



Edition
Harri 
Deutsch 

Physik, verständlich

Alfred Ziegler Rahel Vortmeyer-Kley

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

Europa-Nr.: 57822

Autoren

Prof. Dr. Alfred Ziegler, außerplanmäßiger Professor an der Universität Osnabrück, ist bundesweit bekannt geworden als institutionalisierter permanenter Ansprechpartner der Studierenden bei allen mathematisch-physikalischen Problemen.

Er hat zuvor viele Jahre in der physikalischen Forschung und als Gymnasiallehrer gearbeitet.

Rahel Vortmeyer-Kley, M.Sc., promoviert im Grenzgebiet Physik, Ozeanografie und Umweltwissenschaften am ICBM, Oldenburg und arbeitet als Schreibtutorin für Naturwissenschaften an der Universität Osnabrück.

1. Auflage 2016
Druck 5 4 3 2 1

ISBN 978-3-8085-5782-2

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

© 2016 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG
42781 Haan-Gruiten
<http://www.europa-lehrmittel.de>

Umschlaggestaltung: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald

Layout, Satz und Illustration: Tobias Weh, 49080 Osnabrück (tobiw.de)

Gesetzt mit L^AT_EX. Illustriert mit TikZ, Gnuplot und Adobe Illustrator.

Druck: Totem, 88-100 Inowroclaw, Poland

Inhaltsübersicht

Kapitel 1 Mechanik	1
Kapitel 2 Relativitätstheorie	157
Kapitel 3 Wärmelehre	201
Kapitel 4 Elektrodynamik	265
Kapitel 5 Optik	331
Kapitel 6 Quantenmechanik und Atomphysik	363
Die Zukunft der Physik	389
Anhang	390

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	ix
Danksagungen	xiii
1 Mechanik	1
1.1 Der Begriff der Kraft	1
1.1.1 Der Kraftbegriff nach Aristoteles	2
1.1.2 Gedächtniseffekt	4
1.2 Beschreibung von Bewegungen	13
1.3 Quantitative Form der Kraft	23
1.3.1 Der Kraftbegriff Newtons	27
1.4 Kräfte, die keine sind: Trägheits- oder Scheinkräfte	30
1.5 Erhaltungssätze	39
1.5.1 Impulserhaltung	39
1.5.2 Arbeit und Energieerhaltung	45
1.5.3 Drehimpulserhaltung	53
1.5.4 Erhaltungssätze und das Gesetz der Schwerkraft	56
1.5.5 Raketengleichung oder: Ist die Kraft $F = m dv/dt$ oder $F = dp/dt$?	61
1.5.6 Energieerhaltung bei Wechsel des Inertialsystems	62
1.6 Starrer Körper	65
1.7 Deformierbare Körper	85
1.7.1 Impulsströme	105
1.8 Schwingungen und Wellen	109
1.9 Wasserwellen	124
1.10 Flüssigkeiten	127
1.11 Inkompressible Strömungen	137
2 Relativitätstheorie	157
2.1 Spezielle Relativitätstheorie	157
2.2 Allgemeine Relativitätstheorie	188

3	Wärmelehre	201
3.1	Wärme und Temperatur	201
3.2	Ideale Gase	212
3.3	Wärmekraftmaschinen und Entropie	220
3.4	Thermodynamische Potentiale	242
3.5	Substanz- und Phasengemische	245
3.6	Wärmetransport	252
3.6.1	Wärmeleitung	254
3.6.2	Konvektion	257
3.6.3	Wärmestrahlung	258
3.7	Thermoelektrische Effekte	260
3.8	Chemisches Potential und chemische Reaktionen	262
4	Elektrodynamik	265
4.1	Elektrostatik	265
4.2	Magnetostatik	286
4.3	Elektrische Ströme	289
4.3.1	Zusammenhang zwischen elektrischem und magnetischem Feld	303
4.3.2	Wechselspannungen und -ströme	313
4.4	Elektrodynamik	316
4.4.1	Wechselspannungen und -ströme (Fortsetzung)	316
4.4.2	Übertragung von Signalen und elektromagnetische Wellen	325
5	Optik	331
5.1	Geometrische Optik	333
5.2	Wellenoptik	350
5.3	Elektromagnetisches Spektrum	360
6	Quantenmechanik und Atomphysik	363
6.1	Natur des Lichts	363
6.2	Grundsatzfragen	368
6.3	Aufbau des Atoms	375
6.4	Aufbau des Atomkerns	381
6.5	Das Standardmodell	386
	Die Zukunft der Physik	389

A	Maximum der Sonnenstrahlung	391
B	Zerlegung von $\vec{\omega}$ nach verschiedenen Achsen beim symmetrischen Kreisel	393
C	Grundeinheiten und das »<i>Système International</i>« (SI)	395
D	Lösungen der Aufgaben	399
E	Periodensystem der Elemente	402
	Verzeichnisse	405
	Abbildungen	405
	Tabellen	414
	Kästen mit Erläuterungen	415
	Literatur	419
	Index	423

Vorwort

Das vorliegende Buch wendet sich in erster Linie, aber nicht ausschließlich an Lehramtsstudenten. Sein Titel lautet bewusst nicht »Verständliche Physik«, worunter in der Regel Bücher verstanden werden, die durch Anwendung der Physik auf mannigfache Phänomene des Alltags Motivation schaffen wollen. Es ist vielmehr ein Lehrbuch, das die gesamte Physik des Grundstudiums darstellt, allerdings mit einer Zielsetzung, die sich deutlich von der der Standardlehrbücher, an denen wahrlich kein Mangel herrscht, unterscheidet. Wie sich vielfach in Vorlesungen gezeigt hat, besteht – wie im angelsächsischen Sprachraum längst erkannt [2–7] – für ein Buch solcher Art, das die Standardlehrbücher ergänzt, ein großer Bedarf.

Nach unserer Erfahrung besteht das Hauptproblem von Physikstudenten im Grundstudium nicht im Nachvollziehen der Vorlesung, sondern im Einordnen des Gebotenen in einen Sinnzusammenhang: Warum wird das Problem so angegangen und nicht anders? Warum wird *dieses* Modell, *diese* Vereinfachung verwendet? Woraus ergibt sich überhaupt die Anordnung und Auswahl der behandelten Phänomene? Für den beginnenden Physikstudenten stellt sich oft alles als ein Einheitsbrei ohne erkennbare Struktur dar, bei dem er zwar mit eigener Bemühung jeden Herleitungsschritt nachvollziehen kann, aber die zugrunde liegenden Intentionen nicht erkennen kann. Das ist auch nicht weiter verwunderlich: Wie nicht selten auch im Schulunterricht legen die Unterrichtenden meist sehr viel Wert auf die Ausarbeitung eines Modells samt der dazugehörigen Rechnungen, verwenden aber – wohl, weil ihnen das selbstverständlich erscheint – wenig Zeit auf die Voraussetzungen und die Begründung eines physikalischen Modells und seiner Vereinfachungen, die immer eine Verkürzung der Wirklichkeit darstellen. Lernende denken zunächst eher konkret und ganzheitlich als abstrakt und analytisch!

Zentrales Anliegen dieses Buches ist es also, die Begriffs- und Modellbildungen der Physik durchschaubar zu machen. Daraus ergibt sich unter anderem, dass Formeln in diesem Buch eine Nebenrolle spielen. Eine mathematische Behandlung ist in der Regel erst sinnvoll, wenn man die grundsätzlichen Aspekte des Phänomens bereits verstanden hat. Es wird deshalb auch auf eine direkte und konkrete Deutung des jeweiligen Phänomens Wert gelegt unter Verzicht auf den Einsatz eines bereits zur Verfügung

gestellten Apparats: Das Verständnis des Pirouetteneffekts z. B. beinhaltet mehr als den lapidaren Hinweis auf die Drehimpulserhaltung.

Zu erwähnen ist an dieser Stelle, dass es sich beim vorliegenden Buch nicht einfach mehr oder weniger um eine Übersetzung der oben genannten angelsächsischen Bücher handelt, wenn auch einige sinnvolle Elemente übernommen worden sind. So stellt z. B. Bloomfield, *How Things Work* [2] Anwendungen der Physik auf Geräte des alltäglichen Lebens in den Vordergrund, Arons, *A Guide to Introductory Physics Teaching* [3] konzentriert sich auf die ausführliche Darstellung verbreiteter Verständnishindernisse, Hewitt, *Conceptual Physics* [4] kommt dem Konzept des vorliegenden Buchs nahe, ist aber insofern konventionell, als es recht wenig über das *Warum* physikalischer Begriffe und Modelle sagt. Hobson, *Physics Connections* [5] zielt neben begrifflichen Klarstellungen und der Darstellung des Hintergrunds einer physikalischen Konzeption auf die gesellschaftliche Relevanz von Physik ab, während *Understanding Physics* [6] den historischen Kontext hervorhebt.

Der Leser wird auch gewisse Berührungspunkte mit dem *Karlsruher Physikkurs* von F. Hermann [8] feststellen. Allerdings ist dessen Darstellung am Konzept der Erhaltungsgrößen orientiert, während der Ansatz dieses Buches auf einer redundanten Beschreibung, die die Phänomene von mehreren Gesichtspunkten her angeht, beruht.

Ein Wort noch zu den reichlichen historischen Verweisen: Die Einbettung in einen historischen Hintergrund ist unserer Meinung nach oft eine Verständnishilfe, weil sie die Begriffs- und Modellbildung transparent macht und zugleich deutlich macht, dass Physik das Ergebnis eines langen und harten Ringens ist. Zu oft entsteht durch eine stromlinienförmige Präsentation physikalischen Wissens, die auf kürzestem Weg zum Ziel kommt, der Eindruck einer gewissen Selbstverständlichkeit, die im Lernenden den Eindruck hinterlässt, dass er das auch selbst hätte herleiten können, wenn er nur ein wenig darüber nachgedacht hätte. Physik erscheint so als ein unnahbarer Block auf ewig zementierter Wahrheiten statt als das, was sie wirklich ist: Menschenwerk in all seiner Lebendigkeit, inklusive der Irrungen und Wirrungen, das gerade deshalb solche Faszination ausstrahlt. Der Nachteil des Einbeziehens historischer Hintergründe ist freilich (abgesehen von irrelevanten Irrwegen, die in diesem Buch natürlich ausgespart bleiben), dass man dem Hintergrund der historischen Entwicklungen, ohne tief in ihre zeitgeschichtliche und philosophische Einbettung einzusteigen, nicht wirklich gerecht werden kann. So ist jeder historische Hinweis immer in einem gewissen Maß eine Fälschung. Trotz dieser Gefahr wöge der Verlust beim Verzicht auf historische Anmerkungen nach unserer Meinung schwerer. Der Leser, der sich durch diese historischen Häppchen ermuntert fühlt, sich weiter mit den kulturhistorischen Hintergründen zu befassen, sei auf die *Kulturgeschichte der Physik* von Karoly Simonyi [1] verwiesen.

Wir hoffen, dass dieses Buch eine wesentliche Hilfe beim Verständnis der Physik darstellt. Der Leser sollte sich aber bewusst sein, dass die einfache Lektüre auch dieses Buchs allein nicht ausreicht, sich die Physik weit genug anzueignen, um sie produktiv anwenden zu können. Wie die neuere didaktische Forschung gezeigt hat (siehe die umfangreiche Literaturübersicht in [9]), bedarf es dazu des aktiven und investigativen Lernens. Unser Wunsch ist erfüllt, wenn dieses Buch den Einstieg zu dieser Art des Lernens ebnet.

Alfred Ziegler
Rahel Vortmeyer-Kley

Osnabrück, September 2016

Leserkontakt

Autoren und Verlag Europa-Lehrmittel
Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG
Düsseldorfer Str. 23
42781 Haan-Gruiten

lektorat@europa-lehrmittel.de
<http://www.europa-lehrmittel.de>

Danksagungen

Auch dieses Buch ist nicht ohne die Hilfe vieler Mitarbeiter entstanden. Sie sind sogar so zahlreich, dass die folgende Aufzählung vermutlich nicht vollständig ist, wofür wir uns bei den nicht Genannten entschuldigen. Der Kern dieses Buchs entstand durch Vorlesungen, die A. Ziegler an der Universität Landau gehalten hat. Guido Haag und Patrick Löffler haben als Studenten diese Vorlesungen nicht nur gehört, sondern waren auch diejenigen, die zur Niederschrift dieses Buches ermutigten, weil sie meinten, diese Darstellung der Physik sei genau die, die sie sich schon immer gewünscht hätten. Sie haben das ganze Vorhaben mit kritischen, hilfreichen Anmerkungen begleitet.

Kritisch gelesen haben Teile des Manuskriptes auch Prof. Walter Jung, Prof. Oliver Schwarz, Prof. Rita Wodzinski sowie zahllose Studenten der Universitäten Landau und Osnabrück.

Nicht zuletzt danken wir Herrn Tobias Weh – abgesehen von seinen inhaltlichen Anmerkungen als potentieller Adressat des Buches – für die Anfertigung der Zeichnungen in professioneller Qualität und die Entwicklung des Layouts für dieses Buch.

Die Verantwortung für verbliebene Fehler und suboptimale Erklärungen liegt natürlich nach wie vor bei uns.

Doch dieses Buch wäre vielleicht nie zu Ende geschrieben worden, hätten die Autoren nicht den Rückhalt ihrer Familien gehabt, die sie immer wieder mit Aufmunterung, Rat und Tat unterstützt haben.

Und nicht zuletzt danken die Autoren einander für die gute Zusammenarbeit an diesem spannenden Projekt, dass immer wieder neue Sichtweisen auf die Physik bereithielt.

Kapitel 1

Mechanik

1.1 Der Begriff der Kraft

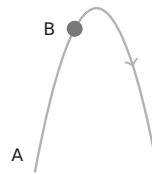
Das Wort **Kraft** bedarf – so möchte man meinen – eigentlich keiner Definition: Jeder kennt es und weiß, was es bedeutet. Unglücklicherweise deckt sich der in der Physik verwendete Begriff von Kraft nicht mit den Bedeutungen (es gibt mehrere), die er in der Alltagssprache hat. Das heißt keineswegs, dass das Wort *Kraft* in der Alltagssprache falsch verwendet wird. Alltagssprachlicher und physikalischer Gebrauch haben beide in ihrem jeweiligen Bereich ihre Berechtigung. Der Unterschied zwischen den beiden Auffassungen wird deutlich im Aufgabenblatt Ia, das der Leser bearbeiten möge, bevor er weiterliest (die nachfolgenden Aufgabenblätter basieren auf Ideen von McCloskey [16] und Hestenes et al. [19]).

Aufgabenblatt Nr. Ia

Aufgabe Nr. 1

Eine Kugel wird vom Punkt A aus direkt nach oben geworfen (siehe Zeichnung).

- a) Geben Sie alle Kräfte an, die auf die Kugel im Punkt B wirken, indem Sie entsprechende Pfeile in die Zeichnung eintragen (tragen Sie nur die Einzelkräfte, nicht die Gesamtkraft und auch keine Reibungskräfte ein).
- b) Wie heißen die Kräfte, die Sie eingetragen haben?

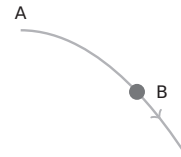


Hinweis: zur Darstellung einer Kraft durch Pfeile: Die Richtung des Pfeils gibt die Richtung der Kraft an, die Länge des Pfeils die Stärke der Kraft

Aufgabe Nr. 2:

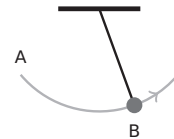
Eine Kugel wird vom Punkt A aus waagrecht geworfen (siehe Zeichnung).

Die Fragestellung ist die gleiche wie in Aufgabe 1.

**Aufgabe Nr. 3:**

Eine Kugel ist an einem Faden aufgehängt und schwingt von links nach rechts (siehe Zeichnung).

Die Fragestellung ist die gleiche wie in Aufgabe 1.



Unterschiedliche
Bedeutung von
Kraft in Physik und
Alltagssprache

Kraft in der
Alltagssprache
entspricht oft dem
Impuls in der Physik

Die meisten Personen, die diesen Test bearbeiten, zeichnen Kräfte ein, die in Richtung der momentanen Bewegung zeigen – meist als Wurfkraft oder Schwingkraft bezeichnet – d. h. eine Kraft nach oben bei der Aufgabe 1 und eine Kraft tangential zur Bahn bei den Aufgaben 2 und 3 (und nicht selten bei Aufgabe 3 noch eine Kraft radial nach außen). Dabei handelt es sich allerdings nicht um Kräfte *im Sprachgebrauch der Physik*, d. h. diese Antworten sind eigentlich falsch. Diese »Kräfte« in Bewegungsrichtung entsprechen eher dem, was in der Physik als **Impuls** bezeichnet wird und umgangssprachlich vielleicht mit Schwung oder Wucht wiedergegeben werden könnte. Es liegt also eher eine Sprachverwirrung als ein wirklich physikalischer Fehler vor. Was meint man denn nun in der Physik mit »Kraft«? Im Gegensatz zu vielen Kunstbegriffen der Physik (wie z. B. Arbeit) stammt der physikalische Begriff der Kraft bereits aus dem antiken Griechenland (gr. *dynamis*, lat. *vis*) und zwar von **Aristoteles** (384–322 v. Chr.). Seine Vorstellung von Kraft unterscheidet sich zwar etwas von dem heute verwendeten Kraftbegriff, hebt aber den wesentlichen Punkt der Definition in aller wünschenswerten Klarheit hervor, weshalb er nachstehend dargestellt werden soll.

1.1.1 Der Kraftbegriff nach Aristoteles

Aristoteles unterscheidet zwischen *natürlichen* und *gewaltsamen* Bewegungen (die hier relevanten Textstellen finden sich sämtlich in englischer Übersetzung in Referenz [20]). Natürliche Bewegungen geschehen von selbst und bedürfen keiner Ursache. Sie liegen sozusagen in der Natur des sich bewegenden Körpers. Das sind am Himmel – der göttlichen Sphäre – als vollkommene geometrische Form Kreise und auf der Erde die Bewegung nach unten, d. h. der Fall. Eine unnatürliche oder gewaltsame Bewegung kommt nur dadurch zustande, dass ein Gegenstand durch »Gewaltausübung« dazu gezwungen wird, z. B. wenn ein Stein durch die Hand des

Werfers dazu gezwungen wird, sich nach oben zu bewegen. *Kraft* ist also für ihn eine unmittelbare Einwirkung (oder »Gewaltausübung«) *hier und jetzt* auf einen Gegenstand. Kraft in diesem Sinne hat sowohl eine Richtung – die, in die man den Gegenstand zu bewegen versucht – als auch eine Größe: Die Einwirkung kann schwächer oder stärker sein. Sie ist also nach modernem Sprachgebrauch ein Vektor.

Kraft ist Gewalt-
ausübung hier
und jetzt

Dass er im Fallen eines Gegenstands hingegen keine Kräfte sieht, ist nur konsequent: Man sieht ja nichts, was direkt an dem Gegenstand angreift, auf ihn einwirkt. Darin unterscheidet er sich vom Newtonschen Kraftbegriff (siehe nächsten Abschnitt). Wichtig für das moderne Verständnis von Kraft sind zwei Aspekte. Zum einen ist Kraft eine *Tätigkeit*: Man kann sie ausüben, aber nicht besitzen. Eine Kraft liegt also nur in dem Zeitraum vor, in dem diese Tätigkeit ausgeübt wird. Zum anderen bezeichnet Kraft eine *Ursache* von Bewegung. Mit diesem Aristotelischen Konzept von Kraft wird völlig klar, dass der Schwung nach oben beim Wurf keine Kraft ist: Es wird ja an dieser Stelle zu diesem Zeitpunkt keine Gewalt ausgeübt. Die Kraft hört auf zu wirken, unmittelbar, nachdem der Gegenstand die Hand verlassen hat. In den Aufgaben 1 und 2 wirkt deshalb ausschließlich die Schwerkraft senkrecht nach unten, in der Aufgabe 3 zusätzlich noch die Kraft des Fadens radial nach innen (er wirkt auf die Kugel ein, indem er ihn hält). Der Leser sollte mithilfe dieser Erläuterung nun versuchen, das nachstehende Aufgabenblatt zu lösen (Lösungen siehe im Anhang D).

Kraft ist eine Tätigkeit

Aufgabenblatt Nr. 1b

Aufgabe Nr. 4:

Ein Autofahrer fährt gegen eine Wand. Der Fahrer ist angeschnallt, aber der Koffer auf der Rückbank fliegt nach vorne.

Geben Sie wieder alle Kräfte (mit Richtung) an, die auf den Koffer wirken, nachdem er die Rückbank verlassen hat, aber bevor er irgendwo aufprallt.

Aufgabe Nr. 5:

Eine Kugel rollt eine schiefe Ebene hinab (siehe Zeichnung).



Die Fragestellung ist die gleiche wie in Aufgabe 1.

Aufgabe Nr. 6:

Eine Rakete kurz nach ihrem Start: Geben Sie alle Kräfte (mit Richtung) an, die auf sie wirken.

Schwung oder Impuls ist
das dauerhafte Resultat
einer Kraft

Es bleibt natürlich die Frage, warum die Kugel in der Aufgabe 1 sich nach oben bewegt, obwohl doch zu diesem Zeitpunkt keine Kraft mehr nach oben auf sie wirkt. Offensichtlich ist der Schwung, den die Kugel nach dem Aufhören der Kraft hat, das Ergebnis des Hochwerfens, d. h. der Kraft, die vorher ausgeübt wurde. Der Schwung erscheint demnach als Nachwirkung oder Erinnerung an die Krafteinwirkung, sozusagen als ein **Gedächtniseffekt** (dabei wurde vorausgesetzt, dass jede Geschwindigkeit, die ein Körper besitzt, Resultat einer einmal eingewirkten Kraft sein muss). Nachwirkung oder Gedächtnis werden besonders sinnfällig in der Momentaufnahme eines Balles (Abb. 1.1).

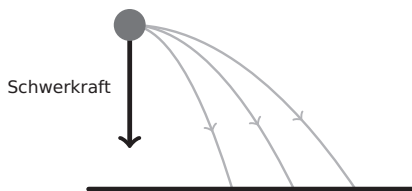


Abb. 1.1 Momentaufnahme eines Balles; die dünnen Linien geben die weitere Bewegung zu verschiedenen Anfangsgeschwindigkeiten an

Obwohl die momentane Position des Balles und alle Kräfte eingetragen sind, weiß man nicht, wie er sich weiterbewegen wird. Eingezeichnet sind drei von unendlich vielen Möglichkeiten. Ohne dass man die Vorgeschichte kennt, ist eine Vorhersage schlicht nicht möglich, es sei denn der Gegenstand ist auf der Momentaufnahme durch hohe Geschwindigkeit verwischt (dann ist es aber nicht wirklich eine Momentaufnahme).

Bei Comics wird dieser Defekt durch das Standardmittel der »speed lines« behoben (Abb. 1.2).

1.1.2 Gedächtniseffekt

Der Schwung oder Impuls hat wie die *Kraft* eine Richtung, nämlich die der momentanen Bewegung, und eine Größe. Der Schwung ist natürlich umso größer, je höher die Geschwindigkeit ist. Er ist aber auch umso größer, je größer die Masse des Gegenstandes ist: Schließlich braucht es mehr Kraft, um einem schweren Gegenstand die gleiche Geschwindigkeit zu erteilen wie einem leichten. Der Betrag des Schwungs enthält also sowohl die Masse wie die Geschwindigkeit des Gegenstandes. Es fragt sich nun, wie lange diese Nachwirkung bzw. das Gedächtnis anhält. Aus der alltäglichen Erfahrung würde man schließen, dass das Gedächtnis mit der Zeit nachlässt: Schließlich kommt jeder Gegenstand einmal zur Ruhe und jeder hochgeworfene Ball erreicht irgendwann seinen höchsten Punkt und kommt wieder herunter. Das ist jedoch ein Trugschluss: In beiden Fällen mischen sich weitere Kräfte (zusätzlich zu der, die den Gegenstand in Bewegung brachte) ein. Im zweiten Fall ist das die Schwerkraft, im ersten Fall die Reibung. Dass Reibung eine Kraft, eine Gewaltausübung ist, mag im ersten Augenblick wenig



Abb. 1.2 »speed lines« (Zeichnung: Julia Wiens)

einleuchtend erscheinen, wird aber deutlich, wenn man bedenkt, dass z. B. ein in die Atmosphäre eintretendes Objekt durch die Luftreibung zum Verglühen gebracht werden kann. Dass Schwerkraft eine Kraft ist, ist weniger offensichtlich. Sie verletzt in der Definition des *hier und jetzt* das *hier* (mehr dazu im Abschnitt 1.3.1).

Was man wissen möchte ist: Lässt das Gedächtnis an eine Kraft, die einmal war, *von selbst* nach, d. h. ohne dass irgendeine weitere Kraft auftritt? Die experimentelle Antwort lautet: Nein! Das Gedächtnis hält ewig. Das folgende Gedankenexperiment hilft vielleicht dabei, sich dieses Resultat zu veranschaulichen (Abb. 1.3).

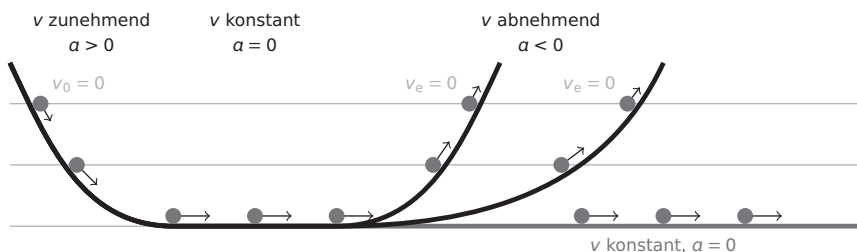


Abb. 1.3 Reibungsfreie Bewegung bei verschiedenen Muldenformen

Eine Kugel rölle in einer Mulde hin und her. Ohne Reibung kommt die Kugel auf der rechten Seite offenbar genauso hoch wie auf der linken. Macht man den rechten Teil immer flacher, bewegt sich die Kugel immer weiter nach rechts, um auf die gleiche Höhe zu kommen. Im Grenzfall, dass die rechte Seite eben verläuft, bewegt sich die Kugel ewig mit konstanter Geschwindigkeit weiter, weil sie nie die gleiche Höhe wie auf der linken Seite erreichen kann. Der Schwung ist also – im Gegensatz zur Kraft – eine Eigenschaft, die der Körper hat: Schwung kann man besitzen.

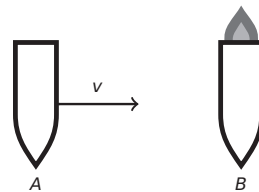
Schwung ist eine
Eigenschaft.
Ein Gegenstand
besitzt Schwung.

Was geschieht mit dem Gedächtnis, wenn eine weitere Kraft hinzutritt? Dazu betrachte man die Aufgaben des Aufgabenblattes II, die der Leser zu lösen versuche, bevor er weiter liest.

Aufgabenblatt Nr. II

Aufgabe Nr. 7:

Eine Rakete bewegt sich bei abgeschaltetem Antrieb seitlich von *A* nach *B* (siehe Zeichnung). Im Punkt *B* wird der Antrieb für einige Sekunden eingeschaltet.



Wie bewegt sich die Rakete von Punkt *B* aus?

Wie bewegt sie sich nach Abschalten des Antriebs?

(Nehmen Sie an, dass die Rakete frei im Weltraum weit weg von irgendwelchen Planeten fliegt)

Aufgabe Nr. 8:

Die Fragestellung ist die gleiche wie in Aufgabe 7 mit dem Unterschied, dass der Schub der Rakete in eine andere Richtung wirkt (siehe Zeichnung).



Aufgabe Nr. 9:

Die Fragestellung ist die gleiche wie in Aufgabe 8 mit dem Unterschied, dass der Schub der Rakete nun nicht mehr abgeschaltet wird.

In Aufgabe 7 zeigt es sich, dass die Bewegung nach rechts unabhängig vom einsetzenden Raketenschub einfach weitergeht, als wäre nichts gewesen. Nach dem Abschalten in *B* setzt sich die Bewegung zusammen aus der