

Josef Honerkamp

Die Entdeckung des Unvorstellbaren

Einblicke in die Physik und ihre Methode

Spektrum
AKADEMISCHER VERLAG

Prof. Dr. Josef Honerkamp

Prof. em. der Fakultät für Mathematik und Physik, Universität Freiburg

Wichtiger Hinweis für den Benutzer

Der Verlag und die Autoren haben alle Sorgfalt walten lassen, um vollständige und akkurate Informationen in diesem Buch zu publizieren. Der Verlag übernimmt weder Garantie noch die juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für die Nutzung dieser Informationen, für deren Wirtschaftlichkeit oder fehlerfreie Funktion für einen bestimmten Zweck. Der Verlag übernimmt keine Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren, Programme usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch 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. Der Verlag hat sich bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber dennoch der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar gezahlt.

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.

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media
springer.de

© Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg 2010
Spektrum Akademischer Verlag ist ein Imprint von Springer

10 11 12 13 14

5 4 3 2 1

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Planung und Lektorat: Dr. Andreas Rüdinger, Sabine Bartels

Redaktion: Dr. Sonja Bernhart

Herstellung und Satz: Crest Premedia Solutions (P) Ltd, Pune, Maharashtra, India

Umschlaggestaltung: wsp design Werbeagentur GmbH, Heidelberg

ISBN 978-3-8274-2425-9

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	IX
1 Prolog	1
<i>Brief vom 3.7.2007</i>	1
<i>Brief vom 17.7.2007</i>	8
2 Die Bewegung	19
Das erste physikalische Gesetz in mathematischer Form und die geradlinig-gleichförmige Bewegung	19
Das Trägheitsgesetz und ideale Bezugssysteme	25
Das Galileische Relativitätsprinzip	30
Kräfte und das Gravitationsgesetz	37
Bewegungsänderungen und ihre Ursache	45
<i>Brief vom 4.9.2007</i>	51
Die Newtonsche Bewegungsgleichung	54
Nachfolger Newtons, Bewegungen starrer Körper	59
Eingeschränkte Bewegungen	67
Das Hamiltonsche Prinzip	71
Bewegungen in Nicht-Inertialsystemen	77
3 Von Blitzen, Feldern und Wellen	83
<i>Brief vom 9.10.2007</i>	83
Die Elektrisierer	84
Elektrostatik	90
Konstante Ströme	97
Die magnetische Wirkung des elektrischen Stroms	106

Erste technische Verwertungen, Telegraf und Elektromotor	113
Das Induktionsgesetz	117
Die Maxwellsche Theorie des Elektromagnetismus	122
Die Entdeckung der elektromagnetischen Wellen	130
Theorien über das Licht	138
Wellen	148
4 Thermodynamik und Statistische Mechanik	157
<i>Brief vom 8.1.2008</i>	157
Was ist Wärme	159
Energie	165
Entropie	173
Thermodynamische Kreisprozesse, Kühltisch und Wärmepumpe	181
Verhalten von Gasen und Flüssigkeiten	189
Mischungen und Zweiphasensysteme	194
Statistische Mechanik	197
Emergenz	205
5 Die Relativitätstheorien	211
<i>Brief vom 2.4.2008</i>	211
Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit	213
Raum und Zeit: Der Begriff der Gleichzeitigkeit	220
Raum und Zeit: Zeitdehnung und Längenkontraktion	225
Raum und Zeit: Das Zwillingsparadoxon	228
Die Masse eines Körpers als Maß für dessen Energieinhalt	232
Grundlagen der Allgemeinen Relativitätstheorie: Das Äquivalenzprinzip	236
Folgerungen aus der Allgemeinen Relativitätstheorie	246
6 Quanten	257
<i>Brief vom 8.7.2008</i>	257
Kathoden- und Röntgenstrahlen	259

Radioaktivität	268
Wärmestrahlen	275
Lichtquanten	284
Das Bohrsche Atommodell	291
Atombau und Spektrallinien	298
Das Pauli-Prinzip	306
Die Geburt der Quantenmechanik	314
Die Unbestimmtheitsrelation	321
Schrödingers Katze	328
Das Gedankenexperiment von Einstein, Podolski und Rosen	337
Die Bellschen Ungleichungen	344
Quanteninformatik	346
7 Epilog	357
<i>Brief vom 11.2.2009</i>	357
Literatur	371
Index	375

Vorwort

Die Idee zu diesem Buch entstand aus einem Unbehagen heraus. Schon immer hatte ich dieses gespürt, wenn ich mit Freunden, Bekannten oder Kollegen, die den Naturwissenschaften fremd gegenüberstanden, ins Philosophieren geriet und dabei versuchte, einen Einblick in das Weltbild eines Physikers zu geben. Hinterher war ich immer frustriert. Zunächst hatte ich geglaubt, ich hätte so schnell nicht die richtigen Worte gefunden, aber bald hatte ich eingesehen, dass das Problem tiefer liegt. Es sind die Unterschiede im Vorverständnis, in der Ansicht, welche Fragen interessant sind, welche Kenntnisse und Fähigkeiten besonders schätzenswert sind. Das Selbstverständnis eines Faches hat man ja über viele Jahre in einer Art intellektueller Sozialisation verinnerlicht und lässt sich einem Außenstehenden nicht so schnell vermitteln.

Nachdem ich nun als Emeritus nicht mehr Physik selbst betrieb, aber immer häufiger die Gelegenheit erhielt, in allen möglichen Kreisen über Physik zu reden, wurde das Unbehagen noch größer. Und obwohl ich mir nach meinem letzten Lehrbuch geschworen hatte: „Nie wieder ein Buch“, habe ich mich nun doch entschlossen, einmal in aller Ruhe darzulegen, wie in der Regel ein Physiker seine Wissenschaft sieht und wie er sie versteht.

Es sollte also in erster Linie ein Buch über die Physik als Wissenschaft werden. Dabei sollte aber das „Metaphysische“ nicht einfach nur als Behauptung daherkommen, sondern sollte sich letztlich auch als Schlussfolgerung beim Leser selbst einstellen können, nachdem man die physikalischen Theorien und ihre Geburtswehen, ihre Eigenarten, ihre Folgen und Grenzen kennen gelernt hat.

Natürlich sollte das alles möglichst allgemein verständlich und in einem erzählerischen Ton geschehen, und bei der Überlegung, wie man das auch noch unterhaltsam gestalten könnte, erinnerte ich mich daran, dass der große Mathematiker Leonard Euler im Jahre 1769 ein Buch unter dem Titel *Briefe an eine deutsche Prinzessin über verschiedene Gegenstände aus der Physik und Philosophie* veröffentlicht hatte. Da es nun heute Prinzessinnen in größerer Anzahl nicht gibt, kam mir die Idee, „Briefe an eine Abiturientin über verschiedene Bereiche der Physik, nicht ohne Philosophie und Geschichte“ zu schreiben, wobei die „Abiturientin“ lediglich das Anspruchsniveau charakterisieren sollte. Diese Form schien mir wie geschaffen für mein Vorhaben: Ein Brief ist meistens so kurz, dass man ihn gerne ohne Pause liest, er kann persönlicher gehalten sein und lebendiger gestaltet werden. Nachdem ich mehrere Kapitel in dieser Art geschrieben hatte, merkte ich aber, dass man diese Form nicht ganz durchhalten kann. Briefe sind nun einmal etwas für menschliche Dinge, und ich wollte doch über die anderen Dinge dieser Welt reden. So ist eine Mischform entstanden, jedem Kapitel geht ein Brief voran, in dem Gedanken über das Thema des Kapitels ausgeführt sind. Für den Namen der „Abiturientin“ habe ich übrigens den meiner ältesten Enkelin Caroline gewählt.

Das Buch stellt die Entstehung unseres Wissens über die Natur im Bereich der Physik dar, und zwar auf drei Ebenen:

- auf einer rein physikalischen Ebene: Wichtigste physikalische Phänomene, Begriffe, Voraussetzungen, Prinzipien und Theorien werden erklärt. Man soll also wirklich etwas über Physik lernen.
- auf der wissenschaftstheoretischen Ebene: Die naturwissenschaftliche Methode und die Art ihres Anspruchs auf „Wahrheit“ werden transparent gemacht. Man soll also die Macht dieser Methode kennen lernen, aber auch die Grenzen der Theorien.
- auf wissenschaftshistorischer Ebene: Die Diskussionen im Rahmen der beiden oberen Ebenen folgen der geschichtlichen Entwicklung. Die Art des Fortschritts in der Physik wird so transparent.

Dabei liegt der Schwerpunkt auf der „alten“ Physik. Über aktuelle Fragen der Physik, z. B. über schwarze Löcher oder über den Urknall gibt es viele gute Bücher, kaum aber darüber, wie die Physik begann, wie man auf die ersten Probleme stieß, wie man sie löste und wie die naturwissenschaftliche Methode immer neue Erfolge zeitigte, die sich auch in der technischen Revolution widerspiegelte. Es soll aber auch gezeigt werden, wie bei der Entstehung dieses Wissens die Wissenschaftler erst noch auf schwankendem Boden standen, wie dieser sich allmählich festigte und wie das geistige Band, der Kanon der Theorien, immer größer, fester und kohärenter wurde.

Mit der Entwicklung der Physik bis zur Quantenmechanik hat man dann den Weg der Physik weit genug verfolgt, um das Weltbild der Physiker, deren Denkweise und deren intellektuellen Wertekanon zu verstehen. Man wird sehen, wie die Begriffe, die zur Erklärung der Welt notwendig werden, immer unanschaulicher werden, wird erkennen, dass diese Begriffe immer so neu und so unvorhersagbar sind, dass sie

durch reines Denken allein nicht zu entdecken wären. Die Beschränkung unserer Vorstellungskraft auf die Welt unserer menschlichen Erfahrungen wird deutlich werden, und man wird sich damit abfinden, dass wir die Natur außerhalb unserer menschlichen Erfahrungen nur verstehen und über sie verfügen können, wenn wir Unvorstellbares akzeptieren.

Ich habe drei Zielgruppen für dieses Buch im Auge:

- alle, die einfach einmal wissen wollen, wie die Physik „funktioniert“, um was es dort bei den prominenten Theorien geht, warum und in welcher Form es dort gesichertes Wissen gibt.
- Physiker: Diese sollten das Buch unterhaltsam finden und häufig auf etwas stoßen, was sie noch nicht wissen, vergessen haben oder so noch nie gesehen haben, insbesondere Studierende der Physik, die einen groben Überblick über die Themen ihres Studiums erhalten wollen.
- Schülerinnen und Schüler (nicht nur Abiturientinnen), in denen vielleicht die Liebe zur Physik oder einer anderen Naturwissenschaft geweckt werden kann.

Bei der Entstehung dieses Buch haben mich viele durch Wort und Tat unterstützt. Zunächst möchte ich meiner Frau danken, die alle Briefe und Abschnitte als Erste auf ihre Verständlichkeit geprüft hat, ebenso meinen Kindern Stefanie und Carsten, dann meinem Mitarbeiter Andreas Liehr, meinen Kollegen Hartmann Römer, Hans Mohr, Andreas Voßkuhle, Klaus Eichmann, Helmut Hoping sowie Klaus Scharpf, Martin Sunder-Plassmann, Christoph Horst, Christiane Zahn, die vorab alle oder einzelne Teile des Manuskripts kritisch gelesen haben und wertvolle Hinweise gegeben haben. Danken möchte ich auch den Freunden meines Rotary-Clubs und des Stammtisches Oberkirch Freiburg und den vielen weiteren,

die mich ermutigt haben und mir zeigten, dass eine solche Darstellung auf großes Interesse stoßen würde.

Der Spektrum-Verlag hat mich, insbesondere durch ihren Programmleiter Dr. Andreas Rüdinger, außerordentlich sorgfältig und kompetent bei der Veröffentlichung des Manuskripts begleitet.

Emmendingen, im November 2009

Josef Honerkamp

2

Die Bewegung

Das erste physikalische Gesetz in mathematischer Form und die geradlinig-gleichförmige Bewegung

Galilei hatte nicht nur Euklid gelesen und sich nicht nur darauf beschränkt, die Prinzipien seiner neuen Wissenschaft lediglich zu verkünden. Er war ein leidenschaftlicher Forscher, der auch schon zu konkreten grundlegenden Erkenntnissen in seiner neuen Wissenschaft kam. Am bekanntesten sind seine astronomischen Studien. Er hatte von der Erfindung eines Fernrohrs gehört und konnte nach seinen Informationen schnell selbst ein solches herstellen. Er entdeckte mit diesem u. a. die vier größten Monde des Jupiters und sah in der Konstellation von Jupiter und seinen Monden ein System, das dem von Sonne und Planeten ähnlich war. Das war für ihn ein wichtiges Argument für die Akzeptanz des Kopernikanischen Weltbildes. Er beschäftigte sich auch mit der Schwimmfähigkeit und mit der Elastizität von festen Körpern, vor allem aber mit der Bewegung von Körpern.

In vielen Büchern (z. B. Fölsing 1989) wird Leben und Werk von Galilei ausführlich gewürdigt. Hier soll auf zwei Dinge eingegangen werden, die nicht so bekannt sind, aber für das

Verständnis davon, was Wissenschaft überhaupt ist, höchst relevant sind.

Neben dem Fernrohr war die schiefe Ebene das wichtigste Handwerkszeug von Galilei. Diese war ein langes Holzbrett, in das eine Rinne eingegraben war, und er hatte in diese noch, um sie ganz glatt zu machen, ein Pergament eingeklebt. Er stellte dieses Holzbrett nun so auf, dass sich das linke Ende des Brettes höher als das rechte befand, und er ließ eine völlig runde und glatt polierte Kugel vom linken höheren Ende in der Rinne nach unten rollen. Er hatte herausgefunden, dass diese Bewegung der Kugel einer Fallbewegung gleichkommt, nur mit einer, je nach Neigung des Brettes, anderen konstanten Beschleunigung.

Galilei hat sorgfältig die Strecken ausgemessen, die in gleichen Zeiten durchlaufen werden. So stellte er fest, dass die Wege, die in aufeinander folgenden Zeitabschnitten durchlaufen werden, stets um zwei Weeinheiten anwachsen, der insgesamt durchlaufende Weg damit proportional zum Quadrat der benötigten Zeit ist. (Denn: $1 + 3 = 4 = 2^2$, $1 + 3 + 5 = 9 = 3^2$, $1 + 3 + 5 + 7 = 16 = 4^2$ usw.). Das war das erste physikalische Gesetz in mathematischer Form, abgeschaut der Natur durch ein Experiment. Später wird Newton es aus einem Axiom ableiten können.

Interessant ist die Frage, wie Galilei die von ihm geschilderte Genauigkeit in der Übereinstimmung des Gesetzes mit den Beobachtungen erreicht hat. Nun, er war ein vorzüglicher Lautenspieler, sein Vater war Komponist und Musiktheoretiker gewesen. Er spielte vermutlich zum Experiment ein Lied auf seiner Laute und jeder gute Musiker weiß, dass man eine Verlängerung oder Verkürzung eines Taktes selbst um z. B. eine 32tel Note, also 10tel Sekunde hört. Man mutmaßt, dass er an den Enden der Streckenabschnitte jeweils kleine Saiten

anbrachte, die einen Ton erzeugten, wenn die Kugel vorbei rollte. Und diese Enden richtete er durch Hin- und Herschieben so ein, dass diese Töne genau im Rhythmus eines Lautenstückes erklangen. Durch die Kugel erzeugte Töne mussten also genau mit Taktanfängen zusammenfallen.

Konzeptionell besonders wichtig sind aber die Schlussfolgerungen Galileis aus seinen Experimenten. Er stellt sich vor, dass am Ende des Brettes mit der Rinne ein weiteres Brett angebracht wird, ebenfalls mit einer Rinne, in der die Kugel weiter rollen kann. Nun sei aber die Neigung dieses weiteren Brettes gleich Null, so dass die Kugel nicht mehr beschleunigt wird. Man wird dann feststellen, dass die Kugel irgendwann zur Ruhe kommt.

Wir wissen heute, dass das nur durch die Reibung geschieht, dass ohne die Reibung die Kugel immer weiter laufen müsste. Man könnte das demonstrieren, wenn man den Grad der Reibung systematisch variieren würde. Bei immer geringer werdender Reibung wird die durchlaufene Strecke immer größer werden, und der Zusammenhang zwischen der durchlaufenen Strecke und dem Grad der Reibung zeigt, dass bei verschwindender Reibung die durchlaufene Strecke unendlich lang werden müsste.

Für uns ist heute diese Art zu argumentieren selbstverständlich. Wir haben gelernt, dass für einen Effekt mehrere Faktoren verantwortlich sein können. Die Kunst ist es, diejenigen Faktoren zu identifizieren, die von den Umständen des Experimentes abhängen, um schließlich das Verhalten zu entdecken, das von grundsätzlicher Art ist und einem allgemeinen Gesetz entspricht.

Für Galilei war dieses Absehen von der Reibung, das Erkennen des fundamentalen Gesetzes hinter einem Effekt, der dieses augenscheinlich aber gar nicht zeigt, eine große kreative

Leistung. Hatte er nicht bei Aristoteles gelernt, dass es bei irdischen Bewegungen drei verschiedene Kategorien gibt, die „Bewegung von Lebewesen“, dann die „Bewegung zur Herstellung der gestörten Ordnung“, wozu die Fallbewegung, das Streben zum Mittelpunkt der Welt gehört, und schließlich, diese Art der Bewegung, die er untersuchte, die „erzwungene Bewegung“, der nach Aristoteles stets eine Kraft zu Grunde liegen musste, da sie sonst zum Stillstand käme.

Von der Autorität und einer 2000 Jahre alten Tradition musste er sich lösen. Das klingt heute einfacher als es damals war. Aber das Experiment, das man zum Richter machen wollte, führte alleine auch nicht zu einem Verständnis. Erst eine Deutung der experimentellen Ergebnisse mithilfe einer Annahme, die darin bestand, dass durch Abstraktion von der Reibung die wahre Natur der Bewegung zum Vorschein kommt, führte zu einem Ergebnis. Danach ist die Bewegung ein Zustand, der ohne äußeren Einfluss bleibt, wie er ist. Nach Aristoteles ist dagegen Bewegung ein Prozess, für ihn ist stets ein Einfluss nötig, um die Bewegung aufrecht zu erhalten.

Aristoteles hat offensichtlich die Beobachtung direkt zur Aussage gemacht, Galilei hat „ein geistiges Band“ eingewoben, hat den Beobachtungen etwas „Geistiges“ hinzugefügt. Ohne diese gedankliche Arbeit wäre das Wissen über die Natur nicht von der Stelle gekommen. So waren die Lehren des Aristoteles über die Natur ja auch 2000 Jahre lang vorherrschend und es kam fast nichts hinzu. Mit Galilei beginnt aber nun die Fahrt, und wir erleben heute, wie diese Fahrt immer schneller wird. Das geistige Band ist in den vergangenen Jahrhunderten immer größer, fester und feiner geworden. An den Rändern hatte es stets – und auch heute – manche lose Fäden, die aber stets bald abgeschnitten oder vernäht werden

konnten. Manche Muster der neueren Teile des Bandes lassen die älteren etwas anders aussehen, deren Funktion und Festigkeit ist aber nach wie vor bewundernswert.

Galilei verstand so auch die Fallgesetze besser. Nach Aristoteles fallen schwere Körper schneller zu Boden als leichtere. Genau, wie man es direkt beobachtet – ein Stein fällt eben schneller als eine Feder. Die Ursache dafür ist aber wieder die Reibung. Ohne diese, z. B. im Vakuum, fällt ein Stein so schnell wie die Feder. Die Beobachtung bei einer Fallbewegung in der Luft erklärt sich also auch als Folge zweier Effekte, wobei einer einem allgemeinen Gesetz entspricht, der andere von den speziellen experimentellen Gegebenheiten abhängt.

Galilei hat also hinter der augenscheinlichen Beobachtung von Naturphänomenen grundsätzliche Formen der Bewegung entdeckt. Als eine ganz besondere Form erkannte er die Bewegung, die hinter der Bewegung der rollenden Kugel in der Ebene, d. h. in der Rinne des Brettes mit verschwindender Neigung steckt. Diese nennt man „geradlinig-gleichförmige Bewegung“. „Geradlinig“ heißt dabei: auf einer geraden Linie, d. h. die Geschwindigkeit hat immer die gleiche Richtung; „gleichförmig“ bedeutet, dass die Geschwindigkeit immer gleich groß ist. Da Richtung und Geschwindigkeit der Bewegung beliebig sein können, gibt es eine ganze Klasse von solchen Bewegungen.

Ein Element dieser Klasse ist offensichtlich auch die Ruhe, d. h. die Bewegung mit Geschwindigkeit Null. Nun stutzt man vielleicht. Was ist schon Ruhe? Die kann es doch wohl nur in Bezug zu einem bestimmten Beobachter geben. Für den, der in einem Zug am Bahnsteig eines Bahnhofs vorbeifährt, kann die Kaffeetasse, die der Ober ihm gerade hingestellt hat, in Ruhe auf dem Tablett stehen. In Bezug auf einen Wartenden am Bahnsteig, ist diese aber in Bewegung. Wenn man also von

einem Objekt in Ruhe spricht, dann kann das nur in Bezug auf einen speziellen Beobachter richtig sein.

Um die folgenden Überlegungen übersichtlicher zu halten, müssen wir also den Begriff des Bezugssystems einführen. Dazu gehört ein Bezugspunkt, ein Punkt im Raume, hier in meinem Arbeitszimmer oder sonst wo, den ich auswähle und in Bezug auf den man eben die Bewegung misst. Und wenn man einen solchen Bezugspunkt ausgewählt hat, kann man diesen Punkt mit allen seinen Raumpunkten um ihn herum ein Bezugssystem nennen. In diesem kann man dann spezifizieren, was Ruhe ist – nämlich Ruhe relativ zum Bezugspunkt. Und Bewegung ist auch immer eine Bewegung relativ zu einem Bezugspunkt.

Wenn man dann noch ein Koordinatensystem einführt, also eine x-Achse, eine y-Achse und auch noch eine z-Achse, und schließlich noch definiert, in welchen Einheiten man die Abstände von Strecken messen will, dann kann man auch noch jede Bewegung quantitativ beschreiben: Jeden Punkt im Raume charakterisiert man zunächst durch drei Koordinaten, so dass man die Lage von Objekten relativ zum Bezugspunkt mithilfe dieser Koordinaten spezifizieren kann. Besonders einfach wird das, wenn nur die Masse, nicht aber andere Eigenschaften wie Ausdehnung oder Form des Objektes für die physikalische Fragestellung eine Rolle spielen. Dann kann man das Objekt als Massenpunkt oder Punktteilchen ansehen und drei Koordinaten genügen zur Angabe des Ortes. Die Bewegung beschreibt man dann durch die Änderung des Ortes in dem Bezugssystem.

Es ist plausibel, dass die Menschen erst die Bewegung verstehen mussten, ehe sie mehr Verlässliches über die Natur lernen konnten. Galilei hat nicht nur eine neue Sicht der Bewegungen der Himmelskörper propagiert, er hat an einer

speziellen Bewegung, der Fallbewegung, gezeigt, dass man sie mathematisch exakt beschreiben kann, und er hat eine besondere Klasse der Bewegungen, die geradlinig-gleichförmige Bewegung entdeckt. Dies ist offensichtlich die einfachste Form der Bewegung und an dieser konnte er seine neue Wissenschaft ausprobieren.

Das Trägheitsgesetz und ideale Bezugssysteme

Die Bewegung war damals das vorherrschende Forschungsthema. Berühmtester Zeitgenosse von Galilei (1564–1642) war Johannes Kepler (1571–1630). Nikolaus Kopernikus (1473–1543) lebte etwa 100 Jahr früher. Kopernikus und Kepler suchten die Bewegungen am Himmel zu verstehen. Viele Geschichten ranken sich um die Personen Kopernikus und Kepler und um ihre Forschungen. Auf diese soll hier nicht eingegangen werden, es geht ja hier nicht um eine Übersicht über die Geschichten und die Geschichte der Physik, sondern eher darum, von der „Natur“ der Natur zu berichten und davon, wie die Menschen diese Natur immer besser kennen lernten.

Allerdings müssen die Keplerschen Gesetze hier doch erwähnt werden. Das erste dieser drei Gesetze stellt fest, dass die Bahnen der Planeten um die Sonne Ellipsen sind. Die Keplerschen Gesetze würden wir heute als „phänomenologische Gesetze“ bezeichnen. Sie sind sozusagen dem Phänomen direkt abgeschaut, beschreiben dieses zwar quantitativ gut, erklären es aber noch in keiner Weise. Die Grundgleichungen einer Theorie, aus der diese Gesetze folgen, mussten erst noch

gefunden werden, und Galilei begann gerade, die Grundlagen dafür zu legen. Er hat die Schriften Keplers wohl gekannt. Für seine Überlegungen war aber der Unterschied zwischen der Kreisbahn und der Bahn einer Ellipse ohne Belang. Ihm ging es, um es auf gut Deutsch zu sagen, um das Wesen der Bewegung. Und da hatte er, wie im letzten Abschnitt berichtet, eine im wahrsten Sinne des Wortes wesentliche Entdeckung gemacht: Eine geradlinig-gleichförmige Bewegung dauert an, wenn sie nicht von außen beeinflusst wird. Man nennt diese Einsicht auch das Trägheitsgesetz. Jeder kennt ja die eigene Trägheit: Man verändert nicht gerne ohne Grund seinen Zustand, besonders wenn man sich in Ruhe befindet. So ist auch jeder materielle Körper träge, sein Zustand einer geradlinig-gleichförmigen Bewegung, die auch die Ruhe sein kann, bleibt ohne einen äußeren Einfluss erhalten.

Auch vor Galilei hatten schon einige Denker ähnliche Gedanken geäußert, wie z. B. der arabische Philosoph Avicenna um etwa 1000 n. Chr. Er behauptete, dass ein Pfeil nur durch das Medium in seinem Flug behindert wird, dass er aber ohne das Medium nie zum Stillstand käme. Irgendwelche Vorläufer gibt es bei fast allen Erkenntnissen, entscheidend ist, in welchem Kontext die Idee erscheint und welche Bedeutung sie damit gewinnt.

Natürlich gibt es bei jeder Formulierung eines Gesetzes immer mehr oder weniger konkret ausgesprochene Annahmen. So wurde bisher so getan, als wäre es selbstverständlich zu wissen, was eine Gerade ist, was eine konstante Geschwindigkeit ist oder wie man Zeit- und Raumabstände misst. Das soll hier auch nicht zum Problem gemacht werden und Galilei hat darin sicherlich auch kein Problem gesehen. Aber darüber, in welchem Bezugssystem das Trägheitsgesetz gelten soll, darüber muss man sich Rechenschaft ablegen. Offensichtlich

hat Galilei das Gesetz aufgestellt, als er ein Bezugssystem benutzte, bei dem der Bezugspunkt ein Punkt in seinem Labor war. In diesem Bezugssystem befand sich sein Labor in Ruhe und in diesem beobachtete er die Bewegung der Kugel auf der schiefen Ebene.

Nun gibt es viele andere Bezugssysteme, die man alle dadurch charakterisieren kann, wie sich der Bezugspunkt des neuen Bezugssystems relativ zum alten Bezugspunkt bewegt. Man darf diese Bewegung eines Bezugspunktes relativ zum anderen aber nicht mit der Bewegung verwechseln, die man in dem Bezugssystem gerade studieren will, also z. B. mit der Bewegung der Kugel.

Betrachten wir also jetzt verschiedene Bezugssysteme, d. h. Bezugspunkte, und alle relativ zum Labor von Galilei. Zunächst ist klar, es wird keinen Unterschied machen, wenn der neue Bezugspunkt sich nur irgendwo anders, aber relativ in Ruhe zum alten befindet. Jeder Punkt auf der Erde ist also als Bezugspunkt so gut wie der im Labor von Galilei. Sodann denken wir daran, dass sich der neue Bezugspunkt relativ zum alten bewegt. Wir können, da wir nun schon die Klasse der geradlinig-gleichförmigen Bewegung kennen, die Bewegung der neuen Bezugspunkte in zwei Kategorien einteilen: Diese können sich geradlinig-gleichförmig relativ zum alten bewegen oder nicht. Dieser Unterschied ist ganz bedeutsam, denn in den Bezugssystemen, die sich nicht in dieser Weise geradlinig-gleichförmig bewegen, treten irgendwelche Beschleunigungen auf, die für die Bewegung zu ganz neuen Effekten führen.

Um etwas konkreter zu werden, machen wir in Gedanken ein kleines Experiment: Man stelle sich vor, dass man in einem Zug sitzt, der auf gerader Strecke mit konstanter Geschwindigkeit fährt. Der neue Bezugspunkt sei nun irgendein Punkt im Zuge, so dass sich also das neue Bezugssystem

geradlinig-gleichförmig relativ zum ursprünglichen Bezugssystem bewegt. Nun hole man eine schöne runde Kugel aus der Tasche und lege sie auf den kleinen Tisch, der sich zwischen den beiden Sitzreihen befindet. Die Umstände seien ideal: Der Tisch sei ganz plan und eben, es gebe kein Vibrieren durch das Rollen der Räder, die Kugel sei ganz glatt, jede Reibung sei vernachlässigbar. Die Kugel bleibt liegen, sie verharrt in ihrem Bewegungszustand, da es keinen äußeren Einfluss gibt. Das Trägheitsgesetz gilt.

Nun bremst der Zug plötzlich. Was passiert? Die Kugel rollt nach vorne. Wie ist das zu interpretieren? Nun, das Bezugssystem des Zuges beschleunigt sich – man kann das so nennen, denn ein Bremsen kann man ja als negative Beschleunigung auffassen. In einem solchen ändert sich offensichtlich der Bewegungszustand der Kugel, obwohl kein Einfluss auf die Kugel erkennbar ist. Das Trägheitsgesetz, das besagt, dass ein Körper in seinem Zustand verharrt, wenn kein Einfluss auf ihn ausgeübt wird, gilt in dem Bezugssystem des Zuges also offensichtlich nicht.

Ein beschleunigtes Bezugssystem ist also etwas Besonderes gegenüber einem in geradlinig-gleichförmiger Bewegung. Beschleunigungen kann man messen, man spürt sie auch. Man wird z. B. auf einem Karussell durch die Zentrifugalkraft nach außen, beim Start eines Fliegers in den Sitz gedrückt. Eine geradlinig-gleichförmige Bewegung, so, wie sie im Zug vor dem Bremsvorgang stattfand, oder wie man sie bei einem ruhigen Flug erlebt, spürt man nicht. Und die Erfahrung zeigt, dass das Trägheitsgesetz gilt.

Könnte man von außen, in einem Bezugssystem eines Bahnhofs z. B. die Bewegung der Kugel im Zuge verfolgen, würde man feststellen, dass die Kugel in diesem Bezugssystem in ihrem Zustand verharrt, während der Zug bremst. Gleiches

würde gelten, wenn man dieses Experiment von einem Auto aus beobachtete, dass mit konstanter Geschwindigkeit neben dem Zug herfahren kann. In diesen Bezugssystemen gilt also das Trägheitsgesetz, in dem beschleunigten aber nicht.

Aber warum sind denn nun gerade diese und alle solche, die sich dazu in Ruhe oder in geradlinig-gleichförmiger Bewegung befinden, so ausgezeichnet? Ist jeder Punkt auf der Erdoberfläche wirklich so ausgezeichnet? Gibt es denn überhaupt ein ausgezeichnetes Bezugssystem und damit einen ausgezeichneten Bezugspunkt, den man dann wirklich den Nabel der Welt nennen könnte? Gibt es etwas wie den absoluten Raum? Muss man auf der Erde nicht auch Beschleunigungen spüren, schließlich dreht sie sich täglich einmal um die eigene Achse und dann noch in einem Jahr um die Sonne?

Diese Fragen haben viele Wissenschaftler lange beschäftigt und sehr viel wäre dazu zu sagen.

Ja, auch Galilei würde feststellen, dass seine Kugel auf die Dauer nicht ganz geradlinig läuft, wenn er ganz genau messen würde. Es gibt tatsächlich Beschleunigungen auf der Erde aufgrund ihrer täglichen Rotation. An der Küste von großen Seen oder Ozeanen gibt es das Phänomen von Ebbe und Flut. Schon im Altertum hat man Erklärungen dafür gesucht, Galilei hat dieses als Argument für die täglichen Drehung der Erde um ihre eigene Achse genutzt, allerdings in falscher Weise. Isaac Newton hat dann die richtige Erklärung gegeben, bei der die tägliche Drehung und die Gravitationskräfte von Sonne und vor allem vom Mond eine Rolle spielen. Es gibt weitere Folgen der täglichen Drehung in Form von Beschleunigungen, z. B. die Richtung der Winde in der Umgebung von meteorologischen Hochdruck- oder Tiefdruckgebieten oder die Richtung der Passatwinde. Alle diese Effekte sind jedoch zu gering, um bei dem Galileischen Experiment eine Rolle zu spielen.

Aber trotzdem, jetzt scheint man in einem Dilemma zu sein. Es sieht so aus, als hätte Galilei ein Gesetz formuliert unter einer Annahme, die niemals zutreffend ist. Hier zeigt sich wieder, dass Wissenschaft nicht reiner Empirismus ist, dass sie erst zu fruchtbaren Hypothesen kommt, wenn man dem „geistigen Band“, von dem im ersten Abschnitt dieses Kapitels die Rede war, einen neuen Faden zufügt. Die Lösung: Man stellt sich einfach Bezugssysteme vor, in denen das Trägheitsgesetz gilt, führt sozusagen ein ideales Bezugssystem ein. Man kennt zwar ein solches nicht in der Realität, aber solche, die mehr oder weniger dem Ideal entsprechen. Ein mit der Erdoberfläche verbundenes Bezugssystem ist schon ein ganz gutes, ein mit einem anfahrenden Zug verbundenes z.B. ein sehr schlechtes.

Aber wie soll das denn eine exakte Wissenschaft sein, wenn man immer nur so mehr oder weniger genau sein will? Nun, es zeigte sich, dass diese Vorstellung von einem idealen Bezugssystem eben den Weg öffnet zu einer fundamentalen Theorie. In dem idealen Bezugssystem sind keine Einflüsse vorhanden, die durch Beschleunigungen des Bezugssystems hervorgerufen werden. Ein Lebensalter später konnte Newton sich so auf die Einflüsse konzentrieren, die „wirklich“ den Bewegungszustand ändern, und von dieser Warte aus konnte man auch all die Effekte in realen Bezugssystemen verstehen und berechnen.

Das Galileische Relativitätsprinzip

Es wäre zwar noch vieles zu dem Verhältnis verschiedener Bezugssysteme zu einander zu sagen und vieles über verschiedene Bewegungstypen. Aber die Vorstellung von einem idealen

Die Entdeckung des Unvorstellbaren
Einblicke in die Physik und ihre Methode

Honerkamp, J.

2010, XIII, 386 S., Hardcover

ISBN: 978-3-8274-2425-9