



Physik

FOS Technik Bayern Jahrgangsstufe 11

Mit Physikalischem Praktikum

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG
Düsseldorfer Straße 23 · 42781 Haan-Gruiten

Europa-Nr.: 87591

Autoren des Buches „Physik - FOS Technik Bayern Jahrgangsstufe 11“

Patrick Drössler	Amberg
Harald Vogel	Inning a. Ammersee
Dr. Petra Weidenhammer	München

Lektorat: Josef Dillinger

Bildentwürfe: Die Autoren

Bildbearbeitung: Zeichenbüro des Verlags Europa-Lehrmittel, Ostfildern

1. Auflage 2017, korrigierter Nachdruck 2021

Druck 5 4 3

Alle Drucke derselben Auflage sind parallel einsetzbar, da sie bis auf die Behebung von Druckfehlern identisch sind.

ISBN 978-3-8085-8759-1

Alle Rechte vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung außerhalb der gesetzlich geregelten Fälle muss vom Verlag schriftlich genehmigt werden.

© 2017 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
<http://www.europa-lehrmittel.de>

Umschlaggestaltung: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald
Umschlagfotos: Tom Hegen, © Science RF-fotolia.com, und Autorenfoto
Satz: Satzherstellung Dr. Naake, 09618 Brand-Erbisdorf
Druck: RCOM Print GmbH, 97222 Würzburg-Rimpf

Vorwort

Mit Beginn des Schuljahres 2017/18 tritt an den beruflichen Oberschulen in Bayern der LehrplanPLUS in Kraft. Mit diesem Buch decken wir inhaltlich für das Fach Physik in der Ausbildungsrichtung Technik die vier Lernbereiche (LB) der 11. Jahrgangsstufe der Fachoberschule (FOS) und damit gleichzeitig einen Teil der 12. Jahrgangsstufe der Berufsoberschule (BOS) ab:

- **Kinematik** (LB 1): Kapitel 1 bis 4
- **Newton'sche Dynamik und Impuls** (LB 2): Kapitel 5 bis 7
- **Arbeit und Energie** (LB 3): Kapitel 8 und 9
- **Physikalisches Praktikum** (LB 4, nur für die Jahrgangsstufe 11 der FOS)

Insbesondere in den beiden ersten Kapiteln finden sich zahlreiche Möglichkeiten, Vorwissen zu aktivieren und Lücken aus der Mittelstufe zu schließen.

Arbeiten mit diesem Buch

Das Buch ist für Sie als Schüler sowohl zum Selbststudium als auch zum Nachholen versäumten Unterrichts geeignet. Nutzen Sie die Anregungen zum eigenen Experimentieren – nur so wird die Physik lebendig!

Den Kollegen bieten wir geeignete Unterrichtseinstiege und die Möglichkeit zur Binnendifferenzierung – ein schneller Blick in den Lösungsteil am Ende des Buches, und Sie haben ein Gefühl für die Schwierigkeit der Aufgaben.

Experimente

Das der Physik eigene Wechselspiel von Theorie und Experiment machen wir deutlich, indem wir verschiedene Versuchsstrategien und moderne Messwerterfassungssysteme beschreiben. Dabei haben wir die unterschiedliche Ausstattung der Schulen berücksichtigt, indem wir alternative Experimente anbieten. Dies gilt für alle Kapitel, insbesondere für das physikalische Praktikum.

Lernen mit Aufgaben

Sie finden typische Fragestellungen und durchgerechnete Aufgabenbeispiele im Lehrtext. Diese können als Leitfaden beim Lösen der Aufgaben am Ende jedes Kapitels dienen. Die Ergebnisse finden Sie im Lösungsteil am Ende des Buches. Viele Aufgaben sind bewusst offen formuliert, um der Kompetenzorientierung des LehrplanPLUS besser Rechnung zu tragen.

Wir wünschen Ihnen viel Freude mit unserem Buch und interessieren uns für Ihre Meinung! Teilen Sie uns Verbesserungsvorschläge, Kritik – gerne auch Lob – mit:

lektorat@europa-lehrmittel.de

München, im August 2017
Die Autoren

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen.....	7
1.1	Aufzeichnung von Bewegungen.....	7
1.2	Geschwindigkeit.....	8
1.3	Geschwindigkeitsänderung und Beschleunigung.....	12
1.4	Exkurs: SI-System	14
1.5	Aufgaben zum Kapitel Grundlagen	16
1.5.1	Aufgaben zum Umrechnen von Einheiten	16
1.5.2	Aufgaben zum Auflösen von Formeln	16
1.5.3	Aufgaben zu Geschwindigkeit und Beschleunigung	16
2	Lineare gleichförmige Bewegung	19
2.1	Diagramme der gleichförmigen Bewegung	19
2.2	Bewegungsgleichungen der gleichförmigen Bewegung.....	22
2.3	Aufgaben zur gleichförmigen Bewegung	24
3	Gleichförmig beschleunigte Bewegung	25
3.1	Von der Durchschnitts- zur Momentangeschwindigkeit.....	25
3.2	Diagramme der beschleunigten Bewegung.....	27
3.3	Bewegungsgleichungen der beschleunigten Bewegung	29
3.4	Linearisierung von Messreihen	32
3.5	Aufgaben zur gleichförmig beschleunigten Bewegung.....	34
3.5.1	Aufgaben mit Schwerpunkt auf Diagrammen	34
3.5.2	Einhol- und Begegnungsaufgaben	35
3.5.3	Aufgaben zur Linearisierung	35
4	Fall- und Wurfbewegungen.....	36
4.1	Der freie Fall	36
4.2	Messung der Fallbeschleunigung.....	38
4.3	Die Fallgesetze.....	39
4.4	Aufgaben zum freien Fall.....	43
4.5	Der senkrechte Wurf	45
4.6	Aufgaben zum senkrechten Wurf.....	50
4.7	Der waagrechte Wurf	51
4.8	Aufgaben zum waagrechten Wurf.....	54
4.9	Der schiefe Wurf	55
4.10	Aufgaben zum schiefen Wurf.....	58
5	Die Kraftgesetze von Newton.....	59
5.1	Kräfte und ihre Wirkung.....	59
5.1.1	Kräfte und ihre Wirkung im Sport	59
5.1.2	Experimentieren Sie selbst	60
5.2	Newtons 1. Gesetz – Das Beharrungsprinzip.....	61
5.2.1	Formulierung	61
5.2.2	Beispiele	62
5.2.3	Bezugssysteme	63
5.3	Newtons 2. Gesetz – Die Newton'sche Bewegungsgleichung	63
5.3.1	Formulierung	64
5.3.2	Experimenteller Nachweis	64
5.3.3	Folgerungen	67
5.4	Geschwindigkeitsänderung und Kraftstoß	68
5.5	Newtons 3. Gesetz – Das Wechselwirkungsprinzip.....	70
5.5.1	Formulierung	71
5.5.2	Kraft und Gegenkraft	71
5.5.3	Gegenkraft und Kräftegleichgewicht	72
5.6	Die Kraft als Vektor.....	73
5.7	Messung von Kräften	74
5.8	Aufgaben zu Kapitel 5.....	77

6	Anwendungen der Kraftgesetze	79
6.1	Die Natur der Kräfte	79
6.1.1	Gewichtskraft und Gravitation	79
6.1.2	Reibungskräfte	79
6.1.3	Elastische Unterlagenkraft	83
6.1.4	Die vier Grundkräfte und ihre Erscheinungsformen	84
6.1.5	Aufgaben zu verschiedenen Kräften	85
6.2	Kräfte wirken zusammen: Kräftepläne	87
6.2.1	Aufzug	87
6.2.2	Atwood'sche Fallmaschine	89
6.2.3	Auf der geneigten Ebene	91
6.2.4	Aufgaben zu Kräfteplänen	96
7	Impuls und Impulserhaltung	99
7.1	Der Impuls als vektorielle Bewegungsgröße	99
7.2	Der Impuls als Erhaltungsgröße	100
7.3	Stoßvorgänge	102
7.4	Raketenphysik	107
7.5	Aufgaben	111
8	Arbeit und Energie	113
8.1	Gesellschaftliche Bedeutung der Energie	113
8.2	Formen mechanischer Arbeit	114
8.2.1	Hubarbeit	114
8.2.2	Reibungsarbeit	115
8.2.3	Beschleunigungsarbeit	116
8.2.4	Spannarbeit	117
8.3	Allgemeine Definition der Arbeit	118
8.4	Mechanische Energie	119
8.5	Leistung	123
8.6	Wirkungsgrad	125
8.7	Aufgaben zu Kapitel 8	127
9	Energie- und Impulserhaltungssatz	129
9.1	Die Stoßgesetze	129
9.2	Das ballistische Pendel	133
9.3	Aufgaben zu Kapitel 9	134
	Lösungen	136
	Physikalisches Praktikum	167
	Bildquellenverzeichnis	221
	Sachwortverzeichnis	222

1 Grundlagen

1.1 Aufzeichnung von Bewegungen

Satellitenavigation

Ob Sie als Radfahrer mit der Länge Ihrer zurückliegenden Radtour prahlen, im Auto den Satz „Sie haben Ihr Ziel erreicht“ hören oder als Jogger mit der App Ihre neue Laufstrecke ausmessen, die Prozedur ist immer die gleiche: Sie beginnen Ihre Bewegung im Punkt S (Start) und enden irgendwann im Punkt Z (Ziel).

Die bequemste Art, eine Bewegung aufzuzeichnen, nutzt das GPS (*Global Positioning System*¹⁾). Dabei wird mit Hilfe von mindestens vier Satelliten (drei für die Raumkoordinaten, einem für die Zeit) Ihr momentaner Standort ermittelt und die Route bis zum Ziel als Linie dargestellt (**Bild 1**).



Bild 1: GPS-Track auf dem Smartphone

Das GPS wäre nicht möglich gewesen ohne die Raumfahrt, diese wiederum nicht ohne die Physik – nur ein Beispiel von vielen, wie die Physik als „Wissenschaft von der Struktur und der Bewegung der unbelebten Materie“ (so die Definition im Duden) unseren Alltag beeinflusst.

Stroboskopaufnahmen

Schnelle Vorgänge werden einprägsam als Stroboskopbild (**Bild 2**) dargestellt. Dabei beleuchten spezielle Blitzlampen mit fester Frequenz das sich bewegende Objekt in einem abgedunkelten Raum. Die Folge der Einzelbilder vermittelt den Eindruck von Bewegung.



Bild 2: Stroboskopbild eines Turners am Hochreck

Videoanalyse

Spätestens bei der nächsten Fußballweltmeisterschaft rückt die Videoanalyse wieder ins öffentliche Bewusstsein, wenn Sportkommentatoren die Laufwege der Nationalspieler als gezackte Linien auf dem Spielfeld zeigen. Mit spezieller Software können die Positionsdaten einer Videosequenz ausgelesen werden. Dabei werden die Pixel auf dem Bildschirm in wahre Längen umgerechnet, wenn der Software die wahre Länge einer Referenzstrecke (z. B. bekannte Körpergröße, Breite eines Fensters, realer Maßstab) mitgeteilt wird (**Bild 3**).

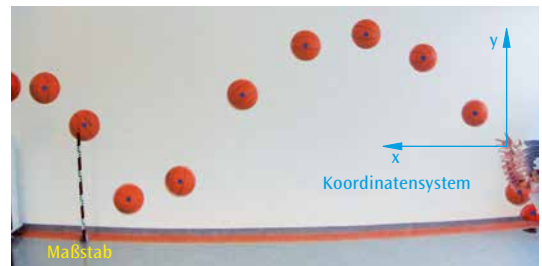


Bild 3: Videoanalyse am Beispiel eines geworfenen Basketballs (aufgenommen mit 6 fps)

Die Bildrate

Ein geflügeltes Wort bei der Videoanalyse ist die Bildrate (engl. *frame rate*). Darunter versteht man den zeitlichen Abstand zweier Einzelbilder einer Videosequenz.

Das menschliche Gehirn ist in der Lage, etwa 20 Bilder pro Sekunde noch als Einzelbilder getrennt wahrzunehmen. Filme werden daher (je nach Format) mit 25 fps oder 30 fps (*frames per second*; zu deutsch: Bilder pro Sekunde, BPS) aufgenommen und abgespielt.



Bild 4: Hochgeschwindigkeitsaufnahme beim Crashtest

Hochgeschwindigkeitsaufnahmen

Bei der Analyse von Crashtests (**Bild 4**) werden Kameras mit extrem kurzer Belichtungszeit eingesetzt, um Hochgeschwindigkeitsaufnahmen mit bis zu

¹⁾ Das russische Pendant zum US-amerikanischen GPS nennt sich GLONASS, das System *Galileo* der Europäischen Union befindet sich derzeit noch im Aufbau.

25 Millionen Bildern pro Sekunde zu machen. Derartige Kameras kommen auch bei der Fehlersuche in schnell ablaufenden Fertigungsprozessen (z. B. in der Verpackungsindustrie) zum Einsatz.

1.2 Geschwindigkeit

Geschwindigkeitsvektor

Bild 1 zeigt das Stroboskopbild eines schwingenden Pendels. In der Nähe der Umkehrpunkte ist das Pendel am langsamsten, in der Nähe des Nulldurchgangs am schnellsten.

Mit *Geschwindigkeit* ist in der Physik nicht nur das *Tempo* gemeint (gemessen in Kilometer pro Stunde oder Meter pro Sekunde), sondern auch die momentane Bewegungsrichtung (**Bild 1**). Formelzeichen für die Geschwindigkeit ist der Buchstabe $\vec{v}$ (lat. *velocitas* oder engl. *velocity*). Der Pfeil über dem Formelzeichen weist auf den Richtungscharakter der Geschwindigkeit hin. In der Mathematik nennt man gerichtete Größen Vektoren. Auch die Kraft $\vec{F}$ ist ein Vektor. Mit Kräften befasst sich Kapitel 5.

Rückwärtsinterpolation

Geschwindigkeit bedeutet Ortsänderung pro Zeiteinheit. Bei konstanter Bildrate der Stroboskopaufnahme verfährt man nach einer Zwei-Punkt-Methode (**Bild 2**):

Zwei Punkte A und B der Bahnkurve werden geradlinig verbunden (Ortsänderung; grüne Linie). Diese Verbindungslinie wird über den Punkt B hinaus verschoben, und man erhält die Geschwindigkeit $\vec{v}_B$ (roter Pfeil) im Punkt B der Bahn.

Zur Konstruktion von $\vec{v}_A$, muss der Bahnpunkt *vor* A bekannt sein. Man spricht daher von *Rückwärtsinterpolation*.

Vorwärtsinterpolation

Die *Vorwärtsinterpolation* (**Bild 3**) ist zwar intuitiver, jedoch muss bei Konstruktion von $\vec{v}_A$ der auf A folgende Bahnpunkt bekannt sein. Vorwärtsinterpolation ist also nur möglich, wenn die Bahnkurve bereits bekannt ist – ein Nachteil, wenn Bahnkurven wie im Fall von Kurskorrekturen in der Raumfahrt aus zeitlich zurückliegenden Informationen berechnet werden müssen.

Man kann sich leicht klarmachen, dass es keinen Unterschied zwischen Vorwärts- und Rückwärtsinterpolation mehr gibt, wenn die einzelnen Punkte der Bahnkurve sehr dicht beieinander liegen.

Tempomessung mit Stroboskopaufnahme

Die Länge der Geschwindigkeitspfeile ist ein Maß für das Tempo in den entsprechenden Punkten. Will man einen Wert angeben, dann muss die Bildrate bekannt sein.

Beispiel (Tempobestimmung):

Bei einer Bildrate von 25 fps beträgt der zeitliche Abstand zweier Einzelbilder $\Delta t = \frac{1}{25} \text{ s} = 0,040 \text{ s} = 40 \text{ ms}$ (Millisekunden), also entspricht einem Meter im Bild ein Tempo von

$$v = \frac{\text{Weg}}{\text{Zeit}} = \frac{1 \text{ m}}{0,040 \text{ s}} = 25 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Bei der Angabe des Tempos lässt man den Pfeil über dem Formelzeichen $\vec{v}$ weg und spricht vom Betrag $v = |\vec{v}|$ der Geschwindigkeit.

Tempomessung ohne Stroboskopaufnahme

Auch ohne Stroboskopaufnahme lässt sich das Tempo v bestimmen. Hierfür steckt man mit dem Maßstab einfach eine bestimmte Strecke Δs ab und misst die Zeitspanne Δt , die zum Zurücklegen dieser Strecke benötigt wird.

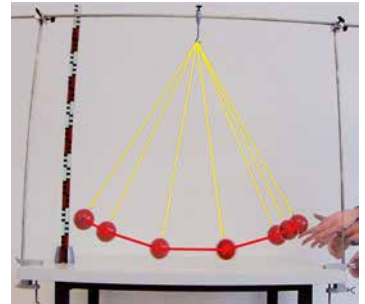


Bild 1: Geschwindigkeitsvektoren stellen Ortsänderungen dar

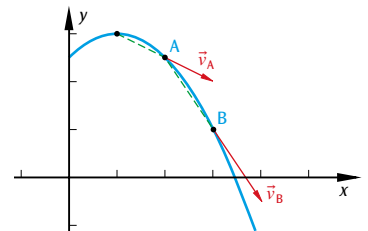


Bild 2: Konstruktion von $\vec{v}$ durch Rückwärtsinterpolation

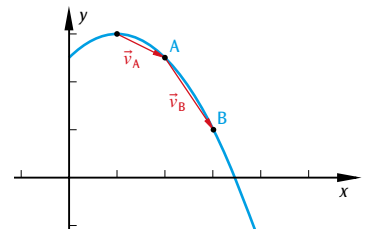


Bild 3: Intuitive Konstruktion von $\vec{v}$ durch Vorwärtsinterpolation

Beispiel (Tempobestimmung):

Legt ein 100-Meter-Läufer einen 10-Meter-Abschnitt in 3,45 s zurück, dann beträgt sein Tempo auf diesem Abschnitt

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{10 \text{ m}}{3,45 \text{ s}} = 2,9 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Merke: Die Geschwindigkeit $\vec{v}$ ist ein Vektor, der in Richtung der Tangente an die Bahnkurve der Bewegung zeigt.

Bei geradliniger Bewegung gilt $v = \frac{\text{Weg}}{\text{Zeit}} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$.

Es ist klar, dass die Beziehung $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ nur einen *durchschnittlichen* Geschwindigkeitswert liefert. Dieser nähert sich umso genauer dem *momentanen* Wert an, je kürzer das gemessene Zeitintervall Δt ist. In Abschnitt 3.1 gehen wir näher darauf ein.

Typische Geschwindigkeiten

Tabelle 1 zeigt einige typische Geschwindigkeiten. Dabei stellt die Lichtgeschwindigkeit c im Vakuum die obere Grenze dar. Dies ist eine der Aussagen der Relativitätstheorie Albert Einsteins. Der seltsam anmutende Wert resultiert aus der Tatsache, dass die Lichtgeschwindigkeit lange als *Messwert* galt. Mit der Konstruktion immer genauerer Uhren war man irgendwann in der Lage Zeiten genauer zu messen als Längen, und definiert seit 1983 die Einheit Meter aus dem bis dato genauesten Messwert für die Lichtgeschwindigkeit. Weitere Informationen zum Thema Einheiten finden Sie in Abschnitt 1.4.

Wie tückisch der Begriff der *Durchschnittsgeschwindigkeit* ist, zeigt folgendes

Tabelle 1: Einige typische Geschwindigkeiten

Fingernagel	0,2 bis 0,5 mm/Woche
Weinbergschnecke	ca. 3 $\frac{\text{m}}{\text{h}}$
Fußgänger	ca. 5 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$
Weltklasesprinter	bis 12 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Gepard	bis 110 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$
Richtgeschwindigkeit auf deutschen Autobahnen	130 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$
ICE 3 der deutschen Bahn	bis 300 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$
Wanderfalke im Sturzflug	320 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$
Verkehrsflugzeug	860 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$
Schall in Luft (Mach 1)	ca. 340 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Gewehrku gel	800 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Schall in Wasser	1500 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Licht im Vakuum	299 792 458 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

Aufgabenbeispiel (Durchschnittsgeschwindigkeit)

Frau Müller fährt die erste Hälfte einer 600 km langen Strecke mit 100 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$, die zweite Hälfte mit 150 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$. Wie groß ist ihre Durchschnittsgeschwindigkeit?

Lösung:

Für die erste Hälfte (600 km : 2 = 300 km) der Strecke benötigt Frau Müller mit 100 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ genau 3 h, für die zweite Hälfte nur 2 h.

Insgesamt benötigt sie also 5 h für die 600 km lange Strecke, ihre Durchschnittsgeschwindigkeit beträgt demnach $\bar{v} = \frac{600 \text{ km}}{5 \text{ h}} = 120 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Dies ist *nicht* das arithmetische Mittel (100 + 150) : 2 = 125, weil Frau Müller für die erste Hälfte der Strecke sehr viel länger braucht als für die zweite.

Selbst wenn Frau Müller auf der zweiten Streckenhälfte mit 200 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ unterwegs wäre, würde ihre Durchschnittsgeschwindigkeit nur auf $\bar{v} = \frac{600 \text{ km}}{3 \text{ h} + 1,5 \text{ h}} = 133 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ steigen – und nicht auf das arithmetische Mittel (150 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$).

Umrechnen von Einheiten

Im Straßenverkehr ist die Angabe Kilometer pro Stunde (km/h) üblich, bei vielen anderen Bewegungsvorgängen sind Meter pro Sekunde (m/s) die günstigere Einheit. Wie wird umgerechnet?

Beispiel (Einheitenumrechnung)

Umrechnung von $130 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ (Richtwert auf deutschen Autobahnen) in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Lösung (ausführlich):

$$130 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 130 \cdot \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = 130 \cdot \frac{1}{3,6} \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ = \frac{130}{3,6} \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 36,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Eine Kurzfassung dieser sehr wichtigen Umrechnung steht im Kasten rechts. Bitte gut einprägen!

Regel: $\frac{\text{km}}{\text{h}} \xrightarrow{\cdot 3,6} \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Beispiele:

$$72 \frac{\text{km}}{\text{h}} = \frac{72}{3,6} \frac{\text{m}}{\text{s}} = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$30 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 30 \cdot 3,6 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 108 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Aufgabenbeispiel (Tachometeruhr)

Auf dem äußeren Rand der abgebildeten Armbanduhr (**Bild 1**) befindet sich eine Tachometer-Skala. Wie funktioniert dieser Tacho?

Lösung:

Beim Starten der Uhr läuft der große rote Zeiger. Man stoppt damit die Zeit, die man zum Zurücklegen der festen Strecke $1 \text{ km} = 1000 \text{ m}$ benötigt.

Wenn der Zeiger z. B. bei 30 s stehen bleibt, beträgt die Geschwindigkeit

$$v = \frac{1 \text{ km}}{30 \text{ s}} = \frac{1 \text{ km}}{\frac{1}{2} \text{ min}} = 2 \frac{\text{km}}{\text{min}} = 120 \frac{\text{km}}{\text{h}}.$$

Dieser Wert ist identisch mit dem Aufdruck auf „6 Uhr“. Bei halber Zeit („3 Uhr“) wäre die Geschwindigkeit doppelt so groß ($240 \frac{\text{km}}{\text{h}}$), bei doppelter Zeit („12 Uhr“) halb so groß ($60 \frac{\text{km}}{\text{h}}$).



Bild 1: Armbanduhr mit Tachometer-Skala (goldene Skala am Außenrand)

Aufgabenbeispiel (Zeitersparnis)

Zwei Familien fahren mit ihren Autos in den Urlaub. Auf der Autobahn sind sie mit durchschnittlich $120 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ bzw. $150 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ unterwegs. Wie lang ist die Strecke, wenn die schnellere Familie 5 min früher am Ziel ankommt?

Lösung:

Beide Familien fahren dieselbe Strecke s , aber mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten $v_1 = 120 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ und $v_2 = 150 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Dafür benötigen sie die Zeiten $t_1 = \frac{s}{v_1}$ und $t_2 = \frac{s}{v_2}$. Für die Zeitersparnis $t_1 - t_2$ muss gelten:

$$t_1 - t_2 = 5 \text{ min} \Leftrightarrow \frac{s}{v_1} - \frac{s}{v_2} = 5 \text{ min} \Leftrightarrow s \cdot \left(\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \right) = 5 \text{ min} \\ \Rightarrow s = \frac{5 \text{ min}}{\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2}} = \frac{(1/12) \text{ h}}{\frac{1}{120 \text{ km}} - \frac{1}{150 \text{ km}}} = 50 \text{ km}.$$

Genauigkeit physikalischer Größen

Das Alter unserer Erde (**Bild 1**, folgende Seite) wird auf 4,55 Milliarden Jahre geschätzt (ausgeschrieben: 4 550 000 000 Jahre). Niemand wird auf die Idee kommen, nächstes Jahr das Erdalter mit 4 550 000 001 Jahren anzugeben. Warum?

Ganz einfach: Die Angabe einer physikalischen Größe beinhaltet drei Informationen:

1. Zahlenwert (hier: 4,55 Mrd),
2. Genauigkeit (hier: $\pm 0,005$ Mrd),
3. Einheit (hier: Jahre; Abk. a für *annus*).

Die Unsicherheit bei der Altersangabe beträgt im Beispiel $\pm 0,005$ Mrd = ± 5 Mio Jahre. Es wird also noch eine Weile dauern, ehe das Erdalter mit 4,56 Mrd Jahren angegeben wird (vorbehaltlich neuer geologischer Erkenntnisse). Sehr große und sehr kleine Werte werden zudem als Gleitkommazahlen geschrieben, also $4,55 \cdot 10^9$ a, weil es im englischen Sprachraum keine „*milliard*“ gibt, sondern die „*billion*“ (1000 Millionen) folgt. Dies führt in der Presse manchmal zu Übersetzungsfehlern.



Bild 1: Unsere Erde

Gültige Ziffern

Bei einer zusammengesetzten physikalischen Größe wie der Geschwindigkeit dürfen bei Division der Werte für Weg und Zeit nicht einfach alle Stellen vom Taschenrechner abgeschrieben werden. Diese Genauigkeitsangabe wäre sinnlos. Man bedient sich vielmehr des Konzepts der gültigen Ziffern. Dabei handelt es sich um eine Vereinfachung der Fehlerrechnung, die im physikalischen Praktikum ausführlicher beschrieben wird. Gültige Ziffern (g.Z.) dürfen nicht mit Dezimalstellen (Dez) verwechselt werden (**Tabelle 1**). Mit gültigen Ziffern bezeichnet man vielmehr die Anzahl der Stellen *ohne* „führende Null(en)“.

Tabelle 1: Gültige Ziffern (g.Z.) und Dezimalen (Dez) im Vergleich

Angabe	g.Z.	Dez
70 m	2	0
70,0 m	3	1
0,07 km	1	2
0,070 km	2	3

Identisch sind zwei Größen demnach nur dann, wenn sie neben dem Zahlenwert auch in der Anzahl gültiger Ziffern übereinstimmen, also $70 \text{ m} \neq 0,07 \text{ km}$, aber $70 \text{ m} = 0,070 \text{ km}$. Nach dieser Regel sind in **Tabelle 1** nur die Werte in der ersten und letzten Zeile identisch.

Merke: Bei einer zusammengesetzten Rechnung (Produkt und Quotient) darf das Ergebnis nur mit so vielen gültigen Ziffern angegeben werden wie die am *ungenauesten* gemessene Größe.

Beispiel (Genauigkeit)

Eine 100 m lange Strecke wird in 15,80 s zurückgelegt. Gesucht ist die durchschnittliche Geschwindigkeit.

Lösung:

Laut Taschenrechner ist

$$v = \frac{s}{t} = \frac{100 \text{ m}}{15,80 \text{ s}} = 6,329\,113 \dots \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Die vielen Nachkommastellen sind natürlich Unsinn: Die ungenaueste Angabe hat drei gültige Ziffern (g.Z.). Deshalb darf das Ergebnis ebenfalls nur 3 g.Z. haben, also ist $v = 6,33 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Eine noch genauere Messung der Zeit ist nicht sinnvoll, solange die Strecke nicht genauer vermessen wurde. Die Längen von Tartanbahnen sind bei Meisterschaften auf cm genau vermessen¹⁾, also lohnt es sich, Sprintzeiten auf 0,01 s genau anzugeben – natürlich nicht bei Handmessungen.

Kurzfassung:

$$s = 100 \text{ m (3 g.Z.)}$$

$$t = 15,80 \text{ s (4 g.Z.)}$$

$$v = \frac{s}{t}$$

$$v = \frac{100 \text{ m}}{15,80 \text{ s}}$$

$$v = 6,33 \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ (3 g.Z.)}$$

¹⁾ Das sind 100,00 m, also fünf gültige Ziffern!

Bezugssysteme

Als Fußgänger sind Sie vielleicht mit $5 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ unterwegs. Künstlich schneller oder langsamer werden Sie, wenn Sie ein Laufband betreten.

Bewegung in Fahrtrichtung (Bild 1a)

Die Unterlage bewegt sich mit der Geschwindigkeit $\vec{v}_2$ nach vorne. Ein neben dem Laufband stehender Beobachter hat das Gefühl, Sie würden sich mit der Geschwindigkeit $\vec{v}_{\text{res}} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$ (resultierende Geschwindigkeit) nach vorne bewegen. Ihre eigene Geschwindigkeit $\vec{v}_1$ wird dabei als Relativgeschwindigkeit (nämlich relativ zum Laufband) bezeichnet.

Bewegung gegen die Fahrtrichtung (Bild 1b)

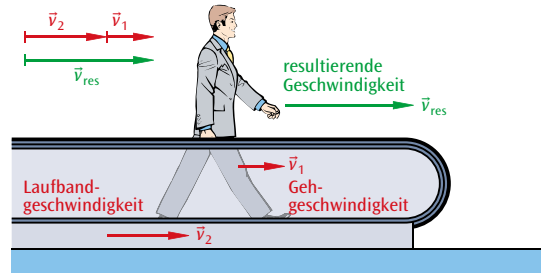
Wenn Sie sich mit genau der Geschwindigkeit $\vec{v}_2$ des Laufbandes entgegen der Fahrtrichtung bewegen, bleiben Sie – von außen betrachtet – scheinbar stehen, weil sich die resultierende Geschwindigkeit dann als Differenz $\vec{v}_{\text{res}} = \vec{v}_1 - \vec{v}_2$ ergibt. Sie müssen also schneller sein als das Laufband, um vorwärts zu kommen. Sonst ist Ihre Geschwindigkeit „negativ“.

Merke: Ob und gegebenenfalls welche Art von Bewegung vorliegt, ist eine Frage des Bezugssystems: Zwei verschiedene Beobachter kommen nicht zwingend zur gleichen Beschreibung ein und desselben Vorgangs.

Umgangssprachlich würde man den Begriff Bezugssystem mit Standpunkt oder „Blickwinkel“ (im Sinne von *point of view*) übersetzen.

Beispiel: Sie überholen mit $130 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ einen $90 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ schnellen LKW. Im „Bezugssystem LKW“ haben Sie dann eine Geschwindigkeit von $40 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Oder Sie argumentieren: Im „Bezugssystem PKW“ (also in ihrem eigenen Bezugssystem) hat der LKW eine Geschwindigkeit von $-40 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, weil er auf Sie zukommt. Beide Formulierungen sind richtig.

a) Gehen in Laufbandrichtung



b) Gehen gegen die Laufbandrichtung

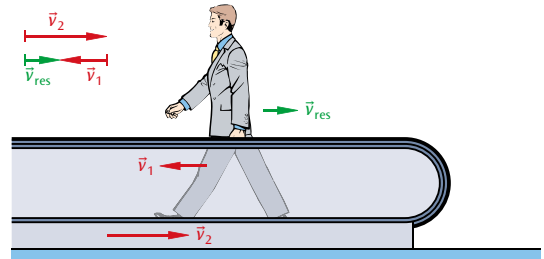


Bild 1: Bewegung auf dem Laufband: (a) in Fahrtrichtung; (b) gegen die Fahrtrichtung

1.3 Geschwindigkeitsänderung und Beschleunigung

Beschleunigung

Sobald sich die Geschwindigkeit ändert, spricht man von einer beschleunigten Bewegung. In der Physik hat die Beschleunigung eine etwas gewöhnungsbedürftige Einheit, die man am ehesten versteht, wenn man die Bewegung einer Tachonadel beobachtet (**Bild 2**): Beschleunigung bedeutet Geschwindigkeitsänderung pro Zeiteinheit, mit Bezug zur Tachonadel in **Bild 2a** also

$$\frac{(190 - 90) \text{ km/h}}{13 \text{ s}} = 7,7 \frac{\text{km/h}}{\text{s}},$$

in **Bild 2b**

$$\frac{(50 - 0) \text{ km/h}}{6,2 \text{ s}} = 8,1 \frac{\text{km/h}}{\text{s}}.$$

Der untere Fahrer beschleunigt also tatsächlich mehr! Dass der obere Fahrer stärker aufs Gaspedal treten muss, um Fahr- und Luftwiderstand zu überwinden, steht auf einem anderen Blatt.



Bild 2: Wer beschleunigt mehr?

Definition der Beschleunigung

Bei einer geradlinigen Bewegung definiert man die Beschleunigung a (engl. *acceleration*, ursprünglich aus dem Lateinischen *accelerare*) als Quotient aus Geschwindigkeitsänderung und Zeitraum, in dem diese Änderung stattfindet (**Bild 1**), also

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}.$$

Die SI-Einheit der Beschleunigung ist

$$[a] = \frac{1 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1 \text{s}} = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2},$$

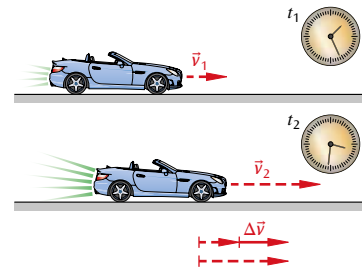


Bild 1: Zur Definition der Beschleunigung

gesprochen als „Meter pro Sekunde-Quadrat“. Dabei wird nicht behauptet, dass es eine Quadratsekunde gibt, vielmehr gilt:

Merke: Eine Beschleunigung von $1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ bedeutet, dass die Momentangeschwindigkeit sich um $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ in jeder Sekunde ändert.

Die beiden PKW in **Bild 2** auf der vorigen Seite erzielen im SI-System also die Beschleunigungen

$$a_1 = \frac{(100/3,6) \text{ m/s}}{13 \text{ s}} = 2,1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad \text{bzw.} \quad a_2 = \frac{(50/3,6) \text{ m/s}}{6,2 \text{ s}} = 2,2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}.$$

Negative Beschleunigung

Aus der Definition $a = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$ der Beschleunigung folgt, dass a auch negativ sein kann. In diesem Fall spricht man von anstelle von Beschleunigung auch von Verzögerung. Der Bremsvorgang (**Bild 2**) ist ein Beispiel für eine verzögerte Bewegung.

Beschleunigungsvektor

Im Allgemeinen ist eine Beschleunigung weder positiv noch negativ, sondern wie die Geschwindigkeit $\vec{v}$ als Vektor aufzufassen. Um den Vektor $\vec{a}$ konstruieren zu können, werden zwei Geschwindigkeitsvektoren und folglich mindestens drei Punkte benötigt (**Bild 3**): Im Bahnpunkt B werden sowohl die Geschwindigkeitsvektoren $\vec{v}_A$ (als Hilfslinie; schwarz gestrichelt) als auch $\vec{v}_B$ eingetragen. Daraus wird die Geschwindigkeitsdifferenz $\Delta \vec{v}$ konstruiert und schließlich parallel zum Punkt B verschoben. Das Ergebnis ist der Vektor $\vec{a}_B$ in **Bild 3**. Bei Vorliegen einer Stroboskopaufnahme verfährt man in analoger Weise mit weiteren Punkten der Bahnkurve.

Merke: Die Beschleunigung $\vec{a}$ ist ein Vektor, dessen Richtung identisch mit der Geschwindigkeitsänderung $\Delta \vec{v}$ ist. Bei geradliniger Bewegung gilt $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ mit der Einheit $1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

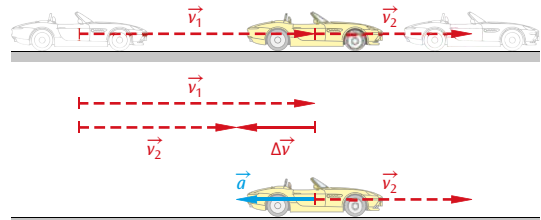


Bild 2: Fahrzeug beim Bremsen: die Beschleunigung ist rückwärts gerichtet und damit negativ

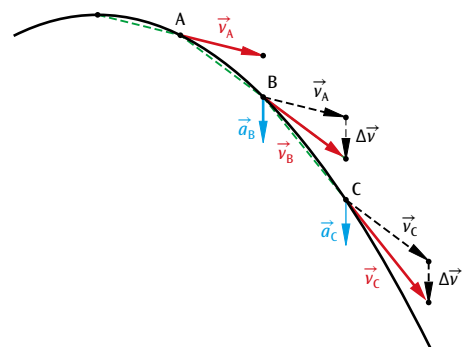


Bild 3: Beschleunigung $\vec{a}$ als Vektor (Erläuterungen im Text)

In Kapitel 5 lernen Sie, dass jede Geschwindigkeitsänderung $\Delta \vec{v}$ und damit jede Beschleunigung $\vec{a}$ immer die Folge einer Kräfteinwirkung ist. Mehr noch: Wenn alle auf einen Körper einwirkenden Kräfte bekannt sind, dann lässt sich die Bahnkurve konstruieren. Zu dieser Erkenntnis waren die Physiker schon vor 300 Jahren gelangt. Ohne sie wäre zum Beispiel die Raumfahrt unmöglich.

1.4 Exkurs: SI-System

Die wohl gebräuchlichsten physikalischen Einheiten sind der Meter¹⁾ und die Sekunde. Beim Einkaufen begegnet uns außerdem das Kilogramm (oder Gramm), beim Tanken der Liter. Im Hochsommer oder tiefsten Winter dominiert das Grad Celsius das Tagesgespräch.

So kommt recht schnell eine scheinbar endlose Liste an Einheiten zusammen. Um nicht den Überblick zu verlieren, teilt man die Einheiten in *Basiseinheiten* und *abgeleitete Einheiten* ein. So ist zum Beispiel der Meter (1 m) eine Basiseinheit, nicht jedoch der Liter, da er sich als dritte Potenz einer Länge schreiben lässt ($1\text{ l} = 1\text{ dm}^3 = 10^{-3}\text{ m}^3$).

Urmeter

Im mittelalterlichen Europa hatte jedes Land, zuweilen jede Stadt, sein eigenes Einheitensystem. Erst die Franzosen bereiteten dem Treiben in den letzten Jahren des 18. Jahrhunderts ein Ende: Während der französischen Revolution beschloss die Nationalversammlung, eine vermeintlich unveränderliche Größe zur Definition der Länge heranzuziehen: den Erdumfang. Entlang des Meridians von Dünkirchen im Norden Frankreichs bis Rodez im Süden wurden zahllose Winkel gemessen und daraus ein Längennormal hergestellt, das genau dem 10-millionsten Teil der Länge eines Erdquadranten entsprechen sollte. Dieses Längennormal wurde als **Urmeter (Bild 1)** bezeichnet und war bis 1883 gültig.

Urkilogramm

Die nächste Einheit, die von der französischen Nationalversammlung festgelegt wurde, war das Urkilogramm (**Bild 1**) als die Masse, die $1\text{ dm}^3 = \frac{1}{1000}\text{ m}^3$ Wasser am Punkt seiner größten Dichte (bei $3,98\text{ }^\circ\text{C}$) hat.

Sekunde

Die nächste festgelegte Einheit war die Sekunde als 86400-ster Teil des mittleren Sonnentages ($60 \cdot 60 \cdot 24 = 86400$). Dieser Zeitraum ergibt sich aus dem Abstand zweier Sonnenhöchststände, die durch Schattenwurf festgestellt werden: Ein in den Boden gesteckter Stab wirft zum Zeitpunkt 12 Uhr den kürzesten Schatten (**Bild 2**).

Mit der Entwicklung immer präziserer mechanischer Pendeluhren konnte gezeigt werden, dass der Sonnentag im Laufe eines Jahres Schwankungen von bis zu $\pm 30\text{ s}$ unterliegt. Heute weiß man, dass dies eine Folge der mehr oder weniger unregelmäßigen Bewegung der Erde um die Sonne ist.

Mitte des 19. Jahrhunderts verabschiedete man sich von der astronomischen Definition der Sekunde und legte das Zeitnormal über die mechanische Schwingung von Quarzen fest. Diese Quarzuhren wurden Mitte der 1950-er Jahre durch die sehr viel genaueren Cäsium-Atomuhren ersetzt.

Nachdem Durchbrüche auf den Gebieten der Wärmelehre, des Elektromagnetismus, der physikalischen Chemie und der Lichttechnik zu verzeichnen waren, gesellten sich zu den mechanischen Einheiten (Meter, Kilogramm, Sekunde – kurz: MKS) vier weitere Einheiten, so dass man heute genau sieben Basiseinheiten (nicht mehr und nicht weniger!) zählt.



Bild 1: Kopien des Urmeters und des Urkilogramms



Bild 2: Sonnenuhr

¹⁾ früher in der Fachsprache auch *das* Meter

Die sieben SI-Einheiten

Anstelle von Basiseinheiten spricht man seit 1960 auch von SI-Einheiten (Tabelle 1). Die Abkürzung steht für système international d'unités (internationales Einheitensystem). Wortlaute der Definitionen können einer Formelsammlung entnommen werden. Hier werden nur kurz die Grundlagen der Definition genannt.

Länge: Ein Meter (1 m) ist die Strecke, die das Licht im Vakuum innerhalb des 299 792 458-sten Teils einer Sekunde zurücklegt.

Masse: Ein Kilogramm (1 kg) ist die Masse des internationalen Kilogramm-Prototyps. Diese Festlegung aus dem Jahr 1799 ist bis heute gültig und stellt damit die älteste Einheitsdefinition dar. Allerdings gibt es Bestrebungen, diese Definition zu ändern (s. weiter unten).

Zeit: Eine Sekunde (1 s) leitet sich aus der Periodendauer einer bestimmten Strahlung ab, die bei Atomuhren genutzt wird.

Elektrische Stromstärke: Ein Ampere (1 A; nach André Marie Ampère) leitet sich aus der magnetischen Kraftwirkung des elektrischen Stromes ab.

Temperatur: Ein Kelvin (1 K; nach Lord Kelvin) leitet sich aus dem Drei-Phasen-Gleichgewicht (Tripelpunkt) des Wassers ab.

Stoffmenge: Ein Mol (1 mol) leitet sich aus der Teilchenzahl des häufigsten Kohlenstoff-Isotops ab.

Lichtstärke: Eine Candela (1 cd) leitet sich aus den Eigenschaften eines so genannten Schwarzen Strahlers ab.

Während die eine oder andere Definition auch für den Laien nachvollziehbar ist, erfordert das Verstehen der übrigen profunde physikalische Kenntnisse, von denen Sie einige erst im Laufe der 13. Jahrgangsstufe oder im Studium erwerben.

Das neue SI

Im Mai 2019 wurde das SI-System reformiert und durch das neue SI ersetzt: Die Idee besteht darin, die Naturkonstanten, die den Festlegungen der Einheiten zugrunde liegen, als exakte Werte zu definieren (**Bild 1** und Umschlagseite des Buches). Dies war bereits bei der Lichtgeschwindigkeit der Fall. Damit wird auch das Urkilogramm abgeschafft. Die Öffentlichkeit wird davon jedoch nicht viel mitbekommen, weil sich im Alltag nichts ändern wird.

Wenn Sie sich noch mehr für das SI-System interessieren, besuchen Sie den Web-Auftritt der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig. Sie hält zahlreiche kostenlose Infobroschüren bereit.

Tabelle 1: Größen und Einheiten des SI

Größe	Einheit	Abk.
Länge	Meter	m
Masse	Kilogramm	kg
Zeit	Sekunde	s
Stromstärke	Ampere	A
Temperatur	Kelvin	K
Stoffmenge	Mol	mol
Lichtstärke	Candela	cd



Bild 1: Konzept hinter dem neuen SI

1.5 Aufgaben zum Kapitel Grundlagen

1.5.1 Aufgaben zum Umrechnen von Einheiten

Verwandeln Sie in die in Klammern stehende Einheit. Achten Sie auch auf die Einhaltung gültiger Ziffern.

- | | | |
|---------------------------------------|---|--|
| 1. 800 μg (mg) | 8. 180 d (a) | 15. $(20 \text{ mm})^2 \cdot 20 \text{ cm}$ (m^3) |
| 2. 16 g (kg) | 9. 60 μm (m) | 16. $7,41 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ (nm) |
| 3. 3,90 h (min) | 10. 1000 m^3 (km^3) | 17. $\frac{4}{3} \cdot (6370 \text{ km})^3 \cdot \pi$ (m^3) |
| 4. $242 \cdot 10^3 \text{ s}$ (d) | 11. 2000 cm^2 (m^2) | 18. $\frac{100 \text{ m}}{9,53 \text{ s}}$ ($\frac{\text{km}}{\text{h}}$) |
| 5. 186 km^2 (m^2) | 12. $9,0 \cdot 10^{-5} \text{ kg}$ (g) | 19. $299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 8,3 \text{ min}$ (km) |
| 6. 150 cm^3 (Liter) | 13. 0,020 A (mA) | 20. $\frac{42,195 \text{ km}}{2 \text{ h } 3 \text{ min } 38 \text{ s}}$ ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$) |
| 7. 1,00 a (s) | 14. 20 μg (kg) | |

1.5.2 Aufgaben zum Auflösen von Formeln

Lösen Sie nach der (die) angegebenen Größe(n) auf.

- | | |
|---|--|
| 1. $v = \frac{s}{t}$ nach s und t | 6. $v^2 - v_0^2 = 2 \cdot a \cdot s$ nach v und a |
| 2. $D = \frac{F}{s}$ nach F und s | 7. $m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ nach v |
| 3. $A = r^2 \pi$ nach r | 8. $m \cdot g \cdot \sin(\alpha) = \mu \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha)$ nach α |
| 4. $E = \frac{1}{2} \cdot m v^2$ nach v | 9. $V = \frac{4}{3} r^3 \pi$ nach r |
| 5. $h = \frac{1}{2} g \cdot t^2$ nach t | 10. $\frac{T_1^2}{a_1^3} = \frac{T_2^2}{a_2^3}$ nach T_2 und a_2 |

1.5.3 Aufgaben zu Geschwindigkeit und Beschleunigung

1. Einheitenumrechnung

(a) Miles per hour (mph)

In vielen englischsprachigen Ländern werden Geschwindigkeiten in Meilen pro Stunde (mph) angegeben. Dabei beträgt die (Land-)Meile 1 mile $\approx 1,609 \text{ km}$.¹⁾

(b) Knoten (kn)

In See- und Luftfahrt ist die Einheit Knoten (kn) üblich. Dabei entspricht 1 kn einer Seemeile (1 sm = 1,852 km) pro Stunde.²⁾

Rechnen Sie 1 mph und 1 kn jeweils in km/h und m/s um.

¹⁾ Die (Land-)Meile ist ein nicht metrisches Maß mit 1 mile = 1760 yd (Yard); 1 yd = 3 ft (Fuß, engl. foot); 1 ft = 12 in (Zoll, engl. inch); 1 in = 1" = 2,54 cm.

²⁾ Die Seemeile ist definiert als diejenige Bogenlänge auf der Erdoberfläche, die zu einem Mittelpunktswinkel von einer Bogenminute $1' = \left(\frac{1}{60}\right)^\circ$ gehört.

2. Tachometeruhr

Berechnen Sie auf ganze Grad genau, wo auf der Tachometeruhr (**Bild 1**, S. 10) der Aufdruck „130“ stehen müsste.

3. Auto

Ein Auto benötigt 11,5 min für eine 18,4 km lange Strecke.

- Berechnen Sie die durchschnittliche Geschwindigkeit.
- Welchen Weg legt das Auto innerhalb von vier Minuten zurück?
- In welcher Zeit wird eine 20 km lange Strecke zurückgelegt?

4. Flugzeug

Ein Airbus A 380 mit einer durchschnittlichen Reisegeschwindigkeit von $945 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ verkehrt auf der 6500 km langen Strecke von München nach New York.

- Berechnen Sie die voraussichtliche Flugdauer.
- Die tatsächliche Flugdauer betrug 7:15 h. Berechnen Sie die Windgeschwindigkeit (reinen Gegenwind vorausgesetzt).
- Wie lange würde der Rückflug bei gleichen Windverhältnissen dauern?

5. Bewegung der Erde

Die Erde benötigt ein Jahr (ca. 365,25 Tage) für ihren Umlauf um die Sonne. Gleichzeitig rotiert die Erde innerhalb eines Tages um ihre eigene Achse. Berechnen Sie

- die Bahngeschwindigkeit der Erde um die Sonne,
- die Geschwindigkeit eines Ortes auf dem Äquator bei seiner Rotation um die Erdachse,
- die Zeit, die das Licht der Sonne zu uns benötigt.

Daten: Entfernung zwischen Erde und Sonne: ca. 150 Mio km; Erdumfang: ca. 40 000 km; Lichtgeschwindigkeit: ca. $300\,000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$

6. Pace¹⁾

Im Laufsport werden keine Geschwindigkeiten angegeben, sondern die Laufleistung (Pace) als Zeit, die zum Zurücklegen eines Kilometers benötigt wird. Eine Pace von 5:20 min bedeutet zum Beispiel, dass der Läufer für einen Kilometer 5 min 20 s benötigt.

- Rechnen Sie o.g. Pace in km/h und m/s um. In welcher Zeit würde der Läufer ein 10-km-Rennen absolvieren?
- Berechnen Sie die Pace des aktuellen Weltrekordhalters im Marathon.
- Zwei Läufer mit einer Pace von 5:00 min/km bzw. 5:20 min/km treten auf der 400-m-Tartanbahn gegeneinander an. Wann und wo wird der langsamere Läufer erstmals vom schnelleren überrundet?

7. 100-Meter-Sprint

Bei der Leichtathletik-Weltmeisterschaft 2009 in Berlin stellte Usain Bolt mit 9,58 s über 100 m einen neuen Weltrekord auf und war damit 0,13 s besser als Tyson Gay (**Tabelle 1**).

Tabelle 1: Durchgangszeiten der beiden Spitzenläufer auf den 20-m-Abschnitten (RZ = Reaktionszeit) bei der Leichtathletik-Weltmeisterschaft 2009

Platz	Läufer	RZ	20 m	40 m	60 m	80 m	100 m
1	Usain Bolt	0,146	2,89	4,64	6,31	7,92	9,58
2	Tyson Gay	0,144	2,92	4,70	6,39	8,02	9,71

- Berechnen Sie die durchschnittlichen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen beider Läufer auf den 20-m-Abschnitten. Gehen Sie auch auf die Reaktionszeiten ein.
- Die Medien sprechen von einer Spitzengeschwindigkeit Usain Bolts von $44,72 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Nehmen Sie begründet Stellung zu diesem Wert.

¹⁾ lies: pe:s (engl.)

8. Beschleunigung

Berechnen Sie die Beschleunigungswerte bei folgenden Vorgängen:

- Ein PKW beschleunigt von 0 auf 100 km/h in 9,8 Sekunden.
- Ein LKW bremst aus 90 km/h innerhalb von 4,0 Sekunden in den Stand.
- Ein Flummi prallt mit $20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ gegen eine Wand und wird ideal reflektiert. Die Kontaktdauer mit der Wand beträgt etwa 40 ms. Diskutieren Sie die Brauchbarkeit dieses Beschleunigungswertes.

9. Beschleunigungsvektor

Bild 1 zeigt idealisiert die Stroboskopaufnahme eines Körpers.

- Übertragen Sie **Bild 1** in Ihr Heft und bestimmen Sie durch Konstruktion die Geschwindigkeitsvektoren $\vec{v}_A$, $\vec{v}_B$ und $\vec{v}_C$ und daraus die Beschleunigungsvektoren $\vec{a}_A$ und $\vec{a}_B$.
- Ermitteln Sie die Beträge der Vektoren unter Berücksichtigung der Bildrate und des Gitterabstandes.

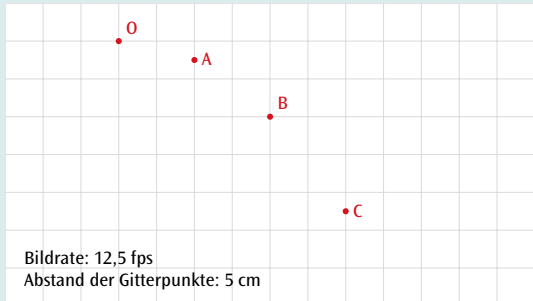


Bild 1: Zu Aufgabe 9

2 Lineare gleichförmige Bewegung

2.1 Diagramme der gleichförmigen Bewegung

Ein ungleicher Wettkampf?!

Anna und Bernd tragen einen Wettkampf aus, bei dem sie beide zuerst laufen und anschließend Rad fahren müssen (**Bild 1**). Dabei muss jeder die Gesamtstrecke von 20 km bewältigen. Obwohl Anna sowohl die langsamere Läuferin (12 km/h bzw. 15 km/h) als auch Radfahrerin (18 km/h bzw. 24 km/h) ist, kommt sie bereits nach 70 min ins Ziel, wohingegen Bernd ganze 77 min benötigt.

Wie kann das sein?

Lösung (Rechnung ist relativ aufwändig!)

Die Frage lässt sich mit Hilfe eines Diagramms leicht beantworten: Auf der Rechtswertachse wird die Zeit t , auf der Hochwertachse der Ort x aufgetragen. Wählt man den Startpunkt als Ursprung eines Koordinatensystems, dann liegt der Zielpunkt bei $x = 20$ km.

Anna benötigt nun 70 min, um die 20 km zurückzulegen („Ziel“ in **Bild 2**). Beim Laufen ist sie 12 km/h schnell, schafft also 12 km in 60 min (rote Pfeile). Mit Laufen allein würde sie die 20 km also nicht in 70 min bewältigen, deshalb muss sie irgendwann unterwegs aufs Rad steigen.

Rechnet man vom Zielpunkt zurück, dann radelt Anna mit 18 km/h ins Ziel, legt also bis dort 18 km in 60 min zurück (blaue Pfeile in **Bild 2**). Dort trifft die blaue Ortslinie auf die rote Ortslinie.

Daraus lässt sich folgern, dass Anna zuerst 10 min gelaufen und anschließend 60 min geradelt ist.

Eine Probe ergibt:

$$10 \text{ min} \cdot 12 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 10 \text{ min} \cdot \frac{12}{60} \frac{\text{km}}{\text{min}} = 2 \text{ km};$$

$$60 \text{ min} \cdot 18 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 1 \text{ h} \cdot 18 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 18 \text{ km}.$$

Die Summe beider Wegabschnitte beträgt exakt 2 km + 18 km = 20 km bei einer Summe der Zeitabschnitte von 10 min + 60 min = 70 min.

Annas endgültige Ortslinie

Lässt man sämtliche Hilfslinien in **Bild 3** weg, dann erhält man Annas endgültige Ortslinie (**Bild 1**, folgende Seite):

Die Bewegungsabläufe „Laufen“ und „Rad fahren“ wurden hierbei jeder für sich als gleichförmig angenommen. Im Zeit-Ort-Diagramm entspricht dies zwei Geradenstücken. Die Steigung einer solchen Geraden ist ein Maß für die Geschwindigkeit der Bewegung (steilere Gerade für „Rad fahren“). Aus dem Mathematikunterricht ist bekannt, dass Steigung definiert wird als „Hochwert durch Rechtswert“, in Formeln $m = \frac{\Delta y}{\Delta x}$, wobei hier die Formelzeichen an die Achsen angepasst werden müssen, also muss es heißen $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$.



Bild 1: Anna ist in beiden Disziplinen langsamer als Bernd und kommt trotzdem als Erste ins Ziel

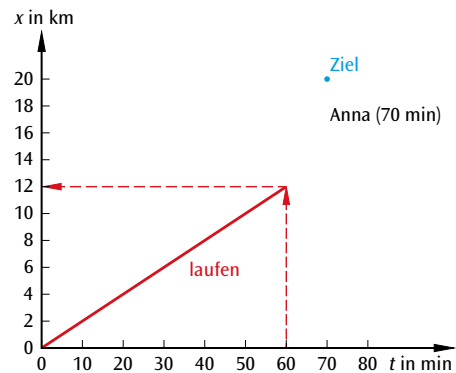


Bild 2: Annas Ortslinie beim Laufen (rot)

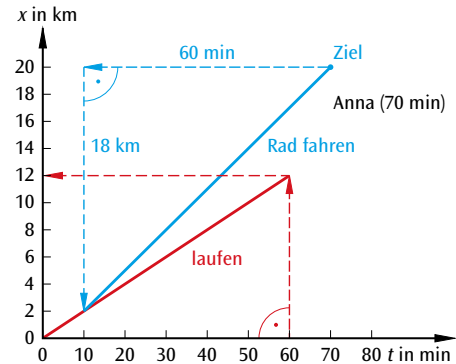


Bild 3: Annas Ortslinie beim Radfahren, zurückgerechnet vom Zielpunkt (blau)

Ein Bild sagt mehr als tausend Worte ...

Bernds Bewegung lässt sich in analoger Weise im Zeit-Ort-Diagramm darstellen (**Bild 2**). Offenbar kommt er nur deswegen später ins Ziel, weil er die meiste Zeit (72 min) in seiner langsameren Disziplin unterwegs ist und lediglich 5 min radelt.

Hier die Probe:

$$72 \text{ min} \cdot 15 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 72 \text{ min} \cdot \frac{15}{60} \frac{\text{km}}{\text{min}} = 18 \text{ km};$$
$$5 \text{ min} \cdot 24 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 5 \text{ min} \cdot \frac{24}{60} \frac{\text{km}}{\text{min}} = 2 \text{ km}.$$

Das Diagramm besagt noch mehr: Wir können ablesen, wann Anna ihren Kontrahenten Bernd einholt, nämlich nach 20 min und fünf zurückgelegten Kilometern (vgl. **Bild 2**).

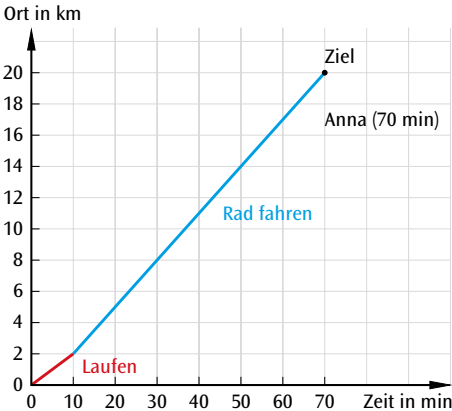


Bild 1: Annas endgültige Ortslinie

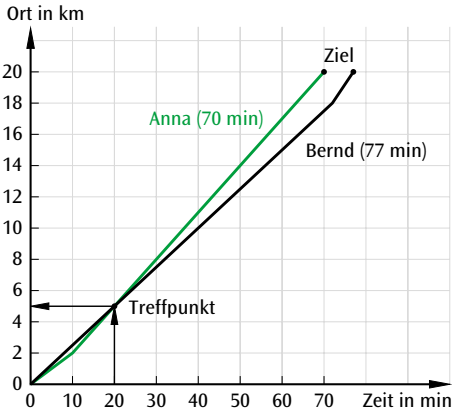


Bild 2: Ortslinien von Anna (grün) und Bernd (schwarz) im Vergleich

Experiment auf der Luftkissenfahrbahn

Eine gleichförmige Bewegung lässt sich auf der Luftkissenbahn realisieren (**Bild 3**): Aus kleinen Düsen auf der Fahrbahn strömt Luft aus. Auf diesem Luftpolster können sich Gleiter ohne nennenswerte Reibung bewegen. Entlang der Bahn sind in regelmäßigen Abständen Lichtschranken aufgestellt.

Zu Beginn des Experiments gibt ein Metallbolzen dem Gleiter einen Stoß. Gleichzeitig wird an eine elektronische Uhr ein Signal gegeben und die Zeitmessung beginnt. Die Zeitmessung endet, wenn der Gleiter die jeweilige Lichtschranke erreicht. Man spricht von *Laufzeitmessung*.

Rechnerische Auswertung

In **Tabelle 1** sind die Zeitwerte für einen Gleiter bei einem Lichtschrankenabstand von 15 cm gelistet (Spalten 1 und 2).

Spalte 3 enthält die Zeitdifferenz zur jeweils vorherigen Lichtschranke, Spalte 4 den Lichtschrankenabstand (jeweils 0,15 m). Auslassungen in der Tabelle bedeuten, dass keine Werte angegeben werden können.

Die letzte Spalte schließlich enthält den Quotienten $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$. Dieser beträgt konstant $1,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und entspricht der Steigung im Zeit-Ort-Diagramm (**Bild 1** auf der folgenden Seite).

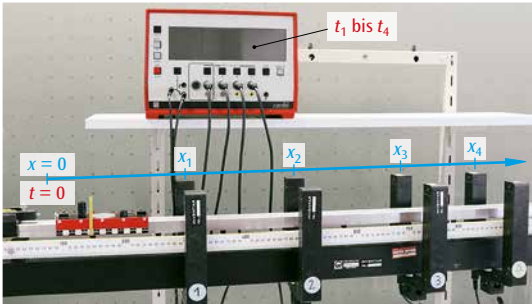


Bild 3: Versuchsanordnung zur Aufnahme der gleichförmigen Bewegung auf der Luftkissenbahn (Messung von Laufzeiten t_1 bis t_4 zu den Orten x_1 bis x_4)

Tabelle 1: Messwerte zum Versuch gemäß Bild 3				
1	2	3	4	5
t s	x m	Δt s	Δx m	$\frac{\Delta x}{\Delta t}$ m/s
0,000	0,00	—	—	—
0,146	0,15	0,146	0,15	1,03
0,291	0,30	0,145	0,15	1,03
0,441	0,45	0,150	0,15	1,00
0,584	0,60	0,143	0,15	1,05