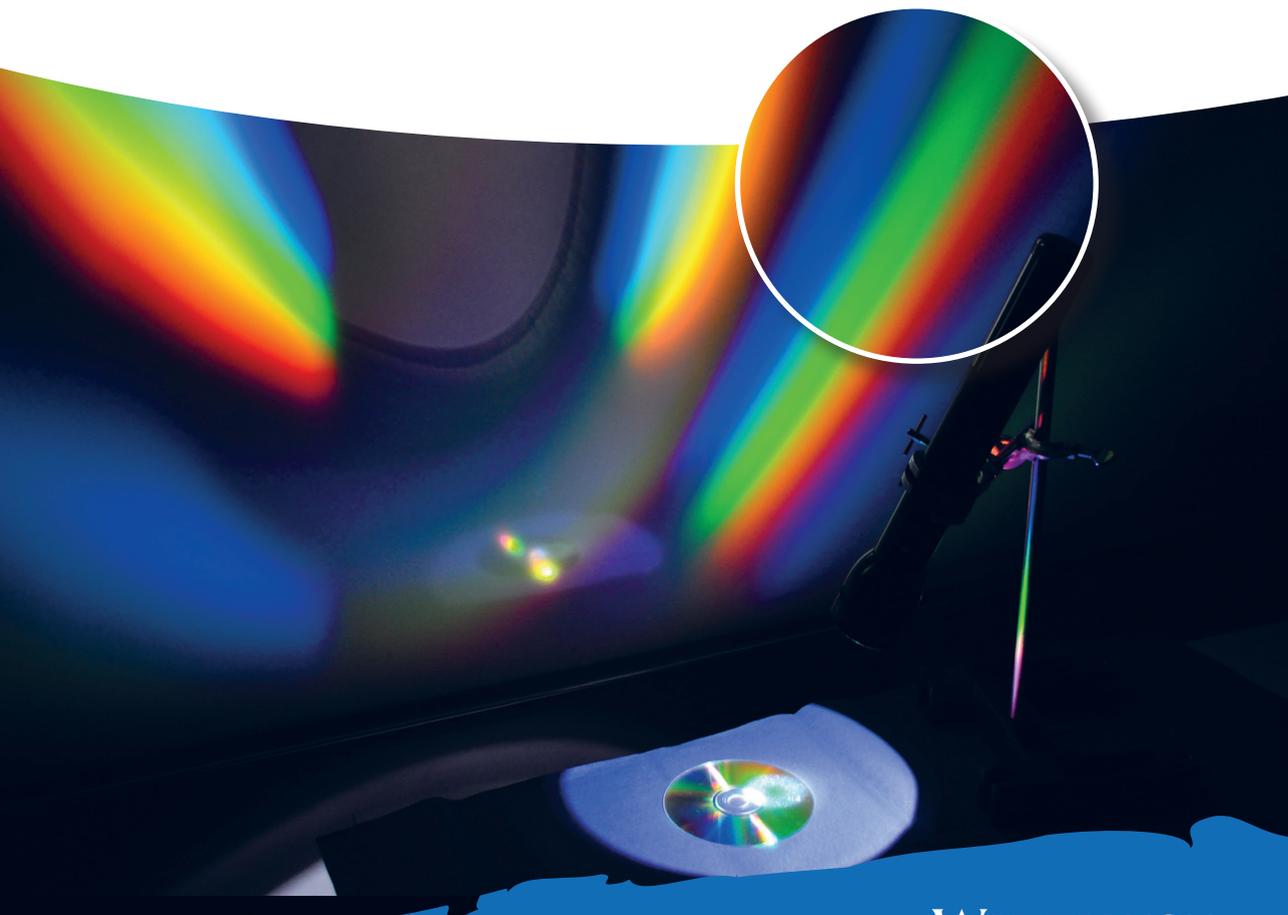




Martin Pohl

Physik für alle



WILEY-VCH

Martin Pohl

Physik für alle

Beachten Sie bitte auch weitere interessante Titel zu diesem Thema

Hüfner, J., Löhken, R.

Physik ohne Ende

Eine geführte Tour von Kopernikus bis Hawking

2012

Print ISBN: 978-3-527-41017-0

Häußler, P.

Donnerwetter - Physik!

2006

Print ISBN: 978-3-527-31644-1

Essenzielle Quantenmechanik

für Elektrotechniker und Informatiker

2015

Print ISBN: P-010-20002-7

Adobe PDF ISBN: P-010-20002-8

eMobi ISBN: P-010-20002-9

ePub ISBN: P-010-20003-0

Martin Pohl

Physik für alle

WILEY-VCH
Verlag GmbH & Co. KGaA

Autor**Martin Pohl**

Universität Potsdam
Institut für Physik und Astronomie
Karl-Liebknecht-Str. 24/25
14476 Potsdam-Golm

© Erhan Ergin/Fotolia.com für die in der
Randspalte verwendeten Symbole.

■ Alle Bücher von Wiley-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

© 2014 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Umschlaggestaltung Simone Benjamin, McLeese Lake, Canada

Satz le-tex publishing services GmbH, Leipzig, Germany

Druck und Bindung Markono Print Media Pte Ltd, Singapore

Print ISBN 978-3-527-41235-8

ePDF ISBN 978-3-527-67469-5

ePub ISBN 978-3-527-67468-8

Mobi ISBN 978-3-527-67467-1

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Für Darija, Alina und Lorena

Inhaltsverzeichnis

Vorwort *XI*

Abkürzungen *XIII*

- 1 Aufgabe und historische Entwicklung der Physik 1**
 - 1.1 Physik, Philosophie und Religion 1
 - 1.2 Messung und Vorhersage 3
 - 1.3 Wahrheit 6
 - 1.4 Grundlegende Methodik der Physik 9

- 2 Koordinaten, Geschwindigkeit und Beschleunigung 11**
 - 2.1 Koordinaten 11
 - 2.2 Bewegungsgesetze 14
 - 2.3 Galileis Fallexperimente 15
 - 2.4 Messunsicherheit 17
 - 2.5 Wissen testen 21

- 3 Erhaltungssätze, Masse und Impuls 23**
 - 3.1 Galileis Prinzipien 23
 - 3.2 Masse und Impuls 27
 - 3.3 Newton'sche Bewegungsgesetze 28
 - 3.4 Relativität und Erhaltungssätze 31
 - 3.5 Schwerpunkt und Relativbewegung 32
 - 3.6 Wissen testen 34

- 4 Das Gravitationsgesetz und der Aufbau des Sonnensystems 35**
 - 4.1 Das Sonnensystem 35
 - 4.2 Von Brahe zu Kepler 40
 - 4.3 Isaac Newton und das Gravitationsgesetz 43
 - 4.4 Anwendung des Gravitationsgesetzes 45
 - 4.5 Drehimpuls 48
 - 4.6 Wissen testen 50

| | | |
|-----------|--|------------|
| 5 | Arbeit, Energie und Leistung | 51 |
| 5.1 | Induktive Logik und Bias | 51 |
| 5.2 | Arbeit, Energie und Leistung | 53 |
| 5.3 | Abhängigkeit vom Bezugssystem | 57 |
| 5.4 | Potenzielle Energie und Energieerhaltung | 58 |
| 5.5 | Wärme und Bindungsenergie | 61 |
| 5.6 | Energie und Impuls | 65 |
| 5.7 | Wissen testen | 67 |
| | | |
| 6 | Elektrizität und Magnetismus | 69 |
| 6.1 | Ladung und elektrische Kraft | 69 |
| 6.2 | Van-der-Waals'sche Kräfte | 73 |
| 6.3 | Elektrischer Strom und Magnetismus | 76 |
| 6.4 | Wie wird Kraft übertragen? | 79 |
| 6.5 | Elektrische Energie und Spannung | 83 |
| 6.6 | Induktion und Radiowellen | 84 |
| 6.7 | Wissen testen | 86 |
| | | |
| 7 | Die Magie großer Zahlen: Flüssigkeiten und Gase | 87 |
| 7.1 | Statistik | 87 |
| 7.2 | Kinetische Gastheorie | 89 |
| 7.3 | Wärme und Druck | 92 |
| 7.4 | Strömungslehre | 95 |
| 7.5 | Determinismus und Chaos | 99 |
| 7.6 | Wissen testen | 102 |
| | | |
| 8 | Wellen | 103 |
| 8.1 | Oszillationen | 103 |
| 8.2 | Störungen in kontinuierlichen Medien | 107 |
| 8.3 | Wellenüberlagerung | 109 |
| 8.3.1 | Stehende Wellen | 109 |
| 8.3.2 | Wellenpakete | 110 |
| 8.3.3 | Interferenz und Beugung | 111 |
| 8.4 | Wissen testen | 117 |
| | | |
| 9 | Der Weg zur speziellen Relativitätstheorie | 119 |
| 9.1 | Wellenausbreitung im Medium | 119 |
| 9.2 | Dopplereffekt | 123 |
| 9.3 | Die Lichtgeschwindigkeit | 126 |
| 9.4 | Das Michelson-Morley-Experiment | 129 |
| 9.5 | Die Grundprinzipien der speziellen Relativität | 131 |
| 9.6 | Wissen testen | 132 |
| | | |
| 10 | Einsteins spezielle Relativitätstheorie | 133 |
| 10.1 | Albert Einstein | 133 |

- 10.2 Die Lorentz-Transformation 135
- 10.3 Geschwindigkeit und Ausbreitungsrichtung 140
- 10.4 Lichtlaufzeit 142
- 10.5 Impuls und Energie 145
- 10.6 Wissen testen 149

- 11 Die allgemeine Relativitätstheorie 151**
 - 11.1 Das Äquivalenzprinzip 151
 - 11.2 Rotverschiebung und Lichtablenkung 156
 - 11.3 Schwarze Löcher 160
 - 11.4 Kosmologie 162
 - 11.5 Wissen testen 167

- 12 Atome und ihr Aufbau 169**
 - 12.1 Die Atomhypothese 169
 - 12.2 Das Elektron 171
 - 12.3 Radioaktivität 175
 - 12.4 Die Struktur der Atome 180
 - 12.5 Wissen testen 183

- 13 Auf dem Weg zur Quantenphysik 185**
 - 13.1 Atomspektren 185
 - 13.2 Schwarzkörperstrahlung 189
 - 13.3 Die Bestätigung der Quantenhypothese 192
 - 13.3.1 Der Fotoeffekt 192
 - 13.3.2 Der Comptoneffekt 193
 - 13.4 Welle-Teilchen-Dualismus 195
 - 13.5 Das Bohr'sche Atommodell 196
 - 13.6 Wissen testen 199

- 14 Quantenmechanik 201**
 - 14.1 De Broglies Teilchenwellen 201
 - 14.1.1 Elektronenstreuung 205
 - 14.2 Teilchenoptik 206
 - 14.2.1 Tunneleffekt 210
 - 14.3 Spin und Quantenstatistik 212
 - 14.4 Wissen testen 215

- 15 Wahrscheinlichkeit und Unschärfe 217**
 - 15.1 Die Wellenfunktion 217
 - 15.1.1 Streuung 219
 - 15.1.2 Wahrscheinlichkeitsinterpretation 221
 - 15.2 Die Unschärferelation 222
 - 15.3 Interpretation 226
 - 15.4 Verschränkte Teilchen 227
 - 15.5 Wissen testen 229

| | | |
|-----------|--|------------|
| 16 | Vom Standardmodell zu heutigen Entwicklungen der Physik | 231 |
| 16.1 | Antiteilchen | 231 |
| 16.2 | Quantisierung von Feldern | 233 |
| 16.3 | Virtuelle Teilchen | 234 |
| 16.4 | Struktur des Atomkerns | 237 |
| 16.5 | Schwache Wechselwirkung | 240 |
| 16.6 | Das Standardmodell und weitergehende Fragen | 242 |
| 16.7 | Wissen testen | 244 |
| 17 | Ausklang | 245 |
| | Richtig gelöst | 247 |
| | Literaturnachweis | 263 |
| | Stichwortverzeichnis | 265 |

Vorwort

Viele von uns empfinden eine gewisse Abneigung, wenn sie das Wort Physik nur hören. Wir denken an lange Stunden des Schulunterrichts, die uns in schmerzhafter Erinnerung sind. Viele Formeln sollte man sich merken, in die man Zahlen einsetzen konnte, um andere Zahlen herauszubekommen. Wozu das alles?

Glauben Sie mir, ich mag diese Art des Unterrichts auch nicht. Nichts ist darin zu finden von der Faszination, die die Physik ausübt. Wo bleibt die Freude, einen Zusammenhang nachvollziehen zu können? Was ist mit dem Gefühl der Zufriedenheit, das uns erfüllt, wenn es gelungen ist, einen komplexen Vorgang gedanklich in einzelne Schritte zu zerlegen, die wir verstehen können? Physiker sind in der Industrie in vielen verschiedenen Aufgabenfeldern zu finden, nicht zuletzt auch im Consulting. Das tun sie nicht, weil sie sich physikalische Formeln besonders gut merken können. Vielfach arbeiten sie in Bereichen, die weit weg liegen von den Forschungsfragen, die das Thema ihrer Master- oder Doktorarbeiten waren. Die dort behandelten Formeln sind daher im Berufsleben oft gar nicht mehr relevant. Es ist vielmehr die Fähigkeit, komplexe Dinge zu behandeln und Gegebenes zu hinterfragen, die den Physiker auszeichnet. Wenn wir in diesem Buch die Entwicklung der Physik bis zur heutigen Zeit nachvollziehen, werden wir gleichzeitig sehen, wie sich Physiker einem Problem nähern, welche Fragen sie stellen und wie sie aus einer Auswahl von Lösungsvorschlägen den vielversprechendsten auswählen.

Mathematik ist auch heute noch die Sprache der Physik, mit der sich Zusammenhänge in kompakter Form darstellen lassen. Mathematik ist allerdings auch eines der größten Hindernisse, das für viele, oft interessierte Menschen den Zugang zur Physik erschwert. In diesem Buch wollen wir weitgehend ohne Mathematik auskommen, wenn auch nicht ganz. Neben der Geometrie werden wir uns Algebra zunutze machen, die Lehre von den Gleichungen und der Verknüpfung mathematischer Strukturen. Dies klingt komplizierter als es ist. Letzten Endes ist jede physikalische Formel eine Gleichung. Eine physikalische Größe ist gleich einer Kombination anderer Größen, wobei die Rechenvorschrift, also die Verknüpfung dieser Größen durch Addieren, Multiplizieren oder Dividieren in der Formel angegeben ist.

Der Wert einer Formel liegt aber nicht darin, dass man Zahlen in sie einsetzen kann. Wir werden dies daher in diesem Buch auch nicht tun. Uns interessieren die logischen Zusammenhänge, die den Formeln zugrunde liegen. Wir wollen nachvollziehen, wie aus Konzepten verschiedene Konsequenzen logisch abgeleitet und überprüft werden. Diese Überprüfung kann es in sich haben und Widersprüche aufzeigen, die zum Verfeinern und schlimmstenfalls zum Verwerfen von Konzepten führen kann. Es gibt keinen Aspekt physikalischer Forschung, der sich der Kritik entziehen kann, denn wir vertrauen keinem physikalischen Gesetz so sehr, dass wir die Möglichkeit begrenzter Gültigkeit niemals ausschließen würden. Der wichtigste Grundsatz ist daher: *Alles, was Sie in diesem Buch lesen werden, kann falsch sein.*

Das logische Weiterdenken, das Gedankenspiel „... was wäre, wenn ...“ ist die Grundlage der Entwicklung und der Überprüfung physikalischer Konzepte und Modellvorstellungen. Dies ist, was wir lernen und anwenden müssen, wenn wir verstehen wollen, wie Physik als Wissenschaft funktioniert. Ich habe mir erlaubt an einigen Stellen in diesem Buch solche Überlegungen vorzuführen, die für das Kapitel nicht immer von zentraler thematischer Bedeutung erscheinen, aber Querverbindungen aufzeigen und letztlich das Durchdenken der Konzepte illustrieren, das für die Physik so wesentlich ist.

Dieses Buch ist aus einer gleichnamigen Vorlesung entstanden, die der Autor seit dem Jahr 2010 an der Universität Potsdam hält. In den ersten Jahren wurde ein englischsprachiger Begleittext benutzt [1], der nun durch dieses Buch ersetzt wird. Die einzelnen Kapitel sind mit Ausnahme des ersten als in sich abgeschlossene Themenblöcke konzipiert, die jeweils die Grundlage für eine 90-minütige Vorlesung liefern können. Ich habe es immer als sinnvoll empfunden, den Text kapitelweise in der Woche vor der jeweiligen Vorlesung lesen zu lassen. Benutzt man ein internetbasiertes Lernportal, kann man ebenfalls vor der Vorlesung mit ein paar Fragen den Verständnisstand ermitteln und auf Defizite verstärkt eingehen.

Die Fragen am Ende jedes Kapitels gehen über reine Verständnisfragen hinaus und erfordern zum Teil etwas Einsatz. Verzweifeln Sie bitte nicht, wenn Sie nach einigen Minuten die Lösung noch nicht gefunden haben. Bleiben Sie bitte innerlich stark und sehen Sie nicht gleich bei den Lösungen nach. Es hilft oft, sich zurückzulehnen und aufzuschreiben, was denn die in der Fragestellung gegebene Information genau bedeutet und wonach gefragt wird. Ich bin mir sicher, Sie werden mit sich zufrieden sein, wenn Sie dann eine Aufgabe nach längerem Überlegen beantwortet haben.

Mein herzlicher Dank geht an Dr. Oliver Henneberg, dessen unermüdlicher Einsatz im Aufbau und der Durchführung von Demonstrationsexperimenten die Abbildungen 6.1, 7.7, 8.7, 8.9, 12.3 sowie das Titelbild ermöglichte. Meiner Frau Darija danke ich für ihre Unterstützung sowie das Korrekturlesen.

Abkürzungen

Liste der Symbole

| | |
|------------------|--|
| \vec{a} | Beschleunigung, wobei der Pfeil anzeigt, dass es sich um einen Vektor handelt |
| A | Fläche, Flächeninhalt |
| c | Betrag der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, etwa 300 000 km/s |
| C | Beliebige Konstante |
| δ | Vorgestellt anderen Größen deren Veränderung, also beispielsweise δx eine Verschiebung des Orts |
| Δ | Vorgestellt anderen Größen deren Unsicherheit oder Abweichung, also beispielsweise Δt die (Mess-)Unsicherheit der Zeit |
| E | Energie, speziell E_{kin} und E_{pot} für die kinetische beziehungsweise potenzielle Energie |
| \vec{E} | Elektrische Feldstärke |
| \vec{F} | Kraft |
| f | Frequenz |
| Γ, γ | Lorentzfaktor |
| h | Höhe, Höhenunterschied, Tiefe |
| I | Elektrische Stromstärke |
| \vec{L} | Drehimpuls |
| λ | Wellenlänge |
| m, M | Masse |
| ν | Symbol des Neutrinos |
| \vec{p} | Impuls |
| P | Leistung |
| p | Druck |
| ψ | Wellenfunktion in der Quantenphysik |
| Q, q | Elektrische Ladung |
| r | Radius, Abstand |
| ρ | Massendichte |

XIV | Abkürzungen

| | |
|-----------|-----------------------------------|
| t | Zeit |
| T | Temperatur |
| \vec{v} | Geschwindigkeit |
| U | Elektrische Spannung |
| V | Volumen |
| W | Arbeit |
| \vec{x} | Ortsvektor, $\vec{x} = (x, y, z)$ |
| x, y, z | Ortskoordinaten |

Liste fundamentaler Konstanten

| | |
|-------|--|
| c | Lichtgeschwindigkeitsbetrag im Vakuum, $c = 3 \times 10^8$ m/s |
| e | Elementarladung, $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C |
| G | Gravitationskonstante, $G = 6,7 \times 10^{-11}$ m ³ s ⁻² kg ⁻¹ |
| h | Planck'sches Wirkungsquantum, $h = 6,7 \times 10^{-34}$ J s |
| k | Boltzmann'sche Konstante in der kinetischen Gastheorie, $k = 1,4 \times 10^{-23}$ J K ⁻¹ . Siehe auch |
| k | Konstante der elektrischen Kraft, $k = 9 \times 10^9$ N m ² C ⁻² |
| m_e | Elektronenmasse, $m_e = 9 \times 10^{-31}$ kg |
| m_p | Protonenmasse, $m_p = 1,7 \times 10^{-27}$ kg |

Liste der grundsätzlichen Einheiten

| | |
|-----------------|--|
| Druck | Pascal, kurz Pa, $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N m}^{-2}$ |
| Energie, Arbeit | Joule, kurz J, $1 \text{ J} = 1 \text{ N m} = 1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$. Für Strahlung oder Atome ist das Elektronenvolt nützlich, kurz eV, $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19}$ J |
| Frequenz | Hertz, kurz Hz, $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$ |
| Kraft | Newton, kurz N, $1 \text{ N} = 1 \text{ kg m s}^{-2}$ |
| Ladung | Coulomb, kurz C, $1 \text{ C} = -6,2 \times 10^{18}$ Elektronenladungen |
| Länge | Meter, kurz m |
| Leistung | Watt, kurz W, $1 \text{ W} = 1 \text{ J s}^{-1} = 1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3}$ |
| Masse | Kilogramm, kurz kg |
| Spannung | Volt, kurz V, $1 \text{ V} = 1 \text{ J C}^{-1}$ |
| Strom | Ampère, kurz A, $1 \text{ A} = 1 \text{ C s}^{-1}$ |
| Temperatur | Kelvin, kurz K, im Alltagsleben aber Grad Celsius, wobei der absolute Nullpunkt der Temperatur bei etwa -273°C liegt. |
| Zeit | Sekunde, kurz s |

Aufgabe und historische Entwicklung der Physik

1

1.1 Physik, Philosophie und Religion

Nicht nur die Naturwissenschaften, allen voran die Physik, haben den Anspruch, die Welt zu erklären. Nein, auch die Philosophie und die Religionen behaupten für sich, sie würden Wahrheiten liefern, vielleicht sogar ewige Wahrheiten. Was ist davon zu halten? Besteht hier ein Konflikt, und hat vielleicht nur eine Seite recht?

Das Verhältnis zwischen Wissenschaft, Philosophie und Religion ist über die Jahrhunderte hinweg von Missverständnissen belastet worden, die Menschen dazu gebracht haben, einzelne oder vielleicht auch alle drei Parteien zu verurteilen. Viele denken, Naturwissenschaften und Religion würden sich gegenseitig ausschließen. Das kann aber nicht ganz richtig sein, denn eine ganze Reihe von Physikern ist religiös. Bevor wir uns näher mit der Physik beschäftigen, möchte ich zunächst einige Punkte im Spannungsfeld von Physik, Philosophie und Religion ansprechen. Es wäre gut, wenn das eine oder andere Missverständnis oder Vorurteil aus dem Weg geräumt werden könnte.

Wenn Sie Wissenschaft, Philosophie und Religion plakativ beschreiben sollten, würden Sie vielleicht in etwa das Folgende sagen:

Philosophie: Suche nach dem Verständnis der wahren Natur der Dinge.

Religion: Erkenntnis der Rolle und Botschaft der Götter.

Wissenschaft: Beobachtung der Natur, Modellentwicklung und Vorhersage des Verhaltens der natürlichen Umgebung.

Oberflächlich betrachtet scheint die Sache klar zu sein: Wenn ein oder mehrere Götter vorkommen, ist es Religion. Wenn es nur um die Natur geht, ist es Wissenschaft. Diese Unterscheidung ist nicht ganz falsch, aber bei Weitem zu kurz gegriffen. Oft hört man auch, dass Religion und Philosophie einen moralischen oder ethischen Bewertungsmaßstab lieferten, den man in der Wissenschaft so nicht fände. So erforschen Physiker Atomkerne und sprechen ohne Bedenken darüber, wie durch die Spaltung von Urankernen Energie gewonnen werden könne. Dies wird als unmoralisches Verhalten empfunden, weil die Kernspaltung in ei-

ner Atombombe zerstörerisch genutzt werden und in der friedlichen Anwendung im Kernkraftwerk zu Katastrophen wie der von Tschernobyl führen kann. Aber trifft dies wirklich zu? Es empfiehlt sich, nicht gleich alles zu glauben, was man so hört. Schauen wir also einmal genau hin. Meine beiden Beispiele, die Atombombe und der Atomreaktor, haben starke moralische Bedenken hervorgerufen. Es ist eine schwierige ethische Frage, zu beurteilen, ob man ihren Bau verantworten kann. Die Kernspaltung aber existiert unabhängig davon, ob wir Bomben oder Reaktoren bauen. Sie ist nicht dafür verantwortlich zu machen, ob wir sie zerstörerisch nutzen oder nicht. Genau genommen existierte die Kernspaltung schon seit Milliarden von Jahren, bevor sie von Physikern und Chemikern entdeckt wurde. Entdecken heißt etwas anderes als erfinden. Wir erfinden ein Telefon, aber wir entdecken ein physikalisches Gesetz wie das der Energieerhaltung. Wir bauen Geräte, die physikalische Phänomene anwenden. Die Anwendung kann man als gut oder schlecht bewerten, das physikalische Phänomen selber aber nicht. Es entzieht sich der Bewertung, weil es einfach nur da ist. Einen ethischen Maßstab brauchen wir nur für das, was wir mit den Ergebnissen der Physik anstellen.

Ich sehe, dass Sie mir das Argument nicht abnehmen wollen. Sie vermuten, ich wolle die Physik ihrer Verantwortung entziehen. Lassen Sie es mich daher mit einem zweiten Thema versuchen zu erklären, das Ihnen vermutlich etwas nähersteht und in dem ihre Perspektive eine andere ist, der Sexualität. Sexualität als solche ist weder gut noch schlecht, ebenso sind unsere Ausprägungen als Mann oder Frau weder gut noch schlecht und das eine nicht besser als das andere. Die wesentliche Frage ist, was Sie mit Ihrer Sexualität machen, wie Sie sie anwenden. Über die Kulturkreise und die Jahrhunderte hinweg sind Menschen zu verschiedensten ethischen Bewertungen gekommen. So gilt heute Päderastie als schlimmes Verbrechen, während es im antiken Griechenland als wesentlicher Teil der Initiation eines Jungen zum erwachsenen Mann galt. Ich bin mir sicher, dass Sie Ihr eigenes moralisches Empfinden haben, wie wir mit unserer Sexualität umgehen sollten. Aber das ist es eben: wie wir damit umgehen, wie wir sie anwenden. Sie sehen, es gilt das gleiche Argument wie für die Physik. Die Sache als solche ist nicht ethisch bewertbar, sondern nur das, was wir daraus machen.

Kommen wir zurück zur Unterscheidung zwischen Wissenschaft und Philosophie. Sind Sie mit meiner Definition einverstanden, die Philosophie sei die Suche nach dem Verständnis der wahren Natur der Dinge? Diese Erklärung wäre vollkommen sinnlos, wenn wir nicht vorher geklärt hätten, was wir denn unter der „wahren Natur der Dinge“ verstehen. Sie wäre eine leere Worthülse, mit der Sie sich nicht abspesen lassen sollten. Um was geht es also?

Lassen Sie mich fragen: „Was ist eigentlich eine Rose?“ Wie würden Sie antworten? Würden Sie sagen, eine Rose sei eine Strauchpflanze, die über Dornen verfügt, einen angenehmen Duft verströmt und wunderschöne Blüten trägt? Wir können die gesamte pflanzenkundliche Beschreibung durchgehen, aber es werden nur Äußerlichkeiten sein, die Sie mir nennen. Wir können über den inneren Aufbau sprechen, über die Atome und Moleküle, aus denen die Rose aufgebaut ist. Die allermeisten dieser Moleküle finden wir auch in anderen Pflanzen. Was also ist das Rosenhafte an der Rose?

Diese Frage ist alt. Schon die griechischen Philosophen, beispielsweise Platon, haben zwischen dem eigentlichen Wesen, oder der Substanz, und der äußeren Form, oder Existenz, unterschieden. Alles Körperliche, Greifbare ist äußere Form. Das innere Wesen, zum Beispiel die Seele, zählt zur Substanz. In der katholischen Dogmatik findet sich die Unterscheidung wieder: Es heißt, im Sakrament der Wandlung ändere sich nicht die äußere Form der Hostie, sondern nur deren innere Substanz.

Ich schrieb zu Beginn, viele Physiker seien gläubig. Sie sind allerdings nicht gutgläubig. In der Physik legen wir Wert darauf, dass unsere Konzepte und Modellvorstellungen überprüfbar sind. Die innere Substanz entzieht sich der Beobachtung. Wir können nur die äußere Form vermessen und beschreiben. Überlassen wir also zunächst die Beurteilung des inneren Wesens der Philosophie und den Religionen. Die Physik nimmt sich das Verständnis der zumindest prinzipiell beobachtbaren, natürlichen Vorgänge zum Ziel. Dies bedeutet nicht, dass Physiker der Natur vollkommen emotionslos gegenüberstehen würden. Im Gegenteil, die meisten empfinden eine tiefe Faszination und Respekt vor der Natur, ihrer Ordnung, aber auch ihrer Schönheit.

1.2 Messung und Vorhersage

Schon vor 5000 Jahren gab es in Sumer (im Süden des heutigen Irak) und in China Observatorien, mit denen die Bewegungen von Sonne, Mond und Sternen am Himmel beobachtet werden konnten. Der Lauf der Planeten hat immer schon eine Faszination auf die Menschen ausgeübt. Man hat in der Anordnung der Sterne am Himmel Bilder gesehen, die mit den Mythen der jeweiligen Kulturen verbunden waren. Moderne Planetariumssoftware¹⁾ vermittelt einen Eindruck davon, wenn sie beispielsweise polynesishe Sternbilder aufrufen.

Im Vordergrund stand natürlich die praktische Anwendung, die Entwicklung von Kalendern und, bei den seefahrenden Völkern, die Navigation. Dafür kann man praktisch alles heranziehen, was sich in festen, unveränderlichen Zyklen abspielt. Die Zeitspanne von einem Sonnenuntergang zum nächsten ist ein Tag, die Periode zwischen zwei Vollmonden nennen wir einen Monat, und die Zeitdauer zwischen zwei Sommersonnenwenden bezeichnen wir als ein Jahr. Egal ob Sie einen solaren oder lunaren Kalender entwerfen, also einen auf die Sonne oder auf den Mond bezogenen Zeitabschnitt zugrunde legen, Sie benutzen messbare, wiederkehrende Ereignisse als Maßstab, um regelmäßig eintreffende Ereignisse wie zum Beispiel die Nilschwemme im alten Ägypten vorherzusagen. Wenn wir einen solchen zeitlichen Maßstab einmal haben, können auch längere Perioden eindeutig beschrieben werden. So gelang es, den Meton-Zyklus zu finden, demzufolge 19 Sonnenjahre fast genau 235 Mondperioden entsprechen, sich die Daten der Vollmonde also alle 19 Jahre wiederholen. Ähnlich lang ist der Saros-Zyklus, dem-

1) Ein Open-Source-Projekt ist Stellarium (www.stellarium.org). Letztes Zugriffsdatum ist Februar 2014.

zufolge sich nach etwas mehr als 18 Jahren Sonnen- und Mondfinsternisse wiederholen. Derartige Zyklen zu finden ist eine erhebliche Leistung, weil wir hier von Perioden sprechen, die ähnlich lang wie die durchschnittliche Lebensarbeitszeit der damaligen Gelehrten sind. Die Überlieferung präziser Zeitangaben mittels eines funktionsfähigen Kalenders war eine wesentliche Voraussetzung. Eine schöne Geschichte besagt, dass im Jahre 585 v. Chr. im Krieg zwischen Lydien und Medien die Schlacht am Halys (im Osten der heutigen Türkei, der heutige Name ist Kizilirmak) durch eine Sonnenfinsternis beendet wurde. Der Ihnen wahrscheinlich wegen des Satz des Thales aus dem Mathematikunterricht bekannte Thales von Milet hatte die Finsternis vorhergesagt, und die Lydier, die mit Milet verbündet waren, hatten daraufhin die Schlacht am vorhergesagten Tag beginnen lassen, um das Ereignis zur Verunsicherung der Gegner nutzen zu können. Diese Geschichte ist ein Beispiel dafür, dass natürliche Ereignisse vorhergesagt werden können, wenn das ihnen zugrunde liegende Prinzip verstanden ist.

Wir wissen, dass griechische Gelehrte zwischen 600–200 v. Chr. wesentliche Ideen und Einsichten entwickelten, die den Übergang von einer Naturphilosophie zu einer Wissenschaft markieren. Die beiden wesentlichen Hilfsmittel waren Logik und Geometrie, also Mathematik. Lassen Sie mich eine Liste von fünf berühmten Köpfen und ihren Leistungen erstellen, beginnend mit dem frühesten.

Thales von Milet (6. Jh. v. Chr.): Erstes Modell des Universums ohne Gott.

Pythagoras (6. Jh. v. Chr.): Einsicht, dass die Erde in etwa die Gestalt einer Kugel hat.

Demokritos (5. Jh. v. Chr.): Entwicklung der Vorstellung, dass die Materie aus unteilbaren Atomen aufgebaut ist.

Aristarchos von Samos (3. Jh. v. Chr.): Erstes heliozentrisches Weltbild, das die Erde in einer Umlaufbahn um die Sonne sieht.

Eratosthenes (3. Jh. v. Chr.): Messung(!) des Umfangs der Erde.

Egal, ob wir uns Pythagoras oder Aristarchos ansehen, alle haben hervorragende wissenschaftliche Leistungen vollbracht. Heutzutage neigt man dazu, die frühen Forscher zu übergehen. Alles, was damals erarbeitet wurde, zählt heute zum Allgemeinwissen, und daher muss es doch banal sein, denkt man. Dies ist ein Irrtum, denn die Einsichten mussten erst einmal entwickelt werden. Ein direkter Nachweis war nicht möglich, und daher war es notwendig, verschiedene Beobachtungen logisch miteinander zu verbinden. Ich will es noch etwas deutlicher machen. Wie würden Sie mir beweisen, dass die Erde in etwa die Gestalt einer Kugel hat? Argumentieren Sie bitte nicht mit Satellitenbildern oder Magellans Weltumsegelung, denn all dies gab es erst mehr als 2000 Jahre nach Pythagoras. Gar nicht so einfach, nicht wahr? Es schadet also nicht, ein wenig Respekt vor den frühen Forschern zu haben und sie nicht zu übergehen.

Die Kugelgestalt der Erde lässt sich durch die Form des Erdschattens bei Mondfinsternissen belegen. Der Erdschatten hat die Form einer Scheibe. Nur eine Kugel würde in alle Richtungen einen scheibenförmigen Schatten werfen, und daher muss die Erde kugelförmig sein. Sie können sogar sehen, dass der Erdschatten

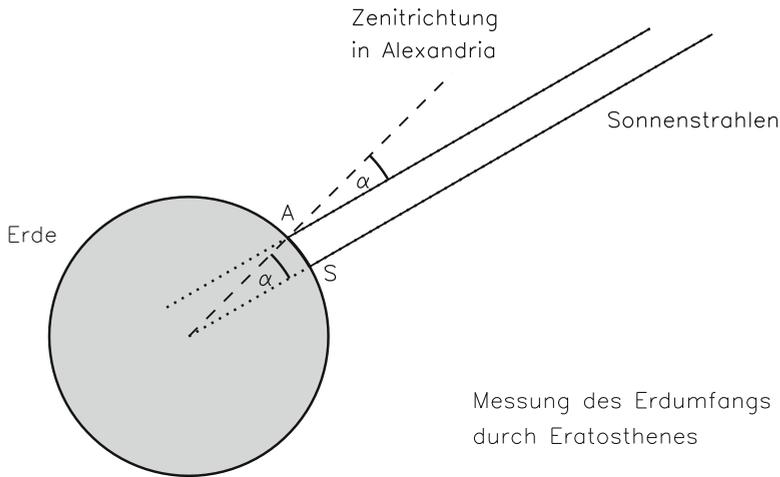


Abb. 1.1 Sonnenstrahlen treffen in Syene (S) und in Alexandria (A) parallel ein, im südlichen Syene aus Zenitrichtung, im nördlicheren Alexandria in einem Winkel α zum Zenit. Die gestrichelten Linien vom Erdmittelpunkt zu den beiden Orten bilden den gleichen Winkel α .

deutlich größer ist als der Mond, woraus folgt, dass auch die Erde größer ist als der Mond.

Besonders herausheben möchte ich Eratosthenes, weil er nicht nur eine qualitative, sondern eine quantitative Aussage macht, also nicht nur Eigenschaften beschreibt, sondern auch in Zahlen ausdrückt. Eratosthenes nutzte für seine Messung des Erdumfangs einige Einsichten, die zu seiner Zeit bereits bekannt waren. Die erste ist die Kugelgestalt der Erde. Dies bedeutet insbesondere, dass eine in Nord-Süd-Richtung verlaufende Linie auf der Erdoberfläche (denken Sie an die Linien gleichen Längengrads auf dem Globus) ein Teil eines Kreises ist, dessen Mittelpunkt auch der Mittelpunkt der Erde ist, eines sogenannten Großkreises. Mit anderen Worten, der Radius des Kreises ist der Erdradius, und der Umfang des Kreises ist der Erdumfang. Die zweite Einsicht ist, dass sich Licht geradlinig oder strahlenförmig ausbreitet. Man wusste bereits, dass die Sonne sehr weit von der Erde entfernt ist, Lichtstrahlen von der Sonne also parallel auf die Erde auftreffen. In der ägyptischen Stadt Syene kann man zum Zeitpunkt der Sommersonnenwende gegen Mittag keinen Schattenwurf eines senkrechten Stabs sehen. In der nördlich gelegenen Stadt Alexandria beobachtet man aber einen Schatten, aus dessen Länge im Vergleich zur Höhe des Stabs man berechnen kann, dass die Sonne etwa 7° südlich vom Zenit (senkrecht über dem Beobachter) steht. Mit anderen Worten, Alexandria liegt 7° nördlich von Syene. Diese Situation ist in Abb. 1.1 schematisch dargestellt. Die Entfernung zwischen beiden Städten kann man messen, und sie steht zum Erdumfang im gleichen Verhältnis wie 7° zu den 360° eines vollen Kreises. In modernen Einheiten berechnete Eratosthenes den Erdumfang als 42 000 km, das sind nur etwa 5 % mehr als der moderne Wert.

Die Griechen entwickelten auch Vorstellungen zu anderen Fragen, beispielsweise der Schwerkraft. Nach Aristoteles war die Erde nicht das Zentrum der Welt, sie

befand sich nur im Zentrum. Seine Vorstellung war, dass Schweres, also Materie, immer zum Zentrum gezogen wird, während Leichtes, also Licht und Flammen, aufsteigt. Zur Materie gehört auch Schmutz, und so befindet sich die Erde im schmutzigen Teil der Welt, ist also unrein. Dazu passt, dass die Unterwelt eben unten, die Götter aber hoch im Himmel zu finden waren.

Ein Großteil des Wissens der Antike ist verlorengegangen. Kriege, Religionsstreitigkeiten und politische Wirren haben dazu beigetragen. Das altgriechische Wissen ist interessanterweise durch die Tätigkeit arabischer Gelehrter, beispielsweise Ibn Rushd (auch bekannt als Averroes) in Andalusien, wieder zu uns zurückgekommen. Welche Leistungen in Sumer oder von den Azteken vollbracht wurden, wissen wir nicht.

1.3 Wahrheit

Ich werde die Wahrheit sagen, die ganze Wahrheit und nichts als die Wahrheit.

Freunde amerikanischer Kriminal- und Gerichtsfilm haben diese Formulierung des Zeugeneids gewiss schon zur Genüge gehört. Aber was ist das eigentlich, die Wahrheit? Was ist der Unterschied zwischen der Wahrheit und der ganzen Wahrheit? Gibt es vielleicht feinsinnige Unterschiede zwischen den beiden, vielleicht auch nur ungefähr die Wahrheit? Gilt sie nur für mich oder für alle, nur heute oder immer?



Wichtig zu wissen

In der Physik gibt es keine absolute Wahrheit. Die physikalischen Gesetze sind keine von irgendjemandem vorgegebenen festen Regeln, an die sich die Natur halten muss. Im Gegenteil, sie fassen nur zusammen, wie sich die Natur in einer gegebenen Situation bisher immer verhalten hat. Die Formulierung *in einer gegebenen Situation* ist absichtlich gewählt, denn physikalische Gesetze gelten häufig nur unter bestimmten Bedingungen und mit einer gewissen Genauigkeit. Alle physikalischen Gesetze können falsch sein, und damit auch alle Erkenntnisse, die wir in diesem Buch besprechen werden. Sämtliche Regeln und daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen müssen kritisch hinterfragt werden. Nicht nur einige und nicht nur gelegentlich, sondern alle und immer.



Definition

Wie funktioniert dies im Einzelnen? Ein wichtiger Schritt ist das logische Ableiten von physikalischen Aussagen. Es gibt hierzu zwei grundsätzliche Wege, die deduktive und die induktive Logik. Deduktive Logik leitet aus zwei als wahr angenommenen Aussagen eine dritte ab. Diese neue Aussage muss ebenfalls wahr sein, wenn die ersten beiden wahr sind. Ist dies nicht der Fall,

muss mindestens eine der beiden Ausgangsaussagen falsch sein. Nehmen wir ein Beispiel und wählen zwei Aussagen.

1. Alle Formen von Materie sind aus Atomen aufgebaut.
2. Holz ist eine Form von Materie.

Aus 1. und 2. können wir schließen,

3. Holz ist aus Atomen aufgebaut.

Definition

Induktive Logik verallgemeinert eine für eine Auswahl von Objekten gefundene Aussage auf alle Objekte der gleichen Art. Auch hierzu ist ein Beispiel hilfreich.



1. Die ungeraden Zahlen 3, 5, 7, 9 und 11 sind nicht durch 2 teilbar.

Aus 1. folgern wir,

2. alle ungeraden Zahlen sind nicht durch 2 teilbar.

Man beachte, dass ein einziges Gegenbeispiel die Regel als falsch belegt. Induktive Logik hat auch ganz generell ihre Tücken. Es ist unmöglich zu beweisen, dass ein bestimmtes Verhalten oder ein Vorgang niemals auftreten wird. Wir können uns so viele Beispiele ansehen wie wir wollen, das Fehlen von Beweisen für den fraglichen Vorgang oder das gesuchte Verhalten ist kein Nachweis für dessen Fehlen. Sie mögen vorgeben, noch nie bei einer Prüfung geschummelt zu haben. Das Einzige, was wir anderen überprüfen können, ist, ob Sie schon einmal einschlägig aufgefallen sind. Der gesunde Menschenverstand sagt uns jedoch, dass nicht alle, die noch nie erwischt worden sind, auch wirklich unschuldig sind. Wundern Sie sich also bitte nicht, wenn Ihre Unschuldsbeteuerungen angezweifelt werden. Dies wird gelegentlich in der politischen Arena ausgenutzt, um Konkurrenten unter Druck zu setzen. Sobald ein Verdacht auf Fehlverhalten vorliegt, sagen wir Vorteilsnahme, fordert man, der wertere Kollege von der anderen Partei möge jetzt nachweisen, dass er niemals (!) die eigenen Interessen über die Interessen des Staates gesetzt hat. Der Beschuldigte kann dies logisch gar nicht leisten und gerät daher noch stärker unter Druck, genau wie beabsichtigt.

Tipp

Die sichere Vorgehensweise in der Physik ist, Modelle und Konzepte miteinander über deduktive Logik zu kombinieren, um quantitative und nachprüfbar Vorhersagen aufzustellen. Diese Vorhersagen können dann experimentell überprüft werden. Hierbei ist es oft interessanter, die Vorhersage *nicht* bestätigen zu können, weil dann eines oder mehrere der Modelle als falsch erkannt werden können.





Beispiel

Ein schönes Beispiel ist das Olbers'sche Paradoxon. Zwei Befunde werden miteinander kombiniert.

1. Die Helligkeit von Objekten am Himmel fällt mit dem Quadrat ihres Abstands ab.
2. Wenn die Objekte gleichmäßig im Universum verteilt sind, nimmt ihre Anzahl in einer bestimmten Entfernung mit dem Quadrat des Abstands zu.

Diese beiden Effekte kompensieren sich gerade. Aus 1. und 2. können wir daher schließen:

3. Aus jeder Entfernung sehen wir den gleichen Beitrag an Strahlung.

Wenn das Universum unendlich ausgedehnt wäre, müsste auch die Gesamthelligkeit unendlich sein. Dies wird offensichtlich nicht beobachtet, denn der Nachthimmel ist recht dunkel und nicht beliebig hell. Da wir tagsüber die Sonne sehr hell sehen und nachts das Band der Milchstraße ausmachen können, muss unser Abstand von der Sonne viel kleiner sein als der typische Abstand zwischen Sternen, denn die Sonne erscheint sehr viel heller als alle anderen Sterne zusammen. Auch die Milchstraße muss eine Anhäufung von Sternen darstellen, sonst könnten wir sie nicht als so helles Band am Himmel erkennen. Weiter muss es etwas geben, was den Strahlungsbeitrag aus sehr großen Entfernungen begrenzt, beispielsweise ein endliches Alter des Universums.

Nicht immer ist die Messung so einfach wie im Fall des Olbers'schen Paradoxons. Generell wird man erst einmal der eigenen Messung, dem eigenen Experiment misstrauen. Die Messunsicherheit ist zu untersuchen. Man prüft auch die Messapparatur und wiederholt die Messung. Außerdem ist es sinnvoll, ein zweites, unabhängiges Experiment durchzuführen. Wenn aber alle Messergebnisse eine logisch abgeleitete Schlussfolgerung widerlegen, muss wenigstens eine der zugrunde liegenden Modellannahmen falsch sein. Wir müssen also unser Modell ändern. Nichts am alten Modell ist außer Zweifel, oft reichen aber kleine Änderungen aus, die man dann auch wieder durch Experimente prüfen muss.

Alles klar, denken Sie. Vorsicht, sage ich. Was machen wir denn, wenn zwei Modelle die Prüfung durch unsere Experimente und Messungen bestehen? Welches von den Modellen ist denn jetzt das bessere, und kann ich überhaupt zwischen ihnen unterscheiden? An dieser Stelle darf ich Ihnen William of Ockham (oder Occam) vorstellen, einen Franziskanermönch und Philosophen, der sich zu Beginn des 14. Jahrhunderts mit diesen Fragen beschäftigt hat. Auf ihn geht das Sparsamkeitsprinzip zurück, das auch als Ockhams Rasierer bekannt ist. Kurz ausgedrückt besagt es, dass von zwei konkurrierenden Modellen im Zweifel das einfachere vorzuziehen ist. Einfach heißt hier, dass möglichst wenige willkürliche Annahmen notwendig sind. In der mathematischen Sprache der modernen Welt sagt man, dass möglichst wenige freie Parameter wünschenswert sind, also weni-

ge Stellschrauben, mit denen man das Modell an eine Messung anpassen kann. Wir suchen also natürliches Verhalten, das mit wenigen, allgemeinen Gesetzen beschreibbar ist.

1.4 Grundlegende Methodik der Physik

Die Grundstrukturen der Physik sind Modellvorstellungen, die permanent durch Experimente, also Messungen, geprüft und weiterentwickelt werden. Die Modelle sind auf Konzepte aufgebaut, die ein Gerüst von genau definierten Begriffen liefern. In der folgenden Auflistung sind einige wesentliche Punkte aufgeführt, die wir in den nächsten Kapiteln weiterentwickeln werden.

- Konzept
 1. grundsätzliche Beschreibung als Teilchen, Welle usw.
 2. Definition physikalischer Zustandsparameter, beispielsweise Masse und Energie
- Modell
 1. detaillierte und quantitative Beschreibung
 2. präzise Formulierung
 3. Gültigkeit muss prinzipiell überprüfbar sein (Falsifizierbarkeit)
 4. eingeschränkter Gültigkeitsbereich möglich
- Beobachtung und Messung
 1. quantitative Bestimmung des Verhaltens und der Zustandsparameter
 2. Kontrolle der Umgebungsbedingungen
 3. gleichzeitige Bestimmung der Messunsicherheit.

Wichtig zu wissen

Ich möchte betonen, dass alle Begriffe eine genaue Definition haben. Nur auf der Basis dieser Definition können physikalische Gesetze abgeleitet und im Experiment überprüft werden. Eine präzise Formulierung aller Aussagen ist daher von Anfang an unabdingbar. Die physikalische Definition von Begriffen ist häufig nicht identisch mit dem im Alltagsleben gebräuchlichen Verständnis. Es kommt daher immer wieder zu Verwirrung, wenn man die Begriffsdefinition der Physik nicht beachtet. Es gibt zwei Fachgebiete, die durch eigene Definitionen und genaue Formulierung eine eigene Sprache entwickelt haben. Das eine Gebiet ist die Physik, das andere Jura, die Rechtswissenschaft. Diese eigenen Sprachen hören sich so an wie Deutsch, müssen und können aber wie Fremdsprachen gelernt werden. Das Ganze ist weit weniger schlimm, als es klingt. Lassen Sie sich einfach fallen ...



Koordinaten, Geschwindigkeit und Beschleunigung

2

In diesem Kapitel ...

Wie beschreibt man etwas quantitativ, also in seinem Ausmaß? Fangen wir mit der einfachsten Situation an, die man sich denken kann. Ignorieren wir die Form des Objekts unseres Interesses. Tun wir einfach so, als wäre es ein Punkt ohne jegliche Ausdehnung. Dieses idealisierte Objekt nennen wir ein *Punktteilchen*. In diesem Kapitel wollen wir physikalische Größen festlegen, die anzeigen, wo sich das Punktteilchen befindet und wie es sich bewegt.

2.1 Koordinaten

Wer kennt es nicht aus den Piratenspielen der Kindheit? Sie haben eine Schatzkarte gefunden, auf der sich Hinweise finden wie etwa der folgende: Von der toten Eiche gehe zwanzig Schritte nach Süden, dann dreißig Schritte auf die Bergspitze zu. In dieser Anweisung ist alles zu finden, was einen Ort nachvollziehbar festlegt. Es gibt eine Referenzposition, die tote Eiche. Weiter sind die Abstände in zwei unabhängige, feste Richtungen angegeben.

Unser Schatzsucher bewegt sich auf der Erdoberfläche, daher reichen zwei unabhängige Richtungen aus, um jeden möglichen Ort eindeutig beschreiben zu können. Im Allgemeinen sind drei unabhängige Richtungen erforderlich. Unabhängig sind die Richtungen genau dann, wenn sich keine als Kombination der anderen darstellen lässt. Diese drei Richtungen bilden zusammen mit dem Referenzpunkt ein *Koordinatensystem*, in dem die Richtungen durch Koordinatenachsen dargestellt werden. Die für jede der drei Richtungen zu wählenden Abstände nennen wir Koordinaten. Ein besonders einfaches Koordinatensystem geht auf den Franzosen René Descartes zurück. In dem nach ihm benannten kartesischen System stehen die Koordinatenachsen senkrecht aufeinander.

Abbildung 2.1 zeigt, dass es egal ist, in welcher Reihenfolge man sich entlang der drei Koordinatenachsen bewegt, man kommt immer am gleichen Punkt an. Da sich die Position des Punkts ändern kann, können sich auch seine Koordinaten ändern. Wir identifizieren sie mit den Symbolen x , y und z . Für alle drei Koordina-

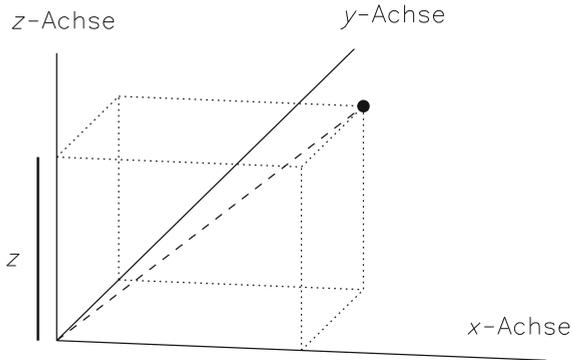


Abb. 2.1 In einem kartesischen Koordinatensystem geben die Koordinaten x , y und z die Abstände an, die in Richtung der jeweiligen Achsen zurückzulegen sind. Der Ortsvektor \vec{x} ist gestrichelt dargestellt.

ten zusammen vereinbaren wir ein weiteres Symbol,

$$\vec{x} = (x, y, z). \quad (2.1)$$



Wichtig zu wissen

Der kleine Pfeil symbolisiert hierbei, dass in der Ortsbestimmung sowohl der Abstand vom Nullpunkt des Koordinatensystems als auch die Richtung einbezogen ist. Derartige Größen, die sowohl einen Betrag als auch eine Richtung haben, nennen wir *Vektoren*.

Jede Einzelkoordinate steht für ein Wegstück. Um diese Strecke eindeutig angeben zu können, benötigen wir einen Maßstab, eine *Einheit*. Fast alle physikalischen Größen sind als Produkt einer Zahl und einer Einheit zu verstehen. Bei unseren Ortskoordinaten könnte die Einheit der Meter sein, also beispielsweise $x = 7 \text{ m}$. Sie können natürlich auch Kilometer benutzen, also $x = 0,007 \text{ km}$. Mit der Wahl der Einheit ändert sich der Zahlenwert. Wir müssen also immer klarmachen, welche Einheit wir benutzen.

Den Ort eines Punktteilchens beschreiben zu können, ist schon ganz gut. Besser wäre es, auch angeben zu können, wann das Teilchen am fraglichen Ort war. Wir müssen also die Zeit angeben. Die Physiker haben sich angewöhnt, das Symbol t für die Zeit zu benutzen. Eine passende Einheit ist die Sekunde, oft als s abgekürzt. Eine Zeitangabe könnte somit $t = 4 \text{ s}$ sein, genau genommen beschreibt diese Angabe jedoch eine Zeitdauer. Für eine vollständige Zeitinformation benötigen wir noch den Nullpunkt der Zeitmessung, ähnlich wie auch für die Ortsangabe die Kenntnis des Nullpunkts des Koordinatensystems erforderlich ist. Gut, jetzt können wir angeben, wann sich ein Teilchen wo aufhält.



Wichtig zu wissen

Leider sind unsere Punktteilchen häufig beweglich, und wir müssen die Ver-

änderung des Orts beschreiben. Für die Änderung einer physikalischen Größe werde ich in diesem Buch den griechischen Buchstaben δ benutzen. So wird $\delta\vec{x}$ für die Änderung des Ortsvektors \vec{x} stehen, analog dazu δt für ein Zeitintervall. Das Verhältnis der beiden ergibt die Geschwindigkeit, meistens bezeichnet durch das Symbol \vec{v} . Hierbei gilt

$$\vec{v} = (v_x, v_y, v_z) = \frac{\delta\vec{x}}{\delta t} = \frac{(\delta x, \delta y, \delta z)}{\delta t} = \left(\frac{\delta x}{\delta t}, \frac{\delta y}{\delta t}, \frac{\delta z}{\delta t} \right). \quad (2.2)$$

Auch die Geschwindigkeit ist aus drei Geschwindigkeitskomponenten aufgebaut, ist also ein Vektor, der Auskunft über den Geschwindigkeitsbetrag und die Richtung der Bewegung gibt.

Tipp

Zwei Aspekte möchte ich betonen. Erstens hat auch die Geschwindigkeit eine Einheit. Man kann sie direkt aus den Einheiten der Ortsänderung und des Zeitintervalls ableiten, Meter und Sekunde. Die Geschwindigkeit ist das Verhältnis von Ortsänderung und Zeitintervall, und damit ist die Einheit der Geschwindigkeit auch das Verhältnis von Meter und Sekunde, kurz m/s.



Mein zweiter Hinweis gilt dem Nullpunkt unseres Koordinatensystems, der keine Rolle für die Berechnung von Abständen oder Ortsveränderungen spielt. Sie erkennen das, wenn Sie x_0 als neuen Nullpunkt für die x -Koordinaten ansetzen. Sie erhalten dann neue Koordinaten, die ich hier durch einen Strich kennzeichnen werde, also $x' = x - x_0$. Die Differenz zweier Koordinaten x'_1 und x'_2 beträgt

$$x'_2 - x'_1 = x_2 - x_0 - (x_1 - x_0) = x_2 - x_1 + x_0 - x_0 = x_2 - x_1, \quad (2.3)$$

also genau so viel wie der Abstand ausgedrückt in den ursprünglichen Koordinaten. Eine solche Eigenschaft haben wir gerne. Wir können den Nullpunkt unseres Koordinatensystems so wählen, wie es für uns am bequemsten ist.

Schwindelfrei gehen wir einen Schritt weiter und definieren die Beschleunigung als die Rate der Geschwindigkeitsänderung. Das meistverwendete Symbol ist \vec{a} , und es gilt

$$\vec{a} = (a_x, a_y, a_z) = \frac{\delta\vec{v}}{\delta t} = \frac{(\delta v_x, \delta v_y, \delta v_z)}{\delta t} = \left(\frac{\delta v_x}{\delta t}, \frac{\delta v_y}{\delta t}, \frac{\delta v_z}{\delta t} \right). \quad (2.4)$$

Sie haben bereits erkannt, dass auch die Beschleunigung ein Vektor ist, also Betrag und Richtung hat. Und die Einheit? Kein Problem für Sie, natürlich haben wir die Geschwindigkeitseinheit durch eine Zeiteinheit zu teilen, und somit ergibt sich m/s^2 .

Tipp

Die Beschleunigung ist immer dann von null verschieden, wenn sich wenigstens eine der Geschwindigkeitskoordinaten ändert. Der Geschwindigkeitsbetrag mag konstant sein, aber wenn Sie die Richtung ändern, also eine Kurve

