



$$E=mc^2$$

Physik für Höhlenmenschen

SACHBUCH



Springer Spektrum

$E=mc^2$: Physik für Höhlenmenschen

Jürgen Beetz

$E = mc^2$: Physik für Höhlenmenschen



Springer Spektrum

Jürgen Beetz
Berlin
Deutschland

ISBN 978-3-642-54408-8
DOI 10.1007/978-3-642-54409-5

ISBN 978-3-642-54409-5 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Planung und Lektorat: Andreas Rüdinger, Martina Mechler

Redaktion: Martin Radke

Einbandabbildung und Kapiteleroöffnungsbilder: Joanna Hegemann, Hamburg: (<http://www.joanna4illu.de/>)

Grafiken: Dr. Martin Lay, Breisach a. Rh.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-spektrum.de

Vorwort

Die Physik ist der ernsthafteste Versuch des Menschen, die Welt zu verstehen.

Peter Grünberg, Nobelpreis für Physik 2007

Naturwissenschaft ist letztlich nichts anderes als ein Versuch des Menschen, Klarheit zu gewinnen über seine eigene Rolle, seine Stellung im Ganzen.

Hoimar von Ditfurth: *Kinder des Weltalls. Der Roman unserer Existenz*

Dies ist das zweite „Höhlenmenschen“-Buch, das sich nun mit Physik beschäftigt – sozusagen bereits Teil einer kleinen Serie. Zweck einer Buchreihe ist ja auch ein Wiedererkennungswert und eine gewisse Ähnlichkeit untereinander. Deswegen sind auch Wiederholungen nicht nur zulässig, sondern z. T. auch wünschenswert oder notwendig. Daher steht auch in diesem Vorwort manches, was die Leser des ersten Buches bereits kennen. Sollten Ihnen also Eddi, Rudi, Sigg und natürlich und vor allem Willa bereits vertraut sein, dann lesen Sie über ihre Vorstellung einfach hinweg.

Einige haben das Buch „ $1 + 1 = 10$ – Mathematik für Höhlenmenschen“ vielleicht *nicht* gelesen (ein schweres Versäumnis, das sich jetzt bitter rächt). Dort sind die mathematischen Grundkenntnisse beschrieben, die man für die Physik braucht. Denn Mathematik ist die notwendige Voraussetzung für Physik. Brüche zum Beispiel sollten Ihnen nicht unbekannt sein, auch nicht deren Zähler und Nenner. Wenn letzterer gegen null tendiert, sollten bei Ihnen die Warnlampen angehen. Und ähnliches Grundwissen ... Denn das ist die schlechte Nachricht: Das Werkzeug der Physiker ist die Mathematik – wie die Rohrzanze für den Installateur. Sie sollten damit umzugehen wissen.

Die gute Nachricht ist: Physik versteht man auch, wenn man mal eine Zeile nicht nachrechnen kann. Sie beschreibt die reale Welt, die uns umgibt, und fasst sie in Gesetze – daher ist sie auch unserer Umgangssprache zugänglich. Für Profis ist Mathematik die „Sprache der Physik“: Manipulation von Formeln und Gleichungen, Koordinatensysteme und Funktionen, Sinus und Kosinus, Differenzial- und Integralrechnung, ... – und ein paar Dinge mehr, aber insgesamt überhaupt nichts Beängstigendes. Niemand verlangt Höhenflüge von Ihnen – ein paar mathematische Grundlagen reichen aus. Und das auch nur, wenn Sie jede Einzelheit nachvollziehen wollen. Physikalische

Zusammenhänge erschließen sich auch dem gesunden Menschenverstand und einer rein sprachlichen Beschreibung. Also lehnen Sie sich zurück und genießen Sie einfach spannende Entdeckungsgeschichten!

Die Kunst, Physik zu erklären, ohne den Leser und die Leserin zu erschrecken, muss etwas Wichtiges berücksichtigen: Unser Gehirn in seiner heutigen Form ist etwa 40.000 Jahre alt und hat sich seitdem biologisch nicht wesentlich verändert. Wir werden von Trieben und Begierden gesteuert – Hunger, Durst, Sexualtrieb, Geltungssucht, Kommunikationsbedürfnis und Machtgier – die „kulturelle Evolution“ hat dem nur ein rationales Mäntelchen übergestülpt. Denn wir sind „im Grund noch immer die alten Affen“.¹

Erfreulicherweise gehören „Neugier“ und „Wissensdurst“ auch zu diesen Grundantrieben – so hat sich das spielerische, nur zum Teil an den Problemen und Erfordernissen des Alltags orientierte Denken entfaltet. Daran möchte ich auch die Linie dieses Buches entwickeln. Es sollen nicht nur die einfachen, fast gefühlsmäßig zu erfassenden physikalischen Fragen des täglichen Lebens beantwortet werden. Ich möchte auch die Lust wecken, mehr zu wissen und weiter zu denken, als es zur Lösung der Aufgabe erforderlich gewesen wäre.

Deswegen kann ich bei dem Versuch, Physik „begreiflich“ zu machen, erneut in die Steinzeit zurückgehen – genauer gesagt: etwa in die Jungsteinzeit, zufällig 7986 v. Chr., also vor genau 10.000 Jahren. Ackerbau und Viehzucht hatten schon begonnen. Dorfgemeinschaften, Rundhäuser und eine arbeitsteilige Gesellschaft existierten bereits. Dort treffen Sie Rudi Radlos, den Physiker (die paradoxe Bedeutung dieses Namens wurde im ersten Buch erklärt) und seinen Freund Eddi Einstein, den Denker (wie konnte ein Topmathematiker in der Jungsteinzeit auch anders heißen!?). Ein *dritter* Geselle gehörte zu der Truppe: Siggis Spöckenkieker, der Druide und Seher.² Warum nun alle Namen auf „i“ enden – diese Frage beschäftigt noch die Historiker. Man vermutet, dass ein lang gezogenes „i“ („Komm mal her, Rudiiii!“) in der damals noch unverschmutzten Luft am weitesten zu hören war – aber daran arbeiten die Paläontophysiker noch.

Siggis Rolle ist eine bedeutende: Man glaubte damals noch an Determinismus und Vorbestimmung – da traf es sich gut, dass der Seher mit der Gabe der Präkognition gesegnet war.³ So können wir Rudi und Eddi mit Erkenntnissen ausstatten, die erst Jahrtausende später von bedeutenden Philosophen, Mathematikern und Physikern erlangt worden waren.

Die wahre Meisterin der Wissenschaft ist jedoch Wilhelmine Wicca, meist „Willa“ genannt. Sie ist die erste Mathematikerin der Geschichte und würde

es auch lange bleiben.⁴ Zu Unrecht, wie man weiß, benutzt eine Frau doch nicht nur eine, sondern *beide* Gehirnhälften. Und da durch diese Verbindung nach den Regeln der Systemtheorie ein neues Gesamtsystem entsteht („Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile“), ist es nicht verwunderlich, dass Willa so klug war wie die drei Kerle *zusammen*. Deshalb galt sie auch als Hexe⁵ – was damals ein Ehrentitel war – und als weise Frau.

Wir werden die Gedankengänge und Erfahrungen unserer Vorfahren hier verfolgen und nachvollziehen. Ich werde schwierige Gedanken nicht nur in einfache Worte kleiden, sondern sie in kleine verdaubare Häppchen zerlegen. Ein kompliziertes Problem bleibt nämlich kompliziert, auch wenn man es einfach nur umgangssprachlich ausdrückt. Erst die Verringerung des Schwierigkeitsgrades durch Zerlegung in einzelne Teilprobleme schafft Klarheit – ein Vorgehen, das seit jeher zum Prinzip der Naturwissenschaft gehört.

Physik ist eine exakte Wissenschaft – mit kleinen „Löchern“, die wir noch thematisieren werden. Sie zeichnet sich auch durch eine präzise Schreibweise aus und verschiedene typographische Regeln, die beachtet werden sollten. Aber an diesem Konjunktiv merken Sie schon: *so* ernst wollen wir das hier nicht nehmen. So werden hier manchmal mathematische Größen (wie es in Fachbüchern üblich ist) klein oder groß oder kursiv oder steil geschrieben, manchmal aber auch nicht. Da Sie ja mitdenken, wird Sie das nicht verwirren. Und die kursive Schreibweise verwenden wir auch (wie Sie drei Sätze weiter oben sehen), um etwas zu betonen und hervorzuheben.

Physik durchzieht unseren Alltag und ist mit den zentralen Fragen unseres Lebens verbunden: Was hängt wie zusammen? Welche Gesetze bestimmen das Dasein des Menschen und der Natur? Welche Strukturen gibt es und wie kann der menschliche Geist sie in Erkenntnisse umformen? Wie ziehen wir aus unseren Wahrnehmungen angemessene und logische Schlüsse?

Auch muss ich dem Autor Dietrich Schwanitz widersprechen. Er schreibt in seinem Buch „Bildung“ freimütig:⁶ „Die naturwissenschaftlichen Kenntnisse werden zwar in der Schule gelehrt; sie tragen auch einiges zum Verständnis der Natur, aber wenig zum Verständnis der Kultur bei. ... So bedauerlich es manchem erscheinen mag: Naturwissenschaftliche Kenntnisse müssen zwar nicht versteckt werden, aber zur Bildung gehören sie nicht.“ Nein, finde ich, sie sind immens wichtig zum Verständnis der Kultur – die Wendung vom erdzentrierten Weltbild des Mittelalters (und der Kirche) zur modernen kopernikanischen Erkenntnis der Neuzeit, wonach die Sonne im Mittelpunkt unseres Planetensystems steht, hat unser gesamtes Denken und unsere Kultur

beeinflusst. Naturwissenschaften prägen unser gesamtes Weltbild, zum Leidwesen vieler Dogmatiker, die im Mittelalter stehen geblieben sind. Aber ich möchte nicht polemisieren, ich möchte *begreiflich* machen. Deswegen habe ich bei vielen Fachbegriffen auch die sprachlichen Wurzeln ausgegraben. Da ein „gebildeter“ Mensch *Vincent van Gogh* nicht für einen niederländischen Fußballspieler hält, sollte er auch *Gottfried Wilhelm Leibniz* nicht die Erfindung eines Butterkekses zuschreiben. Apropos „Bildung“: Das Buch enthält mehr oder weniger Stoff einer höheren Schule – nur *reloaded and remixed*. Also nichts, was man nicht bewältigen könnte.

Ich habe versucht, Ihnen hier die Grundlagen der Physik zu zeigen. Dabei will ich Ihnen nur die (aus meiner subjektiven Sicht) wesentlichen *Basics* vermitteln. Physik ist ein riesiges Gebiet, das sich unmöglich in einem kleinen Büchlein abhandeln lässt. Sie werden schnell erkennen, wo meine persönlichen Präferenzen liegen. Damit es nicht allzu technisch wird, habe ich öfter Formeln und Einzelheiten weggelassen und lieber auf die interessante und oft langwierige und von Irrtümern begleitete Entdeckungsgeschichte geschaut. Sicher werden einige Fachleute sagen: „Wo steht denn etwas über XYZ? Das gehört doch hierher!“ Unbescheiden könnte ich Goethe zitieren: „In der Beschränkung zeigt sich erst der Meister!“ Aber eher danke ich meinen Lektoren Martina Mechler und Dr. Andreas Rüdinger für ihren freundlichen Warnhinweis: „Sie können über alles schreiben, nur nicht über 350 Seiten!“

Viele Lerninhalte sind auch seit meiner Schulzeit verschüttet worden. So bin ich besonders Herrn Dr. Martin Radke, Lektorat Textgärtnerei in Bremen, für seine fachliche Korrektur sowie wertvolle Anregungen verpflichtet. Dr. Oscar Bandtlow, Physiker und Dozent für angewandte Mathematik an der *University of London* (UK) hat ebenso wichtige Beiträge geliefert wie Prof. Dr. Helmut Föll vom Institut für Materialwissenschaft der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, die ich (zum Teil) wörtlich und (immer) respektvoll übernommen habe. Auch die intensive fachliche Betreuung von Dr. Andreas Rüdinger hat mir sehr geholfen. Nun sind alle Fehler beseitigt – bis auf die, die wir trotz größter Mühe übersehen haben. Und ich bekenne mich zu meiner genetischen Vorbelastung, indem ich mich bezüglich Gliederung und Inhalt auf den „Leitfaden der Physik“ meines Ururgroßvaters stütze.⁷ Damit sind Sie, meine verehrten Leserinnen und Leser, auf dem exakten Stand der Erkenntnis der Dinge, die man wissen sollte. Genießen Sie es!

Gehen wir nun in die Steinzeit zurück und lernen wir etwas über die Gegenwart (und sogar die Zukunft)! „Physik“ bedeutet ja – dem altgriechischen Ursprung des Wortes folgend – die „Naturforschung“. Damit Sie das nicht als

Mühe empfinden, habe ich es in unterhaltsame Geschichten verpackt. Also machen wir uns auf die Reise ins Neolithikum ...

Doch an Eines werden Sie schon stirnrunzelnd gedacht haben: Wie konnten Menschen vor 10.000 Jahren schon so weit entwickelt gewesen sein – ohne Metalle, ohne Maschinen, ohne Technik? Wie wahr! Was auf dem Gebiet der Mathematik noch gerade eben vorstellbar war – scharfsinnige Denker, die die Erkenntnisse späterer Jahrtausende vorwegnahmen –, wird unter diesem Aspekt zunehmend unwahrscheinlich. Warten Sie ab und seien Sie gespannt, wie ich mich aus der Affäre ziehe! Und bleiben Sie kritisch mit wachem Verstand. Nicht alles, was gedruckt ist, ist auch wahr. Vielleicht nicht einmal der vorstehende Satz. Damit lasse ich Sie jetzt allein ...

Jürgen Beetz, Mai 2014 (10.000 Jahre nach diesen Geschichten)
Besuchen Sie mich auf meinem Blog <http://beetzblog.blogspot.de>:



Inhalt

Vorwort	V
Inhalt	XI
1 Was bisher geschah und wie Rudi zur Physik kam	1
2 Rudi Radlos und die einfachen Dinge	5
2.1 Messung von Raum, Zeit und Kraft	6
2.2 Grundbegriffe von Kraft und Bewegung	10
3 Kräfte bewegen die Welt	19
3.1 Statik: Zusammensetzung von Kräften	20
3.2 Dynamik: Bewegung durch Kräfte	29
3.3 Impuls, Energie und Arbeit	36
3.4 Die Welt ist voller Energie	49
4 Kräfte verändern Körper	57
4.1 Elastizität bei Zug und Drehung	58
4.2 Kräfte in Luft und Wasser	65
5 Rudi R. schwitzt und friert	75
5.1 Wärme wirkt auf Körper	76
5.2 Wärme wird gespeichert und verrichtet Arbeit	79
5.3 Wärme verändert Körper	85
5.4 Die Wärme-Grundgesetze	91
6 Rudi kann auch Lärm machen	97
6.1 Die Regeln der Töne	98
6.2 Wellen und ihre Gesetze	102
7 Geheimnisvolle Kräfte aus der Zukunft	109
7.1 Unsichtbare Kräfte, sichtbare Effekte	110
7.2 Elektrizität und Magnetismus sind Zwillinge	121
7.3 Wirkungen auf Körper und Materie	129
7.4 Elektromagnetische Wellen und ihr Verhalten	134
8 Erkenntnis erleuchtet, Licht erhellt	143
8.1 Das Wesen des Lichtes und seine Gesetze	144
8.2 Lichteffekte und ihre praktischen Anwendungen	151
8.3 Wie schnell ist das Licht und was ist es überhaupt?	158

9	Das Universum von innen	165
9.1	Materie wird in ihre Bestandteile zerlegt	166
9.2	Woraus besteht das „Nichts“ der Materie?	172
9.3	„Quanten“ sind keine großen Schuhe	185
9.4	Warum hält das alles zusammen?	201
10	Das Universum von außen	207
10.1	Was fliegt da eigentlich so herum?	208
10.2	Warum hält auch das alles zusammen?	219
10.3	Wieso fliegt das Universum dennoch auseinander?	225
10.4	Der Kosmos besteht aus Teilen, die aus Teilen bestehen	233
10.5	Die wohl berühmteste Formel der Welt	239
10.6	Und wo kam das Universum überhaupt her?	250
11	Physik und Metaphysik	263
11.1	Theorien sind gut, Experimente sind besser	265
11.2	Philosophie und Spiritualität	276
11.3	Große Fragen der Physik.	285
11.4	Das physikalische Quartett	293
	Anmerkungen	303
	Stichwortliste und Register	351

1

Was bisher geschah und wie Rudi zur Physik kam

Mathematik als Hilfsmittel der Physik



Was bisher geschah (oder für exakte Historiker: hätte geschehen können), ist schnell erzählt. Eddi, der Mathematiker, wurde bei einem neuen Stamm aufgenommen, nachdem seiner von hirnlosen Barbaren vernichtet worden war. Er hatte Zahlen, Schrift und Geld erfunden, sein neuer Freund Rudi den Meter (aus einem Streit um die Länge des Fußes des Druiden). Andere Ereignisse, die sich heute näherungsweise mathematisch erfassen lassen – wirtschaftliche Erschütterungen, die Kurskapriolen an der SILEX-Börse, Zufallsereignisse –, spielten auch damals schon eine Rolle.

Willa, weise Frau und Hexe, hatte es Eddi angetan – nicht nur durch ihre Klugheit, sondern auch durch ihre liebenswerte Art. Er hatte sich in sie verknallt. Aber da sie die Frau des Stammesführers war, verbot sich jede Annäherung. Doch der Wunsch, ihr zu gefallen, spornte ihn zu immer weiteren Entdeckungen in der Mathematik an.

Nach ungefähr zwei Jahren der vorwiegend theoretischen Höhenflüge in die Mittelgebirge der Mathematik kam das, was kommen musste. Siggie hatte es natürlich vorausgesehen, aber – wie meist – seine Vorsehung nicht öffentlich verkündet und auch den Betroffenen nicht mitgeteilt.

Rudi begegnete seinem Freund Eddi mit unwirscher Miene und kam sofort zur Sache: „So, jetzt habe ich langsam die Nase voll von all dem Formelkram und theoretischen Zeugs! Zahlen und Mengen, Rechnen und Symbole, Zinsen und Prozente, Potenzen und Wurzeln, Geometrie und Algebra, Koordinaten und Funktionen, Gleichungen und Beweise, Iteration und Rekursion, Differenzieren und Integrieren, Zufall und Chaos und so weiter ... Wer braucht das schon?!“ Eddi hatte unbeeindruckt auf eine Pause zum Atemholen gewartet und konterte: „*Du* hast das gebraucht. Für all deine physikalischen Experimente, wie den Regelapparat bei deinem Wassertrog. Für die Ermittlung der Fallgesetze. Ich will dir ja nicht alles aufzählen, wozu der Physiker die Mathematik benötigt.“ Rudi ließ aber nicht locker: „Das zeigt es ja: Mathematik ist eine Hilfswissenschaft. *Wir* lösen die Probleme des täglichen Lebens. Wir brauchen *euch* nur zur Unterstützung.“ Eddi grinste böseartig: „Die Physik braucht die Mathematik – aber die Mathematik braucht die Physik nicht. Also mach’ dich nicht so dick! Das Buch der Natur ist in der Sprache der Mathematik geschrieben.“⁸

Wie viele etwas zu klein geratene Pykniker war Rudi nicht zu stoppen – wie immer, wenn er sich etwas in den Kopf gesetzt hatte: „Egal! Mit Mathematik ist jetzt erst einmal Schluss. Ich will etwas Praktisches machen, etwas Naturverbundenes, etwas Brauchbares. Ich konzentriere mich jetzt auf die Physik. Du kannst mitmachen oder weiter über unendliche Summen unendlich kleiner Größen nachdenken, hihi!“

Eddi dachte kurz nach. Die Freundschaft aufs Spiel setzen ...? Allein forschen müssen, ohne interessante Diskussionen ...? Und überhaupt, Rudi würde sich noch wundern – unendliche Summen unendlich kleiner Größen würden ihm früher über den Weg laufen, als ihm lieb war ... „Na gut!“, sagte er und hieb dem Kumpel auf die Schulter, „Dann machen wir das. ‚Physik‘, was ist denn das überhaupt?“

„Das ist einfach“, sagte Rudi, „Im Gegensatz zur Mathematik nichts Abstraktes, sondern etwas Konkretes. Ihr denkt, wir machen. Wir erforschen Naturerscheinungen mit wissenschaftlichen Methoden.“ „Und denkt dabei

nicht?“, grinste Eddi. „Na jaa, schon ... Wir bilden uns ein theoretisches Modell, eine physikalische Theorie. Dann aber hat das trockene Grübeln ein Ende. Der mathematische Beweis wird durch das Experiment, den Versuch ersetzt. Klappt er, ist die Theorie bewiesen. Klappt er nicht, ist sie widerlegt.“

Eddi grinste immer noch: „Was, *ein* Versuch soll eine Theorie beweisen?! Was ist, wenn er nur zufällig gelingt?“ „Na jaa, wir machen natürlich eine ganze Versuchsreihe, variieren verschiedene Kenngrößen dabei. ‚Parameter‘ sagt Sigggi dazu, ich habe mich erkundigt. Und Physikerkollegen wiederholen das Experiment, damit man mir nicht nachsagen kann, ich hätte geschummelt. Aber *ein* Gegenbeispiel genügt, um die Theorie zu Fall zu bringen.“

„Deine Theorien und Versuche vereinfachen die reale Welt aber gewaltig. Deine schiefe Ebene hat Reibung, die du vernachlässigst. Dein Pendel hat ein Seil, dessen Gewicht du nicht berücksichtigst. Deine Fallversuche berücksichtigen nicht den Widerstand der Luft. Also eigentlich ist die ganze Physik nur eine Abstraktion.“ „Na jaa, das ist schon wahr. Aber der Fehler ist klein, und wir geben auch immer an, wie genau unsere Ergebnisse sind.“

Eddis gute Laune nahm nicht ab: „Das sind aber ziemlich viele ‚Na jaa‘'s. Ich glaube, du kannst deinen Standpunkt nicht aufrechterhalten. Und, nebenbei, ein Standpunkt ist ein Gesichtskreis vom Radius null!“⁹

Bevor Rudi antworten konnte, tauchte Willa „zufällig“ auf (Sigggi hatte das Gespräch zwischen Eddi und Rudi offensichtlich telepathisch empfangen) und fragte, noch lächelnd: „Nun, ihr Beiden ... Ein neues Projekt?!“ Rudi ging in die Falle: „Ja, warum nicht?! Die Wissenschaft muss voranschreiten.“

Willa bekam diese von allen gefürchtete senkrechte Falte zwischen den Augenbrauen und fragte streng: „Was denkt ihr euch eigentlich?! Zwischen-durch frage ich mich, wovon ihr eigentlich den ganzen Tag lebt. Könnten die Damen des Dorfes, die euch täglich mit mühsam gezogenen und geernteten Feldfrüchten versorgen und bekochen, nicht ab und zu eine praktische Nutzenanwendung eurer hehren wissenschaftlichen Tätigkeit erwarten?“¹⁰ Rudi grinste: „Arbeitsteilung. Wir leben ja schließlich nicht mehr im Paläolithikum!“ Willas Falte wurde tiefer: „Wo hast du denn dieses Wort her?! In Umgehung des Dienstweges mit Sigggi gesprochen?? So geht es aber nicht!“

Nun war Gefahr im Verzuge ... Rudi wollte sein Vorhaben nicht gefährden und war einsichtig genug, Willas Kritik zu akzeptieren: „Nun gut, gib uns ein wenig Zeit für die theoretischen Grundlagen. Danach wird die Physik jede Menge nützliche Anwendungen für unseren Stamm hervorbringen. Versprochen! Denn eigentlich bin ich ja ein Ingenieur: jemand, der scharfsinnige und sinnreiche Erfindung macht.“¹¹ Und Eddi nickte dazu.

Willa lächelte wieder, und Eddis Herz schlug höher: „Ich behalte euch im Auge, Jungs!“

2

Rudi Radlos und die einfachen Dinge *Mechanik, Masse und Materie*



Wie wir noch genauer sehen werden, besteht die physische „Welt“ aus drei Kontinenten: Mikronesien, Mesonesien und Makronesien.¹² Der erste Kontinent ist die Welt der Atome, auf dem zweiten leben wir und der dritte ist das gesamte Universum.¹³ Auf den drei „Kontinenten“ gelten zum Teil dieselben, zum Teil andere Gesetze – anders als in der Mathematik.¹⁴ Dort gelten alle Regeln überall, auch für die kleinsten oder die größten Zahlen. Aber die Physik ist die reale Welt, die Mathematik die Welt der Ideen, des bloß Gedachten (nach dessen Regeln die reale Welt komischerweise funktioniert). *Size matters* (es kommt auf die Größe an), „die Dosis macht das Gift“, „mehr ist anders“ – das sind die gängigen Sprüche zu diesem Thema.¹⁵

Natürlich gibt es auch in der Physik die „Skaleninvarianz“, also Gegebenheiten, die sich in alle Größenordnungen transformieren lassen. Andernfalls könnten wir z. B. keine kleinen Modelle von großen Dingen bauen und damit ihr Verhalten studieren. Bei den Aufgaben der Messung physikalischer Größen unterscheiden sich die drei Welten oft gravierend. Wir messen Entfernungen in unserer „Mittelwelt“ mit dem Zollstock (mal salopp gesagt) – ein Verfahren, das sich im atomaren Bereich ebenso wenig eignet wie in fernen Galaxien. Auch von der Gravitation, der gegenseitigen Anziehung von Massen, merken wir im Alltag nichts (natürlich abgesehen von der allgegenwärtigen Erdanziehung) – aber sie hält unser Sonnensystem zusammen. Auch das ist wieder zu salopp gesagt, deswegen werden wir später hier noch genauer hinschauen.

Beschäftigen wir uns zuerst mit der Mechanik. Mechanik ist der Zweig der Physik, der die Bewegungen der Körper unter dem Einfluss von Kräften untersucht. Ihre Aufgabe ist es, die mechanischen Zusammenhänge mathematisch zu formulieren und Lösungsmethoden für mechanische Fragestellungen bereitzustellen.¹⁶ Und – Voraussetzung für alle Experimente – sie überhaupt erst einmal korrekt zu *messen*.

2.1 Messung von Raum, Zeit und Kraft

Rudi hatte sich von Willa einige pädagogische Tipps geben lassen. Daraufhin beschloss er, mit einem einfachen Thema anzufangen: dem Messen von Entfernungen. So begann er: „Natürlich hat auch in der Physik der Raum drei Dimensionen, genau wie in der Mathematik. Warum sollte es auch anders sein? Wir messen Länge, Breite und Höhe und benutzen dazu einen Vergleichsmaßstab: den Meter. Unser Meter hat schöne Kerben, an denen wir kürzere Längen ablesen können. Nun muss ich dich schon auf eine Gepflogenheit der Physiker hinweisen: Korrekterweise geben wir alle Maße immer zusammen mit ihrer Maßeinheit und der Messgenauigkeit an.“ „Na schön“, sagte Eddi, „das ist ja nichts Neues. Physikalisch gesehen bist du nicht 1,50 groß – ein kleiner dicker Knubbel – sondern $1,50 \pm 0,01$ m, weil ich nur auf einen Zentimeter genau ablesen kann.“¹⁷ Und ohne die physikalische ‚Dimension‘, wie man die Maßeinheit auch nennt, sagt eine Zahl nichts aus.“¹⁸ „Na prima“, grinste Rudi, „kaum hast du es verstanden, schon machst du es richtig.“ „Das hatten wir schon vor zwei Jahren: Jede Messung ist ohne die Kenntnis ihrer Genauigkeit völlig bedeutungslos. Jetzt wollen wir uns dabei nicht aufhalten, lass uns weitermachen.“¹⁹

Eigenschaften von Körpern werden gemessen

„Ja, wir Physiker interessieren uns für die messbaren Eigenschaften der Körper. Wir wollen nicht wissen, ob sie schön sind, und wir wollen auch nicht sagen, dass sie ‚schwer‘ sind. Wir möchten angeben, *wie* schwer sie sind – in einer eigens dafür geschaffenen Maßeinheit.“ „So ist es“, sagte Eddi, „der mathematische Körper hat ein Volumen, ist aber nur gedacht. Der natürliche, also physische Körper hat auch ein Volumen, aber dieses ist mit Stoff gefüllt. Den nennen wir ‚Materie‘. Sie verleiht dem Körper gewisse Eigenschaften, zum Beispiel eine bestimmte Festigkeit.“ Rudi nickte und Eddi fuhr fort: „Ihr sagt ja auch nicht: ‚Das hat aber lange gedauert‘, sondern gebt es in der passenden Maßeinheit an.“ „Ja“, sagte Rudi stolz, „und ich habe eine besonders fixe Sanduhr dafür entwickelt. Sie misst ein Sechzigstel eines Sechzigstels einer Stunde, und ich nenne es ‚Sekunde‘. Aber zurück zu den Körpern: Ihre träge Masse, mit der sie sich einer Geschwindigkeitsänderung widersetzt, wird in Kilogramm angegeben. Durch die Erdbeschleunigung erhält die Masse ein Gewicht, also eine Kraft, mit der sie auf die Erde drückt. Man nennt sie deswegen auch die schwere Masse – so wie bei dir. Das müssen wir aber noch genauer betrachten.“ „Ich hoffe nur, deine Physik bleibt weiterhin so einfach!“, sagte Eddi und verdrehte die Augen.

„Ja, aber *warum* verwenden wir diese Maßeinheiten?“, wollte Eddi dann wissen. „Tja, zum Teil ist es willkürlich, historisch gewachsen, ein Einigungsprozess“, erklärte Rudi, „Wir haben uns auf den Meter geeinigt, die Größe dreier mittlerer Füße unseres Stammes, und das Kilo ist ziemlich genau das Gewicht eines Laibes Ziegenkäse. Die Gelehrtenkommission der Stammesführerkonferenz hat es abgesegnet.“²⁰ Der Meter hängt als Referenz an der Hütte unseres Anführers. Bei der Zeitmessung sind die Dinge komplexer: Schon unsere Urahnen – besonders die Hirten – haben den nächtlichen Himmel beobachtet. Der „Hundsstern“ war jedes Jahr an der gleichen Stelle, und so wusste man, dass das Jahr aus 365 Tagen besteht.“²¹ So haben sie den ersten bekannten Kalender gebaut.“²² Und was ein Tag ist, weißt ja sogar du!“ „Na, na!“, sagte Eddi warnend und fragte gleich weiter: „Und wieso hat der Tag 2 mal 12, also 24 h zu je 60 min zu je 60 Sekunden? Wozu habe ich euch Rundschädeln das Dezimalsystem beigebracht?“ Rudi verzog das Gesicht: „Wieder historisch gewachsen.“²³ Und bei unserem Zählwettbewerb haben wir ganz übersehen, dass man mit einer Hand bis 12 und mit zwei Händen bis 60 zählen kann. Also passt das doch!“²⁴ „Und wie misst du die Zeit konkret?“, fragte Eddi überflüssigerweise. „Ganz einfach: durch Vergleich mit Bekanntem – mit den Definitionen, auf die wir uns geeinigt haben. Ein Eichvorgang bestimmt die abgeleiteten Größen, zum Beispiel eiche ich ein Pendel, dessen Schwingungsdauer eine Sekunde beträgt, mit einer Sanduhr, deren Durchlauf

eine Minute dauert – und die mit einer Stundenuhr, von denen ich 24 für eine Tageslänge brauche.“ Rudi holte Luft – diese langen Sätze beanspruchten ihn doch sehr.

Hier wollen wir die Szene verlassen, damit keine Langeweile aufkommt. Das Gesagte können wir in einer Zeile zusammenfassen. Denn wir unterscheiden 3 Dinge: die physikalische Größe, die Dimension (in „{ }“) und die Maßeinheit (in „[]“):

Länge l {L} [m], Masse m {M} [kg], Zeit t {T} [s]²⁵

Das sind fundamentale Einheiten der Physik: Länge ist Länge, Masse ist Masse, Zeit ist Zeit. Sie lassen sich nicht auf andere Größen zurückführen, aber andere Größen werden aus ihnen (bzw. den zugehörigen Gesetzen oder Dimensionen) abgeleitet: Geschwindigkeit ist Weg dividiert durch Zeit, also ist ihre Einheit [m/s]. Oft werden auch kleine oder andere Buchstaben verwendet, aber auch andere (teils „exotische“) Maßeinheiten – z. B. Länge l [Zoll], Masse m [Pfund], Zeit t [Stunde].

Hier können wir auch sauberer unterscheiden: „Dimensionen“ sind die qualitativen Eigenschaften einer Größe (Länge, Masse, Zeit), „Einheiten“ ihre Messgröße (m, kg, s).

So wird eine physikalische Größe angegeben: der Zahlenwert (auch „Maßzahl“ genannt) und das „Einheitenzeichen“ als Abkürzung für die Maßeinheit in „[]“. Plus, wie schon gesagt, die Messgenauigkeit des Zahlenwertes. Anders als in der Küche eines Feinschmeckers gibt es hier keine „Prise Salz“, keinen „Schuss Rum“, keine „Messerspitze Butter“. Und wir dürfen auch nicht beliebige Einheitenzeichen mischen – etwa [mm], [Pfund] und [Jahr], denn im offiziellen „SI-Einheitensystem“ sind die Einheitenzeichen definiert, genormt und festgeschrieben.²⁶ Natürlich ist es oft unpraktisch, die genormten Größen darin anzugeben – das Alter der Erde wird man nicht in Sekunden messen. Aber das ist normale Bequemlichkeit oder Gepflogenheit. Auf jeden Fall müssen sich die „umgangssprachlichen“ Einheiten immer in das korrekte Maß umrechnen lassen.

Die einfachste Messung ist die des Ortes – so einfach, dass wir sie im Leben kaum bemerken. Höchstens ein Autofahrer oder ein Segler fragen sich manchmal verzweifelt: „Ei, wo bin ich denn?“ Auf einer Linie genügt eine Angabe, auf einer Fläche braucht man zwei: „e3“ auf einem Schachbrett, „49°26'18"N 8°39'10"E“ auf der Erdoberfläche. Im Raum braucht man drei Koordinaten – und immer eine Angabe des Nullpunktes. Jede Entfernung wird immer relativ zu einem Bezugspunkt gemessen.

Wenn wir die drei „Grundgrößen“ der klassischen Physik betrachten (Länge, Masse, Zeit), dann kommen wir sofort zu weiteren – im täglichen Leben oft wichtigen – Einheiten: z. B. der „Dichte“. Natürlich hätte ich noch erwähnen müssen, dass sich aus der Länge unmittelbar das Volumen [m³] ableiten

Tab. 2.1 Dichte einiger Gebrauchsmaterialien

Material	[g/cm ³]	Material	[g/cm ³]
Platin	21,45	Meerwasser	1,02
Gold	19,29	Wasser	1,00
Blei	11,34	Eis	0,92
Kupfer	8,92	Olivenöl	0,92
Eisen	7,86	Alkohol	0,79
Granit	ca. 2,8	Lindenholz	ca. 0,5
Aluminium	2,70	Kork	ca. 0,12–0,20
Porzellan	ca. 2,4	Styropor	ca. 0,015
Erdreich (trocken)	ca. 1,3–2,0	Kohlendioxid	0,0020
Salzsäure	1,2	Luft	0,0012

lässt, aber das ist nun fast *zu* einfach. Die Dichte wird auch „spezifisches Gewicht“ genannt. Sie ergibt sich ganz einfach aus der Masse bzw. dem Gewicht eines Körpers, dividiert durch sein Volumen:

$$\text{Dichte} \left[\text{kg} / \text{m}^3 \right] = \frac{\text{Masse} [\text{kg}]}{\text{Volumen} [\text{m}^3]}$$

Und Sie alle kennen die Geschwindigkeit = Länge [m]/Zeit [s] oder das geläufigere Maß [km/h], die bekannten „Ka-em-ha“. Man könnte auch sagen: „Die Dimension der Geschwindigkeit ist die Dimension der Länge dividiert durch die Dimension der Zeit“. Die Dimension der „Dichte“ (s. o.) wäre M/L³.

Zur Illustration sehen Sie in Tab. 2.1 die Dichte einiger Stoffe des täglichen Lebens,²⁷ gemessen in der praktischeren Einheit [g/cm³]²⁸ und natürlich mit einer Messgenauigkeit von – sagen wir mal – ungefähr ± 5 % oder weniger. Wenn eine Zahl mit x Stellen angegeben ist, dann gelten diese üblicherweise als „sicher“ und die nächste als unsicher. Kurz: „21,2“ heißt „21,2?“ – was nach der 3. Stelle folgt, ist unsicher.

Nun wissen Sie, warum Eis auf Wasser schwimmt, warum Metalle das nicht tun und warum sich Meerwasser unter Süßwasser schichtet.

Eine physikalisch exakte Messung

„Also wir messen“, sagte Eddi, „Aber die zentrale Frage ist doch: *Wie* messen wir?“ „Genau“, sagte Rudi, „wir messen *genau*. Und wir geben an, *wie* genau. In der gesamten Physik gilt ein eiserner Grundsatz: Jede Messung ist ohne die Kenntnis ihrer Genauigkeit völlig bedeutungslos. Die Angabe ‚Der Hinkelstein wiegt 5 Kilo‘ ist also physikalisch unkorrekt: Es muss z. B. $5 \pm 0,2 \text{ kg}$ “

heißen. Die Genauigkeit schätzen wir oder ermitteln sie als Mittelwert aus mehreren Messungen, üblicherweise drei.“²⁹

„Lass uns das ausprobieren!“, sagte Eddi und stellte sich neben Rudis sorgfältig eingeritzten Längenmaßstab aus bestem Hartholz, der sogar eine Millimeter-Einteilung hatte. Rudi nahm hintereinander drei Maße und notierte die Werte: 182,7 cm, 183,4 cm und 183,5 cm. Dann rechnete er:

$$\frac{182,7 + 183,4 + 183,5}{3} = 183,2$$

„Du bist also 183,2 cm oder 1,832 m groß“, sagte er, „und zwar mit einer geschätzten Genauigkeit von 3,3 mm. ‚183,2 ± 0,33 cm‘ müsste ich schreiben.“³⁰ Eddi wiegte den Kopf: „Als Wissenschaftler bin ich skeptisch. Vielleicht drückt mein mit Wissen gefüllter Kopf mich zusammen? Vielleicht bin ich im Liegen sogar noch größer?!“³¹ „Ja, das sollten wir ausprobieren. Wenn der Effekt sich deutlich von der Messungenauigkeit abhebt, dann kann ich ihn akzeptieren. Leg’ dich auf dieses Brett und ich messe deine Länge – von ‚Größe‘ würde ich hier nicht sprechen – noch einmal.“

Eddi folgte seiner Anweisung und Rudi machte seine drei Messungen: „Im Durchschnitt 185,7 ± 0,4 cm. Erstaunlich. Der Effekt liegt deutlich über der Messgenauigkeit. Du bist im Liegen 2,5 cm länger. Klar, bei deinem schweren Kopf!“

Mehr ist nicht dazu zu sagen. Nur eins noch: Wenn die umständliche Angabe „± x [Einheit]“ fehlt, dann geht man davon aus, dass die letzte angegebene Dezimalstelle um ± 1 ungenau ist: 9,81 bedeutet, dass der Wert zwischen 9,80 und 9,82 liegt.

2.2 Grundbegriffe von Kraft und Bewegung

Auch hier beginnen wir mit den einfachsten Werkzeugen in unserem Kasten: den Begriffen. Zum Beispiel „Kraft“. Kraft ist eine Fähigkeit, etwas zu bewirken, etwa die Bewegung eines Körpers zu ändern (Beschleunigung, d. h. Geschwindigkeits- oder Richtungsänderung) oder einen Körper zu verformen. Sowohl eine Kraft als auch eine Bewegung haben eine Richtung. Und beide brauchen einen Bezugspunkt: Eine Kraft hat einen Bezugspunkt (wo die Kraft angreift) und eine Richtung sowie eine Größe. Eine Bewegung wird auch immer relativ zu einem Bezugspunkt festgestellt.

Kraft und Gegenkraft

Rudi saß am Ufer des Sees, auf dem Fritz („Fritzi“ gerufen), der Fischer, und Eddi in ihren Booten herumpaddelten. Offensichtlich versuchten sie, in einem zwischen ihnen gespannten Netz ein paar Fische für das Abendessen zu fangen. Was auch erfolgreich war, denn nach einiger Zeit fuhren sie aufeinander zu und wuchteten das volle Netz gemeinsam in Fritzis Boot. Dann paddelte Eddi zu dem Steg an Land, auf dem Rudi saß. Er kam einen halben Meter vor dem Steg zu stehen und sagte zu Rudi: „Mach mich fest!“

Rudi tat so, als sei er in Gedanken versunken und ignorierte das kurze Grasseil, das Eddi ihm hinhielt. „Steig halt rüber!“, sagte er wie nebenbei. Was Eddi auch tat, mit einem großen Schritt.

Was dann folgte, können Sie sich denken: Es gab einen großen „Platsch!“ und Eddi lag im Wasser. Denn durch seinen kräftigen Schritt hatte er das Boot, das ungefähr sein Gewicht (genauer: seine Masse) hatte, im Wasser nach hinten geschoben. Am Ende der Bewegung war der Steg nicht den geschätzten halben, sondern einen vollen Meter von ihm entfernt und sein Schritt führte ihn ins Leere. Die Kraft, mit der er sich vom Boot abstieß, erzeugte eine gleich große Gegenkraft, die das Boot von ihm weg schob. Und da die Masse des Bootes ungefähr seiner eigenen entsprach, schob er das Boot genauso schnell und damit weit weg, wie er sich vorwärts bewegte – und diese Strecke fehlte ihm dann bei seinem Schritt.

Darüber dachten die beiden nach, nachdem Eddi sich beruhigt hatte. Und es dauerte lange, bis er sich beruhigt hatte, denn er fühlte sich von Rudi hereingelegt und akzeptierte dessen Entschuldigung, es hätte nur pädagogischen Zwecken gedient, nicht im Geringsten. „Wenn es aber ein großes und schweres Boot gewesen wäre“, fragte er, „hätte ich es dann mit derselben Kraft abgestoßen?“ „Ja, hättest du. Stößt du dich mit einer Kraft F vom Boot ab, übst du eine Gegenkraft $-F$ auf das Boot aus. Und Kraft ist gleich Masse mal Beschleunigung, wie du an dieser Formel siehst.“ Und er schrieb sie hin:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{b}$$

Rudi erklärte weiter: „Beides sind gerichtete Größen, ‚Vektoren‘, wie wir Fachleute sagen, und die Beschleunigung $\vec{b}$ wirkt in derselben Richtung wie die Kraft. Umgekehrt ist die Beschleunigung gleich der Kraft $\vec{F}$ geteilt durch die Masse. Ist die Masse groß, wie bei dem dicken Schiff, dann ist die Beschleunigung klein, das Schiff setzt sich kaum in Bewegung, und du fällst nicht ins Wasser.“ Eddi begann zu verstehen: „Wenn ich also einen kräftigen Schritt nach Osten mache, dann schiebe ich mit gleicher Kraft die Erde nach Westen und ihre Drehung verlangsamt sich ein wenig?“³² „So ist es“, bestätigte Rudi,

„aber da sie hunderttausend Milliarden Milliarden mal schwerer ist als du, bemerkt es kein Schwein.“³³

Recht hat er. Und wenn 1,4 Mrd. Chinesen (zu je 70 kg) gleichzeitig in die Höhe springen würden, dann wäre das Massenverhältnis zur Erde immer noch ca. 10^{11} zu $6 \cdot 10^{24}$ – die Erde ist einfach verdammt schwer. Anders dagegen ein Hubschrauber: Er dreht seinen Rotor, aber der Rotor dreht auch ihn. Deswegen hat er den senkrechten Propeller am Heck, um die entsprechende Gegenkraft zu erzeugen.

Mit diesem Zusammenhang (Kraft gleich Masse mal Beschleunigung) wird auch die Definition der Maßeinheit „Newton“ klar: $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$. Ein Newton ist also die Kraft, die eine Masse von 1 kg mit 1 m/s^2 beschleunigt. Denn die Beschleunigung ist die Veränderung der Geschwindigkeit (m/s) pro Zeit (s). Mit ihr werden wir uns gleich noch beschäftigen.

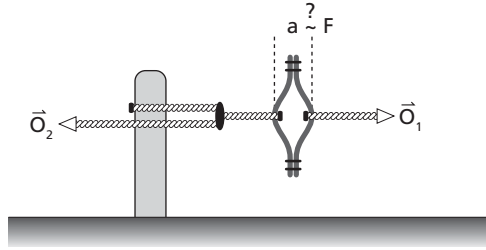
Die SI-Einheiten sind menschlich, stammen aus der „Mittelwelt“. Sie sagen langsam „einundzwanzig“ – 1 s. Sie halten Ihre Unterarme mit den Fingerspitzen gegeneinander – 1 m. Sie werfen einen leichten Medizinball – 1 kg. So weit, so gut. Was in aller Welt ist aber 1 Newton?! Ganz einfach: Sie *tragen* den Ball – 10 N ziehen an Ihrem Arm. 1 Apfel oder 100 g Wurst auf der Waage – 1 N (genauer: 0,981 N). In der Weltraumstation hat der Medizinball immer noch eine Masse von 1 kg und setzt sie einer Beschleunigung entgegen, aber auf die Waage bringt er ... nichts!

Zwei kämpfende Böcke

Ein weiteres lehrreiches Beispiel sahen die beiden am nächsten Tag. Zwei Böcke, etwa gleich groß, trugen einen Revierkampf aus, indem sie mit ihren Hörnern aneinanderrannten. „Die Kopfschmerzen möchte ich nicht haben!“, sagte Eddi, „Das ist ja, als ob ich mit dem Kopf gegen eine Felswand rennen würde!“ „Ist es das wirklich?“, fragte Rudi, „Wenn der eine Bock gegen einen Felsen donnert, ist es doch nur die halbe Kraft, denn der Felsen steht still. Wenn er aber gegen den anderen Bock knallt, der mit gleicher Geschwindigkeit auf ihn zurennt, dann muss er doch doppelt so viel Kraft aufwenden, oder!?“ Eddi schüttelte den Kopf: „Das sehe ich nicht so. Denn der zweite Bock mit seiner Geschwindigkeit – und die ist wichtig! – ersetzt den Felsen. Stünde er still, würde er durch den Aufprall des Gegners in Bewegung gesetzt.“

„Wie könnten wir das testen?“, fragte Rudi, noch zweifelnd. Eddi hatte eine Idee: „Wir binden einen Ochsen an einen Pfahl und lassen ihn ziehen. Mit deiner famosen Erfindung messen wir die Kraft. Dann ersetzen wir den Pfahl durch einen zweiten Ochsen, der in die andere Richtung zieht. Dazu müssen wir nur das Seil zum Pfahl durchschneiden, wenn der zweite angezo-

Abb. 2.1 Das Ochsen-Experiment mit dem Kraftmesser



gen hat.³⁴ Im Idealfall ändert sich dein Kraftmesser nicht. Wie funktionier er überhaupt?“ (Abb. 2.1)

„Ich habe zwei biegsame Weidenzweige aneinandergebunden. Wenn ich sie beide nach außen ziehe, kann ich die Kraft dadurch messen, dass ich den Abstand a messe.“ „Welcher Kraft F entspricht ein Zentimeter für a ?“ „Das weiß ich nicht.“ „Ist a denn immer genau proportional zu F ?“ „Das weiß ich auch nicht.“ „Das sind aber ziemlich viele ‚Weiß ich nicht!‘“ Rudi blieb gelassen: „Die Physik macht eben Fortschritte, abhängig von der Technik. Wenn ich meinen Kraftmesser geeicht habe, wissen wir mehr.“³⁵

Was soll ich Ihnen sagen? Das Experiment ergab das von Eddi vorausgesehene „Nullresultat“: Der Pfosten „zog“ mit derselben Kraft gegen den Ochsen Nr. 1 wie der Ochse Nr. 2. In der modernen Welt finden wir diese Regel im Straßenverkehr wieder (wenn es auch ein makaberes Beispiel ist): Die physikalische Wirkung ist dieselbe, wenn ein Auto gegen eine Betonwand kracht oder in ein mit gleicher Geschwindigkeit entgegenkommendes Auto mit gleicher Masse.

Ein schöner Beleg für das Prinzip „Kraft gleich Gegenkraft“. Und die Summe aller Kräfte ist null. Das bringt uns zu einer neuen Anwendung.

Kraft und Gewicht

„Hatten wir das nicht schon?!“, fragte Eddi mit gerunzelter Stirn, als sie über den Fall eines Körpers zur Erde und die dabei wirkenden Kräfte sprachen. „Nein“, sagte Rudi und Eddi konterte: „Klar hatten wir das schon! Ich erinnere mich genau, vor etwa zwei Jahren, als wir unter dem Apfelbaum saßen.“³⁶ „Na, schön, wenn du meinst. Fass es noch einmal zusammen, bitte!“ Eddi holte aus: „Die Geschwindigkeit ist der zurückgelegte Weg, in diesem Fall der Fallweg – haha! Schönes Wortspiel! – dividiert durch die Zeit oder anders gesagt: die zeitliche Veränderung des Weges. Beim freien Fall wird sie durch eine Kraft hervorgerufen, die durch die konstante Erdbeschleunigung entsteht. Wir haben ja damals erkannt, dass die Erde mit ihrer Riesenmasse alle Körper zu sich zieht. Wir wissen nur nicht, warum. Werden sie nicht

durch eine Gegenkraft gehalten – wie bei uns, die wir durch die Kraft, die der feste Boden auf uns ausübt, gestützt werden –, dann fallen sie und werden immer schneller.“ „Kannst du etwas kürzere und weniger verschachtelte Sätze verwenden?!“, maulte Rudi. „Na, gut. Die Geschwindigkeit v ist gleich der Beschleunigung g mal der Zeit t . Beschleunigung ist definiert als Geschwindigkeitsänderung pro Zeiteinheit. Geschwindigkeit ist definiert als Wegänderung pro Zeiteinheit. Den Weg nenne ich s . Kürzer kann ich es nicht sagen. Nur aufschreiben.“ „Dann mach’s!“ Und Eddi tat es, wobei er gleich die Einheiten hinzufügte:

$$v \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] = g \left[\frac{\text{m/s}}{\text{s}} \right] \cdot t [\text{s}]$$

$$v = \frac{ds}{dt} \Rightarrow s = \int v \cdot dt = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$$

„Ein Integral ...“, sagte Eddi, „Kannst du dich erinnern?“ Rudi konnte sich erinnern, um sich keine Blöße zu geben, und spann den Faden weiter: „Wenn ich also die Zeit t für verschiedene Fallhöhen s messen kann, dann kann ich daraus die Erdbeschleunigung g bestimmen.“

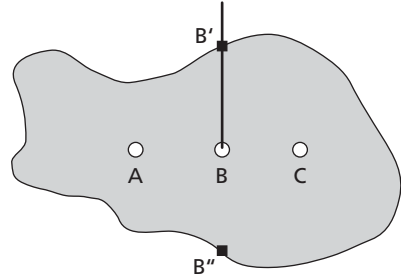
Gesagt, getan. Es dauerte ein paar Stunden, bis die beiden in verschiedenen Experimenten den Wert von g mit einfacher Genauigkeit bestimmt hatten: $g \approx 9,8 \text{ m/s}^2$. Eine gute Annäherung, denn in einer DIN-Norm (DIN 1305) wird sie als $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$ festgelegt.³⁷

Das brachte die beiden sofort zu einer praktischen Anwendung: die Messung der Reaktionszeit. Rudi hielt einen ca. 50 cm langen Holzmaßstab an eine glatte Felswand. Die Testperson musste ihren Daumen dicht über sein unteres Ende halten. Irgendwann ließ Rudi den Stab los, und die Versuchsperson sollte ihn so schnell wie möglich mit dem Daumen gegen die Wand drücken. Die Jäger des Stammes waren die schnellsten. Sie schafften es, den Stab nach ca. 20 cm zu stoppen. Rudi rechnete:

$$t = \sqrt{\frac{2s}{g}} \Rightarrow t = \sqrt{\frac{0,4}{9,8}} \approx 0,20 \text{ s.}$$

„Was ist aber nun mit dem Gewicht?“, fragte Eddi. „Es ist die Kraft, die der Erdbeschleunigung entspricht“, sagte Rudi, „Die Gewichtskraft G ist die Masse m , multipliziert mit der Erdbeschleunigung g . Gewicht ist keine Eigenschaft eines Körpers wie seine Masse, sondern eine Kraftwirkung.“ Eddi schaute ihn fragend an: „Würde das bedeuten, dass etwas auf dem Mond *weniger* wiegt? Der ist ja viel kleiner als die Erde und müsste ein kleineres ‚ g ‘

Abb. 2.2 Die Masse eines Körpers kann man sich im Schwerpunkt B konzentriert denken



haben. Das würde dir gut tun, denn du brächtest vielleicht nur 30 Kilo auf die Waage! Aber ... welche Waage? Wenn wir eine Balkenwaage verwenden und auf die eine Seite unsere Kilosteine verwenden, dann würden die ja auch weniger wiegen.“ Rudi überhörte die Bosheit und dachte nach.

Das wollen wir auch tun, um zu einer Erkenntnis zu kommen: Masse ist das, was sich einer Beschleunigung widersetzt. Gewicht ist die Kraft auf einen Körper in einem Schwerfeld, in unserem Fall dem Schwerfeld der Erde. Auf dem Mond ist die Masse (und damit ihre Trägheit) die gleiche wie auf der Erde, aber die Gewichtskraft ist kleiner als auf der Erde. Daher werden fallende Gegenstände auf dem Mond langsamer beschleunigt. Auf der Erde ist das Gewicht $G = \text{Masse } m \text{ [kg]} \cdot \text{Erdbeschleunigung } g \text{ [m/s}^2\text{]}$. Auf dem Mond ist das Gewicht $G = \text{Masse } m \text{ [kg]} \cdot \text{Mondbeschleunigung } g_M \text{ [m/s}^2\text{]}$ mit $g_M = 1,62 \text{ m/s}^2$. Rudi besitzt eine Masse von 90 kg – will man ihn „anschieben“, d. h. beschleunigen, dann braucht man auf der Erde ebenso viel Kraft zum Erreichen einer bestimmten Geschwindigkeit wie auf dem Mond oder irgendwo im Weltraum, weit entfernt von allen Anziehungskräften. Doch seine Gewichtskraft ist auf der Erde $G = 90 \cdot 9,81 = 883 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 883 \text{ N}$. Auf dem Mond wiegt er $G_M = 90 \cdot 1,62 = 146 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 146 \text{ N}$, also etwa ein Sechstel. Natürlich – Eddi hatte Recht – nicht mit Kilosteinen auszuwiegen, sondern z. B. mit einer „Federwaage“.³⁸ Im kräftefreien Weltraum wiegt Rudi ... nichts, wie wir inzwischen aus zahllosen Übertragungen aus Raumkapseln anschaulich erfahren haben. Seine Masse ist dieselbe wie auf der Erde, aber sie ist keinerlei Beschleunigung ausgesetzt.

Noch eine Anmerkung zu Gewicht und Masse: Bei kompliziert geformten Körpern kann man sich die gesamte Masse im „Schwerpunkt“ konzentriert vorstellen. Das ist der Punkt, in dem man den Körper in einem Schwerfeld unterstützen kann, ohne dass er sich danach bewegt. Abbildung 2.2 zeigt das anschaulich: Denken Sie sich eine unregelmäßig zurechtgesägte Metallscheibe. Hängt man sie im Punkt A auf, kippt ihre rechte Seite nach unten. Hängt man sie im Punkt C auf, kippt ihre linke Seite nach unten. Hängt man sie im Punkt B auf, bleibt sie im Gleichgewicht. Das ist der Massenmittelpunkt

oder Schwerpunkt) des Körpers. Nebenbei: Er muss nicht im Körper selbst liegen – denken Sie an einen Bumerang oder einen Donut.

Um den Schwerpunkt dreht sich alles – im wahrsten Sinn des Wortes. Läge unsere Scheibe aus Abb. 2.2 auf dem Eis (nahezu reibungsfrei) und würde man ihr an der linken oberen Ecke einen Stoß nach oben geben, dann würde sie sich um den Schwerpunkt drehen und in Richtung des Stoßes davonrutschen. Wird eine Drehung eines Körpers um einen anderen Punkt als dem Massenmittelpunkt erzwungen (z. B., weil dort eine Achse hindurchgeht), dann entsteht eine Unwucht. Das kennen Sie von Ihrem Auto: Die Radnabe sollte der Massenmittelpunkt sein – ist er es nicht (z. B. durch eine Unwucht im Reifen), dann sorgt ein kleines Ausgleichsgewicht für die Beseitigung der Unwucht.

Damit sind wir sofort bei den 3 Formen des Gleichgewichts: Wird ein Körper *über* seinem Schwerpunkt in B' gestützt (d. h. aufgehängt), befindet er sich im *stabilen* Gleichgewicht. Jede Auslenkung bringt ihn nach einiger Zeit wieder dorthin zurück. Wird er genau *unter* seinem Schwerpunkt in B" gestützt, befindet er sich im *labilen* Gleichgewicht. Jede Auslenkung bringt ihn unweigerlich aus dem Gleichgewicht. Die Aufhängung genau *im* Schwerpunkt B ist das *indifferente* Gleichgewicht, das nach jeder Auslenkung im neuen Zustand verbleibt. Manche vergleichen das mit menschlichen Beziehungen oder Verhandlungen (konstruktiv, destruktiv, ergebnislos).

Fassen wir zusammen

Abstraktes Denken ist die Stärke des Menschen, unsere „evolutionäre Nische“. Einige Tiere können das im Ansatz auch, aber Sprache, Logik und Mathematik sind unsere Domäne – und Physik gehört auch dazu. Denn wie wir gesehen haben, beschäftigt sie sich zwar mit körperlichen Dingen, vereinfacht oder vernachlässigt aber viele ihrer Eigenschaften und enthält daher auch Abstraktionen von der „Wirklichkeit“.

In diesem Kapitel haben wir exemplarisch einige Regeln, Formeln und Berechnungen der Mechanik gezeigt. Wenn Ihnen also nun nach längerem Stehen die Füße wehtun, dann denken Sie an die Regel „Kraft = Gegenkraft“. Nicht nur Ihre Füße drücken auf den Boden, sondern der Boden drückt auch gegen Ihre Füße. Sind Kraft und Gegenkraft nicht von gleicher Größe und genau entgegengesetzter Richtung, dann setzt sich etwas in Bewegung. Das merkt man beim alpenländischen Fingerhakeln, wenn jemand einen „über den Tisch zieht“.

Das „Herz der Physik“ ist ein gedankliches Modell, das aus Beobachtungen gebildet wurde. Es enthält die wesentlichen Größen des Phänomens (z. B. die Geschwindigkeit einer Masse bei einer auf sie einwirkenden Kraft) und

vernachlässigt die unwesentlichen Größen (z. B. die Reibung und den Luftwiderstand). Wir drücken das Modell in der Sprache der Mathematik aus – kurz, prägnant und exakt. Damit können wir Voraussagen machen, was in der Wirklichkeit unter bestimmten Bedingungen passiert (z. B., wenn wir die einwirkende Kraft verdoppeln und die Masse halbieren). Messen wir den vorausgesagten Effekt mit hinreichender Genauigkeit, dann ist unser Modell korrekt – wenn nicht, dann stimmt etwas nicht. Das ist Physik. Mehr nicht.

„Das Buch der Natur ist in der Sprache der Mathematik geschrieben“, hat Galileo Galilei gesagt. Und wir haben es hier schon gesehen, dass die Mathematik das Werkzeug der Physik ist. Physikalische Erscheinungen werden mathematisch formuliert, diese Formeln werden nach den Gesetzen der Mathematik und damit der Logik umgeformt und führen zu Aussagen, die die Natur im Experiment bestätigt. Ist das nicht fantastisch?!

3

Kräfte bewegen die Welt

Kräfte, die auf den ganzen Körper wirken



Die Geometrie hat den Vorzug, gewisse mathematische oder physikalische Gesetzmäßigkeiten anschaulich zu machen. Wer sich mit abstrakten Formeln nicht spontan anfreunden kann, findet beispielsweise Gefallen an einfachen Zeichnungen, die die Zusammensetzung und Zerlegung von Kräften oder Bewegungen nicht nur illustrieren, sondern auch quantitativ (innerhalb bescheidener Grenzen) bestimmbar machen. Denn beide sind „gerichtete Grö-

ßen“: Sie haben eine Größe *und* eine Richtung. Im Gegensatz zur Masse, die einfach nur träge herumliegt.

3.1 Statik: Zusammensetzung von Kräften

Statik ist, wenn sich nichts bewegt. So primitiv könnte man dieses Gebiet umreißen. Kräfte sind trotzdem da und können eine Wirkung zeigen. Sie zu erkennen, zu messen und zu berechnen – das ist hier die Aufgabe.

Kraft wirkt auf Körper – aber wie?

Bevor wir uns ausgiebig mit Kräften beschäftigen, müssen wir eine Grundeigenschaft kennenlernen: Kräfte addieren sich. Wenn zwei Leute von je 70 kg an einem Seil hängen, wird es mit 140 kg belastet. Aber so einfach ist die Welt nicht. Zuerst müssen (und werden) wir sauber zwischen Masse und Gewicht unterscheiden. Und wenn sie an ihm ziehen, ziehen sie vielleicht in verschiedene Richtungen – im schlimmsten Fall genau entgegengesetzt. Und – wie man schon am Titelbild sieht – zu jeder Kraft gehört eine Gegenkraft. Das ist das „Wechselwirkungsprinzip“, das „Dritte Gesetz“ des großen Physikers Sir Isaac Newton (1643–1727):³⁹

Kräfte treten immer paarweise auf. Übt ein Körper A auf einen anderen Körper B eine Kraft aus (*actio*), so wirkt eine gleichgroße, aber entgegengerichtete Kraft von Körper B auf Körper A (*reactio*)

Wenn also Rudi mit seinen 90 kg Gewicht auf den Erdboden drückt, dann muss der Erdboden mit genau der gleichen Kraft dagegendrücken, um ihn zu halten (was Rudi spätestens dann merkt, wenn er im Moor steht – dort ist die Gegenkraft des Bodens geringer und er versinkt langsam).

Zurück zur Addition: Hier ist 1 + 1 nicht immer gleich 2, denn man muss den Angriffswinkel der Kraft berücksichtigen. Das wussten unsere beiden Wissenschaftler schon vor zwei Jahren.⁴⁰ Sie sehen es noch einmal in Abb. 3.1: Zwei Ochsen ziehen einen Baumstamm durch eine Rinne.

„Kräfte sind Vektoren“, sagte Eddi und war stolz, wieder etwas Eigenes zur Diskussion beitragen zu können. „Das hat mir Sigggi verraten, dass ‚Vektoren‘ gerichtete Größen sind“. Sie haben eine Richtung, zeigen also irgendwo hin. Und wenn du dich erinnerst ... aber auch, wenn du es wieder vergessen hast ... wir können sie in einem x-y-Koordinatensystem darstellen. Also durch eine Zahl mit einer x- und einer y-Komponente. Und als Kennzeichen bekommen sie einen Pfeil über dem Buchstaben. Du siehst das hier (Abb. 3.2):

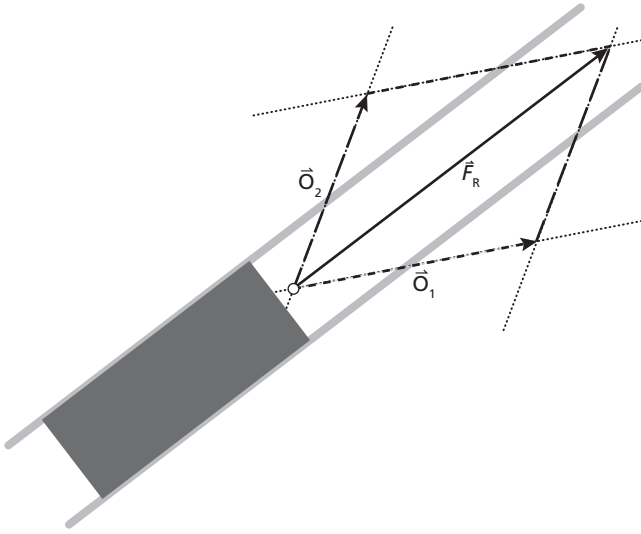


Abb. 3.1 Addition zweier Kräfte mit verschiedenen Winkeln

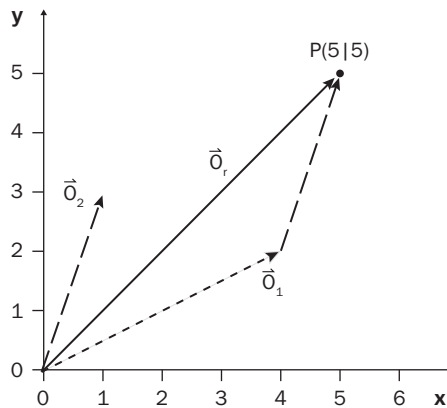


Abb. 3.2 Vektoren im kartesischen Koordinatensystem

Rudi nickte: „Ich schreibe mal die drei Kräfte auf, nehme einfach Zahlenwerte und lasse die Einheit ‚Newton‘ weg. Von mir aus kannst du dir ‚1‘ als 50 N denken. Dazu brauchen wir den ‚Einheitsvektor‘ e , der uns die Richtung angibt. Richtung ‚x‘ oder Richtung ‚y‘. Er hat die Größe 1, daher der Name.“ Und er tat es:

$$\vec{O}_1 = 4e_x + 2e_y \quad \vec{O}_2 = 1e_x + 3e_y \quad \vec{O}_R = 5e_x + 5e_y$$

Und fuhr fort: „Die Pfeile über dem ‚e‘ habe ich mir gespart. Ich weiß sogar noch, wie man das rechnet: Man addiert einfach die Horizontal- und