

Dieter Frekers · Peter Biermann

Weltall, Neutrinos, Sterne und Leben

Faszinierendes
aus der Astroforschung

SACHBUCH



Springer

Weltall, Neutrinos, Sterne und Leben

Dieter Frekers · Peter Biermann

Weltall, Neutrinos, Sterne und Leben

Faszinierendes aus der Astroforschung

Dieter Frekers
Institut für Kernphysik
Universität Münster
Münster, Deutschland

Peter Biermann
MPI für Radioastronomie
Universität Bonn
Bonn, Deutschland

ISBN 978-3-662-65109-4 ISBN 978-3-662-65110-0 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-65110-0>

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

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2023

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 allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Umschlaggestaltung: DeBlik, Berlin

Planung/Lektorat: Caroline Strunz

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Für den Leser

Die Autoren dieses Buchs sind übereingekommen, die genderspezifischen Ausdrücke in der im Sprachgebrauch immer noch gebräuchlichen männlichen Form zu belassen. Wir weisen den Leser jedoch darauf hin, dass die männlichen Formen, sofern diese nicht auf einen spezifischen Personenkreis mit direktem Bezug zum Inhalt des Buches hinweisen, lediglich Statthalter für eine genderneutrale Schreibweise sind.

Des Weiteren haben die Autoren dieses Buchs versucht, physikalische Zusammenhänge möglichst intuitiv und in leicht lesbarer Form zu vermitteln. Sie haben dabei auf mathematische Gleichungen weitgehend verzichtet. Sollten an einigen Stellen mathematische Abhandlungen auftreten, so sind diese schwarz umrahmt und können ohne großen Verständnisnachteil übersprungen werden.

Münster, Februar 2021

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	1
1.1	So fing es an	2
2	Physik und Erkenntnis	7
2.1	Frage: Physik ist – was?	8
2.2	Antwort: Physik ist – dieses!	9
3	Messgrößen $\longleftrightarrow$ Größenordnungen	15
3.1	Distanzen	16
3.2	Energien	17
4	Eine kurze Reise ins Reich der elementaren Teilchen	23
4.1	Quarks und Leptonen	24
4.2	Die Wechselwirkungen	26
5	Beginn und Ende von Zeit und Raum	29
5.1	Die Epochen des Universums	30
6	Das inflationäre Universum	43
6.1	Unbeachtete Hinweise, Fragen ohne Antworten	44
6.2	Masse, Zeit, Raum, Raum-Zeit	48
6.3	Statisches oder dynamisches Universum?	53
6.4	Ein dynamisches Universum – es expandiert	56
6.5	Die Problematik der „Zurückrechnung“	59
7	Nukleosynthese im frühen Universum	71
7.1	Neutronen kommen und gehen	73
7.2	Frühe Nukleosynthese, Beginn und Ende	76
8	Die Mikrowellen-Hintergrundstrahlung	83
8.1	Die 380.000 Jahr-Marke	84
8.2	Die Entdeckung der Strahlung	86
9	Späte Nukleosynthese und Supernovae	99
9.1	Elemente, elementare Fragen	101
9.2	Die Sonne – eine unter vielen	102
9.3	Faszination Triple-alpha	111
9.4	Supernovae – kosmische Kochkessel der Elemente	116
9.5	Supernovae – Einblicke und Impressionen	122
9.6	Supernovae und kosmisches Erstaunen	134
9.7	Supernovae und Entstehung des Lebens	140
9.8	Auf der Suche nach Leben im Sonnensystem	151

10	Relativität	157
10.1	Spezielle Relativitätstheorie und Highlights	158
10.2	Allgemeine Relativitätstheorie und Highlights	162
11	Neutronensterne, Inertialsysteme, Schwarze Löcher	181
11.1	Physik der Neutronensterne	182
11.2	Das Gravity-Probe-B-Experiment	194
11.3	Schwarze Löcher	201
12	Kosmische Botschaften	221
12.1	Historie	222
12.2	Entschlüsselung der kosmischen Strahlung	234
12.3	Gravitationswellen, die neue Strahlung	243
12.4	Drei Detektoren	250
12.5	Noch etwas Wissenswertes	261
13	Flucht in die Zukunft	265

Über die Autoren

Dr. Dieter Frekers

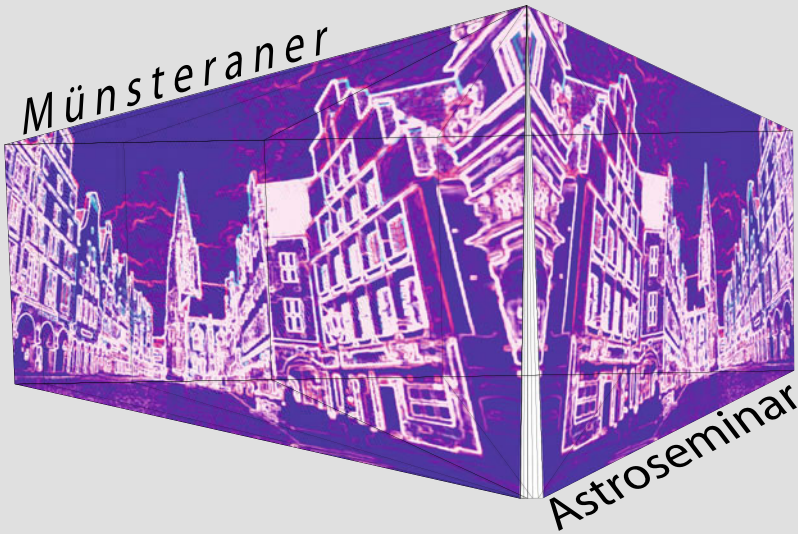
Professor Universität Münster
Fellow of the American Physical Society
Experimentelle Kern- und Teilchenphysik

Dr. Dr. h.c. Peter Biermann

Professor (apl.) Universität Bonn
Max-Planck-Institut für Radioastronomie
Adjunct Professor University of Alabama, Tuscaloosa, USA
Ehrendoktor Universität Bukarest
Theoretische Astrophysik und Kosmologie



Vorwort



Inhaltsverzeichnis

1.1 So fing es an – 2

1.1 So fing es an

Das Münsteraner Astroseminar ist eine Veranstaltung, die seit nunmehr über 20 Jahren im jährlichen Turnus Ende September/Anfang Oktober jeweils von Freitag bis Samstag am Fachbereich Physik der Universität stattfindet. Zielgruppe ist ein interessiertes Publikum aus allen Lebensbereichen – und natürlich ist der Eintritt frei. An diesen beiden Tagen werden in Vorträgen und Diskussionen die gegenwärtigen Forschungsarbeiten und die neuesten Ergebnisse zu bestimmten Themen und Fragestellungen aus den Bereichen Weltraumforschung, Astrophysik, Astro-Teilchenphysik und Kosmologie in wissenschaftlich verständlicher, aber auch in originell unterhaltsamer Weise von Experten und Wissenschaftlern aus diesen Bereichen vorgestellt.

Das Besondere und Außergewöhnliche ist, dass diese Veranstaltung bis ins Detail organisiert wird von Doktorandinnen und Doktoranden aus dem Institut für Experimentelle Kern- und Teilchenphysik. Sie allein definieren das jeweilige Thema, stellen das Programm über die zwei Tage zusammen, laden international anerkannte Wissenschaftler aus den verschiedenen Forschungsgebieten als Sprecher ein, beantragen die nicht unbeträchtlichen finanziellen Mittel, organisieren die Werbe-Kampagnen, sorgen für die Räumlichkeiten und die Technik, stellen in den Pausen Erfrischungen und kleine Snacks zur Verfügung und beteiligen sich in der Regel auch noch selbst mit Kurzvorträgen über ihre eigenen Arbeiten zum jeweiligen Thema. Eine wie immer geartete Einmischung vonseiten der Hochschullehrer findet nicht statt. Das mittlerweile fest in Münster verankerte „Münsteraner Astroseminar“ ist in dieser Art einzig in Deutschland, und der Erfolg zeigt sich sicher auch darin, dass diese Veranstaltung über die Jahre ein immer größeres Publikum aus einem immer größeren Umkreis von Münster anziehen konnte.

Dabei hat das Astroseminar im Jahr 2000 ganz bescheiden mit einem Vortrag von einem der Autoren dieses Buchs, Prof. Dr. Dr. h. c. Peter L. Biermann vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie und der Universität Bonn, über ein astrophysikalisches Thema angefangen. Der Anlass war eine für Stipendiaten der Studienstiftung e. V.¹ organisierte Veranstaltung in Münster. Im Nachgang hierzu hatte der Gastgeber aus dem Institut für Planetologie der Universität Münster, Prof. Dr. Elmar K. Jessberger, die Anwesenden zu sich nach Hause eingeladen, wo bis spät in die Nacht ein kleiner verbliebener Teilnehmerkreis von einer Handvoll Studierenden aus verschiedenen Fachbereichen mit den beiden Kollegen über Fragen zur Astrophysik und Kosmologie diskutieren konnte. Die Studierenden waren hiervon so angetan, dass sie vereinbarten, in dem darauf folgenden Jahr die Veranstaltung in dieser Form erneut und mit einem noch breiter gefächerten Themenspektrum zu wiederholen.

Dank einer jungen Medizinstudentin aus diesem kleinen Kreis geriet diese Vereinbarung tatsächlich nicht in Vergessenheit, und im folgenden Jahr ergriff

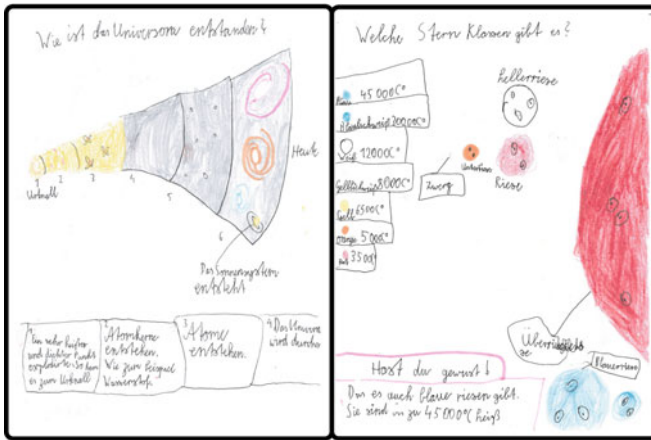
¹ Das Mandat der Studienstiftung: „Die Studienstiftung fördert Studierende, deren Begabung und Persönlichkeit besondere Leistungen im Dienst der Allgemeinheit erwarten lassen“ (Textstelle: ► <https://www.studienstiftung.de/studienfoerderung/>, 2019). In diesem Kontext werden insbesondere auch Veranstaltungen wie die hier beschriebene gefördert.

dieser Kreis die Initiative und stellte ein Themen- und Sprecherprogramm zusammen, zu dem die Autoren dieses Buches für eine Vorlesungsreihe über ein frei gewähltes astrophysikalisches Thema eingeladen wurden. Die Anzahl der Interessenten vergrößerte sich, jedoch blieb der Teilnehmerkreis zunächst weiter beschränkt auf die sogenannten „Studienstiftler“. Eine anschließende Umfrage unter den Teilnehmern ergab, dass großes Interesse bestand, diese Form der Veranstaltung auch in den kommenden Jahren fortzusetzen und dabei den Teilnehmerkreis zu erweitern. So folgten weitere jährliche Veranstaltungen, die zunächst wieder von „Studienstiftlern“ organisiert wurden. Eigens entworfene Werbeplakate, angebracht in den universitären Gebäuden, sollten nun aber alle Studierende der verschiedenen Fachrichtungen auf diese Veranstaltung aufmerksam machen, was den Teilnehmerkreis rasch auf etwa 20–30 Personen vergrößerte. Entsprechende Räumlichkeiten mussten gebucht werden, was nicht einfach war, denn die Astro-Veranstaltung war ja immer noch mehr oder weniger privat und unbekannt. Die Organisatoren waren jedoch recht einfallsreich; es gab immer irgend jemanden, der diesen oder jenen Professor oder Hausmeister kannte und bitten konnte, von Freitagnachmittag bis Samstagabend die Räumlichkeiten (und die Schlüssel dafür) zur Verfügung zu stellen. So traf man sich anfangs in einem kleinen Hörsaal der Anatomie, später z. B. im „Pfarrzentrum Heilig-Kreuz“ in Münster.

Der Bekanntheitsgrad des Astroseminars begann zu wachsen und die Veranstaltung bekam im Laufe der Zeit ein neues Format mit neuen Gesichtern. Im Jahr 2005 wurde die Veranstaltung erstmalig im Institut für Kernphysik durchgeführt. Die Organisatoren waren mittlerweile Studierende aus diesem Institut, denen es gelang, mit großem Ehrgeiz und großem persönlichen Einsatz ein überregionales Publikum zu erreichen und Wissenschaftler aus dem internationalen Umfeld als Redner für diese Veranstaltung zu gewinnen. Die Besucherzahlen schossen unerwartet in die Höhe und der Seminarraum im Institut für Kernphysik mit etwa 35 Sitzplätzen erwies sich schnell als viel zu klein, sodass schließlich für die folgenden Jahre der große Hörsaal der Physik einschließlich der Technik und des technischen Personals gewonnen werden konnte, und dies auch dank der besonderen und bereitwilligen (auch finanziellen) Unterstützung des Dekans des Fachbereichs.

Die Attraktivität der Veranstaltung hat erstaunlicherweise über die Jahre nicht abgenommen, was neben den immer wieder neuen und spannenden Themen auch daran lag, dass jedes Mal besondere „High-lights“ in das Programm eingebaut waren, z. B. ein Vortrag über das Leben im All vom ESA-Astronauten Dr. Gerhard Thiele, eine Theater-Einlage über Victor Hess, den Entdecker der kosmischen Strahlung, oder auch ein besonders amüsanter Vortrag über die „Fact-vs.-Fiction“-Physik in der Fernsehserie „Star-Trek“. Kleine Preise für besonders gute Fragen wurden regelmäßig nach jedem Vortrag vergeben, Laborführungen waren im Programm, oder man war als Organisator oder Sprecher einfach Ansprechpartner für Schüler, die sich mit dem Gedanken trugen, ein Studium der Naturwissenschaften aufzunehmen.

Der Schüler Andreas M. war 2020 mit 8 Jahren wohl der jüngste Teilnehmer des Astroseminars. Einige Vorträge hatten ihn scheinbar so beeindruckt, dass er eigenständig eine kleine Bilderserie entwarf und sie den Autoren dieses Buchs übermittelte. Zwei seiner Zeichnungen sind deshalb diesem Buch beigelegt (■ Abb. 1.1).



■ **Abb. 1.1** Die Welt in den Augen eines 8-Jährigen

Sie zeigen, dass Physik ein außerordentlich spannendes und Fantasie beflügelndes Gebiet ist, und das für alle Altersgruppen.

Derzeit kann das „Münsteraner Astroseminar“ jedes Jahr mit einer Zahl von 300–500 Besuchern rechnen. Ein Glückwunsch an all die Studierenden, die zu dieser enormen Leistung beigetragen haben!

Dieses Buch soll ein Versuch sein, die Themen, die in den Jahren seit dem Bestehen des Astroseminars angeschnitten wurden, noch einmal Revue passieren zu lassen. Es ist allerdings nicht möglich, die vielen Vorträge im Nachhinein einzeln zusammenzufassen oder zu kommentieren, sodass die Auswahl der Themen in diesem Buch aus dem subjektiven und sehr eingeschränkten Blickwinkel der Autoren erfolgt (■ Abb. 1.2).

Das Buch beginnt zunächst mit einigen einleitenden Grundlagen zur Methodik der Physik und gibt dann einen kurzen Überblick über die kosmischen Epochen. Diese werden dann in der Folge detailliert beschrieben, beginnend mit dem „Big Bang“ und der „Kosmischen Inflation“. Hier steht vor allem die Frage im Mittelpunkt, wie zwingend eine solche verblüffende Entwicklungsphase ist, welche nahezu zeitgleich mit dem „Big Bang“ eingeleitet wurde und welche innerhalb einer fast schon grotesk anmutenden Zeit von ca. 10^{-30} Sekunden wieder abgeschlossen war. Danach taucht es ein in die Phase des „Frühen Universums“ und der „Frühen Element-Synthese“, die etwa einige Mikrosekunden nach dem „Big Bang“ begann und knappe 10 Minuten andauerte. Das Buch beleuchtet dann, wie es zur kosmischen Mikrowellenstrahlung kommt, wie die Elemente in einer Supernova-Explosion entstehen und wie man mit solchen Explosionen, welche für einige Tage mal eben eine ganze Galaxie überstrahlen, eine Eichung der Expansionsgeschwindigkeit des Universums vornehmen kann und dabei ein äußerst überraschendes (und schließlich mit einem Nobelpreis gewürdigtes) Ergebnis erhält. Kapitel mit Abschnitten über Relativität, Schwarze Löcher, Gravitationswellen, kosmische Strah-

lung, Dunkle Materie und über Neutrinos folgen, wobei auch die Frage angeschnitten wird: Wie konnte Leben entstehen und haben Neutrinos, die sich „am Rande der Existenz“ bewegen, etwas damit zu tun?

Da der Mensch weder in diesen längst vergangenen Epochen des Universums noch bei den Vorgängen in dessen unbegrenzten Weiten als Zeuge gegenwärtig war, erhebt sich die berechnigte Frage: *Woher weiß man's, wenn niemand dabei gewesen?* Glücklicherweise haben viele dieser vergangenen Ereignisse bis heute fortdauernde Auswirkungen. Diese gilt es im Rahmen der Physik zu verstehen und einzuordnen, um somit ein konsistentes Abbild der Vergangenheit erstellen zu können. Interessanterweise entsteht damit auch gleichzeitig ein Bild über die Zukunft, z. B. über die weitere Entwicklung des Sonnensystems, über das Schicksal von Sternen und Galaxien, und das bis hin zu Epochen, die noch weit entfernt in der Zukunft liegen.

Um allerdings zu verstehen, dass „Physik“ nicht eine Ansammlung von Kopfgeburten und Fantasiegebilden in der Vorstellungswelt von Wissenschaftlern ist, halten die Autoren dieses Buchs es zunächst für wichtig, ein wenig Klarheit darüber zu schaffen, *was Physik ist und was Physik nicht ist.*



▣ **Abb. 1.2** Foto-Reminiszenzen des Astroseminars im großen Hörsaal der Physik

Physik und Erkenntnis



Inhaltsverzeichnis

- 2.1 Frage: Physik ist – was? – 8
- 2.2 Antwort: Physik ist – dieses! – 9

2.1 Frage: Physik ist – was?

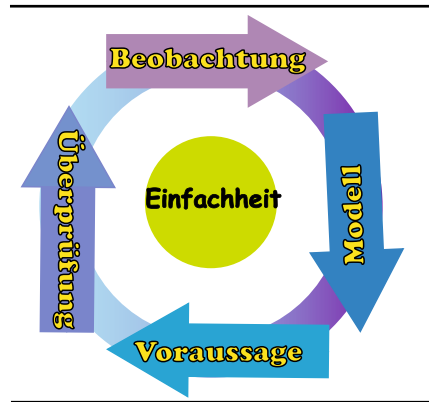
2

Ja, was denn ...? Hierzu gibt es eine schier endlose Zahl von mehr oder weniger tiefgehenden philosophischen, theologischen oder wie immer auch gearteten, sinnerfüllten Abhandlungen, die versuchen, das Wesen der Naturwissenschaften und die aus ihr erwachsenden Erkenntnisse in ein jeweils passendes Gedankenschema einzubinden. Es ist nicht Ziel dieses Buches, eine Bestandsaufnahme hierzu zu machen. Stattdessen soll hier ein simples, pragmatisches und von theologischen und philosophischen Blickwinkeln unbeeinflusstes Bild gezeichnet werden. Dieses entspricht der täglichen Arbeit von Naturwissenschaftlern, die sich lediglich mit der simplen Frage beschäftigen *«Wie passt das alles zusammen?»* Hierbei stellt man schnell fest, die Natur ist völlig einfach gestrickt; sie unterhält klare Gesetzmäßigkeiten, die sich mit einiger Intelligenz auch noch äußerst nutzbringend miteinander verbinden und verwerten lassen¹. Im Mittelalter und sogar bis zur Neuzeit hin war genau dies der Stein des Anstoßes, zumindest im christlich-europäischen Kulturraum; das Erforschen von Gesetzmäßigkeiten war als häretisch eingestuft und nicht konform mit göttlicher Lehre². Jedoch die Natur offenbart sich uns Menschen freiwillig, von ganz allein und ohne unser Zutun. Keinesfalls schaut der Mensch einem „intelligenten Wesen“ in ungebührlicher oder verbotener Weise in die Karten.

Wir werden des Weiteren sogar sehen, dass Prozesse, die sich weit in der Vergangenheit zugetragen haben (z. B. kurz nach dem „Big Bang“ vor 13,8 Mrd. Jahren), eine nachhaltige Wirkung auf die Entwicklung und Beschaffenheit unserer Gegenwart zur Folge haben und auch für die zukünftige Entwicklung von bleibender Relevanz sind. Damit wird es möglich, Vorgänge in vergangenen Epochen vermöge der von der Natur angelegten Gesetzmäßigkeiten detailliert zurückzuverfolgen und nachzuzeichnen. Grundlage hierfür ist die Schaffung von belastbaren und in konsistenter mathematischer Sprache angelegten Beschreibungsmodellen. Diese Modelle müssen sich erschließen lassen allein durch Beobachtungen von Gesetzmäßigkeiten und müssen bereits vom Entwurf her grundsätzlich falsifizierbar, d. h. durch experimentelle Tests (was gleichbedeutend ist mit beobachteten Ergebnissen aus Experimenten) überprüfbar sein. Hierzu gehört insbesondere, dass Modelle in der Lage sind, per mathematischer Schlussfolgerung überprüfbare Voraussagen zu machen. Modelle, die keine überprüfbaren Voraussagen machen oder als Prämisse Dinge beschreiben oder erfinden, die es nicht gibt, sind nicht falsifizierbar und daher unbrauchbar. Ein Beispiel: Ein Modell, welches die Ära vor dem „Big Bang“ beschreibt, hat keine Relevanz, wenn es nicht gleichzeitig und in mathematischer Sprache vorgibt, welches die messbaren Auswirkungen sind. Die in diesem Buch aufgeführten und teilweise spektakulären Szenarien über die Entwicklung unseres Universums basieren deshalb ganz pragmatisch und unemotional auf bekannten physikalischen Gesetzen und etablierten Modellen und sind keine Fantasiegebilde.

1 Ein triviales Beispiel: Kraft erzeugt Bewegungsänderung (das Gesetz); damit kann man sich zielsicher von A nach B bewegen (der Nutzen).

2 Der Leser mag sich z. B. mit der Biografie des letzten Stauferkönigs Friedrich II. (1194–1250) und seiner erstaunlich modernen Sichtweise zur Erkennung von Gesetzmäßigkeiten mittels Beobachtungen und Experimenten befassen.



■ **Abb. 2.1** Das Wesen der Physik

Die ■ Abb. 2.1 fasst das Erstellen von physikalischen Modellen zur Beschreibung der Gesetze der Natur in einfacher Weise zusammen. In Worten:

- 1 man starte mit Beobachtungen,
- 2 man finde Gesetzmäßigkeiten und schaffe ein Modell zu deren Beschreibung in mathematischer Sprache,
- 3 man mache Voraussagen auf Grundlage des entwickelten Modells,
- 4 man teste die Voraussagen und überprüfe die Gültigkeit des Modells,
- 5 man verbessere (z. B. durch weitere Beobachtung und mit besserer Technik) das Modell und starte wieder mit Punkt 2.

Ein zentrales Merkmal ist dabei die Einfachheit des Modells, d. h. die Beschränkung auf eine minimale Anzahl von relevanten Parametern. Man erinnere sich an die Vielzahl der natürlich vorkommenden Elemente zusammen mit ihren stabilen Isotopen (ca. 250), die sich letztendlich zusammensetzen aus nur 3 unterschiedlichen Bausteinen, dem Proton, dem Neutron und dem Elektron.

Des Weiteren ist die Mächtigkeit eines Beschreibungsmodells gegeben durch seine Fähigkeit, korrekte und überprüfbare Voraussagen zu machen. In dieser Weise haben sich beispielsweise die Quantenmechanik oder auch das Standardmodell der Elementarteilchen etabliert, indem sie bis heute allen experimentellen Prüfungen mit einer erstaunlichen Genauigkeit (teilweise bis in die 15. Dezimalstelle) standhalten konnten.

2.2 Antwort: Physik ist – dieses!

In dem folgenden Abschnitt soll versucht werden, die Argumentation umzudrehen, um herauszustellen, was Physik *NICHT* ist und was Physik auf keinen Fall leistet. Auch diese Auslassungen sind für das Verständnis dieses Buchs bedeutend, um

einen kritischen Blick zu den Abläufen in der Vergangenheit oder solchen in großen Entfernungen beibehalten zu können. Die einzelnen Thesen sind:

- 1 Physik ist beschreibend und NICHT erklärend,
- 2 Physik beansprucht NICHT Wahrheit,
- 3 Physik führt NIEMALS Wahrheitsbeweise,
- 4 Physik ist NIEMALS exakt,
- 5 Physik beschreibt NICHT Dinge, die NICHT in Erscheinung treten (d. h. Dinge, die es NICHT gibt).

In der öffentlichen Wahrnehmung der Naturwissenschaften und insbesondere der Physik werden diese wichtigen Merkmale häufig nicht beachtet oder auch schlichtweg unterschlagen, was dann zu völlig abwegigen Argumentationsketten führen kann. Dass dem so ist, liegt zum großen Teil auch an der teilweise unpräzisen und laxen Sprache der Physiker und Wissenschaftler, wenn sie von «Beweisen» reden, aber «Nachweise» meinen oder von «RICHTIG und WAHR» reden, aber lediglich «RICHTIG im Rahmen der Messgenauigkeit» meinen. Zu beachten ist hier insbesondere der Begriff «im Rahmen der Messgenauigkeit»!! Wir kommen später noch einmal darauf zurück.

Dies mag alles ein wenig spitzfindig und philosophisch klingen, deshalb an dieser Stelle etwas mehr Erklärung zu den einzelnen Thesen:

These 1: Physik ist beschreibend und NICHT erklärend Die Gesetzmäßigkeiten der Natur, welche sich in der Physik manifestieren, sind die Grundlagen dafür, dass ein Wesen, insbesondere ein intelligentes Wesen, sich einen Plan erstellen kann, um sich in der Natur zurechtzufinden. Bereits ein Kleinkind beginnt mit der Erstellung eines solchen Plans, um Bewegungsabläufe zu verstehen und zu koordinieren. Es macht dies mühelos und ohne die Mathematik, einzig allein durch Experimentieren, durch Beobachten und durch Kommunizieren. Später kommt die Mathematik ins Spiel, mit deren Hilfe physikalische Vorgänge modellhaft beschrieben werden können. Die Mathematik ist dabei lediglich ein Hilfsmittel oder, wenn man so will, die Sprache, in der Modelle/Gesetzmäßigkeiten untereinander kommuniziert werden (also z. B. zurückgelegter Weg = Geschwindigkeit $\times$ Zeit) und logisch miteinander verknüpft werden. Die Physik erhebt dabei nicht den Anspruch, irgend etwas zu erklären, sie beschreibt lediglich die Dinge in dem für den Menschen relevanten Lebensbereich, um damit verifizierbare und belastbare Voraussagen erstellen zu können. Eine Erklärung, warum die Dinge so sind, wie sie sind, und nicht anders, ist für den Plan nicht von Bedeutung. Wichtig bleibt aber, dass ein Modell sich einfügt in ein in sich geschlossenes einheitliches und einfaches Gesamtmodell der Natur, oder anders formuliert, für die Physik ist die Natur inhärent simpel und inhärent gesetzmäßig, oder im Umkehrschluss salopp formuliert, es ist unphysikalisch, für jeden Regenbogen auf der Wiese oder für jede Sternschnuppe am Himmel ein eigenes Modell konstruieren zu wollen. Partikularmodelle oder auch die Abkehr von Gesetzmäßigkeiten sind für Voraussagen und Planerstellungen unbrauchbar. «Wunder gibt es immer wieder», so ertönte es einst, diese gehören jedoch nicht in den Bereich voraussagbarer physikalischer Gesetzmäßigkeiten, aber sie werden

auch nicht von der Physik negiert. Dafür gibt es kein Mandat. Die Physik steht deshalb nicht im Konflikt mit Religions- und Glaubensfragen.

These 2: Physik beansprucht NICHT Wahrheit Es ist ebenfalls nicht von Bedeutung, dass ein Beschreibungsmodell ultimativ richtig und wahr ist. Einzig von Bedeutung ist, dass es im Rahmen der für «mich» relevanten Genauigkeit vernünftige Voraussagen machen kann, um somit ein Fortschreiten und einen Fortschritt bzw. eine sinnvolle Planung zu ermöglichen. Dieses gilt bis zu dem Zeitpunkt, wenn sich Schwächen des Modells herausstellen, welche dann Verbesserungen bzw. Erweiterungen erfordern. Nehmen wir als ein einfaches Beispiel den legendären und immer wieder benutzten Newton'schen Apfel, welcher angeblich im Jahr 1666 Newton auf den Kopf fiel. Aus dieser Apfel-Anekdote (nein – nicht ganz richtig, es war die „Philosophiae Naturalis Principia Mathematica“) entfaltete sich das theoretische Modell der Newton'schen (oder klassischen) Mechanik, welches die Grundlage aller Bewegungsvorgänge auf der Erde (und darüber hinaus) ist. Es beschreibt diese mit einer beachtlichen Präzision, verifiziert durch eine schier unendliche Zahl von experimentellen Erfahrungen. Kommt die Strömungslehre von Bernoulli hinzu in einer Weise, dass Newton und Bernoulli ineinandergreifen, dann kann man sogar Flugzeuge zum Fliegen bringen.

Die Newton'sche Mechanik scheint also die ultimative Wahrheit darzustellen – leider völlig falsch! Mit der Möglichkeit immer genauerer Experimentier-techniken in den letzten 50–100 Jahren taten sich immer mehr Diskrepanzen zwischen Experiment und klassischer Voraussage auf. Abhilfe schaffte erst die mit dem Namen Einstein verbundene und mathematisch recht anspruchsvolle Allgemeine Relativitätstheorie. Sie wurde entwickelt, einzig um der experimentell beobachteten Konstanz der Lichtgeschwindigkeit Rechnung zu tragen. Die Allgemeine Relativitätstheorie reduziert sich in eleganter Weise auf die Newton'sche Mechanik im Grenzfall eines sogenannten «kleinen Labors», was auch heißt, sie ist kein Partikularmodell. Ein «kleines Labor» ist immer dann realisiert, wenn die Krümmung der Raum-Zeit in dieser «kleinen-Labor»-Umgebung auf die relevanten Messergebnisse und Planerstellungen einen vernachlässigbaren Effekt hat, was praktisch für alle Bewegungsvorgänge auf der Erde der Fall ist. Ist höchste Präzision gefordert, z. B. für das Global Positioning System (GPS), für die Bestimmung eines Zeit-Normals (wichtig für den digitalen Funkverkehr, sprich «Handy») oder für die Satelliten-Navigation, dann ist die Krümmung der Raum-Zeit aufgrund unterschiedlicher Massenverteilungen erheblich und muss berücksichtigt werden.

Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ist in der einfachen menschlichen Denkweise nicht intuitiv, sie wird aber zunächst als solche beobachtet. Die Genauigkeit, mit der die Allgemeine Relativitätstheorie der experimentellen Überprüfung standhält, ist schlichtweg beeindruckend. Es gibt bis heute keinen Hinweis, ab welcher Stelle hinter dem Komma diese Theorie durch eine noch weitergehende oder noch allgemeinere Theorie zu ersetzen wäre. Es erhebt sich die Frage: Ist diese Theorie nun die wahre und richtige Theorie, oder andersherum, ab welcher Stelle hinter dem Komma beginnt denn nun die Wahrheit? Die Antwort erübrigt sich, denn auch die Allgemeine Relativitätstheorie hat mindestens eine ungelöste, inhärente und gravierende Schwachstelle. Sie ist divergent in der Nähe eines Schwarzen Lochs,

d. h., in dem Beschreibungsmodell treten an der Grenze zum Schwarzen Loch Unendlichkeiten auf. Gleiches passiert zum Zeitpunkt des „Big Bang“. Unendlichkeiten sind aber schlicht unphysikalisch. Beim (fiktiven) Übergang von einer Endlichkeit in eine Unendlichkeit und umgekehrt wird die Kausalität verletzt, d. h., es werden zeitliche Abfolgen durcheinandergeworfen bzw. auch ganz aufgelöst. Alles ist und bleibt für immer unendlich.

Natürlich gibt es weitere Disziplinen in der Physik, wie die Elektrodynamik (Schlagworte: Strom, Fernseher), Thermodynamik (Schlagworte: Temperatur, Leben), Hydrodynamik (Schlagworte: Wetter, Flugzeug) und insbesondere auch die Quantenmechanik (Schlagworte: Atom, Computer). Sie alle greifen in eleganter Weise konsistent ineinander und beschreiben im engen Zusammenspiel miteinander die natürlichen Vorgänge, und das mit erstaunlicher Präzision. Auf der Grundlage dieses Zusammenspiels konnten sich im Laufe der Zeit auch weiter entfernte Bereiche wie die Chemie, die Biologie oder die Medizin als eigenständige Disziplinen manifestieren. Allen ist gemein, dass sie natürliche Vorgänge lediglich beschreiben, teilweise nicht einmal deterministisch, sondern nur aufgrund von Wahrscheinlichkeiten, was in besonders ausgeprägter Weise für die Thermodynamik und die Quantenmechanik der Fall ist. Eine Wahrheit unterliegt aber nicht einer Wahrscheinlichkeit. Die Tatsache, dass die Quantenmechanik physikalische Phänomene nicht deterministisch beschreibt, muss zunächst einmal so hingenommen werden. Offensichtlich scheint die Natur mit ihren eigenen Gesetzmäßigkeiten zu spielen, oder liegt es vielleicht daran, dass auf kleinsten Skalen die üblichen Definitionen von Zeit und Ort nicht mehr greifen? Eine Antwort darauf gibt es bis dato nicht. Unabhängig davon besteht die Quantenmechanik alle Prüfungen; sie etabliert sich somit als ein extrem brauchbares Beschreibungsmodell.

These 3: Physik führt NIEMALS Wahrheitsbeweise Dies ist wahrscheinlich die wichtigste Aussage zu dem, was Physik *NICHT* ist, auch deshalb weil sie sowohl in einschlägigen Diskussionen als auch in philosophischen Abhandlung am häufigsten ignoriert und unterschlagen wird.

Die Physik kann *NIEMALS* Wahrheitsbeweise führen, dies ist schlicht unmöglich. Die Physik, die physikalischen Erkenntnisse sowie der sich daraus entwickelnde Fortschritt sind immer verbunden mit Messungen und Messergebnissen. Jede Messung und jedes Messergebnis ist aber fehlerbehaftet. Eine Messung ohne Fehler ist nicht denkbar. Im Umkehrschluss ist die Angabe eines Messergebnisses ohne eine Abschätzung des Messfehlers ebenfalls unbrauchbar. In jeder technischen Zeichnung sind Toleranzen angegeben. Ohne diese Angabe wird kein Techniker oder Ingenieur je anfangen, ein Werkstück zu konstruieren. Nun muss nicht jede triviale Angabe wie Tagestemperatur, Größe eines Areals, Geschwindigkeit, benutzte Energie im Privathaushalt, Inhaltsangaben in Lebensmitteln, oder was man sich sonst im täglichen Leben noch vorstellen mag, mit einer Fehlerangabe versehen werden – das wäre, solange es sich nicht um Präzisionsangaben handelt, unsinnig, im technischen und wissenschaftlich-physikalischen Bereich ist diese Angabe jedoch unerlässlich.

Man kann These 3 anhand eines Beispiels noch pointierter formulieren. In der idealen Welt der Mathematik lernen wir (meistens in der Schule), dass Parallelen sich im Unendlichen schneiden. Gibt es einen Lehrer, der die Parallelität auch

nur über eine Länge von 10 Metern experimentell überprüft hätte? Offensichtlich erscheint uns dies als intuitiv so sinnvoll, dass man sich gar nicht erst die Mühe machen müsste dies zu überprüfen. Carl Friedrich Gauß (1777–1855), auf den wir später noch einmal zurückkommen, hatte dieses Dogma für die reale Welt bereits im frühen 19. Jahrhundert in Zweifel gezogen, aber leider reichte seine Messgenauigkeit nicht aus, um Abweichungen zu erkennen.

Des Weiteren, in der idealen Welt der Mathematik lernen wir, dass der Umfang eines Einheitskreises 2π ist. In der realen Welt ist dieses Ergebnis wegen der unendlichen Zahlenreihe von π durch eine Messung überhaupt nicht beweisbar und auch sicher nicht korrekt. Die bloße Anwesenheit einer Masse hat zwangsläufig eine Krümmung des Raums zur Folge, was bereits auf der Erde zu einer Diskrepanz in der 10. Stelle hinter dem Komma führt – ein Rieseneffekt, wenn man bedenkt wie viele Stellen noch folgen, jedoch völlig vernachlässigbar für die meisten Dinge in unserem «kleinen Labor» Erde. Und man stelle sich nun vor, wie viele physikalische Formeln solche transzendenten Zahlen wie die Zahl π oder die Euler'sche Zahl e enthalten.

These 4: Physik ist NIEMALS exakt Dies ist nahezu gleichbedeutend mit der obigen These 3. Physik findet immer statt in einer realen Welt. Die Mathematik ist dabei die Sprache, in der die Physik (im Rahmen von Theorien und Modellen) einheitlich und allgemein verständlich kommuniziert und quantifiziert wird, wobei sie diese aber immer und grundsätzlich idealisiert beschreibt. Fortschritt in der realen Welt der Physik ist ohne die Sprache der Mathematik nicht denkbar, und in der Tat ist die Physik sogar eine treibende Kraft für die nach wie vor fortschreitende Entwicklung der Mathematik. Die Mathematik begreift sich als exakte Wissenschaft, und lässt man erkenntnistheoretische Spitzfindigkeiten mal beiseite, so ist dies richtig und sinnvoll. Die Logik der Mathematik basiert immer auf bestimmten Voraussetzungen, und diese werden in mathematischen Schlussfolgerungen (d. h. Beweisen) immer und ausnahmslos vorangestellt. Die im vorliegenden Fall gemachte Voraussetzung dafür, dass der Umfang eines Einheitskreises 2π beträgt, ist die euklidische Geometrie oder die «Flachheit» des Raums. Natürlich kann man den Umfang eines Kreises prinzipiell in jeder gekrümmten Geometrie mathematisch berechnen, es ändert aber nichts an dem grundsätzlichen Unvermögen, mittels einer inhärent messfehlerbehafteten Messung eine ganz bestimmte theoretische Voraussetzung quantitativ herauszupräparieren und diese als Ultima Ratio zu verwahrheitlichen.

These 5: Physik beschreibt „NICHT“ Dinge, die es „NICHT“ gibt Diese in sich amüsante Forderung ist eigentlich selbstverständlich. Wie sollte man Dinge beschreiben, die es nicht gibt, was für neue Erkenntnisse wären damit zu gewinnen und vor allem, welche Modelle ließen sich erstellen und welche überprüfbaren Voraussagen sollten diese machen, oder auch welche technologischen Fortschritte ließen sich aus der wie immer gearteten Beschreibung von Dingen, die es nicht gibt, ableiten? Dennoch gibt es immer wieder skurrile Argumente, mit denen versucht wird, die wissenschaftliche Forschung als angeblich unfähig und erkenntnislos zu

diskreditieren. Natürlich kann die Physik nicht beweisen, dass es keine unsichtbaren³ Teekannen gibt, die um die Erde kreisen. Im Umkehrschluss deshalb auf deren mögliche Existenz zu schließen ist jedoch skurril und abwegig. Natürlich kann die Wissenschaft nicht beweisen, dass es die schützende Wirkung gegen Märsen oder Windpocken nicht gibt, wenn man sich um Mitternacht bei Vollmond auf eine Wiese legt. Im Umkehrschluss eine solche Schutzwirkung zu prognostizieren, nur weil man bislang noch keine Windpocken bekommen hat, ist ebenfalls abwegig und wirklichkeitsfremd. Varianten dieser Argumentationsketten gibt es zuhauf. Sie stellen eine Abkehr von Gesetzmäßigkeiten her und bringen uns in die Abstrusität bzw. zurück in längst vergangene Zeiten von Mystik und Aberglauben⁴.

Allerdings gibt es in der Physik durchaus sogenannte Null-Experimente. Das vielleicht bekannteste dieser Art ist das Michelson-Morley-Experiment (1881 und 1887), welches bis in die heutige Zeit mit immer verfeinerten Techniken wiederholt wird. Ziel war es, und ist es nach wie vor, die Bewegung der Erde relativ zu einem vermeintlichen Äther, welcher als Träger der Lichtwellen vermutet wurde, festzustellen. Die Lichtgeschwindigkeiten in und entgegen der Bewegungsrichtung der Erde sollten bei Vorhandensein eines Trägers unterschiedlich sein. Alle Experimente erzielten „im Rahmen der Messgenauigkeit!“ Null-Resultate. Heute gelten diese Experimente als Test der sogenannten Lorentz-Invarianz oder auch als Test der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in einem sich gleichförmig bewegten System. So können derzeit relative Abweichungen der Lichtgeschwindigkeit $\Delta c/c$ in der Größenordnung von 10^{-17} experimentell ausgeschlossen werden, in „Noch-Übereinstimmung“ mit der Relativitätstheorie, welche dafür den Wert Null vorhersagt^{5,6}.

3 Im Sinne von „nicht-wechselwirkenden“.

4 Hier soll nicht von Placebo-Effekten die Rede sein; sie sind wissenschaftlich durchaus fundiert.

5 Ch. Eisele, et al., *Laboratory Test of the Isotropy of Light Propagation at the 10^{-17} level*, Physical Review Letters 103, 090401 (2009).

6 S. Herrmann, et al., *Rotating optical cavity experiment testing Lorentz invariance at the 10^{-17} level*, Physical Review D 80, 105011 (2009).

Messgrößen $\longleftrightarrow$ Größenordnungen



Wir werden in diesem Buch immer wieder über Messungen und Messgrößen reden. Messgrößen sind erforderlich, um physikalische Vorgänge zu quantifizieren und untereinander zu vergleichen. In der Astrophysik und der Kosmologie spielen zusätzlich Größenordnungen (d. h. Zehnerpotenzen) eine entscheidende Rolle, und es ist häufig schwer vorstellbar, wie sich kosmologische Größen auf unseren kleinen persönlichen Lebensbereich abbilden lassen. Dieses bleibt auch für Wissenschaftler, die sich tagtäglich hiermit beschäftigen, eine immerwährende intellektuelle Herausforderung.

Inhaltsverzeichnis

3.1 Distanzen – 16

3.2 Energien – 17

3.1 Distanzen

Distanzen werden gemessen in Metern (m), Kilometern (km), und – beschränkt man sich auf ganz große Distanzen – in Lichtjahren (Lj) und Parallaxensekunden (pc – häufig auch als „Parsec“ angegeben).

Meter und Kilometer sind vorstellbare Größen. Bei einem Lichtjahr, welches die Strecke ist, die das Licht in einem Jahr zurücklegt, verschwindet allmählich die Vorstellungskraft, insbesondere dann, wenn man eine solche Entfernung auch noch in Kilometern ausdrücken will. Hier ist eine einfache Umrechnung von einem Lichtjahr in Kilometer dargestellt:

$$1 \text{ Jahr} \simeq \pi \times 10^7 \text{ s}$$

$$\text{Lichtgeschwindigkeit} \simeq 300.000 \text{ km/s}$$

$$\text{damit: } 1 \text{ Lichtjahr} \simeq \pi \times 10^7 \times 300.000 \simeq 9,42 \times 10^{12} \text{ km} \simeq 10^{13} \text{ km}$$

Nun hat 1 Jahr nicht exakt $\pi \times 10^7$ Sekunden, sondern $3,155\,760\,0 \times 10^7$ Sekunden (denn ein Jahr hat nun wirklich nichts mit π zu tun) und die Lichtgeschwindigkeit ist auch nicht 300.000 km/s, sondern 299.792,458 km/s (siehe Fußnote¹). Damit ist der genaue Wert eines Lichtjahrs $9,460\,730\,472\,580\,800 \times 10^{12}$ km, was jedoch eine völlig unhandliche Zahl ist. Der Unterschied zwischen diesem und dem ersteren Wert von $9,42 \times 10^{12}$ km ist gerade einmal 1,5 Lichttage, also in etwa von der Größe des Sonnensystems. Die heutigen Messgenauigkeiten bei kleinen Entfernungen (d. h. kleiner als 1000 Lichtjahre) übertreffen diesen Wert, bei größeren Entfernungen (ab etwa 10.000 Lichtjahre) spielt dieser Unterschied und auch der 5 %-Unterschied zwischen einem Lichtjahr und dem noch gröber abgeschätzten Wert von 10^{13} km eine zunehmend untergeordnete Rolle.

Die Parallaxensekunde (pc) hat ihren Ursprung in der beobachtenden Astronomie. Sie ist definiert als die Entfernung, in der die Halbachse der Erdumlaufbahn um die Sonne (also ca. 149,598 Mio. km) unter einem Winkel (Parallaxe) von einer Bogensekunde ($1''$) erscheint, oder andersherum, man sieht Fixsterne in dieser Entfernung innerhalb eines Halbjahres vermeintlich um $1''$ wandern. Die Umrechnung auf Lichtjahre ergibt

$$1 \text{ pc} \simeq 3,2616 \text{ Lj} \simeq 30,9 \times 10^{12} \text{ km}$$

$$\text{mit: } 1000 \text{ pc} = 1 \text{ kpc, } 1000 \text{ kpc} = 1 \text{ Mpc, } 1000 \text{ Mpc} = 1 \text{ Gpc}$$

Man kann diesen Winkel auch auf eine etwas leichter vorstellbare Bezugsgröße abbilden, nämlich als den Durchmesser eines menschlichen Haars im Abstand von ca. 20 Metern. Heutige astronomische Instrumente (z. B. die Raumsonde Gaia) besitzen eine Winkelauflösung entsprechend dem Durchmesser eines menschlichen Haars im Abstand von ca. 2 km oder $0,01''$. Damit lassen sich durch einfache Triangulation Entfernungen von Sternen bis etwa 100 pc (≈ 300 Lj) und mit einigen Tricks

¹ Aus praktischen Gründen ist von der „International Astronomical Unit (IAU)“ das Jahr mit 365,25 Tagen festgelegt. Ferner, der Wert der Lichtgeschwindigkeit ist ein definierter Wert und trägt deshalb keinen Messfehler – warum man diese etwas unhandliche Zahl genommen hat und nicht den Wert 300.000 km/s, ist eine andere Geschichte.



■ Abb. 3.1 Milchstraße

und für ausgewählte Objekte sogar bis zu 5000 pc bestimmen. Der uns nächstgelegene Stern Proxima Centauri hat bereits eine Parallaxe von nur $0,772''$ (entsprechend einem Abstand von 4,224 Lj oder 1,285 pc), was an dieser Stelle bereits zeigt, dass der Bereich von 300 Lj um das Sonnensystem herum nur einen winzigen Teil der gesamten Milchstraße ausmacht (■ Abb. 3.1). Diese hat im sichtbaren Spektrum einen Durchmesser von ca. 200.000 Lj (ca. 60.000 pc), im Außenbereich eine Höhe von ca. 3000 Lj (ca. 900 pc) und im Innenbereich eine Höhe von ca. 20.000 Lj (ca. 6000 pc). In ihr tummeln sich etwa 200 Milliarden Sterne. In der Mitte (ca. 27.000 Lj von uns entfernt) befindet sich ein Schwarzes Loch (Sagittarius A*) mit einer Masse von ziemlich genau 4,2 Millionen Sonnenmassen und einem Durchmesser von ca. 25 Mio. km, was etwa 83 Lichtsekunden entspricht. Um Entfernungen von weiter entfernten Objekten und auch von solchen außerhalb der Milchstraße einigermaßen sicher bestimmen zu können, muss man auf andere Methoden zurückgreifen. Diese werden uns später in diesem Buch noch begegnen.

3.2 Energien

Energien werden gemessen in Wattsekunden (Ws), Joule (J) und Elektronenvolt (eV).

Hierbei sind Wattsekunde und Joule ein und dasselbe. Häufig sieht man auch Newtonmeter (Nm) als Einheit für Energie oder Arbeit, allerdings wird Newtonmeter eher als Einheit für das Drehmoment verwandt, aber Vorsicht, das Drehmoment (als vektorielle Größe) ist trotz gleicher Einheit nicht identisch mit der skalaren Größe Energie.

Im kosmologischen Bereich begegnet man der Einheit Wattsekunde relativ selten. Befasst man sich allerdings mit großen und kompakten Objekten und deren Bewegungen (z. B. Planeten, Sonnen, Galaxien), dann sind Wattsekunden und Joule (oder manchmal sogar die veraltete Einheit $\text{erg} = 10^{-7} \text{Ws}$) gebräuchlicher, vielleicht auch deswegen, weil sie sich leichter abbilden lassen auf Dinge, die uns im täglichen Leben begegnen (z. B. werden Stromrechnungen in Kilowattstunden (kWh) abgerechnet). Um einen Größenordnungsvergleich anzustellen, nehmen wir einen Meteoriten von ca. 500.000 Tonnen (d. h., ein solches Objekt hat immer noch einen recht bescheidenen Durchmesser von 50–100 Metern). Objekte dieser Größenordnung kollidieren mit der Erde im Mittel etwa alle 1000 Jahre. Treffen diese Objekte von der sonnenabgewandten Seite auf die Erde, dann haben sie typischerweise Geschwindigkeiten von ca. 50–60 km/s, sodass bei Kollisionen Energien von etwa $170 \times 10^9 \text{ kWh}$ freigesetzt werden. Das entspricht ungefähr 5 % des Gesamtenergieverbrauchs in Deutschland pro Jahr (2017 mit $3,8 \times 10^{12} \text{ kWh}$ angegeben²) – allerdings mit einem entscheidenden Unterschied: In einer solchen Kollision wird die Energie in wenigen Sekunden freigesetzt. Jeder mag nun für sich selbst ausrechnen, mit welchen Größenordnungen man konfrontiert wird, wenn zwei Neutronensterne jeweils von der Masse der Sonne mit Kollisionsgeschwindigkeiten, die bis nahe an die Lichtgeschwindigkeit reichen, aufeinandertreffen.

In der ■ Tab. 3.1 sind mögliche Szenarien von Meteoriten-Einschlägen unterschiedlicher Größe und deren geschätzte Häufigkeiten und Auswirkungen zusammengefasst. Um mit diesen Zahlen eine Vorstellung zu verbinden, sind einige der bekanntesten Meteoriten-Einschläge kurz zitiert.

Der Meteorit von Tscheljabinsk schlug am 15. Februar 2013 um etwa 9:20 h Ortszeit ein und ist ein Ereignis, welches durch eine Vielzahl von Video-Aufnahmen festgehalten wurde. Aus der Zerstörungsenergie konnte auf dessen Masse von etwa 12.000 Tonnen und dessen Durchmesser von ca. 20 Metern geschlossen werden. Es handelte sich dabei um einen Steinmeteoriten mit einer mittleren Dichte von ca. $3,3 \text{ g/cm}^3$, welcher von der sonnenzugewandten Seite die Erde mit einer relativ geringen Geschwindigkeit von ca. 20 km/s traf. Bilanz: 3700 Gebäudeschäden durch Druckwelle, ca. 1500 Verletzungen.

Das Tunguska-Ereignis am 30. Juni 1908 in der heutigen Region Krasnojarsk ist wahrscheinlich ebenfalls auf einen Einschlag eines Steinmeteoriten zurückzuführen. Sein ungefähre Durchmesser könnte in der Größenordnung von 30–80 Metern gelegen haben. Da es keinen Krater gab, muss dieses Objekt wohl in der höheren Atmosphäre (ungefähr 10 Kilometer) explosionsartig auseinandergebrochen sein. Dieses Szenarium lässt sich sowohl aus den (allerdings wenigen) Augenzeugenberichten als auch aus den angerichteten Verwüstungen, welche sich über ein Areal von fast 2000 km² erstreckten, ableiten.

Ein insgesamt schlüssiges Bild über die Abfolge dieses Ereignisses lässt sich aber bis heute noch immer nicht zusammenstellen.

Der Barringer-Krater in Arizona (■ Abb. 3.2) geht auf einen Meteoriteneinschlag vor ungefähr 50.000 Jahren zurück. Der Meteorit hatte einen Durchmesser von ca. 45 Metern, wog ca. 300.000 Tonnen und bestand vornehmlich aus Eisen.

² Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

■ **Tab. 3.1** Szenarien von Einschlägen kompakter Objekte auf den Planeten Erde, übernommen und adaptiert aus: *The Impact Hazard*, Essay von David Morrison, Clark R. Chapman und Paul Slovic in *Hazards due to Comets and Asteroids*, University of Arizona Press, 1994. Die angegebenen Dichten beziehen sich auf Steinmeteoriten (ca. 3 g/cm³) und Eisenmeteoriten (ca. 5 g/cm³), wobei Letztere eine höhere Wahrscheinlichkeit besitzen, in nahezu kompakter Form die Erdoberfläche zu erreichen

Impaktor-Eigenschaft: Dichte ca. 3–5 g/cm ³ , Kollisionsgeschwindigkeit ca. 50 km/s 1 Megatonne (Mt) TNT entspricht einer Energiefreisetzung von 1,16 × 10 ⁹ kWh				
Durchmesser in Meter	Masse in Mt	Energie in Mt TNT	Häufigkeit in Jahre	Konsequenzen
< 50	< 0,2	< 10	< 1	Meteore verglühen und zerbrechen, erreichen meist nicht die Erdoberfläche
75	0,6 – 1	10 – 100	1000	Landeinschläge zerstören Flächen einer Großstadt
160	6 – 10	100 – 1000	5000	Landeinschläge zerstören Flächen von Metropolen (Berlin, Tokio)
350	60 – 100	10 ³ – 10 ⁴	15.000	Landeinschläge zerstören Flächen kleiner Staaten, See-Einschläge produzieren kleinere Tsunamis
750	500 – 1000	10 ⁴ – 10 ⁵	66.000	Landeinschläge zerstören Flächen mittelgroßer Staaten (Irland), See-Einschläge produzieren große Tsunamis
1700	5000 – 10.000	10 ⁵ – 10 ⁶	250.000	Landeinschläge zerstören Flächen großer Staaten (Kalifornien, Frankreich), haben atmosphärische Langzeiteffekte zur Folge.

Er schlug mit einer eher geringen Geschwindigkeit von etwa 15–30 km/s auf und hinterließ einen 1,2 km großen und 170 m tiefen Krater.

Der Meteorit, der vor 14,6 Mio. Jahren das Nördlinger Ries im heutigen Gebiet zwischen Schwäbischer und Fränkischer Alb erzeugte, dürfte einen Durchmesser von etwa 1,5 km gehabt haben und mit einer Geschwindigkeit von etwa 50 km/s eingeschlagen sein. Er erzeugte einen Krater von etwa 25 km Durchmesser mit einer Tiefe von ungefähr 500 m (■ Abb. 3.3).

Von einem der spektakulärsten und für die Artenentwicklung auf unserer Erde zweifellos folgenschwersten Einschläge zeugt der im Jahr 1991 entdeckte Chicxulub-Krater nahe der Halbinsel Yukatan in Mexiko (■ Abb. 3.4). Dieser Einschlag datiert ziemlich genau zurück auf etwa 66,04 Mio. Jahre und leitete nach heutigem Kenntnisstand das abrupte Ende der fast 200 Mio. Jahre andauernden Ära der Dinosaurier ein. Er führte in kürzester Zeit zu einem globalen Artensterben, dem vermutlich 70–75 % aller vorhandenen Arten auf der Erde zum Opfer fielen. Die klimatischen Nachwirkungen dauerten fast 100.000 Jahre und waren bestimmt durch zunächst mehrere Jahrzehnte globalen Winters mit einem Temperatursturz von fast 30 Grad und dem nahezu vollständigen Erliegen der Fotosynthese, sowie in der Folgezeit durch globales Treibhausklima. Der globale Winter ver-