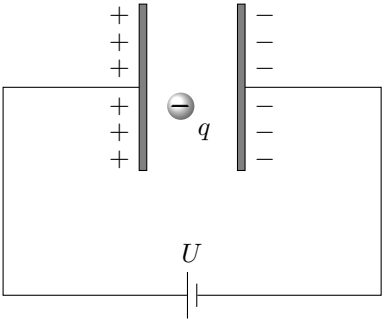


E6 Kondensator

Ein Plattenkondensator ist an eine Spannungsquelle mit der Spannung $U = 1000\,\mathrm{V}$ angeschlossen. Der Abstand der Platten beträgt $2{,}0\,\mathrm{cm}$, zwischen ihnen befindet sich Luft.

a) Zeichnen Sie die Richtung des elektrischen Feldes ein und berechnen Sie den Betrag der Feldstärke.

b) Ein Elektron $\left(q = -1{,}6 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C}\right)$ wird in die Anordnung eingebracht. Berechnen Sie die darauf wirkende Kraft und zeichnen Sie ihre Richtung ein.

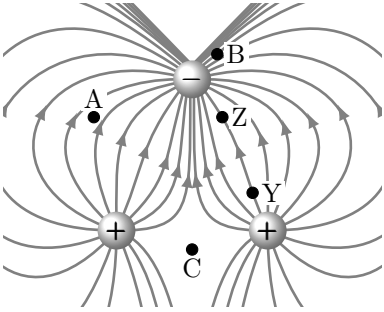


E7 E-Feld einer Ladungsverteilung

Die Abbildung zeigt ein Feldlinienbild dreier Ladungen.

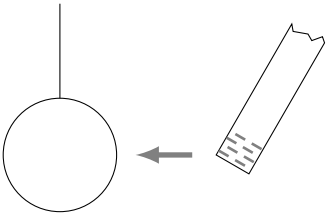
a) Ordnen Sie die eingezeichneten Punkte A, B, C nach steigender elektrischer Feldstärke.

b) Nehmen Sie an, die Feldstärke in Punkt Y sei 2 V/m. Ist die Feldstärke im Punkt Z kleiner, größer oder ähnlich groß?



E8 Influenz

Ein negativ geladener, nichtleitender Stab wird einer ungeladenen Metallkugel, die an einem nichtleitenden Faden hängt, genähert. Erklären Sie anhand einer Skizze, was geschieht.



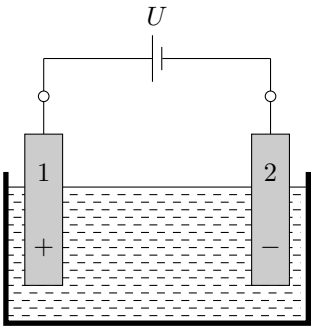
E9 Anlasser

Zum Starten eines Automotors wird der elektrische Anlasser 3,0 Sekunden lang betätigt. Wie viele Elektronen fließen während dieser Zeit durch den Anlasser, wenn die dabei konstante Stromstärke in der Zuleitung 80 A beträgt?

E10 Kochsalzlösung (K)

Wird Kochsalz – chemisch Natriumchlorid (NaCl) – in Wasser gegeben, bilden sich darin bewegliche Na^+ und Cl^- Ionen. In einem einfachen Experiment zur Messung der Leitfähigkeit werden in diese Lösung zwei Elektroden (1) und (2) eingetaucht und, wie abgebildet, mit einer Spannungsquelle verbunden.

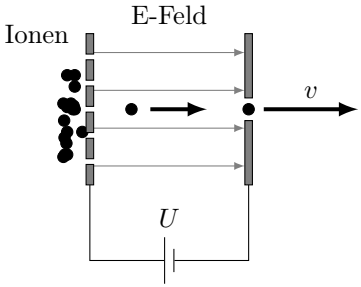
Wie viele Teilchen werden pro Sekunde an einer der Elektroden entladen, wenn die Stromstärke 10 mA beträgt?



E11 Massenspektrometer

Massenspektrometer dienen zur Analyse chemischer Verbindungen. Diese werden darin zuerst verdampft und ionisiert. Die entstehenden geladenen Teilchen werden dann in einem elektrischen Feld beschleunigt und entlang einer Analysestrecke entsprechend ihrer verschiedenen Massen getrennt. Die Anordnung ist evakuiert, damit die Ionen nicht durch Stöße mit Gasteilchen abgebremst werden. Ein zu Beginn ruhendes, einfach geladenes Methanol-Molekülion (Summenformel $CH_3OH^{+\bullet}$, Masse $m_\mathrm{M} = 5{,}3 \cdot 10^{-26}\,\mathrm{kg}$) durchläuft im elektrischen Feld eine Spannung von 300 V.

Welche Endgeschwindigkeit v erreicht es dabei?



E12 Blockbatterie

Bei Kurzschluss der beiden Pole einer 9-V-Blockbatterie fließt ein Strom von 1,2 A.

a) Welchen Innenwiderstand hat die Batterie?

b) Die Batterie dient zur Stromversorgung eines Rauchmelders. Beim Erklingen des Alarmtons fließt ein Strom von 80 mA. Welche Spannung liegt dann zwischen den Polen der Batterie?

E13 Halogenlampe

Eine Niedervolt-Halogenlampe (12 V/30 W) wird an eine Gleichspannung von 12 V angeschlossen. Der Glühdraht der Lampe besteht aus Wolfram und hat bei rundem Querschnitt den Durchmesser 40 µm.

a) Welchen Widerstand hat die Lampe?

b) Welche Gesamtlänge hat der Glühdraht (spezifischer Widerstand bei Betrieb $\varrho_{\mathrm{W}} = 80 \cdot 10^{-8}\,\Omega\,\mathrm{m}$)?

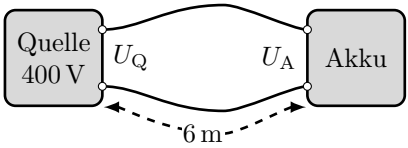
E14 Ladestation (K)

Der Akkumulator eines Elektroautos wird zur Schnellladung über ein 6,0 m langes, zweiadriges Kabel mit einer Gleichspannungsquelle verbunden. Die Kupferadern des Kabels haben einen Querschnitt von jeweils $10\,\mathrm{mm}^2$ (spezifischer Widerstand $\varrho_{\mathrm{Cu}} = 1{,}7 \cdot 10^{-8}\,\Omega\,\mathrm{m}$). Die Quelle liefert bei einer Spannung von 400 V eine elektrische Ladeleistung von 43 kW.

a) Welcher Ladestrom fließt im Kabel?

b) Welchen Gesamtwiderstand hat das Kabel?

c) Welche Spannung liegt an den Anschlüssen des Akkumulators an?

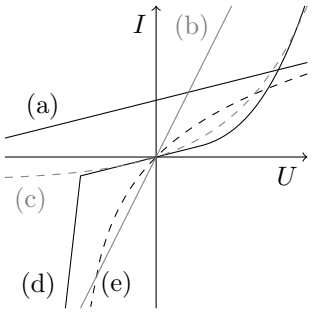


E15 Ohmsches Gesetz

An verschiedene elektrische Bauelemente wird eine variable Spannung angelegt und dabei die Stromstärke gemessen. Die entstehenden Messdaten

für den Strom I in Abhängigkeit von der jeweiligen Spannung U sind als Verläufe (a), (b), (c), (d), (e) in der folgenden Grafik aufgetragen.

Welcher Verlauf beschreibt einen ohmschen Widerstand?



E16 Elektroinstallation

In Wohngebäuden ist jeder einzelne Stromkreis üblicherweise mit einer 16 A Sicherung abgesichert. Welche elektrische Leistung kann einem solchen Haushaltsstromkreis maximal entnommen werden?

E17 Autoelektrik

Die beiden Hauptscheinwerfer eines Autos haben eine elektrische Leistung von jeweils 55 W, die beiden Rücklichter von jeweils 5 W. Sie werden alle mit einer Gleichspannung von 12 V betrieben.

a) Welche Gesamtleistung hat die Beleuchtung des Autos?

b) Welchen Widerstand haben die einzelnen Leuchtelemente und welchen Gesamtwiderstand hat die Beleuchtungsanlage, wenn alle in Betrieb sind? Erstellen Sie eine Skizze der Schaltung mit der Batterie und den einzelnen Leuchtelementen.

c) Die Kapazität der Autobatterie ist mit 75 A h angegeben. Wie lange kann die Beleuchtungsanlage damit maximal betrieben werden?

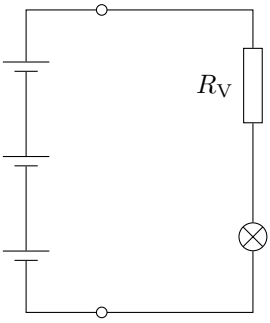
E18 Taschenlampe

Das Lämpchen einer Taschenlampe ist bei der Spannung $U_\mathrm{L} = 3{,}3\,\mathrm{V}$ zu betreiben, dabei fließt ein Strom der Stromstärke 80 mA. Als Span-

nungsquelle dienen drei in Reihe geschaltete Batterien, jede liefert eine Spannung von 1,5 V.

a) Welchen Wert muss der Vorwiderstand R_V haben, damit im Betrieb die Spannung U_L an dem Lämpchen anliegt? Der Innenwiderstand der Batterien soll vernachlässigt werden.

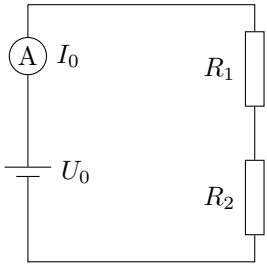
b) Wie groß ist der Wirkungsgrad der Schaltung, wenn die gesamte in dem Lämpchen umgesetzte elektrische Leistung als Nutzleistung betrachtet wird?



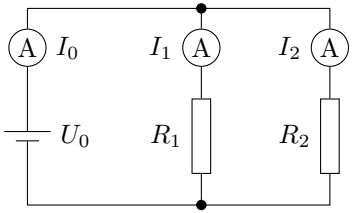
E19 Widerstandskombinationen

Zwei Widerstände $R_1 = 250\,\Omega$ und $R_2 = 450\,\Omega$ werden einmal in Reihe sowie in einem weiteren Versuch parallel zueinander geschaltet und an eine Batterie der Spannung $U_0 = 9{,}0\,\mathrm{V}$ angeschlossen.

a) Welchen Gesamtwiderstand hat die Reihenschaltung der beiden Widerstände, welche Spannung U_1 und U_2 fällt jeweils an ihnen ab und welche Stromstärke hat der Strom I_0?



b) Welchen Gesamtwiderstand hat die Parallelschaltung der beiden Widerstände und welche Stromstärken haben die Ströme I_1, I_2 und I_0?



E20 Netzwerk **(K)**

Die dargestellte Schaltung enthält drei Widerstände und eine Batterie als Spannungsquelle.

Werteangaben: $R_1 = 150\,\Omega$, $R_2 = 200\,\Omega$, $R_3 = 100\,\Omega$, $U_0 = 5{,}0\,\mathrm{V}$.

Berechnen Sie aus den Angaben die folgenden Größen:

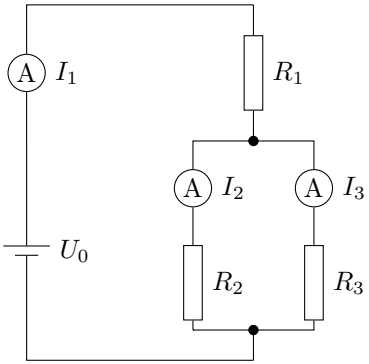
a) den Ersatzwiderstand der gesamten Kombination aus den drei Widerständen R_1, R_2 und R_3,

b) die Gesamtstromstärke I_1,

c) die Teilstromstärken I_2 und I_3,

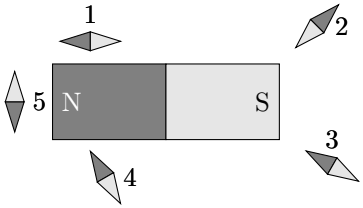
d) die gesamte elektrische Leistung der Schaltung,

e) die von den einzelnen Widerständen R_1, R_2 und R_3 jeweils aufgenommene elektrische Leistung.



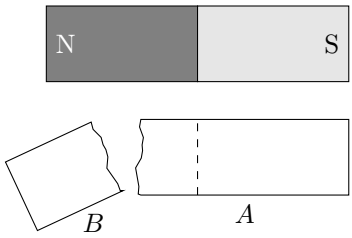
E21 Stabmagnet

Um einen Stabmagneten sind Kompassnadeln angeordnet (Nordpol dunkelgrau, Südpol hellgrau). Die Skizze zeigt eine Momentaufnahme der Anordnung. Welche Kompassnadel ist stabil orientiert und zeigt am ehesten die richtige magnetische Feldrichtung an?



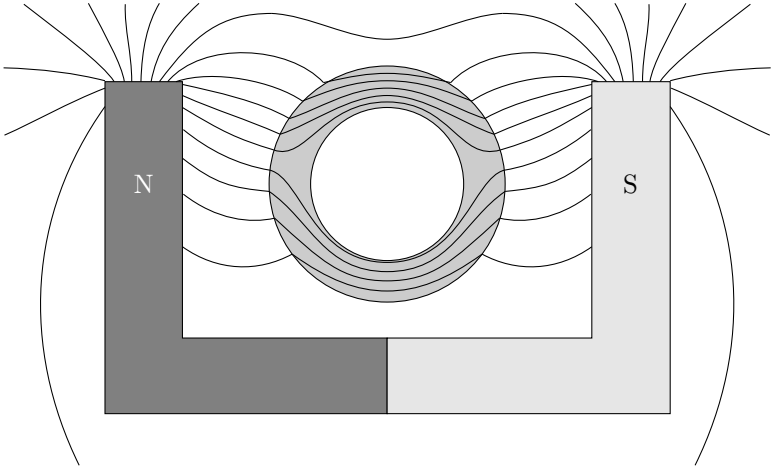
E22 Magnetbruch

Von einem Stabmagneten (Nordpol dunkelgrau, Südpol hellgrau) wird ein Stück abgebrochen. Welche Polung haben die Enden der beiden Teilstücke A und B nach dem Abbrechen? Tragen Sie die Polung der Teilstücke in die Skizze ein.



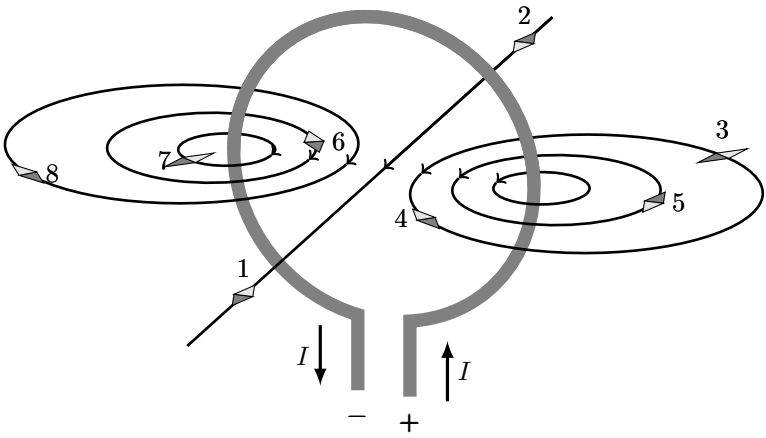
E23 Magnetfeld **(K)**

Zwischen zwei verschiedene Magnetpole wird ein Eisenring gebracht. Kennzeichnen Sie eine Stelle A, an der die magnetische Flussdichte im Verhältnis zu anderen Orten klein ist, eine Stelle B, an der sie sich über eine kleine Strecke hinweg stark ändert und eine Stelle C, an der die magnetische Flussdichte groß und in etwa konstant ist.



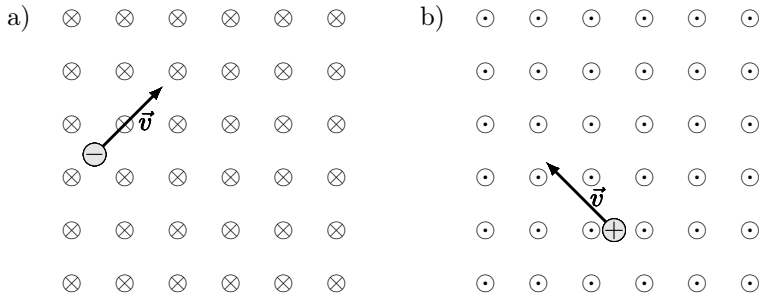
E24 Drahtschleife

Die räumliche Abbildung zeigt Feldlinien, die einen stromdurchflossenen Leiter umgeben. Welche der Magnetnadeln (Nordpol dunkelgrau, Südpol hellgrau) sind in richtiger Orientierung eingezeichnet?



E25 Lorentzkraft

Zwei verschieden geladene Teilchen - ein Elektron und ein Proton - bewegen sich jeweils mit der Geschwindigkeit $v_e = v_p = v = 2{,}0\,\mathrm{m/s}$ senkrecht zu den Feldlinien in einem Magnetfeld der Flussdichte B mit $B = 1{,}0 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{T}$.



⊗ Die Feldlinie geht in die Zeichenebene senkrecht hinein

⊙ Die Feldlinie kommt aus der Zeichenebene senkrecht heraus

⊖ Elektron ⊕ Proton

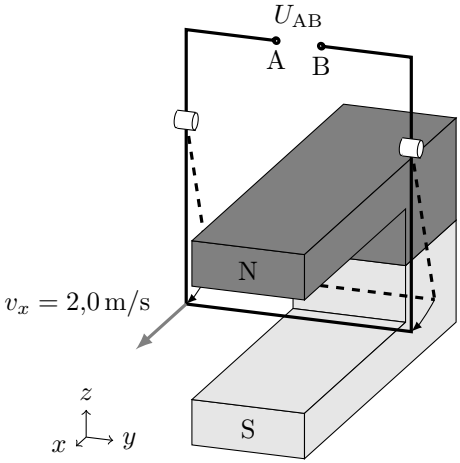
Berechnen Sie für diese beiden in den Abbildungen a) und b) gezeichneten Fälle jeweils den Betrag der Lorentzkraft und zeichnen Sie ihre Richtung in die zugehörige Skizze ein.

E26 Induktionsspannung

Ein 4,0 cm langes Drahtstück befindet sich in einem homogenen Magnetfeld der Flussdichte 0,50 T. Es wird mit 2,0 m/s nach vorne bewegt (siehe Skizze).

a) Berechnen Sie die dabei auftretende Induktionsspannung U_{AB}.

b) Nennen Sie Änderungen, durch welche die Spannung erhöht werden kann.

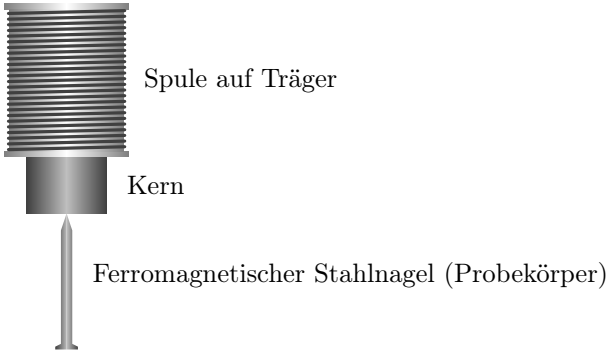


E27 Zylinderspule

Eine stromdurchflossene, 30 cm lange, zylindrische Luftspule mit 300 Windungen und 1 cm Durchmesser hat im Innern dieselbe magnetische Flussdichte wie eine halb so lange Spule mit 200 Windungen bei gleichem Durchmesser. In welchem Verhältnis stehen die Stromstärken zueinander?

E28 Elektromagnet

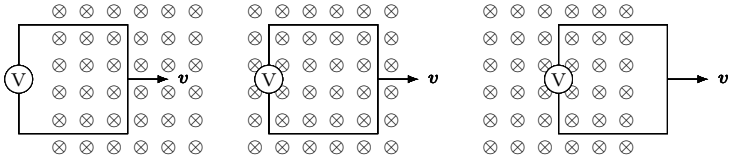
Nennen Sie mehrere Maßnahmen, wie man eine Spule mit Eisenkern durch veränderte Geometrie, Material- oder Betriebsgrößen so abändern kann, dass man einen stärkeren Elektromagneten erhält.



E29 Leiterschleife (K)

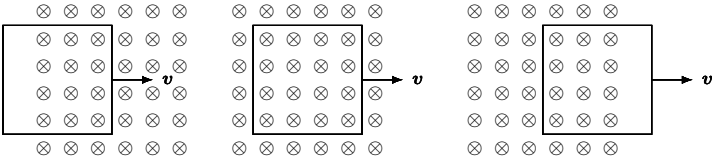
Eine Leiterschleife wird, wie in der Abbildung dargestellt, senkrecht zu einem begrenzten, homogenen Magnetfeld (das Magnetfeld ist in die Zeichenebene hinein gerichtet) mit konstanter Geschwindigkeit von links nach rechts in das Feld und wieder heraus bewegt. Gleichzeitig wird die induzierte Spannung gemessen.

a) Skizzieren Sie qualitativ ein Spannungs-Zeit-Diagramm für eine Bewegung der Leiterschleife von links nach rechts.



b) Nimmt man das hochohmige Voltmeter heraus und verbindet die zwei Enden leitend, entsteht durch die induzierte Spannung auch ein induzierter Strom. Durch die Wechselwirkung mit dem permanenten Magnetfeld erfährt die Schleife eine Kraft.

In welche Richtung wirkt diese Kraft? Skizzieren Sie qualitativ ein Kraft-Zeit-Diagramm.



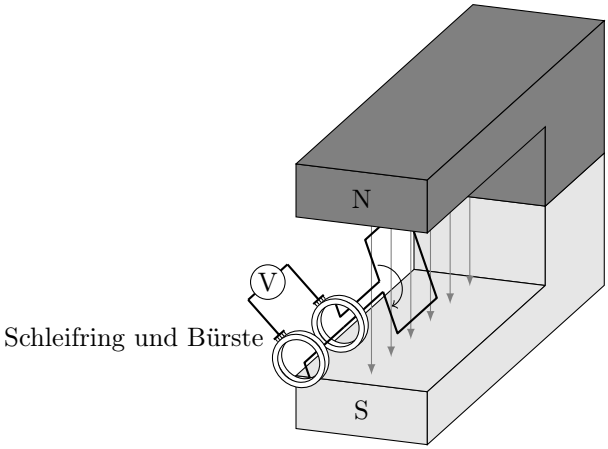
E30 Generator (K)

In einem homogenen Magnetfeld mit der magnetischen Flussdichte 0,10 T wird eine quadratische Drahtschleife gedreht. Die Drahtschleife hat die Seitenlänge 5,0 cm. Sie wird mit einer konstanten Drehzahl von 6000 Umdrehungen pro Minute gedreht.

a) Skizzieren Sie qualitativ für zwei Umdrehungen die Spannung über der Zeit.

b) Berechnen Sie die Spannungsamplitude.

c) Wie könnte die Spannungsamplitude gesteigert werden?



3.3 Erwartungshorizonte

Erwartungshorizont E1 Ladungserhaltung

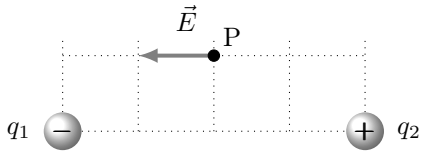
Nachfolgend wird angenommen, dass das Gesamtsystem aus Fell und Stab gegen seine Umgebung elektrisch isoliert ist, so dass ihm weder Ladung zufließt noch entnommen wird.

a) Da aufgrund der Ladungserhaltung die Summe der Ladungsanteile konstant ist, trägt das Fell nach dem Reiben die Ladung $-2{,}0\,\mathrm{nC}$.

b) Die Ladung des Glasstabs nimmt durch das Reiben offenbar um $\Delta Q_{\mathrm{Stab}} = +2{,}5\,\mathrm{nC}$ zu, da er am Ende eine Ladung von $+2{,}0\,\mathrm{nC}$ trägt. Dementsprechend muss die Ladung des Fells um $\Delta Q_{\mathrm{Fell}} = -2{,}5\,\mathrm{nC}$ abnehmen, damit die Ladungserhaltung gewährleistet ist, denn sie erfordert $\Delta Q_{\mathrm{Stab}} + \Delta Q_{\mathrm{Fell}} = 0$. Am Ende trägt das Fell somit eine Ladung von $-3{,}0\,\mathrm{nC}$.

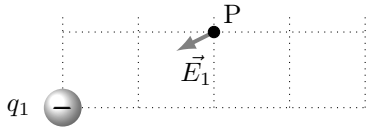
Erwartungshorizont E2 Ladungsanordnungen 1

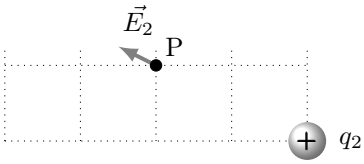
Das E-Feld in Punkt P wird nachstehend durch einen Vektorpfeil veranschaulicht, er ist in Richtung der Kraft des Felds auf eine positive Probeladung orientiert.



Ergänzungen

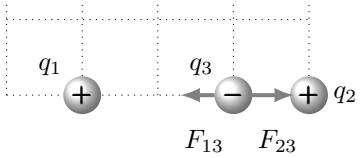
Man kann sich den Vektor $\vec{E}$ als vektorielle Überlagerung zweier Feldanteile $\vec{E_1}$ und $\vec{E_2}$ vorstellen, die den beiden Ladungen q_1 und q_2 zuzuordnen sind. Nachstehend sind diese Einzelanteile skizziert:





Erwartungshorizont E3 Ladungsanordnungen 2

Es wirken die beiden Kräfte F_{13} von q_1 auf q_3 (nach links in der Skizze) sowie F_{23} von q_2 auf q_3 (nach rechts in der Skizze, dies sei die Koordinatenrichtung mit positivem Vorzeichen):

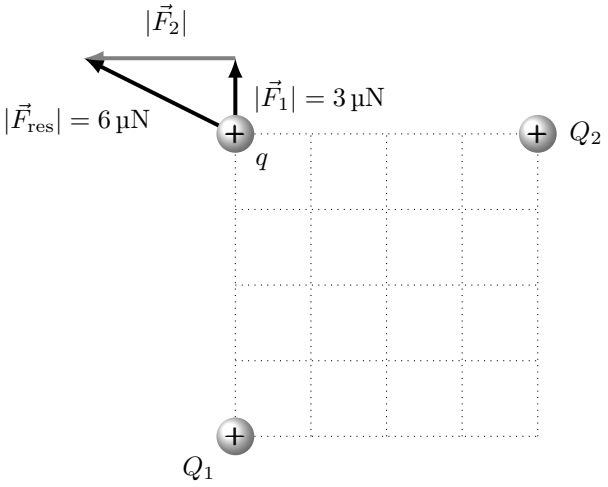


$$
\begin{aligned}
F_{13} &= \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_3|}{r^2} \\
&= \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 8{,}854 \cdot 10^{-12}\,\mathrm{C/(V\,m)}} \cdot \frac{1{,}0\,\mathrm{nC} \cdot 2{,}0\,\mathrm{nC}}{(2 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{m})^2} \\
&= \frac{1\,\mathrm{N\,m^2}}{4 \cdot \pi \cdot 8{,}854 \cdot 10^{-12}\,\mathrm{C^2}} \cdot \frac{1 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \cdot 10^{-9}\mathrm{C^2}}{(2 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{m})^2} \\
&= 0{,}45 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{N}\,; \\
F_{23} &= \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{|q_2| \cdot |q_3|}{r^2} \\
&= \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 8{,}854 \cdot 10^{-12}\,\mathrm{C/(V\,m)}} \cdot \frac{1{,}0\,\mathrm{nC} \cdot 2{,}0\,\mathrm{nC}}{(1 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{m})^2} \\
&= \frac{1\,\mathrm{N\,m^2}}{4 \cdot \pi \cdot 8{,}854 \cdot 10^{-12}\,\mathrm{C^2}} \cdot \frac{1 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \cdot 10^{-9}\,\mathrm{C^2}}{(1 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{m})^2} \\
&= 1{,}80 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{N}\,.
\end{aligned}
$$

Somit wirkt auf die Ladung q_3 insgesamt die (in der Skizze nach rechts) gerichtete Kraft:

$$F = F_{23} - F_{13} = 1{,}35 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{N} = 0{,}14\,\mathrm{mN}\,.$$

Erwartungshorizont E4 Kräfte zwischen Ladungen (K)



Aus den bekannten Werten für die Beträge $|\vec{F}_1| = 3\,\mu\mathrm{N}$ der Kraft zwischen Ladung Q_1 und q sowie $|\vec{F}_{\mathrm{res}}| = 6\,\mu\mathrm{N}$ der resultierenden Gesamtkraft beider Ladungen auf q folgt nach Pythagoras direkt der Betrag $|\vec{F}_2|$ der Kraft zwischen der Ladung Q_2 und q:

$$|\vec{F}_2| = \sqrt{|\vec{F}_{\mathrm{res}}|^2 - |\vec{F}_1|^2} = \sqrt{|6|^2 - |3|^2}\ \mu\mathrm{N} = 3 \cdot \sqrt{3}\ \mu\mathrm{N}\,.$$

Angenommen, das Quadrat habe die Seitenlänge a, dann berechnen sich die Beträge der beiden Coulombkräfte folgendermaßen:

$$|\vec{F}_1| = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot q}{a^2} \quad \text{und} \quad |\vec{F}_2| = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{Q_2 \cdot q}{a^2}$$

Auflösen nach a^2 ...

$$a^2 = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot q}{|\vec{F}_1|} \quad \text{und} \quad a^2 = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{Q_2 \cdot q}{|\vec{F}_2|}$$

Gleichsetzen ...

$$\begin{aligned} \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot q}{|\vec{F}_1|} &= \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{Q_2 \cdot q}{|\vec{F}_2|} \\ \frac{Q_1}{|\vec{F}_1|} &= \frac{Q_2}{|\vec{F}_2|} \\ Q_2 = Q_1 \cdot \frac{|\vec{F}_2|}{|\vec{F}_1|} &= Q_1 \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{3} = \sqrt{3} \cdot Q_1 = 5{,}2\,\text{nC} \,. \end{aligned}$$

Erwartungshorizont E5 Kraft im E-Feld

Auf das Kügelchen wirkt in Feldrichtung die Kraft F:

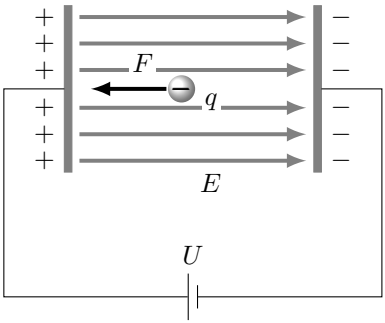
$$F = E \cdot q = 8\,\text{V/m} \cdot 4 \cdot 10^{-9}\,\text{C} = 3{,}2 \cdot 10^{-9}\,\text{N} \,.$$

Komponentenzerlegung in die beiden Koordinatenrichtungen liefert:

$$\begin{aligned} F_\text{x} &= F \cdot \cos(\alpha) \\ &= 3{,}20 \cdot 10^{-8}\,\text{N} \cdot \cos(30°) = 2{,}77 \cdot 10^{-8}\,\text{N} \quad \text{und} \\ F_\text{y} &= F \cdot \sin(\alpha) \\ &= 3{,}20 \cdot 10^{-8}\,\text{N} \cdot \sin(30°) = 1{,}60 \cdot 10^{-8}\,\text{N} \,. \end{aligned}$$

Erwartungshorizont E6 Kondensator

Hier das Ganze in etwas vergrößerter Ansicht:



a) Das elektrische Feld E ist zwischen den Platten in guter Näherung homogen und wird durch parallele Feldlinien veranschaulicht, die von der positiven zur negativen Platte hin orientiert sind.

Der Betrag der elektrischen Feldstärke berechnet sich aus den Werten für die Spannung U und den Plattenabstand d zu:

$$E = \frac{U}{d} = \frac{1000\,\mathrm{V}}{2 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{m}} = 5{,}0 \cdot 10^{4}\,\mathrm{V/m}\ .$$

b) Die Kraft F wirkt entgegen der Orientierung der Feldlinien, da die Ladung q negativ ist.

Der Betrag der Kraft F auf die Ladung q folgt unter Verwendung des Werts für die elektrische Feldstärke zu:

$$F = E \cdot q = 5{,}0 \cdot 10^{4}\,\mathrm{V/m} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C} = 8{,}0 \cdot 10^{-15}\,\mathrm{N}\ .$$

Erwartungshorizont E7 E-Feld einer Ladungsverteilung

Die Feldliniendichte ist ein Maß für die elektrische Feldstärke E.

a) Die Reihung der Feldstärkewerte in den Punkten nach ansteigendem Betrag ist: $E_\mathrm{C} < E_\mathrm{A} < E_\mathrm{B}$.

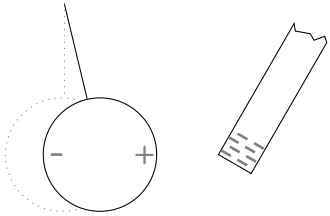
b) Die Feldstärke in Punkt Z ist ähnlich groß wie in Punkt Y, also $E_\mathrm{Z} \approx E_\mathrm{Y}$.

Erwartungshorizont E8 Influenz

Die im Metall der Kugel frei beweglichen, negativen Elektronen werden von dem negativ geladenen Stab abgestoßen und bewegen sich in der

Skizze nach links, wo sich ein Bereich negativer Ladung aufbaut. Die Rümpfe der Metallatome behalten dabei ihre Position, dadurch entsteht im rechten Teil der Kugel ein Bereich positiver Ladung. Dieser Vorgang wird als Influenz bezeichnet. Die Summe beider Ladungsanteile ist Null, vom Betrag her sind sie gleich groß. Insgesamt bleibt die vorher ungeladene Kugel weiterhin elektrisch neutral. In der Skizze sind diese beiden Ladungsschwerpunkte auf der Kugel eingezeichnet.

Der Abstand zwischen der negativen Ladung auf dem Stab und der positiven Ladung auf der Kugel ist kleiner als der Abstand zwischen dem Stab und der negativen Ladung auf der Kugel. Daher ist die elektrostatische Anziehungskraft zwischen Kugel und Stab größer als die zwischen ihnen wirkende elektrostatische Abstoßungskraft. Die Kugel wird demnach in Richtung Stab gezogen.



Ergänzungen

Die Vorstellung von in metallischen Leitern leicht verschiebbaren und negative Ladung tragenden Elektronen, die sich frei zwischen den fest an ihren Plätzen im Gitter sitzenden positiven Atomrümpfen bewegen können, bildet die Grundannahme des Elektronengasmodells.

Erwartungshorizont E9 Anlasser

Die Stromstärke I ist der Quotient aus der insgesamt transportierten Ladung und der dazu benötigten Zeitdauer t. Die während des Startvorgangs fließende Ladung Q_{ges} besteht aus n Elektronen, die jeweils eine Elementarladung e tragen:

$$I = \frac{Q_{\text{ges}}}{t} = \frac{n \cdot e}{t} .$$

Somit beträgt die Anzahl n der insgesamt durch den Anlasser geflossenen

Elektronen:

$$n = \frac{I \cdot t}{e} = \frac{80\,\mathrm{A} \cdot 3\,\mathrm{s}}{1{,}60 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C}} = 1{,}5 \cdot 10^{21}\ .$$

Erwartungshorizont E10 Kochsalzlösung (K)

Die Ionen im Wasser sind jeweils einfach positiv (Na^+) beziehungsweise einfach negativ (Cl^-) geladen, der Betrag ihrer Ladung ist daher in beiden Fällen gleich der Elementarladung $|q_+| = |q_-| = e = 1{,}60 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C}$. Die Stromstärke I berechnet sich als Quotient aus der insgesamt transportierten Ladung Q_{ges} und der dazu benötigten Zeit. Dabei bewegen sich pro Zeiteinheit jeweils gleich viele positive (n_+) und negative (n_-) Ionen an die Elektroden. Mit $n = n_+ = n_-$ als Anzahl der bewegten Ionen folgt daraus:

$$I = \frac{Q_{\mathrm{ges}}}{t} = \frac{n \cdot |q_+| + n \cdot |q_-|}{t} = \frac{2 \cdot n \cdot e}{t}\ .$$

Somit beträgt die Anzahl sowohl der positiven als auch der negativen Ionen, die pro Zeiteinheit an der jeweiligen Elektrode ankommen

$$\frac{n}{t} = \frac{I}{2 \cdot e} = \frac{10 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{A}}{2 \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C}} = 3{,}1 \cdot 10^{16} \cdot \frac{1}{\mathrm{s}}\ .$$

Erwartungshorizont E11 Massenspektrometer

Die Molekülionen sind einfach geladen, also $q_{\mathrm{M}} = e = 1{,}60 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C}$. Sie starten in guter Näherung aus der Ruhelage und durchlaufen dann eine Potentialdifferenz (Spannung) von $U = 300\,\mathrm{V}$, wodurch ihre kinetische Energie E_{kin} zunimmt. Es gilt der Energieerhaltungssatz:

$$E_{\mathrm{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m_{\mathrm{M}} \cdot v^2 = U \cdot q = U \cdot e = E_{\mathrm{el}} \quad \text{daraus}$$

$$v^2 = \frac{2 \cdot U \cdot e}{m_{\mathrm{M}}}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot U \cdot e}{m_{\mathrm{M}}}}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot 300\,\mathrm{V} \cdot 1{,}60 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C}}{5{,}3 \cdot 10^{-26}\,\mathrm{kg}}}$$

$$= \sqrt{\frac{600\,\mathrm{J} \cdot 1{,}60 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C}}{\mathrm{C} \cdot 5{,}3 \cdot 10^{-26}\,\mathrm{kg}}} = 4{,}3 \cdot 10^{4}\,\mathrm{m/s}\,.$$

Erwartungshorizont E12 Blockbatterie

Die Leerlaufspannung der Blockbatterie beträgt $U_0 = 9{,}0\,\mathrm{V}$. Bei Kurzschluss fällt diese gesamte Spannung am Innenwiderstand R_i der Batterie ab, die Klemmenspannung U_kl zwischen den Polen ist dann Null. Es fließt der Kurzschlussstrom $I_\mathrm{k} = 1{,}2\,\mathrm{A}$.

a) Innenwiderstand $R_\mathrm{i} = 9\,\mathrm{V}/1{,}2\,\mathrm{A} = 7{,}5\,\Omega$.

b) Bei Stromfluss I gilt für die Spannung U_kl zwischen den Polen: $U_\mathrm{kl} = U_0 - I \cdot R_\mathrm{i} = 9\,\mathrm{V} - 0{,}6\,\mathrm{V} = 8{,}4\,\mathrm{V}$.

Erwartungshorizont E13 Halogenlampe

a) Aus $P = U \cdot I$ und $R = U/I$ folgt $P = U^2/R$.
Somit $R = U^2/P = 144\,\mathrm{V}^2/30\,\mathrm{W} = 4{,}8\,\Omega$.

b) Aus dem spezifischen Widerstand ϱ ergibt sich der Widerstand der Lampendrahts zu $R = \varrho \cdot l/A$. Dabei ist A seine Querschnittsfläche mit $A = \pi \cdot (d/2)^2 = 1{,}257 \cdot 10^{-9}\,\mathrm{m}^2$. Demnach:

$$\begin{aligned} l &= R \cdot A/\varrho \\ &= 4{,}8\,\Omega \cdot 1{,}257 \cdot 10^{-9}\,\mathrm{m}^2/80 \cdot 10^{-8}\,\Omega\,\mathrm{m} \\ &= 7{,}54 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{m} = 7{,}5\,\mathrm{mm}\,. \end{aligned}$$

Erwartungshorizont E14 Ladestation (K)

Der Strom fließt zwischen Quelle und Akkumulator insgesamt durch 12 m Kupferader.

a) Der Ladestrom I_Lad folgt aus der Ladeleistung $P_\mathrm{Lad} = U \cdot I_\mathrm{Lad}$:

$$I_\mathrm{Lad} = P_\mathrm{Lad}/U = 43\,000\,\mathrm{W}/400\,\mathrm{V} = 107{,}5\,\mathrm{A}\,.$$

b) Der Gesamtwiderstand des Kabels ergibt sich aus:

$$\begin{aligned} R_{\mathrm{Kab}} &= \varrho \cdot l/A = 1{,}7 \cdot 10^{-8}\,\Omega\,\mathrm{m} \cdot 12\,\mathrm{m}/10\,\mathrm{mm}^2 \\ &= 1{,}7 \cdot 10^{-8}\,\Omega\,\mathrm{m}^2 \cdot 1{,}2 \cdot 10^{6}/\mathrm{m}^2 = 2{,}04 \cdot 10^{-2}\,\Omega\,. \end{aligned}$$

c) Der Spannungsabfall aufgrund des Kabelwiderstands beträgt

$$\Delta U = R_{\mathrm{Kab}} \cdot I_{\mathrm{Lad}} = 2{,}2\,\mathrm{V}\,.$$

Die Spannung zwischen den Anschlüssen des Akkumulators hat daher den Wert

$$U_{\mathrm{A}} = U_{\mathrm{Q}} - \Delta U = 397{,}8\,\mathrm{V}\,.$$

Erwartungshorizont E15 Ohmsches Gesetz

Ein Ohmscher Widerstand ist gekennzeichnet durch eine direkte Proportionalität zwischen der angelegten Spannung U und dem zugehörigen Strom I, es gilt $I \sim U$.
Der Verlauf (b) beschreibt eine solche Proportionalität zwischen Spannung und Strom, er gehört daher zu einem Ohmschen Widerstand.

Ergänzungen

Zwei weitere Verläufe sind anderen Bauelementen zuzuordnen:
Verlauf (c) entspricht dem prinzipiellen Verhalten einer Diode.
Verlauf (d) entspricht dem prinzipiellen Verhalten einer Zener-Diode.

Erwartungshorizont E16 Elektroinstallation

Die effektive Netzspannung beträgt $U = 230\,\mathrm{V}$. Somit kann einem mit einer Sicherung von 16 A abgesicherten Stromkreis maximal die folgende Leistung entnommen werden:

$$P = U \cdot I = 230\,\mathrm{V} \cdot 16\,\mathrm{A} = 3680\,\mathrm{W} = 3{,}68\,\mathrm{kW}\,.$$

Erwartungshorizont E17 Autoelektrik

Es wird angenommen, dass sich die Leistungsangaben alle auf den Betrieb bei der Nennspannung 12 V beziehen.

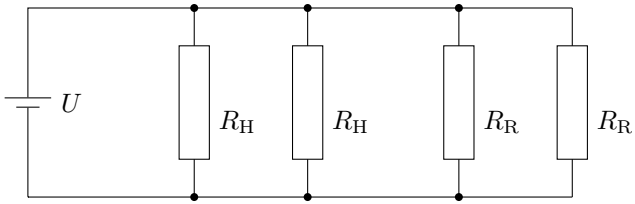
a) $P_{\text{ges}} = 2 \cdot P_{\text{Haupt}} + 2 \cdot P_{\text{Rück}} = 2 \cdot 55\,\text{W} + 2 \cdot 5\,\text{W} = 120\,\text{W}$.

b) Die einzelnen Leuchtelemente müssen alle in Parallelschaltung betrieben werden, damit sie an der gleichen Spannung von 12 V liegen. Aus $R = U/I$ und $P = U \cdot I$ folgt $R = U^2/P$. Also ...

Hauptscheinwerfer: $R_{\text{H}} = (12\,\text{V})^2/55\,\text{W} = 2{,}6\,\Omega$.

Rücklichter: $R_{\text{R}} = (12\,\text{V})^2/5\,\text{W} = 28{,}8\,\Omega$.

Gesamtwiderstand: $R_{\text{ges}} = (12\,\text{V})^2/120\,\text{W} = 1{,}2\,\Omega$.



Alternative Berechnung des Gesamtwiderstands:

Die Skizze zeigt, dass es sich um eine Parallelschaltung von vier Widerständen handelt. Für deren Gesamtwiderstand R_{ges} gilt

$$\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \frac{1}{R_{\text{H}}} + \frac{1}{R_{\text{H}}} + \frac{1}{R_{\text{R}}} + \frac{1}{R_{\text{R}}} = \frac{2}{R_{\text{H}}} + \frac{2}{R_{\text{H}}} \quad \text{daraus}$$

$$R_{\text{ges}} = \frac{R_{\text{H}} \cdot R_{\text{R}}}{2 \cdot (R_{\text{H}} + R_{\text{R)}})} = 1{,}2\,\Omega\ .$$

c) Durch die Beleuchtungsanlage fließt insgesamt ein Strom von $I_{\text{ges}} = U/R_{\text{ges}} = 12\,\text{V}/1{,}2\,\Omega = 10\,\text{A}$. Für die Kapazität C_{N} einer Batterie gilt: $C_{\text{N}} = I \cdot t$, dies liefert die mögliche Entnahmezeit:

$t = C_{\text{N}}/I_{\text{ges}} = 75\,\text{A h}/10\,\text{A} = 7{,}5\,\text{h} = 7\,\text{h}\ 30\,\text{min}$.

Ergänzungen

Achtung: Im Zusammenhang mit Batterien und Akkumulatoren bedeutet Kapazität C_{N} die dem System entnehmbare Ladung. Sie wird in der Regel in Amperestunden (A h) angegeben. Diese Kapazität darf nicht mit der Kapazität C eines Kondensators verwechselt werden, die nach $C = Q/U$ berechnet und in der Einheit F gemessen wird.

Erwartungshorizont E18 Taschenlampe

Da der Innenwiderstand der drei Batterien vernachlässigbar ist, liefern sie unabhängig vom Stromfluss eine durchweg konstante Spannung, insgesamt wird die Schaltung also mit $U_{\text{ges}} = 4{,}5\,\text{V}$ betrieben.

a) Am Vorwiderstand muss die Spannung $U_{\text{V}} = U_{\text{ges}} - U_{\text{L}} = 1{,}2\,\text{V}$ abfallen, wenn der Strom $I_{\text{ges}} = 0{,}08\,\text{V}$ fließt.

Somit $R_{\text{V}} = U_{\text{V}}/I = 1{,}2\,\text{V}/0{,}08\,\text{A} = 15{,}0\,\Omega$.

b) Die gesamte Leistungsaufnahme der Schaltung beträgt:

$P_{\text{ges}} = U_{\text{ges}} \cdot I_{\text{ges}} = 4{,}5\,\text{V} \cdot 0{,}08\,\text{A} = 0{,}36\,\text{W}$.

Die elektrische Nutzleistung ist die von dem Lämpchen aufgenommene Leistung $P_{\text{L}} = U_{\text{L}} \cdot I_{\text{ges}} = 3{,}3\,\text{V} \cdot 0{,}08\,\text{A} = 0{,}26\,\text{W}$.

Der Wirkungsgrad beträgt somit $\eta = P_{\text{L}}/P_{\text{ges}} = 0{,}73 = 73\,\%$.

Ergänzungen

Die von dem Lämpchen aufgenommene elektrische Leistung ist sehr viel höher als die von ihm abgestrahlte optische Nutzleistung. Der größte Teil der aufgenommenen Leistung erwärmt das Lämpchen und wird von ihm als langwellige, unsichtbare, infrarote Wärmestrahlung abgegeben.

Erwartungshorizont E19 Widerstandskombinationen

Hier werden die üblichen Rechnungen für Reihen- und Parallelschaltung erwartet.

a) Der Gesamtwiderstand der Reihenschaltung beträgt:

$$R_{\text{ges}} = R_1 + R_2 = 700\,\Omega\ .$$

Die Stromstärke I_0 folgt aus $R_{\text{ges}} = U_0/I_0$ zu:

$$I_0 = U_0/R_{\text{ges}} = 1{,}3 \cdot 10^{-2}\,\text{A} = 13\,\text{mA}\ .$$

Spannungsabfälle U_1 und U_2 an den Widerständen R_1 und R_2:

$$U_1 = R_1 \cdot I_0 = 3{,}2\,\text{V} \quad \text{und}$$
$$U_2 = R_2 \cdot I_0 = 5{,}8\,\text{V}\ .$$

b) Der Gesamtwiderstand der Parallelschaltung folgt aus:

$$\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad \text{daraus} \quad R_{\text{ges}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 161\,\Omega\ .$$

An beiden Widerständen liegt die gleiche Spannung U_0 an. Somit betragen die Teilströme I_1, I_2 und der Gesamtstrom I_0:

$$I_1 = U_0/R_1 = 3{,}60 \cdot 10^{-2}\,\text{A} = 36{,}0\,\text{mA}\ ;$$
$$I_2 = U_0/R_2 = 2{,}00 \cdot 10^{-2}\,\text{A} = 20{,}0\,\text{mA}\ ;$$
$$I_0 = I_1 + I_2 = 56{,}0\,\text{mA}\ .$$

Ergänzungen

Die Schaltung in Teilaufgabe a) ist ein Spannungsteiler, er teilt die angelegte Spannung U_0 im Verhältnis der beiden Widerstände R_1 und R_2 in die beiden daran abfallenden Teilspannungen U_1 und U_2 auf:

$$U_1/U_2 = R_1/R_2\ .$$

Die Schaltung in Teilaufgabe b) ist ein Stromteiler, er teilt den zufließenden Strom I_0 im Verhältnis der beiden Leitwerte der parallelen Widerstände in die beiden Teilströme I_1 und I_2 auf. Der Leitwert G ist der reziproke Widerstand $1/R$, also $G_1 = 1/R_1$ und $G_2 = 1/R_2$:

$$I_1/I_2 = G_1/G_2 = R_2/R_1\ .$$

Erwartungshorizont E20 Netzwerk (K)

Diese Netzwerk besteht aus zwei parallel geschalteten Widerständen R_2 und R_3, die in Serie zum Widerstand R_1 geschaltet sind.

a) Der Ersatzwiderstand R_{23} für die beiden parallel geschalteten Widerstände folgt aus

$$\frac{1}{R_{23}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad \text{daraus} \quad R_{23} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = 66{,}7\,\Omega\ .$$

Die Serienschaltung von R_{23} und R_1 hat den Gesamtwiderstand

$$R_{\text{ges}} = R_{23} + R_1 = 217\,\Omega\ .$$

b) Die Schaltung liegt an einer Spannung von $U_0 = 5\,\mathrm{V}$, der Gesamtstrom ist somit $I_1 = U_0/R_{\mathrm{ges}} = 2{,}31 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{A} = 23{,}1\,\mathrm{mA}$.

c) Der Spannungsabfall an R_1 beträgt

$$U_1 = R_1 \cdot I_1 = 3{,}46\,\mathrm{V} .$$

An den parallelen Widerständen R_2 und R_3 liegt demnach die gleiche Spannung $U_{23} = U_0 - U_1 = 1{,}54\,\mathrm{V}$.

Daraus folgen die Ströme durch die beiden Widerstände zu

$$I_2 = U_{23}/R_2 = 7{,}7 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{A} = 7{,}7\,\mathrm{mA} \quad \text{und}$$
$$I_3 = U_{23}/R_3 = 1{,}54 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{A} = 15{,}4\,\mathrm{mA} .$$

d) Die von der Schaltung aufgenommene elektrische Leistung ist

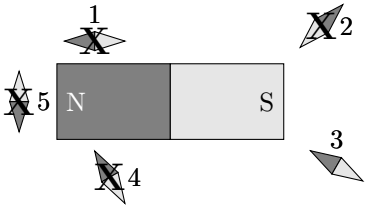
$$P_{\mathrm{ges}} = U_0 \cdot I_1 = 1{,}154 \cdot 10^{-1}\,\mathrm{W} = 115{,}4\,\mathrm{mW} .$$

e) Ein an einer Spannung U anliegender Widerstand R nimmt die Leistung $P = U \cdot I = R \cdot I^2 = U^2/R$ auf. Demnach folgt für die Leistungsaufnahme der einzelnen Widerstände:

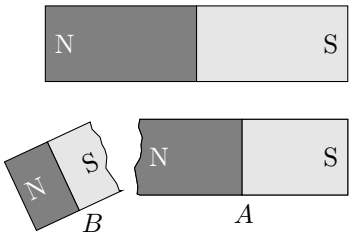
$$P_1 = R_1 \cdot I_1^2 = 7{,}99 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{W} = 79{,}9\,\mathrm{mW} ;$$
$$P_2 = U_{23} \cdot I_2 = 1{,}18 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{W} = 11{,}8\,\mathrm{mW} ;$$
$$P_3 = U_{23} \cdot I_3 = 2{,}37 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{W} = 23{,}7\,\mathrm{mW} .$$

Erwartungshorizont E21 Stabmagnet

Die einzige Magnetnadel mit einer zu den Feldlinien des Magntfeldes passenden Orientierung ist die Nadel mit der Nummer 3.



Erwartungshorizont E22 Magnetbruch

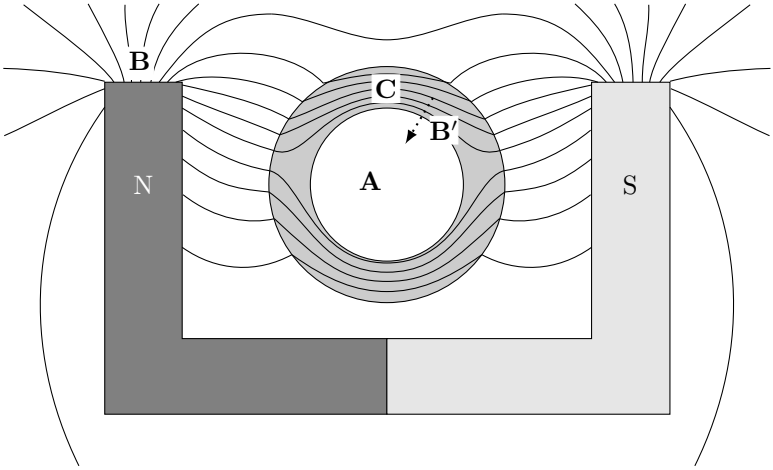


Ergänzungen

Jedes einzelne Bruchstück hat die gleiche Polung, wie sie der orignale Stabmagnet hatte. Die Modellvorstellung erklärt dies dadurch, dass ferromagnetische Materialien (wie zum Beispiel Eisen, Nickel, Kobalt) viele mikroskopische Elementarmagnete enthalten. Bei der Herstellung - der Magnetisierung - eines solchen Stabmagneten werden sie alle parallel ausgerichtet. Die Überlagerung der Magnetfelder dieser vielen mikroskopischen Elementarmagnete führt zu dem den Magneten umgebenden, makroskopischen Magnetfeld. Beim Auseinanderbrechen behalten die Elementarmagnete ihre Orientierung bei, die originale Polung bleibt daher in den Bruchstücken erhalten.

Erwartungshorizont E23 Magnetfeld (K)

In der folgenden Skizze sind mögliche Punkte eingezeichnet:

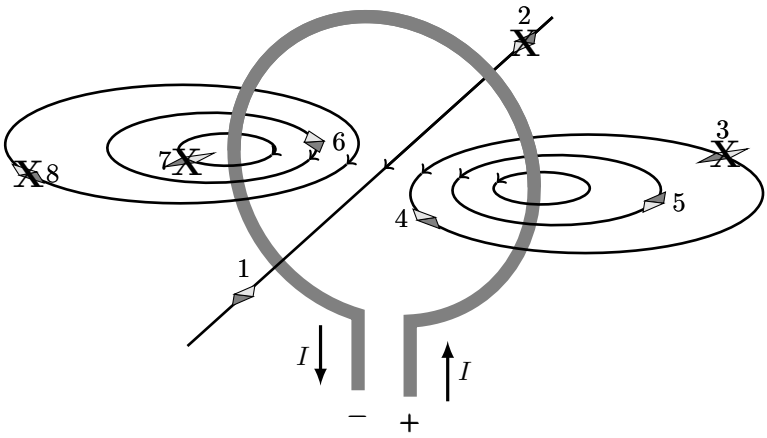


Ergänzungen

Die magnetische Flussdichte in einem Raumbereich wird über die Feldliniendichte visualisiert. Sehr wenig Feldlinien bedeuten also geringe Flussdichte (A). Über eine kleine Strecke hinweg auseinanderlaufende Feldlinen bedeuten eine starke Änderung der Flussdichte entlang dieser Strecke (B). Gleiches gilt auch für eine große Änderung der Anzahl der Feldinien über eine kleine Strecke hinweg, wie hier über den Innenrand des Rings (B′). Viele dicht nebeneinander verlaufende Feldlinien bedeuten schließlich eine hohe Flussdichte (C).

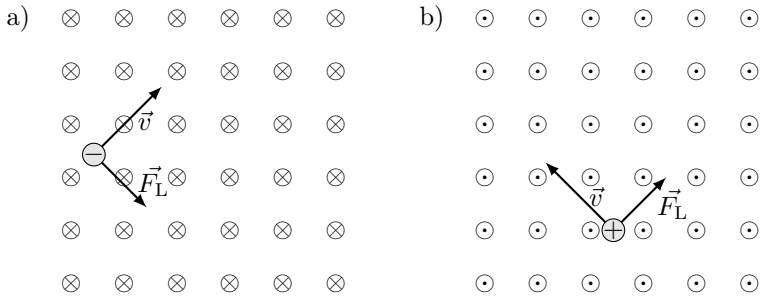
Erwartungshorizont E24 Drahtschleife

Magnetnadeln, deren Orientierung nicht richtig ist, sind in der folgenden Skizze mit einem **X** durchgestrichen:



Feldlinien zeigen laut Konvention vom Nordpol zum Südpol, also in die Richtung, in die sich der Nordpol einer in Gedanken auf der Feldlinie platzierten Magnetnadel drehen würde. Somit sind die Magnetnadeln mit den Nummern 1, 4, 5 und 6 in der richtigen Orientierung eingezeichnet.

Erwartungshorizont E25 Lorentzkraft



Die Lorentzkraft berechnet sich vektoriell nach $\vec{F_\mathrm{L}} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$. Da die Vektoren $\vec{v}$ und $\vec{B}$ jeweils in einem Winkel von $\alpha = 90°$ zueinander stehen, gilt demnach für ihren Betrag:

$$|\vec{F_\mathrm{L}}| = |q| \cdot |\vec{v}| \cdot |\vec{B}| \cdot \sin(\alpha) = q \cdot v \cdot B \cdot 1$$

$$
\begin{aligned}
&= 1{,}60 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C} \cdot 2\,\mathrm{m/s} \cdot 1 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{T} \\
&= 3{,}20 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{A\,s\,m/s} \cdot 1 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{V\,s/m^2} \\
&= 3{,}20 \cdot 10^{-23}\,\mathrm{A\,V\,s/m} \\
&= 3{,}20 \cdot 10^{-23}\,\mathrm{N\,m/m} = 3{,}20 \cdot 10^{-23}\,\mathrm{N}\ .
\end{aligned}
$$

Da der Betrag der Ladung von Elektron und Proton gleich ist - eine Elementarladung - und sie sich beide mit der gleichen Geschwindigkeit bewegen, ist der Betrag der Lorentzkraft in beiden Fällen gleich. Die Richtung der Lorentzkraft ergibt sich jeweils aus der Drei-Finger-Regel.

Erwartungshorizont E26 Induktionsspannung

a) Für die induzierte Spannung gilt

$$
\begin{aligned}
U_{\mathrm{ind}} &= d \cdot v \cdot B \\
&= 4 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{m} \cdot 2\,\mathrm{m/s} \cdot 0{,}5\,\mathrm{T} \\
&= 8 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{m^2/s} \cdot 0{,}5\,\mathrm{V\,s/m^2} \\
&= 4 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{V} = 40\,\mathrm{mV}\ .
\end{aligned}
$$

b) Zu den möglichen Änderungen ...

- Eine Erhöhung der Spannung ist am einfachsten durch eine höhere Geschwindigkeit des Drahtstücks zu erreichen, also müsste eine schnellere Bewegung herbeigeführt werden.
- Alternativ wäre ein Magnet einzubauen, der ein Magnetfeld mit höherer Flussdichte liefert.
- Auch ein Magnet gleicher Flussdichte, aber mit breiterem Bereich des homogenen Magnetfelds könnte verwendet werden, durch das dann ein längeres Drahtstück bewegt wird.
- Da die Spannung von der gesamten effektiven Drahtlänge im Magnetfeld abhängt, könnte in dem Aufbau auch ein Drahtrahmen mit mehreren Windungen verwendet werden, dessen unterer Rand sich durch das Magnetfeld bewegt.

Ergänzungen

Im (vereinfachten) Modell dieses Vorgangs wird angenommen, dass die Bewegungsrichtung des Drahtstücks im Magnetfeld der Flussdichte B

senkrecht zu den Feldlinien erfolgt. Dann wirkt auf eine Ladung q im Drahtstück aufgrund der Bewegung mit der Geschwindigkeit v die Lorentzkraft $F_\mathrm{L} = q \cdot v \cdot B$, die sie im Draht verschiebt. Da die Leiterschleife nicht geschlossen ist und die Ladungen daher nicht im Kreis fließen können, führt dies zum Aufbau eines elektrischen Feldes E_el über das Drahtstück der Länge d hinweg (dabei zählt natürlich nur dessen Länge im Magnetfeld). Somit tritt zwischen seinen Enden eine Induktionsspannung U_ind auf, für die gilt: $U_\mathrm{ind} = E_\mathrm{el} \cdot d$.

Das entstandene elektrische Feld übt nun auf die Ladung q eine der Lorentzkraft entgegengesetzte Kraft $F_\mathrm{el} = E_\mathrm{el} \cdot q$ aus. Wenn beide Kräfte vom Betrag her gleich sind,ruhen die Ladungen im Draht. Für diesen Gleichgewichtszustand kann U_ind berechnet werden:

$$\begin{aligned} F_\mathrm{L} &= F_\mathrm{el} \quad \text{also} \\ E_\mathrm{el} \cdot q &= q \cdot v \cdot B \\ U_\mathrm{ind}/d &= v \cdot B \\ U_\mathrm{ind} &= d \cdot v \cdot B \,. \end{aligned}$$

Erwartungshorizont E27 Zylinderspule

Spule 1 hat eine Länge von $l_1 = 30\,\mathrm{cm}$ und $N_1 = 300$ Windungen. Spule 2 ist nur halb so lang wie Spule 1, also $l_2 = l_1/2$ und sie hat nur 200 Windungen, also $N_2 = 2 \cdot N_1/3$. Wenn beide dieselbe magnetische Flussdichte erzeugen, gilt:

$$\begin{aligned} B_1 &= B_2 \quad \text{also} \\ \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N_1 \cdot I_1/l_1 &= \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N_2 \cdot I_2/l_2 \\ N_1 \cdot I_1/l_1 &= (2 \cdot N_1/3) \cdot (I_2 \cdot 2/l_1) \\ I_1 &= (2/3) \cdot (I_2 \cdot 2) = (4/3) \cdot I_2 \,. \end{aligned}$$

Also beträgt das Verhältnis der Stromstärken: $I_1/I_2 = 4/3$.

Erwartungshorizont E28 Elektromagnet

Die magnetische Flussdichte in einem solchen Elektromagnet - also einer langen Zylinderspule - beträgt $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N \cdot I/l$. Mögliche Maßnahmen sind

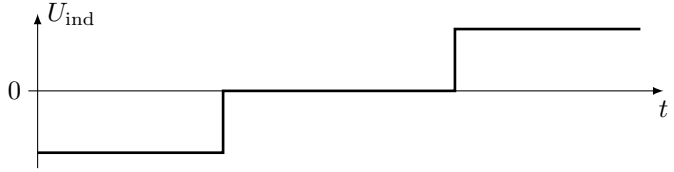
- Erhöhung des Spulenstroms I,
- Verwendung eines Spulenkerns mit höherer Permeabilität μ_r,
- Erhöhung der Windungszahl N auf dem Träger,
- Verkürzen der Spulenlänge l.

Erwartungshorizont E29 Leiterschleife (K)

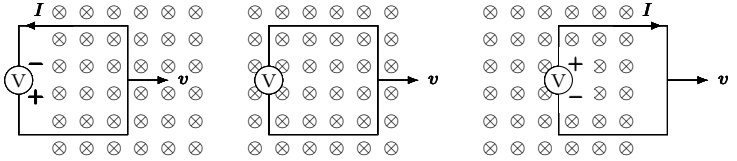
a) Für den Zusammenhang der induzierten Spannung U_{ind} mit der Änderung des magnetischen Flusses $\Phi = B \cdot A$ durch diese Leiterschleife mit nur einer Windung ($N = 1$) gilt:

$$U_{\text{ind}} = -N \cdot \dot{\Phi} = -\frac{\mathrm{d}(B \cdot A)}{\mathrm{d}t} = -B \cdot \frac{\mathrm{d}A}{\mathrm{d}t} \ .$$

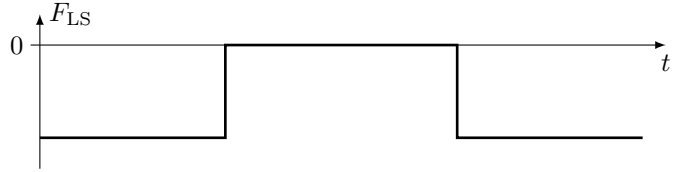
Im ersten Teil nimmt der Fluss zu und die Spannung ist deswegen negativ, im zweiten Teil bleibt der Fluss konstant und die Spannung ist Null, im dritten Teil nimmt der Fluss ab und die Spannung ist positiv (eine an der t-Achse gespiegelte Darstellung würde hier ebenfalls akzeptiert, da die Polung des Voltmeters nicht bekannt ist):



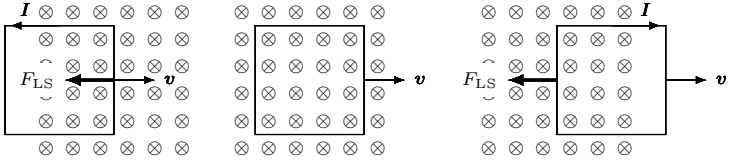
Die Polarität der Spannung folgt aus der Regel von Lenz: Ein eventuell in der Leiterschleife fließender Strom I wird immer so gerichtet sein, dass das ihn umgebende Magnetfeld der Flussänderung entgegenwirkt. Die daraus jeweils resultierende Stromrichtung und die Polung der induzierten Spannung am Voltmeter ist nachstehend eingezeichnet:



b) Wenn die Bewegung zu einer Änderung des magnetischen Flusses durch die Leiterschleife führt, entsteht eine dieser Bewegung entgegengesetzt gerichtete Kraft. Im ersten Teil nimmt der Fluss aufgrund der Bewegung zu und die Kraft F_{LS} auf die Leiterschleife ist deswegen nach links gerichtet, im zweiten Teil bleibt der Fluss konstant und die Kraft ist Null, im dritten Teil nimmt der Fluss ab und die Kraft ist wieder entgegen der Bewegung nach links gerichtet. Dies ergibt das folgende qualitative Kraft-Zeit-Diagramm, in dem ein negatives Vorzeichen der Kraft ihre Orientierung entgegen der Bewegungsrichtung bedeutet:



Dazu noch die Skizze der Leiterschleife in den drei Phasen:



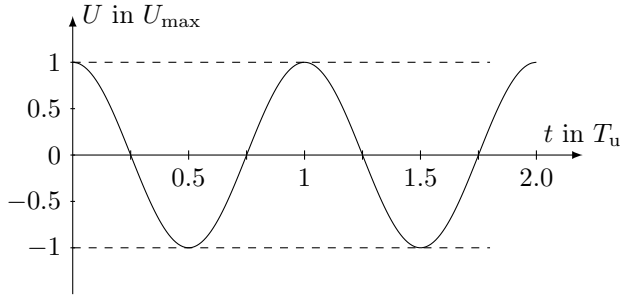
Ergänzungen

Die der Bewegung entgegengesetzte Kraftwirkung wird bei der Wirbelstrombremse ausgenutzt. Diese hat im Gegensatz zur klassischen Reibungsbremse - wie etwa einer Scheibenbremse - den Vorteil, ohne jeden mechanischen Kontakt mit dem abzubremsenden Objekt zu funktionieren. Dieses muss lediglich metallisch sein, damit darin Stromfluss möglich ist.

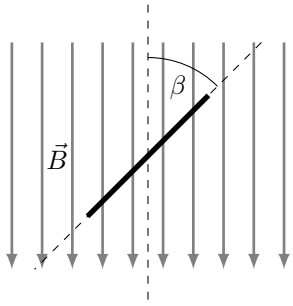
Erwartungshorizont E30 Generator (K)

a) In der nachstehenden schematischen Skizze des Verlaufs der Spannung U über der Zeit t ist die Zeitachse in Vielfache der Dauer T_{u} einer Umdrehung eingeteilt. Entsprechend sind die Spannungswerte in Vielfachen (hier also Bruchteilen) der Spannungsamplitude $U_{\max}$

dargestellt. Ob sich für den Spannnungsverlauf eine Sinus- oder eine Kosinusfunktion ergibt, hängt von der Startposition zum gewählten Zeitnullpunkt ab.



b) Aufgrund der Drehung der Drahtschleife verändert sich ihre senkrecht zum Magnetfeld stehende, wirksame Fläche A und damit der sie durchsetzende magnetische Fluss Φ.



Mit dem wie links skizziert definierten, zeitabhängigen Drehwinkel $\beta(t)$ der ebenen Drahtschleife relativ zur Orientierung der magnetischen Flussdichte $\vec{B}$ wird ihre wirksame Fläche

$$A(t) = A_0 \cdot \sin(\beta(t)) \; .$$

A_0 ist ihre geometrische Fläche.

Der zeitabhängige magnetische Fluss durch die Drahtschleife berechnet sich damit zu

$$\begin{aligned} \Phi(t) &= B \cdot A(t) = B \cdot A_0 \cdot \sin(\beta(t)) \\ &= B \cdot A_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ &= B \cdot A_0 \cdot \sin((2\pi/T_\mathrm{u}) \cdot t) \; . \end{aligned}$$

wobei $T_\mathrm{u} = 60\,\mathrm{s}/6000 = 10\,\mathrm{ms}$ die Dauer einer Umdrehung ist. Die induzierte Spannung folgt durch Ableitung nach der Zeit:

$$U_\mathrm{ind} = -N \cdot \dot{\Phi} = -N \cdot \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} \; .$$

Da hier nur eine Windung vorliegt, ist $N = 1$. Demnach ist die zeitabhängige induzierte Spannung

$$U_{\mathrm{ind}}(t) = -B \cdot A_0 \cdot (2\pi/T_{\mathrm{u}}) \cdot \cos((2\pi/T_{\mathrm{u}}) \cdot t) \; .$$

Das Produkt der Größen vor der Cosinus-Funktion liefert die gesuchte Spannungsamplitude U_{max}:

$$\begin{aligned} U_{\mathrm{max}} &= B \cdot A_0 \cdot (2\pi/T_{\mathrm{u}}) \\ &= 0{,}1\,\mathrm{V\,s/m^2} \cdot 5 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{m} \cdot 5 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{m} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60\,\mathrm{s}/6000} \\ &= 25 \cdot 10^{-5}\,\mathrm{V\,s} \cdot \frac{200 \cdot \pi}{\mathrm{s}} \\ &= 0{,}16\,\mathrm{V} \; . \end{aligned}$$

c) Eine höhere Spannungsamplitude wäre erreichbar durch Steigerung der Drehzahl, Vergrößerung der Fläche der Drahtschleife und eine Erhöhung ihrer Windungszahl. Auch die magnetische Flussdichte könnte dafür erhöht werden.

4 Wärmelehre

4.1 Kompetenzen

4.1.1 Temperatur

Die Studienanfängerinnen und Studienanfänger kennen die Celsius-Temperaturskala und die Kelvin-Temperaturskala. Sie wissen, dass man Temperaturen mit Hilfe des elektrischen Widerstandes, der thermischen Ausdehnung und der thermischen Strahlung messen kann. Sie wissen, dass die Atome und Moleküle eine thermische Bewegung ausführen und dass die absolute Temperatur ein Maß für die Stärke der thermischen Bewegung ist. Es ist ihnen bekannt, dass bei Kontakt zweier Körper verschiedener Temperatur ein Temperaturausgleich erfolgt und dass die Atome und Moleküle am absoluten Temperaturnullpunkt „ruhen“.

Sie können ...

- Werte auf der Celsius- und der Kelvin-Temperaturskala ineinander umrechnen (W1),
- den Zusammenhang zwischen Bewegung und Temperatur in einer Fragestellung erkennen (W2).

4.1.2 Aggregatzustände

Die Studienanfängerinnen und Studienanfänger kennen die drei Aggregatzustände fest, flüssig und gasförmig sowie die Begriffe Erstarren, Schmelzen, Sublimieren, Resublimieren, Verdampfen und Kondensieren, mit denen die Phasenübergänge zwischen diesen Aggregatzuständen bezeichnet werden.

Sie können ...

- die Unterschiede der Aggregatzustände bezüglich ihrer mikroskopischen Struktur und Bewegung qualitativ beschreiben (W2, W3),
- mögliche Aggregatzustände von Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur angeben (W3).

4.1.3 Wärmekapazität

Die Studienanfängerinnen und Studienanfänger kennen die Begriffe Wärmekapazität und spezifische Wärmekapazität. Sie wissen, dass sich nach Mischung von Flüssigkeiten verschiedener Temperatur eine gemeinsame Mischtemperatur einstellt[1].

Sie können ...

- mit dem Zusammenhang zwischen der Temperaturänderung eines Körpers und der Zufuhr oder Entnahme von Wärme Berechnungen durchführen (W4, W5),
- die sich bei Mischung von Flüssigkeiten verschiedener Temperatur einstellende Mischtemperatur berechnen (W6).

4.1.4 Wärme und Energieaustausch

Die Studienanfängerinnen und Studienanfänger kennen die Erweiterung des Energieerhaltungssatzes in Form der Berücksichtigung der Wärme. Sie wissen, dass Wärme zwischen Körpern ausgetauscht werden kann. Sie kennen drei Arten der thermischen Energieübertragung: Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung.

Sie können ...

[1] Die Unterscheidung zwischen der Zustandsgröße Innere Energie und der Prozessgröße Wärme sowie die in Schulbüchern daraus abgeleiteten Begriffe wie thermische Energie, Wärme-Energie usw. sind den Autorinnen und Autoren bekannt. Die Kenntnis dieser uneinheitlich verwendeten Terminologie ist ausdrücklich nicht Teil des cosh-Kataloges Physik, der den Begriff Wärme umgangssprachlich und ohne strikte Abgrenzung zur Arbeit für eine im Zusammenhang mit einer Temperaturdifferenz oder einem Phasenübergang übertragene Energie verwendet.

Der Unterschied zwischen Zustands- und Prozessgröße wird an der Hochschule eingeführt, dabei wird auch der Wärmebegriff präzisiert.

- Berechnungen unter Verwendung des erweiterten Energieerhaltungssatzes durchführen (W7, W8),
- die verschiedenen Arten der Energieübertragung qualitativ beschreiben und voneinander unterscheiden (W9).

4.2 Illustrierende Aufgaben

W1 Temperaturskalen

Rechnen Sie die Temperatur von 20 °C in Kelvin um.

W2 Tieftemperaturexperiment

Ein italienisches Kernforschungsteam kühlte 2014 einen Kupferblock von 400 kg Masse auf 0,006 K ab und hielt ihn 15 Tage lang bei dieser Temperatur. Angenommen, es wäre gelungen, den Block noch weiter auf exakt 0 K abzukühlen – was würde das für die Bewegung der Kupferatome bedeuten?

W3 Wasser (K)

Wasser kann in verschiedenen Aggregatzuständen vorliegen.

a) In welchen Aggregatzuständen kann Wasser bei einer Temperatur von 250 K vorliegen?

b) Wasser in einem Glas hat die Temperatur 20 °C. Um wieviel Kelvin muss bei Normaldruck die Temperatur erhöht werden, damit es siedet?

c) Bei den im Alltag üblichen Bedingungen trocknet nasse Wäsche an der Luft. Das gilt sogar im Winter für gefrorene Wäsche. Wie werden diese Vorgänge bezeichnet und wie sind sie zu erklären? Welcher Unterschied besteht zum Vorgang des Siedens?

W4 Tee

In einem elektrischen Wasserkocher wird Wasser zum Aufbrühen von Tee erhitzt. Das Gerät wird mit 1,5 Liter Wasser der Temperatur 12 °C befüllt und eingeschaltet. Welche Wärmemenge muss dem Wasser zugeführt

werden, um es auf die zum Aufbrühen optimale Temperatur von 90 °C zu bringen?

W5 Wärmekapazitäten

Gegenstand A hat eine doppelt so große Masse wie Gegenstand B. Beiden wird die gleiche Wärmemenge zugeführt und beide erfahren dabei die gleiche Temperaturänderung. Wie verhalten sich

a) ihre Wärmekapazitäten und

b) ihre spezifischen Wärmekapazitäten

relativ zueinander?

W6 Milchkaffee

Ein Isolierbecher enthält 250 mL Kaffee der Temperatur 90 °C. Um ihn trinken zu können, werden noch 100 mL kühle Milch mit einer Temperatur von 10 °C zugegeben. Welche Temperatur wird der dabei entstehende Milchkaffee nach Umrühren aufweisen? Zur Berechnung ist anzunehmen, dass Kaffee und Milch die gleiche spezifische Wärmekapazität wie Wasser besitzen.

W7 Kochtopf

Ein mit 1,5 Liter Wasser gefüllter Kochtopf steht auf der Platte eines Elektroherds, die eine maximale elektrische Leistung von 3,0 kW aufnimmt.

a) Wie lange dauert es mindestens, um das Wasser im Topf von 10 °C auf 95 °C zu erhitzen?

b) Während dieses Vorgangs beträgt der Gesamtwirkungsgrad für die Umwandlung der elektrischen Energie in Wärme 70 %. Welche Zeit ist demnach tatsächlich für die Erwärmung des Wassers erforderlich?

W8 Bremsscheiben

Bremsanlagen an Fahrzeugen müssen gut gekühlt werden, um im Betrieb nicht zu überhitzen. Dies gilt auch für Fahrräder. Ein Mountainbike Fahrer (Gesamtmasse mit Fahrrad 75 kg) fährt mit der konstanten

Geschwindigkeit 15 km/h einen steilen Berg hinunter in das 200 m tiefer gelegene Tal. Berechnen Sie den maximalen Temperaturanstieg in den Bremsscheiben, wenn Sie davon ausgehen, dass die gesamte frei werdende Energie bei der Talfahrt die Scheiben erwärmt und diese dabei keine Wärme nach außen abgeben können! Der ebenfalls bremsende Luftwiderstand und sonstige Reibungskräfte sollen nicht berücksichtigt werden. Jede der beiden Bremsscheiben hat eine Masse von 130 g und besteht aus Edelstahl mit einer spezifischen Wärmekapazität von 0,477 J/(g K).

W9 Heizung

Mehrfamilienhäuser werden häufig mit einer Zentralheizung beheizt.

a) Erklären Sie, wie bei einer solchen Zentralheizung die Wärme zu den Heizkörpern in den Wohnräumen gelangt.

b) Fasst man einen Heizkörper an, fühlt er sich warm an. Wie kommt die Wärme von dem Wasser im Heizkörper zur Haut der Hand?

c) Wie gibt der Heizkörper die Wärme in den umgebenden Raum weiter?

4.3 Erwartungshorizonte

Erwartungshorizont W1 Temperaturskalen

Eine Temperatur von 20 °C entspricht auf der Kelvin-Skala 293 K.

Die Umrechnung einer Temperatur ϑ (angegeben auf der Celsius-Skala) in die Temperaturangabe T auf der Kelvin-Skala erfolgt über die Formel

$$T = \left(273{,}15 + \frac{\vartheta}{^\circ\mathrm{C}}\right) \mathrm{K} \,.$$

Ergänzungen

Das Kelvin ist die SI-Basiseinheit der Temperatur und wird in der Physik zur Angabe von Temperaturen und Temperaturdifferenzen verwendet. Der Zahlenwert eines Temperaturunterschieds in den Einheiten Kelvin und Grad Celsius ist gleich. Die Kelvin-Skala ist aber gegenüber der

Celsius-Skala um genau 273,15 K verschoben, so dass eine Temperatur von 0 °C auf der Celsius-Skala 273,15 K auf der Kelvin-Skala entspricht. Der absolute Nullpunkt liegt bei 0 K, das entspricht −273,15 °C, tiefere Temperaturen sind physikalisch nicht möglich.

Erwartungshorizont W2 Tieftemperaturexperiment

Nähert sich die Temperatur dem absoluten Nullpunkt $T = 0\,\mathrm{K}$, so geht die Geschwindigkeit der Atome gegen Null, die Bewegung der Atome kommt also zum Stillstand.

Ergänzungen

Die absolute Temperatur eines Körpers ist ein Maß für die mittlere kinetische Energie der ungeordneten Bewegung seiner Atome bzw. Moleküle $\overline{E}_{\mathrm{kin}} \sim T$. Erhöht man die Temperatur eines Körpers, dann bewegen sich die Atome schneller und ihre kinetische Energie nimmt zu. Kühlt man den Körper hingegen ab, so bewegen sich die Atome langsamer.

Die Temperatur eines Körpers kann nie vollständig auf exakt 0 K abgesenkt werden. Man kann sich dieser Temperatur allerdings sehr weit annähern, wie in dem genannten Experiment geschehen. Dass die Atome zum Stillstand kommen, ist außerdem nur bei einer klassischen thermodynamischen Beschreibung möglich. Betrachtet man die Atome des Kupfergefäßes hingegen als quantenmechanisches System, so lassen sich Ort und Geschwindigkeit eines Atoms aufgrund der Unschärferelation nie gleichzeitig exakt bestimmen. Der klassische Fall, bei dem die Atome an einer Position völlig zur Ruhe kommen, ist daher nicht exakt möglich und die Atome haben selbst am absoluten Temperaturnullpunkt noch eine sogenannte Nullpunktsenergie.

Erwartungshorizont W3 Wasser (K)

a) Bei der Temperatur 250 K kann Wasser fest oder gasförmig sein.

   Umgerechnet in die im Alltag gebräuchliche Celsius-Skala entspricht diese Temperatur ungefähr −23 °C. Auch unter hohem Druck kann Wasser bei dieser Temperatur nicht mehr stabil flüssig vorliegen.

b) Wasser siedet unter Normaldruck bei 100 °C, die Temperatur muss also um $\Delta T = 80\,\mathrm{K}$ erhöht werden.

Temperaturdifferenzen bzw. Temperaturänderungen müssen stets in der Einheit Kelvin angegeben werden, auch wenn für die Temperaturangaben selbst die Celsius-Skala verwendet wird. Der Zahlenwert bleibt dabei gleich, das heißt eine Änderung von 20 °C auf 100 °C entspricht einer Temperaturänderung von $\Delta T = 80\,\mathrm{K}$.

c) Der Übergang von flüssigem zu gasförmigem Wasser wird als Verdampfen bezeichnet, der von festem zu gasförmigem Wasser als Sublimieren. Zum Trocken der Wäsche darf die Luft, hauptsächlich Stickstoff und Sauerstoff, nicht mit gasförmigem Wasser „gesättigt“ sein. In diesem Zusammenhang wird das vergleichsweise langsame Verdampfen auch als Verdunsten bezeichnet. Die Verdunstung findet an der Grenzfläche zwischen Wasser und Luft statt und benötigt viel Energie. Verdampfen wird als Sieden bezeichnet, wenn der sogenannte Dampfdruck der Flüssigkeit bei der gegebenen Temperatur größer ist als der Luftdruck. Dann bilden sich auch Gasblasen in der Flüssigkeit. Natürlich wird auch hierfür viel Energie benötigt, die beim Kochen von der Herdplatte übertragen wird. Da der Luftdruck auf einem hohen Berg niedriger ist als auf Meereshöhe, siedet Wasser dort bei entsprechend niedrigeren Temperaturen. Wasser siedet auch bei Raumtemperatur, wenn über der Flüssigkeit das Gas ständig evakuiert wird. Dabei kühlt sich das Wasser ab, bis es gefriert. Umgekehrt bedingt der erhöhte Druck in einem Schnellkochtopf eine höhere Siedetemperatur, was die Garzeit verkürzt.

Ergänzungen

Wenn nasse Wäsche im Alltag trocknet, ist dann der stabile Aggregatzustand von Wasser im Alltag gasförmig und nicht, wie verbreitet angenommen, flüssig?

Jein! Der Dampfdruck von Wasser im Alltag liegt bei etwa 20 mbar. Da die Luft üblicherweise nicht mit Wasserdampf gesättigt ist, also der sogenannte Partialdruck von Wasser kleiner als 20 mbar ist, geht beispielsweise das Wasser an der Meeresoberfläche in den stabilen gasförmigen Aggregatzustand über und ermöglich durch Kondensation in Wolken und Regen das Leben an Land. Der Vorgang ist allerdings recht langsam, da die erforderliche Energiemenge groß ist. Unterhalb der Meeresoberfläche steht das flüssige Wasser unter dem Lufdruck von etwa 1 bar und dem Schweredruck der Flüssigkeit und ist dort stabil flüssig.

Erwartungshorizont W4 Tee

Die benötigte Wärmemenge berechnet sich über

$$Q = c \cdot m \cdot (T_1 - T_0) \ ,$$

wobei $c = 4{,}18\,\mathrm{kJ/(kg\,K)}$ die spezifische Wärmekapazität des Wassers ist und $T_1 - T_0 = 78\,\mathrm{K}$ die gewünschte Temperaturänderung. Die Masse des zu erwärmenden Wassers beträgt $m = 1{,}5\,\mathrm{kg}$. Somit erhält man

$$Q = 4{,}18\,\mathrm{kJ/(kg\,K)} \cdot 1{,}5\,\mathrm{kg} \cdot 78\,\mathrm{K} = 0{,}49\,\mathrm{MJ} \ .$$

Erwartungshorizont W5 Wärmekapazitäten

Hier werden zwei verschiedene Fälle betrachtet:

a) Die Gegenstände A und B haben die gleiche Wärmekapazität.
Aus $Q = C \cdot (T_1 - T_0)$ folgt

$$C = \frac{Q}{T_1 - T_0} \ .$$

Die Wärmekapazität eines Körpers berechnet sich also als Quotient aus der zugeführten Wärmemenge Q und der sich daraus ergebenden Temperaturänderung $T_1 - T_0$. Dieser Quotient ist unabhängig von der Masse des Körpers.

b) Die spezifische Wärmekapazität von Gegenstand A ist halb so groß wie die von B.
Die spezifische Wärmekapazität c berechnet sich als Quotient aus der Wärmekapazität C eines Körpers und seiner Masse m

$$c = \frac{C}{m} \ .$$

Da bei Gegenstand A die Masse doppelt so groß ist wie bei Gegenstand B, hat seine spezifische Wärmekapazität nur den halben Wert.

Erwartungshorizont W6 Milchkaffee

Beim Mischen des heißen Kaffees ($\vartheta_{\mathrm{Kaffee}} = 90\,^\circ\mathrm{C}$, das entspricht $T_{\mathrm{Kaffee}} = 363\,\mathrm{K}$) mit der kühlen Milch ($\vartheta_{\mathrm{Milch}} = 10\,^\circ\mathrm{C}$, das entspricht

$T_{\text{Milch}} = 283\,\text{K}$) stellt sich nach dem Umrühren die noch unbekannte und zu berechnende Mischungstemperatur T_{m} ein. Die beim Abkühlen des Kaffees auf die Mischungstemperatur abgegebene Wärme entspricht aufgrund des Energieerhaltungssatzes der von der Milch aufgenommenen Wärme.

$$\text{Wärmeabgabe des Kaffees} = \text{Wärmeaufnahme der Milch}$$
$$c_{\text{Kaffee}} \cdot m_{\text{Kaffee}} \cdot (T_{\text{Kaffee}} - T_{\text{m}}) = c_{\text{Milch}} \cdot m_{\text{Milch}} \cdot (T_{\text{m}} - T_{\text{Milch}}) \,.$$

Da die spezifischen Wärmekapazitäten von Kaffee und von Milch laut Aufgabenstellung gleich sind, können diese aus der Gleichung gekürzt werden. Wir erhalten durch Auflösen der Gleichung nach T_{m}

$$T_{\text{m}} = \frac{m_{\text{Kaffee}} \cdot T_{\text{Kaffee}} + m_{\text{Milch}} \cdot T_{\text{Milch}}}{m_{\text{Milch}} + m_{\text{Kaffee}}} \,.$$

Geht man davon aus, dass die Dichte von Kaffee und von Milch gleich der Dichte von Wasser sind, so beträgt $m_{\text{Kaffee}} = 250\,\text{g}$ und $m_{\text{Milch}} = 100\,\text{g}$. Man erhält schließlich die Mischungstemperatur des Milchkaffees

$$T_{\text{m}} = \frac{250\,\text{g} \cdot 363\,\text{K} + 100\,\text{g} \cdot 283\,\text{K}}{250\,\text{g} + 100\,\text{g}} = 340\,\text{K} \,.$$

Umgerechnet auf die im Alltagsgebrauch übliche Celsius-Skala entspricht dies einer Mischungstemperatur von $\vartheta_{\text{m}} = 67\,^{\circ}\text{C}$.

Ergänzungen

Bei dieser Rechnung wurde vernachlässigt, dass auch der Isolierbecher eine Wärmekapazität besitzt und bei der Änderung der Temperatur von T_{Kaffee} auf die Mischungstemperatur T_{m} Wärme abgibt. Für eine genauere Berechnung muss dieser Beitrag berücksichtigt werden. Hierfür muss die Wärmekapazität des Isolierbechers in einem Vorversuch bestimmt werden, zum Beispiel indem heißes Wasser mit bekannter Temperatur, Masse und spezifischer Wärmekapazität in den Becher gegossen wird und die sich einstellende Temperatur gemessen wird.

Erwartungshorizont W7 Kochtopf

a) Die für die Temperaturerhöhung benötigte Energie berechnet sich zu

$$Q = c \cdot m \cdot (T_1 - T_0) = 4{,}18\,\text{kJ}/(\text{kg}\,\text{K}) \cdot 1{,}5\,\text{kg} \cdot 85\,\text{K} = 533\,\text{kJ} \,.$$

Da der Herd mit seiner maximalen elektrischen Leistung höchstens 3,0 kJ pro Sekunde liefern kann, beträgt die Dauer im besten Fall

$$t = \frac{Q}{P} = \frac{533\,\mathrm{kJ}}{3\,\mathrm{kJ/s}} = 180\,\mathrm{s}\ .$$

b) Der angegebene Wirkungsgrad bedeutet, dass bei der Umwandlung nur 70 % der (elektrischen) Eingangsleistung als Nutzleistung für die Erwärmung zur Verfügung stehen

$$P = 0{,}70 \cdot 3{,}0\,\mathrm{kW} = 2{,}1\,\mathrm{kW}\ .$$

Die benötigte Dauer berechnet sich somit zu

$$t = \frac{Q}{P} = \frac{533\,\mathrm{kJ}}{2{,}1\,\mathrm{kJ/s}} = 250\,\mathrm{s}\ .$$

Ergänzungen

Hierbei wird angenommen, dass das Material des Kochtopfs keine Wärme aufnimmt und die genannten 70 % der Eingangsleistung somit vollständig der Erwärmung des Wassers dienen.

Erwartungshorizont W8 Bremsscheiben

Die potentielle Energie wird bei der Talfahrt in Wärme umgewandelt

$$Q = E_{\mathrm{pot}} = m \cdot g \cdot h = 75\,\mathrm{kg} \cdot 9{,}81\,\mathrm{m/s^2} \cdot 200\,\mathrm{m} = 147\,\mathrm{kJ}\ .$$

Für die Temperaturerhöhung folgt aus $Q = c \cdot m \cdot (T_1 - T_0) = c \cdot m \cdot \Delta T$ durch Umformung

$$\Delta T = \frac{Q}{c \cdot m} = \frac{147\,\mathrm{kJ}}{0{,}477\,\mathrm{J/(g\,K)} \cdot 260\,\mathrm{g}} = 1200\,\mathrm{K}\ .$$

Dabei wurde die Gesamtmasse von beiden Bremsscheiben eingesetzt unter der Annahme, dass die Wärme gleichmäßig auf die vordere und die hintere Bremsscheibe verteilt wird.

Ergänzungen

Tatsächlich sind Temperaturerhöhungen in dieser Größenordnung für eine Bremsscheibe unrealistisch. Bei einer realen Talfahrt wird ein großer

Teil der Wärme an die Umgebung abgegeben, zunächst hauptsächlich durch die vorbeiströmende Luft, bei sehr hohen Temperaturen auch über Wärmestrahlung.

Erwartungshorizont W9 Heizung

Hier geht es um drei verschiedene Vorgänge:

a) In der Zentralheizung erwärmtes Wasser wird mit Hilfe einer Pumpe über die Rohre eines Heizkreislaufs durch die verschiedenen Heizkörper gepumpt.

b) Die Wärme gelangt durch die sogenannte Wärmeleitung vom Wasser in der Heizung durch die Außenhülle des Heizkörpers zur Hand.

c) Hier treten die drei verschiedenen Mechanismen des Wärmetransports auf. Insbesondere bei sehr hohen Temperaturen des Heizkörpers gibt dieser einen Teil der Wärme in Form von Wärmestrahlung an den Raum weiter. Außerdem steigt die direkt am Heizkörper erwärmte Luft auf und transportiert dabei einen weiteren Teil der Wärme vom Heizkörper durch Konvektion in den Raum. Ein weiterer Transportmechanismus ist die Wärmeleitung. Diese spielt bei Heizkörpern aber eine untergeordnete Rolle.

Ergänzungen

Ein Transport von Wärme, der mit der Bewegung von Materie einhergeht (zum Beispiel einer Flüssigkeit oder eines Gases, bei der Zentralheizung Wasser), wird Konvektion genannt. Wird die Materie zum Beispiel durch einen Ventilator oder wie im Fall der Zentralheizung durch eine Pumpe angetrieben, handelt es sich um die sogenannte erzwungene Konvektion. Im Falle der aufsteigenden warmen Luft spricht man hingegen von der sogenannten freien Konvektion.

5 Optik

5.1 Kompetenzen

5.1.1 Geometrische Optik

Die Studienanfängerinnen und Studienanfänger haben Grundkenntnisse über verschiedene Arten natürlicher und künstlicher Lichtquellen, Schattenwurf und die Ausbreitung von Licht. Das Modell der Strahlen zur Darstellung eines Lichtbündels ist ihnen bekannt und sie können es anwenden. Die Begriffe leuchtende und beleuchtete Körper sind bekannt.

Die Studienanfängerinnen und Studienanfänger haben Grundkenntnisse über die Phänomene der Reflexion und Brechung. Das Reflexionsgesetz, das Brechungsgesetz und die zugehörigen Begriffe Brechzahl beziehungsweise Brechungsindex und optische Dichte des Mediums sind bekannt. Sie kennen die Begriffe Absorption und Streuung.

Die Studienanfängerinnen und Studienanfänger kennen das Modell der dünnen Linse und die zugehörigen Begriffe Brennweite und Brennpunkt.

Die Studienanfängerinnen und Studienanfänger kennen die Lochkamera als einfaches abbildendes System.

Die Studienanfängerinnen und Studienanfänger kennen die Entstehung des Bildes auf der Netzhaut im Auge und die Besonderheiten bei Kurz- und Weitsichtigkeit.

Sie können ...

- die Eigenschaften von Lichtquellen, den Schattenwurf und die Ausbreitung von Licht anhand von Beispielen aus dem Alltag mit Hilfe von Skizzen erklären (O1, G41, O2, O3).
- das Bild bei der Abbildung durch einen ebenen Spiegel konstruieren (O4),

- qualitativ den Verlauf eines Lichtstrahles beim Übergang von einem Medium in ein anderes Medium beschreiben und skizzieren (O5),
- das Brechungsgesetz anwenden, um die Winkel im Strahlengang quantitativ zu bestimmen (O6).
- beschreiben, wie die Brennweite einer Sammellinse experimentell abgeschätzt werden kann (O7),
- den weiteren Verlauf von Mittelpunktstrahlen, achsenparallelen und Brennpunktstrahlen nach Durchtritt durch Sammel- beziehungsweise Zerstreuungslinsen erklären und in einen Strahlengang einzeichnen (O7).
- die Entstehung des Bildes auf der Netzhaut und die Besonderheiten bei Kurz- und Weitsichtigkeit erklären (O8).
- das Abbildungsprinzip, die Bildentstehung und die Orientierung des Bildes einer Lochkamera erklären (O9).

5.1.2 Wellenoptik

Die Studienanfängerinnen und Studienanfänger wissen, dass Licht sich in Form von elektromagnetischen Wellen ausbreitet. Sie kennen die Größen Frequenz, Wellenlänge und Ausbreitungsgeschwindigkeit und ihren Zusammenhang zur Beschreibung dieser Wellen. Sie wissen, dass Licht in der Regel aus Wellenanteilen verschiedener Frequenzen besteht, die als unterschiedliche Spektralfarben wahrgenommen werden. Es ist ihnen bekannt, dass das elektromagnetische Spektrum über den sichtbaren Bereich hinausgeht und sie kennen die Bezeichnungen Infrarot und Ultraviolett. Sie kennen den Unterschied zwischen mono- und polychromatischem Licht.

Die Studienanfängerinnen und Studienanfänger wissen, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht in Medien von der Frequenz abhängt.

Sie können ...

- mit den Größen Frequenz, Wellenlänge und Ausbreitungsgeschwindigkeit rechnen (O10),
- die Spektralfarben korrekt in ein Spektrum einordnen (O11).

- die Zerlegung von weißem Licht durch ein Prisma in seine farbigen Bestandteile erklären (O12).

5.2 Illustrierende Aufgaben

O1 Größenpeilung

Ein Schüler schätzt die Höhe einer Tanne, indem er ihre Peilhöhe mit der Größe seines Daumens am gestreckten Arm vergleicht. Bei einem Abstand der Tanne zum Auge von 24 m erscheinen Daumen und Tanne gleich groß. Der Daumen hat eine Länge von 6,5 cm, der Abstand zum Auge beträgt bei ausgestrecktem Arm 86 cm. Wie hoch ist die Tanne?

O2 Schatten

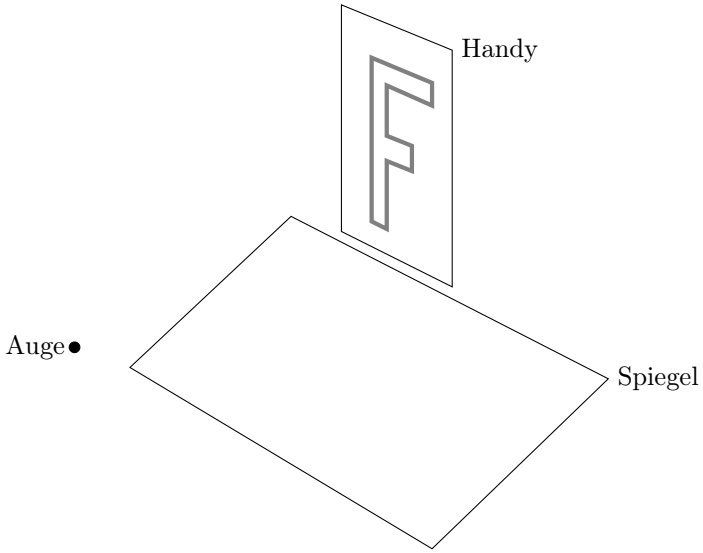
Eine Schülerin und ihr Schatten sind gleich lang. In welchem Winkel steht dann die Sonne über dem Horizont?

O3 Selfie

Auf einem Selfie vor dem Freiburger Münster beträgt der Pupillenabstand einer Schülerin 200 Pixel, das Münster selbst erscheint 800 Pixel hoch. Sie weiß aufgrund einer kurz zuvor vom Augenoptiker vorgenommenen Messung, dass ihre Augen in der Realität einen Abstand von genau 62 mm besitzen. Das Münster ist 116 m hoch. Wie viele Armlängen war der Münsterturm bei der Aufnahme entfernt?

O4 Spiegel **(K)**

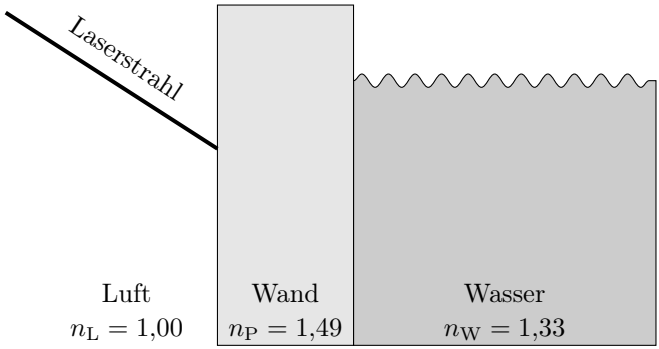
Eine Schülerin legt einen ebenen Spiegel auf ihren Schreibtisch. Im rechten Winkel stellt sie dahinter ihr Smartphone, das ein großes „F“ anzeigt und schaut in den Spiegel.



Welche Orientierung hat das „F“ im Spiegelbild? Skizzieren Sie hierzu die Lage des virtuellen Bildes des „F“.

O5 Laserpointer 1

Ein Schüler strahlt mit einem Laserpointer durch die dicke Plexiglaswand (Brechzahl $n_\mathrm{P} = 1{,}49$) des Schulaquariums. Skizzieren Sie qualitativ den weiteren Weg des Strahls durch Wand und Wasser.



O6 Laserpointer 2 **(K)**

Berechnen Sie die in Aufgabe O5 auftretenden Winkel in Wand und Wasser. Der Einfallswinkel des Laserstrahls beträgt dabei 30°.

O7 Unbekannte Linse **(K)**

Eine unbekannte Linse zeigt Gegenstände vergrößert, wenn sie nah an der Linse sind. Wenn sie dagegen weit entfernt sind, stehen sie auf dem Kopf.

a) Um welche Art von Linse handelt es sich?

b) Beschreiben Sie, wie die Brennweite der Linse abgeschätzt werden kann.

c) Konstruieren Sie den Strahlengang für einen Gegenstand, der von der Linse auf dem Kopf stehend abgebildet wird.

O8 Kurzsichtigkeit **(K)**

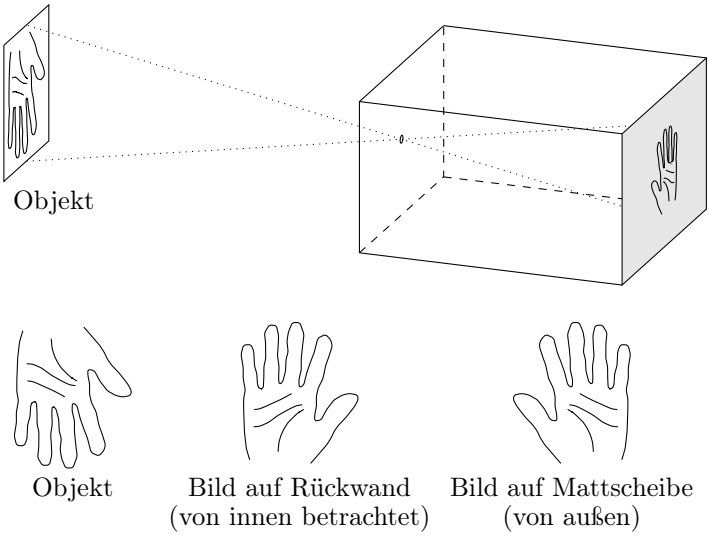
Kurzsichtige Personen können nur Gegenstände dicht vor dem Auge scharf sehen.

a) Ist der Augapfel bei kurzsichtigen Personen besonders lang oder besonders kurz, wenn man für beide Fälle die gleiche Brennweite annimmt?

b) Welche Art von Linse ist zur Korrektur dieser Fehlsichtigkeit erforderlich?

O9 Lochkamera

Eine „Lochkamera“ kann ein dunkler Raum mit kleiner Lichtöffnung sein, bei dem das Bild auf der Rückseite innen betrachtet wird. Einfach zu basteln sind kleine Lochkameras, bei denen das Bild außen auf einer Mattscheibe betrachtet wird, siehe Skizze.



a) Das Bild einer Turmuhr fällt auf die Rückwand in einer Lochkamera. Drehen sich die Zeiger auf dem Bild im Uhrzeigersinn?

b) Nun wird das Bild auf der Mattscheibe einer kleinen Lochkamera betrachtet. In welche Richtung drehen sich die Zeiger jetzt?

O10 Laserlicht

Ein Laser strahlt laut Betriebsanleitung mit einer Wellenlänge von $\lambda = 633\,\text{nm}$. Welche Frequenz hat das von ihm abgegebene Licht?

O11 OLED-Monitor

Das Bild eines aus organischen Leuchtdioden (OLED) bestehenden Monitors entsteht aus vielen einzelnen Leuchtpunkten (Pixeln) in den Grundfarben blau, grün und rot. Sortieren Sie die drei Grundfarben nach ansteigender Frequenz.

O12 Regenbogen

Die Wassertropfen eines Regenbogens zerlegen das weiße Sonnenlicht in seine spektralen Anteile.

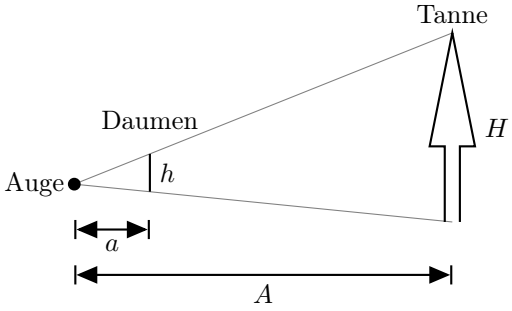
a) Ordnen Sie seine Farben blau, gelb, grün, orange und rot nach steigender Wellenlänge.

b) Ergänzen Sie diese Reihe um infrarotes und ultraviolettes Licht.

5.3 Erwartungshorizonte

Erwartungshorizont O1 Größenpeilung

Die Tanne hat eine Höhe von 1,8 m. Die Lösung erfolgt mit dem Strahlensatz, wobei H die Höhe der Tanne, h die Höhe des Daumens, A den Abstand zwischen Beobachter und Tanne und a den Abstand zwischen dem Auge und dem Daumen darstellt:



$$H = \frac{h}{a} \cdot A = \frac{6{,}5\,\text{cm}}{86\,\text{cm}} \cdot 24\,\text{m} = 1{,}8\,\text{m}\,.$$

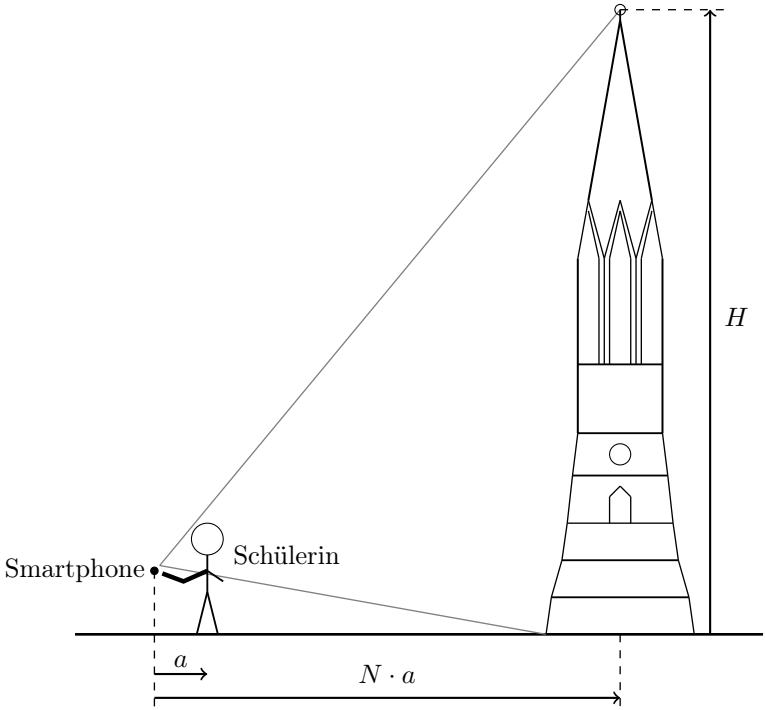
Erwartungshorizont O2 Schatten

Wenn der Schatten auf dem Boden genau so groß wie die Schülerin ist, dann muss die Sonne 45° über dem Horizont stehen.

Erwartungshorizont O3 Selfie

Zur Lösung der Aufgabe wird im ersten Schritt angenommen, dass das Münster und der Pupillenabstand gleich groß auf dem Bild dargestellt

werden (gleiche Anzahl von Pixeln). Dann würden zwei mathematische Strahlen von den Augen zum Handy mit den Randstrahlen (oben und unten) des Münsters zusammenfallen, und es ergibt sich folgende (nicht maßstäbliche) Skizze zur Veranschaulichung:



Der Pupillenabstand von 62 mm liegt dann um eine Armlänge a vom Handy entfernt. Das Münster mit einer Höhe von 116 m besitzt den Abstand $N \cdot a$ vom Handy, wobei N die Anzahl der Armlängen darstellt. Mit Hilfe des Strahlensatzes kann man nun im ersten Schritt den Abstand des Münsters vom Handy bestimmen. Es gilt:

$$\frac{a}{N \cdot a} = \frac{62\,\text{mm}}{116\,\text{m}} \,.$$

Man erhält so für die Anzahl N an Armlängen:

$$N = \frac{116\,\mathrm{m}}{0{,}062\,\mathrm{m}} = 1871\ .$$

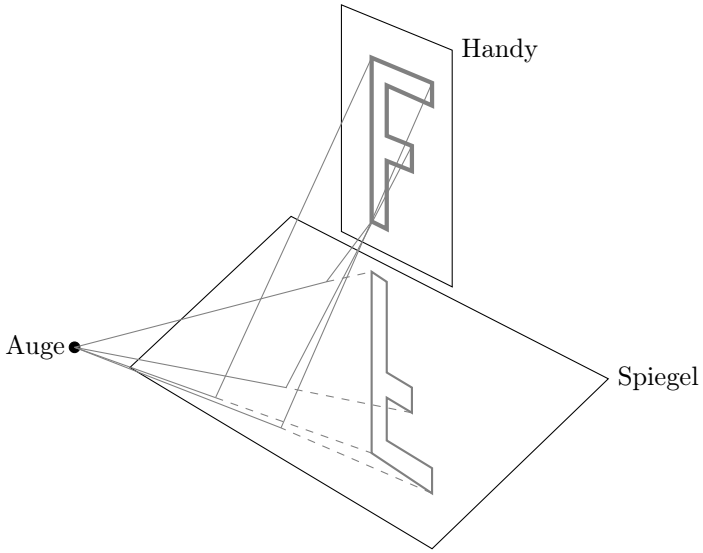
Für den Fall, dass das Münster und der Pupillenabstand gleich groß auf dem Bild wären, würde der Abstand Handy–Münster 1871 Armlängen betragen. Laut Aufgabenstellung ist das Münster aber viermal größer dargestellt als der Pupillenabstand. Das Münster muss sich also viermal näher am Handy befinden als bisher berechnet, so dass sich schlussendlich ein Abstand von rund 468 Armlängen ergibt.

Ergänzungen

Die oben gemachte Abschätzung wird nur grob gelten. Bei den gegebenen Parametern sind Abbildungsfehler bei der Aufnahme des Selfies unvermeidlich. Längen werden nicht proportional auf dem CCD-Chip abgebildet, und ggf. werden gerade Kanten des Münsters als gekrümmte Linien dargestellt. Solche Abbildungsfehler führen zu Verzerrungen im Bild, die sicherlich jeder kennt. Diese nicht perfekte Abbildung führt damit ebenso zu einer weiteren Abweichung des Rechenergebnisses vom realen Wert, da hierbei eine ideale Abbildung angenommen wurde. Man würde deshalb das Ergebnis sehr grob zu rund 500 Armlängen runden.

Erwartungshorizont O4 Spiegel (K)

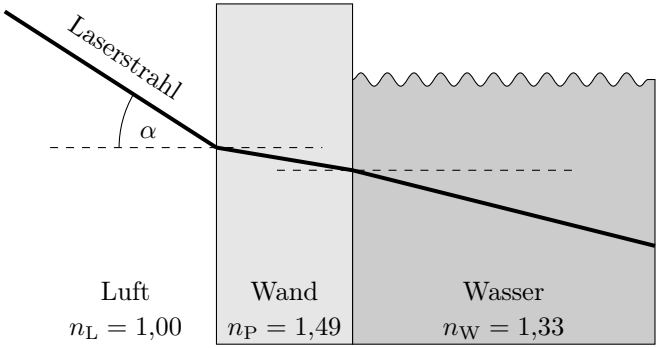
Das Spiegelbild des „F“ steht auf dem Kopf, seine Querbalken zeigen in die gleiche Richtung wie die des originalen „F“ , also nach rechts.



In der Skizze ist exemplarisch der Verlauf einiger weniger Lichtstrahlen vom „F“ zum Auge der Beobachterin eingezeichnet. Die gestrichelten Linien geben deren scheinbaren Verlauf hin zum virtuellen Spiegelbild des „F“ wieder.

Erwartungshorizont O5 Laserpointer 1

An der Grenzfläche zwischen Luft (Brechzahl $n_\mathrm{L} = 1{,}00$) und Plexiglas wird der Strahl zum Einfallslot hin gebrochen, da $n_\mathrm{P} > n_\mathrm{L}$ ist.
An der Grenzfläche zwischen Plexiglas und Wasser wird der Strahl vom Einfallslot weg gebrochen, da $n_\mathrm{W} < n_\mathrm{P}$ ist.
Das Einfallslot ist dabei die gestrichelt eingezeichnete Flächennormale zur Grenzfläche, die jeweils durch den Auftreffpunkt des Laserstrahls verläuft.

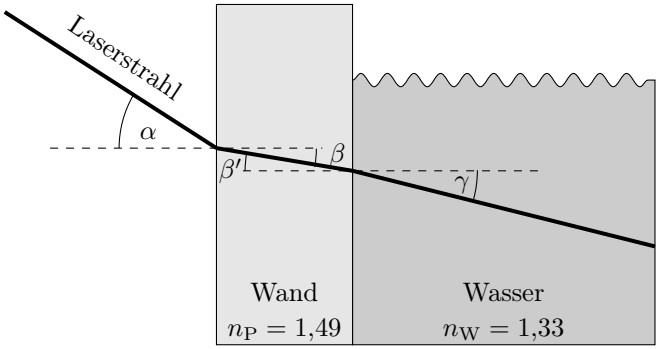


Ergänzungen

An Grenzflächen zwischen optisch transparenten Medien unterschiedlicher Brechzahl wird im Allgemeinen ein Anteil des einfallenden Lichtstrahls reflektiert. Wie groß er ist, hängt dabei von der Brechzahldifferenz ab. Seine Orientierung zum Einfallslot ergibt sich aus dem Reflexionsgesetz. Es besagt, dass die Beträge von Einfallswinkel α und Reflexionswinkel α_r gleich sind: $|\alpha| = |\alpha_r|$.

Erwartungshorizont O6 Laserpointer 2 (K)

Nachstehend wurden in die Skizze noch die zur Berechnung verwendeten Winkel eingezeichnet:



Die Winkel β und β' sind gleich, also $\beta = \beta'$. Unter Verwendung des Brechungsgesetzes für den Zusammenhang zwischen Winkeln und Brechzahlen an den beiden Grenzflächen „Luft/Plexiglas“ und „Plexiglas/Wasser“ folgen daraus die beiden Winkel β und γ:

$$
\begin{aligned}
n_\mathrm{L} \cdot \sin(\alpha) &= n_\mathrm{P} \cdot \sin(\beta) \\
n_\mathrm{L} \cdot \frac{\sin(\alpha)}{n_\mathrm{P}} &= \sin(\beta) \\
\sin(\beta) &= \frac{n_\mathrm{L}}{n_\mathrm{P}} \cdot \sin(\alpha) = \frac{1{,}00}{1{,}49} \cdot \sin(30^\circ) = 0{,}336 \\
\beta &= \arcsin(0{,}336) = 19{,}6^\circ \qquad \text{(im Plexiglas)} .
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
&n_\mathrm{P} \cdot \sin(\beta') = n_\mathrm{W} \cdot \sin(\gamma) , \\
&\text{mit} \qquad \beta = \beta' \qquad \text{folgt daraus:} \\
&\sin(\beta') = n_\mathrm{W} \cdot \frac{\sin(\gamma)}{n_\mathrm{P}} = \sin(\beta) \\
&\sin(\gamma) = \frac{n_\mathrm{P}}{n_\mathrm{W}} \cdot \sin(\beta) = \frac{1{,}49}{1{,}33} \cdot \sin(19{,}6^\circ) = 0{,}376 \\
&\gamma = \arcsin(0{,}376) = 22{,}1^\circ \qquad \text{(im Wasser)} .
\end{aligned}
$$

Ergänzungen

Zwischen den Winkeln α und γ besteht offenbar ein direkter mathematischer Zusammenhang. Aus $\sin(\beta) = \sin(\beta')$ ergibt sich:

$$
\begin{aligned}
n_\mathrm{L} \cdot \frac{\sin(\alpha)}{n_\mathrm{P}} &= n_\mathrm{W} \cdot \frac{\sin(\gamma)}{n_\mathrm{P}} \\
n_\mathrm{L} \cdot \sin(\alpha) &= n_\mathrm{W} \cdot \sin(\gamma) \\
\sin(\gamma) &= \frac{n_\mathrm{L}}{n_\mathrm{W}} \cdot \sin(\alpha) .
\end{aligned}
$$

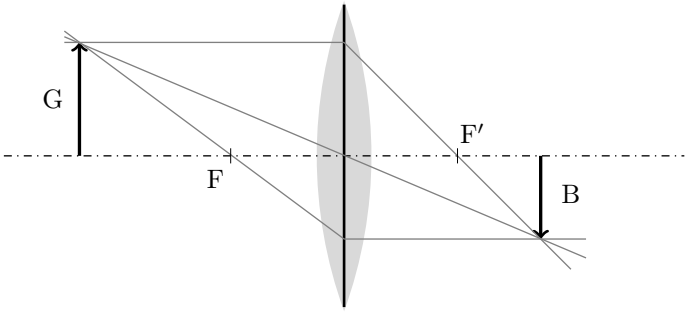
Der Winkel γ hängt demnach im Endeffekt gar nicht von der Brechzahl n_P der Plexiglaswand ab. Dies gilt, solange ihre Oberflächen zur Luft und zum Wasser hin planparallele Ebenen sind.

Erwartungshorizont O7 Unbekannte Linse (K)

a) Es handelt sich um eine Sammellinse.

b) Die Brennweite kann abgeschätzt werden, indem man einen weit entfernten Gegenstand (z.B. die Sonne oder eine Lampe) auf einem Schirm scharf abbildet. Dabei entspricht der Abstand Linse–Schirm in etwa der Brennweite. Eine zweite Variante besteht darin, einen Gegenstand in unmittelbarer Nähe zur Linse vergrößert zu beobachten und dann den Abstand Gegenstand–Linse langsam zu vergrößern. Im Moment des Wechsels des Bilds von aufrechter zu umgekehrter Orientierung entspricht der Abstand Gegenstand–Linse der Brennweite.

c) G bezeichnet den Gegenstand. Durch die Abbildung an einer Sammellinse entsteht generell ein auf dem Kopf stehendes Bild B, wenn sich der Gegenstand außerhalb der einfachen Brennweite befindet. Eine mögliche Lösung sieht wie folgt aus:



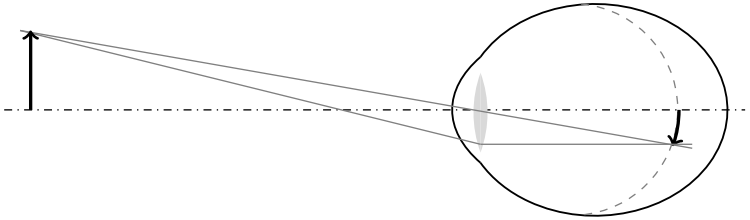
In der Mitte befindet sich die Sammellinse. Die beiden mit F und F′ bezeichneten Punkte sind die Brennpunkte der Linse.

Ergänzungen

Nach der DIN 1335 für technische Optik sind andere Größenbuchstaben zu verwenden, als in der Schule üblich (dazu die Tabelle A.6 im Anhang). Demnach sind alle korrespondierenden Größen in Objektraum und Bildraum mit den gleichen Buchstaben zu bezeichnen, die Größen im Bildraum werden dabei durch einen hochgestellten Strich gekennzeichnet. In der Skizze ist dies beispielhaft an den beiden Brennpunkten zu sehen.

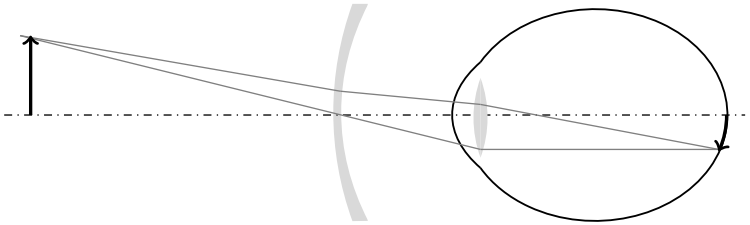
Erwartungshorizont O8 Kurzsichtigkeit (K)

a) Im Fall der Kurzsichtigkeit liegt der Brennpunkt der Augenlinse vor der Netzhaut. Der Augapfel ist demnach zu lang.



Grau gestrichelt ist die Lage der Netzhaut im normalsichtigen Fall.

b) Für die Korrektur wird eine Zerstreuungslinse verwendet, entweder in Form einer Kontaktlinse oder als in eine Brille eingesetzte Linse.



Erwartungshorizont O9 Lochkamera

Auf der Rückwand innen steht das Bild auf dem Kopf und ist zudem gespiegelt:

auf dem Kopf und zudem gespiegelt

Auf der Mattscheibe gesehen ist das Bild lediglich auf den Kopf gedreht:

auf den Kopf gedreht

Für die auf den Bildern beobachtete Bewegung der Zeiger bedeutet das:

a) Auf der Rückwand drehen sich die Zeiger gegen den Uhrzeigersinn.

b) Auf der Mattscheibe drehen sich die Zeiger im Uhrzeigersinn.

Erwartungshorizont O10 Laserlicht

Die Frequenz f des Laserlichts ergibt sich aus der Lichtgeschwindigkeit c und der Wellenlänge λ zu:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3{,}00 \cdot 10^8\,\mathrm{m/s}}{633 \cdot 10^{-9}\,\mathrm{m}} = 4{,}74 \cdot 10^{14}\,\mathrm{Hz}\ .$$

Erwartungshorizont O11 OLED-Monitor

Die korrekte Reihung der Farben nach ansteigender Frequenz lautet: rot, grün, blau.

Ergänzungen

Aus dem Zusammenhang $c = \lambda \cdot f$ ergibt sich, dass die Wellenlänge des Lichts in umgekehrter Reihung ansteigt, also in der Abfolge: blau, grün, rot.

Erwartungshorizont O12 Regenbogen

a) Nach steigender Wellenlänge haben die Farben folgende Reihenfolge: blau, grün, gelb, orange, rot.

b) Vor Blau liegt in dieser Reihe der Bereich des ultravioletten Lichts, nach Rot folgt der Bereich des infraroten Lichts.

A Formeln, Naturkonstanten, Materialgrößen

Tabelle A.1: Formeln zur Mechanik

$s(t) = v_0 \cdot t + s_0$	Gleichförmige Bewegung, Anfangsort s_0
$s(t) = \frac{1}{2} \cdot a_0 \cdot t^2 + v_0 \cdot t + s_0$	Konstant beschleunigte Bewegung, Anfangsort s_0 und -geschwindigkeit v_0
$F_\mathrm{G} = m \cdot g$	Gewichtskraft auf der Erde
$F_\mathrm{Feder} = -k \cdot x$	Federkraft nach Hooke
$E_\mathrm{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$	Kinetische Energie
$E_\mathrm{pot} = m \cdot g \cdot h$	Lageenergie
$E_\mathrm{elast} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot x^2$	Elastische Energie
$F = m \cdot a$	2. Newtonsches Gesetz ($m = \mathrm{const}$)
$p = m \cdot v$	(linearer) Impuls
$p = F/A$	Druck aus Kraft pro Fläche
$\varrho = m/V$	Massendichte
$p = \varrho_\mathrm{fluid} \cdot g \cdot h$	Schweredruck in der Tiefe h unter der Oberfläche einer Flüssigkeit der Dichte ϱ_fluid
$F_\mathrm{A} = \varrho_\mathrm{fluid} \cdot V \cdot g$	Auftriebskraft in Fluid der Dichte ϱ_fluid, V ist das verdrängte Fluidvolumen
$W = F \cdot \Delta s$	Arbeit für konstante Kraft in Wegrichtung
$P = W/\Delta t$	(mittlere) Leistung
$\eta = W_\mathrm{nutz}/W_\mathrm{zu}$	Wirkungsgrad aus Nutzarbeit und zugeführter Arbeit
Harmonische Schwingung, Beschreibung unter Verwendung von ...	
$x(t) = \hat{x} \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t)$	(1) Frequenz f
$x(t) = \hat{x} \cdot \cos((2\pi/T) \cdot t)$	(2) Periodendauer T
$x(t) = \hat{x} \cdot \cos(\omega \cdot t)$	(3) Kreisfrequenz ω
$y(x,t) = \hat{y} \cdot \cos(2\pi \cdot (x/\lambda - t/T))$	Wellenfunktion
$c = \lambda \cdot f$	Ausbreitungsgeschwindigkeit

Tabelle A.2: Formeln zu Elektrizitätslehre und Magnetismus

$F_{\mathrm{Coul}} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$	Coulombkraft im Vakuum
$F = q \cdot E$	Kraft auf Ladung im E-Feld
$E = U/d$	Elektrische Feldstärke im Plattenkondensator
$E_{\mathrm{el}} = q \cdot U$	Potentielle Energie im E-Feld
$\Phi = B \cdot A$	Magnetischer Fluss durch Fläche A senkrecht zu $\vec{B}$ (homogenes B-Feld)
$\vec{F}_{\mathrm{L}} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$	Lorentzkraft im B-Feld
$P = U \cdot I$	Elektrische Leistung
$R = U/I$	Elektrischer Widerstand allgemein
$U = R \cdot I$	Ohmsches Gesetz ($R = \mathrm{const}$)
$R = \varrho \cdot l/A$	Widerstand eines Leiters
$U_{\mathrm{kl}} = U_0 - R_{\mathrm{i}} \cdot I$	Klemmenspannung einer Batterie
$U_{\mathrm{ind}} = d \cdot v \cdot B$	Induzierte Spannung in einem im B-Feld bewegten Leiterstück
$U_{\mathrm{ind}} = -N \cdot \dot{\Phi} = -N \cdot \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$	Induzierte Spannung
$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N \cdot I/l$	Magnetische Flussdichte im Inneren einer langen Spule
$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot A/l$	Induktivität lange Spule

Tabelle A.3: Formeln zur Wärmelehre

$Q = C \cdot (T_1 - T_0)$	Zusammenhang von Temperaturänderung und ausgetauschter Wärmemenge, C ist die Wärmekapazität
$c = C/m$	spezifische (auf die Masse m bezogene) Wärmekapazität
$Q = c \cdot m \cdot (T_1 - T_0)$	Zusammenhang von Temperaturänderung und ausgetauschter Wärmemenge Q.

Tabelle A.4: Formeln zur Optik

$n_1 \cdot \sin(\alpha_1) = n_2 \cdot \sin(\alpha_2)$	Snelliussches Brechungsgesetz
$\lambda = c/f$	Wellenlänge als Quotient von Ausbreitungsgeschwindigkeit und Frequenz

Tabelle A.5: Naturkonstanten und Materialgrößen (gerundete Angaben)

Elementarladung	e	$1{,}60 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C}$
Elektrische Feldkonstante	ε_0	$8{,}85 \cdot 10^{-12}\,\mathrm{C/(V\,m)}$
Magnetische Feldkonstante	μ_0	$1{,}26 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{H/m}$
Elektronenmasse	m_e	$9{,}11 \cdot 10^{-31}\,\mathrm{kg}$
Allgemeine Gaskonstante	R	$8{,}31\,\mathrm{J/(mol\,K)}$
Spez. Wärmekapazität von Wasser	$c_{\mathrm{H_2O}}$	$4{,}18\,\mathrm{kJ/(kg\,K)}$
Lichtgeschwindigkeit	c	$3{,}00 \cdot 10^{8}\,\mathrm{m/s}$
Brechzahl von Luft	n_L	1,00
Brechzahl von Wasser	n_W	1,33
Brechzahl von Plexiglas (PMMA)	n_P	1,49

Tabelle A.6: Physikalische Größen und ihre Nomenklatur nach DIN

Größe	DIN-Symbol	andere Symbole	DIN-Norm
Amplitude	$\hat{x}$	x_m, A, a	1311-1
Federkonstante	k	c, D	1311-1
Drehfederkonstante	k'	c^*, c_D, k_D	1311-1
Objektweite	a	g	1335
Bildweite	a'	b	1335
Brennweite	f', f	f	1335
Objektgröße	y	G	1335
Bildgröße	y'	B	1335

bildseitige Größen nach DIN jeweils gestrichen

B Zwischenergebnisse und Zahlendarstellung

In der Physik werden Naturphänomene mit experimentellen Methoden untersucht und mit quantitativen Modellen beschrieben. Da sowohl die Genauigkeit von Experimenten als auch die Gültigkeit von Modellen prinzipiell begrenzt sind, besteht ein grundsätzlicher Unterschied zwischen dem formalen Rechnen in der Mathematik und den Berechnungen in der Physik.

Zwischenergebnisse

In den Erwartungshorizonten werden Zwischenergebnisse angegeben, wenn diese helfen, ein Verständnis für die Größen in der Aufgabe zu entwickeln. Bei der Verwendung eines nicht programmierbaren Taschenrechners können Zwischenergebnisse genutzt werden, um nicht längliche Terme eingeben zu müssen.

Um eine störende Fortpflanzung von Rundungsfehlern zu vermeiden, sollten bei Zwischenergebnissen „genügend“ Stellen behalten werden. In den meisten Fällen dürfte es genügen, bei Zwischenergebnissen mit einer oder zwei Stellen mehr zu rechnen, als im Endergebnis angegeben werden.

Darstellung von Endergebnissen

In der Darstellung von Endergebnissen sollten die angegebenen Ziffern im Rahmen der Aufgabenstellung signifikant (bedeutsam, aussagekräftig, geltend, gültig, zählend) sein.

Hinsichtlich der Anzahl gültiger Stellen ist die wissenschaftliche Notation mit genau einer linksseitigen Dezimalstelle eindeutig, aber der Einfachheit

halber wird sie meist nur bei sehr großen oder sehr kleinen Zahlen verwendet. Bei einem Hinweis ‚Rechnen Sie mit $g = 10\,\mathrm{m/s^2}$‘ für eine Überschlagsrechnung ist offensichtlich nur die erste Ziffer signifikant, zwei signifikante Ziffern wäre $g = 9{,}8\,\mathrm{m/s^2}$, aber die Schreibweise $g = 1{\cdot}10^1\,\mathrm{m/s^2}$ ist unüblich. Wenn es nicht um eine Überschlagsrechnung geht, werden in dem Katalog auch signifikante Nullen angegeben, also beispielsweise ‚eine Spannung von 1,50 V‘.

Um Unklarheiten über die Gültigkeit von endenden oder führenden Nullen zu vermeiden, können neben der wissenschaftlichen Notation auch die Präfixe in Tabelle B.1 im Kombination mit den jeweiligen Einheiten verwendet werden. Einige Beispiele für Größenangaben finden sich in Tabelle B.2.

Eine Fehlerrechnung wird nicht erwartet. Trotzdem ist gut zu wissen, dass bei Strichrechnung die absolute Unsicherheit von der größten absoluten Unsicherheit bestimmt wird, bei Punktrechnung entsprechend mit den relativen Unsicherheiten.

Ein typisches Beispiel für Strichrechnung ist die Umrechnung zwischen der Celsius-Temperatur und der absoluten Temperatur. Bei alltäglichen Temperaturangaben ist eine absolute Unsicherheit im Bereich von 1 °C beziehungsweise 1 K realistisch. Eine Temperaturangabe von 22 °C sollte also nicht in 295,15 K sondern in 295 K umgerechnet werden.

Ein Beispiel für Punktrechnung ist die Berechnung von Wärmemengen aus der spezifischen Wärmekapazität, der Masse und der Temperaturänderung. In einem Wasserkocher soll ein Liter Wasser von 15 °C auf 45 °C erwärmt werden. Von der Ausgangs- zur Endtemperatur fällt die spezifische Wärmekapazität von $4{,}189\,\mathrm{kJ/(kg\,K)}$ auf $4{,}179\,\mathrm{kJ/(kg\,K)}$, $4{,}18\,\mathrm{kJ/(kg\,K)}$ ist ein vernünftiger Wert für die Rechnung. Auch wenn drei Stellen für die spezifische Wärmekapazität angegeben sind, sollte das Endergebnis nur mit zwei Stellen angegeben werden, da die Wassermasse und auch die Temperaturänderung eher auf zwei Stellen bekannt sind:

$$Q = 4{,}18\,\mathrm{kJ/(kg\,K)} \cdot 1{,}0\,\mathrm{kg} \cdot 30\,\mathrm{K} = 0{,}13\,\mathrm{MJ} = 130\,\mathrm{kJ}\,.$$

Die mathematische Rechnung ergibt $Q = 125{,}4\,\mathrm{kJ}$, die endende Null in dem letzten Endergebnis der physikalischen Rechnung ist nicht signifi-

kant, worauf die Zahlenangaben für die Masse und die Temperaturänderung hindeuten.

Für die meisten Größen und Endergebnisse in dem vorliegenden Katalog werden zwei oder drei signifikante Stellen angegeben. Beispiele für oftmals nicht so gut bekannten physikalischen Größen sind alltägliche Längen, Volumina, Massen, Temperaturen oder elektrische Widerstände. Bei Überschlagsaufgaben kann auch nur eine Stelle sinnvoll sein.

Tabelle B.1: Zehnerpotenzen und jeweils dafür zu verwendende Präfixe

Faktor	Präfix	Zeichen
10^{12}	Tera-	T
10^{9}	Giga-	G
10^{6}	Mega-	M
10^{3}	Kilo-	k
10^{2}	Hekto-	h
10^{-1}	Dezi-	d
10^{-2}	Centi-	c
10^{-3}	Milli-	m
10^{-6}	Mikro-	μ
10^{-9}	Nano-	n
10^{-12}	Piko-	p

Tabelle B.2: Beispiele für Größenangaben

Häufig anzutreffen	Hier verwendete Form
1 nC	1,00 nC
$6{,}1234 \cdot 10^{-9}$ F	6,12 nF
$1{,}599 \cdot 10^{-2}$ s	16,0 ms

Gleichheitszeichen oder Rundungszeichen?

An vielen Stellen in der Physik kann gefragt werden, ob ein Gleichheitszeichen (=) oder ein Rundungszeichen (≈) verwendet werden sollte.

In einfachen Umformungen wie $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{p^2}{2m}$ ist das Gleichheitszeichen unstrittig, aber schon bei einer Aussage wie ‚Die kinetische Energie des Satelliten $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}mv^2 \ldots$‘ könnte auch ein Rundungszeichen verwendet werden, da etwa rotatorische oder relativistische Anteile vernachlässigt werden. Die Grenzen des Modells hier durch das Rundungszeichen auszudrücken, wäre eher unüblich. Wird hingegen im Rahmen des Modells etwas vernachlässigt, ist ein Rundungszeichen angebracht, etwa bei $m = m_{\text{Kind}} + m_{\text{Skateboard}} \approx m_{\text{Kind}}$.

Wie sollte bei Zahlenwerten verfahren werden? Seien zum Beispiel zwei quadratische Leiterschleifen mit den Flächen $A_1 = 2{,}0\,\text{cm}^2$ beziehungsweise $A_2 = 4{,}0\,\text{cm}^2$ gegeben. Bereits hier könnten auch Rundungszeichen verwendet werden: Es ist die Dicke des Drahtes zu berücksichtigen, die Messunsicherheit etc. Sollen nun die entsprechenden Drahtlängen l_1 und l_2 berechnet werden, wäre $l_2 = 8{,}0\,\text{cm}$ eine passende Angabe. Für l_1 könnte vor allem in der Schule $l_1 = 4 \cdot \sqrt{2{,}0}\,\text{cm}$ oder $l_1 \approx 5{,}7\,\text{cm}$ eine gewünschte Schreibweise sein. Solange es sich nicht um Überschlagsrechnungen sondern um Rechnungen im Rahmen des Modells und der Messunsicherheiten handelt, wird in der Physik an der Hochschule hier häufig das Gleichheitszeichen verwendet, also $l_1 = 5{,}7\,\text{cm}$. Diese letztgenannte Schreibweise wird auch in dem vorliegenden Katalog verwendet.

C Vektorgrößen bei 1D-Fragestellungen

Insbesondere in der Schulphysik treten vektorielle physikalische Größen oft nur in eindimensionalen Fragestellungen auf. Dabei ist es üblich, vereinfachte Notationen zu verwenden, was allerdings auch zu Unklarheiten führen kann. In der Tabelle C.1 werden übliche Notationen im allgemeinen Fall und im 1D-Fall gegenübergestellt. Dabei wird der Begriff „Betrag“ häufig nicht nur für skalare Größen, sondern auch für die euklidische Norm einer vektoriellen Größe verwendet. Dies gilt auch für die Notation:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \| \vec{v} \| = |\vec{v}| \ .$$

Tabelle C.1: Übliche Vektornotationen allgemein und im 1D-Fall

Größe	allgemein	1D-Fall
Vektor	$\vec{v}$	v
Koordinatendarstellung	$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix}$	v
Komponente	v_x	v
Euklidische Norm	$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$	v
Betrag	$\lvert v_x \rvert$	v

Im Zweifelsfall sollte bei Verwendung der vereinfachten Notation in der Aufgabenstellung darauf hingewiesen werden, ob nach der einzigen Komponente beziehungsweise Koordinate des Vektors gefragt ist oder nach der Norm des Vektors beziehungsweise dem Betrag der Komponente. Hierzu folgen ein paar Beispiele.

Beschleunigung, kinetische Energie

Für den senkrechten Wurf kann beispielsweise die allgemeine Gleichung

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g} \cdot t$$

mit vektorieller Schwerebeschleunigung $\vec{g}$ aufgestellt werden. Bei einer senkrecht orientierten z-Achse müssen lediglich die z-Komponenten betrachtet werden:

$$v_z = v_0 + g_z \cdot t\,.$$

Ist die z-Achse nach oben orientiert, hat g_z einen negativen Wert. In der vereinfachten Notation könnte zum Beispiel die Gleichung

$$v = v_0 - g \cdot t$$

aufgestellt werden. Dabei wäre v die vorzeichenbehaftete, senkrecht nach oben gezählte Komponente der Geschwindigkeit und g der Betrag der Schwerebeschleunigung.

Bei der kinetischen Energie geht das Skalarprodukt der Geschwindigkeit mit sich selbst, also die quadrierte Norm ein. Im allgemeinen Fall hat der Ausdruck etwa die Form

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left(v_x^2 + v_y^2\right) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2\,.$$

Da die Norm nicht negativ ist, lautet die Auflösung nach der Norm der Geschwindigkeit

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{\text{kin}}}{m}}\,.$$

In der vereinfachten Notation könnte auch die vorzeichenbehaftete Komponente des Vektors gemeint sein. Dann sind zunächst beide Lösungen zu betrachten:

$$v = \pm\sqrt{\frac{2 \cdot E_{\text{kin}}}{m}}\,.$$

Bilanzen

Bilanzen mit vektoriellen Größen gibt es bei Kräfte- oder Impulsbilanzen. Sei beispielsweise

$$m_1 \cdot \vec{v}_1 + m_2 \cdot \vec{v}_2 = \vec{0}$$

die Impulsbilanz bei einem Rückstoß in allgemeiner Form. In der vereinfachten Schreibweise lautet sie

$$m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 = 0$$

für die Komponenten und

$$m_1 \cdot v_1 = m_2 \cdot v_2$$

für die Beträge.

Kraftgesetze

In der allgemeinen Notation lautet die Coulomb-Kraft auf die Ladung q am Ort $\vec{r}$, hervorgerufen durch die Ladung Q im Ursprung

$$\vec{F}_{\text{Coul}} = q \cdot \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r^3} \cdot \vec{r}$$

beziehungsweise die Gravitationskraft auf die Masse m am Ort $\vec{r}$, hervorgerufen durch die Masse M im Ursprung

$$\vec{F}_{\text{G}} = -m \cdot \frac{G \cdot M}{r^3} \cdot \vec{r}.$$

Sind in der vereinfachten Notation die Komponenten gemeint, ist jeweils im Nenner der Betrag zu nehmen:

$$F_{\text{Coul}} = q \cdot \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot |r|^3} \cdot r\,,$$
$$F_{\text{G}} = -m \cdot \frac{G \cdot M}{|r|^3} \cdot r\,.$$

Sind hingegen die Beträge gemeint, müssten die Ladungen auch Beträge bedeuten oder in Betragsstriche gesetzt werden:

$$F_{\mathrm{Coul}} = |q| \cdot \frac{|Q|}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r^2} \,,$$
$$F_{\mathrm{G}} = m \cdot \frac{G \cdot M}{r^2} \,.$$

Ein sauberer Umgang mit der vereinfachten Notation bereitet selbst an der Hochschule regelmäßig Schwierigkeiten, dieser ist keine erwartbare Anforderung zu Studienbeginn. Schülerinnen und Schüler sollten aber hinsichtlich der Unterscheidung skalarer und vektorieller physikalischer Größen sensibilisiert sein.

D Empfehlungen für das Selbststudium

Auswahl empfehlenswerter Bücher

D. Commeßmann: Abiturtraining FOS 11 BOS 12 Technik *Physik 1: Kinematik, Dynamik, Energie; Stark Verlag, 2019* In diesem Heft werden in nur knapp 100 Seiten die wichtigsten Grundbegriffe der Kinematik, Dynamik und Energie zusammengefasst, anhand von Beispielen erklärt und mit Hilfe von Übungen vertieft.

C. Fischer, R. Hübner, H. Karsten: Physik *für Fachoberschulen, Berufsoberschulen, Berufliche Gymnasien und Gymnasien (Schülerband); Bildungsverlag EINS, 2014* Das Schulbuch bietet auf über 600 Seiten zuerst einen Einführungsteil zu elementaren Grundlagen der Naturwissenschaft Physik. Dieses Kapitel bildet die Basis zu folgenden speziellen Fachinhalten: Geradlinige Bewegungen, Kraft und Masse, Kreisbewegung, Energie- und Impulserhaltungssatz, Harmonische Schwingungen, Gravitation, elektrische und magnetische Felder, Wechselspannung und Schwingkreis, mechanische und elektromagnetische Wellen. Das Buch ermöglicht exemplarisches und selbständiges Lernen, da primär von Beispielen ausgegangen wird bzw. Erklärungen anhand von zahlreichen Beispielen veranschaulicht werden. Jedes Kapitel enthält zahlreiche Aufgaben, deren Kurz-Lösungen unter BuchPlusWeb auf der Website des Westermann-Verlags zum Download zu finden sind.

D. C. Giancoli: Physik *Lehr- und Übungsbuch; Pearson Studium, 2019* Das Buch bietet zu einer Vielzahl von Themen der Physik eine verständliche Einführung mit passenden Abbildungen, Beispielen (oft mit Alltagsbezug), Verständnisfragen und Aufgaben. Dazu enthält

es viele durchgerechnete Beispiele, Problemlösungskästen, Anwendungen der gezeigten Inhalte und sehr viele Übungsbeispiele mit Lösungen am Ende jedes Kapitels. Die Fachinhalte werden etwas weniger ausführlich als im Tipler behandelt. Umfassendes Werk mit 45 Kapiteln und über 1500 Seiten.

H. Kuchling: Taschenbuch der Physik *Hanser Fachbuch, 2014* Dieses Werk ist **kein** Lehrbuch, aber ein bekannter, bewährter und hervorragend zusammengestellter Klassiker unter den Formelsammlungen. Zu allen Größen und Formeln wird der wesentliche Inhalt teils in Stichworten, teils in Merksätzen angegeben. Das Buch ist inzwischen in der 21. Auflage erschienen

G. Nandi: Vorkurs Physik für Ingenieure *2. Auflage, utb 4646, expert Verlag Tübingen, 2020* In diesem Buch werden auf gut 200 Seiten die zu Beginn eines Ingenieurstudiums wichtigsten Inhalte der Physik wiederholt. Es besteht eine hohe thematische Übereinstimmung mit den Kompetenzen in dem vorliegenden Katalog. Das Buch ist ansprechend gestaltet und bietet eine Vielzahl von Beispiel- und Übungsaufgaben.

P. A. Tipler, G. Mosca: Physik *für Studierende der Naturwissenschaften und Technik; Springer Verlag, 2019* Die einzelnen Kapitel und deren Themengebiete sind didaktisch gut aufbereitet und illustriert. Die Inhalte werden verständlich dargestellt und durch Beispiele verdeutlicht. Am Ende jedes Kapitels wird das Wichtigste in einer Zusammenfassung präsentiert. Jedes Kapitel schließt ab mit einer Aufgabensammlung, mit der das Verständnis eines Themas durch Rechnen von passenden Aufgaben vertieft werden kann. Hierzu stehen verschiedene Aufgabentypen zur Verfügung: Verständnisaufgaben, Schätzungs- und Näherungsaufgaben, konzeptionelle Aufgaben, allgemeine Aufgaben. 41 Kapitel, über 1300 Seiten.

J. Zeitler, G. Simon: Physik für Techniker *Hanser Fachbuch, 2016* Das Buch ist für die Aus- und Weiterbildung in technischen Berufen konzipiert, es kann auch zur selbstständigen Vertiefung und Wiederholung verwendet werden. Es stellt in 16 Kapiteln auf ca. 500 Seiten das physikalische Grundwissen aus der Mechanik, Thermodynamik, Elektrik, Schwingungs- und Wellenlehre sowie zur Atom- und Kernphysik in anschaulicher, leicht verständlicher

Weise vor. Die Anschaulichkeit und die Verständlichkeit werden in den einzelnen Kapiteln durch Anwendungs- und Aufgabenbeispiele unterstützt. Am Ende des Buches gibt es eine Aufgabensammlung von über 300 Übungsaufgaben mit Ergebnissen und Hinweisen zu den Lösungswegen.

Empfehlenswerte Angebote im Internet

LEIFIphysik: www.leifiphysik.de Auf diesen Webseiten werden alle Themen der Schulphysik abgedeckt, aufbereitet nach Jahrgang und Bundesland. Zu den Themenbereichen gibt es Grundwissen, Aufgaben mit Lösungen und Versuche, zum Beispiel in Form von Simulationen.

Online-Brückenkurs Physik und Varianten In einer bundesweiten Kooperation von 14 Hochschulen wurde ein Online-Brückenkurs Physik erstellt, der insbesondere beim Einstieg in ein Ingenieurstudium mit Physik im Nebenfach Unterstützung anbietet. Zu den Gebieten Mechanik, Elektromagnetismus, Optik und Wärme gibt es Eingangstests mit Bearbeitungsempfehlungen. Die Themenschwerpunkte der Teilgebiete werden jeweils mit Basiswissen, Texten, Videos, Animationen und interaktiven Aufgaben behandelt. Abschlusstests dienen der Überprüfung des Lernerfolgs. Bei den Inhalten findet sich eine Einschätzung, ob diese als besonders wichtig, empfehlenswert oder als über das Erwartbare hinausgehend angesehen werden. Zu Rechentechniken wird auf den Online-Brückenkurs Mathematik verlinkt. Beide Kurse werden von der TU9-Allianz empfohlen. Die Inhalte der Brückenkurse werden mit den Katalogen der jeweiligen cosh-Gruppen abgestimmt.

Unter **www.brückenkurs-physik.de** ist die gemeinsame Kursversion ohne Anmeldung frei verfügbar. Die für den Online-Brückenkurs Physik erstellten Inhalte stehen unter der freien Lizenz CC BY-SA zur Verfügung. Teilweise stellen die kooperierenden Einrichtungen in die jeweiligen Plattformen integrierte Kursvarianten zur Verfügung:

Für Hamburg ist eine Kursversion in **www.mintfit.hamburg** in-

tegriert, die sich durch ein themenübergreifendes Kapitel „Energie“ von der gemeinsamen Version unterscheidet.

Für Nordrhein-Westfalen ist eine Kursversion in dem neuen Landesportal **ORCA.nrw** integriert. Dieses soll insbesondere eine tutorielle Betreuung anbieten.

Der Kurs wird inhaltlich und technisch weiter überarbeitet und wird derzeit ins Englische übersetzt.

POWER-Kurs der OPEN vhb Die virtuelle Hochschule Bayern bietet den allgemein zugänglichen Kurs „*P*hysik *O*nline *W*arm-*U*p für *ER*stsemester“ an: **www.vhb.org** . Gegenüber dem kooperierenden Online-Brückenkurs Physik sind die Themen reduziert, um eine Bearbeitungszeit von 60 Stunden zu erreichen. Die Lernziele sind am cosh-Katalog Physik orientiert. Insbesondere die Themen Kräften, Kinematik und Energie werden nach Erkenntnissen der Physics Education Research behandelt. Hierbei liegen die Schwerpunkte auf Konzepverständnis und Aktivierung.

viaMINT: viamint.haw-hamburg.de Dieser online-Physikkurs legt den Fokus auf die Themen Physikalische Größen und Maßeinheiten, Diagramme und Skalen, Bewegung und Kraft, Arbeit, Energie und Leistung, Wärmelehre, Elektrizität und Optik. Zusätzlich werden Kapitel zur Erstellung von Protokollen und zur Einführung in experimentelles Arbeiten gegeben. Die Vermittlung der Inhalte erfolgt anhand von Erklärvideos und Übungsaufgaben in Form von Selbsttests.

Aufgabenverzeichnis

A1 Standardaufgabe ix
A2 Ergänzende Aufgabe ix
G1 Symbole und Einheiten 4
G2 Größengleichung 4
G3 Einheitenumrechnung 4
G4 Einheitenkonversion 5
G5 Sortierung nach Größe 5
G6 Einheiten 5
G7 Einheitensystem 5
G8 Einheitenanalyse 6
G9 Vektorgrößen 6
G10 Überlagerung 6
G11 Kräfte 7
G12 Masse und Gewicht 7
G13 Aktionsprinzip 8
G14 Newton 8
G15 Rutschvorgang 8
G16 Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm 8
G17 Dichte 9
G18 Weg-Zeit-Diagramm 9
G19 Fallbewegung 10
G20 Schwingung 10
G21 Beschleunigung 10
G22 Weg-Zeit-Diagramme 11
G23 Geschwindigkeits-Zeit-Diagramme 12
G24 Parallelfahrt 13
G25 Berechnungen 14
G26 Treppensteigen 15
G27 Aufgabenstellung 16
G28 Dichtebestimmung 16

G29 Zugfahrt . . . 17
G30 Stoßvorgänge . . . 17
G31 Schlauchstück . . . 17
G32 Multimeter . . . 18
G33 Schulweg . . . 19
G34 Schätzwert . . . 19
G35 Weltbevölkerung . . . 19
G36 Schnappschuss . . . 20
G37 Tennisbälle . . . 20
G38 Ruderer . . . 20
G39 Feuerwerk . . . 20
G40 Schwingungsmessung . . . 21
G41 Höhenmessung . . . 21
G42 Federkonstante . . . 21
M1 Koordinaten . . . 54
M2 Geschwindigkeiten . . . 54
M3 Bremsvorgang . . . 54
M4 Fall . . . 54
M5 Konstante Beschleunigung . . . 54
M6 Wurfweite . . . 55
M7 Wurf . . . 55
M8 Feder . . . 55
M9 Auftrieb . . . 55
M10 Kraftpfeile . . . 55
M11 Seilkraft . . . 56
M12 Schnellwaage . . . 56
M13 Gleichgewicht . . . 57
M14 Kraft pro Fläche . . . 58
M15 Druck . . . 58
M16 Zugkraft . . . 58
M17 Beschleunigungskräfte . . . 58
M18 Arbeit und Energie . . . 58
M19 Reibung . . . 59
M20 Energieumwandlung . . . 59
M21 Leistung . . . 59
M22 Impulserhaltung . . . 59
M23 Rückstoß . . . 59
M24 Harmonische Schwingung . . . 60

M25 Wellenarten 60
M26 Fortschreitende Welle 60
M27 Stehende Welle 61
M28 Wellenfunktion 61
E1 Ladungserhaltung 79
E2 Ladungsanordnungen 1 80
E3 Ladungsanordnungen 2 80
E4 Kräfte zwischen Ladungen 80
E5 Kraft im E-Feld 81
E6 Kondensator 81
E7 E-Feld einer Ladungsverteilung 82
E8 Influenz 83
E9 Anlasser 83
E10 Kochsalzlösung 83
E11 Massenspektrometer 84
E12 Blockbatterie 84
E13 Halogenlampe 85
E14 Ladestation 85
E15 Ohmsches Gesetz 85
E16 Elektroinstallation 86
E17 Autoelektrik 86
E18 Taschenlampe 86
E19 Widerstandskombinationen 87
E20 Netzwerk 88
E21 Stabmagnet 89
E22 Magnetbruch 89
E23 Magnetfeld 90
E24 Drahtschleife 90
E25 Lorentzkraft 91
E26 Induktionsspannung 92
E27 Zylinderspule 92
E28 Elektromagnet 93
E29 Leiterschleife 93
E30 Generator 94
W1 Temperaturskalen 119
W2 Tieftemperaturexperiment 119
W3 Wasser 119
W4 Tee 119

W5 Wärmekapazitäten 120
W6 Milchkaffee 120
W7 Kochtopf 120
W8 Bremsscheiben 120
W9 Heizung 121
O1 Größenpeilung 131
O2 Schatten 131
O3 Selfie 131
O4 Spiegel 131
O5 Laserpointer 1 132
O6 Laserpointer 2 133
O7 Unbekannte Linse 133
O8 Kurzsichtigkeit 133
O9 Lochkamera 133
O10 Laserlicht 134
O11 OLED-Monitor 134
O12 Regenbogen 134