



Technische Physik

Berufskolleg

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

Europa-Nr.: 80611

Autoren des Buches „Technische Physik - Berufskolleg“

Drössler, Patrick
Schuster, Katharina
Vogel, Harald
Dr. Weidenhammer, Petra

Lektorat: Dillinger, Josef

Bildentwürfe: Die Autoren

Bildbearbeitung: Zeichenbüro des Verlags Europa-Lehrmittel, Ostfildern

1. Auflage 2022

Druck 5 4 3 2 1

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

ISBN 978-3-7585-8061-1

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

© 2022 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
www.europa-lehrmittel.de

Satz: Satzherstellung Dr. Naake, 09212 Limbach-Oberfrohna
Umschlaggestaltung: braunwerbeagentur, Radevormwald
Umschlagfotos: © Revilo – stock.adobe.com und © Llepod – iStock
Druck: Plump Druck und Medien GmbH, 53619 Rheinbreitbach

Vorwort

Dieses Buch ist auf den Lehrplan des einjährigen Berufskollegs zum Erwerb der Fachhochschulreife (gewerbliche Richtung) von 2009 im Fach Technische Physik abgestimmt. Am Ende des Schuljahres absolvieren die SchülerInnen eine Abschlussprüfung. Die Prüfungsrelevanten Themen sind mit * gekennzeichnet.

BKFH		
HOT	Handlungsorientierte Themenbearbeitung	10 Std.
LPE 1*	Grundlagen der Mechanik (Kapitel 1, 2 und 3)	44 Std.
LPE 2*	Kreisbewegung (Kapitel 4)	10 Std.
LPE 3*	Impuls und Stoßprozesse (Kapitel 3)	10 Std.
LPE 4*	Elektrische und magnetische Felder (Kapitel 6, 7 und 8)	36 Std.
LPE 5*	Bewegung geladener Teilchen in magnetischen und elektrischen Feldern (Kapitel 7 und 8)	16 Std.
LPE 6*	Elektromagnetische Induktion (Kapitel 9)	18 Std.
LPE 7*	Mechanische Schwingungen (Kapitel 5)	10 Std.
LPE 8	Wahlthemen	56 Std.

Im Technischen Berufskolleg II schreiben die SchülerInnen dieselbe Prüfung in Technischer Physik, weshalb dieses Buch sich auch in dieser Schulart besonders gut eignet. Obwohl das Technische Berufskolleg II unabhängig vom ersten Jahr ist (Technisches Berufskolleg I), beziehen sich die Prüfungsinhalte auch auf den Lehrplan vom Technischen Berufskolleg I.

BK1T		
LPE 1	Technische Systeme	20 Std.
LPE 2*	Entwicklung und Behandlung physikalischer Modelle in der Mechanik	50 Std.
LPE 3*	Entwicklung und Behandlung physikalischer Modelle in der Elektrizitätslehre	20 Std.
LPE 4	Laborübungen	80 Std.

BK2T		
LPE 1*	Kreisbewegung	15 Std.
LPE 2*	Impuls und Stoßprozesse	15 Std.
LPE 3*	Elektrische und magnetische Felder	42 Std.
LPE 4*	Bewegung von Körpern in homogenen Kraftfeldern	25 Std.
LPE 5*	Elektromagnetische Induktion	25 Std.
LPE 6*	Mechanische Schwingungen	18 Std.
LPE 7	Wahlthemen	40 Std.

Arbeiten mit diesem Buch

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

Hervorhebungen

Formeln und wichtige Zusammenhänge im roten Rechteck

Beispiele und Beispielrechnungen im gelben Rechteck

Zusatzinformationen (nicht prüfungsrelevant) im grünen Rechteck

Simulationen

Um die Forderungen des **Handlungsorientierten Unterrichts (HOT)** zu erfüllen, sind u. a. **Interaktive Simulationen** zu finden, so dass sich die Lernkonzeption in Verbindung mit digitalen Medien im Unterricht umsetzen lässt. Die digitalen Inhalte sind auch zur Darstellung auf kleinen Displays (Smartphone, Tablet) geeignet.

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.

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.

Lehrkräften 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.

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

Die Autoren

Inhaltsverzeichnis

1	Beschreibung von Bewegungen	9
1.1	Grundlagen.....	9
1.1.1	Aufzeichnung von Bewegungen	9
1.1.2	Geschwindigkeit	10
1.1.3	Geschwindigkeitsänderung und Beschleunigung	14
1.1.4	Exkurs: SI-System	16
1.2	Lineare gleichförmige Bewegung	18
1.2.1	Diagramme der gleichförmigen Bewegung	18
1.2.2	Bewegungsgleichungen der gleichförmigen Bewegung	21
1.3	Gleichmäßig beschleunigte Bewegung.....	22
1.3.1	Von der Durchschnitts- zur Momentangeschwindigkeit	22
1.3.2	Diagramme der beschleunigten Bewegung	24
1.3.3	Bewegungsgleichungen der beschleunigten Bewegung	26
1.3.4	Linearisierung von Messreihen	29
1.4	Fall- und Wurfbewegungen.....	30
1.4.1	Freier Fall	30
1.4.2	Senkrechter Wurf	37
1.4.3	Waagrechter Wurf	41
1.4.4	Schiefer Wurf	43
1.5	Aufgaben zur Beschreibung von Bewegungen	46
1.5.1	Aufgaben zum Kapitel Grundlagen	46
1.5.2	Aufgaben zur gleichförmigen Bewegung	48
1.5.3	Aufgaben zur gleichmäßig beschleunigten Bewegung	49
1.5.4	Aufgaben zu Fall und Wurfbewegungen	51
2	Dynamik, Newton'sche Gesetze	56
2.1	Kräfte und ihre Wirkung	56
2.2	Newtons 1. Gesetz – Das Beharrungsprinzip.....	58
2.2.1	Trägheitssatz	58
2.2.2	Bezugssysteme	60
2.3	Newtons 2. Gesetz – Die Newton'sche Bewegungsgleichung.....	60
2.3.1	Grundgesetz der Mechanik	61
2.3.2	Experimenteller Nachweis	61
2.3.3	Träge und schwere Masse	65
2.4	Geschwindigkeitsänderung und Kraftstoß.....	66
2.5	Newtons 3. Gesetz – Das Wechselwirkungsprinzip.....	68
2.5.1	„actio gleich reactio“	68
2.5.2	Kraft und Gegenkraft	68
2.5.3	Gegenkraft und Kräftegleichgewicht	69
2.6	Arbeiten mit Kräften	70
2.6.1	Kraft als Vektor	70
2.6.2	Messung von Kräften	71
2.7	Anwendungen der Kraftgesetze	73
2.7.1	Gewichtskraft und Gravitation	73
2.7.2	Elastische Unterlagenkraft	74
2.7.3	Reibungskräfte	75
2.7.4	Die vier Grundkräfte und ihre Erscheinungsformen	79
2.7.5	Kräfte wirken zusammen: Kräftepläne	80
2.8	Impuls und Impulserhaltung.....	88
2.8.1	Der Impuls als vektorielle Bewegungsgröße	89
2.8.2	Der Impuls als Erhaltungsgröße	89

2.8.3	Stoßvorgänge	91
2.8.4	Raketenphysik	96
2.9	Aufgaben zur Dynamik und den Newton'schen Gesetzen	100
2.9.1	Aufgaben zu den Newton'schen Gesetzen	100
2.9.2	Aufgaben zu verschiedenen Kräften	102
2.9.3	Aufgaben zu den Anwendungen der Newton'schen Gesetze	103
2.9.4	Aufgaben zum Impuls und zur Impulserhaltung	106
3	Arbeit und Energie	108
3.1	Gesellschaftliche Bedeutung der Energie	108
3.2	Formen mechanischer Arbeit	109
3.2.1	Hubarbeit	109
3.2.2	Reibungsarbeit	110
3.2.3	Beschleunigungsarbeit	111
3.2.4	Spannarbeit	112
3.3	Allgemeine Definition der Arbeit	113
3.4	Mechanische Energie	114
3.5	Leistung und Wirkungsgrad	118
3.5.1	Leistung	118
3.5.2	Wirkungsgrad	121
3.6	Energie- und Impulserhaltungssatz	122
3.6.1	Die Stoßgesetze	122
3.6.2	Das ballistische Pendel	126
3.7	Aufgaben zu Kapitel 3	127
3.7.1	Aufgaben zu Arbeit und Energie	127
3.7.2	Aufgaben zu Energie- und Impulserhaltung	129
4	Kreisbewegung	131
4.1	Grundlagen der Kreisbewegung	131
4.2	Gesetzmäßigkeiten der Kreisbewegung	134
4.3	Kurvenfahrten	137
4.4	Kreisbewegung am Himmel, Gravitation	140
4.4.1	Die Geschichte der Bewegung von Himmelskörpern	140
4.4.2	Newton'sches Gravitationsgesetz	143
4.5	Aufgaben zur Kreisbewegung	145
4.5.1	Aufgaben zu den Grundlagen der Kreisbewegung	145
4.5.2	Aufgaben zu den Gesetzmäßigkeiten der Kreisbewegung	146
4.5.3	Aufgaben zu Kurvenfahrten	149
4.5.4	Aufgaben zur Kreisbewegung am Himmel	150
5	Mechanische Schwingungen	153
5.1	Beispiele und Beschreibung schwingungsfähiger Systeme	153
5.1.1	Rücktreibende Kräfte	153
5.1.2	Kenngrößen einer Schwingung	155
5.1.3	Äquivalenz zur Kreisbewegung	155
5.1.4	Die Bewegungsgleichung eines Oszillators	156
5.2	Harmonische Schwingungen	157
5.2.1	Lineares Kraftgesetz beim Feder-Schwere-Pendel	157
5.2.2	Die Differenzialgleichung der harmonischen Schwingung	158
5.2.3	Das Fadenpendel	160
5.2.4	Bewegungsgleichungen und Diagramme der harmonischen Schwingung	162
5.2.5	Energie der harmonischen Schwingung	164
5.3	Aufgaben zu harmonischen Schwingungen	166

6	Elektrizitätslehre	169
6.1	Grundlagen.....	169
6.1.1	Ladung und Stromstärke	169
6.1.2	Elektrische Spannung	171
6.1.3	Stromkreis	171
6.2	Messung von Spannung und Stromstärke	172
6.3	Wirkungen des elektrischen Stroms.....	173
6.4	Elektrischer Widerstand	173
6.4.1	Widerstand und Leitwert	173
6.4.2	Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands	174
6.4.3	Ohmsches Gesetz	174
6.4.4	Leiterwiderstand	175
6.5	Grundsaltungen	177
6.5.1	Reihenschaltung	177
6.5.2	Parallelschaltung	179
6.5.3	Gemischte Schaltungen	181
6.6	Elektrische Arbeit und Leistung	182
6.6.1	Elektrische Arbeit	182
6.6.2	Elektrische Leistung	183
6.6.3	Wirkungsgrad	184
6.7	Aufgaben zur Elektrizitätslehre	186
6.7.1	Aufgaben zu elektrischer Stromstärke, Ladung und Spannung	186
6.7.2	Aufgaben zu Widerstand und Ohm'schen Gesetz	187
6.7.3	Aufgaben zu Grundsaltungen und gemischten Schaltungen	188
6.7.4	Aufgaben zu elektrischer Arbeit, Leistung und Wirkungsgrad	190
7	Elektrisches Feld.....	191
7.1	Grundbegriffe der Elektrostatik	191
7.2	Elektrische Feldlinien	198
7.3	Elektrische Feldstärke.....	199
7.4	Grundgleichung der Elektrostatik	201
7.5	Coulomb'sches Kraftgesetz	204
7.6	Feldstärke des radialsymmetrischen Feldes	205
7.7	Elektrische Spannung und Potenzial	208
7.8	Kondensatoren	210
7.8.1	Kapazität als Ladungsspeicherfähigkeit	210
7.8.2	Kapazität eines Plattenkondensators	211
7.8.3	Bauformen von Kondensatoren	214
7.8.4	Energie eines geladenen Kondensators	216
7.8.5	Energie des elektrischen Feldes	218
7.8.6	Kondensatorschaltungen	218
7.9	Teilchenbewegung im elektrischen Feld	220
7.9.1	Erzeugung freier Elektronen	220
7.9.2	Geladene Teilchen im elektrischen Längsfeld	221
7.9.3	Geladene Teilchen im elektrischen Quersfeld	222
7.9.4	Anwendungen	224
7.10	Aufgaben zum elektrischen Feld.....	228
7.10.1	Aufgaben zu den Grundbegriffen der Elektrostatik	228
7.10.2	Aufgaben zu elektrischen Feldlinien und Feldstärke	228
7.10.3	Aufgaben zum elektrischen Feld	229
7.10.4	Aufgaben zum Coulomb'schen Kraftgesetz	230

7.10.5	Aufgaben zur Feldstärke des radialsymmetrischen Feldes	231
7.10.6	Aufgaben zur elektrischen Spannung und Potenzial	232
7.10.7	Aufgaben zu Kondensatoren	233
7.10.8	Aufgaben zu Teilchenbewegung im elektrischen Feld	236
8	Magnetfeld.....	239
8.1	Grundlagen: Permanentmagnetismus.....	239
8.2	Magnetische Feldlinien.....	243
8.3	Grundlagen: Elektromagnetismus	243
8.4	Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter	245
8.5	Magnetische Flussdichte	247
8.6	Flussdichte von Spulen	250
8.7	Teilchenbewegung im Magnetfeld.....	254
8.7.1	Lorentz-Kraft	254
8.7.2	Teilchenbahn im Magnetfeld	255
8.7.3	Fadenstrahlrohr	256
8.7.4	Geschwindigkeitsfilter	257
8.7.5	Massenspektrometer	257
8.8	Aufgaben zum magnetischen Feld.....	258
8.8.1	Aufgaben zum Permanentmagnetismus	258
8.8.2	Aufgaben zum Elektromagnetismus	258
8.8.3	Aufgaben zur Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter	259
8.8.4	Aufgaben zur magnetischen Flussdichte	260
8.8.5	Aufgaben zur Flussdichte von Spulen	261
8.8.6	Aufgaben zu Teilchenbewegung im Magnetfeld	262
9	Elektromagnetische Induktion	264
9.1	Induktion und Lenz'sche Regel	264
9.2	Magnetischer Fluss und Induktionsgesetz	267
9.2.1	Induktion im bewegten Leiter	268
9.2.2	Induktion im ruhenden Leiter	270
9.3	Selbstinduktion und magnetische Feldenergie	272
9.4	Wechselspannung.....	277
9.5	Aufgaben zur elektromagnetischen Induktion und Wechselspannung.....	281
9.5.1	Aufgaben zur Induktion und Lenz'schen Regel	281
9.5.2	Aufgaben zur Induktion im bewegten Leiter	282
9.5.3	Aufgaben zur Induktion im ruhenden Leiter	283
9.5.4	Aufgaben zur Selbstinduktion und magnetischen Feldenergie	283
9.5.5	Vermischte Aufgaben zu Kap. 9	284
10	Prüfungsaufgaben.....	287
10.1	Prüfung A	287
10.2	Prüfung B.....	291
	Lösungen	297
	Bildquellenverzeichnis.....	380
	Sachwortverzeichnis	382

1 Beschreibung von Bewegungen

1.1 Grundlagen

1.1.1 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 bewegendes 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**).

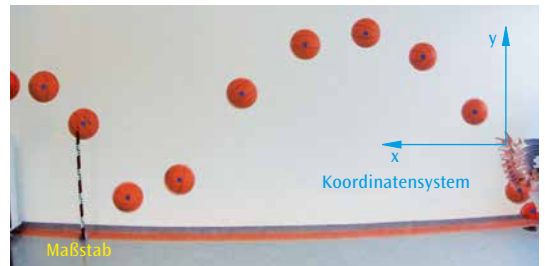


Bild 3: Videoanalyse am Beispiel eines geworfenen Basketballs (aufgenommen mit 6 fps)

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

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

Hochgeschwindigkeitsaufnahmen

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

1.1.2 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 Abschnitt 2.1.

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

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

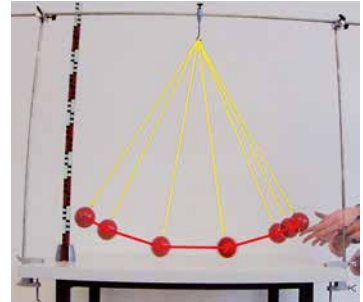


Bild 1: Geschwindigkeitsvektoren stellen Ortsänderungen dar

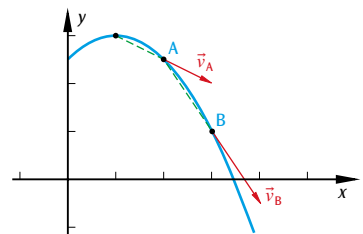


Bild 2: Konstruktion von $\vec{v}$ durch Rückwärtsinterpolation

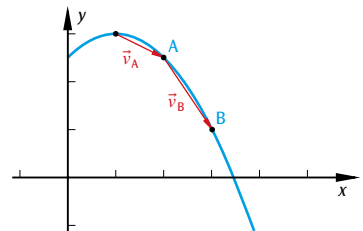


Bild 3: Intuitive Konstruktion von $\vec{v}$ durch Vorwärtsinterpolation

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.

Beispiel: Tempobestimmung

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

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

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

Bei geradliniger Bewegung gilt

$$v = \frac{\text{Weg}}{\text{Zeit}} = \frac{\Delta s}{\Delta t}.$$

Die Beziehung $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ liefert nur einen *durchschnittlichen* Geschwindigkeitswert. Dieser nähert sich umso genauer dem *momentanen* Wert an, je kürzer das gemessene Zeitintervall Δt ist (siehe Abschnitt 1.3.1).

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 1.1.4.

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

Tabelle 1: Einige typische Geschwindigkeiten

Fingernagel	0,2 bis 0,5 mm/Woche
Weinbergschnecke	ca. 3 $\frac{\text{m}}{\text{h}}$
Fußgänger	ca. 5 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$
Weltklassesprinter	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 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Gewehrkugel	800 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Schall in Wasser	1500 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Licht im Vakuum	299 792 458 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

Beispiel: 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:

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

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

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

Beispiel: 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)

Beispiel: 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**) 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)“.

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.

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

Bei einer zusammengesetzten Rechnung (Produkt und Quotient) darf das Ergebnis nur mit so vielen gültigen Ziffern angegeben werden wie die am *ungenau*sten 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 $v_{\text{res}} = v_1 + v_2$ (resultierende Geschwindigkeit) nach vorne bewegen. Ihre eigene Geschwindigkeit $\vec{v}_1$ wird dabei als Relativgeschwindigkeit (nämlich relativ zum Laufband) bezeichnet.

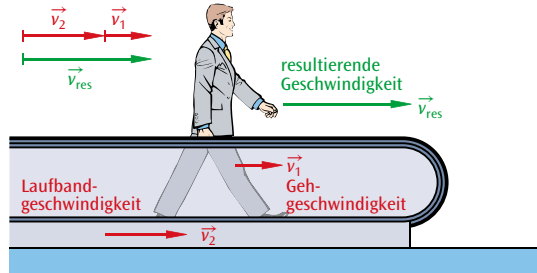
Bewegung gegen die Fahrtrichtung (Bild 1b)

Wenn Sie sich mit genau der Geschwindigkeit v_2 des Laufbandes entgegen der Fahrtrichtung bewegen, bleiben Sie – von außen betrachtet – scheinbar stehen, weil sich die resultierende Geschwindigkeit dann als Differenz $v_{\text{res}} = v_1 - v_2$ ergibt. Sie müssen also schneller sein als das Laufband, um vorwärts zu kommen. Sonst ist Ihre Geschwindigkeit „negativ“.

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.

a) Gehen in Laufbandrichtung



b) Gehen gegen die Laufbandrichtung

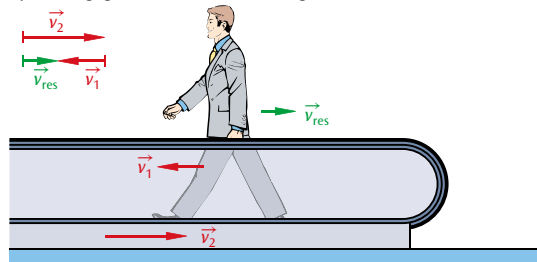


Bild 1: Bewegung auf dem Laufband: (a) in Fahrtrichtung; (b) gegen die Fahrtrichtung

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.

1.1.3 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.

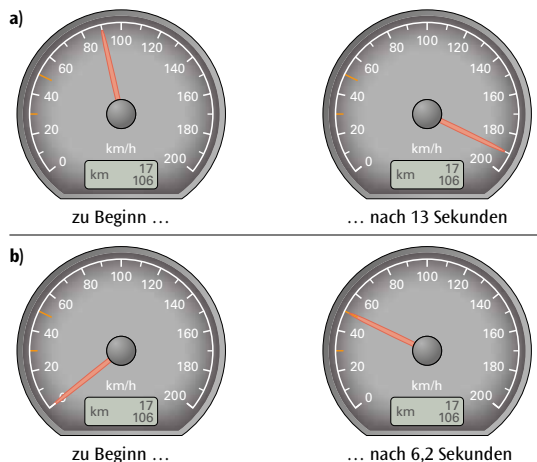


Bild 2: Wer beschleunigt mehr?

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**).

Beschleunigung

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

SI-Einheit der Beschleunigung

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

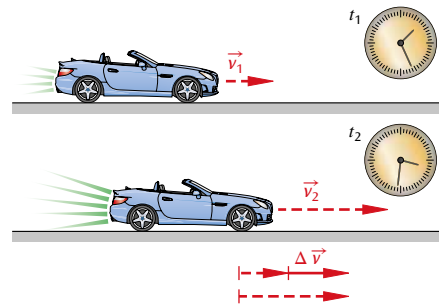


Bild 1: Zur Definition der Beschleunigung

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

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.

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 $1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

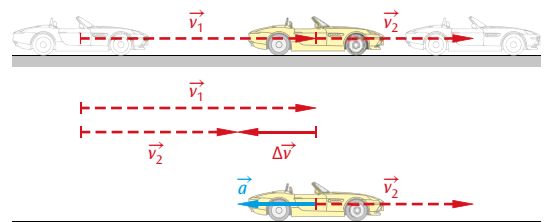


Bild 2: Fahrzeug beim Bremsen: die Beschleunigung ist rückwärts gerichtet und damit negativ

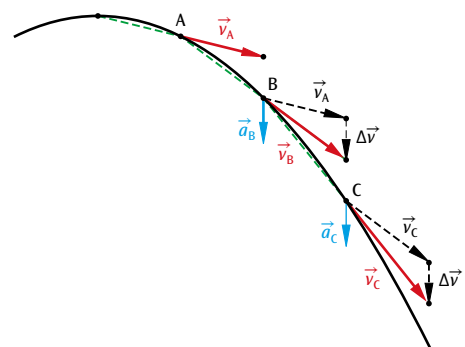


Bild 3: Beschleunigung $\vec{a}$ als Vektor (Erläuterungen im Text)

In Kapitel 2 lernen Sie, dass jede Geschwindigkeitsänderung $\Delta \vec{v}$ und damit jede Beschleunigung $\vec{a}$ immer die Folge einer Krafteinwirkung 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.

1.1.4 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 Dunkirchen 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 1983 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 $3,98\text{ °C}$) hat.

Sekunde

Die nächste festgelegte Einheit war die Sekunde als 86 400-ster Teil des mittleren Sonnentages ($60 \cdot 60 \cdot 24 = 86\,400$). 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 Pendeluhrn 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 Quarzuhrn 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

Die im Mai 2019 eingeführte Neudefinition der bisherigen sieben SI-Basiseinheiten betrifft im Wesentlichen die Einheiten Kilogramm, Mol, Ampère und Kelvin, mit den definierenden Konstanten Plancksches Wirkungsquantum h , Avogadrokonstante N_A , Elementarladung e und Boltzmannkonstante k . Die anderen drei Basiseinheiten Sekunde, Meter und Candela wurden lediglich in der sprachlichen Formulierung angeglichen, was jedoch keine Auswirkung auf die Realisierung hat. 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: Das Gewichtsnormale (1 kg) basiert nun auf dem planckschen Wirkungsquantum, einer von Max Planck eingeführten Naturkonstanten, die in der Quantenphysik das stets gleich bleibende Verhältnis von Energie und Frequenz eines Lichtteilchens angibt.

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 bestand darin, die Naturkonstanten, die den Festlegungen der Einheiten zugrunde liegen, als exakte Werte zu definieren (**Bild 1** und Umschlagseite des Buches). 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 (<https://www.ptb.de/cms/forschung-entwicklung/forschung-zum-neuen-si.html>).

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

1.2 Lineare gleichförmige Bewegung

1.2.1 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?

Erklärung (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 3**). 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 $2 \text{ km} + 18 \text{ km} = 20 \text{ km}$ bei einer Summe der Zeitabschnitte von $10 \text{ min} + 60 \text{ min} = 70 \text{ min}$.

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

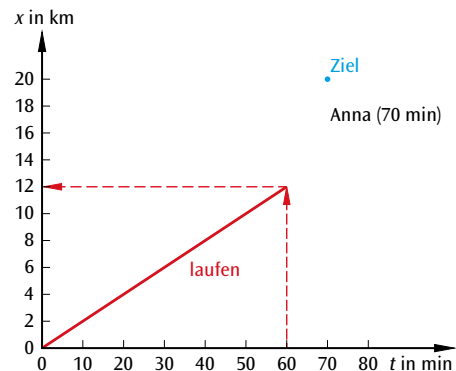


Bild 2: Annas Ortslinie beim Laufen (rot)

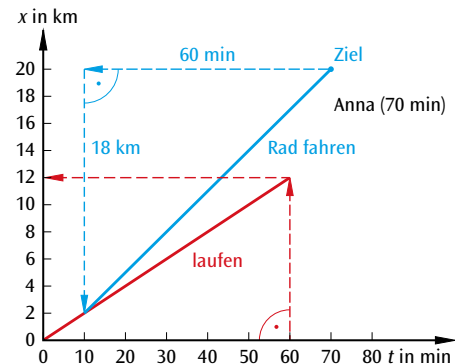


Bild 3: Annas Ortslinie beim Radfahren, zurückgerechnet vom Zielpunkt (blau)

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**).

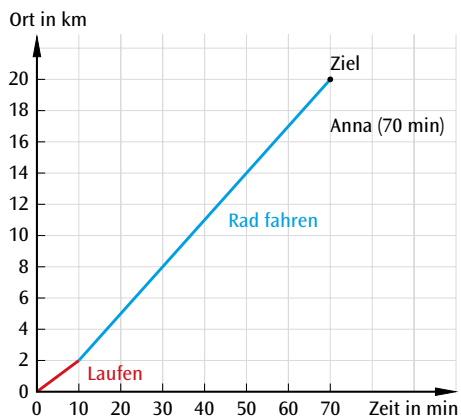


Bild 1: Annas endgültige Ortslinie

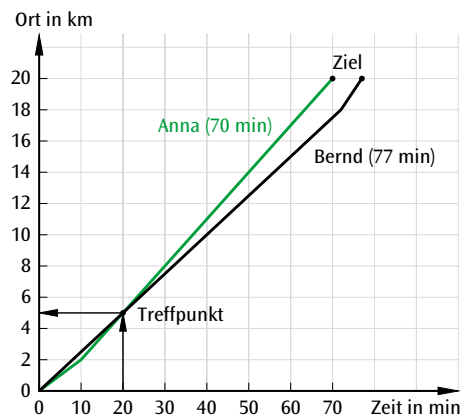


Bild 2: Ortslinien von Anna (grün) und Bernd (schwarz) im Vergleich

Experiment auf der Luftkissenfahrbahn

Eine gleichförmige Bewegung lässt sich auf der Luftkissenfahrbahn 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).

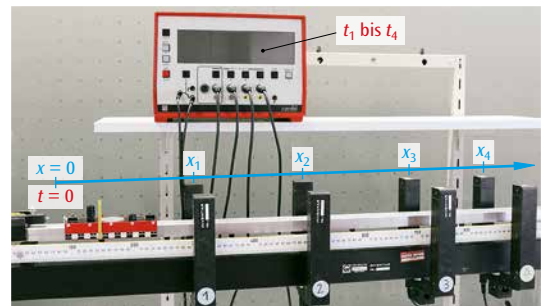


Bild 3: Versuchsanordnung zur Aufnahme der gleichförmigen Bewegung auf der Luftkissenfahrbahn (Messung von Laufzeiten t_1 bis t_4 zu den Orten x_1 bis x_4)

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

Zeit-Ort-Diagramm

Trägt man Ort und Zeit gegeneinander auf, dann ergibt sich in guter Näherung eine Gerade (**Bild 1**).

Die Steigung dieser Gerade ist ein Maß für die Geschwindigkeit des Gleiters: Ein schnellerer Gleiter „erzeugt“ eine steilere Gerade, ein langsamerer eine flachere.

Um die Geschwindigkeit bei gleichförmiger Bewegung zu ermitteln, wählt man ein möglichst großes Steigungsdreieck (rote gestrichelte Linien in **Bild 1**) und achtet darauf, dass der Teiler eine Zahl ist, die nicht zu unendlichen Dezimalbrüchen führt, in **Bild 1** also z. B.

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{0,51 \text{ m}}{0,50 \text{ s}} = 1,0(2) \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

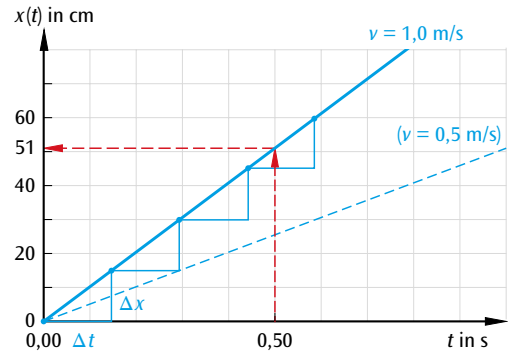


Bild 1: Zeit-Ort-Diagramm der gleichförmigen Bewegung für zwei unterschiedliche Geschwindigkeiten $v_1 = 1,0 \text{ m/s}$ und $v_2 = 0,5 \text{ m/s}$

Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm

Trägt man die Geschwindigkeitswerte v gegen die Zeit t auf, erhält man aufgrund der Konstanz der Geschwindigkeit eine Parallele zur Zeitachse (**Bild 2**).

Das $v(t)$ -Diagramm gibt noch mehr Auskunft: Die Fläche unter dem Diagramm entspricht wegen $x = v \cdot t$ dem zurückgelegten Weg, nach 0,584 s beispielsweise 0,60 m (vgl. **Bild 2**). Dies entspricht dem Abstand zur letzten Lichtschranke (60 cm). Eventuelle Abweichungen resultieren aus gerundeten Geschwindigkeitswerten.

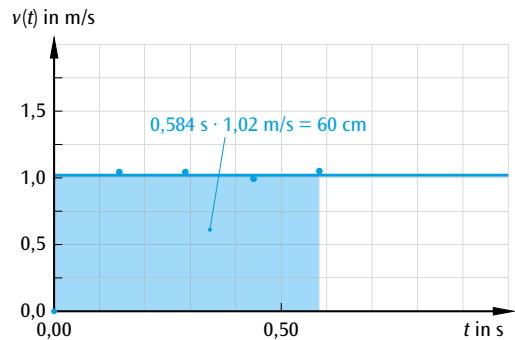


Bild 2: Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm der gleichförmigen Bewegung (aus Tabelle 1 auf der vorigen Seite ermittelt)

Diagramme erzählen Geschichten

Die Eibsee-Seilbahn benötigt zehn Minuten für die Höhendifferenz von fast 2000 Metern. Sie verkehrt im 30-Minuten-Takt vom Eibsee zum Zugspitzgipfel.

Bild 3 zeigt stark vereinfacht das Zeit-Ort-Diagramm einer Gondel. Anfahrts- und Bremsphasen werden dabei nicht berücksichtigt.

Bei der Fahrt zum Gipfel („Hinfahrt“) nehmen die Höhenwerte mit der Zeit zu. Auf dem Gipfel steigen Touristen aus und ein. In dieser Zeit nehmen die Höhenwerte nicht weiter zu. Bei der Talfahrt („Rückfahrt“) nehmen die Höhenwerte wieder ab, bis die Talstation erreicht ist.

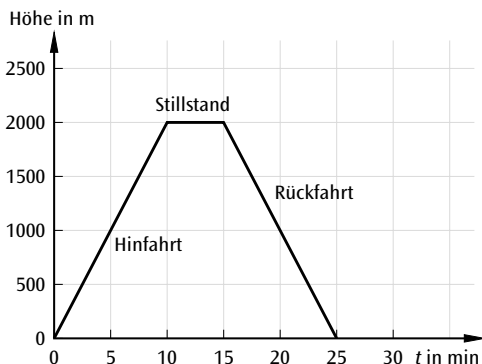


Bild 3: Zeit-Ort-Diagramm der Eibsee-Seilbahn (vereinfachte Darstellung)

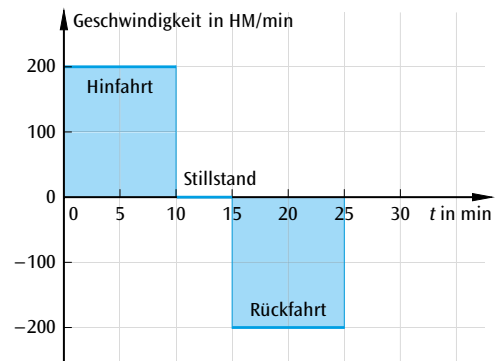


Bild 4: Geschwindigkeitsverlauf einer Gondel der Eibsee-Bahn in der Einheit „Höhenmeter pro Minute“