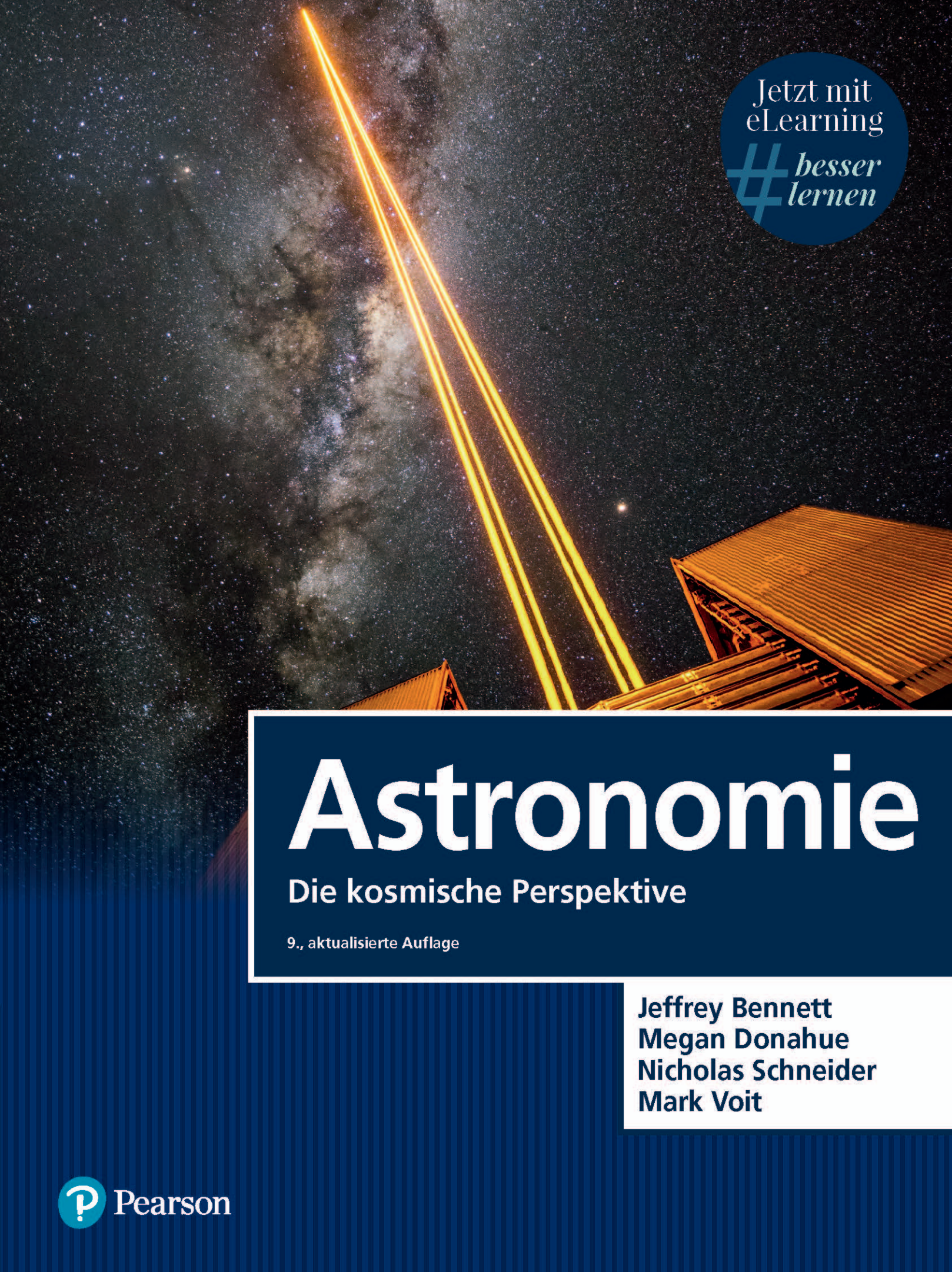




Jetzt mit
eLearning

#besser
lernen

Astronomie

Die kosmische Perspektive

9., aktualisierte Auflage

Jeffrey Bennett
Megan Donahue
Nicholas Schneider
Mark Voit

Astronomie

Die kosmische Perspektive

9., aktualisierte Auflage

Astronomie

Die kosmische Perspektive

9., aktualisierte Auflage

Fachlektorat dieser Auflage:
Dr. Carolin Liefke und
Dr. Gunnar Radons

Jeffrey Bennett
Megan Donahue
Nicholas Schneider
Mark Voit

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.

Die Informationen in diesem Produkt werden ohne Rücksicht auf einen eventuellen Patentschutz veröffentlicht. Warennamen werden ohne Gewährleistung der freien Verwendbarkeit benutzt. Bei der Zusammenstellung von Texten und Abbildungen wurde mit größter Sorgfalt vorgegangen. Trotzdem können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Verlag, Herausgeber und Autoren können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen. Für Verbesserungsvorschläge und Hinweise auf Fehler sind Verlag und Herausgeber dankbar.

Alle Rechte vorbehalten, auch die der fotomechanischen Wiedergabe und der Speicherung in elektronischen Medien. Die gewerbliche Nutzung der in diesem Produkt gezeigten Modelle und Arbeiten ist nicht zulässig.

Fast alle Produktbezeichnungen und weitere Stichworte und sonstige Angaben, die in diesem Buch verwendet werden, sind als eingetragene Marken geschützt. Da es nicht möglich ist, in allen Fällen zeitnah zu ermitteln, ob ein Markenschutz besteht, wird das ®-Symbol in diesem Buch nicht verwendet.

Authorized translation from the English language edition, entitled THE COSMIC PERSPECTIVE, 9th Edition, by JEFFREY BENNETT, MEGAN DONAHUE, NICHOLAS SCHNEIDER, and MARK VOIT, published by Pearson Education, Inc., publishing as Pearson, © 2019.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

GERMAN language edition published by PEARSON DEUTSCHLAND GMBH, Copyright © 2021.

Titelbild: Eines der Hauptteleskope des Very Large Telescope (VLT), das den Namen Yepun erhielt, sendet Laserstrahlen aus, die etwa 90 km über dem Teleskop künstliche Leitsterne erzeugen. Sie sind Teil des adaptiven optischen Systems und stellen die derzeit führende Technologie zur Korrektur der Luftunruhe über dem Teleskop dar. Weitere Informationen dazu in und am Ende von Kapitel 6.

Credit: G. Hudepohl (atacamaphoto.com)/ESO https://www.eso.org/public/images/_D5D0581-CC/, Text und Skalierung von Pearson Deutschland GmbH, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>

10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

25 24 23 22 21

ISBN 978-3-86894-364-1 (Buch)
ISBN 978-3-86326-865-7 (E-Book)

Zugangscode einlösbar bis 30.09.2026.

© 2021 by Pearson Deutschland GmbH
St.-Martin-Str. 82, 81541 München/Germany
Alle Rechte vorbehalten
www.pearson.de
A part of Pearson plc worldwide

Programmleitung: Birger Peil, bpeil@pearson.de
Deskeditorial und Bildbearbeitung: Elisabeth Prümm, epruemmm@pearson.de
Fachlektorat: Dr. Carolin Liefke, Dr. Gunnar Radons
Übersetzung: Dr. Gunnar Radons, projekte@radons.de
Sprachkorrektorat: Katharina Pieper, Petra Alm
Herstellung: Claudia Bäurle, cbaurle@pearson.de
Satz & Layout: Gerhard Alfes, mediaService, Siegen, www.mediaservice.tv
Druck und Verarbeitung: Neografia a.s., Martin – Priekopa

Printed in Slovakia

Inhaltsübersicht

Vorwort	xix
Teil I Das Entwickeln eines Blickwinkels.....	2
Kapitel 1 Unser heutiges Bild vom Universum	5
Kapitel 2 Entdecken Sie das Universum selbst	35
Kapitel 3 Astronomie als Wissenschaft	73
Kapitel S1 Zeitmessung und Navigation anhand der Sterne	117
Teil II Schlüsselkonzepte der Astronomie	150
Kapitel 4 Wie das Universum funktioniert	153
Kapitel 5 Licht und Materie	189
Kapitel 6 Teleskope	227
Teil III Von anderen Welten lernen	262
Kapitel 7 Unser Sonnensystem	265
Kapitel 8 Die Entstehung des Sonnensystems	305
Kapitel 9 Planetare Geologie	329
Kapitel 10 Planetare Atmosphären	379
Kapitel 11 Jovianische Planeten	435
Kapitel 12 Asteroiden, Kometen und Zwergplaneten	477
Kapitel 13 Andere Planetensysteme	521
Teil IV Ein tieferer Blick in die Natur	560
Kapitel S2 Raum und Zeit	563
Kapitel S3 Raumzeit und Gravitation	593
Kapitel S4 Bausteine des Universums	625
Teil V Sterne	652
Kapitel 14 Unser Stern – die Sonne	655
Kapitel 15 Ein genauer Blick auf die Sterne	685
Kapitel 16 Sternentstehung	717
Kapitel 17 Sternenstaub	743
Kapitel 18 Der Friedhof der Sterne	773

Teil VI	Galaxien und darüber hinaus	802
Kapitel 19	Unsere Galaxis, die Milchstraße	805
Kapitel 20	Galaxien und die Grundlagen der modernen Kosmologie.....	837
Kapitel 21	Galaxienentwicklung	869
Kapitel 22	Der Anbeginn der Zeit	895
Kapitel 23	Dunkle Materie, Dunkle Energie und das Schicksal des Universums	923
Teil VII	Leben auf und außerhalb der Erde	958
Kapitel 24	Leben im Universum.....	961
Anhang		1005

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	xix
Teil I Das Entwickeln eines Blickwinkels	2
Kapitel 1 Unser heutiges Bild vom Universum	5
1.1 Maßstäbe im Universum	8
Wo ist unser Platz im Universum?	8
Wie groß ist das Universum?	12
Wie weit sind die Sterne entfernt?	14
Wie groß ist die Milchstraße?	16
1.2 Die Geschichte des Universums	22
Wie sind wir entstanden?	22
Wie lässt sich unsere Lebensspanne mit dem Alter des Universums vergleichen? ..	24
1.3 Raumschiff Erde.	24
Wie bewegt sich die Erde durch den Raum?	24
Wie bewegen sich Galaxien durch das Universum?	28
1.4 Menschheitsabenteuer Astronomie.	31
Wie hat die astronomische Forschung die menschliche Geschichte beeinflusst? ...	31
Überblick	32
Zusammenfassung.	32
Kapitel 2 Entdecken Sie das Universum selbst	35
2.1 Muster am Nachthimmel.	37
Wie ist der Anblick des Universums von der Erde aus?	37
Warum gehen Sterne auf und unter?	41
Warum hängen die sichtbaren Sternbilder von der geografischen Breite und der Jahreszeit ab?	42
2.2 Die Ursache der Jahreszeiten.	47
Was verursacht die Jahreszeiten?	47
Wie verändert sich die Orientierung der Erdachse im Lauf der Zeit?	53
2.3 Der Mond: Unser ständiger Begleiter	55
Warum gibt es Mondphasen?	55
Was verursacht Finsternisse?	59
2.4 Das Planetenrätsel der Antike	65
Weshalb war die Planetenbewegung am Himmel einst so rätselhaft?	65
Warum lehnten die alten Griechen die richtige Erklärung für die Planetenbewegung ab?	66
Überblick	70
Zusammenfassung.	70
Kapitel 3 Astronomie als Wissenschaft	73
3.1 Die historischen Wurzeln der Naturwissenschaften	75
Inwiefern denken alle Menschen wissenschaftlich?	75
Wie ist die moderne Wissenschaft in der antiken Astronomie verwurzelt?	76

3.2	Naturwissenschaft im antiken Griechenland	83
	Warum führt die moderne Wissenschaft ihre Anfänge auf Griechenland zurück?...	83
	Wie haben die Griechen die Planetenbewegung erklärt?	86
3.3	Die kopernikanische Wende	90
	Wie haben Kopernikus, Brahe und Kepler das geozentrische Weltbild angefochten?	90
	Wie lauten die drei Kepler'schen Gesetze der Planetenbewegung?	93
	Wie hat Galilei die kopernikanische Wende untermauert?	94
3.4	Das Wesen der Wissenschaft	97
	Wie können wir Wissenschaft von Nichtwissenschaft unterscheiden?	98
	Was ist eine wissenschaftliche Theorie?	106
3.5	Astrologie	109
	Wie unterscheiden sich Astrologie und Astronomie?	109
	Hat die Astrologie eine naturwissenschaftliche Grundlage?	110
	Überblick	113
	Zusammenfassung	113
	Kapitel S1 Zeitmessung und Navigation anhand der Sterne	117
S1.1	Astronomische Zeiträume	119
	Wie definieren wir Tag, Monat, Jahr und planetare Umlaufzeiten?	119
	Wie bestimmen wir die Tageszeit?	124
	Wann und warum gibt es Schaltjahre?	127
S1.2	Himmelskoordinaten und Bewegungen am Himmel	128
	Wie stellen wir den Ort von Objekten an der Himmelskugel fest?	128
	Wie bewegen sich die Sterne am Himmel über uns?	132
	Wie bewegt sich die Sonne am Himmel über uns?	139
S1.3	Grundlagen der Navigation nach den Sternen	142
	Wie können Sie Ihren Breitengrad bestimmen?	142
	Wie können Sie Ihren Längengrad bestimmen?	142
	Überblick	146
	Zusammenfassung	146
	Teil II Schlüsselkonzepte der Astronomie	150
	Kapitel 4 Wie das Universum funktioniert.	153
4.1	Bewegungen: Beispiele aus dem Alltag	155
	Wie beschreiben wir Bewegungen?	155
	Wie unterscheiden sich Masse und Gewicht?	158
4.2	Die newtonschen Bewegungsgesetze	160
	Wie hat Newton unser Verständnis des Universums verändert?	160
	Wie lauten die drei newtonschen Bewegungsgesetze?	161
4.3	Erhaltungssätze in der Astronomie	164
	Warum bewegen sich Objekte mit gleichförmiger Geschwindigkeit, wenn keine Kräfte auf sie wirken?	164
	Was lässt Planeten rotieren und um die Sonne kreisen?	165
	Woher haben Objekte ihre Energie?	167

4.4	Das allgemeine Gravitationsgesetz	172
	Was bestimmt die Stärke der Schwerkraft?	173
	Wie erweitert das newtonsche Gravitationsgesetz die Kepler'schen Gesetze?	173
4.5	Umlaufbahnen, Gezeiten und Schwerebeschleunigung	176
	Wie können wir Umlaufbahnen anhand von Schwerkraft- und Energiegesetzen verstehen?	176
	Wie verursacht die Schwerkraft Gezeiten?	181
	Warum fallen alle Objekte mit derselben Geschwindigkeit?	184
	Überblick	186
	Zusammenfassung	186
Kapitel 5 Licht und Materie		189
5.1	Licht im Alltag	191
	Wie nehmen wir Licht wahr?	191
	Wie treten Licht und Materie in Wechselwirkung?	192
5.2	Eigenschaften des Lichts	194
	Was ist Licht?	194
	Was ist das elektromagnetische Spektrum?	196
5.3	Eigenschaften der Materie	200
	Welche Struktur hat Materie?	200
	Welche Aggregatzustände der Materie gibt es?	203
	Wie wird Energie in Atomen gespeichert?	206
5.4	Vom Licht lernen	208
	Was sind die drei Grundarten von Spektren?	209
	Wie erkennen wir anhand von Licht, woraus die Dinge bestehen?	209
	Wie kann uns Licht etwas über die Temperaturen von Planeten und Sternen sagen?	214
	Wie kann uns Licht etwas über die Geschwindigkeit eines fernen Objekts sagen? ..	216
	Überblick	223
	Zusammenfassung	223
Kapitel 6 Teleskope		227
6.1	Augen und Kameras: Lichtsensoren des Alltags.	229
	Wie sieht das Auge und wie zeichnet man Bilder auf?	229
6.2	Riesige Augen: Teleskope	232
	Was sind die beiden wichtigsten Merkmale eines Teleskops?	232
	Was sind die beiden wichtigsten Teleskoparten?	233
	Wie nutzen Astronomen ihre Teleskope?	238
6.3	Teleskope und die Atmosphäre.	243
	Wie beeinflusst die Erdatmosphäre bodengestützte Beobachtungen?	243
	Warum bringen wir Teleskope in den Weltraum?	246
6.4	Teleskope für verschiedene Spektralbereiche	248
	Wie beobachten wir unsichtbares Licht?	248
	Wie arbeiten mehrere Teleskope zusammen?	253
	Überblick	255
	Zusammenfassung	255

Teil III	Von anderen Welten lernen	262
Kapitel 7	Unser Sonnensystem	265
7.1	Die Untersuchung des Sonnensystems	267
	Wie sieht das Sonnensystem aus?	267
	Was lehrt uns der Vergleich der Planeten untereinander?	270
7.2	Gesetzmäßigkeiten im Sonnensystem	285
	Welche Merkmale des Sonnensystems bieten Hinweise auf seine Entstehung?	285
7.3	Die Erkundung des Sonnensystems mit Raumsonden	289
	Wie arbeiten Robotersonden?	290
	Überblick	294
	Zusammenfassung	294
Kapitel 8	Die Entstehung des Sonnensystems	305
8.1	Auf der Suche nach dem Anfang	307
	Von der Hypothese zur Theorie	307
	Woraus ist das Sonnensystem entstanden?	308
8.2	Wie die wichtigsten Eigenschaften des Sonnensystems zustande kamen	309
	Weshalb gibt es regelmäßige Bewegungsmuster in unserem Sonnensystem?	309
	Warum gibt es zwei Hauptgruppen der Planeten?	312
	Woher stammen Asteroiden und Kometen?	317
	Wie können wir Ausnahmen von den Regeln erklären?	318
8.3	Das Alter des Sonnensystems	323
	Wie messen wir das Alter von Gesteinen?	323
	Woher kennen wir das Alter des Sonnensystems?	324
	Überblick	326
	Zusammenfassung	327
Kapitel 9	Planetare Geologie	329
9.1	Der Zusammenhang zwischen dem Planeteninneren und der Oberfläche	331
	Wie sehen Gesteinsplaneten im Inneren aus?	331
	Was verursacht geologische Aktivität?	336
	Warum erzeugt das Innere mancher Planeten ein Magnetfeld?	338
9.2	Die Struktur von Planetenoberflächen	340
	Welche Prozesse bestimmen die Oberflächeneigenschaften eines Planeten?	341
	Wie zeigen Einschlagkrater das geologische Alter einer Oberfläche an?	346
	Warum haben die Gesteinsplaneten eine unterschiedliche geologische Geschichte?	347
9.3	Die Geologie von Mond und Merkur	349
	Welche geologischen Prozesse haben den Mond geprägt?	350
	Welche geologischen Prozesse haben Merkur geprägt?	352
9.4	Die Geologie des Mars	354
	Welche geologischen Prozesse haben den Mars geprägt?	355
9.5	Die Geologie der Venus	363
	Welche geologischen Prozesse haben die Venus geprägt?	363
	Weist die Venus Plattentektonik auf?	365

9.6	Die einzigartige Geologie der Erde	366
	Woher wissen wir, dass sich die Erdoberfläche bewegt?	366
	Wie wird die Erdoberfläche durch die Plattentektonik verändert?	368
	War die Geologie der Erde bei ihrer Entstehung bereits festgelegt?	374
	Überblick	376
	Zusammenfassung	376
	Kapitel 10 Planetare Atmosphären	379
10.1	Grundlagen der Atmosphärenphysik	381
	Was ist eine Atmosphäre?	381
	Wie heizt der Treibhauseffekt einen Planeten auf?	386
	Warum verändern sich die Eigenschaften der Atmosphäre mit der Höhe?	389
10.2	Wetter und Klima	394
	Was verursacht Wind und Wetter?	394
	Welche Faktoren können langfristige Klimaänderungen verursachen?	399
	Wie gewinnt oder verliert ein Planet atmosphärische Gase?	401
10.3	Die Atmosphären von Mond und Merkur	403
	Haben Mond und Merkur überhaupt eine Atmosphäre?	403
10.4	Die Marsatmosphäre und ihre Geschichte	406
	Wie sieht der Mars heute aus?	406
	Wie hat sich das Klima des Mars in der Vergangenheit verändert?	409
	Warum hat sich der Mars verändert?	410
10.5	Die Venusatmosphäre und ihre Geschichte	413
	Wie sieht die Venus heute aus?	413
	Warum wurde die Venus so heiß?	414
10.6	Die einzigartige Atmosphäre der Erde	417
	Was macht die Erdatmosphäre so außergewöhnlich?	417
	Warum ist die Erdatmosphäre relativ stabil?	419
	Wie verändern menschliche Aktivitäten unseren Planeten?	423
	Überblick	431
	Zusammenfassung	431
	Kapitel 11 Jovianische Planeten	435
11.1	Eine andere Art von Planet	437
	Sind alle jovianischen Planeten gleich?	437
	Wie sieht das Innere jovianischer Planeten aus?	442
	Welches Wetter herrscht auf den jovianischen Planeten?	445
	Haben jovianische Planeten Magnetosphären wie die Erde?	450
11.2	Eine Fülle an Welten: Satelliten aus Eis und Fels	452
	Welche Arten von Monden umkreisen die jovianischen Planeten?	452
	Warum sind die Galilei'schen Monde des Jupiters geologisch so aktiv?	454
	Was ist an Titan und anderen großen Monden des äußeren Sonnensystems so bemerkenswert?	460
	Warum sind kleine Eismonde geologisch aktiver als kleine Gesteinsplaneten?	466

11.3	Die Ringe der jovianischen Planeten	467
	Wie sehen die Saturnringe aus?	467
	Wie sehen die Ringsysteme anderer jovianischer Planeten im Vergleich zu den Saturnringen aus?	469
	Warum haben die jovianischen Planeten Ringe?	470
	Überblick	473
	Zusammenfassung	473
	Kapitel 12 Asteroiden, Kometen und Zwergplaneten	477
12.1	Klassifikation kleiner Körper	479
	Worin unterscheiden sich Asteroiden, Kometen und Zwergplaneten?	479
	Was sind Meteore und Meteorite?	483
12.2	Asteroiden	485
	Woraus bestehen Asteroiden?	485
	Was erfahren wir von Meteoriten über Asteroiden und das frühe Sonnensystem ...	489
	Warum gibt es einen Asteroidengürtel?	492
12.3	Kometen	494
	Warum entwickeln sich Kometenschweife?	494
	Woher kommen Kometen?	499
12.4	Pluto und der Kuiper-Gürtel	501
	Was wissen wir über Pluto?	502
	Warum gibt es den Kuiper-Gürtel?	505
12.5	Kosmische Kollisionen: Kleine Körper kontra Planeten	507
	Hat ein Einschlag die Dinosaurier ausgerottet?	508
	Wie groß ist heute das Einschlagrisiko?	512
	Wie beeinflussen die jovianischen Planeten Einschlagsraten und das Leben auf der Erde?	514
	Überblick	516
	Zusammenfassung	516
	Kapitel 13 Andere Planetensysteme	521
13.1	Extrasolare Planeten entdecken	523
	Warum ist das Entdecken von Planeten bei anderen Sternen so schwierig?	523
	Wie verrät die Bewegung eines Sterns die Anwesenheit von Planeten?	524
	Wie verraten Helligkeitsschwankungen des Sterns die Anwesenheit von Planeten?	528
13.2	Eigenschaften extrasolarer Planeten	534
	Welche Eigenschaften extrasolarer Planeten können wir messen?	534
	Wie sieht der Vergleich extrasolarer Planeten mit den Planeten unseres Sonnensystems aus?	543
13.3	Die Entstehung anderer Sonnensysteme	548
	Müssen wir unsere Theorie der Entstehung des Sonnensystems überdenken?	548
	Sind Planetensysteme wie unser eigenes häufig zu finden?	551
13.4	Die Zukunft der Exoplanetenforschung	551
	Wie werden zukünftige Beobachtungen unsere Vorstellungen verändern?	551
	Überblick	555
	Zusammenfassung	555

Teil IV	Ein tieferer Blick in die Natur	560
Kapitel S2	Raum und Zeit	563
S2.1	Einsteins Revolution	565
	Was sind die Grundelemente der speziellen Relativitätstheorie?	565
	Was ist an der Relativitätstheorie „relativ“?	567
	Was ist an der Relativitätstheorie „absolut“?	568
S2.2	Relative Bewegung	570
	Warum ist die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit so überraschend?	570
	Warum können wir die Lichtgeschwindigkeit niemals erreichen?	573
S2.3	Die Realität von Raum und Zeit	575
	Wie beeinflusst die Relativitätstheorie unsere Vorstellung von Raum und Zeit?	575
	Treten die von der Relativitätstheorie vorhergesagten Effekte wirklich auf?	583
S2.4	Eine neue Betrachtungsweise	587
	Wie können wir die Relativitätstheorie verstehen?	587
	Ermöglicht die Relativitätstheorie Reisen zu den Sternen?	588
	Überblick	590
	Zusammenfassung	590
Kapitel S3	Raumzeit und Gravitation	593
S3.1	Einsteins zweite Revolution	595
	Was sind die wichtigsten Aussagen der allgemeinen Relativitätstheorie?	595
	Wie lautet die Grundannahme der allgemeinen Relativitätstheorie?	596
S3.2	Die Raumzeit verstehen	599
	Was ist Raumzeit?	599
	Was versteht man unter gekrümmter Raumzeit?	603
S3.3	Ein neues Bild der Gravitation	607
	Was ist Gravitation?	607
	Was ist ein Schwarzes Loch?	609
	Wie beeinflusst die Gravitation die Zeit?	610
S3.4	Prüfen der allgemeinen Relativitätstheorie	612
	Wie können wir die Vorhersagen der allgemeinen Relativitätstheorie prüfen?	612
	Was sind Gravitationswellen?	615
S3.5	Hyperspace, Wurmlöcher und Warp-Antrieb	617
	Wo hört Wissenschaft auf und wo beginnt Science-Fiction?	617
S3.6	Ein letztes Wort	620
	Wie hat die Relativitätstheorie unsere Vorstellung von Raum und Zeit verändert?	620
	Überblick	621
	Zusammenfassung	621
Kapitel S4	Bausteine des Universums	625
S4.1	Die Quantenrevolution	627
	Wie hat die Quantenrevolution unsere Welt verändert?	627
S4.2	Elementare Teilchen und Kräfte	628
	Welche grundlegenden Eigenschaften haben subatomare Teilchen?	628
	Welche elementaren Bausteine der Materie gibt es?	629
	Welche fundamentalen Kräfte gibt es in der Natur?	632

S4.3	Unschärfe und Ausschluss im Bereich der Quanten	636
	Was besagt die Unschärferelation?	636
	Was besagt das Pauli-Prinzip?	639
S4.4	Wichtige Quanteneffekte in der Astronomie	642
	Welchen Einfluss haben die Gesetze der Quantenphysik auf besondere Sternarten?	642
	Weshalb ist das Tunneln von Teilchen für das Leben auf der Erde so wichtig?	644
	Wie leer ist der leere Raum?	645
	Leben Schwarze Löcher ewig?	646
	Überblick	648
	Zusammenfassung	648
Teil V	Sterne	652
Kapitel 14	Unser Stern – die Sonne	655
14.1	Ein genauerer Blick auf die Sonne	657
	Warum scheint die Sonne?	657
	Wie ist die Sonne aufgebaut?	659
14.2	Kernfusion in der Sonne	662
	Wie läuft die Kernfusion in der Sonne ab?	662
	Wie kommt die Fusionsenergie aus der Sonne heraus?	668
	Woher wissen wir, was in der Sonne geschieht?	669
14.3	Die Verbindung zwischen Sonne und Erde	672
	Was ist die Ursache der Sonnenaktivität?	672
	Wie verändert sich die Sonnenaktivität mit der Zeit?	676
	Überblick	680
	Zusammenfassung	680
Kapitel 15	Ein genauer Blick auf die Sterne	685
15.1	Eigenschaften der Sterne	687
	Wie messen wir die Leuchtkraft von Sternen?	687
	Wie messen wir die Temperatur von Sternen?	693
	Wie messen wir die Masse von Sternen?	697
15.2	Systematik von Sternen	701
	Was ist ein Hertzsprung-Russell-Diagramm?	701
	Welche Bedeutung hat die Hauptreihe?	706
	Was sind Riesen, Überriesen und Weiße Zwerge?	707
	Warum verändern sich die Eigenschaften mancher Sterne?	709
15.3	Sternhaufen	710
	Welche zwei Arten von Sternhaufen gibt es?	710
	Wie messen wir das Alter von Sternhaufen?	711
	Überblick	713
	Zusammenfassung	713

Kapitel 16 Sternentstehung	717
16.1 Die Geburtsorte der Sterne	719
Wo entstehen die Sterne?	719
Warum entstehen Sterne?	723
16.2 Stadien der Sternentstehung	729
Wodurch wird die Kontraktion einer Wolke, in der ein Stern entsteht, gebremst? ..	729
Welche Rolle spielt die Rotation bei der Sternentstehung?	731
Wie setzt in einem neu entstandenen Stern die Kernfusion ein?	733
16.3 Massen neu entstandener Sterne.	736
Welche Minimalmasse kann ein neu entstandener Stern haben?	736
Welche Maximalmasse kann ein neu entstandener Stern haben?	738
Welche Massen haben neu entstandene Sterne üblicherweise?	739
Überblick	740
Zusammenfassung	740
Kapitel 17 Sternenstaub	743
17.1 Entwicklung im Gleichgewicht	745
Wie beeinflusst die Masse eines Sterns seine Kernfusion?	745
17.2 Die Entwicklung eines massearmen Sterns	746
Welche Entwicklungsstadien durchläuft ein massearmer Stern?	746
Wie stirbt ein massearmer Stern?	751
17.3 Die Entwicklung eines massereichen Sterns	755
Welche Entwicklungsstadien durchläuft ein massereicher Stern?	755
Wie erzeugen massereiche Sterne die für das Leben notwendigen Elemente?	758
Wie stirbt ein massereicher Stern?	761
17.4 Die Rolle von Masse und Massenaustausch	765
Wie bestimmt die Masse eines Sterns seine Entwicklungsgeschichte?	765
Wie unterscheidet sich das Leben von Sternen mit engen Begleitern von dem alleinstehender Sterne?	765
Überblick	769
Zusammenfassung	769
Kapitel 18 Der Friedhof der Sterne	773
18.1 Weiße Zwerge	775
Was ist ein Weißer Zwerg?	775
Was geschieht mit einem Weißen Zwerg in einem engen Doppelsternsystem?	776
18.2 Neutronensterne	780
Was ist ein Neutronenstern?	780
Wie wurden Neutronensterne entdeckt?	781
Was geschieht mit einem Neutronenstern in einem engen Doppelsternsystem?	784
18.3 Schwarze Löcher: Der endgültige Sieg der Schwerkraft	785
Was ist ein Schwarzes Loch?	785
Wie wäre es, wenn wir ein Schwarzes Loch besuchen könnten?	788
Gibt es Schwarze Löcher wirklich?	791

18.4	Der Ursprung der Gammabursts	794
	Was verursacht Gammabursts?	794
	Was geschieht, wenn Neutronensterne verschmelzen?	795
	Was geschieht, wenn Schwarze Löcher verschmelzen?	796
	Überblick	798
	Zusammenfassung	798
Teil VI Galaxien und darüber hinaus		802
Kapitel 19 Unsere Galaxis, die Milchstraße		805
19.1	Der Blick auf die Milchstraße	807
	Wie sieht unsere Galaxis aus?	807
	Wie bewegen sich die Sterne in unserer Galaxis?	808
19.2	Galaktisches Recycling	813
	Wie wird Gas in unserer Galaxis recycelt?	814
	Wo bilden sich üblicherweise Sterne in unserer Galaxis?	822
19.3	Die Geschichte unserer Milchstraße	826
	Welche Hinweise auf die Geschichte der Galaxis bieten die Sterne des Halos?	826
	Wie ist unsere Galaxis entstanden?	827
19.4	Das galaktische Zentrum	829
	Welche Hinweise gibt es auf ein Schwarzes Loch im Zentrum der Milchstraße?	829
	Überblick	833
	Zusammenfassung	833
Kapitel 20 Galaxien und die Grundlagen der modernen Kosmologie		837
20.1	Sterneninseln	839
	Wie hängt die Galaxienentwicklung mit der Geschichte des Universums zusammen?	839
	Welche Muster verstecken sich in den Eigenschaften der Galaxien?	840
20.2	Messung der Galaxienentfernung	846
	Wie messen wir die Entfernung von Galaxien?	847
	Wie konnte Hubble beweisen, dass Galaxien weit außerhalb der Milchstraße liegen?	852
	Was ist das Hubble'sche Gesetz?	854
20.3	Das Alter des Universums	858
	Was sagt das Hubble'sche Gesetz über das Alter des Universums aus?	859
	Wie beeinflusst die Expansion des Universums unsere Entfernungsmessungen?	862
	Warum hat das beobachtbare Universum einen Horizont?	864
	Überblick	866
	Zusammenfassung	866
Kapitel 21 Galaxienentwicklung		869
21.1	Der Blick zurück durch die Zeit	871
	Wie können wir die Entwicklungsgeschichten von Galaxien beobachten?	871
	Wie untersuchen wir die Entstehung von Galaxien?	871

21.2	Die Entwicklung von Galaxien	873
	Warum unterscheiden sich Galaxien voneinander?	874
	Wie wird Gas durch Galaxien recycelt?	879
21.3	Die Rolle supermassereicher Schwarzer Löcher	881
	Welche Hinweise auf supermassereiche Schwarze Löcher in den Zentren von Galaxien gibt es?	881
	Steuern supermassereiche Schwarze Löcher die Entwicklung von Galaxien?	886
21.4	Gas jenseits der Sterne	890
	Wie können wir das Gas zwischen den Galaxien beobachten?	890
	Überblick	892
	Zusammenfassung	892
Kapitel 22 Der Anbeginn der Zeit		895
22.1	Der Urknall	897
	Welche Bedingungen herrschten im frühen Universum?	897
	Wie hat sich das junge Universum im Lauf der Zeit verändert?	900
22.2	Belege für den Urknall	904
	Wie unterstützen Beobachtungen der kosmischen Hintergrundstrahlung die Urknalltheorie?	905
	Wie belegen die Elementhäufigkeiten die Urknalltheorie?	909
22.3	Der Urknall und die Inflation	912
	Welche Grundeigenschaften des Universums werden durch die Inflation erklärt? . .	913
	Hat die Inflation wirklich stattgefunden?	916
22.4	Den Urknall selbst beobachten	917
	Warum ist die Schwärze des Nachthimmels ein Beleg für den Urknall?	918
	Überblick	920
	Zusammenfassung	920
Kapitel 23 Dunkle Materie, Dunkle Energie und das Schicksal des Universums		923
23.1	Unsichtbare Einflüsse im Kosmos	925
	Was verstehen wir unter Dunkler Materie und Dunkler Energie?	925
23.2	Hinweise auf die Dunkle Materie	926
	Welche Hinweise gibt es auf Dunkle Materie in Galaxien?	926
	Welche Hinweise auf Dunkle Materie gibt es in Galaxienhaufen?	930
	Gibt es Dunkle Materie wirklich?	935
	Woraus könnte die Dunkle Materie bestehen?	936
23.3	Die Entstehung von Strukturen	940
	Welche Rolle spielt die Dunkle Materie bei der Galaxienentstehung?	940
	Wie sehen die größten Strukturen im Universum aus?	941
23.4	Dunkle Energie und das Schicksal des Universums	944
	Beschleunigt sich die Expansion des Universums?	945
	Warum ist eine flache Geometrie ein Hinweis auf Dunkle Energie?	948
	Welches Schicksal erwartet das Universum?	949
	Überblick	954
	Zusammenfassung	954

Teil VII	Leben auf und außerhalb der Erde	958
Kapitel 24	Leben im Universum	961
24.1	Leben auf der Erde	963
	Wann entstand das Leben auf der Erde?	963
	Die geologische Zeitskala	964
	Wie entstand das Leben auf der Erde?	968
	Was sind die Grundvoraussetzungen des Lebens?	974
24.2	Leben im Sonnensystem	975
	Gibt es Leben auf dem Mars?	975
	Gibt es Leben im äußeren Sonnensystem?	979
24.3	Leben bei anderen Sternen	981
	Wann ist eine Oberfläche bewohnbar?	981
	Welche extrasolaren Planeten könnten bewohnbar sein?	984
	Wie können wir Leben auf extrasolaren Planeten erkennen?	986
24.4	Die Suche nach außerirdischer Intelligenz	988
	Wie viele Zivilisationen gibt es da draußen?	988
	Wie funktioniert SETI?	992
24.5	Interstellare Flüge und ihre Auswirkungen auf die Zivilisation	994
	Wie schwierig sind interstellare Flüge?	994
	Wo stecken die Außerirdischen?	997
	Überblick	999
	Zusammenfassung	999
Anhang		1005
A	Häufig benötigte Konstanten	1006
B	Häufig benötigte Formeln	1007
C	Ein wenig Mathematik	1008
D	Das Periodensystem	1015
E	Planetendaten	1016
F	Sterndaten	1020
G	Galaxiendaten	1022
H	Ausgewählte astronomische Websites	1026
I	Sternbildnamen	1028
J	Sternkarten	1030
K	Piktogramme	1035
L	Glossar	1037
M	Index	1063
N	Abbildungsverzeichnis	1084

Vorwort

Wir Menschen blicken seit unzähligen Generationen in den Himmel und grübeln darüber, wie unser Leben mit den ganzen Objekten verbunden ist, die den Himmel bevölkern. Dank der wissenschaftlichen Disziplin der Astronomie wissen wir heute, dass diese Verbindungen viel tiefer reichen, als unsere Vorfahren es sich jemals hätten träumen lassen. Dieses Buch erzählt die Geschichte der modernen Astronomie und der neuen Perspektive, der *kosmischen Perspektive*, die uns eine vollkommen neue Sicht auf uns und unseren Planeten ermöglicht.

Dieses Buch beruht auf unseren mehr als 40 Jahre langen Erfahrungen, die wir als Dozenten mit der Vermittlung von Astronomie an Hochschulen und für die interessierte Öffentlichkeit gewonnen haben. Während dieses Zeitraums hat eine Flut neuer Entdeckungen unser Verständnis des Kosmos revolutioniert, was sich allerdings in dem didaktischen Ansatz und dem grundlegenden Aufbau moderner Astronomiebücher kaum widerspiegelt.

Wir sind der Ansicht, dass es an der Zeit ist, Lehre und Aufbau der wichtigen Konzepte der Astronomie neu zu überdenken, um dieser Revolution der wissenschaftlichen Erkenntnisse gerecht zu werden. Das vorliegende Buch ist unser Ergebnis.

An wen wendet sich dieses Buch?

Astronomie - Die kosmische Perspektive ist primär für Einführungsvorlesungen sowie Grund- und Leistungskurse in Astronomie konzipiert, wendet sich aber auch an Hobby-Astronomen und alle diejenigen Laien, die sich für die moderne Astronomie interessieren.

Die Themen dieses Buches

Das Buch bietet eine breite Übersicht über unseren heutigen Kenntnisstand des Kosmos und die Wege, die zu ihm führten. Eine derartige Übersicht kann auf verschiedene Weise präsentiert werden. Wir haben entschieden, uns im Buch auf fünf Leitgedanken zu konzentrieren und diese auf verschiedene Weise miteinander zu

verflechten; jeder einzelne ist so gewählt, dass er das Thema Astronomie auch für Leserinnen und Leser attraktiv macht, die nie zuvor eine wissenschaftliche Vorlesung gehört haben und daher den Einstieg in die Astronomie mit geringen Vorkenntnissen über die naturwissenschaftlichen Grundlagen und Arbeitsweisen beginnen. Die fünf Leitgedanken unseres Buchs lauten:

■ **Leitgedanke 1:** *Wir sind ein Teil des Universums und können daher unsere Ursprünge verstehen, indem wir das Universum untersuchen.* Dies ist der alles umfassende Hauptgedanke der *Kosmischen Perspektive*, denn wir weisen immer wieder darauf hin, dass unser Wissen über das Universum unser Selbstverständnis mitbestimmt. Die Untersuchung der engen Verbindungen zwischen dem menschlichen Leben und dem Kosmos gibt den Leserinnen und Lesern einen Grund, sich mit Astronomie zu befassen, und vertieft zudem ihren Respekt vor der einzigartigen und zerbrechlichen Natur unseres Planeten und seiner Lebensformen.

■ **Leitgedanke 2:** *Das Universum lässt sich durch wissenschaftliche Prinzipien erklären, die jeder verstehen kann.* Das Universum kann erklärt werden, weil dieselben physikalischen Gesetze überall, auf jeder Größenskala und zu jedem Zeitpunkt des Universums, zu gelten scheinen. Diese Gesetze mögen zwar im Allgemeinen von Wissenschaftlern entdeckt worden sein, aber jeder kann ihre grundlegenden Aussagen verstehen. Die Leserinnen und Leser sind nach dem Studium dieses Buchs imstande, die wesentlichen Ursachen vieler Erscheinungen nachzuvollziehen – Phänomene, die beim Wechsel der Jahreszeiten und bei den Mondphasen anfangen und bis zu den geheimnisvollsten astronomischen Bildern reichen, die in den Nachrichten zu sehen sind.

■ **Leitgedanke 3:** *Die Wissenschaft ist keine Sammlung von Fakten, sondern vielmehr ein Prozess, durch den wir die Welt um uns herum zu verstehen suchen.* Viele Leser und Leserinnen glauben, dass die Naturwissenschaften nur aus einer Aneinanderreihung von Fakten bestehen. Die lange Geschichte der Astronomie zeigt jedoch, dass Naturwissen-

schaften ein Prozess sind, durch den wir z.B. mehr über unser Universum erfahren – ein Prozess, der nicht immer gleich die ganze Wahrheit liefert. Deshalb verändern sich unsere Ansichten über den Kosmos jedes Mal, wenn wir etwas Neues darüber herausgefunden haben, wie beispielsweise damals, als man das erste Mal erkannte, dass die Erde keineswegs das Zentrum des Universums ist, sondern ein Planet, der sich um die Sonne bewegt. In diesem Buch weisen wir immer wieder auf die Vorgehensweise der Naturwissenschaft hin, sodass jeder versteht, wie und warum moderne Theorien anerkannt wurden und warum sich diese Theorien in der Zukunft trotzdem ändern können.

- **Thema 4:** *Die Astronomie gehört uns allen.* Im Laufe der Geschichte hat Astronomie praktisch in jeder Kultur eine wichtige Rolle gespielt und die astronomischen Wissenschaften sind diesen frühen und größtenteils unbekannten Astronomen zu großem Dank verpflichtet. Deshalb bemühen wir uns in diesem Buch klarzustellen, dass astronomisches Wissen jedem gehört, dass die unterschiedlichsten Personen zu astronomischen Entdeckungen und Erkenntnissen beigetragen haben und dass jeder sich mit Astronomie befassen kann. Außerdem versuchen wir, die Studenten dahingehend zu motivieren, dass sie auch später an dem Abenteuer astronomischer Entdeckungen teilhaben, sei es passiv über Medien oder aktiv über eine entsprechende Berufswahl.
- **Leitgedanke 5:** *Wegen der Perspektiven, die sie anbietet, betrifft Astronomie uns alle persönlich.* Wir alle führen unsere täglichen Aufgaben im Leben auf der Basis eines gewissen „Weltbilds“ durch – ein Bündel persönlicher Vorstellungen über unsere Stellung und Aufgabe im Universum, die wir aus einer Kombination aus Schulbildung, religiöser Unterweisung und persönlichen Ansichten heraus entwickelt haben. Dieses Weltbild dominiert unsere Ansichten und viele unserer Handlungen. Obwohl die Astronomie kein bestimmtes Glaubensvorstellungen vorgibt, liefert sie doch einen Blick auf die Architektur des Universums, der unser Selbstbild und die Sicht auf unsere Welt beeinflussen und damit unser Verhalten verändern kann. Zum Beispiel wird jemand, der die Erde als Zentrum des Universums betrachtet, unseren Planeten anders behandeln als jemand, der sie als kleine und verletzbare Welt in den Weiten des Kosmos ansieht. In vielerlei Hinsicht zeigt die Rolle, welche die Astronomie bei der Entwicklung

eines Weltbilds spielt, was für enge Verbindungen zwischen dem Universum und dem täglichen menschlichen Leben bestehen.

Didaktische Grundlagen des Buches

Egal, wen Sie in das Thema Astronomie einführen, die Präsentation des Materials muss klaren didaktischen Grundlagen entsprechen. In der anschließenden Liste sind die wichtigsten Grundlagen, denen wir in diesem Buch folgen, kurz zusammengefasst.

- **Konzentration auf das große Ganze:** Astronomie besteht aus einer Fülle interessanter Fakten und Details, aber sie sind unbedeutend, solange sie sich nicht in das große Ganze des Universums einfügen. Wir achten daher ständig darauf, diesen Gesamtüberblick (im Wesentlichen die oben genannten Leitgedanken) nicht aus den Augen zu verlieren.
- **Immer zuerst den Zusammenhang herstellen:** Wir alle lernen Neues leichter, wenn wir verstehen, warum wir es lernen. Im Grunde genommen handelt es sich einfach darum, dass man ein Ziel leichter erreicht, wenn man weiß, in welche Richtung man muss. Wir beginnen daher dieses Buch mit einem breiten Überblick über unser heutiges Bild des Kosmos (*Kapitel 1*), sodass Sie wissen, womit Sie es im restlichen Buch zu tun haben werden. Wir behalten diese Methode des „Herstellens von Zusammenhängen“ im ganzen Buch bei und vermitteln Ihnen immer zuerst, was Sie nun lernen werden und warum, bevor wir uns mit Details befassen.
- **Dem Material Bedeutung verleihen:** Natürlich sind wir Menschen immer mehr an Dingen interessiert, die für unser Leben wichtig scheinen. Glücklicherweise steckt die Astronomie voller Themen, die uns alle persönlich betreffen. So hilft uns die Untersuchung des Sonnensystems dabei, unseren Planeten, die Erde, besser zu verstehen und schätzen zu lernen. Die Untersuchung von Sternen und Galaxien hilft dabei zu verstehen, warum wir entstanden sind. Indem wir unsere direkten Verbindungen mit dem Kosmos hervorheben, machen wir das Material persönlich bedeutsamer.
- **Konzeptionelles Verständnis anstelle einer reinen Faktensammlung:** Wenn wir nicht aufpassen, erscheint die Astronomie als überwältigende Sammlung von Fakten, die schnell vergessen sind. Wir heben daher einige wenige wichtige Konzepte her-

vor, die wir immer wieder heranziehen. Beispielsweise tauchen die Gesetze zur Energieerhaltung und zur Drehimpulserhaltung (die in Abschnitt 4.3 eingeführt werden) im ganzen Buch immer wieder auf. Auch die große Vielfalt geologischer Erscheinungen auf den terrestrischen Planeten kann anhand von wenigen geologischen Schlüsselprozessen verstanden werden.

- *Vom Bekannten und Konkreten zum Unbekannten und Abstrakten:* Bekanntermaßen lernen Kinder am besten, wenn sie mit konkreten Ideen beginnen und erst später zum Abstrakten vorstoßen. Dasselbe gilt für viele Erwachsene. Wir versuchen daher immer, „Brücken zum Bekannten“ zu bauen – d. h., mit konkreten oder bekannten Themen zu beginnen und aus ihnen allmählich die abstrakten Grundlagen herauszuarbeiten.
- *Eine einfache Sprache:* Untersuchungen haben gezeigt, dass die Anzahl neuer Begriffe in den einführenden Astronomiebüchern häufig größer ist als die Anzahl der Vokabeln in vielen Fremdsprachkursen für Anfänger. Im Grunde genommen bedeutet dies, dass diese Bücher Astronomie in einer für die Leserinnen und Leser fremden Sprache lehren! Natürlich verstehen Sie die wesentlichen astronomischen Konzepte leichter, wenn sie in einfachem Deutsch erklärt werden, ohne auf unnötigen Jargon zurückzugreifen. Wir haben uns intensiv darum bemüht, auf Jargon weitestgehend zu verzichten oder zumindest den üblichen Jargon durch Begriffe zu ersetzen, die hinsichtlich des behandelten Themas einfacher zu verstehen sind.
- *Irrtümer der Leserinnen und Leser erkennen und ansprechen:* Viele, die mit diesem Thema beginnen, haben nicht nur Wissenslücken, die wir hier zu schließen hoffen, sondern sie haben darüber hinaus auch falsche Vorstellungen über astronomische Themen. Um diese geradezurücken, müssen wir ihnen dabei helfen, die Paradoxien in ihren früheren falschen Auffassungen zu erkennen. Wir gehen dieses Problem auf vielfache Weise an, vornehmlich jedoch mithilfe vieler Kästen mit dem Titel „Häufige Irrtümer“. Dort fassen wir verbreitete Fehleinschätzungen zusammen und erklären, warum sie nicht richtig sein können.

Die thematische Struktur (die Teile) des Buches

Das Buch ist in sieben umfangreiche Themengebiete gegliedert (die sieben Teile des Inhaltsverzeichnisses), an die wir jeweils auf bestimmte Weise herangehen, um die vorher diskutierten fünf Leitgedanken nicht aus den Augen zu verlieren. Jeder Teil endet mit einer zweiseitigen Zusammenfassung zum Kosmischen Kontext, welche die unterschiedlichen Themen, die in den einzelnen Kapiteln behandelt wurden, nochmal in einen Gesamtzusammenhang stellen

Didaktische Merkmale des Buches

Außer dem Haupttext umfasst das Buch eine Reihe didaktischer Hilfsmittel, die den Leserinnen und Lesern das Lernen erleichtern sollen:

- **Lernziele:** Als Schlüsselfragen im Inhaltsverzeichnis **orange** hervorgehoben führen motivierende Lernziele in jedes Kapitel ein. Jeder Abschnitt jedes Kapitels ist so formuliert, dass diese besonderen Ziele im Titel angesprochen werden.
- **Kommentierte Abbildungen:** Knapp formulierte Texte in den Abbildungen (in blauer Farbe), welche Grafiken verständlicher machen.
- **Zweiseitige Abbildungen zum Kosmischen Kontext:** Diese zweiseitigen Bilder bieten eine optische Zusammenfassung elementarer Prozesse und Konzepte.
- **Wellenlänge/Observatoriums-Icon:** In astronomischen Aufnahmen (oder Grafiken, die damit verwechselt werden können) zeigen einfache Icons, in welchem Wellenlängenbereich beobachtet wurde, ob es sich um ein Foto oder eine Computersimulation handelt und ob das Bild an einem erdgebundenen oder einem Weltraumobservatorium erzeugt wurde. Siehe auch *Anhang K*.
- **Materialien von MyLab|Astronomie:** Im MyLab stehen weitere interessante Inhalte bereit, wie Fragen zu den Kapiteln, Verständnisfragen mit Feedback, interaktive Tutorien und Videos (in Englisch mit deutschen UT).
- **Zum Nachdenken:** Diese Lernhilfen, die im ganzen Buch in Form kurzer, in den Haupttext eingestreuter Fragen auftauchen, ermöglichen den Leserinnen und Lesern, über wichtige neue Konzepte nachzudenken. Sie bieten zudem gute Ansatzpunkte für Diskussionen.

- **Sehen Sie selbst:** Auch dieses Element taucht im Haupttext des ganzen Buchs auf. Es bietet den die Möglichkeit, eigene einfache Beobachtungen oder Experimente durchzuführen, um die wesentlichen Konzepte besser zu verstehen.
- **Häufige Irrtümer:** Diese Kästen stellen weit verbreitete, aber falsche Ansichten zu dem Inhalt des Kapitels klar.
- **Spezialthemen:** Diese Kästen enthalten über das Thema des Kapitels hinausführende Inhalte, die zwar zum Hauptthema gehören, aber für die weitere Diskussion nicht unbedingt notwendig sind.
- **Mathematische Einblicke:** Diese Kästen enthalten den Großteil der Mathematik, die wir in diesem Buch verwenden. Je nach Interesse an der Mathematik können diese Kästen studiert oder übersprungen werden. Die mathematischen Einblicke benutzen eine Problemlösungsstrategie mit drei Schritten – Analysieren, Lösen und Erklären –, die eine konsistente und nachvollziehbare Struktur vorgibt, mit der die Leserinnen und Leser eigene quantitative Aufgaben lösen können.
- **Überblick:** Mit diesem Element endet der Haupttext jedes Kapitels. Es ermöglicht, den Lernstoff des Kapitels im Zusammenhang mit dem allgemeinen Lernziel zu sehen, nämlich eine erweiterte Perspektive auf uns und unseren Planeten zu erlangen.
- **Zusammenfassung der Kapitel:** Die Zusammenfassung am Ende eines Kapitels bietet eine kompakte Übersicht über die Lernziele, die den Leserinnen und Lesern helfen soll, die wesentlichen Konzepte eines Kapitels zu vertiefen. Miniaturbilder erinnern an wichtige Abbildungen und Fotos im gerade behandelten Kapitel.
- **Verweise:** Wird ein Konzept an anderer Stelle des Buchs eingehender behandelt, fügen wir einen kursiven Verweis auf diesen Abschnitt in Klammern ein (z. B. *(Abschnitt 5.2)*). Querverweise auf Abbildungen sind optisch hervorgehoben (z. B. ► *Abbildung 20.1*).
- **Glossar:** Ein ausführliches Glossar ermöglicht den Leserinnen und Lesern das schnelle Nachschlagen wichtiger Begriffe.
- **Anhänge:** Die Anhänge enthalten eine Reihe wichtiger Nachweise und Tabellen. Darin finden sich unter anderem wichtige Konstanten (*Anhang A*), zentrale Formeln (*Anhang B*), wichtige mathematische Kenntnisse (*Anhang C*), zahlreiche Datentabellen und Sternkarten (*Anhänge D – J*) sowie die Erklärung der Piktogramme (*Anhang K*).

MyLab | Astronomie – ein neues Paradigma in der astronomischen Lehre

Dieses Buch enthält einen **48-monatigen Zugang zu MyLab|Astronomie**. Diesen finden Sie am Anfang dieses Buchs. Die beste Methode, um es kennenzulernen, besteht natürlich darin, Zeit auf dieser Webseite zu verbringen. Wir laden Sie ein, www.pearson-studium.de/mylab/astro9e zu besuchen und sich selbst einen Eindruck zu verschaffen. Falls noch kein Konto vorhanden, einfach neu registrieren und dann das Buch auswählen, Code einlösen, fertig. Falls Sie Probleme mit der Registrierung oder grundsätzlich Probleme mit dem **MyLab|Astronomie** haben, dann zögern Sie nicht, unseren ausgezeichneten 24/7 Support zu kontaktieren: <https://support.pearson.com/getsupport/s/contactsupport> und dann MyLab Deutsche Version auswählen. Das Team wird Ihnen umgehend weiterhelfen.

Wichtiger Hinweis: Falls Sie die digitale Version dieses Buches erworben haben, ist der Zugangscode vorne im Buch leider nicht abgebildet. Bitte wenden Sie sich dazu mit der PDF-Rechnung des Kaufes ebenfalls an den Support, der Ihnen umgehend einen Zugang zum **MyLab|Astronomie** zukommen lassen wird.

In einer Welt, in der jeder behauptet, dass seine Webseite besser ist als alle anderen, wollen wir einige Gründe nennen, weshalb sich **MyLab|Astronomie** wirklich von der Masse abhebt:

- **MyLab|Astronomie** unterstützt die besondere Struktur und den pädagogischen Ansatz dieses Buchs. Es greift die gleiche Struktur auf wie die Webseite und benutzt dieselbe Terminologie. Diese Konsistenz trägt dazu bei, dass die Leserinnen und Leser auf die Themen konzentriert bleiben und keine Gefahr besteht, dass sie von unterschiedlichen Darstellungen verwirrt werden.
- Praktisch der gesamte Inhalt von **MyLab|Astronomie** wurde entweder vom Autorenteam des Buches *Astronomie* entwickelt oder entstand in der Zusammenarbeit unseres Teams mit herausragenden Dozenten wie Jim Dove, Tim Slater, Ed Prather, Daniel Loran und Jonathan Williams. Die direkte Mitarbeit der Autoren stellt sicher, dass Sie auf der Website dieselbe hohe Qualität erwarten können, die Sie es von unserem Lehrbuch gewohnt sind.
- Sie finden dort Updates, Korrekturen, Hinweise und Tipps zu Apps und viele weitere Informationen. Der Verlag wünscht Ihnen viel Freude dabei.

Die Autoren



Jeffrey Bennett besitzt einen Bachelorabschluss in Biophysik (Universität San Diego) und einen Masterabschluss sowie einen Dokortitel in Astrophysik (Universität von Colorado). Sein berufliches Interesse gilt der wissenschaftlichen und mathematischen Bildung – er hat Lehr-

erfahrung auf allen schulischen Ebenen, von der Vorschule bis zur Universität. Meilensteine seiner Laufbahn sind unter anderem: seine 2-jährige Tätigkeit als leitender Gastwissenschaftler im NASA-Hauptquartier, wo er Programme zum Aufbau besserer Schnittstellen zwischen Forschung und Bildung entwickelte; die Idee zum Voyage-Scale-Modell des Sonnensystems in der National Mall (Washington, DC) und die Mitarbeit an dessen Entwicklung; die Entwicklung der kostenlosen App Totality, mit der man sich über totale Sonnenfinsternisse informieren kann. Seine Arbeit wurde 2013 mit dem Preis für Wissenschaftskommunikation des American Institute of Physics ausgezeichnet. Er ist der Hauptautor vieler Lehrbücher in den Bereichen Astronomie, Astrobiologie, Mathematik und Statistik sowie mehrerer, von der Kritik gelobter populärwissenschaftlicher Bücher. Sie finden seine persönliche Website unter www.jeffreybennett.com.



Megan Donahue ist Professorin an der Fakultät für Physik und Astronomie der Michigan State University (MSU), Fellow der American Physical Society und der American Association for the Advancement of Science sowie Präsidentin der American Astronomical Society

(2018–2020). Ihre Forschung konzentriert sich auf die Nutzung von Röntgen-, UV-, Infrarot- und sichtbarem Licht zur Untersuchung von Galaxien und Galaxienhaufen: deren Inhalte – Dunkle Materie, heißes Gas, Galaxien, aktive galaktische Kerne – und was diese über den Inhalt des Universums sowie die Entstehung und Entwicklung von Galaxien verraten. Sie erhielt ihren Bachelorabschluss in Physik vom MIT, an dem

sie ihre Forschungslaufbahn im Bereich Röntgenastronomie begann. Sie promovierte in Astrophysik an der Universität von Colorado mit einer Arbeit über Theorie und optische Beobachtungen von intergalaktischem Gas sowie Gas zwischen den Galaxienhaufen. Mit dieser Arbeit gewann sie 1993 den Robert Trumpler Award der Astronomical Society for the Pacific für eine herausragende astrophysikalische Dissertation in Nordamerika. Nach der Promotion setzte sie ihre Forschung als Carnegie Fellow an den Carnegie-Observatorien in Pasadena, Kalifornien, und später als Fellow des Space Telescope Science Institute (STScI) am Hubble-Weltraumteleskop fort. Prof. Donahue hat bis 2003 als Astronomin am STScI gearbeitet und wechselte danach an die Fakultät der MSU. Sie ist außerdem als Beraterin für nationale und internationale astronomische Einrichtungen sowie der NASA tätig, wozu die Planung zukünftiger NASA-Missionen gehört. Prof. Donahue ist mit Mark Voit verheiratet, mit dem sie bei vielen Projekten zusammenarbeitet, darunter dieses Lehrbuch sowie über 70 von Fachkollegen begutachtete astrophysikalische Arbeiten.



Nicholas Schneider ist Professor der Fakultät für Astrophysik und Planetenwissenschaften an der Universität von Colorado und Wissenschaftler im Laboratory for Atmospheric & Space Physics. Er erhielt 1979 seinen Bachelorabschluss in Physik und Astronomie vom Dart-

mouth College und 1988 seinen Dokortitel in Planetenwissenschaften von der Universität von Arizona. Zu seinen Forschungsinteressen gehören planetare Atmosphären und planetare Astronomie. Seine Forschungsschwerpunkte sind der seltsame Fall des Jupitermondes Io sowie das Rätsel der verlorenen Marsatmosphäre. In seiner Funktion als Teamleiter für den Imaging UV Spectrograph der Raumsonde MAVEN, die den Mars umkreist, trägt er zur Lösung dieses Rätsels bei. Er liebt seine Lehrtätigkeit und setzt sich aktiv für die Verbesserung der Lehre in der Astronomie, auch im schulischen Bereich ein. Im Laufe seiner Karriere hat er mehrere Auszeichnungen erhalten: den Presidential Young Investigator Award der National Science Foundation, den Teaching Excellence Award der Boulder Faculty Assembly und die Exceptional Scientific Achievement Medal der NASA.



Mark Voit ist Professor an der Fakultät für Physik und Astronomie und Prodekan für grundständige Studiengänge an der Michigan State University. Er erhielt seinen Bachelorabschluss in Astrophysik von der Universität Princeton und promovierte 1990 in Ast-

rophysik an der Universität von Colorado. Er setzte seine Studien am California Institute of Technology fort, wo er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für theoretische Astrophysik tätig war, bevor er als Hubble Research Fellow an die Johns Hopkins University wechselte. Vor seiner Tätigkeit an der MSU arbeitete Prof. Voit im Office of Public Outreach des Hubble-Weltraumteleskops, für das er Ausstellungskonzepte für das Weltraumteleskop entwickelte und an der Gestaltung der preisgekrönten Hubble-Website der NASA mitwirkte. Seine Forschungsinteressen reichen von interstellaren Prozessen in unserer eigenen Galaxie bis hin zur Haufenbildung von Galaxien im frühen Universum. Er ist Fellow der American Association for the Advancement of Science und mit der Koautorin Megan Donahue verheiratet.

Gastvorwort zu Astronomie

Die Bedeutung der Kosmischen Perspektive von Neil deGrasse Tyson



Der Astrophysiker Neil de-Grasse Tyson ist Frederick P. Rose Director des Hayden-Planetariums am American Museum of Natural History in New York. Er hat zahllose Bücher und Artikel verfasst, ist Moderator der PBS-Fernsehserie NOVA scienceNOW und wurde vom

Time Magazine als einer der „Time 100“ eingestuft – die Liste der 100 einflussreichsten Menschen der Welt. Er ist Autor dieses Artikels über die Bedeutung der Kosmischen Perspektive, eine Kurzfassung seines 100. Essays für das Magazin Natural History.

Unter allen Wissenschaften, die von der Menschheit gepflegt werden, gilt, und sie ist es auch ohne jeden Zweifel, die Astronomie als die erhabenste, die interessanteste und die nützlichste. Denn aufgrund der Erkenntnisse dieser Wissenschaft entdecken wir nicht nur den größten Teil der Erde, sondern alle Fakultäten werden vom Glanz der von ihr ausgehenden Gedanken durchdrungen, sie erhebt unsere Geister über unsere niedrigen Vorurteile.

– James Ferguson, „Astronomy explained upon Sir Isaac Newton's Principles and Made Easy To Those Who Have Not Studied Mathematics“ (Astronomie, erklärt anhand der Prinzipien von Sir Isaac Newton und einfach zu verstehen für diejenigen, die nicht Mathematik studiert haben), 1757

Lange bevor jemand wusste, dass das Universum einen Anfang hatte, bevor wir wussten, dass die nächstgelegenen Galaxien zweieinhalb Millionen Lichtjahre von der Erde entfernt sind, bevor wir wussten, wie Sterne funktionieren oder ob Atome existieren, war James Fergusons enthusiastische Einleitung über seine Lieblingswissenschaft bereits richtig.

Aber wer denkt auf diese Weise? Wer lebt diese kosmische Sichtweise des Lebens? Nicht der eingewanderte Farmarbeiter. Nicht der Arbeiter in seiner Tretmühle. Bestimmt nicht die Obdachlosen, die den Müll nach Nahrung durchwühlen. Sie brauchen dafür den Luxus freier Zeit, die nicht dem bloßen Überleben gewidmet ist. Sie müssen in einer Nation leben, deren

Regierung die Suche nach dem Platz des Menschen im Universum unterstützt. Sie benötigen eine Gesellschaftsform, in der intellektuelles Streben sie an die Grenzen des Wissens führt und in der die Nachricht ihrer Entdeckungen auf einfache Weise verbreitet werden kann.

Wenn ich eine Pause mache und über unser expandierendes Universum nachdenke, mit seinen Galaxien, die sich voneinander entfernen, eingebettet in das sich ständig ausdehnende vierdimensionale Gewebe von Raum und Zeit, dann vergesse ich manchmal die ungezählten Menschen, die auf der Suche nach Obdach oder Nahrung die Welt durchstreifen und dass Kinder überproportional häufig zu ihnen gehören.

Wenn ich über den Daten grüble, welche die mysteriöse Existenz der Dunklen Materie und der Dunklen Energie im Universum enthüllen, vergesse ich manchmal, dass jeden Tag – in jeder einzelnen 24-stündigen Umdrehung der Erde – Menschen im Namen irgendeiner Ideologie töten und getötet werden.

Wenn ich die Umlaufbahnen der Asteroiden, Kometen und Planeten verfolge, jeder ein Pirouetten drehender Tänzer in einem kosmischen Ballett, dessen Choreografie von den Kräften der Gravitation geschrieben wird, vergesse ich manchmal, dass allzu viele Menschen das empfindliche Wechselspiel zwischen Erdatmosphäre, Ozeanen und Land einfach ignorieren, wodurch unsere Kinder und Enkel die Konsequenzen erleben und mit ihrer Gesundheit werden bezahlen müssen.

Und manchmal vergesse ich, dass einflussreiche Menschen selten alles tun, was sie können, um denen zu helfen, die sich nicht selbst helfen können.

Ich vergesse diese Dinge manchmal, weil – egal wie groß die Welt in unseren Herzen, unseren Gedanken und unseren riesigen Atlanten ist – das Universum noch viel größer ist. Für manche ist das ein deprimierender Gedanke, für mich ist es ein befreiender.

Betrachten wir einen Erwachsenen, der sich mit den Ängsten eines Kindes befasst: ein kaputtes Spielzeug, ein aufgeschürftes Knie, eine Rauferei auf dem Schulhof. Erwachsene wissen, dass Kinder keine Ahnung von echten Problemen haben, weil ihr kindlicher

Blickwinkel durch Unerfahrenheit eingeschränkt wird.

Trauen wir uns als Erwachsene zuzugeben, dass wir ebenfalls eine kollektive unreife Sichtweise besitzen? Gestehen wir uns ein, dass unsere Gedanken und Ver-

haltensweisen der Überzeugung entspringen, dass sich die Welt um uns herum dreht? Blicken Sie hinter die

Kulissen rassistischer, ethnischer, religiöser, nationaler und kultureller Konflikte der Gesellschaft und Sie finden das menschliche Ego, das die Fäden zieht.

Stellen wir uns nun eine Welt vor, in der jeder, insbesondere Menschen mit Macht und Einfluss, einen größeren Blick auf unseren Platz im Kosmos haben. Aus diesem Blickwinkel heraus schrumpfen unsere Probleme zusammen – oder verschwinden völlig – und wir könnten unsere irdischen Differenzen feiern und die Verhaltensweisen unserer Vorväter vermeiden, die sich wegen dieser Unterschiede abgeschlachtet hatten.

Im Februar 2000 lief im frisch renovierten Hayden-Planetarium eine Weltraumshow mit dem Namen „Reise in den Kosmos“, welche die Besucher auf eine virtuelle Reise von New York an die Grenzen des Kosmos führte. Auf dieser Reise erlebten die Zuschauer, wie erst die Erde, dann das Sonnensystem und die 100 Milliarden Sterne der Milchstraße zu beinahe unsichtbaren Punkten auf der Kuppel des Planetariums zusammenschrumpften.

Bald darauf erhielt ich den Brief eines Psychologieprofessors der Ivy League, der darum bat, Besuchern einen Fragebogen zukommen zu lassen, mit dem ermittelt werden sollte, wie tief ihre Depression nach Besuch der Show war. Unsere Veranstaltung, so erklärte er, hätte in ihm das intensivste Gefühl von Bedeutungslosigkeit hervorgerufen, das er jemals gespürt hätte.

Wie kann das sein? Jedesmal, wenn ich die Show sehe, fühle ich mich lebendig, angeregt und allem verbunden. Ich fühle mich auch riesig, denn ich weiß, dass es erst die Vorgänge in diesen drei Pfund menschlichen Gehirns sind, die es uns ermöglichen, unseren Platz im Universum zu erkennen.

Ich erlaube mir die Ansicht, dass nicht ich, sondern dieser Professor die Natur falsch versteht. Zum einen war sein Ego zu groß, aufgebläht vom Wahn der Bedeutung und gefüttert von kulturellen Vorstellungen, denen zufolge Menschen wichtiger sind als alles andere im Universum.

Bei aller Fairness gegenüber dem Kollegen, starke Strömungen in der Gesellschaft machen die meisten von uns beeinflussbar. Genau wie mich ... bis zu jenem Tag, an dem ich im Biologieunterricht erfuhr, dass in einem Zentimeter meines Darms mehr Bakterien leben

und arbeiten, als es jemals Menschen auf der Welt gab. Solche Kenntnisse lassen Sie zweimal darüber nachdenken wer – oder was – wirklich das Sagen hat.

Von diesem Tag an waren Menschen für mich nicht mehr die Herren von Raum und Zeit, sondern Glieder einer riesigen kosmischen Kette von Lebewesen mit einer direkten genetischen Verbindung durch alle Spezies, sowohl lebende als auch ausgestorbene, die bis zu den ersten einzelligen Organismen auf der Erde reicht und sich vier Milliarden Jahre weit in die Vergangenheit erstreckt.

Brauchen Sie noch mehr Ego-Abtörner? Einfache Vergleiche von Menge, Größe und Maßstäben sollten genügen.

Nehmen Sie als Beispiel Wasser. Es ist einfach, überall aufzufinden und lebensnotwendig. In einer großen Tasse Wasser sind mehr Wassermoleküle als die Anzahl voller Wassertassen, die aus allen Ozeanen geschöpft werden könnten. Jeder Tasseninhalt, der durch eine Person hindurchläuft und sich schließlich mit den weltweiten Wasservorräten wiedervereinigt, enthält so viel Moleküle, dass jede andere Tasse mit Wasser der Welt 1500 davon bekommen könnte. Anders herum betrachtet: ein Teil des Wasser, das Sie gerade getrunken haben, wurde schon von den Nieren von Sokrates, Dschinghis Khan und Johanna von Orléans gefiltert.

Wie stehts mit Luft? Ebenfalls ein lebensnotwendiger Stoff. Mit einem einzelnen Atemzug nehmen Sie mehr Moleküle auf, als es Atemzugsinhalte in der Erdatmosphäre gibt. Das bedeutet, dass ein Teil der Luft, die Sie gerade eingeatmet haben, bereits durch die Lungen von Napoleon, Beethoven, Lincoln und Billy the Kid geströmt ist.

Es wird Zeit, in den Kosmos zu blicken. Es gibt mehr Sterne im Universum als Sandkörner an allen Stränden der Erde, mehr Sterne als die Zahl der seit Entstehung der Erde verstrichenen Sekunden, mehr Sterne als alle Worte und Töne, die jemals von irgendeinem Menschen ausgestoßen wurden.

Wollen Sie einen umfassenden Überblick über die Vergangenheit? Je mehr sich unsere kosmische Perspektive entfaltet, umso mehr erkennen Sie. Licht braucht seine Zeit, bis es aus den Tiefen des Weltraums die Observatorien der Erde erreicht und daher erkennen Sie Objekte und Ereignisse nicht so, wie sie jetzt aussehen, sondern so, wie sie vor langer Zeit aussahen. Das Universum ist also eine riesige Zeitmaschine: Je

tiefer wir in den Weltraum sehen, desto weiter sehen wir in die Vergangenheit zurück – fast bis zum Anbeginn der Zeit selbst. Innerhalb dieses Beobachtungshorizonts entfaltet sich ständig und gut sichtbar die Entwicklung des Kosmos.

Wollen Sie wissen, woraus wir geschaffen sind? Die kosmische Perspektive bietet schon wieder eine größere Antwort, als Sie vielleicht erwarten. Die chemischen Elemente des Universums werden in den Feuern massereicher Sterne geschmiedet, die ihr Leben in gewaltigen Explosionen beschließen. Dabei impfen sie ihre Heimatgalaxien mit dem chemischen Arsenal des Lebens, wie wir es kennen. Wir sind nicht einfach im Universum. Das Universum ist in uns. Ja, wir sind wahrlich Sternenstaub. Wahrlich Sternenstaub.

Durch die Jahrhunderte haben kosmische Entdeckungen immer wieder unser Selbstbild verändert. Von der Erde dachten wir einst, sie sei aus astronomischer Sicht einzigartig, bis die Astronomen herausgefunden hatten, dass die Erde nur ein Planet ist, der um die Sonne kreist. Dann war die Sonne für uns einzigartig, bis wir herausgefunden hatten, dass die zahllosen Sterne am Nachthimmel ebenfalls Sonnen sind. Dann dachten wir, dass unsere Galaxis, die Milchstraße, das ganze bekannte Universum umfasst, bis wir erkannten, dass die zahllosen unscharfen Dinger am Himmel andere Galaxien sind, welche die Landschaft des bekannten Universums sprenkeln.

Die kosmische Perspektive entwickelt sich aus fundamentalem Wissen. Er ist aber mehr als nur das, was Sie wissen. Er umfasst auch die Weisheit und die Einsicht, dieses Wissen anzuwenden, um unseren Platz im Universum zu bestimmen. Und seine Attribute sind eindeutig:

- Die kosmische Perspektive entspringt den Grenzen der Wissenschaft, aber er ist nicht allein Eigentum des Wissenschaftlers. Er gehört jedem.
- Die kosmische Perspektive ist bescheiden.
- Die kosmische Perspektive ist spirituell – sogar erlösend –, aber nicht religiös.
- Die kosmische Perspektive ermöglicht uns, im gleichen Gedanken das Große und das Kleine zu erfassen.
- Die kosmische Perspektive öffnet unseren Geist für außergewöhnliche Ideen, aber nicht so weit, dass unsere Gehirne auslaufen und wir für alles empfänglich werden, was uns vorgekauft wird.

- Die kosmische Perspektive öffnet uns die Augen über das Universum, das keine herzensgute Wiege ist, um das Leben zu beschützen, sondern ein kalter, einsamer und gefährlicher Ort.
- Die kosmische Perspektive zeigt die Erde als Staubkorn, aber als wertvolles Staubkorn und als die einzige Heimat, die wir besitzen.
- Die kosmische Perspektive erkennt die Schönheit in den Bildern der Planeten, Monde, Sterne und Nebel, aber er genießt auch die physikalischen Gesetze, die sie formen.
- Die kosmische Perspektive ermöglicht uns den Blick hinter unsere Lebensverhältnisse, wodurch wir über unsere Urbedürfnisse nach Nahrung, Obdach und Sex hinausgehen können.
- Die kosmische Perspektive erinnert uns daran, dass im Weltraum, in dem es keine Luft gibt, keine Flagge weht – ein Hinweis darauf, dass Flaggenschwenken und die Erkundung des Weltraums wohl eher nicht zusammenpassen.
- Die kosmische Perspektive offenbart nicht nur unsere genetische Verwandtschaft mit dem gesamten Leben auf der Erde, er würdigt auch unsere chemische Verwandtschaft mit jeder noch zu entdeckenden Lebensform im Universum sowie unsere atomare Verwandtschaft mit dem Universum als Ganzem.

Mindestens einmal in der Woche, wenn nicht sogar einmal am Tag, sollte jeder von uns darüber nachdenken, welche kosmischen Wahrheiten noch unerkannt vor uns liegen. Diese warten vielleicht nur auf die Ankunft eines klügeren Denkers, auf ein geniales Experiment oder eine neuartige Weltraummission, um aufgedeckt zu werden. Wir sollten auch darüber nachdenken, wie diese Entdeckungen eines Tages das Leben auf der Erde verändern könnten.

Ohne diese Neugier unterscheiden wir uns nicht von einem hinterwäldlerischen Bauern, der kein Bedürfnis hat, über den Horizont hinauszusehen, weil sein Grund und Boden all seine Begierden stillt. Hätten alle unsere Vorfahren so gedacht, wäre dieser Bauer immer noch ein Höhlenmensch, der seine Mahlzeit mit Pfeil und Bogen jagt.

Während der kurzen Zeit, die wir auf der Welt sind, schulden wir uns und unseren Nachkommen die Möglichkeit der Forschung – nicht zuletzt, weil es auch Spaß macht. Aber es gibt auch einen viel edleren Grund. Sobald unsere Kenntnisse über das Universum

stagnieren, riskieren wir, zum kindlichen Blickwinkel zurückzukehren, in dem sich die Erde im wahrsten Sinn des Wortes um uns dreht. In dieser düsteren Welt wären bewaffnete, rohstoffhungrige Menschen und Nationen dazu verurteilt, entsprechend ihrer niedrigen Vorurteile zu handeln und das wäre der letzte Atemzug menschlicher Erkenntnis – bis zum Aufstieg einer neuen vorausschauenden Kultur, die wieder in der Lage wäre, die kosmischen Perspektive einzunehmen.

Copyright Neil deGrasse Tyson 2007. Entnommen dem Essay „Cosmic Perspectives“, zuerst erschienen im *Natural History Magazine*, April 2007

Astronomie – Die kosmische Perspektive

Begleitwort zur deutschen Ausgabe



Kennen Sie auch dieses merkwürdige Gefühl beim Blick in den von Sternen übersäten Nachthimmel? Was ist das da oben? Welche Geheimnisse mögen sich hinter oder in dieser gewaltigen Schwärze des Universums verbergen? Oft wirft

uns der Blick in den Spiegel des Kosmos aber schlagartig wieder auf uns selbst zurück, denn aus der riesigen Finsternis schallt einem unhörbar die Frage in den Kopf: Wer bin ich in diesem Kosmos? Welche Rolle spielt der Mensch in den Abgründen von Raum und Zeit? Ist er nur ein kleiner Teil des Teils, der anfangs alles war (im Zweifel hilft Goethes Faust ja immer!), oder stellt seine Vernunft, seine Neugier, sein Wissensdrang etwas bemerkenswert Neues dar?

Der das Universum beobachtende Mensch fragt nach dem Universum, wie es jetzt ist, wie es zu dem geworden ist und wie es in Zukunft werden wird, also nach seiner Geschichte. Die dazugehörige Naturwissenschaft besteht aus Astronomie, Physik und Mathematik, zudem auch immer mehr aus Chemie, Biologie und Geologie, selbst die Physik des Klimas und der Meere findet immer häufiger Anwendung bei der Untersuchung der Objekte am Himmel.

Heute geht es nämlich nicht mehr nur um die Entstehung und Entwicklung von Sternen, Galaxien oder Galaxienhaufen. Seit über zehn Jahren werden auch Planeten um andere Sterne entdeckt und damit gehört die Frage nach den Bedingungen für außerirdisches Leben in anderen Sternsystemen zu den ganz großen Forschungsthemen. Es geht ums Ganze, um die gesamte kosmische Evolution – vom Urknall bis zum Menschen.

Die Lust, sich dem ganzen Universum zu stellen und zu versuchen, es zu ergründen, macht uns Menschen als staunende Wesen aus. Wir wollen wissen und dazu wird dieses Buch eine ganz besonders gute und große Hilfe sein.

Das Buch, das Sie vor sich liegen haben, ist eine Einmaligkeit, es präsentiert eine im deutschen Sprachraum bis heute noch nie in dieser Breite vorgenommene Synthese von Astronomie, Physik, Mathematik und

Geschichte. Über den Begriff der kosmischen Evolution wird ein einheitlicher Begriff von Wissenschaft vermittelt, denn es geht letztlich um die Geschichte der ganzen Natur. Zugleich berichtet es vom eindrucks vollsten Unternehmen der Menschheit: dem Versuch, mittels der menschlichen Vernunft das gesamte Universum zu erkunden und zu verstehen. Dabei wird der Leser auf eine Reise in den Kosmos geschickt und zugleich unternimmt er eine Expedition in die Geschichte der Wissenschaften. Das tiefere Verständnis für die Zusammenhänge und Prozesse im Universum war nämlich immer verbunden mit besseren Beobachtungsinstrumenten einerseits und andererseits immer genaueren Erkenntnissen über die Zusammensetzung der Welt, die in irdischen Laboratorien durch Experimente entdeckt wurden.

Im Zentrum dieses großartigen Werkes stehen zwei Eckpfeiler: erstens die These, dass die auf der Erde entdeckten Naturgesetzmäßigkeiten überall im Universum volle Gültigkeit besitzen. Damit wird jeder Entdeckung von physikalischen Zusammenhängen zugleich eine kosmische Bedeutung gegeben. Die Atome bestehen zwar im ganzen Universum aus den gleichen Teilchen, aber unter den besonderen Bedingungen des Universums können auch Objekte entstehen, die wir von der Erde nicht kennen: Galaxien und Sterne. Aber wir können ihre Entstehung und Entwicklung trotzdem verstehen und erklären, indem wir uns einer Sprache bedienen, die sich als hervorragendes Instrument erwiesen hat – die Mathematik.

Hier kommt dann die zweite These ins Spiel: Der Mensch ist ein Teil der Natur, er verfügt als Produkt der irdischen Evolution über einen Erkenntnisapparat, der es ihm möglich macht, die Welt um ihn herum zu verstehen. Und er entwickelte mit der Mathematik einen Erkenntnisweg, der ihn auch in die Bereiche der physikalischen Wirklichkeit eindringen lässt, die jenseits seiner direkten Anschauung liegen. Die Geschichte des Kosmos verbindet die Physik des aller kleinsten Teilchens mit der Physik des riesigen Universums.

Ich möchte Pearson Deutschland ausdrücklich für den Mut loben, ein solches Buch für den deutschen Sprachraum anzubieten. Es eignet sich in hervorragender Weise, die moderne Astronomie an Schulen und Universitäten als das zu präsentieren was sie ist: die faszinierendste Wissenschaft vom großen Ganzen, die den Ursprung von allem erforscht. Der Leser lernt die kosmische Perspektive kennen, die geprägt ist vom Staunen über den gestirnten Himmel über uns und dem

immerwährenden Versuch der Vernunft, den Platz und die Bedeutung des Menschen im Kosmos zu finden.

Viel Vergnügen dabei.
München

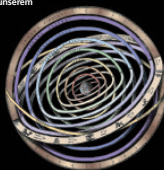
Harald Lesch

I

Unser Blickwinkel auf das Universum hat sich im Verlauf der menschlichen Geschichte dramatisch erweitert. Diese Zeitskala fasst einige der wesentlichen Entdeckungen zusammen, die zu unserem modernen Blickwinkel geführt haben.



Stonehenge



Geozentrisches Modell des Universums



Galileis Teleskop



Yerkes Observatorium



Edwin Hubble am Mount-Wilson-Teleskop



Hubble-Weltraumteleskop

< 2500 v. Chr.

400 v. Chr. – 170 n. Chr.

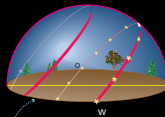
1543 – 1648 n. Chr.

1838 – 1920 n. Chr.

1924 – 1929 n. Chr.

1990 n. Chr. – heute

1 Die frühen Kulturen erkannten Muster in den Bewegungen von Sonne, Mond, Planeten und Sternen am Himmel. Sie erkannten zudem Verbindungen zwischen dem, was sie sahen, und dem Leben auf der Erde, etwa dem Ablauf der Jahreszeiten und den Gezeiten (Abschnitt 1.1).



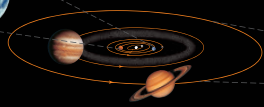
Die Rotation der Erde um ihre Achse führt zur täglichen Ost-West-Bewegung der Himmelskörper.

2 Die antiken Griechen versuchten, die beobachteten Bewegungen mit einem Modell zu erklären, in dessen Zentrum sich die Erde befand, umgeben von den Himmelskörpern. Das Modell konnte viele Phänomene erklären, musste jedoch für die scheinbare retrograde Bewegung der Planeten eine komplizierte Erweiterung einfügen – und selbst dann waren seine Vorhersagen nicht allzu genau (Abschnitt 2.2).



Die Neigung der Erdschse führt zu Jahreszeiten während des Erdumlaufs um die Sonne.

3 Kopernikus behauptete, dass die Erde ein Planet ist, der die Sonne umkreist. Dieses heliozentrische Modell erklärte die scheinbare retrograde Bewegung der Planeten auf einfache Weise, obwohl genaue Vorhersagen erst möglich waren, nachdem Kepler seine drei Gesetze der Planetenbewegung formuliert hatte. Galileis Teleskopbeobachtungen bestätigten die heliozentrische Modell und enthüllten, dass das Universum viel mehr Sterne besitzt, als man bis dahin geglaubt hatte (Abschnitt 2.3).



Planeten sind viel kleiner als die Sonne. Im Maßstab 1:10 Milliarden hat die Sonne die Größe einer Grapefruit; die Erde hat die Größe der Kugel eines Kugelschreibers und die Entfernung zwischen ihnen beträgt etwa 15 Meter.

4 Größere Teleskope und die Fotografie machten es möglich, die Parallaxe der Sterne zu messen. Diese Messungen bewiesen direkt, dass die Erde tatsächlich die Sonne umkreist und dass die nächsten Sterne Lichtjahre von uns entfernt sind. So haben wir gelernt, dass unsere Sonne ein ganz gewöhnlicher Stern unserer Milchstraße ist (Abschnitt 2.4, 15.1).

Die Entfernungen zwischen den Sternen sind riesig. Im Maßstab 1:10 Milliarden können Sie die Sonne in der Hand halten; die nächsten Sterne sind jedoch Tausende Kilometer weit weg.

5 Edwin Hubble bestimmte die Entfernungen anderer Galaxien und zeigte so, dass sie sich weit außerhalb der Milchstraße befinden. Er bewies damit, dass das Universum viel größer ist als unsere Milchstraße. Hubble entdeckte auch, dass sich die meisten Galaxien von uns entfernen; das bedeutet, dass das Universum expandiert und vermutlich mit einem Ereignis begann, das wir als Urknall bezeichnen (Abschnitt 1.3, 20.2).

Unser Sonnensystem ist etwa 28 000 Lichtjahre vom Zentrum der Milchstraße entfernt.

Die Milchstraße enthält über 100 Milliarden Sterne.

6 Verbesserte Messungen der galaktischen Entfernungen und der Expansionsgeschwindigkeit haben gezeigt, dass das Universum etwa 14 Milliarden Jahre alt ist. Diese Messungen enthüllten auch einige Überraschungen, die immer noch nicht erklärt sind, etwa die Existenz der mysteriösen „Dunklen Materie“ und der „Dunklen Energie“ (Abschnitt 1.3, 23.1).



Das beobachtbare Universum enthält über 100 Milliarden Galaxien.

TEIL I

Das Entwickeln eines Blickwinkels

»Diese ersten Kapitel haben zum Ziel, den Leserinnen und Lesern einen Überblick zu vermitteln, um die weiteren Inhalte dieses Buchs in einen größeren Zusammenhang stellen zu können. Kapitel 1 skizziert unser heutiges Verständnis vom Kosmos – dazu gehören auch die Maßstäbe von Raum und Zeit –, sodass wir einen Eindruck des gesamten Universums bekommen, bevor wir in die Details eintauchen. Kapitel 2 führt uns in die grundlegenden Himmelsphänomene ein, darunter unsere Jahreszeiten und die Mondphasen, und zeigt, wie solche alltäglichen Phänomene in das gesamte kosmische Geschehen eingebunden sind. In Kapitel 3 lernen wir die Eigenart des wissenschaftlichen Denkens kennen und bekommen einen historischen Abriss über die Entwicklung der Naturwissenschaften im Allgemeinen und der Astronomie im Besonderen. Wir erfahren, wie Wissenschaft funktioniert und wie sie sich von Nichtwissenschaft unterscheidet. Das zusätzliche Kapitel S1 geht ausführlich auf den Himmel ein und erklärt die Zeitmessung und Navigation anhand der Sterne.«

Kosmischer Kontext zu Teil I ► Seite 148

Diese Aufnahme vom Hubble-Weltraumteleskop zeigt Tausende von Galaxien in einer Himmelsregion, die so klein ist, dass man sie mit einem Sandkorn auf Armeslänge abdecken könnte.



Unser heutiges Bild vom Universum

1

1.1	Maßstäbe im Universum	8
	Wo ist unser Platz im Universum?	8
	Wie groß ist das Universum?	12
	Wie weit sind die Sterne entfernt?	14
	Wie groß ist die Milchstraße?	16
1.2	Die Geschichte des Universums	22
	Wie sind wir entstanden?	22
	Wie lässt sich unsere Lebensspanne mit dem Alter des Universums vergleichen?	24
1.3	Raumschiff Erde	24
	Wie bewegt sich die Erde durch den Raum?	24
	Wie bewegen sich Galaxien durch das Universum? ..	28
1.4	Menschheitsabenteuer Astronomie	31
	Wie hat die astronomische Forschung die menschliche Geschichte beeinflusst?	31
	Überblick	32
	Zusammenfassung	32



Unser heutiges Bild vom Universum

*Plötzlich fiel mir auf, dass diese kleine Erbse, hübsch und blau, die Erde war.
Ich hielt meinen Daumen hoch und schloss ein Auge,
sodass mein Daumen den Planeten Erde abdeckte.
Ich fühlte mich nicht wie ein Riese. Ich fühlte mich sehr, sehr klein.*

– Neil Armstrong während er vom Mond aus zur Erde zurückblickt, Juli 1969

Weit abseits der lichterfüllten Städte sehen Sie einen Himmel, der mit Sternen übersät ist. Wenn Sie sich zurücklehnen und eine Weile zusehen, dann erkennen Sie, dass die Sterne gleichmäßig über den Himmel wandern. Angesichts des scheinbar unendlichen Himmels fragen Sie sich vielleicht, wie die Erde und das Universum entstanden sind. Diese Frage haben sich die Menschen seit Tausenden von Generationen in der ganzen Welt gestellt.

Die moderne Wissenschaft bietet Antworten auf viele unserer grundlegenden Fragen über das Universum und unseren

Platz darin. Wir kennen mittlerweile die wichtigsten Bestandteile und die Größenordnungen des Universums. Wir kennen das Alter der Erde und das des Universums. Und obwohl noch viel zu entdecken ist, lernen wir gerade, wie die einfachen Bestandteile des frühen Universums sich zur unglaublichen Vielfalt des Lebens auf der Erde entwickeln konnten – und womöglich ebenso auf anderen Welten.

In diesem ersten Kapitel werden wir uns mit der Geschichte des Universums, den Größenordnungen und den Bewegungen im Universum befassen. Wir werden eine Übersicht über unsere Stellung im Universum entwerfen, die uns im restlichen Buch als Basis für ein tieferes Verständnis dienen wird.

Abbildung 1.1: Unsere kosmische Adresse. Diese Grafik zeigt die wichtigsten strukturellen Ebenen in unserem Universum.

Universum

ungefähre Größe:
 10^{21} km $\approx$ 100 Millionen Lichtjahre

Lokaler Superhaufen

ungefähre Größe:
 $3 \cdot 10^{19}$ km bzw. 3 Millionen Lichtjahre

Lokale Gruppe

ungefähre Größe:
 10^{18} km bzw. 100 000 Lichtjahre

Milchstraße

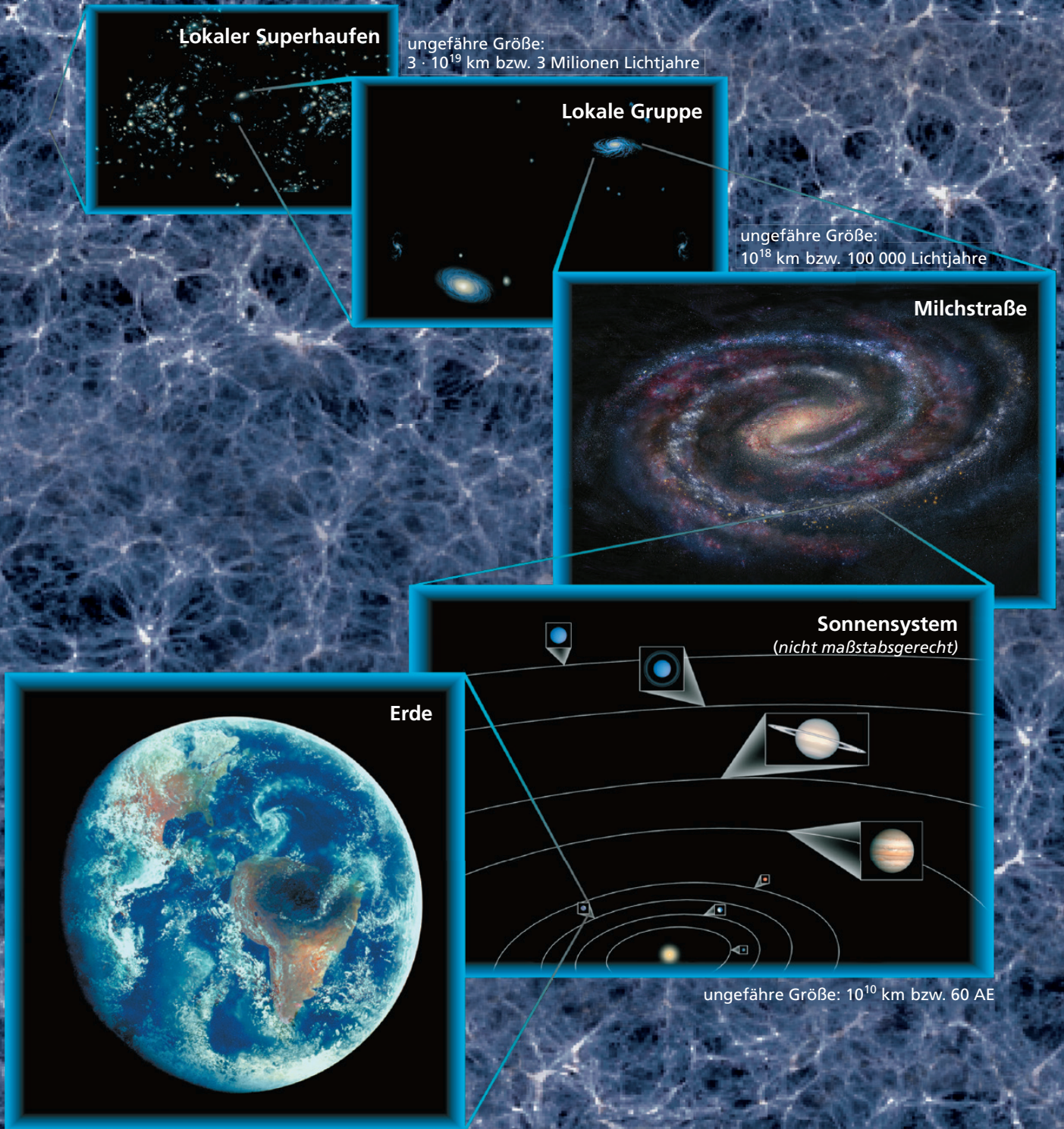
Sonnensystem

(nicht maßstabsgerecht)

Erde

ungefähre Größe: 10^{10} km bzw. 60 AE

ungefähre Größe: 10^4 km



Maßstäbe im Universum

1.1

Im Laufe der Menschheitsgeschichte haben sich unsere Vorfahren die Erde größtenteils feststehend im Zentrum eines vergleichsweise kleinen Universums vorgestellt. Solche Ansichten waren zu Zeiten, in denen das Verständnis auf Alltagserfahrungen beruhte, sicherlich sinnvoll, denn Sonne, Mond, Planeten und Sterne scheinen jeden Tag über unseren Himmel zu wandern; die ständige Bewegung der Erde, die Rotation um ihre Achse und ihren Umlauf um die Sonne können wir hingegen nicht wahrnehmen.

Heute wissen wir, dass die Erde sich in einem riesigen Universum um einen ziemlich durchschnittlichen Stern bewegt. Der historische Weg bis zu dieser Erkenntnis war lang und steinig. In späteren Kapiteln werden wir sehen, dass die alten Überzeugungen von einem erdzentrierten (geozentrischen) Weltbild erst nach eindeutigen Beweis des Gegenteils geändert wurden. Wir werden auch sehen, wie die wissenschaftliche Methodik uns ermöglicht hat, dieses Wissen zu erwerben und zu erfahren, dass wir auf eine Weise mit den Sternen verbunden sind, die sich unsere Vorfahren niemals hätten träumen lassen. Zuerst sollten wir uns jedoch einen allgemeinen Überblick über das Universum verschaffen, wie wir es heute kennen.

Wo ist unser Platz im Universum?

Schauen Sie sich das bemerkenswerte Bild auf der Eingangsseite dieses Kapitels (Seite 4) an. Es stammt vom Hubble-Weltraumteleskop und zeigt eine Himmelsregion, die so klein ist, dass man sie mit einem Sandkorn auf Armeslänge abdecken könnte. Trotzdem beinhaltet es nahezu unvorstellbare Weiten sowohl von Raum als auch von Zeit. Nahezu jedes darin enthaltene Objekt ist eine Galaxie, bestehend aus Milliarden von Sternen. Einige der kleineren Flecken sind Galaxien, die so weit von uns entfernt sind, dass ihr Licht Milliarden Jahre gebraucht hat, um uns zu erreichen. Beginnen wir also unseren Blick auf die Astronomie damit herauszufinden, was uns ein Bild wie dieses über unsere eigene kosmische Heimat verrät.

Unsere kosmische Adresse

Die Galaxien aus der Hubble-Aufnahme sind nur eine der wichtigen strukturellen Ebenen in unserem Universum, die in ► Abbildung 1.1 illustriert sind.

Die Erde ist ein *Planet* im **Sonnensystem**, das aus der Sonne und allen Objekten besteht, die sie umkreisen: die Planeten und ihre Monde sowie zahllose klei-

nere Objekte wie steinige *Asteroiden* und eisige *Kometen*. Unsere Sonne ist ein Stern wie etliche andere Sterne am Nachthimmel.

Unser Sonnensystem gehört zu der riesigen, scheibenförmigen Ansammlung von Sternen, die als **Milchstraße** oder **Galaxis** bezeichnet wird. Eine **Galaxie** ist eine Ansammlung von Sternen im Weltraum, die ein gemeinsames Zentrum umkreisen und von der Schwerkraft zusammengehalten werden. Unsere Milchstraße ist mit über 100 Milliarden Sternen, von denen wiederum viele von Planeten umkreist werden, relativ groß. Unser Sonnensystem befindet sich an einem Punkt etwa in der Mitte zwischen dem galaktischen Zentrum und dem Außenrand der galaktischen Scheibe.

Milliarden weiterer Galaxien sind im ganzen Welt- raum verstreut. Einige Galaxien stehen eher alleine, aber viele andere bilden Gruppen. Beispielsweise ist unsere Milchstraße eine der beiden größten von etwa 40 Galaxien der **Lokalen Gruppe**. Gruppen von Galaxien mit mehr als einigen Dutzend Mitgliedern werden als **Galaxienhaufen** bezeichnet.

Wie die Beobachtungen zeigen, sind Galaxien und Galaxienhaufen im sehr großen Maßstab zu riesigen Ketten und in Flächen angeordnet, zwischen denen sich gigantische Leerräume (sogenannte *Voids*) auftun. Der Hintergrund von ► Abbildung 1.1 zeigt diese groß- räumige Struktur. Die Regionen, in denen Galaxien und Galaxienhaufen am dichtesten zusammengeballt sind, nennt man **Superhaufen**. Sie sind im Wesentlichen Haufen von Galaxienhaufen. Unsere Lokale Gruppe befindet sich am Außenrand des Lokalen Superhaufens, der auch Laniakea genannt wird (hawaiianisch für „unermesslicher Himmel“).

Zusammengenommen bilden alle diese Strukturen unser **Universum**. In anderen Worten ist das Universum die Zusammenfassung aller Materie und Energie einschließlich der Superhaufen, Voids und allem darin. Wir fassen daher unseren Platz im Universum folgendermaßen zusammen: Wir leben auf einem Planeten, der einen durchschnittlichen Stern unter den mehr als 100 Milli-

Zum Nachdenken

Einige Menschen glauben, dass unsere winzige Körpergröße uns in den Weiten des Universums unbedeutend macht. Andere sind davon überzeugt, dass unsere Fähigkeit, die Wunder des Universums kennenzulernen, uns trotz unserer winzigen Größe Bedeutung verleiht. Was denken Sie?

arden Sternen der Milchstraße umkreist, die wiederum eine von Milliarden Galaxien des Universums ist.

Astronomische Entfernungsangaben

Die Beschriftungen in ► Abbildung 1.1 geben für jede Struktur eine ungefähre Größe in Kilometern an, aber viele Entfernungen in der Astronomie sind so groß, dass eine Angabe in Kilometern nicht sinnvoll ist. Stattdessen verwenden wir oft zwei andere Einheiten:

- Eine **Astronomische Einheit (AE)** ist die durchschnittliche Entfernung der Erde von der Sonne, die etwa 150 Millionen Kilometer beträgt. Wir verwenden AE üblicherweise für Entfernungen innerhalb unseres Sonnensystems.
- Ein **Lichtjahr (Lj)** ist die Entfernung, die das Licht in einem Jahr zurücklegt, das sind etwa 10 Billionen Kilometer (vgl. *Mathematische Einblicke 1.1*). Wir verwenden Lichtjahre, um die Entfernungen von Sternen und Galaxien anzugeben.

Ein Lichtjahr ist also eine Entfernungseinheit und keine Zeiteinheit. Das Licht bewegt sich mit der Lichtgeschwindigkeit, die 300 000 Kilometer pro Sekunde beträgt. Eine Lichtsekunde entspricht also etwa 300 000 Kilometern, denn das ist die Entfernung, die das Licht in einer Sekunde zurücklegt. Entsprechend ist eine Lichtminute die Entfernung, die das Licht in einer Minute zurücklegt, eine Lichtstunde die Entfernung, die das Licht in einer Stunde zurücklegt, usw.

Blick in die Vergangenheit

Nach irdischen Maßstäben bewegt sich Licht extrem schnell; mit Lichtgeschwindigkeit könnte man die Erde in einer Sekunde fast achtmal umrunden. Dennoch braucht sogar Licht viel Zeit für die riesigen Entfernungen im Weltraum. So benötigt das Licht gut eine Sekunde vom Mond zur Erde und fast acht Minuten, um von der Sonne zur Erde zu kommen. Das Licht der Sterne

braucht viele Jahre, um uns zu erreichen, daher messen wir die Entfernung zu den Sternen in Lichtjahren.

Beispielsweise ist Sirius, der hellste Stern am Nachthimmel, etwa 8 Lichtjahre von der Erde entfernt. Sein Licht braucht also etwa 8 Jahre, um uns zu erreichen. Wenn wir Sirius betrachten, dann sehen wir nicht, wie er heute aussieht, sondern wie er vor acht Jahren ausgesehen hat.

Dieser Effekt ist bei größeren Entfernungen noch dramatischer. Der Orionnebel (► Abbildung 1.2) ist eine riesige Wolke, in der sich Sterne und Planeten bilden. Er ist etwa 1350 Lichtjahre von der Erde entfernt, d. h. wir sehen, wie er vor 1350 Jahren ausgesehen hat – etwa zur Zeit, als das Römische Reich zerfiel. Sollten seitdem irgendwelche besonderen Ereignisse im Orionnebel stattgefunden haben, können wir darüber nichts wissen, weil das Licht dieser Ereignisse uns noch nicht erreicht hat. Dass Licht Zeit braucht, um den Weltraum zu durchqueren, führt uns zu einer bemerkenswerten Erkenntnis:

Je größer die Entfernung, in die wir blicken, desto weiter sehen wir zeitlich zurück.

► Abbildung 1.3 zeigt ein noch weiter entferntes Objekt: den Andromedanebel (eine Galaxie, die auch als M31 bezeichnet wird), dessen Entfernung von der Erde etwa 2,5 Millionen Lichtjahre beträgt. Sein Foto zeigt uns daher, wie diese Galaxie vor 2,5 Millionen Jahren ausgesehen hat, als die ersten Menschen auf der Erde

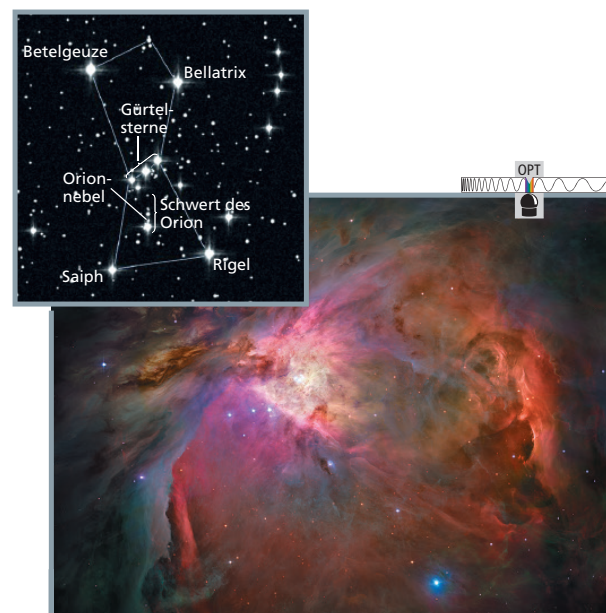


Abbildung 1.2: Der Orionnebel in einer Entfernung von etwa 1350 Lichtjahren. Der Kasten zeigt seine Position im Sternbild Orion (vgl. auch Abbildung 8.2 und Abbildung 19.13).

Häufige Irrtümer

Die Bedeutung des Lichtjahrs

In der Werbung hört man manchmal Aussagen wie „es wird Lichtjahre dauern, bis jemand ein besseres Produkt baut“. Eine derartige Aussage ist eigentlich sinnlos, denn das Lichtjahr ist eine Entfernungseinheit, keine Zeiteinheit. Wenn Sie unsicher sind, ob der Begriff Lichtjahr in einer Aussage richtig verwendet wird, prüfen Sie es nach: Ein Lichtjahr umfasst etwa 10 Billionen Kilometer. Die Werbeaussage bedeutet dann „es dauert 10 Billionen Kilometer, bis jemand ein besseres Produkt baut“ – was eindeutig sinnlos ist.

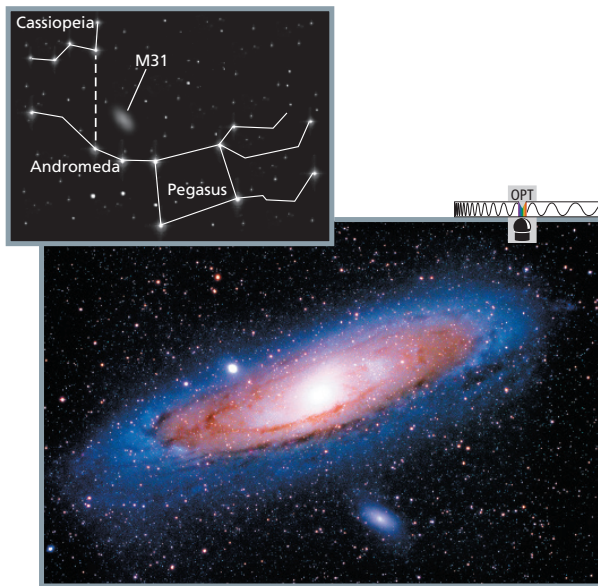


Abbildung 1.3: Der Andromedanebel (M31). Betrachten wir diese Galaxie, dann sehen wir Licht, das den Weltraum seit 2,5 Millionen Jahren durchquert.

auftauchten. Die noch weiter entfernten Galaxien sehen wir in noch größerer Vergangenheit.

Ist es nicht verblüffend, dass jeder „Schnappschuss“ einer weit entfernten Galaxie ein Bild sowohl des Raums als auch der Zeit darstellt? Da beispielsweise der Andromedanebel einen Durchmesser von etwa 100 000 Lichtjahren hat, muss das Licht des weiter entfernten Rands sich etwa 100 000 Jahre vor dem Licht des näher liegenden Rands auf den Weg gemacht haben. Mit anderen Worten zeigt uns das Foto in ► Abbildung 1.3 nicht nur, wie der Andromedanebel vor

SEHEN SIE SELBST



Suchen Sie mithilfe einer Sternenkarte oder Astronomie-App den Andromedanebel am Nachthimmel. Wenn Sie sich an einem dunklen Standort befinden, sollten Sie schon mit bloßem Auge ein schwaches Leuchten erkennen können, das von den zentralen Bereichen ausgeht. Wenn nicht, suchen Sie ihn mit einem Feldstecher. Denken Sie darüber nach, dass das Licht, das in Ihre Augen fällt, 2,5 Millionen Jahre lang ungehindert den Weltraum durchquert hat, bevor es Ihre Netzhaut erreicht. Dann fragen Sie sich selbst: Wenn Beobachter auf einem Planeten irgendwo im Andromedanebel dasselbe machen und unsere Milchstraße betrachten, was würden sie sehen? Könnten Sie wissen, dass wir hier auf der Erde existieren? Erläutern Sie Ihre Antwort.

mehr als 2 Millionen Jahren aussah, sondern es zeigt auch das Aussehen verschiedener Bereiche der Galaxie über einen Zeitraum von 100 000 Jahren. Bei der Untersuchung des Universums ist es also unmöglich, Raum und Zeit voneinander zu trennen.

Das beobachtbare Universum

Ein Blick weit in den Weltraum hinein bedeutet, weit in der Zeit zurückblicken. Deshalb können wir beobachten, wie sich das Universum im Lauf der Zeit verändert hat (► Abbildung 1.4). Wie wir in *Abschnitt 1.2* sehen werden, ist das Universum etwa 14 Milliarden Jahre alt. Betrachten wir eine Galaxie in einer Lichtlaufzeitentfernung von 7 Milliarden Lichtjahren, dann sehen wir, wie die Galaxie vor 7 Milliarden Jahren aus-

Weit: Wir sehen eine Galaxie in 7 Milliarden Lichtjahren Entfernung so, wie sie vor 7 Milliarden Jahren aussah – als das Universum etwa die Hälfte seines heutigen Alters von 14 Milliarden Jahren erreicht hatte.

Weiter: Eine Galaxie in 12 Milliarden Lichtjahren Entfernung sehen wir so, wie sie vor 12 Milliarden Jahren aussah – damals war das Universum etwa 2 Milliarden Jahre alt.

Die Grenze des beobachtbaren Universums: Licht aus einer Entfernung von etwa 14 Milliarden Lichtjahren zeigt, wie das Universum kurz nach dem Urknall aussah, als noch keine Galaxien existierten.

Außerhalb des beobachtbaren Universums: Wir können nichts sehen, das weiter als 14 Milliarden Lichtjahre weit entfernt ist, denn das Licht von dort hätte noch keine Zeit gehabt, uns zu erreichen.

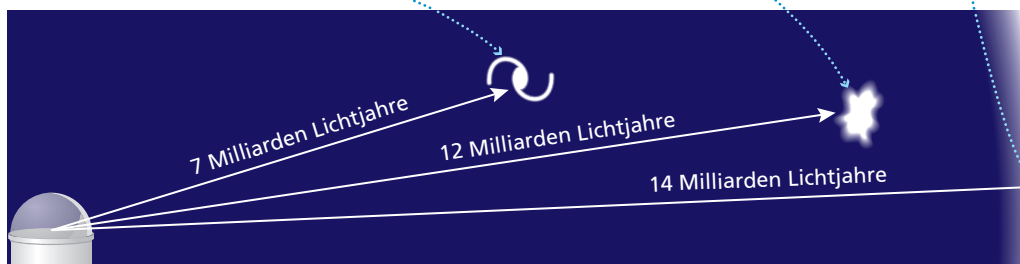


Abbildung 1.4: Je weiter wir in den Weltraum hinausblicken, desto weiter blicken wir in die Zeit zurück. Das Alter des Sonnensystems begrenzt daher die Größe des sichtbaren Universums – den Teil des Universums, den wir zumindest prinzipiell beobachten können.

DEFINITION

Grundlegende astronomische Objekte, Einheiten und Bewegungen

Dieser Kasten fasst einige astronomische Schlüsseldefinitionen zusammen, die in diesem Kapitel eingeführt wurden und im gesamten Buch benutzt werden.

Grundlegende astronomische Objekte

Stern Eine große glühende Kugel aus Gas, die durch Kernfusionen in ihrem Zentrum Wärme und Licht erzeugt. Unsere Sonne ist ein Stern.

Planet Ein mäßig großes Objekt, das um einen Stern kreist und hauptsächlich leuchtet, weil es dessen Licht reflektiert. Eine 2006 getroffene Definition besagt, dass ein Objekt nur dann als Planet gilt, wenn es 1. einen Stern umkreist, 2. groß genug ist, damit es durch seine eigene Schwerkraft rund geformt wird, und 3. die meisten anderen Objekte auf seiner Umlaufbahn aus dem Weg geräumt hat. Ein Objekt, das die ersten beiden Bedingungen erfüllt, das aber seine Umlaufbahn nicht freigeräumt hat, wie Pluto, wird als **Zwergplanet** bezeichnet.

Mond (auch **Satellit**) Ein Objekt, das um einen Planeten kreist. Der Begriff Satellit bezieht sich allgemein auf jedes Objekt, das ein anderes Objekt umkreist.

Asteroid Ein relativ kleines und steiniges Objekt, das einen Stern umkreist. Offiziell sind Asteroiden Teil einer Kategorie, die als „Kleinkörper im Sonnensystem“ bezeichnet wird.

Komet Ein relativ kleines und eishaltiges Objekt, das einen Stern umkreist. Wie Asteroiden gehören Kometen zu den „Kleinkörpern im Sonnensystem“.

Ansammlungen astronomischer Objekte

Sonnensystem (Solarsystem) Die Sonne und alle Materie, die sie umkreist, einschließlich der Planeten. Der Begriff Sonnensystem gilt streng genommen nur für unser eigenes Sternsystem (solar bedeutet „von der Sonne“), er wird manchmal aber auch auf andere Sternsysteme angewendet.

Planetensystem Ein Sternsystem, bestehend aus einem Stern und einem oder mehreren Planeten. Unser Sonnensystem ist also auch ein Planetensystem.

Sternsystem Ein Stern (manchmal auch mehrere) sowie alle Planeten und Materie, die ihn umkreisen. (Grob die Hälfte aller Sternsysteme bestehen aus zwei oder mehr Sternen.)

Galaxie Eine große Sterneninsel im Weltraum, die zwischen einigen hundert Millionen bis zu einigen Billionen Sternen enthält, die alle durch die Schwerkraft zusammengehalten werden und ein gemeinsames Zentrum umkreisen.

Galaxienhaufen (oder **Galaxiegruppe**) Eine Reihe von Galaxien, die durch die Schwerkraft zusammengehalten werden. Meist bezeichnet man kleine Ansammlungen (bis zu einem Dutzend Galaxien) als Gruppen, große Ansammlungen als Haufen.

Superhaufen Eine riesige Region des Weltraums, in der viele einzelne Galaxien und viele Gruppen und Haufen von Galaxien dichter zusammengeballt sind als anderswo im Universum.

Universum (oder **Kosmos**) Die Zusammenfassung aller Materie und aller Energie – also alle Galaxien und alles zwischen ihnen.

Beobachtbares Universum Der Teil des gesamten Universums, der von der Erde zumindest prinzipiell gesehen werden kann. Das beobachtbare Universum ist möglicherweise nur ein kleiner Teil des gesamten Universums.

Astronomische Entfernungseinheiten

Astronomische Einheit (AE bzw. international AU) Die mittlere Entfernung zwischen Erde und Sonne, die etwa 150 Millionen Kilometer beträgt. Genauer gesagt ist 1 AE die Länge der großen Halbachse der Umlaufbahn der Erde um die Sonne.

Lichtjahr Die Entfernung, die das Licht in einem Jahr zurücklegen kann. Sie entspricht etwa 9,46 Billionen Kilometern.

Begriffe zu Bewegungen

Rotation Die *Drehung* eines Objekts um seine Drehachse. Die Erde rotiert beispielsweise einmal am Tag um ihre Achse, eine imaginäre Verbindungslinie vom Nordpol durch das Erdzentrum zum Südpol.

Orbit (oder **Umlaufbahn**) Die Umlaufbewegung eines Objekts um ein anderes. Die Erde beispielsweise läuft in einem Jahr einmal um die Sonne.

Expansion (des Universums) Das Anwachsen der mittleren Entfernung zwischen Galaxien mit der Zeit. Beachten Sie, dass zwar das Universum als Ganzes expandiert, einzelne Galaxien (oder Gruppen und Haufen von Galaxien) sowie ihre Inhalte hingegen *nicht* expandieren.

gesehen hat¹ – wir sehen sie also zu einer Zeit, als das Universum halb so alt war wie heute. Beobachten wir eine Galaxie in 12 Milliarden Lichtjahren Entfernung, dann sehen wir, wie sie vor 12 Milliarden Jahren aus-

gesehen hat, als das Universum erst 2 Milliarden Jahre alt war. Beim Blick in große Entfernungen sehen wir also, wie das Universum aussah, als es noch jünger war. Die Hubble-Aufnahme zeigt sogar Galaxien, die mehr als 12 Milliarden Lichtjahre entfernt sind.

Selbst bei den größten vorstellbaren Teleskopen ist die Reichweite, wie weit wir in den Weltraum sehen können, begrenzt. Die Grenze wird durch das Alter des

¹ Wie wir in *Kapitel 20* sehen werden, sind in einem expandierenden Universum die Entfernungsangaben zu weit entfernten Galaxien mit Vorsicht zu genießen. Entfernungen wie die hier genannten basieren auf der Zeit, die das Licht der Galaxien benötigt hat, um uns zu erreichen (man nennt diese Zeit die *Lichtlaufzeit*, engl. *lookback time*).

Universums vorgegeben. In einem 14 Milliarden Jahre alten Universum können wir unmöglich etwas erkennen, das mehr als 14 Milliarden Lichtjahre – beispielsweise 15 Milliarden Lichtjahre – entfernt ist. Denn sonst würden wir in eine Zeit vor der Existenz des Universums sehen, was bedeutet, dass es noch gar nichts zu sehen gab. Das **beobachtbare Universum** – der Teil des gesamten Universums, den wir zumindest prinzipiell sehen können – besteht daher nur aus Himmelskörpern, deren Entfernung von der Erde kleiner ist als 14 Milliarden Lichtjahre. Dies ist nicht unbedingt die Größe des *gesamten* Universums; dieses könnte viel größer sein als unser beobachtbares Universum. Es gibt schlicht keine Möglichkeit, etwas jenseits der Grenze des beobachtbaren Universums zu erkennen. Alles, was sich außerhalb unseres beobachtbaren Universums befindet, ist so weit von uns entfernt, dass uns das Licht von dort noch nicht erreicht haben kann.

Wie groß ist das Universum?

Die Zahlenwerte für die Größen der verschiedenen Strukturen im Universum in ► Abbildung 1.1 sagen Ihnen vielleicht nicht viel – schließlich sind sie buchstäblich astronomisch –, aber ihr Verständnis ist für praktisch jeden Bereich der modernen Astronomie von wesentlicher Bedeutung. In diesem Abschnitt versuchen wir, diese Zahlen mit Leben zu erfüllen.

Der Maßstab des Sonnensystems

Abbildungen und Fotomontagen lassen unser Sonnensystem oft so erscheinen, als wäre es mit Planeten und Monden vollgestopft; das genaue Gegenteil ist der Fall. Eine Vorstellung der kosmischen Größen und Entfernungen erhalten wir maßstabsgerecht, indem wir uns das Sonnensystem so weit zusammengeschrumpft vorstellen, dass wir darin umhergehen könnten.

Planetenwege wie das Voyage-Scale-Modell des Sonnensystems in Washington ermöglichten einen solchen Spaziergang (► Abbildung 1.5). Dieses Modell zeigt Sonne, Planeten und die Entfernungen zwischen ihnen 10 Milliarden Mal kleiner, als es den tatsächlichen Größen entspricht.

► Abbildung 1.6a zeigt die richtige Größe (nicht aber die Entfernungen) von Sonne und Planeten in diesem Maßstab. Dabei hat die Sonne den Durchmesser einer großen Grapefruit, Jupiter hat die Größe einer Murmel, während die Erde nur so groß ist wie die Kugel in einem Kugelschreiber. Dieser Größenvergleich deckt sofort einige wesentliche Fakten über unser Sonnensystem



Abbildung 1.5: Das Bild zeigt das Voyage-Scale-Modell auf der National Mall in Washington, ein etwa 600 Meter langes Modell unseres Sonnensystems im Maßstab 1:10 Milliarden. Die Sonne (die goldfarbene Kugel im Vordergrund) sowie die inneren Planeten sind jeweils auf Säulen befestigt. Die Planetenmodelle befinden sich in Scheiben, die zum Bürgersteig weisen und etwa in Augenhöhe angebracht sind.

tem auf. Beispielsweise ist die Sonne weit größer als jeder der Planeten. Ihre Masse ist mehr als das Tausendfache der Gesamtmasse aller Planeten. Die Planeten weisen auch äußerst unterschiedliche Größen auf: Der als Großer Roter Fleck bezeichnete Sturm auf Jupiter (in der Zeichnung links unten auf der Jupiterscheibe sichtbar) könnte die ganze Erde in sich aufnehmen.

Der Maßstab des Sonnensystems ist sogar noch verwunderlicher, wenn Sie die in ► Abbildung 1.6a sichtbaren Größen mit den Entfernungen vergleichen, die in ► Abbildung 1.6b dargestellt sind. So ist beispielsweise die millimetergroße Erde, so groß wie die Kugel eines Kugelschreibers, etwa 15 Meter von der grapefruitgroßen Sonne entfernt. Die Umlaufbahn der Erde müssen Sie sich also als einen Kreis mit einem Radius von 15 Metern vorstellen. Zur Veranschaulichung des Maßstabs ist in dieser Abbildung der Schattenriss des Deutschen Museums in München dargestellt.

Betrachten wir unser Sonnensystem in diesem Maßstab, dann ist das vielleicht auffallendste Merkmal seine Leere. Die Grafik zeigt die Planeten entlang einer geraden Linie. Eigentlich müssten wir aber die Umlaufbahn jedes Planeten um die Sonne als Kreis darstellen, um die tatsächliche Ausdehnung unseres Planetensystems zu verdeutlichen. Dann würden all diese Umlaufbahnen eine Fläche von über einem Quadratkilometer bedecken – diese Fläche wäre größer als der Campus der meisten Universitäten und entspräche etwa 200 Fußballfeldern. Auf dieser ganzen Fläche wären nur die grape-

MATHEMATISCHE EINBLICKE 1.1

Wie weit ist ein Lichtjahr? Eine Einführung in astronomische Problemlösungen



Ein Lichtjahr entspricht etwa 10 Billionen Kilometern, aber woher wissen wir das? Schließlich ist diese Entfernung viel weiter, als ein Mensch oder ein Raumfahrzeug je zurückgelegt hat, daher ist sie nicht einfach so zu messen. Tatsächlich können wir die Entfernung, die das Licht in einem Jahr zurücklegt, berechnen. Die Mathematik ermöglicht uns viele Antworten, die wir durch direkte Messungen nicht erhalten können.

Obwohl viele Menschen erwarten, dass die in der Astronomie notwendige Mathematik sehr schwer ist (und tatsächlich benutzen professionelle Astronomen höhere Mathematik in ihrer Arbeit), lassen sich viele astronomische Probleme schon mit ein wenig Arithmetik oder einfacher Algebra lösen. Wir werden weiter unten sehen, dass die Antwort auf die Frage „Wie weit ist ein Lichtjahr“ nur Multiplikation und Division benötigt. Der Trick bei der Lösung von diesem und anderen astronomischen Problemen liegt darin, einen geeigneten Arbeitsablauf zur Problemlösung zu finden. Problemlösungen sind oft eher eine Kunst als eine Wissenschaft, doch der folgende dreistufige Ablauf sollte Ihnen bei jedem quantitativen Problem helfen.

Analysieren Sie das Problem: Überprüfen Sie, wie die Lösung aussehen sollte (beispielsweise: Welche Einheiten werden benötigt? Ist sie groß oder klein?) und welche Informationen Sie brauchen, um das Problem zu lösen. Zeichnen Sie ein Diagramm oder nutzen Sie ein einfaches ähnliches Problem, um einen Lösungsweg zu finden.

Lösen Sie das Problem: Führen Sie die notwendigen Berechnungen durch.

Erläutern Sie Ihr Ergebnis: Stellen Sie sicher, dass Ihre Antwort einen Sinn ergibt, und betrachten Sie, was Sie durch die Lösung des Problems gelernt haben.

Als Eselsbrücke für diesen Ablauf können die ersten drei Buchstaben dienen: **ALE** für **A**nalysieren, **L**ösen und **E**rläutern. Wenn Sie mehr Erfahrung im Lösen von Problemen gewonnen haben, müssen Sie sich die drei Schritte nicht immer ausdrücklich aufschreiben. Allerdings können Sie Ihnen immer helfen, wenn Sie bei der Lösung eines Rechenproblems stecken bleiben.

Beispiel: Wie weit ist ein Lichtjahr?

Lösung: Verwenden wir den dreistufigen Ablauf.

Analysieren des Problems: Die Frage lautet wie *weit*, also suchen wir nach einer Entfernung. Erinnern wir uns an die Definition, dann wissen wir, dass wir nach der Entfernung suchen, die das Licht in einem Jahr zurücklegt. Ein einfacheres ähnliches Problem wäre z.B. die Frage „Wie weit können Sie in zwei Stunden mit dem Auto fahren?“

Anhand dieses einfacheren Problems wissen Sie, dass Sie nur die Geschwindigkeit des Wagens kennen müssen. Wenn Sie z.B. mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h fahren, dann legen Sie in zwei Stunden 100 Kilometer zurück. Sie können also eine Entfernung mithilfe einer Geschwindigkeit bestimmen, indem Sie die Geschwindigkeit mit der Zeit multiplizieren: Entfernung = Geschwindigkeit $\times$ Zeit. Da es bei diesem Problem darum geht, wie weit sich Licht in einem Jahr bewegt, ist die Geschwindigkeit nun die Lichtgeschwindigkeit und die Zeit beträgt 1 Jahr.

Lösen des Problems: Nach Schritt (1) müssen wir die Lichtgeschwindigkeit mit 1 Jahr multiplizieren. Im Text steht, dass die Lichtgeschwindigkeit 300 000 km/s beträgt. Weil sie in *Sekunden* angegeben ist, die Zeit aber 1 *Jahr* beträgt, müssen wir das Jahr noch in Sekunden umwandeln. Für die Umrechnung müssen wir wissen, dass 60 Sekunden eine Minute, 60 Minuten eine Stunde (Einheit „h“, von engl. *hour*), 24 Stunden einen Tag (Einheit „d“, von engl. *day*) und 365 Tage ein Jahr (Einheit „yr“, von engl. *year*) ergeben. Damit können wir nun die Berechnung durchführen

1 Lichtjahr = (Lichtgeschwindigkeit) $\cdot$ (1 Jahr)

$$= \left(300\,000 \frac{\text{km}}{\text{s}} \right) \cdot \left(1 \text{ yr} \cdot \frac{365 \text{ d}}{1 \text{ yr}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} \cdot \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \cdot \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right) = 9\,460\,000\,000\,000 \text{ km} \quad (\text{bzw. } 9,46 \text{ Billionen km})$$

Wie Sie sehen, ist die Umwandlung der Einheiten eigentlich nur eine trickreiche Form der Multiplikation mit 1. *Anhang C.3* beschreibt die Arbeit mit Einheiten im Detail.

Erläutern des Ergebnisses: Als ganzer Satz lautet unsere Antwort: „Ein Lichtjahr entspricht etwa 9,5 Billionen Kilometern.“ Die Antwort ist sinnvoll: Sie hat die Einheit, die wir erwarten, zudem handelt es sich um eine enorme Strecke, was für die Entfernung, die Licht in einem Jahr zurücklegt, zu erwarten war. In unserer Antwort benutzten wir „etwa“, weil wir wissen, dass der Wert nicht genau ist: Wir wissen beispielsweise, dass ein Jahr nicht genau 365 Tage lang ist. Tatsächlich genügt meist eine noch gröbere Abschätzung: „Ein Lichtjahr entspricht etwa 10 Billionen Kilometern.“

Zum Nachdenken

Die Erde ist der einzige Ort im Sonnensystem – und soweit wir wissen, der einzige Ort im Universum –, der die Bedingungen bietet, die menschliches Leben braucht. Wie verändert der maßstabgerechte Anblick der Erde Ihren Blickwinkel auf die menschliche Existenz? Wie beeinflusst er Ihren Blickwinkel auf unseren Planeten? Erläutern Sie Ihre Antwort.

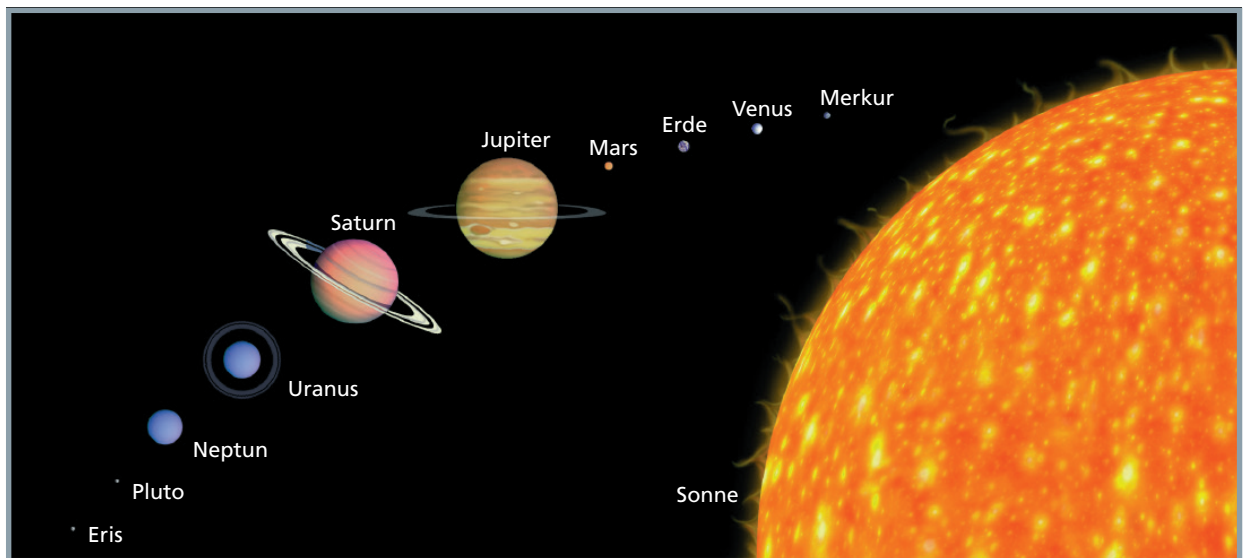
fruitgroße Sonne, die Planeten und einige Monde für das bloße Auge sichtbar. Der Rest wäre scheinbar leer (deshalb heißt es ja auch Weltraum!).

Der Blick auf das maßstabgerechte Sonnensystem bietet auch einen neuen Blickwinkel auf die Weltraumforschung. Der Mond, das einzige Stückchen Boden außerhalb der Erde, auf das Menschen jemals einen Fuß gesetzt haben (► Abbildung 1.7), ist im Maßstab 1:10 Milliarden nur etwa vier Zentimeter von der Erde entfernt und Ihre Handfläche bedeckt das ganze Gebiet, in dem sich Men-

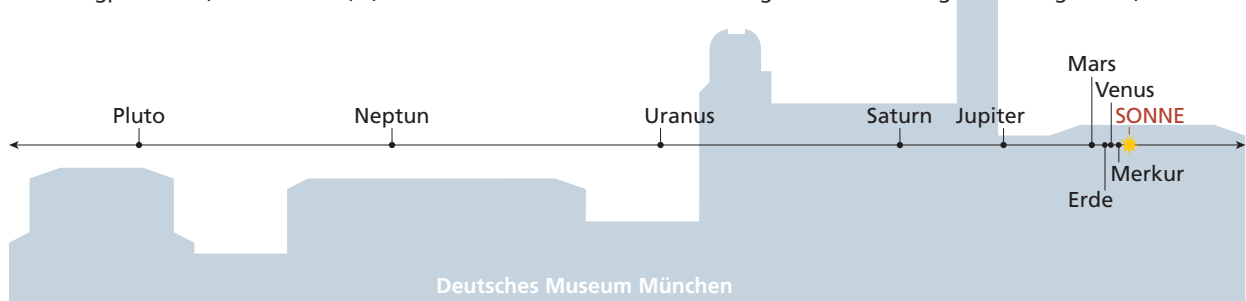
schen bisher aufgehalten haben. Ein Flug zum Mars ist mehr als 150-mal so weit wie der Flug zum Mond, sogar dann, wenn sich Erde und Mars auf derselben Seite der Sonne befinden. Und während Sie auf dem Voyage-Scale-Modell in nur wenigen Minuten von der Sonne zu Pluto spazieren, war die Raumsonde *New Horizons* vom Start bis zu ihrem Vorbeiflug am Pluto im Jahr 2015 mehr als 9 Jahre lang unterwegs, und das, obwohl sie fast 100-mal so schnell ist wie ein Verkehrsflugzeug.

Wie weit sind die Sterne entfernt?

Stellen Sie sich vor, Sie spazieren am Deutschen Museum in München entlang und vollziehen die Wegstrecke in ► Abbildung 1.6b nach. Sie laufen die knapp 600 Meter von der Sonne zum Pluto und entschließen sich dann dazu, den sonnennächsten Stern anzusteuern. Wie weit müssten Sie laufen?



a Diese Grafik zeigt maßstabsgerecht die Größe der Sonne, der Planeten und der beiden größten bekannten Zwergplaneten (Pluto und Eris). (Die Abstände zueinander sind allerdings nicht maßstabsgerecht dargestellt.)



b Maßstabsgerechte Darstellung der Abstände von Sonne und Planeten. Die Planeten befinden sich in diesem Modell in einer Linie, obwohl sie in der Realität die Sonne auf unterschiedlichen Umlaufbahnen umkreisen und eine perfekte lineare Ausrichtung nie eintritt. Die Entfernung vom Pluto zur Sonne entspricht etwa 600 Metern.

Abbildung 1.6: Darstellung des Sonnensystems mit einem Maßstab von 1:10 Milliarden.

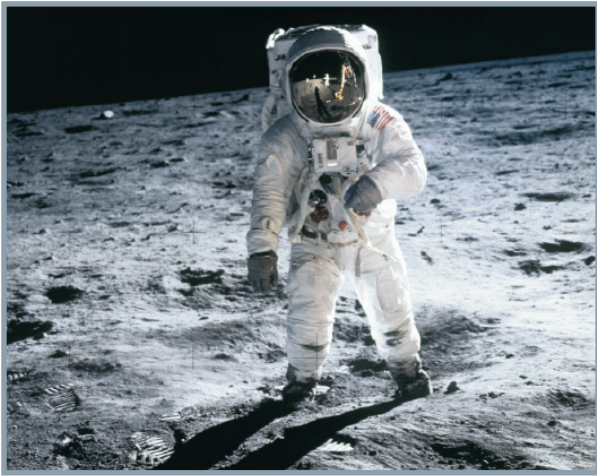


Abbildung 1.7: Der Mond ist der am weitesten entfernte Ort, an dem sich jemals Menschen aufgehalten haben. Im Maßstab von 1:10 Milliarden des Voyage-Scale-Modells ist er jedoch nur etwa 4 cm von der Erde entfernt. Diese berühmte Fotografie der ersten Mondexpedition (Apollo 11 im Juli 1969) zeigt den Astronauten Buzz Aldrin, in dessen Helmvisier sich Neil Armstrong spiegelt. Armstrong war der erste Mensch auf der Mondoberfläche. Dabei sprach er die Worte: „Ein kleiner Schritt für einen Menschen, ein Riesensprung für die Menschheit.“

Erstaunlicherweise bis nach Nigeria! Selbst in dem Maßstab, in dem Sie von Sonne zu Pluto nur einige Minuten brauchen, sind die nächsten Sterne mehr als 4000 Kilometer weit weg. Wenn Ihnen diese Antwort unglaublich vorkommt, können Sie sie selbst nachprüfen. Ein Lichtjahr beträgt etwa 10 Billionen Kilometer, was im Maßstab 1:10 Milliarden 1000 Kilometern entspricht (weil 10 Billionen / 10 Milliarden = 1000 ist). Das unserem eigenen nächstgelegene Sonnensystem namens Alpha Centauri (► Abbildung 1.8) ist etwa 4,4 Lichtjahre entfernt. Im Maßstab 1:10 Milliarden sind dies 4400 Kilometer, dies entspricht grob der Entfernung zwischen Moskau und Lissabon.

Die riesigen Entfernungen zwischen den Sternen geben uns eine Vorstellung von den technologischen Herausforderungen an die Astronomie. Da beispielsweise der größte Stern im System Alpha Centauri etwa so groß und hell ist wie unsere eigene Sonne, lässt sich sein Nachweis am Nachthimmel damit vergleichen, von Lissabon aus eine sehr helle Grapefruit in Moskau zu erkennen (von der Erdkrümmung einmal abgesehen). Es mag erstaunlich scheinen, dass wir diesen Stern überhaupt sehen können, doch die Schwärze des Nachthimmels ermöglicht es, ihn mit bloßem Auge als schwachen Lichtpunkt zu erkennen. Durch leistungsfähige Teleskope betrachtet, sieht er zwar viel heller aus, allerdings sind keine Einzelheiten auf der Sternoberfläche zu erkennen.

Stellen Sie sich nun vor, wie schwer es ist, *Planeten* zu entdecken, die nahe gelegene Sterne umkreisen. Das Problem lässt sich damit vergleichen, eine winzige Kugelschreiberkugel oder eine Murmel, die in Moskau um eine Grapefruit kreist, von Spanien aus zu erkennen. Angesichts dieser Herausforderung ist es mehr als nur erstaunlich, dass wir heute tatsächlich Techniken haben, solche Planeten zumindest in einigen Fällen aufzuspüren (*Abschnitt 13.1*).

Die riesigen Entfernungen zu den Sternen geben uns auch eine ernüchternde Lektion über die interstellare Raumfahrt. Obwohl solche Flüge in Science-Fiction-Serien wie *Star Trek* und *Star Wars* sehr einfach erscheinen, sieht die Realität ganz anders aus. Betrachten wir die Raumsonde *Voyager 2*, die 1977 gestartet wurde. *Voyager 2* passierte 1979 Jupiter, 1981 Saturn, 1986 Uranus und 1989 Neptun. Sie befindet sich derzeit mit einer Geschwindigkeit von etwa 50 000 Kilometern pro Stunde auf dem Weg zu den Sternen – hundertmal schneller als eine Gewehrkegel. Aber selbst mit dieser Geschwindigkeit bräuchte *Voyager 2* immer noch etwa 100 000 Jahre, um Alpha Centauri zu erreichen (die Sonde fliegt jedoch in eine andere Richtung). Bequeme interstellare Flüge liegen weit außerhalb unserer heutigen technischen Möglichkeiten.

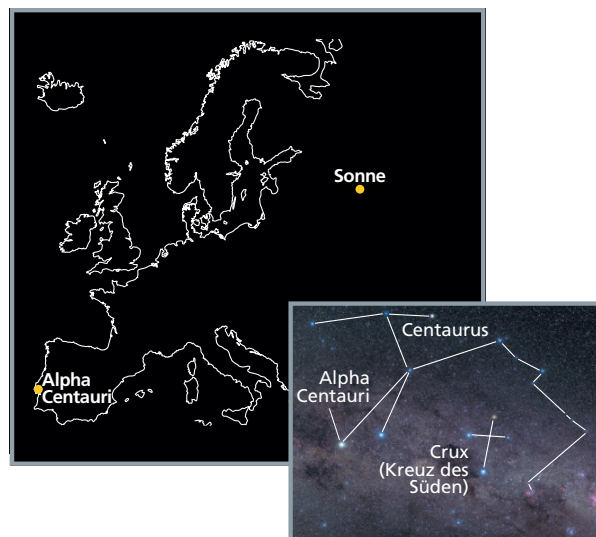


Abbildung 1.8: Die Montage aus Foto und Diagramm zeigt das Sternbild Centaurus (*Zentaur*), das von tropischen und südlichen Breitengraden aus sichtbar ist. Die tatsächliche Entfernung von Alpha Centauri beträgt 4,4 Lichtjahre. Im Maßstab 1:10 Milliarden, in dem man innerhalb von Minuten von der Sonne zum Pluto gelangt, müsste man ganz Europa durchqueren, um Alpha Centauri zu erreichen, das nächstgelegene Sternsystem. Das Inset zeigt die Position von Alpha Centauri am Sternhimmel.

SPEZIALTHEMA

Wie viele Planeten gibt es im Sonnensystem?

Bis 2006 hieß es, dass unser Sonnensystem neun Planeten besitzt. In jenem Jahr haben die Astronomen dafür gestimmt, Pluto zu einem von vielen „Zwergplaneten“ herabzustufen; dadurch verbleiben in unserem Sonnensystem nur acht offizielle Planeten. Warum diese Änderung?

Als Pluto 1930 entdeckt wurde, dachte man, er wäre ähnlich wie die anderen Planeten. Seit Mitte der 90er Jahre wissen wir (in *Kapitel 12* gehen wir näher darauf ein), dass Pluto nicht nur viel kleiner ist als jeder der ersten acht Planeten und dass er sich das äußere Sonnensystem (ein als *Kuiper-Gürtel* bezeichnetes Gebiet) mit Tausenden anderen eisigen Objekten teilt. Solange Pluto als das größte dieser Objekte galt, hatten die meisten Astronomen keine Einwände gegen den planetaren Status Quo. Das änderte sich erst 2005 mit der Entdeckung eines Objekts, das den Namen Eris erhielt. Weil Eris etwas mehr Masse hat als Pluto (dafür ist Pluto aber etwa 50 Kilometer größer), mussten sich Astronomen mit der Frage befassen, welche Objekte als Planeten gelten sollen.

Offizielle Entscheidungen über astronomische Namen und Definitionen trifft die Internationale Astronomische Union (IAU), eine Organisation von professionellen Astronomen der ganzen Welt. Auf einer durchaus umstrittenen Sitzung definierten die Mitglieder der IAU im August 2006 den Begriff „Planet“ so, dass Pluto und Eris nicht mehr darunterfallen (siehe die Definition grundlegender astronomischer Objekte, Einheiten und Bewegungen auf Seite 11), ergänzten aber die Kategorie „Zwergplanet“, um sie aufzunehmen. Diese Definitionen lösen nach wie vor Kontroversen aus, sind aber womöglich gerade deshalb ein hervorragendes Beispiel für den Unterschied zwischen den unscharfen Grenzen der Natur und der menschlichen Präferenz für fixe Kategorien. Schließlich unterscheidet sich die

Frage, ob Pluto ein Planet oder ein Zwergplanet ist, nicht so sehr von der Frage, ob ein bestimmter Wasserlauf nun ein Bach oder ein Fluss ist.

Die Frage nach der Anzahl der Planeten in unserem Sonnensystem ist allerdings nach wie vor offen. Mehrere Astronomen argumentieren anhand von Berechnungen, die auf den Bahnen der eisreichen Objekte in den Außenbereichen des Sonnensystems basieren, dass diese Bahnen Muster zeigen, die auf die Schwerkraftwirkung eines bislang unentdeckten „Planetens Neun“ hindeuten. Wenn ein solches Objekt tatsächlich gefunden wird, könnten die Astronomen gezwungen sein, die Definition des Begriffs „Planet“ erneut zu überdenken.



Zettel, die nach Plutos Abstufung zum „Zwergplaneten“ an der Pluto-Platte des Voyage-Scale-Modells hinterlassen wurden.

Wie groß ist die Milchstraße?

Der riesige Abstand zwischen unserem Sonnensystem und Alpha Centauri ist typisch für die Abstände zwischen Sternensystemen im Außenbereich der Milchstraße. Der Maßstab 1:10 Milliarden ist daher ungeeignet zur Betrachtung von Abständen über diesen typischen Abstand hinaus, denn weiter entfernte Sterne würden in diesem Maßstab gar nicht mehr auf die Erde passen. Um uns die ganze Milchstraße vorzustellen, benötigen wir einen neuen Maßstab.

Verkleinern wir unser Sonnensystem erneut um den Faktor 1 Milliarde (wodurch der Maßstab 1:10¹⁹ beträgt). In diesem neuen Maßstab wird ein Lichtjahr zu einem Millimeter und die 100 000 Lichtjahre der Milchstraße schrumpfen auf 100 Meter zusammen, etwa die Länge eines Fußballfelds (► Abbildung 1.9).

Stellen Sie sich ein Fußballfeld vor, mit einem maßstäblichen Modell unserer Milchstraße darauf. Unser Sonnensystem wäre dann ein mikroskopisch winziger Punkt kurz vor dem Strafraum. Die 4,4 Lichtjahre Abstand zwischen unserem Sonnensystem und Alpha Centauri schrumpfen in diesem Maßstab auf 4,4 Millimeter – weniger als die Breite Ihres kleinen Fingers. Würden Sie dort stehen, wo sich in diesem Modell unser Sonnensystem befindet, lägen Millionen Sterne in der Reichweite Ihrer Arme.

Ein anderer Weg, um eine Vorstellung von den Ausmaßen der Galaxis zu bekommen, ist die Betrachtung ihrer Sterne – mehr als 100 Milliarden. Vielleicht könnten Sie heute Abend schlecht einschlafen (weil Sie möglicherweise über den Maßstab des Universums nachdenken). Statt Schafe zählen Sie nun Sterne. Wenn Sie pro Sekunde einen Stern zählen, wie lange brau-

Häufige Irrtümer

Verwechseln sehr unterschiedlicher Dinge

Viele Menschen kennen die Begriffe *Sonnensystem* und *Galaxie*, aber manchmal verwechseln die Menschen beide Begriffe. Dabei sind unser Sonnensystem und die Milchstraße so unglaublich verschieden. Unser Sonnensystem ist ein einzelnes Planetensystem, bestehend aus unserer Sonne und verschiedenen Objekten, die sie umkreisen, wie die Erde und die anderen Planeten. Unsere Galaxie ist eine Ansammlung von 100 Milliarden Sternen – so viele, dass es allein Jahrtausende dauern würde, sie alle zu zählen. Daher bedeutet eine Verwechslung der Begriffe *Sonnensystem* und *Galaxie* einen Fehler mit dem Faktor 100 Milliarden – ein ziemlich großer Fehler.

chen Sie dann, um alle 100 Milliarden Sterne der Milchstraße zu zählen? Natürlich 100 Milliarden (10^{11}) Sekunden. Aber wie lange dauert das? Erstaunlicherweise entsprechen 100 Milliarden Sekunden mehr als 3000 Jahren. (Sie können das selbst nachrechnen, indem Sie 100 Milliarden durch die Anzahl der Sekunden eines Jahres teilen.) Sie brauchen also allein schon Tausende von Jahren, um die Sterne der Milchstraße nur zu *zählen*, Pausen nicht eingerechnet.

Zum Nachdenken

Betrachten Sie die ausklappbaren Abbildungen am Ende dieses Kapitels, welche die in diesem Abschnitt behandelten Konzepte näher erläutern. Wie wirkt sich die Visualisierung der Größe der Erde auf Ihre Perspektive auf unseren Planeten und die menschliche Existenz aus?



Abbildung 1.9: Diese Zeichnung zeigt die Milchstraße auf einer Skala, deren Durchmesser der Länge eines Fußballfeldes entspricht. In dieser Größenordnung sind die Sterne mikroskopisch klein und der Abstand zwischen unserem Sonnensystem und Alpha Centauri beträgt nur 4,4 Millimeter. Es gibt so viele Sterne in unserer Galaxis, dass es Tausende von Jahren dauern würde, sie laut abzuzählen.

Zum Nachdenken

Denken Sie darüber nach, dass es im beobachtbaren Universum etwa ebenso viele Sterne gibt wie Sandkörner an allen Stränden der Erde. Jeder Stern könnte das Zentrum eines Planetensystems sein. Wie wirkt sich das auf Ihre Gedanken aus zu der Frage, ob Leben – womöglich intelligentes Leben – auch außerhalb der Erde vorkommt?

Das beobachtbare Universum

Obwohl die Ausdehnung unserer Milchstraße schon unglaublich groß erscheinen mag, ist sie doch nur eine von etwa 100 Milliarden große (und dazu unzählige kleine) Galaxien im beobachtbaren Universum. Genauso viele Jahrtausende, die es dauern würde, um alle Sterne zu zählen, wären daher auch notwendig, um alle Galaxien zu zählen.

Denken Sie kurz an die Gesamtzahl aller Sterne in diesen Galaxien. Wenn wir von 100 Milliarden Sternen für jede Galaxie ausgehen, beträgt die Gesamtzahl der Sterne im beobachtbaren Universum etwa 100 Milliarden $\cdot$ 100 Milliarden oder 10 000 000 000 000 000 000 (10^{22}). Wie können wir uns das vorstellen? Denken Sie an einen Strand. Lassen Sie den feinen Sand durch Ihre Finger rieseln. Stellen Sie sich vor, Sie würden jedes Sandkorn an diesem Strand zählen und danach jedes Korn an jedem Strand der Erde (vgl. *Mathematische Einblicke 1.3*). Wenn Ihnen das wirklich möglich wäre, würden Sie feststellen, dass die Zahl der Sandkörner etwa so groß ist wie die Zahl der Sterne im beobachtbaren Universum (► Abbildung 1.10).



Abbildung 1.10: Die Zahl der Sterne im beobachtbaren Universum ist vergleichbar mit der Zahl der Sandkörner an allen Stränden der Erde zusammen.

MATHEMATISCHE EINBLICKE 1.2

Maßstäbe von Raum und Zeit



Die Betrachtung von Maßstäben (Skalierung) ist eine hervorragende Methode, um ein Gefühl für Zeit und Raum zu entwickeln. Bei einem architektonischen 1:20-Modell ist ein 18 Meter hohes Gebäude im Modell nur noch $1800 / 20 = 90$ Zentimeter hoch. Dasselbe gilt für astronomische Maßstäbe, nur müssen wir durch viel größere Zahlen teilen. Daher ist es einfacher, wenn wir mit Zahlen arbeiten, die in der *wissenschaftlichen Zahlenschreibweise* ausgedrückt werden, also als Potenzen zur Basis 10. Die folgenden Beispiele verdeutlichen das. Wenn Sie mit der wissenschaftlichen Zahlenschreibweise oder mit Zehnerpotenzen nicht vertraut sind oder wenn Sie einen Überblick benötigen, lesen Sie bitte die *Anhänge C.1* und *C.2*.

Beispiel 1: Wie groß ist die Sonne in dem beschriebenen Maßstab von 1:10 Milliarden?

Lösung:

Analysieren: Wir suchen nach der maßstabsgerechten Größe der Sonne, also müssen wir die tatsächliche Größe herausfinden. *Anhang E.1* entnehmen wir, dass der Sonnenradius 695 000 km beträgt, in wissenschaftlicher Schreibweise $6,95 \cdot 10^5$ km. Um den Sonnenradius im Maßstab 1:10 Milliarden zu berechnen, müssen wir diese Zahl durch 10 Milliarden bzw. 10^{10} teilen.

Lösen: Führen wir nun die Rechnung durch

$$\begin{aligned} \text{Sonnenradius im Maßstab} &= \frac{\text{tatsächlicher Radius}}{10^{10}} \\ &= \frac{6,95 \cdot 10^5 \text{ km}}{10^{10}} \\ &= 6,95 \cdot 10^{(5-10)} \text{ km} \\ &= 6,95 \cdot 10^{-5} \text{ km} \end{aligned}$$

Dabei haben wir die Regel benutzt, dass man Zehnerpotenzen durcheinander teilt, indem man ihre Exponenten voneinander abzieht (*Anhang C.1*).

Erläutern: Wir haben nun eine Antwort, allerdings in einer wenig sinnvollen Form, denn die meisten von uns haben keine rechte Vorstellung davon, was 10^{-5} km bedeuten. Wir müssen unsere Antwort also in Einheiten umwandeln, die sich leichter interpretieren lassen. Da 1 Kilometer 1000 Metern entspricht und 1 Meter 100 Zentimetern, können wir das Ergebnis in Zentimeter umwandeln:

$$6,95 \cdot 10^{-5} \text{ km} \cdot \frac{10^3 \text{ m}}{1 \text{ km}} \cdot \frac{10^2 \text{ cm}}{1 \text{ m}} = 6,95 \text{ cm}$$

Der Sonnenradius im Maßstab 1:10 Milliarden ist also etwas kleiner als 7 Zentimeter, was einem Durchmesser von knapp 14 Zentimetern entspricht. Mit anderen Worten: Die Größe der Sonne im Maßstab 1:10 Milliarden entspricht einer großen Grapefruit.

Beispiel 2: Welchen Maßstab benötigen wir, wenn wir die Milchstraße mit ihrem Durchmesser von 100 000 Lichtjahren auf einem 100 Meter langen Fußballfeld unterbringen wollten?

Lösung:

Analysieren: Dieses Mal wollen wir wissen, wie viel Mal größer als 100 Meter der tatsächliche Durchmesser der Galaxie ist; daher müssen wir den größeren Durchmesser durch den kleineren teilen. Dazu müssen wir erst beide Werte in dieselben Einheiten umwandeln. Wir wissen bereits, dass ein Lichtjahr etwa 10^{16} Kilometern entspricht (vgl. *Mathematische Einblicke 1.1*). Da ein Kilometer aus 1000 Metern besteht, können wir beide Werte in Metern ausdrücken.

Lösen: Wir geben beide Zahlen in derselben Einheit an und führen die Division durch. Um es leichter lesen zu können, werden wir alle Werte als Zehnerpotenzen angeben, einschließlich des Durchmessers der Galaxie, 100 000 Lichtjahre bzw. 10^5 Lj:

$$\begin{aligned} \frac{\text{Durchmesser der Milchstraße}}{\text{Durchmesser des Fußballfelds}} &= \frac{10^5 \text{ Lj} \cdot \frac{10^{13} \text{ km}}{1 \text{ Lj}} \cdot \frac{10^3 \text{ m}}{1 \text{ km}}}{10^2 \text{ m}} \\ &= 10^{(5+13+3-2)} = 10^{19} \end{aligned}$$

Beachten Sie, wie wir in dieser Rechnung die Zehnerpotenzen eingesetzt haben und dass unser Ergebnis keine Einheit aufweist, da es uns nur sagt, wie viel Mal ein Gegenstand größer ist als ein anderer.

Erläutern: Wir benötigen einen Maßstab von $1:10^{19}$, um die Milchstraße auf einem Fußballfeld abzubilden.

Beispiel 3: Der kosmische Kalender in ► Abbildung 1.12 entspricht 14 Milliarden Jahren der wirklichen Zeit. Welcher realen Zeit entspricht eine Sekunde auf dem kosmischen Kalender?

Lösung:

Analysieren: Wir suchen nach der realen Zeitdauer, die der skalierten Zeit des Kalenders entspricht.

Lösen: Man kann diese Aufgabe auf unterschiedliche Weise lösen; besonders einfach ist die Lösung, wenn wir erkennen, dass der Kalendermaßstab 1:14 Milliarden beträgt, denn ein Jahr des Kalenders entspricht 14 Milliarden echten Jahren. Daher entspricht eine Sekunde auf dem kosmischen Kalender 14 Milliarden echten Zeitsekunden.

Erläutern: Dieses Ergebnis ist schwer zu erklären, denn die meisten Menschen haben keine klare Vorstellung von „14 Milliarden Sekunden“. Es wird leichter, wenn wir das Ergebnis in Jahre umrechnen:

$$1,4 \cdot 10^{10} \text{ s} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \cdot \frac{1 \text{ d}}{24 \text{ h}} \cdot \frac{1 \text{ yr}}{365 \text{ d}} = 443,9 \text{ yr}$$

Da wir die Anzahl der Tage im Jahr nur genähert haben (und nur einen Näherungswert von 14 Milliarden Jahren für das

Alter des Universums benutzen), können wir sagen: „Eine Sekunde des kosmischen Kalenders entspricht etwa 440 Jahren echter Zeit. Daher entspricht eine Zehntel-Sekunde etwa 44 Jahren und eine Zwanzigstel-Sekunde entspricht 22 Jahren – grob das Alter eines durchschnittlichen Studenten.“

MATHEMATISCHE EINBLICKE 1.3

Abschätzung von Größenordnungen



Wir können ein Gefühl für etwas entwickeln, indem wir einen passenden Wert abschätzen, anstatt ihn exakt zu berechnen. In der Astronomie sind die Zahlen oft so groß, dass eine Schätzung selbst dann genügt, wenn sie bis auf einen Faktor 10 genau ist. Wir haben beispielsweise abgeschätzt, dass im beobachtbaren Universum 10^{22} Sterne zu finden sind, indem wir 100 Milliarden Galaxien mit jeweils 100 Milliarden Sternen angenommen haben. Weil diese Werte aber nur grob geschätzt sind, kann die tatsächliche Zahl der Sterne ohne weiteres 10-mal größer (10^{23}) oder 10-mal kleiner sein (10^{21}). Dennoch gibt uns die Schätzung eine gute Vorstellung von der tatsächlichen Zahl der Sterne. Schätzungen, die nur auf einen Faktor 10 genau sind, nennt man **Schätzungen der Größenordnung**.

Beispiel: In der Unterschrift zu ► Abbildung 1.10 heißt es, dass „die Anzahl der Sandkörner [an allen Stränden der Erde] mit der Zahl aller Sterne im beobachtbaren Universum vergleichbar ist“. Prüfen Sie diese Aussage.

Lösung:

Analysieren: Um diese Aussage bestätigen zu können, müssen wir die Zahl der Sandkörner abschätzen und prüfen, ob sie in etwa mit den geschätzten 10^{22} Sternen im beobachtbaren Universum übereinstimmt. Wir erhalten die Gesamtzahl aller Sandkörner, indem wir das gesamte Volumen des Sandes aller irdischen Strände durch das mittlere Volumen eines einzelnen Sandkorns teilen. Die letztere Zahl ist leicht zu bestimmen: Nehmen Sie etwas Sand und messen Sie ein kleines Volumen ab (beispielsweise $0,1 \text{ cm}^3$). Zählen Sie dann die Sandkörner in diesem Volumen. Das Volumen geteilt durch die Zahl der Sandkörner ist das mittlere Volumen eines Korns. Einige Sandarten sind feiner oder grobkörniger als andere, aber Sie werden feststellen, dass ein einzelnes Sandkorn typischerweise ein Volumen zwischen $0,1$ und 1 mm^3 aufweist. Um die Größenordnung abzuschätzen, benutzen wir $0,1 \text{ mm}^3$, also 10^{-10} m^3 .

Als Nächstes brauchen wir eine Schätzung des Gesamtvolumens des Sandes an den Stränden der Erde. Ein Volumen bestimmt man, indem man Länge, Höhe und Breite miteinander multipliziert. In diesem Fall sind Breite und Höhe die durchschnittliche Breite und Höhe trockenen Sandes an Sandstränden. Die Länge ist die Gesamtlänge aller Sandstrände entlang aller Küsten der Erde. Breite und Tiefe sind schnell bestimmt. Wenn Sie jemals an einem Strand im Sand gebuddelt haben, dann wissen Sie, dass die Schicht trockenen Sandes im Mittel mit Sicherheit mehr als $0,1 \text{ m}$, aber weniger als 10 m misst. Der mittlere Wert 1 m ist daher

ein gute Schätzung der Größenordnung für die Tiefe eines Strands. Auch die Breite eines Strands weist große Schwankungen auf, liegt aber im Mittel sicher zwischen etwa 1 m und 100 m . Daher können wir den mittleren Wert von 10 m für unsere Schätzung der Größenordnung verwenden. Die Gesamtlänge aller Sandstrände ist schwerer zu bestimmen, daher besteht eine gute Strategie darin, das Problem ohne diese Zahl zu lösen und dann zu prüfen, wie groß sie sein müsste, damit die Gesamtzahl der Sandkörner stimmt.

Lösen: Wie bereits diskutiert, genügt uns die folgende einfache Formel für die Gesamtzahl trockener Sandkörner:

$$\text{Gesamtzahl der Körner} = \frac{\text{Strandhöhe} \cdot \text{Strandbreite} \cdot \text{Strandlänge}}{\text{mittleres Volumen eines Sandkorns}}$$

In diese Formel setzen wir unsere Schätzungen von 1 m für die Strandhöhe, 10 m für die Strandbreite und 10^{-10} m^3 für das Volumen eines Sandkorns ein:

$$\begin{aligned} \text{Gesamtzahl der Körner} &= \frac{1 \text{ m} \cdot 10 \text{ m} \cdot \text{Strandlänge}}{10^{-10} \text{ m}^3} \\ &= \frac{10^{11}}{\text{m}} \cdot \text{Strandlänge} \end{aligned}$$

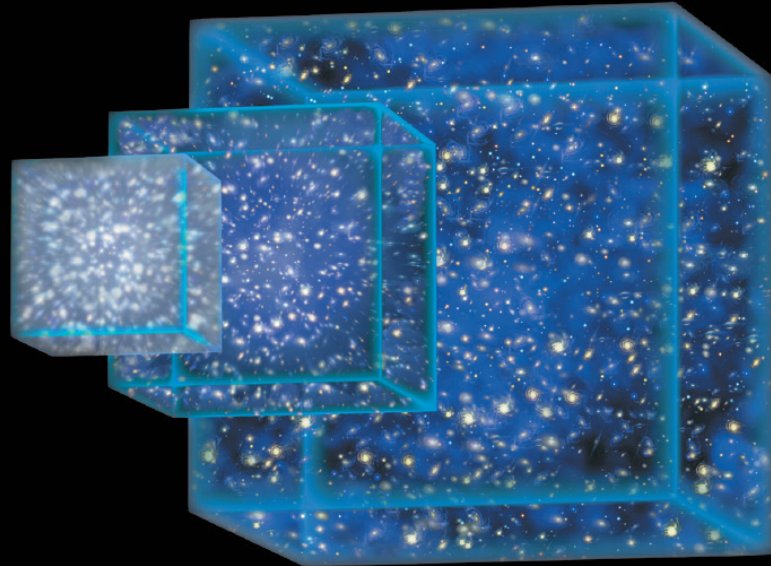
Wir versuchen zu bestätigen, dass die Gesamtzahl der Körner grob 10^{22} beträgt. Damit dies stimmt, müsste die Strandlänge 10^{11} m betragen, denn dann hätten wir auf der rechten Seite der obigen Gleichung $10^{11} \cdot 10^{11} = 10^{22}$. (Beachten Sie, wie sich die Einheiten gegenseitig aufheben.)

Erläutern: Die Behauptung, dass es 10^{22} Sandkörner gibt, ist vernünftig, *sofern* die Gesamtlänge aller Sandstrände der Erde in der Größenordnung 10^{11} m bzw. 10^8 (100 Millionen) Kilometer liegt. Diese Länge zu bestimmen ist nicht einfach, denn Strände verlaufen nie gerade und es ist auch nicht einfach, die Zahl aller Buchten und Inseln auf der Erde abzuschätzen. Mit einem Blick in einen Atlas oder auf einen Globus können Sie sich aber leicht davon überzeugen, dass 100 Millionen Kilometer die Gesamtlänge der Sandstrände mindestens um einen Faktor 10 überschätzt. Die tatsächliche Zahl der Sandkörner könnte daher näher bei 10^{20} oder 10^{21} liegen als bei 10^{22} . Das bedeutet aber nicht, dass die Behauptung falsch wäre. Angesichts all der Größenordnungen, die wir abgeschätzt haben – die Zahl der Galaxien, die Zahl der Sterne pro Galaxie, das Volumen der Strände und das Volumen eines einzelnen Sandkorns –, ist es schon sehr gut, wenn wir nur einen Faktor 10 oder 100 danebenliegen. Daher kann man durchaus mit einigem Recht sagen, dass die Zahl der Sterne im beobachtbaren Universum mit der Zahl der Sandkörner an allen Stränden der Erde vergleichbar ist.

Abbildung 1.11: **KOSMISCHER KONTEXT** Unsere kosmische Herkunft

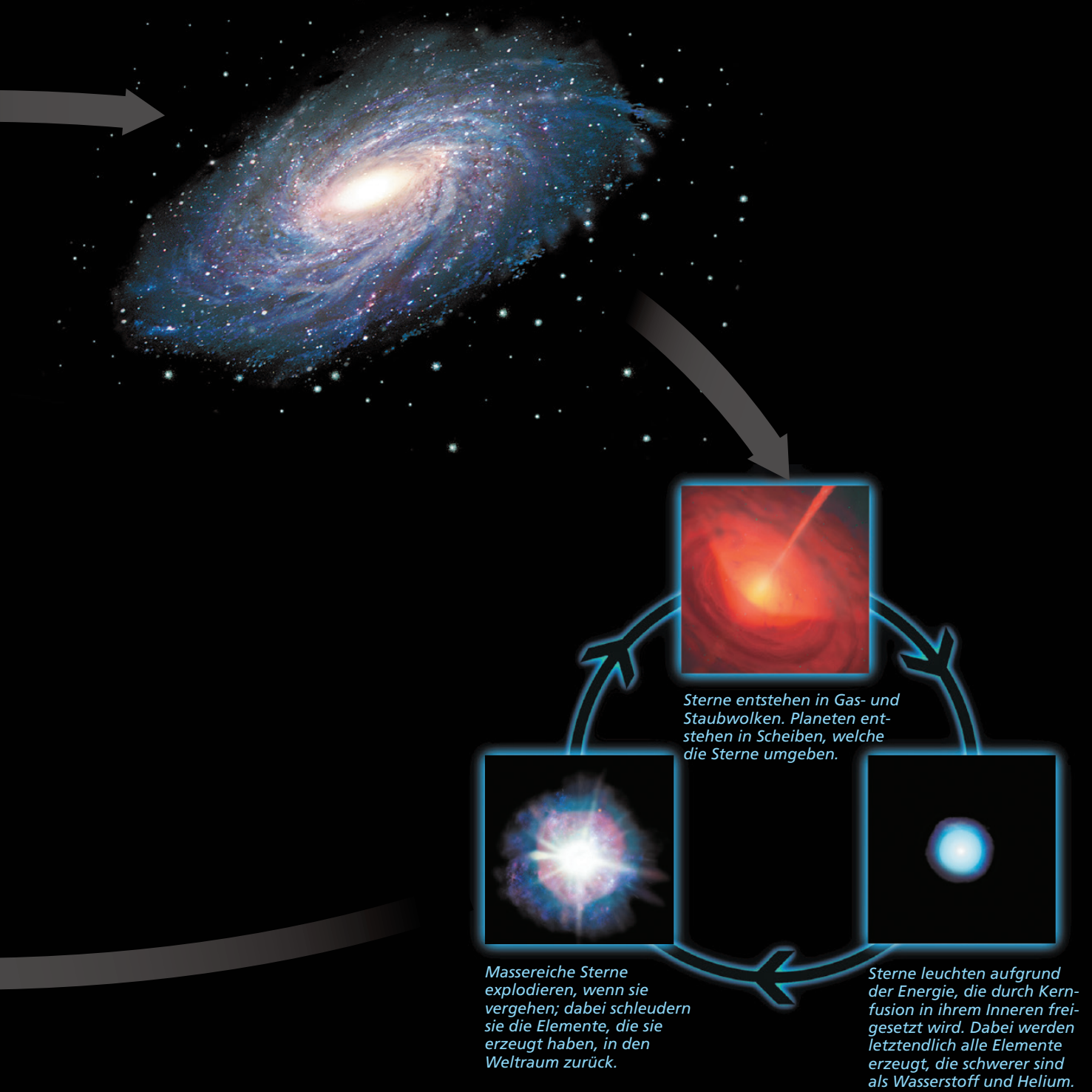
Im ganzen Buch werden wir immer wieder erkennen, dass das menschliche Leben aufs Engste mit der Entwicklung des ganzen Universums verknüpft ist. Diese Abbildung bietet einen Überblick über unsere kosmische Herkunft und zeigt einige der unabdingbaren Schritte, die unsere Existenz erst möglich machten.

- 1 **Die Entstehung des Universums:** Die Expansion des Universums begann im heißen und dichten Urknall. Die Würfel zeigen, wie sich eine Region des Universums im Lauf der Zeit ausdehnt. Das Universum expandiert ständig, aber in kleineren Gebieten hat die Schwerkraft die Materie zu Galaxien zusammengezogen.



- 4 **Erde und Leben:** Als vor 4,5 Milliarden Jahren unser Sonnensystem entstand, waren etwa 2% des ursprünglichen Wasserstoffs und Heliums in schwerere Elemente umgewandelt worden. Wir sind „Sternenstaub“, weil wir und unser Planet aus Elementen bestehen, die in Sternen erzeugt wurden, die vor langer Zeit existierten und vergingen.

- ② **Galaxien als kosmische Recycling-Fabriken:** Im frühen Universum gab es nur zwei chemische Elemente: Wasserstoff und Helium. Alle anderen Elemente entstanden in Sternen und wurden in Galaxien wie unserer Milchstraße von einer Sternengeneration zur nächsten weitergereicht und recycelt.



- ③ **Lebenszyklus der Sterne:** In der Milchstraße haben bereits viele Sternengenerationen existiert und sind wieder erloschen.

Die Geschichte des Universums in einem Jahr

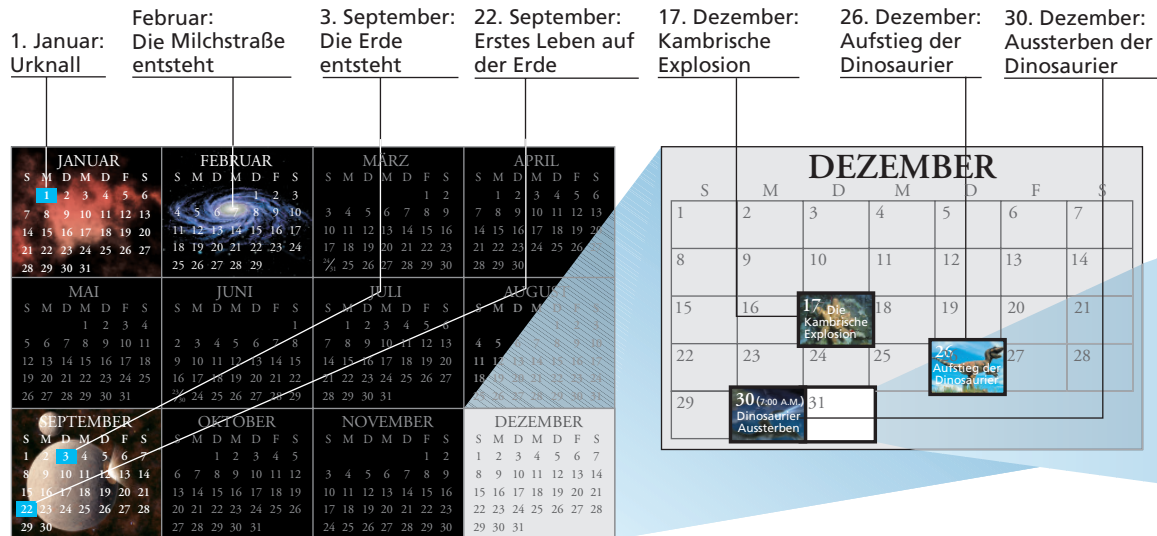


Abbildung 1.12: Der kosmische Kalender presst die 14 Milliarden Jahre lange Geschichte des Universums in ein Jahr, sodass jeder Monat gut einer Milliarde Jahre entspricht (genauer gesagt 1,17 Milliarden Jahre). Jeder Tag entspricht etwa 38 Millionen Jahren. Dieser kosmische Kalender beruht auf einer Version von Carl Sagan.

Die Geschichte des Universums

1.2

Unser Universum ist nicht nur räumlich, sondern auch in der Zeit riesig. In diesem Abschnitt werden wir kurz auf unseren heutigen Kenntnisstand von der Geschichte des Universums eingehen.

Sie fragen sich vielleicht, woher wir unser Wissen über die Vergangenheit unseres Universums nehmen, und wir werden große Teile dieses Lehrbuchs darauf verwenden zu verstehen, wie die Wissenschaft es uns ermöglicht, genau dies zu tun. Einen Teil der Antwort kennen Sie bereits, denn tiefer in den Weltraum zu schauen bedeutet, dass wir weiter in die Vergangenheit schauen. Wir können tatsächlich Teile des Universums noch heute so sehen, wie sie vor langer Zeit ausgesehen haben, indem man einfach weit genug weg schaut. Mit anderen Worten, unsere Teleskope sind so etwas wie Zeitmaschinen, die es uns ermöglichen, die Geschichte des Universums nachzuvollziehen.

Wie sind wir entstanden?

Verschaffen wir uns mithilfe von ► Abbildung **KOSMISCHER KONTEXT** 1.11 zunächst einen Überblick über die Geschichte des Universums nach dem aktuellen Stand der Forschung.

Der Urknall und das expandierende Universum

Teleskopgestützte Beobachtungen entfernter Galaxien zeigen, dass das gesamte Universum *expandiert* (vgl. *Abschnitt 1.3*). Das bedeutet, dass die mittleren Abstände zwischen den Galaxien im Lauf der Zeit anwachsen, was darauf schließen lässt, dass sie in der Vergangenheit dichter beieinander waren. Die Geschwindigkeit, mit der sich Galaxien voneinander entfernen, zeigt uns, dass diese Expansion vor 14 Milliarden Jahren begonnen hat. Wir bezeichnen diesen Anfang als **Urknall**. Die drei Würfel in der oberen linken Ecke von ► Abbildung 1.11 zeigt die zeitliche Entwicklung in einem kleinen Ausschnitt des Universums.

Das Universum als Ganzes expandiert seit dem Urknall weiter, obwohl in kleinen Bereichen die Anziehungskräfte die Materie zusammengeballt hat. Strukturen wie Galaxien und Galaxienhaufen befinden sich in Regionen, in denen die Gravitation die Oberhand über die allgemeine Expansion behalten hat. Obwohl also das Universum als Ganzes expandiert, expandieren die individuellen Galaxien (sowie Gruppen und Galaxienhaufen) und deren Inhalte *nicht*. Auch dieser Gedanke wird in den drei Würfeln in ► Abbildung 1.11 wiedergegeben. Beachten Sie, dass ein Würfel zwar größer wird, die darin befindliche Materie sich aber in Galaxien und Galaxienhaufen zusammengeballt hat. Die meisten Galaxien, einschließlich unserer eigenen Milchstraße, sind wahrscheinlich in den ersten Milliarden Jahren nach dem Urknall entstanden.

31. Dezember:

21:00 Uhr:
Erste Hominiden
entwickeln sich

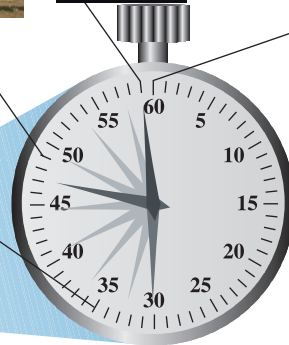
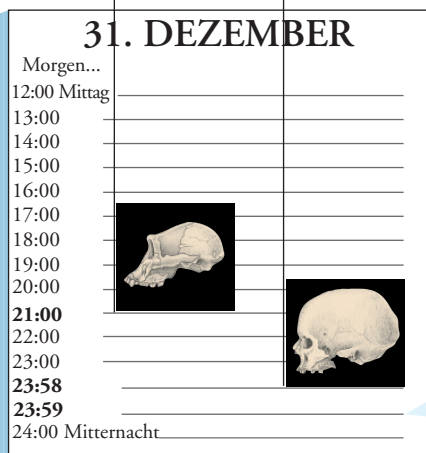
23:58 Uhr:
Der moderne Mensch
taucht auf

vor 25 Sekunden:
Die Landwirtschaft
entsteht

vor 11 Sekunden:
Bau der
Pyramiden

vor einer Sekunde:
Kepler und Galilei
beweisen, dass die Erde
die Sonne umkreist

Gegenwart

**Das Leben der Sterne und Recycling in Galaxien**

Innerhalb von Galaxien wie der Milchstraße verursacht die Schwerkraft den Kollaps von Gas- und Staubwolken, aus denen sich Sterne und Planeten bilden. Sterne sind zwar keine lebenden Organismen, weisen aber dennoch einen „Lebenszyklus“ auf. Ein Stern wird geboren, wenn die Schwerkraft die Materie in einer Wolke so stark verdichtet, dass das Zentrum dicht und heiß genug wird, um Energie mittels **Kernfusion** zu erzeugen. Bei diesem Prozess stoßen leichte Atomkerne zusammen und verbinden sich zu schwereren Kernen (sie fusionieren). Der Stern „lebt“, solange er mit der Energie aus diesen Fusionen scheitern kann, und „stirbt“, sobald er seinen nutzbaren Brennstoff aufgebraucht hat.

In seinem Todeskampf bläst ein Stern sein Inneres teilweise in den Weltraum zurück. Insbesondere sterben massereiche Sterne in gigantischen Explosionen, die als *Supernovae* bezeichnet werden. Die abgegebene Materie vermischt sich mit anderer Materie, die sich zwischen den Sternen befindet, und wird schließlich Teil neuer Gas- und Staubwolken, aus denen neue Stern generationen entstehen können. Galaxien wirken daher als kosmische Recyclingfabriken, die Materie, welche von sterbenden Sternen ausgestoßen wird, zu neuen Generationen von Sternen und Planeten recyceln. Dieser Zyklus wird im unteren rechten Teil von ► Abbildung 1.11 dargestellt. Auch unser Sonnensystem ist das Ergebnis vieler derartiger Recyclingdurchläufe.

Sterne erzeugen die Elemente der Erde und des Lebens

Das Recycling stellarer Materie ist mit unserer Existenz auf noch tiefergehende Weise verbunden. Bei der Un-

tersuchung von Sternen unterschiedlichen Alters haben wir gelernt, dass im frühen Universum nur die einfachsten chemischen Elemente enthalten waren: Wasserstoff und Helium (und eine Spur Lithium). Die Erde und wir bestehen überwiegend aus anderen Elementen, z.B. Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff und Eisen. Woher kamen diese anderen Elemente? Es gibt Belege dafür, dass alle Elemente außer Wasserstoff und Helium in Sternen erzeugt worden sind – einige durch die Kernfusion, welche die Sterne erstrahlen lässt, andere in den Kernreaktionen, die mit den Explosionen am Ende eines Sternlebens einhergehen.

Zum Zeitpunkt der Entstehung des Sonnensystems, vor etwa 4,5 Milliarden Jahren, hatten frühere Stern generationen bereits etwa 2 % des ursprünglichen Gehalts an Wasserstoff und Helium in schwerere Elemente umgewandelt, sodass die Wolke, aus der unser Sonnensystem entstand, zu etwa 98 % aus Wasserstoff und Helium und zu 2 % aus sonstigen Elementen bestand. Diese 2 % scheinen nicht besonders viel zu sein, aber es war genug, um die kleinen steinigen Planeten unseres Sonnensystems entstehen zu lassen, einschließlich der Erde. Auf ihr wurden einige dieser Elemente zu den Rohstoffen des Lebens, das sich heute in einer großen Vielfalt von Lebensformen zeigt.

Zusammenfassend ist der größte Teil der Materie, aus der wir und unser Planet besteht, in Sternen erzeugt worden, die vor der Geburt unserer Sonne lebten und wieder erloschen. Wie der Astronom Carl Sagan (1934–1996) sagte, sind wir „Sternenstaub“.

Wie lässt sich unsere Lebensspanne mit dem Alter des Universums vergleichen?

Stellen Sie sich vor, die gesamte Geschichte des Universums, vom Urknall bis zum heutigen Tag, würde in ein einziges Jahr gepackt. Diese Geschichte lässt sich dann in Form eines kosmischen Kalenders darstellen, in dem der Urknall zu Beginn des 1. Januars stattfindet und der heutige Tag gerade Mitternacht des 31. Dezembers entspricht (► Abbildung 1.12). Im einem 14 Milliarden Jahre alten Universum entspricht somit jeder Monat des kosmischen Kalenders etwas mehr als einer Milliarde Jahre.

Nach dieser Zeitskala ist die Milchstraße wahrscheinlich irgendwann im Februar entstanden. Viele Sternengenerationen haben in den nachfolgenden kosmischen Monaten gelebt und sind wieder vergangen, wobei sie die Milchstraße mit dem „Sternenstaub“ anreicherten, aus dem wir und unser Heimatplanet bestehen.

Unser Sonnensystem und die Erde haben sich auf dieser Skala erst Anfang September gebildet, in echter Zeit vor etwa 4,5 Milliarden Jahren. Schon Ende September gedieh das Leben auf der Erde. Allerdings blieben die Lebewesen während des größten Teils der irdischen Geschichte relativ einfach und mikroskopisch klein. Im Maßstab des kosmischen Kalenders sind größere Lebewesen erst Mitte Dezember aufgetreten. Die frühen Dinosaurier erschienen erst am zweiten Weihnachtsfeiertag. Dann sind die Dinosaurier in einem kosmischen Augenzwinkern wieder verschwunden – vermutlich durch den Einschlag eines Asteroiden oder Kometen (*Abschnitt 12.5*). In echten Zeitbegriffen starben die Dinosaurier vor 65 Millionen Jahren aus, im kosmischen Kalender war das erst gestern. Nach dem Verschwinden der Dinosaurier bevölkerten kleine pelzige Säugetiere die Erde. Etwa 60 Millionen Jahre später, am 31. Dezember gegen 21 Uhr, begannen frühe Hominiden (die Vorfahren der Menschheit) den aufrechten Gang.

Vielleicht das Erstaunlichste am kosmischen Kalender: Die gesamte Geschichte menschlicher Zivilisationen passt in die letzte halbe Minute. In diesem Maßstab haben die alten Ägypter die Pyramiden erst vor elf Sekunden gebaut. Vor einer Sekunde haben Kepler und Galilei bewiesen, dass sich die Erde um die Sonne bewegt und nicht umgekehrt. Der durchschnittliche Student wurde vor etwa 0,05 Sekunden geboren, gegen 23:59:59,95 Uhr. Im Maßstab des kosmischen Kalenders ist die Menschheit das jüngste Kind und ein menschliches Leben dauert nicht länger als ein Augenzwinkern.

Zum Nachdenken

Wenn es im Weltraum kein Oben oder Unten gibt, warum haben dann Ihrer Ansicht nach praktisch alle Globen den Nordpol am oberen und den Südpol am unteren Ende? Wäre es ebenso richtig, wenn der Südpol oben läge oder der Globus seitlich gedreht wäre? Erläutern Sie Ihre Antwort.

Zum Nachdenken

Betrachten Sie den ausführlicheren kosmischen Kalender zwischen den Seiten 36 und 37. Wie wirkt sich das Wissen um die Zeitskalen auf Ihre Sicht auf die menschliche Zivilisation aus?

Raumschiff Erde

1.3

Wo Sie auch dieses Buch lesen, Sie werden wahrscheinlich das Gefühl haben, „einfach dazusitzen“. Tatsächlich bewegen wir uns aber auf vielfältige Art und Weise durch den Raum, oder mit den Worten des bekannten Erfinders und Philosophen R. Buckminster Fuller (1895–1983) ausgedrückt: Sie sind ein Reisender auf dem *Raumschiff Erde*.

Wie bewegt sich die Erde durch den Raum?

Lassen Sie uns die wichtigsten Bewegungen, die wir mit unserem Raumschiff Erde durchführen, etwas genauer untersuchen.

Rotation und Umlaufbahn

Die wichtigsten Bewegungen der Erde sind die tägliche **Rotation** und der jährliche **Umlauf** um die Sonne.

Die Erde rotiert einmal pro Tag um ihre Achse, eine gedachte Verbindungslinie vom Nordpol durch den Erdmittelpunkt zum Südpol. Die Erde rotiert von Westen nach Osten – vom Nordpol aus gesehen gegen den Uhrzeigersinn – und deshalb gehen Sonne und Sterne im Osten auf und im Westen unter. Obwohl wir die Erdrotation nicht spüren, ist die Rotationsgeschwindigkeit beträchtlich (► Abbildung 1.13): Sofern Sie nicht in der Nähe von Nord- oder Südpol leben, wirbeln Sie mit mehr als 1000 km/h um die Erdachse – schneller als die Reisegeschwindigkeit der meisten Flugzeuge.

Während die Erde rotiert, umläuft sie auch die Sonne (► Abbildung 1.14). Der mittlere Abstand der Erde von der Sonne wird als **Astronomische Einheit (AE)** bezeichnet. Obwohl wir auch dabei die Auswirkungen

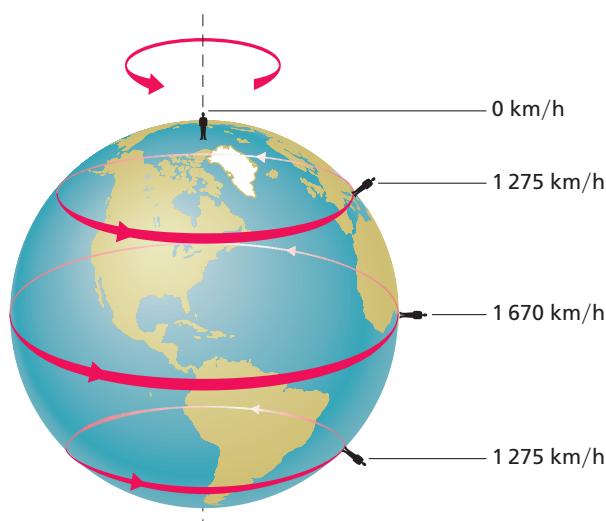


Abbildung 1.13: Auf der rotierenden Erde hängt Ihre Geschwindigkeit um die Erdachse von Ihrem Standort ab: Je näher Sie sich am Äquator befinden, desto schneller ist die Rotation. Beachten Sie, dass die Erde von West nach Ost rotiert. Deshalb geht die Sonne im Osten auf und im Westen unter.

der Bewegung nicht spüren, ist die Geschwindigkeit beeindruckend: Zu jeder Zeit rasen wir mit mehr als 100 000 km/h um die Sonne. Das ist 100-mal schneller als eine Gewehrkugel und schneller als jedes jemals gestartete Raumfahrzeug.

In ► Abbildung 1.14 erkennen Sie, dass die Erdumlaufbahn eine Ebene definiert, die **Ebene der Ekliptik**. Die Erdachse ist um $23,5^\circ$ gegen eine Linie geneigt, die senkrecht auf dieser Ebene steht. Durch diese **Achsenneigung** zeigt die Rotationsachse der Erde fast genau auf den Stern *Polaris*, den *Polarstern*. Beachten Sie, dass diese Achsenneigung nur in Bezug auf die Ebene der Ekliptik sinnvoll ist. Der Begriff „Neigung“ selbst hat im Weltraum keine Bedeutung, denn dort existiert kein absolutes Oben oder Unten. Im Weltraum bedeuten „hinauf“ und „herunter“ lediglich „vom Zentrum

der Erde (oder eines anderen Planeten) weg gerichtet“ bzw. „zum Zentrum der Erde hin gerichtet“.

Beachten Sie, dass die Erde in derselben Richtung um die Sonne läuft, in der sie auch um ihre Achse rotiert: vom Nordpol aus gesehen gegen den Uhrzeigersinn. Das ist kein Zufall, sondern eine Konsequenz der Art und Weise, auf die unser Planet entstanden ist. Wie wir in *Kapitel 8* diskutieren werden, entstanden die Erde und die anderen Planeten in einer rotierenden Gaswolke, die unsere noch junge Sonne umgab. Rotations- und Umlaufrichtung der Erde verlaufen daher in derselben Richtung, in der diese Wolke rotierte.

Bewegung innerhalb der Milchstraße

Rotations- und Bahnbewegung machen nur einen kleinen Teil der Bewegung des Raumschiffs Erde aus. Tatsächlich befindet sich unser gesamtes Sonnensystem auf einer großen Reise innerhalb der Milchstraße. Diese Bewegung hat zwei Hauptkomponenten: die Eigenbewegung der Sterne und die Rotation der Galaxis als Ganzes (► Abbildung 1.15).

Beginnen wir mit der Bewegung unseres Sonnensystems innerhalb der *lokalen Sonnenumgebung*, also der Region, in der sich die Sonne und die ihr benachbarten Sterne befinden. Wie ► Abbildung 1.15 zeigt, ist diese Sonnenumgebung nur ein winziger Teil der gesamten Milchstraße (was uns die unglaubliche Größe der Milchstraße in Erinnerung bringt). Stellen Sie sich den winzigsten Punkt vor, den Sie in dieses Bild der Milchstraße einzeichnen könnten. Selbst wenn dieser Punkt 10 000-mal kleiner wäre als das gesamte Bild, würde er eine Region bedecken, die mehr als 10 Millionen Sterne umfasst! (Denn ein Zehntausendstel von 100 Milliarden Sternen der Milchstraße sind 10 Millionen Sterne.) Als lokale Sonnenumgebung gilt ein Ge-

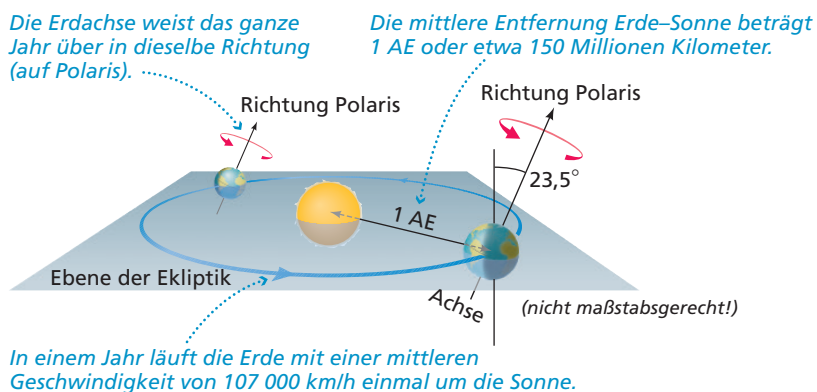


Abbildung 1.14: Die Erde läuft mit unglaublich hoher Geschwindigkeit um die Sonne. Beachten Sie, dass, vom Nordpol aus gesehen, sowohl die Rotations- als auch die Umlaufrichtung gegen den Uhrzeigersinn verlaufen.

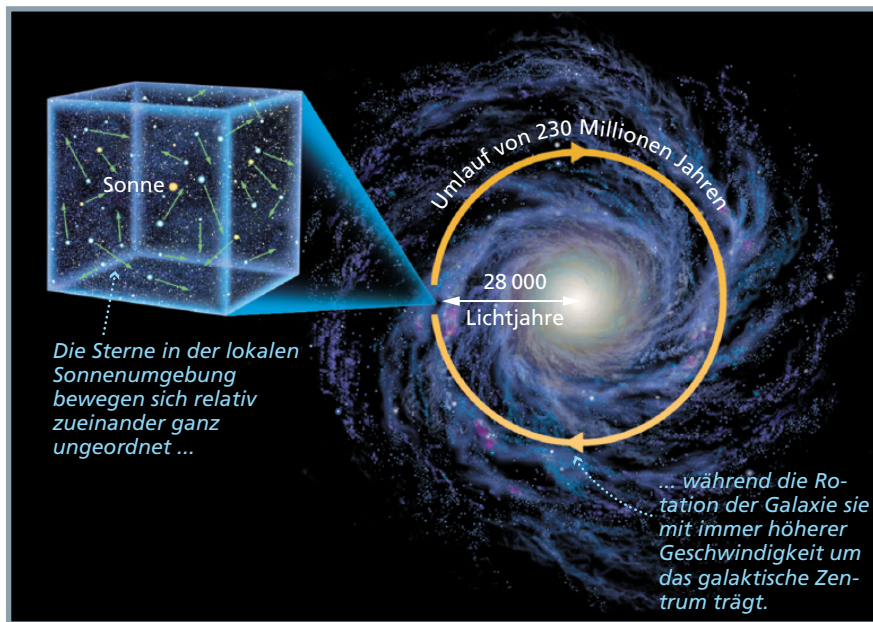


Abbildung 1.15: Diese Grafik illustriert die Bewegung des Sonnensystems innerhalb der Milchstraße. Der vergrößerte Ausschnitt zeigt, dass sich die Sterne der lokalen Sonnenumgebung im Wesentlichen zufällig zueinander bewegen. Gleichzeitig rotiert die ganze Milchstraße, sodass alle Sterne das Zentrum der Milchstraße umkreisen.

biet, das nur zwischen einigen Tausend bis zu einigen Millionen der nächsten Sterne umfasst.

Der Kasten in ► Abbildung 1.15 zeigt, dass Sterne innerhalb der lokalen Sonnenumgebung (oder die Sterne innerhalb einer beliebigen anderen kleinen Region der Milchstraße) sich im Wesentlichen zufällig gegeneinander bewegen. Sie bewegen sich zudem ziemlich schnell. Beispielsweise bewegen wir uns relativ zu nahe gelegenen Sternen mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von etwa 70 000 Kilometern pro Stunde, mehr als dreimal so schnell wie die internationale Raumstation ISS auf ihrem Weg um die Erde.

Warum sehen wir bei diesen hohen Geschwindigkeiten die Sterne nicht über den Himmel rasen? Der Grund sind ihre riesigen Entfernungen von uns. Sie haben sicher schon bemerkt, dass ein weit entferntes Flugzeug sich am Himmel langsamer zu bewegen scheint als eines, das nahe vorbeifliegt. Sterne sind so weit weg, dass ihre Bewegungen selbst bei Geschwindigkeiten von 70 000 km/h nur dann mit bloßem Auge zu erkennen wären, wenn wir sie einige Tausend Jahre lang beobachten würden. Deshalb scheinen sich die Sternbilder nicht zu verändern. Dennoch werden sich die Sternbilder in 10 000 Jahren deutlich von den heutigen unterscheiden. In 500 000 Jahren werden sie nicht mehr zu erkennen sein. Wenn Sie einen Zeitrafferfilm betrachten könnten, der Jahrtausenden umfasst, könnten Sie *wirklich* die Sterne über den Himmel rasen sehen.

Der zweite Bewegungsanteil läuft viel geordneter ab: Wenn Sie Blätter betrachten, die in einem Fluss treiben, dann sind deren Bewegungen relativ zueinander rein zufällig, genau wie bei den Sternen der lokalen Sonnenumgebung. Ein sorgfältigerer Blick zeigt aber deutlich, dass alle Blätter durch die Strömung in dieselbe Richtung getrieben werden. Betrachten wir nun ebenso auch die nähere Umgebung der Sonne sorgfältiger, so entpuppt sich die scheinbar zufällige Bewegung der Sterne als eine einfachere und sogar viel schnellere Bewegung: Die gesamte Milchstraße rotiert. In einer Entfernung von etwa 27 000 Lichtjahren vom galaktischen Zentrum benötigt unser Sonnensystem etwa 230 Millionen Jahre für einen Umlauf um die Milchstraße. Selbst wenn wir von außen zusehen könnten, wäre diese Bewegung für das bloße Auge nicht erkennbar. Wenn Sie jedoch die Geschwindigkeit unseres Sonnensystems auf ihrem Umlauf um das galaktische Zentrum berechnen, dann kommen Sie auf einen Wert von 800 000 km/h.

Die sorgfältige Untersuchung der galaktischen Rotation enthüllt eines der größten Geheimnisse der Wissenschaft. Sterne in unterschiedlichen Entfernungen zum galaktischen Zentrum umkreisen das Zentrum mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Anhand der Messung dieser Geschwindigkeiten können wir feststellen, wie die Masse in der Galaxie verteilt ist. Die Ergebnisse derartiger Untersuchungen waren eine große Überraschung: Es scheint, als ob die Sterne in der galaktischen

Scheibe, verglichen mit der Masse der gesamten Galaxie, nur die Spitze des Eisbergs sind (► Abbildung 1.16). Das bedeutet, dass sich der größte Teil der Masse der Milchstraße außerhalb der sichtbaren Scheibe zu befinden scheint, im sogenannten galaktischen *Halo*. Wir wissen nicht, woraus diese Materie besteht, nennen sie aber **Dunkle Materie**, denn sie sendet keinerlei Licht aus. Untersuchungen anderer Galaxien haben gezeigt, dass auch sie zum größten Teil aus Dunkler Materie bestehen. Diese mysteriöse Materie muss also die normale Materie, aus der Planeten und Sterne bestehen, um ein Vielfaches übersteigen. Noch weniger wissen wir über die geheimnisvolle **Dunkle Energie**, die sich darin manifestiert, dass die Expansion des Universums mit der Zeit schnell-

Zum Nachdenken

Trotz der chaotischen Bewegungen, die seit Jahrtausenden in der lokalen Sonnenumgebung stattfinden, sind Zusammenstöße zwischen Sonnensystemen extrem selten. Erklären Sie, warum. (*Hinweis:* Betrachten Sie die Größe der Sonnensysteme, beispielsweise unseres Sonnensystems, im Vergleich zu ihren Entfernungen voneinander.)

ler wird. Die Dunkle Energie scheint den größten Teil des gesamten Energieinhalts des Universums zu bilden. Wir werden die Geheimnisse der Dunklen Materie und der Dunklen Energie in *Kapitel 23* behandeln.

MATHEMATISCHE EINBLICKE 1.4

Rotations- und Umlaufgeschwindigkeit



In den ersten drei mathematischen Einblicken haben wir allgemeine Problemlösungstechniken betrachtet: die Verwendung von Einheiten, die wissenschaftliche Zahlenschreibweise und Abschätzungen. Jetzt werden wir sehen, wie einfache Formeln den Bereich astronomischer Probleme, die wir lösen können, erweitern. In diesem Fall werden wir die Formel für den Kreisumfang: $U = 2 \cdot \pi \cdot \text{Radius}$ (bzw. $U = 2 \cdot \pi \cdot r$) benutzen.

Beispiel 1: Wie schnell bewegt sich ein Mensch auf dem Erdaquator aufgrund der Erdrotation?

Lösung:

Analysieren: Die Frage *wie schnell* deutet darauf hin, dass wir nach einer Geschwindigkeit suchen. Wenn Sie daran denken, dass Geschwindigkeiten im Straßenverkehr in Kilometern pro Stunde gemessen werden, dann wissen Sie auch, dass wir Geschwindigkeiten erhalten, indem wir eine Strecke (gemessen z. B. in Kilometern) durch die Zeit (z. B. gemessen in Stunden) dividieren. In diesem Fall ist die Strecke der Erdumfang am Äquator, denn das ist die Strecke, die ein Mensch aufgrund der Erdrotation an einem Tag zurücklegt (► Abbildung 1.13). Die Zeit beträgt 24 Stunden, denn so lange dauert jede Umdrehung.

Lösen: Gemäß *Anhang E.1* beträgt der Äquatorradius der Erde 6378 km, daher beträgt der Umfang $2 \cdot \pi \cdot 6378 \text{ km} = 40\,074 \text{ km}$. Wir teilen diese Entfernung durch 24 Stunden:

$$\begin{aligned} \text{Rotationsgeschwindigkeit} &= \frac{\text{Äquatumfang}}{\text{Tageslänge}} \\ &= \frac{40\,074 \text{ km}}{24 \text{ h}} \\ &= 1670 \text{ km/h} \end{aligned}$$

Erläutern: Ein Mensch am Äquator bewegt sich aufgrund der Erdrotation mit einer Geschwindigkeit von 1670 km/h. Verkehrsflugzeuge fliegen üblicherweise mit Geschwindigkeiten um 800 km/h, die Erdrotation ist also etwa doppelt so schnell.

Beispiel 2: Wie schnell kreist die Erde um die Sonne?

Lösung:

Analysieren: Es wird wieder nach einer Geschwindigkeit gefragt, also müssen wir eine Strecke durch eine Zeit dividieren. In diesem Fall ist die Strecke der Umfang der Erdumlaufbahn, denn das ist die Strecke, welche die Erde in einem Jahr auf ihrem Weg um die Sonne zurücklegt. Die Zeit beträgt ein Jahr, denn so lange dauert ein Sonnenlauf.

Lösen: Die mittlere Entfernung der Erde von der Sonne beträgt 1 AE bzw. etwa 149,6 Millionen ($1,496 \cdot 10^8$) km, daher ist der Umfang der Erdumlaufbahn $2 \cdot \pi \cdot 1,496 \cdot 10^8 \text{ km} \approx 9,40 \cdot 10^8 \text{ km}$. Die Umlaufgeschwindigkeit ist diese Strecke, dividiert durch ein Jahr; das Jahr wandeln wir in Stunden um, damit wir am Ende die Einheiten km/h erhalten:

$$\begin{aligned} \text{Umlaufgeschwindigkeit} &= \frac{\text{Umfang des Erdorbits}}{1 \text{ Jahr}} \\ &= \frac{9,40 \cdot 10^8 \text{ km}}{1 \text{ yr} \cdot \frac{365 \cancel{\text{d}}}{\text{yr}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{\cancel{\text{d}}}} \\ &= 107\,000 \text{ km/h} \end{aligned}$$

Erläutern: Die mittlere Geschwindigkeit der Erde auf ihrer Bahn um die Sonne beträgt etwa 107 000 km/h. Die Mündungsgeschwindigkeit einer Gewehrkegel beträgt typischerweise 1000 km/h; die Orbitalgeschwindigkeit der Erde ist also über 100-mal schneller als eine Kugel.



Abbildung 1.16: Dieses Bild zeigt die Seitenansicht der Milchstraße. Obwohl sich die meisten sichtbaren Sterne in dem zentralen Sphäroid (*Bulge*, die zentrale Verdickung) oder der dünnen Scheibe befinden, zeigen Untersuchungen der galaktischen Rotation, dass sich der größte Teil der Masse außerhalb der Scheibe befindet. Da diese Masse keinerlei Licht aussendet, wird sie als *Dunkle Materie* bezeichnet.

Wie bewegen sich Galaxien durch das Universum?

Auch die Milliarden Galaxien im Universum bewegen sich relativ zueinander. Innerhalb der Lokalen Gruppe (►Abbildung 1.1) bewegen sich einige Galaxien auf uns zu, andere bewegen sich von uns fort und zumindest zwei kleine Galaxien (die Kleine und die Große Magellansche Wolke) umkreisen unsere Milchstraße. Und wieder sind die Geschwindigkeiten nach irdischen Maßstäben gigantisch. So bewegt sich beispielsweise die Milchstraße mit etwa 300 000 km/h in Richtung des Andromedanebels. Trotz dieser hohen Geschwindigkeiten brauchen wir uns nicht um eine Kollision in absehbarer Zeit zu sorgen. Selbst wenn sich die Milchstraße und der Andromedanebel direkt aufeinander zubewegten (was nicht der Fall sein muss), dauerte es noch Jahrmilliarden, bevor die Kollision begänne.

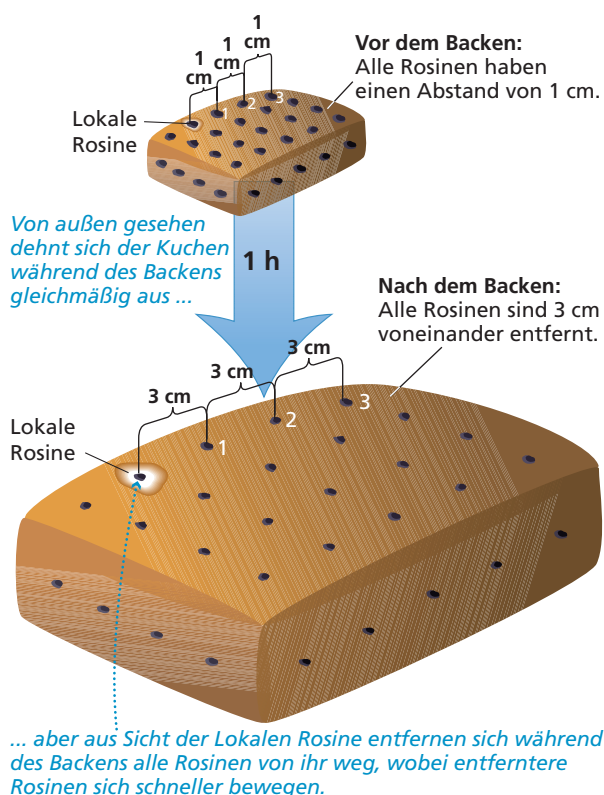
Sehen wir uns jedoch außerhalb der Lokalen Gruppe um, dann können wir zwei erstaunliche Fakten feststellen, die erstmals von Edwin Hubble (1889–1953) – nach ihm ist das Hubble-Weltraumteleskop benannt – festgestellt wurden.

- 1** Nahezu jede Galaxie außerhalb der Lokalen Gruppe entfernt sich von uns.
- 2** Je weiter die Galaxie entfernt ist, umso höher ist ihre Geschwindigkeit.

Dies klingt, als würden wir an einer ansteckenden kosmischen Krankheit leiden, aber es gibt eine viel einfachere Erklärung: *Das gesamte Universum dehnt sich aus (es expandiert)*. Wir werden die Details später in diesem Buch behandeln, aber die Grundidee lässt sich auch anhand einer einfachen Analogie verstehen: einem Rosinenkuchen im Backofen.

Das Rosinenkuchenmodell

Stellen Sie sich vor, Sie würden einen Rosinenkuchen backen. Im Teig beträgt die Entfernung zwischen benachbarten Rosinen einen Zentimeter. Sie stecken den Kuchen in einen Ofen, in dem er sich während des Backens aufbläht. Nach einer Stunde holen Sie den Kuchen, der sich so aufgebläht hat, dass die Entfernung zwischen benachbarten Rosinen auf drei Zentimeter angewachsen ist, aus dem Ofen (►Abbildung 1.17). Die Ausdehnung des Kuchens ist ziemlich offensichtlich. Wie aber würde Ihnen dieser Prozess erscheinen, wenn Sie *im* Kuchen leben würden, so wie wir im Universum leben?



Entfernungen und Geschwindigkeiten aus Sicht der Lokalen Rosine

Rosinen-Nummer	Entfernung vor dem Backen	Entfernung nach dem Backen (1 Stunde später)	Geschwindigkeit
1	1 cm	3 cm	2 cm/h
2	2 cm	6 cm	4 cm/h
3	3 cm	9 cm	6 cm/h
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.

Abbildung 1.17: Ein sich ausdehnender Rosinenkuchen ist ein Analogon des expandierenden Universums. Würde jemand in einer der Rosinen dieses Kuchens leben, so könnte er aus der Beobachtung, dass sich alle anderen Rosinen entfernen und weiter entfernte Rosinen sich schneller bewegen als näher gelegene, die Expansion des Kuchens ableiten. Entsprechend wissen wir, dass wir in einem expandierenden Universum leben, weil alle Galaxien außerhalb unserer Lokalen Gruppe sich von uns entfernen, und zwar umso schneller, je weiter sie entfernt sind.

Greifen Sie sich irgendeine Rosine heraus (egal welche); wir nennen sie die Lokale Rosine und betrachten sie in der Abbildung des Kuchens vor und nach dem Backen. ► Abbildung 1.17 zeigt eine mögliche Wahl der Lokalen Rosine sowie drei markierte benachbarte Rosinen. Die dazugehörige Tabelle fasst zusammen, was Sie aus dem Blickwinkel der Lokalen Rosine sehen würden. Rosine 1 befindet sich zum Beispiel vor dem Backen in einer Entfernung von 1 cm und nach dem Backen in 3 cm Entfernung. Während des Backens hat sie sich also zwei Zentimeter weit von der Lokalen Rosine entfernt. Daher beträgt ihre Geschwindigkeit, von der Lokalen Rosine aus gemessen, 2 cm/h. Rosine 2 bewegt sich von ihrem anfänglichen Abstand von zwei Zentimetern in eine Entfernung von sechs Zentimetern nach dem Backen, sie hat sich also während einer Stunde 4 cm von der Lokalen Rosine wegbewegt. Ihre Geschwindigkeit beträgt daher 4 cm/h, also doppelt so schnell wie Rosine 1. Allgemein führt die Ausdehnung des Kuchens dazu, dass sich alle Rosinen von der Lokalen Rosine entfernen, wobei sich weiter entfernte Rosinen schneller bewegen.

Hubbles Entdeckung, dass sich Galaxien in ganz ähnlicher Weise bewegen wie die Rosinen in unserem Kuchen, dass sich also die meisten Galaxien von uns entfernen, und zwar umso schneller, je weiter sie ent-

fernt sind, bedeutet, dass unser Universum sich auf ähnliche Weise ausdehnt wie der Rosinenkuchen. Ersetzen Sie nun die Lokale Rosine durch die Lokale Gruppe und die anderen Rosinen durch weiter entfernte Galaxien oder Galaxienhaufen, dann haben Sie eine grundlegende Vorstellung von der Expansion des Universums. So wie sich zwischen den Rosinen der Teig ausdehnt, expandiert zwischen den Galaxien der Raum selbst. Weiter entfernte Galaxien bewegen sich schneller von uns weg, weil sie von der Expansion mitgerissen werden wie die Rosinen im expandierenden Kuchen. Sie können damit auch nachvollziehen, wie Beobachtungen der Expansion es uns erlauben, das Alter des Universums zu bestimmen: Je schneller die Expansionsrate, desto schneller erreichten die Galaxien ihre aktuellen Positionen und desto jünger muss das Universum sein. Durch die genaue Messung der Expansionsrate haben Astronomen erfahren, dass das Universum etwa 14 Milliarden Jahre alt ist.

Das reale Universum

Es gibt aber einen wesentlichen Unterschied zwischen dem Rosinenkuchen und dem Universum: Ein Kuchen hat ein Zentrum und Ränder, das Universum unseres Wissens nach aber nicht. Jedes Wesen in jeder beliebigen Galaxie des expandierenden Universums sieht ge-

nau dasselbe, was wir auch sehen: Andere Galaxien entfernen sich und die weiter entfernten Galaxien entfernen sich schneller. Weil dieser Eindruck von jedem Punkt des Universums aus derselbe ist, kann kein Ort „zentraler“ gelegen sein als ein anderer. Dass das Universum kein Zentrum und keinen Rand hat, mag befremdlich anmuten und lässt sich auch nicht einfach veranschaulichen. Wie wir jedoch in den *Sonderkapiteln S2* und *S3* diskutieren werden, entsprechen Raum und Zeit nicht unbedingt Ihrer üblichen Vorstellung. Einstein hat gezeigt, dass die drei Dimensionen des Raums – Länge, Breite und Höhe – mit einer vierten Dimension verbunden sind, die wir als Zeit wahrnehmen. Sobald Sie gelernt haben, das Universum als vierdimensional zu betrachten, wird seine Zentrums- und Kantenlosigkeit nicht mehr so fremdartig wirken.

Wir müssen uns klarmachen, dass wir – anders als bei einem Rosinenkuchen – nicht direkt sehen können, wie sich die Galaxien mit der Zeit bewegen – die Entfernungen sind zu gewaltig, als dass während eines menschlichen Lebens irgendeine Bewegung erkennbar wäre. Stattdessen bestimmen wir die Geschwindigkeit der Galaxien, indem wir ihr Licht zu einem Spektrum

auffächern und etwas messen, dass wir die *Doppler-Verschiebung* nennen (*Abschnitt 5.4*). Dies zeigt, wie sehr die moderne Astronomie sowohl von sorgfältigen Beobachtungen als auch dem heutigen Verständnis der Naturgesetze abhängt.

Alle Bewegungen zusammen

Wie wir gesehen haben, kommen wir niemals zur Ruhe.

► **Abbildung 1.18** fasst die eben diskutierten Bewegungen zusammen. Wir drehen uns mit mehr als 1000 km/h um die Erdachse, während unser Planet mit mehr als 100 000 km/h um die Sonne läuft. Unser Sonnensystem bewegt sich mit einer typischen Geschwindigkeit von über 70 000 km/h zwischen den Sternen der lokalen Sonnenumgebung und umkreist gleichzeitig das galaktische Zentrum mit einer Geschwindigkeit von mehr als 800 000 km/h. Unsere Milchstraße bewegt sich zwischen den Galaxien der Lokalen Gruppe, während sich alle anderen Galaxien von uns mit Geschwindigkeiten entfernen, die mit wachsender Distanz in unserem expandierenden Universum immer mehr anwachsen. Das Raumschiff Erde trägt uns auf eine außergewöhnliche Reise.

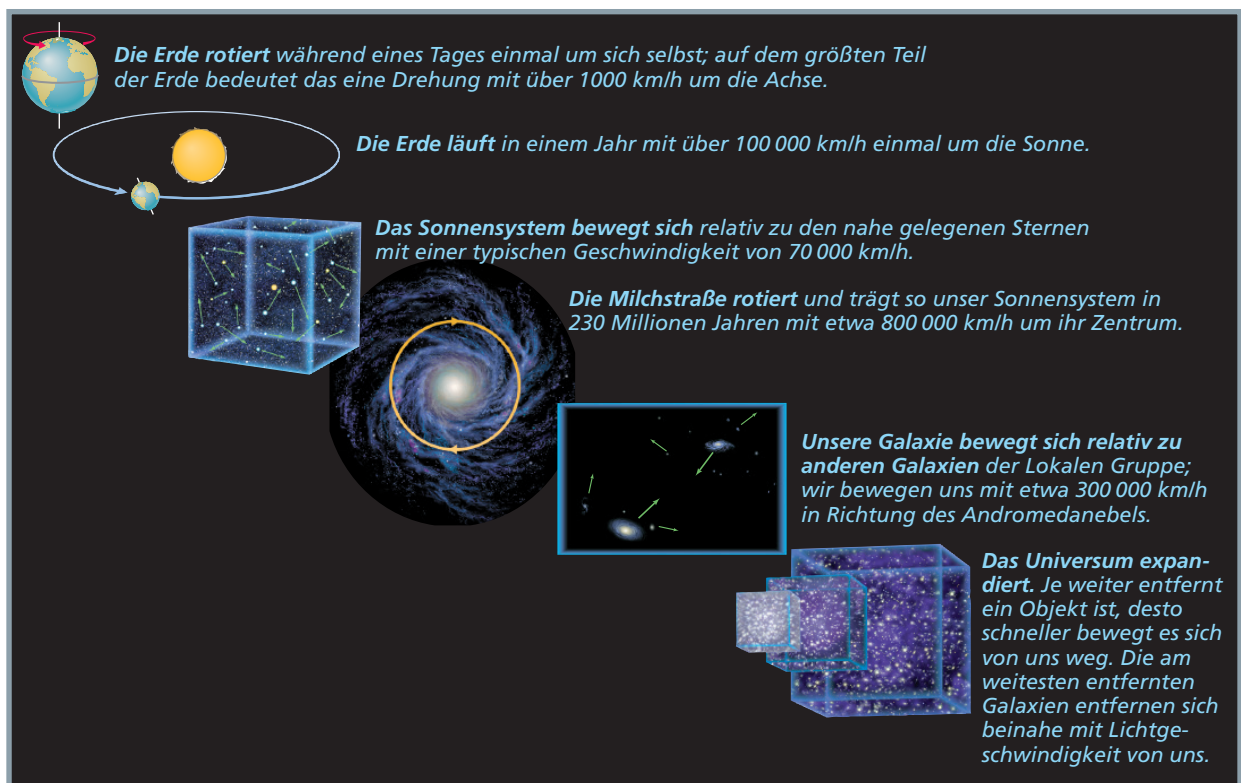


Abbildung 1.18: Diese Abbildung fasst die wesentlichen Bewegungen der Erde im Universum sowie die entsprechenden Geschwindigkeiten zusammen.

Menschheitsabenteuer Astronomie

1.4

Auf relativ wenigen Seiten haben wir hier einen ziemlich vollständigen Überblick über die heutige wissenschaftliche Sicht auf unser Universum gegeben. Aber das Ziel unseres Buchs besteht nicht darin, dass Sie diese Sichtweise einfach nachbeten können. Vielmehr wollen wir erreichen, dass Sie die Belege verstehen, auf denen diese Sicht beruht, und den außergewöhnlichen Verlauf ihrer Entwicklung kennenlernen.

Wie hat die astronomische Forschung die menschliche Geschichte beeinflusst?

Astronomie ist ein Menschheitsabenteuer in dem Sinne, dass sie uns alle betrifft – selbst diejenigen, die noch nie den Himmel betrachtet haben –, weil die Geschichte der Astronomie so eng mit der Entwicklung unserer Zivilisation verwoben ist. Umwälzungen in der Astronomie gingen immer Hand in Hand mit den Umwälzungen in Wissenschaft und Technik, die unser modernes Leben geformt haben.

Betrachten wir den Nachhall der kopernikanischen Wende, die uns gezeigt hat, dass die Erde nicht das Zentrum des Universums ist, sondern nur ein Planet, der die Sonne umkreist. Diese Revolution, die wir in *Kapitel 3* weiter diskutieren werden, begann 1543 durch Kopernikus mit der Veröffentlichung seines Modells eines sonnenzentrierten Planetensystems. Drei weitere Persönlichkeiten – Tycho Brahe, Johannes Kepler und Galileo Galilei – lieferten die wesentlichen Belege, die schließlich zur allgemeinen Akzeptanz des kopernikanischen Modells geführt haben. Diese Umwälzungen gipfelten in der Aufdeckung der Bewegungsgesetze und der Gravitation durch Isaac Newton. Dessen Arbeiten waren wiederum die Grundlage der Physik, welche die industrielle Revolution beschleunigte.

In jüngerer Zeit haben die Entwicklung der Raumfahrt und die Computerrevolution bedeutende Fortschritte in der Astronomie ermöglicht. Wir haben Raumsonden zu anderen Planeten entsandt und viele unserer leistungsfähigsten Teleskope befinden sich im Weltraum. Parallel sind Größe und Leistungsfähigkeit bodengestützter Teleskope beträchtlich angewachsen, weil sie durch Computer entworfen und kontrolliert werden.

Viele dieser Bemühungen und die von ihnen hervorgerufenen Errungenschaften haben zu tief greifenden sozialen Veränderungen geführt. Das berühmteste Beispiel ist das Schicksal von Galilei, den der Papst wegen seiner Behauptung, die Erde bewege sich um die Sonne, 1633 unter Hausarrest stellte. Obwohl die Kirche bald erkannte, dass Galilei Recht hatte, wurde er erst 1992 durch eine Stellungnahme von Papst Johannes Paul II. formell rehabilitiert. In der Zwischenzeit rief der Fall Galilei viele Debatten in religiösen Kreisen hervor und beeinflusste tief greifend die theologische und wissenschaftliche Denkweise.

Verlieren Sie dieses Menschheitsabenteuer nicht aus den Augen, während Sie dieses Buch lesen und astronomische Entdeckungen kennenlernen. Sie erfahren dann nicht nur etwas über die Wissenschaft selbst, sondern auch über eine der stärksten Kräfte, die unsere heutige Welt geprägt haben. Dieser Kontext wird Sie auch zum Nachdenken darüber anregen, wie die vielen verbleibenden astronomischen Rätsel – etwa die Zusammensetzung der Dunklen Materie, die Ereignisse zu Beginn des Urknalls und die Möglichkeit von Leben außerhalb der Erde – unsere Zukunft verändern könnten.

Was würde es für uns bedeuten, wenn wir irgendwann die vollständige Geschichte unserer kosmischen Herkunft kennen? Wie würde sich unser Blick auf die Erde ändern, wenn wir wüssten, dass erdähnliche Planeten häufig vorkommen oder besonders selten sind? Diese Fragen können nur mit der Zeit beantwortet werden. Aber die folgenden Kapitel werden Ihnen die Grundlagen für das Verständnis geben, wie wir Menschen uns von Völkern, die Muster am Himmel betrachteten, zu einer Zivilisation entwickelten, die fähig ist, tief greifende Fragen über unsere Existenz zu stellen.

ÜBERBLICK

Kapitel 1 im Zusammenhang

In diesem ersten Kapitel haben wir einen allgemeinen Überblick über unseren Platz im Universum entwickelt. Wenn wir im weiteren Verlauf des Buches das Universum weiter untersuchen, behalten Sie die folgenden Punkte des großen Ganzen in Erinnerung:

- Die Erde ist nicht das Zentrum des Universums, sondern ein Planet, der einen recht gewöhnlichen Stern innerhalb der Milchstraße umkreist. Unsere Milchstraße wiederum ist eine von Milliarden Galaxien innerhalb unseres beobachtbaren Universums.
- Kosmische Entfernungen sind buchstäblich astronomisch. Wir können sie aber mithilfe von maßstäblichen Modellen und anderen Skalierungsmethoden veranschaulichen. Wenn Sie an diese enormen Maßstäbe denken, vergessen Sie nicht, dass jeder Stern eine Sonne und jeder Planet eine einzigartige Welt ist.
- Wir sind „Sternenstaub“. Die Atome, aus denen wir bestehen, sind im Urknall als Wasserstoff und Helium entstanden und wurden später von massereichen Sternen zu schweren Elementen fusioniert. Beim Tod der Sterne wurden diese Elemente zurück in den Weltraum geschleudert, wo unsere Milchstraße sie zu neuen Sternen und Planeten recycelt hat. Vor etwa 4,5 Milliarden Jahren bildete sich unser Sonnensystem aus derartiger recycelter Materie.
- Auf der kosmischen Zeitskala sind wir Nachzügler. Das Universum hatte schon mehr als die Hälfte seines heutigen Alters erreicht, als unser Sonnensystem entstand. Und es dauerte noch weitere Jahrtausende, bevor der Mensch auf der Weltbühne erschien.
- Wir alle werden auf dem Raumschiff Erde durch den Kosmos getragen. Obwohl wir diese Bewegung im täglichen Leben nicht spüren können, sind die entsprechenden Geschwindigkeiten überraschend groß. Indem wir uns die Bewegung des Raumschiffs Erde klarmachen, gewinnen wir einen neuen Blickwinkel auf den Kosmos und können seine Natur und seine Geschichte verstehen.

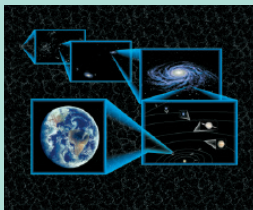
MEINE KOSMISCHE PERSPEKTIVE

Astronomie als Wissenschaft beeinflusst uns auf vielfältige Art und Weise. Insbesondere hilft sie uns zu verstehen, wie wir als Menschen in das Universum als Ganzes passen. Die Geschichte der Astronomie ist eng mit der Entwicklung unserer Zivilisation verwoben.

ZUSAMMENFASSUNG

1.1 Maßstäbe im Universum

► Wo ist unser Platz im Universum?



Die Erde ist ein Planet, der die Sonne umkreist. Unsere Sonne ist einer von über 100 Milliarden Sternen in einer Galaxie, der **Milchstraße**. Unsere Galaxie ist eine von etwa 40 weiteren in der **Lokalen Gruppe**. Die Lokale Gruppe ist ein kleiner Teil

des **Lokalen Superhaufens**, der ein kleiner Teil des **Universums** ist.

► Wie groß ist das Universum?



In einem Maßstab von 1:10 Milliarden hat die Sonne die Größe einer Grapefruit. Die Planeten sind viel kleiner. Die Erde ist in diesem Maßstab so groß wie die Kugel eines Kugelschreibers und

Jupiter hat die Größe einer Marmel. Verglichen mit ihrer Größe sind die Abstände zwischen den Planeten riesig. Die Erde zieht in diesem Maßstab in einer Entfernung von 15 Metern ihre Bahn um die Sonne.

► Wie weit sind die Sterne entfernt?

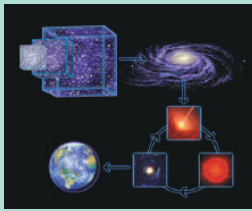
Im Maßstab 1:10 Milliarden kann man in wenigen Minuten von der Sonne zu Pluto laufen. Im selben Maßstab sind die sonnen nächsten Sterne schon einige Tausend Kilometer weit entfernt.

► Wie groß ist die Milchstraße?

Benutzt man einen Maßstab, bei dem die gesamte Milchstraße auf ein Fußballfeld passen würde, dann wären die nächsten Sterne gerade einmal vier Millimeter von uns entfernt. Es gibt so viele Sterne in unserer Milchstraße, dass es Tausende Jahre dauern würde, sie nur zu zählen.

1.2 Die Geschichte des Universums

► Wie sind wir entstanden?



Das Universum begann im **Urknall** und expandiert seit diesem Zeitpunkt. Ausnahmen sind kleine Bereiche, in denen die Gravitation stark genug war, die Materie zu Sternen und Galaxien zu binden. Im Urknall entstanden im Wesentlichen zwei

chemische Elemente: Wasserstoff und Helium. Die restlichen wurden in Sternen erzeugt und von den aufeinanderfolgenden Stern- generationen in den Galaxien recycelt. Deshalb sind wir alle „Ster- nenstaub“.

► Wie lässt sich unsere Lebensspanne mit dem Alter des Universums vergleichen?

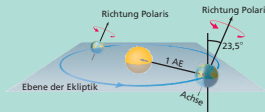


In einem kosmischen Kalender, der die gesamte Geschichte des Universums in einem Jahr dar- stellt, sind alle menschlichen Zivi-

lisationen erst wenige Sekunden alt. Ein Menschenalter dauert nur den Bruchteil einer Sekunde.

1.3 Raumschiff Erde

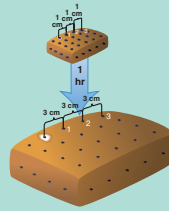
► Wie bewegt sich die Erde durch den Raum?



Die Erde **rotiert** während eines Tages einmal um ihre Achse und **umkreist** während eines Jahres einmal die Sonne. Relativ zu den

Sternen der lokalen Sonnenumgebung scheinen wir uns rein zu- fällig zu bewegen. Unsere Sonne und die anderen Sterne in un- serer Nachbarschaft kreisen im Verlauf von 230 Millionen Jahren einmal um das Zentrum der Milchstraße, weil unsere gesamte alaxie rotiert.

► Wie bewegen sich Galaxien durch das Universum?



Galaxien bewegen sich innerhalb der Lo- kalen Gruppe im Wesentlichen zufällig. Außerhalb der Lokalen Gruppe entfernen sich aber alle Galaxien von uns. Galaxien in größerer Entfernung bewegen sich schnel- ler als nähere, was darauf hindeutet, dass wir uns in einem expandierenden Univer- sum befinden.

1.4 Menschheitsabenteuer Astronomie

► Wie hat die astronomische Forschung die menschliche Geschichte beeinflusst?

Im Verlauf der Geschichte hat sich die Astronomie Hand in Hand mit dem sozialen und technischen Fortschritt entwickelt. Astro- nomie berührt daher jeden von uns und ist ein Menschheits- abenteuer, an dem alle teilnehmen können.

Diese mehrere Stunden lang belichtete Aufnahme zeigt die Strichspuren der Sterne im Arches-Nationalpark in Utah (USA).



Entdecken Sie das Universum selbst

2

2.1	Muster am Nachthimmel	37
	Wie ist der Anblick des Universums von der Erde aus?	37
	Warum gehen Sterne auf und unter?	41
	Warum hängen die sichtbaren Sternbilder von der geografischen Breite und der Jahreszeit ab?	42
2.2	Die Ursache der Jahreszeiten	47
	Was verursacht die Jahreszeiten?	47
	Wie verändert sich die Orientierung der Erdachse im Lauf der Zeit?	53
2.3	Der Mond: Unser ständiger Begleiter	55
	Warum gibt es Mondphasen?	55
	Was verursacht Finsternisse?	59
2.4	Das Planetenrätsel der Antike	65
	Weshalb war die Planetenbewegung am Himmel einst so rätselhaft?	65
	Warum lehnten die alten Griechen die richtige Erklärung für die Planetenbewegung ab?	66
	Überblick	70
	Zusammenfassung	70

Entdecken Sie das Universum selbst

*Wir hatten den Himmel über uns, ganz mit Sternen übersät,
und oft lagen wir auf dem Rücken und sahn zu ihnen hoch
und diskutierten dann darüber,
ob sie erschaffen sind oder einfach so da.*

– Mark Twain, *Huckleberry Finn*

Es sind aufregende Zeiten in der Geschichte der Astronomie. Eine neue Generation von Teleskopen durchmustert die Tiefen des Weltalls. Ausgeklügelte Raumsonden sammeln Daten über die Planeten und andere Objekte unseres Sonnensystems. Die rasanten Fortschritte der Computertechnik ermöglichen Wissenschaftlern, die Unmengen neuer Daten zu verarbeiten und Modelle der Prozesse zu entwickeln, die in Planeten, Sternen, Galaxien und dem Universum ablaufen.

Ein Ziel dieses Buchs besteht darin, Ihnen die Teilnahme am Abenteuer astronomischer Entdeckungen zu erleichtern. Eine der besten Möglichkeiten, an diesem Abenteuer teilzuhaben, besteht darin, das zu tun, was andere Menschen seit Tausenden von Generationen getan haben: Gehen Sie ins Freie, betrachten Sie den Himmel über sich und denken Sie über das Ehrfurcht gebietende Universum nach, in dem Sie leben. In diesem Kapitel diskutieren wir einige der wichtigsten Gedanken, die Ihnen dabei helfen werden zu verstehen, was Sie am Himmel beobachten.

Muster am Nachthimmel

2.1

Für uns ist es eine Selbstverständlichkeit, dass wir auf einem kleinen Planeten leben, der einen gewöhnlichen Stern in einer von vielen Galaxien des Universums umkreist. Doch dieser Umstand ist durch einen gelegentlichen Blick an den Himmel allein nicht zu erfassen. Erst nach langen, sorgfältigen Beobachtungen konnten wir unseren Platz im Kosmos erkennen. In diesem Abschnitt diskutieren wir die wichtigsten Merkmale des Nachthimmels und behandeln dabei einerseits, wie sie sich dem bloßen Auge darbieten, und andererseits, wie wir sie im Licht unseres heutigen Wissens über das Universum verstehen können.

Wie ist der Anblick des Universums von der Erde aus?

Kurz nach Sonnenuntergang, wenn das Tageslicht der Dunkelheit weicht, scheint sich der Himmel allmählich mit Sternen zu füllen. In klaren, mondlosen Nächten sind fernab der Städte über 2000 Sterne zu erkennen, dazu kommt das weiß schimmernde Lichtband, das wir die *Milchstraße* nennen (► Abbildung 2.1). Während Sie den Himmel betrachten, wird Ihr Gehirn die Sterne möglicherweise zu Mustern oder Objekten zusammenfassen, die Ihnen vertraut sind. Wenn Sie den Himmel Nacht für Nacht oder Jahr für Jahr betrachten, werden Ihnen immer wieder dieselben Muster auffallen. Tatsächlich haben sich diese Muster in den letzten Jahrtausenden kaum verändert.



Abbildung 2.1: Dieses Foto zeigt die Milchstraße über dem Krater des Haleakalā auf der hawaiianischen Insel Maui. Der helle Punkt links unterhalb der Verdichtung innerhalb des Milchstraßenbandes ist der Jupiter.

Sternbilder

Nahezu jede menschliche Kultur hat diesen Mustern Namen gegeben. Dasjenige, das die Griechen als Orion, den Jäger, bezeichnet haben (► Abbildung 1.2), war für die alten Chinesen ein überlegener Krieger mit dem Namen *Shen*. Die Hindus des alten Indiens erkannten ebenfalls einen Krieger namens *Skanda*. Er ritt auf einem Pfau und befehligte eine große himmlische Armee. Für die Ureinwohner Nordaustraliens waren die drei Gürtelsterne des Orions drei Fischer in einem Kanu. In Südkalifornien steigen diese drei Sterne im Osten beinahe senkrecht in den Himmel empor. Vielleicht sehen die Chemehuevi-Indianer der kalifornischen Wüste sie deshalb als drei trittsichere Bergschafe. Dies sind nur wenige Beispiele dafür, wie dieses Sternmuster benannt wurde – es gibt noch viele weitere, jeweils mit einer reichen Folklore.

Wir bezeichnen Orion und die anderen Sternmuster am Himmel als Sternbilder, allerdings hat dieser Begriff bei Astronomen eine präzisere Bedeutung: Ein **Sternbild** ist ein *Gebiet* des Himmels mit wohldefinierten Grenzen. So wie jeder Flecken Land in Europa Teil eines Staates ist, gehört jeder Punkt des Himmels zu irgendeinem Sternbild. Als Beispiel zeigt ► Abbildung 2.2 die Gren-



Abbildung 2.2: Blaue Linien zeigen die offiziellen Grenzen von Orion und mehreren benachbarten Sternbildern. Gelbe Linien verbinden auffällige Sternmuster innerhalb der Sternbilder. Sirius, Procyon und Rigel bilden zusammen mit Aldebaran im Stier, Capella im Fuhrmann und Pollux in den Zwillingen ein Muster, das sich über mehrere Sternbilder erstreckt und als Wintersechseck bezeichnet wird. In klaren Winter Nächten ist es leicht zu erkennen.

zen des Sternbilds Orion sowie einige seiner Nachbarn. Die vertrauten Muster der Sterne helfen uns lediglich dabei, diese Sternbilder aufzufinden.

Die offiziellen Grenzen der Sternbilder wurden 1928 gezogen, als die Internationale Astronomische Union (IAU) den Himmel in 88 Sternbilder aufteilte (siehe *Anhang I*). Die IAU wählte damals Sternbildnamen, die den größtenteils europäischen und amerikanischen Astronomen vertraut waren. Die meisten Namen der auf der Nordhalbkugel sichtbaren Sternbilder gehen auf frühe Kulturen des Nahen Ostens zurück. Viele der Sternbilder der südlichen Hemisphäre tragen hingegen offizielle Bezeichnungen, die von den europäischen Entdeckern des 17. Jahrhunderts vergeben wurden.

Sich unter den Sternbildern am Himmel zurechtzufinden, ist nicht schwieriger, als sich in Ihrer Nachbarschaft zurechtzufinden. Wenn Sie 20 Sternbilder erkennen, wird Ihnen schon der ganze Himmel vertraut erscheinen. Am besten lernen Sie die Sternbilder kennen, wenn Sie hinausgehen und sie betrachten; einige Besuche in einem Planetarium, Sternkarten (in digitaler oder gedruckter Form), entsprechende PC-Software oder Apps fürs Handy werden Ihnen dabei helfen.¹

Die Himmelskugel

Die Sterne eines bestimmten Sternbilds scheinen zwar alle sehr nahe beieinanderzustehen, in Wahrheit können sie jedoch weit voneinander entfernt sein, da sie ganz unterschiedliche Entfernungen zur Erde haben können. Die Illusion entsteht, weil uns beim Blick auf den Himmel die Tiefenwahrnehmung fehlt – eine Folge des Umstands, dass die Sterne so weit von der Erde entfernt sind (*Abschnitt 1.1*). Die alten Griechen haben diese Illusion fälschlicherweise für wahr gehalten; für sie befanden sich die Sterne auf einer großen Himmelskugel (oder Himmelsphäre), welche die Erde umgibt (► *Abbildung 2.3*).

Heute wissen wir natürlich, dass die Erde nicht im Zentrum einer riesigen Sternenkugel liegt, benutzen dieses Bild aber immer noch, um uns am Himmel zu orientieren und ihn zu kartieren. Vier besondere Punkte und Kreise dienen uns dabei als Referenz:

- Der **Himmelsnordpol** ist der Punkt direkt oberhalb des irdischen Nordpols.
- Der **Himmelssüdpol** ist der Punkt direkt oberhalb des irdischen Südpols.

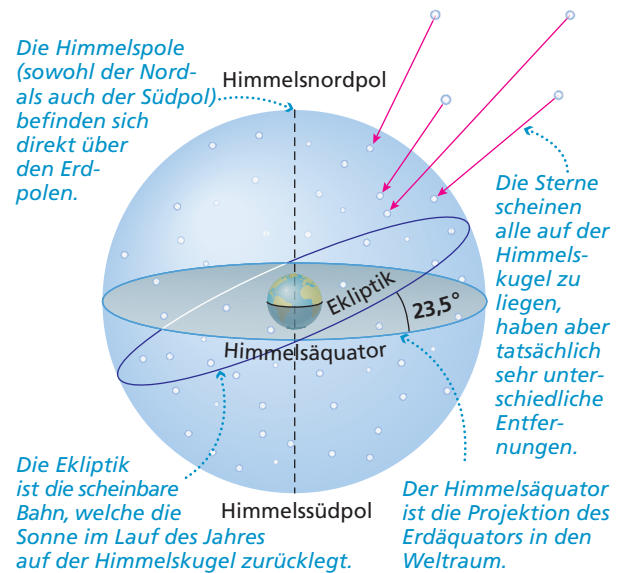


Abbildung 2.3: Diese schematische Darstellung der Himmelskugel zeigt die wichtigsten Referenzpunkte und Kreise. Die Illusion, dass die Sterne sich auf einer Kugel befinden, ergibt sich aufgrund der fehlenden Tiefenwahrnehmung.

- Der **Himmelsäquator**, eine Projektion des Erdäquators an den Himmel, bildet einen kompletten Kreis am Himmel.
- Die **Ekliptik** ist die Linie, der die Sonne während ihres scheinbaren Umlaufs um den Himmel im Verlauf eines Jahres folgt. Sie kreuzt den Himmelsäquator in einem Winkel von $23,5^\circ$, denn dies ist die Neigung der Erdachse.

So wie uns ein Globus ein Bild der Erdoberfläche gibt, zeigt ein Modell der Himmelskugel, wie die Sterne am Himmel angeordnet sind. Ein typisches Modell zeigt die Muster von hellen Sternen, die Grenzen der 88 offiziellen Sternbilder, die Himmelspole, den Himmelsäquator und die Ekliptik (► *Abbildung 2.4*).

Die Milchstraße

Unsere Heimatgalaxie (auch Galaxis genannt) hat ihren Namen von dem schwach leuchtenden Band am Himmel, das als *Milchstraße* bezeichnet wird. Die Milchstraße zieht sich um die ganze Himmelskugel und durchquert über ein Dutzend Sternbilder, daher können wir immer nur einen Teil von ihr sehen. Die breitesten und hellsten Teile der Milchstraße sind von der südlichen Erdhalbkugel aus am leichtesten zu erkennen. Vielleicht haben deshalb die australischen Ureinwohner den Heli- und Dunkelwolken der Milchstraße genauso Namen gegeben wie andere Kulturen den Sternmustern.

¹ Der Klassiker: Stellarium, die kostenfreie Planetariumssoftware für alle Betriebssysteme, <https://stellarium.org/de/>.

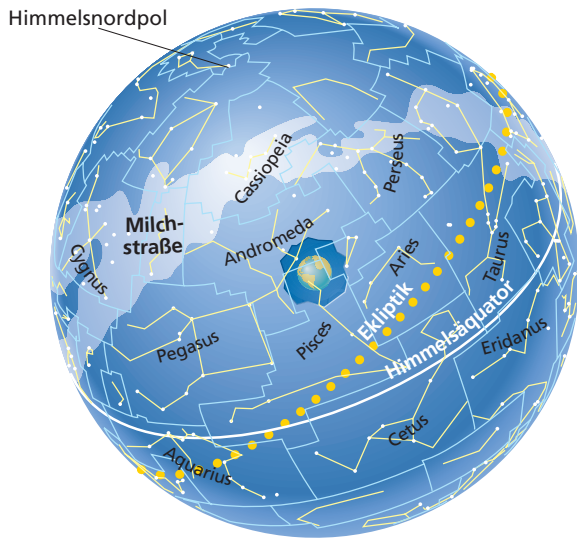


Abbildung 2.4: Die Himmelskugel mit Sternen und Sternbildern, die die Erde umgibt, ist ein Modell, dass uns bei der Kartierung des Himmels hilft.

Das Band der Milchstraße ist auf besondere Weise mit der Galaxie namens Milchstraße verbunden: Es zeigt, wie die Sternscheibe unserer Galaxie – die galaktische Ebene – von unserem Standpunkt innerhalb der Galaxis aus aussieht. ► Abbildung 2.5 zeigt, was gemeint ist. Unsere Galaxie hat die Form eines Pfannkuchens, dessen Mitte ausgebeult ist. Wir beobachten das Universum von einem Punkt aus, der mehr als den halben Radius vom Zentrum des „Pfannkuchens“ entfernt ist. Egal, in welche Richtung wir *innerhalb* dieser Scheibe blicken, wir sehen zahllose Sterne und riesige Wolken aus interstellarem Gas und Staub. Diese Sterne und Wolken bilden am Nachthimmel das Band der Milchstraße. Blicken wir in Richtungen von der galaktischen Scheibe weg, dann sehen wir weniger Sterne und relativ wenig Gas und Staub. In diesen Richtungen – in ► Abbildung 2.5 durch weiße Pfeile dargestellt – haben wir einen ungetrübten Blick in die Tiefen des Universums, sofern wir dafür leistungsfähige Teleskope einsetzen.

Bei klarem Nachthimmel können Sie erkennen, dass die Breite der Milchstraße variiert und dass sie von dunklen Streifen durchzogen ist. Die breiteste Stelle befindet sich im Sternbild Sagittarius (Schütze), weil wir dort in die zentrale Verdichtung blicken. Die dunklen Streifen treten dort auf, wo relativ dichte interstellare Wolken unseren Blick auf die dahinterliegenden Sterne verdecken. Das in der Milchstraße häufige Gas und der Staub verhindern, dass wir mehr als einige Tausend Lichtjahre in die Scheibe unserer Galaxie hineinblicken können. Wegen dieser Begrenzung blieb bis



Abbildung 2.5: Die Zeichnung zeigt, wie die Struktur unserer Galaxie unseren Blick von der Erde aus beeinflusst.

vor einigen Jahrzehnten ein großer Teil unserer Galaxie unseren Blicken verborgen. Seither haben wir mit neuen Technologien die Wolken durchdrungen, indem wir für das Auge unsichtbare Lichtarten beobachteten (wie Radiowellen und Röntgenstrahlung, siehe *Abschnitt 5.2*).

Zum Nachdenken

Stellen Sie sich eine entfernte Galaxie vor, die in derselben Richtung liegt wie das galaktische Zentrum (aber viel weiter entfernt ist). Könnten wir sie mit Teleskopen für sichtbares Licht beobachten? Warum bzw. warum nicht?

Der Himmel über uns

Die Himmelskugel ist ein gutes Hilfsmittel, um sich das Erscheinungsbild des Universums, von der Erde aus gesehen, vorzustellen. Wenn wir vor die Tür gehen, sehen wir aber etwas anderes. Stellen Sie sich vor, Sie stehen auf einem flachen, offenen Feld. Der Himmel scheint die Form einer Kuppel zu haben; es ist leicht zu verstehen, warum viele frühe Kulturen dachten, die Erde wäre flach und befände sich unter einer großen Kuppel, welche die Welt überdeckt. An jedem beliebigen Ort und zu jeder beliebigen Zeit sehen Sie nur die Hälfte der Himmelskugel, weil die andere Hälfte vom Boden verdeckt wird. Die Hälfte der Himmelskugel, die Sie zu einem beliebigen Zeitpunkt sehen können, ist der **Himmel über uns** (der *lokale Himmel*) – der Himmel, so wie er sich an Ihrem Standort zeigt.

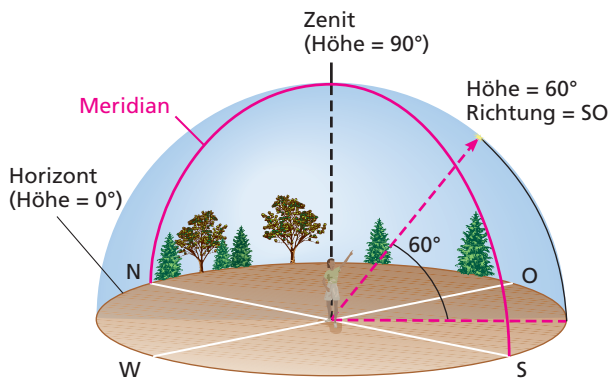


Abbildung 2.6: An jedem Ort der Erde erscheint der Himmel wie eine Kuppel (eine Halbkugel). Die Zeichnung zeigt wichtige Referenzpunkte am Himmel. Sie zeigt auch, wie wir eine beliebige Position am Himmel durch ihre Höhe und Richtung kennzeichnen können.

► Abbildung 2.6 zeigt die wesentlichen Merkmale des lokalen Himmels. Die Grenze zwischen Erde und Himmel definiert den **Horizont**. Der Punkt direkt über uns ist der **Zenit**. Der **Meridian** ist ein gedachter Halbkreis, der genau vom Südpunkt am Horizont durch den Zenit genau zum Nordpunkt am Horizont verläuft.

Wir können die Position jedes Punkts am Himmel festlegen, indem wir die **Richtung** am Horizont sowie die **Höhe** (den Höhenwinkel) über dem Horizont angeben. Die Richtung, oft als *Azimet* bezeichnet, ist der genau von Norden aus im Uhrzeigersinn gemessene Winkel. ► Abbildung 2.6 zeigt beispielsweise einen Menschen, der auf einen Stern in südöstlicher Richtung in einer Höhe von 60° deutet. Beachten Sie, dass zum Zenit die Höhe 90° , aber keine Richtung gehört, denn er befindet sich direkt über dem Menschen.

Winkelgrößen und -entfernungen

Weil wir an der Himmelskugel keine Tiefenwahrnehmung haben, können wir keinerlei Aussagen über die wahre Größe oder den Abstand der am Himmel sichtbaren Objekte machen. Allerdings können wir die *Winkelgrößen* oder die *Winkelabstände* von Objekten angeben, selbst wenn wir nicht wissen, wie weit sie entfernt sind.

Die **Winkelausdehnung** eines Objekts ist der Winkel, den dieses Objekt in Ihrem Gesichtsfeld einzunehmen scheint. Die Winkelausdehnungen von Sonne und Mond betragen beispielsweise jeweils etwa $0,5^\circ$ (► Abbildung 2.7a). Beachten Sie, dass die Winkelausdehnung eines Objekts nichts über die wahre Größe eines Objekts aussagt, weil die Winkelausdehnung auch von der Entfernung abhängt: Je weiter das Objekt entfernt ist, desto geringer ist seine Winkelausdehnung. Die Sonne

ist z. B. 400-mal größer als der Mond, hat aber etwa dieselbe Winkelausdehnung, weil sie auch etwa 400-mal weiter entfernt ist als der Mond.

Der **Winkelabstand** zweier Objekte am Himmel ist der Winkel, der die beiden zu trennen scheint. So beträgt beispielsweise der Winkelabstand der beiden „Zeigersterne“ vom Kasten des Großen Wagens etwa 5° und das Kreuz des Südens erstreckt sich über etwa 6° (► Abbildung 2.7b). Mit Ihrem ausgestreckten Arm und Ihrer Hand können Sie grob die Winkel am Himmel abschätzen (► Abbildung 2.7c).

Für präzisere astronomische Messungen unterteilen wir jedes Grad in 60 Bogenminuten und jede Bogenminute weiter in 60 Bogensekunden (► Abbildung 2.8). Bogenminuten werden mit dem Symbol ' und Bogensekunden mit " gekennzeichnet. Beispielsweise wird die Größe $35^\circ 27' 15''$ als „35 Grad, 27 Bogenminuten und 15 Bogensekunden“ gesprochen.

Zum Nachdenken

Kinder versuchen oft, die Größe eines Objekts am Himmel (wie der Mond oder ein Flugzeug) in Zentimetern oder Kilometern anzugeben, oder indem sie die Finger spreizen und sagen „es war 500 groß“. Können wir Objekte wirklich auf diese Art beschreiben? Warum oder warum nicht?

Häufige Irrtümer

Die Mondtäuschung

Sie haben sicher schon bemerkt, dass der Vollmond, wenn er sich in der Nähe des Horizonts befindet, größer erscheint, als wenn er hoch am Himmel steht. Diese scheinbare Größenänderung ist eine Illusion. Wenn Sie die Winkelausdehnung des Vollmonds in einer beliebigen Nacht messen, werden Sie feststellen, dass sie sich nicht ändert, wenn der Mond am Horizont oder am Himmel steht. Die Winkelgröße des Monds am Himmel hängt nur von seiner wahren Größe und seiner Entfernung von der Erde ab. Obwohl sich diese Entfernung im Lauf der monatlichen Umlaufbahn des Monds ändert, hat dies keine bemerkbaren Auswirkungen auf die Winkelgröße in einer beliebigen Nacht. Sie können sich überzeugen, dass die Winkelausdehnung des Monds gleich bleibt, indem Sie sie messen. Sie können aber die Illusion auch überlisten, indem Sie den am Horizont stehenden Mond kopfüber ansehen (z. B. indem Sie sich vorbeugen und den Mond durch Ihre Beine hindurch betrachten).

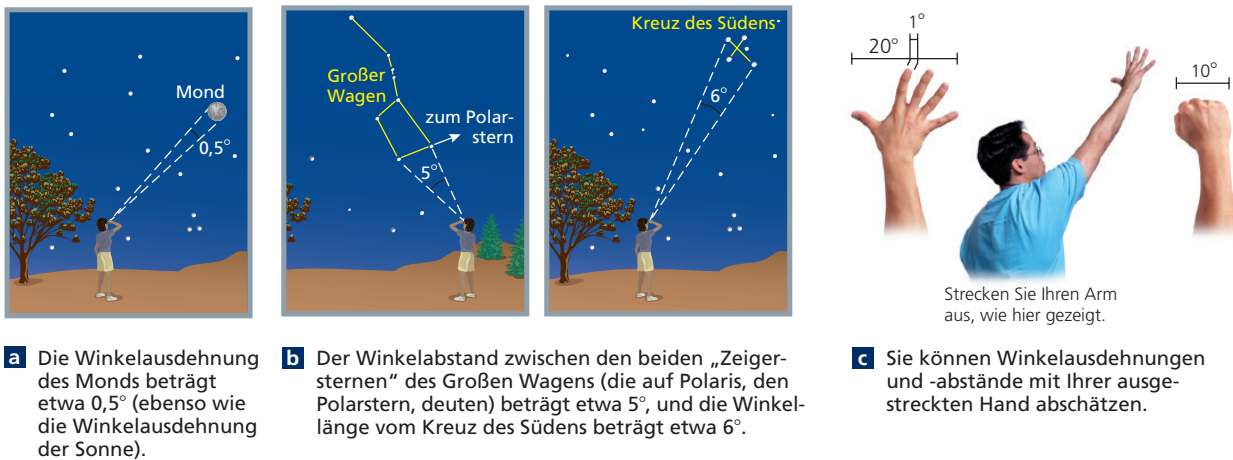


Abbildung 2.7: Beim Betrachten von Objekten am Himmel messen wir statt tatsächlicher Größen und Entfernungen Winkelausdehnungen und Winkelabstände.

Warum gehen Sterne auf und unter?

Wenn Sie einige Stunden unter dem Sternhimmel verbringen, stellen Sie fest, dass das Universum sich um uns zu drehen scheint, wobei die Sterne allmählich von Ost nach West über den Himmel wandern. In früheren Zeiten hielten viele Menschen diese scheinbare Bewegung für real und nahmen an, dass wir uns im Zentrum eines Universums befinden, das sich jeden Tag um uns dreht. Heute wissen wir, dass unsere Vorfahren falsch herum dachten: Die Erde dreht sich, nicht der Rest des Universums, und deshalb bewegen sich Sonne, Mond, Planeten und Sterne jeden Tag über den Himmel.

Wir können uns die Bewegung des Himmels mit der Vorstellung verdeutlichen, dass die Himmelskugel um die Erde rotiert (► Abbildung 2.9). So betrachtet scheint sich das Universum um uns zu drehen: Jedes Objekt an der Himmelskugel scheint im Lauf eines Tags einen einfachen Kreis am Himmel zu vollführen. Die Bewegung kann jedoch am lokalen Himmel etwas komplexer

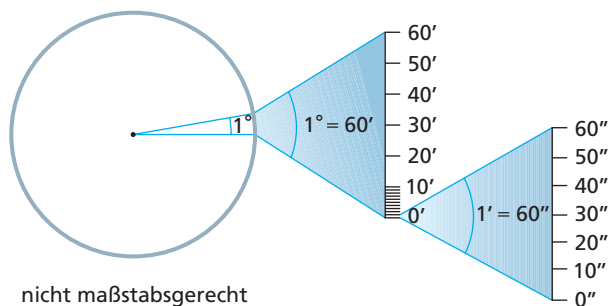


Abbildung 2.8: Jedes Grad wird in 60 Bogenminuten und jede Bogenminute in 60 Bogensekunden unterteilt.

erscheinen, weil der Horizont die Himmelskugel in der Mitte halbiert. ► Abbildung 2.10 beschreibt die Situation für einen typischen Ort auf der Nordhalbkugel der Erde bei 40° nördlicher Breite (entspricht Teilen der USA, Spaniens, Italiens, Chinas und Japans). Wenn Sie die Abbildung sorgfältig betrachten, werden Sie die folgenden wichtigen Fakten bezüglich der Bahnen verschiedener Sterne (und anderer Himmelsobjekte) an Ihrem lokalen Himmel feststellen:

- Sterne, die sich nahe am Himmelsnordpol befinden, bleiben ständig über dem Horizont. Sie gehen niemals auf oder unter, sondern bewegen sich vielmehr auf täglichen Kreisen gegen den Uhrzeigersinn um den Himmelsnordpol. Wir nennen solche Sterne **zirkumpolar**.

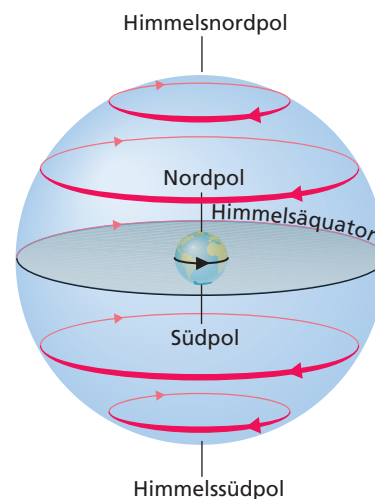


Abbildung 2.9: Die Erde rotiert von West nach Ost (schwarzer Pfeil), wodurch die Himmelskugel von Ost nach West zu rotieren scheint.

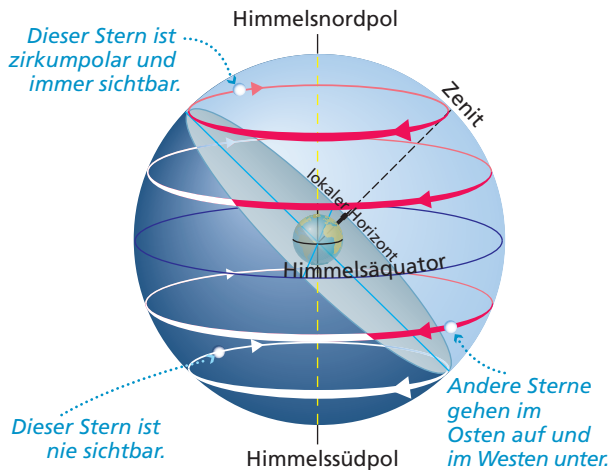


Abbildung 2.10: Der lokale Himmel für einen typischen Ort auf der Nordhalbkugel der Erde. Der Horizont schneidet unter einem Winkel durch die Himmelskugel; dadurch scheinen die täglichen Kreisbahnen der Sterne am Himmel geneigt zu sein. *Hinweis:* Wenn Sie die Seite so drehen, dass der Zenit nach oben weist, können Sie die Bahnen der Sterne leichter erkennen.

- Sterne, die sich nahe am Himmelssüdpol befinden, steigen niemals über den Horizont.
- Alle anderen Sterne bewegen sich auf täglichen Kreisen, die teilweise über und teilweise unter dem Horizont liegen. Weil die Erde von Westen nach Osten rotiert (vom Nordpol aus gesehen gegen den Uhrzeigersinn), scheinen die Sterne im Osten auf- und im Westen unterzugehen.

Die Langzeitaufnahme am Beginn dieses Kapitels (S. 34) zeigt einen Teil des täglichen Wegs, den die Sterne zurücklegen. Die Strichspuren der zirkumpolaren Sterne sind innerhalb des Felsbogens zu erkennen. Beachten Sie, dass der vollständige Tagesbogen dieser Sterne oberhalb des Horizonts liegt (obwohl das Foto nur einen Teil dieser Kreise zeigt). Der Himmelsnordpol liegt im Zentrum dieser Kreise. Je weiter die Sterne vom Nordpol entfernt sind, desto größer werden die Bögen. Wenn sie groß genug sind, überqueren die Kreise den Horizont, sodass die Sterne im Osten aufgehen und im Westen untergehen. Dasselbe gilt für die Südhalbkugel, nur dass sich dort die zirkumpolaren Sterne

Zum Nachdenken

Gehen entfernte Galaxien ebenso auf und unter wie die Sterne an unserem Himmel? Warum oder warum nicht?

Häufige Irrtümer

Sterne am Taghimmel

Sterne scheinen während des Tages zu verschwinden und am Abend „herauszukommen“, dabei sind die Sterne in Wirklichkeit ständig am Himmel. Ihre Augen können die Sterne am Tag jedoch nicht sehen, weil ihr schwaches Licht durch den hell erleuchteten Taghimmel überdeckt wird. Mithilfe eines Teleskops *kann* man helle Sterne aber auch am Tag sehen. Sie können am Taghimmel auch dann Sterne sehen, wenn Sie das Glück haben, eine totale Sonnenfinsternis zu erleben. Auch ein Astronaut sieht Sterne am Tag. Oberhalb der Erdatmosphäre, wo es keine Luft gibt, die das Sonnenlicht am Himmel streut, ist die Sonne eine helle Scheibe vor einem dunklen, sternübersäten Himmel. (Weil aber die Sonne so hell ist, muss ein Astronaut ihr Licht abdecken und seine Augen an die Dunkelheit anpassen, wenn er die Sterne sehen will.)

in der Nähe des Himmelssüdpols befinden und sich im Uhrzeigersinn und nicht mehr gegen den Uhrzeigersinn bewegen.

Warum hängen die sichtbaren Sternbilder von der geografischen Breite und der Jahreszeit ab?

Wenn Sie an einem Ort bleiben, verändert sich das grundlegende Bewegungsmuster am Himmel während aufeinanderfolgender Nächte kaum. Wenn Sie allerdings weit in den Norden oder den Süden reisen, werden Sie am Himmel ganz andere Sternbilder sehen als zu Hause. Und selbst vom selben Ort aus sehen Sie zu unterschiedlichen Zeiten des Jahres unterschiedliche Sternbilder. Untersuchen wir, warum.

Veränderung mit der Breite

Um nachvollziehen zu können, warum wir andere Sternbilder sehen, wenn wir nach Norden oder Süden reisen, müssen wir uns zuerst in Erinnerung rufen, wie wir einen Punkt auf der Erdoberfläche festlegen (► Abbildung 2.11 a). Die **geografische Breite** (Latitude) misst die Nord-Süd-Position auf der Erde. Sie ist per Definition am Äquator 0° und nimmt nach Norden bzw. Süden zu. Nordpol und Südpol haben die Breite 90° N bzw. 90° S. Beachten Sie, dass die Breitenkreise gedachte Kreise sind, die parallel zum Äquator verlaufen und damit zu den sogenannten Kleinkreisen zählen. Mit der **geografischen Länge** (Longitude) wird die Ost-West-Position gemessen. Die Längengrade sind Halbkreise vom Nordpol bis zum Südpol und liegen

MATHEMATISCHE EINBLICKE 2.1

Winkelausdehnung, tatsächliche Ausdehnung und Entfernung



Wenn Sie ein Fünfcentstück direkt vor Ihr Auge halten, kann es Ihr Gesichtsfeld vollständig verdecken. Aber sobald Sie es weiter weghalten, scheint es kleiner zu werden und verdeckt viel weniger Ihres Gesichtsfelds. ► Abbildung (a) illustriert dieses Verhalten: Ganz offensichtlich ändert sich die wahre Größe der Münze nicht, ihr *Winkeldurchmesser* aber durchaus.

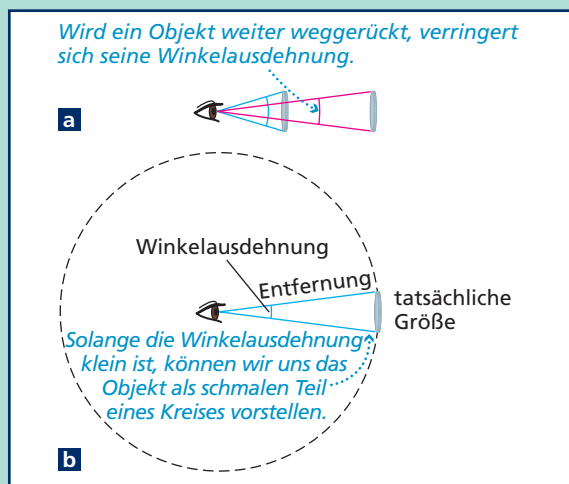
► Abbildung (b) zeigt, wie der Winkeldurchmesser eines Objekts von seiner physischen Größe und der Entfernung abhängt. Solange der Winkeldurchmesser der Münze relativ klein ist (also höchstens wenige Grad beträgt), können wir so tun, als wäre die physische Größe der Münze (ihr Durchmesser) ein kleiner Teil des von uns gezeichneten Kreises. Zwischen der physischen Größe von Münze und Kreis herrscht dasselbe Größenverhältnis wie zwischen der Winkelausdehnung der Münze und dem vollen Umfang (360°) des Kreises. Da der Umfang dieses Kreises $2 \cdot \pi \cdot (\text{Entfernung})$ beträgt, können wir unser Ergebnis folgendermaßen formulieren:

$$\frac{\text{Winkeldurchmesser}}{360^\circ} = \frac{\text{physische Größe}}{2 \pi \cdot \text{Entfernung}}$$

Nun multiplizieren wir beide Seiten mit 360° und formen etwas um. Damit haben wir eine Formel, mit der wir die Winkelausdehnung bestimmen können, sofern wir die physische Größe und die Entfernung kennen:

$$\text{Winkeldurchmesser} = \text{physische Größe} \cdot \frac{360^\circ}{2 \pi \cdot \text{Entfernung}}$$

Diese Formel wird als **Näherung für kleine Winkel** bezeichnet, weil sie nur gilt, wenn die Winkelausdehnung klein ist. In der Astronomie messen wir üblicherweise die Winkelausdehnung eines Objekts und haben oft eine Möglichkeit, die Entfernung zu bestimmen (die Methoden zur Entfernungsbestimmung lernen wir in späteren Kapiteln kennen).



Die Winkelausdehnung hängt von der tatsächlichen Größe und der Entfernung ab.

Beispiel 1: Die beiden Frontscheinwerfer eines Wagens, der sich in 500 m Entfernung befindet, sind 1,5 Meter voneinander entfernt. Wie groß ist der Winkelabstand der beiden Scheinwerfer?

Lösung:

Analysieren: In diesem Fall fragen wir nach dem Abstand der beiden Lichter, nicht nach ihrer Größe, allerdings bleibt der Grundgedanke der gleiche. Wir ersetzen in den untenstehenden Formeln einfach Größe durch Abstand und haben bereits alle Informationen, die wir zur Lösung der Aufgabe benötigen.

Lösen: Weil wir in diesem Fall den physischen Abstand und die Entfernung kennen, benutzen wir

$$\begin{aligned} \text{Winkelabstand} &= \text{physischer Abstand} \cdot \frac{360^\circ}{2 \pi \cdot \text{Abstand}} \\ &= 1,5 \text{ m} \cdot \frac{360^\circ}{2 \pi (500 \text{ m})} = 0,17^\circ \end{aligned}$$

Erläutern: Wir haben festgestellt, dass der Winkelabstand der beiden Scheinwerfer $0,17^\circ$ beträgt. Beachten Sie allerdings, dass Bruchteile eines Grads üblicherweise in Bogenminuten oder Bogensekunden angegeben werden. Da 60 Bogenminuten 1° sind, entsprechen die $0,17^\circ$ unseres Ergebnisses $0,17^\circ \cdot 60 \text{ Bogenminuten}/1^\circ = 10,2 \text{ Bogenminuten}$. Mit anderen Worten: Der Winkelabstand der Scheinwerfer beträgt etwa 10 Bogenminuten, also etwa ein Drittel der 30 Bogenminuten ($0,5^\circ$) des Winkeldurchmessers des Mondes.

Beispiel 2: Der Winkeldurchmesser des Mondes beträgt etwa $0,5^\circ$ und der Mond befindet sich in etwa 380 000 km Entfernung. Bestimmen Sie den tatsächlichen Durchmesser des Mondes.

Lösung:

Analysieren: Wir sollen den tatsächlichen Durchmesser des Mondes aus seinem Winkeldurchmesser und der Entfernung bestimmen. Dazu formen wir die Formel nach der physischen Größe um, indem wir beide Seiten mit $2 \pi \cdot \text{Entfernung} / 360^\circ$ multiplizieren.

Lösen: Wir berechnen nun mithilfe der Formel die physische Größe (den Durchmesser) des Mondes aus den gegebenen Werten für Winkelausdehnung und Entfernung:

$$\begin{aligned} \text{physische Größe} &= \text{Winkelabstand} \cdot \frac{2 \pi \cdot \text{Entfernung}}{360^\circ} \\ &= 0,5^\circ \cdot \frac{2 \pi (380\,000 \text{ km})}{360^\circ} \\ &\approx 3300 \text{ km} \end{aligned}$$

Erläutern: Wir haben festgestellt, dass der Monddurchmesser etwa 3300 km beträgt. Ob unsere Antwort sinnvoll ist, können wir anhand des Werts für den Monddurchmesser aus *Anhang E* überprüfen. Unsere Schätzung von 3300 km

liegt ziemlich dicht an dem tatsächlichen Monddurchmesser von 3476 km. Mit genaueren Werten für den Winkeldurchmesser und die Entfernung des Monds hätten wir diesen Wert ebenfalls erhalten.

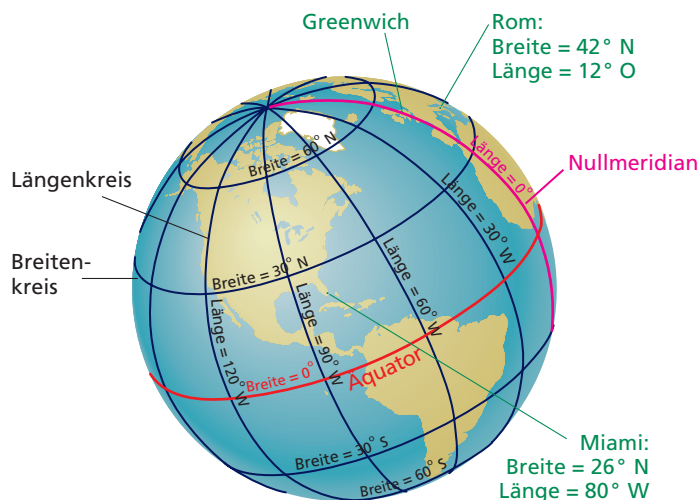
entlang von Großkreisen. Aufgrund internationaler Verträge wird der durch Greenwich in England verlaufende Längengrad als 0° Länge definiert. Diese Linie bezeichnet man als den **Nullmeridian** (► Abbildung 2.11b). Durch Angabe einer Länge und einer Breite wird eine Position auf der Erde festgelegt. So liegt beispielsweise Rom etwa bei der Breite 42° N und der Länge 12° E, Miami in Florida befindet sich bei der Breite 26° N und 80° W.

Ein nochmaliger Blick auf ► Abbildung 2.10 verdeutlicht, warum sich die sichtbaren Sternbilder mit der Breite verändern. Betrachten wir eine Person auf der Erde, die zum Zenit schaut. Verschieben wir die Person zu einer anderen Breite, verschiebt sich die Lage ihres Horizonts und Zenits auf der Himmelskugel. ► Abbildung 2.12 zeigt für den Nordpol (90° N) und für Sydney in Australien (34° S), wie der lokale Sternhimmel relativ zur Himmelskugel liegt.

Beachten Sie, dass der Himmel sich zwar mit der Breite verändert, *nicht* aber mit der Länge. Charleston

(in South Carolina) und San Diego (in Kalifornien) befinden sich beispielsweise auf demselben Breitengrad, daher sehen die Menschen in beiden Städten bei Nacht dieselben Sternbilder. (Da sich die Städte aber in unterschiedlichen Zeitzonen befinden, beginnt die Nacht in Charleston drei Stunden früher als in San Diego.)

Wenn Sie Grafiken wie die in ► Abbildung 2.10 und ► Abbildung 2.12 sorgfältig betrachten, können Sie viele Eigenschaften des Himmels erkennen. So sind beispielsweise vom Nordpol aus gesehen alle Sterne zirkumpolar; zudem können Sie von dort nur die Sterne der nördlichen Hälfte der Himmelskugel sehen. Dies erklärt, warum die Sonne am Nordpol sechs Monate oberhalb des Horizonts bleibt: Die Sonne befindet sich dort ein halbes Jahr lang auf der Nordhälfte der Himmelskugel (beachten Sie die gelben Punkte in ► Abbildung 2.4, welche die Sonne darstellen), daher muss sie in diesen sechs Monaten jeden Tag den nördlichen Himmelspol umkreisen, genau wie ein Zirkumpolarstern.



a Die Breite gibt den Winkelabstand vom Äquator nach Norden oder Süden an. Die Länge ist ein Maß für den Winkelabstand östlich bzw. westlich des Nullmeridians, der durch Greenwich in England verläuft.



b Der Eingang des alten königlichen Observatoriums in Greenwich bei London. Die Linie vor der Tür zeigt die Lage des Nullmeridians.

Abbildung 2.11: Wir können jeden Ort der Erdoberfläche durch Angabe von geografischer Länge und Breite festlegen.

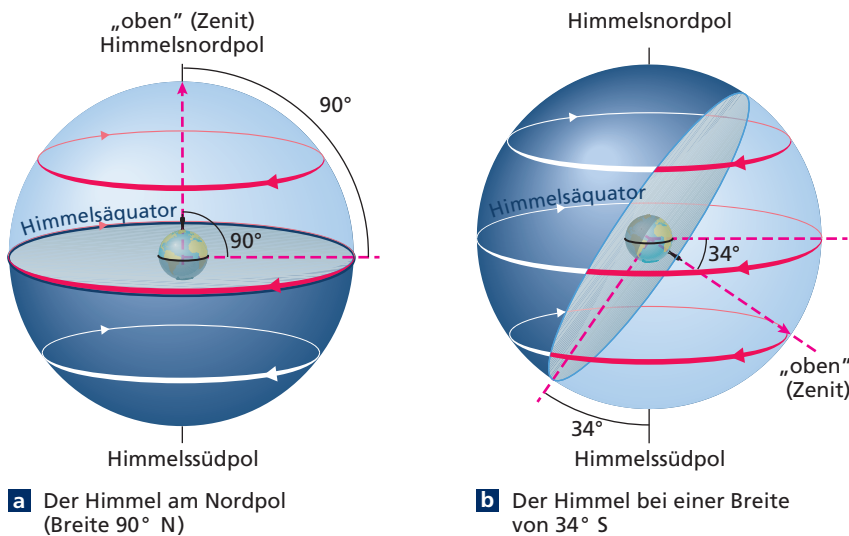


Abbildung 2.12: Der Himmel verändert sich mit der geografischen Breite. Beachten Sie, dass die Höhe des Himmelspols, der an Ihrem Himmel sichtbar ist, immer gleich der Breite an Ihrem Ort ist.

Die Grafiken zeigen zudem eine für die Navigation äußerst wichtige Tatsache:

Die Höhe des an Ihrem Himmel sichtbaren Himmelspols hat denselben Wert wie Ihre geografische Breite.

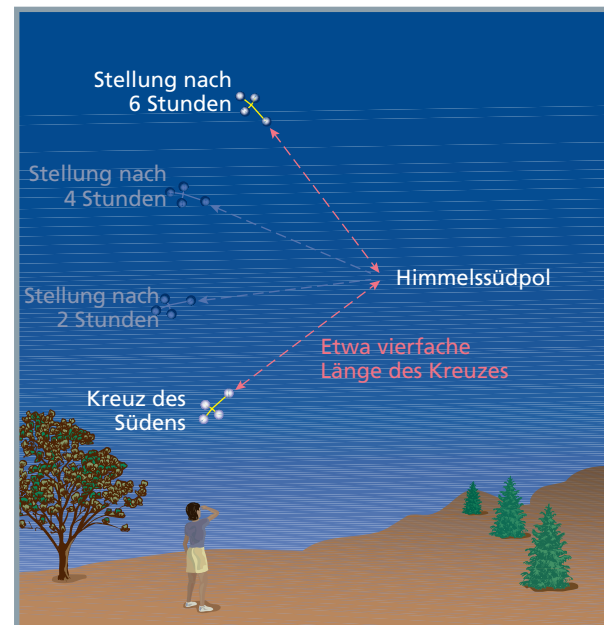
Befindet sich der Himmelsnordpol an Ihrem Standort in einer Höhe von 40° oberhalb des nördlichen Horizonts, dann beträgt Ihre geografische Breite 40° N.

Befindet sich der Himmelssüdpol an Ihrem Standort in einer Höhe von 34° oberhalb des südlichen Horizonts, dann beträgt Ihre geografische Breite 34° S. Sie können also Ihre Breite einfach dadurch bestimmen, indem Sie den Himmelspol suchen. Das ist für den Himmelsnordpol sehr einfach, denn er liegt in der Nähe des Sterns Polaris, dem Polarstern (► Abbildung 2.13 a). Auf der



Blick nach Norden

a Am Nordhimmel zeigen die beiden Zeigersterne des Großen Wagens auf den Polarstern, der knapp 1° vom Himmelsnordpol entfernt liegt. Beachten Sie, dass sich der Himmel gegen den Uhrzeigersinn um den Himmelsnordpol zu drehen scheint.



Blick nach Süden

b Am Südhimmel zeigt das Kreuz des Südens auf den Himmelssüdpol, an dem sich kein heller Stern befindet. Der Himmel scheint sich im Uhrzeigersinn um den Himmelssüdpol zu drehen.

Abbildung 2.13: Sie können Ihre geografische Breite feststellen, indem Sie die Höhe des an Ihrem Himmel sichtbaren Himmelspols messen.

SEHEN SIE SELBST

Gehen Sie von ► Abbildung 2.14 und dem heutigen Datum aus. In welchem Sternbild befindet sich derzeit die Sonne? Welches Sternbild des Tierkreises wird sich um Mitternacht auf dem Meridian befinden? Welches Tierkreiszeichen werden Sie im Westen kurz nach Sonnenuntergang sehen? Gehen Sie nachts hinaus und überprüfen Sie Ihre Antworten.

Häufige Irrtümer**Warum ist der Polarstern etwas Besonderes?**

Den meisten Menschen ist bewusst, dass der Polarstern (Polaris) ein besonderer Stern ist. Anders als häufig angenommen ist Polaris aber nicht der hellste Stern am Himmel. Über 50 andere Sterne sind entweder bedeutend heller oder beinahe so hell. Polaris ist etwas Besonderes, weil er sich so nahe am Himmelsnordpol befindet. Diese Position macht ihn für die Navigation äußerst wertvoll, denn er befindet sich fast genau im Norden, und seine Höhe entspricht daher fast genau der geografischen Breite.

Die Ursache der Jahreszeiten

2.2

Wir haben gesehen, wie der Himmel aufgrund der Erdrotation um uns zu kreisen scheint und wie der Nachthimmel sich während des Umlaufs der Erde um die Sonne verändert. Die Kombination aus Erdrotation und Umlauf um die Sonne führt zudem zum Wechsel der Jahreszeiten. In diesem Abschnitt werden wir den Grund für die Jahreszeiten kennenlernen.

Was verursacht die Jahreszeiten?

Sie kennen natürlich die jahreszeitlichen Veränderungen, wie etwa längere und wärmere Tage im Sommer und kürzere und kühlere Tage im Winter. Warum aber gibt es die Jahreszeiten überhaupt? Die Antwort liegt in der Neigung der Erdachse. Ihretwegen fällt das Sonnenlicht zu verschiedenen Zeiten des Jahres unterschiedlich auf die Erde. ► Abbildung **KOSMISCHER KONTEXT** 2.15 verdeutlicht diesen Gedanken.

Schritt 1 zeigt, dass die Erdachse das ganze Jahr über in dieselbe Richtung in den Weltraum zeigt (nämlich auf Polaris). Deshalb verändert sich während eines Sonnenumschlufs die Orientierung der Achse *in Bezug auf die Sonne*. Die Nordhalbkugel ist im Juni der Sonne zugeneigt und im Dezember von der Sonne weggeneigt. Für die Südhalbkugel ist es genau umgekehrt. Aus diesem Grund herrscht auf den beiden Erdhalbkugeln jeweils die entgegengesetzte Jahreszeit. Der Rest der Abbildung zeigt, wie der sich ändernde Einfallswinkel der Sonnenstrahlen auf beiden Hemisphären unmittelbar zu Jahreszeiten führt.

Schritt 2 zeigt die Erde im Juni, wenn die Neigung der Erdachse dafür sorgt, dass das Sonnenlicht unter einem steileren Winkel auf die Nordhalbkugel und unter einem

flacheren Winkel auf die Südhalbkugel trifft. Der steilere Einfallswinkel sorgt aus zwei Gründen für Sommer auf der Nordhalbkugel: Zum einen führt er, wie in der Nahaussicht dargestellt, zu einer Konzentration des Sonnenlichts, sodass es wärmer wird. Des Weiteren müssen Sie sich vorstellen, was passiert, wenn sich die Erde dreht. Der steilere Einfallswinkel führt dann dazu, dass die Bahn der Sonne am Himmel während des Sommers länger und höher ist; deshalb hat die Nordhalbkugel mehr Sonnenstunden und somit hat die Sonne mehr Zeit, sie zu erwärmen. Zur selben Zeit passiert auf der Südhalbkugel das Gegenteil: Der flache Einfallswinkel der Sonnenstrahlen sorgt für Winter, da das Sonnenlicht weniger stark konzentriert ist und die Sonne einer kürzeren und niedrigeren Bahn am Himmel folgt.

Der Einfallswinkel des Sonnenlichts ändert sich langsam, während die Erde die Sonne umkreist. Auf der gegenüberliegenden Seite der Erdumlaufbahn zeigt Schritt 4, dass es auf der Nordhalbkugel Winter und auf der Südhalbkugel Sommer geworden ist. Zwischen diesen beiden Extremen liegt Schritt 3, wenn im März und im September beide Hemisphären gleichermaßen beleuchtet sind. Es ist also Frühling in der Hemisphäre, die sich auf dem Weg vom Winter zum Sommer befindet, und Herbst für die Hemisphäre, die sich auf dem Weg vom Sommer zum Winter befindet.

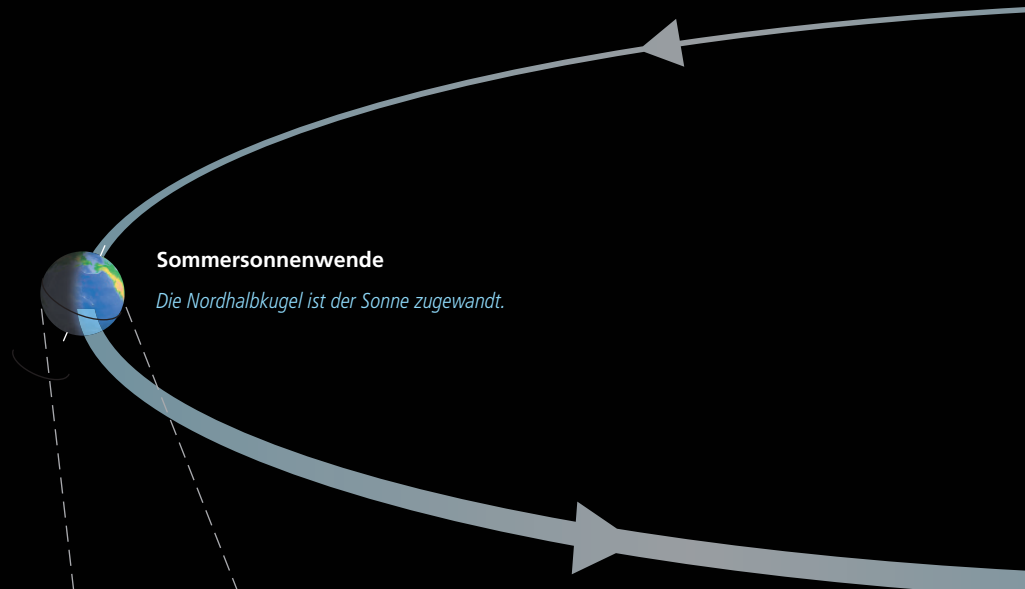
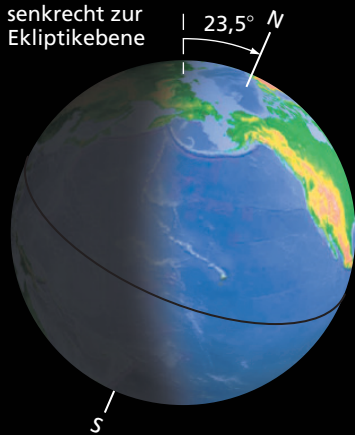
Beachten Sie, dass die Jahreszeiten auf der Erde nur durch die Achsenneigung der Erde verursacht werden, nicht aber durch die Entfernung der Erde von der Sonne. Zwar verändert sich der Abstand zwischen Erde und Sonne im Lauf eines Jahres, doch diese Änderung ist ziemlich klein. In ihrem sonnenfernsten Punkt, den sie Anfang Juli erreicht, ist die Erde nur 3 % weiter von der Sonne entfernt als in ihrem sonnennächsten Punkt, den sie Anfang Januar erreicht. Die unterschiedliche Sonneneinstrahlung aufgrund dieses Entfernungsun-

Abbildung 2.15: KOSMISCHER KONTEXT Die Entstehung der Jahreszeiten. Die Jahreszeiten der Erde werden durch die Achsenneigung verursacht. Beachten Sie, dass die Erdachse das ganze Jahr über in dieselbe Richtung zeigt (auf Polaris). Das bedeutet, dass die Nordhalbkugel auf der einen Hälfte ihrer Umlaufbahn zur Sonne geneigt und auf der anderen Hälfte von der Sonne weggeneigt ist. Dasselbe gilt für die Südhalbkugel, allerdings auf der jeweils gegenüberliegenden Seite der Umlaufbahn.

Auf der Erde werden die Jahreszeiten durch die Neigung der Erdachse verursacht. Sie laufen deshalb auch auf den beiden Halbkugeln um ein halbes Jahr versetzt ab. Die Jahreszeiten hängen nicht vom Abstand der Erde zur Sonne ab, der sich über das Jahr hinweg nur wenig ändert.

1 Achsenneigung: Die Erdachse zeigt das ganze Jahr über in dieselbe Richtung, wodurch sich die Ausrichtung der Erde *relativ zur Sonne* ändert.

2 Sommer auf der Nordhalbkugel/Winter auf der Südhalbkugel: Im Juni trifft das Sonnenlicht steiler auf die Nordhalbkugel. Es herrscht Sommer, da die Sonnenenergie stärker konzentriert ist und die Sonne am Himmel einer längeren und höheren Bahn folgt. Die Südhalbkugel erhält weniger direktes Sonnenlicht und es herrscht dort Winter.



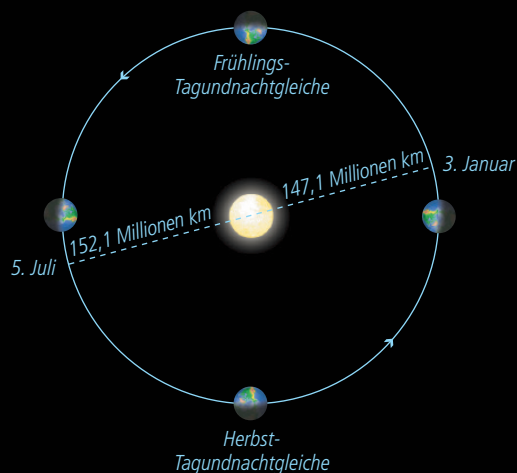
Sommersonnenwende

Die Nordhalbkugel ist der Sonne zugewandt.

Zur Interpretation dieser Grafik

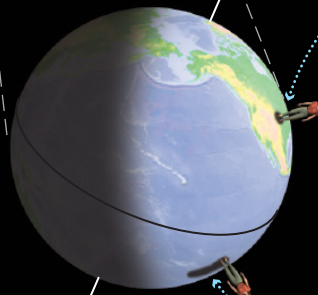
Um das Jahreszeitendiagramm richtig zu interpretieren, denken Sie immer daran:

1. Die Größe der Erde ist im Verhältnis zum Durchmesser ihrer Umlaufbahn mikroskopisch klein. Das bedeutet, dass beide Hemisphären im Wesentlichen denselben Abstand von der Sonne haben.
2. Das Diagramm ist eine Seitenansicht der Erdumlaufbahn. Die Draufsicht (unten) zeigt, dass die Erdumlaufbahn einem nahezu perfekten Kreis entspricht und im Januar der Sonne am nächsten kommt.



Zur Mittagszeit treffen Sonnenstrahlen auf der Nordhalbkugel in einem steileren Winkel auf den Boden, was stärker konzentriertes Sonnenlicht bedeutet und kürzere Schatten verursacht.

Zur Mittagszeit treffen Sonnenstrahlen auf der Südhalbkugel in einem flacheren Winkel auf den Boden, was weniger stark konzentriertes Sonnenlicht bedeutet und längere Schatten verursacht.



- 3 **Frühling/Herbst:** Frühling und Herbst beginnen, wenn das Sonnenlicht beide Hemisphären gleichmäßig beleuchtet, was zweimal pro Jahr geschieht: im März, wenn auf der Nordhalbkugel der Frühling und auf der Südhalbkugel der Herbst beginnt, und im September, wenn auf der Nordhalbkugel der Herbst und auf der Südhalbkugel der Frühling beginnt.

- 4 **Winter auf der Nordhalbkugel/Sommer auf der Südhalbkugel:** Im Dezember trifft das Sonnenlicht weniger steil auf die Nordhalbkugel. Es herrscht Winter, da die Sonnenenergie weniger stark konzentriert ist und die Sonne am Himmel einer kürzeren und niedrigeren Bahn folgt. Die Südhalbkugel erhält mehr direktes Sonnenlicht und es herrscht dort Sommer.



Frühlings-Tagundnachtgleiche

Die Sonne beleuchtet beide Hemisphären gleich.



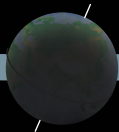
Die Änderung der Orientierung der Erde zur Sonne bewirkt, dass Jahreszeiten an vier besondere Punkte der Erdumlaufbahn gebunden sind:

*Die **Sonnenwenden** sind die beiden Punkte, an denen die Sonneneinstrahlung für die beiden Hemisphären am extremsten wird.*

*Die **Tagundnachtgleichen** sind die beiden Punkte, an denen die Hemisphären gleichmäßig beleuchtet werden.*

Herbst-Tagundnachtgleiche

Die Sonne beleuchtet beide Hemisphären gleich.



Wintersonnenwende

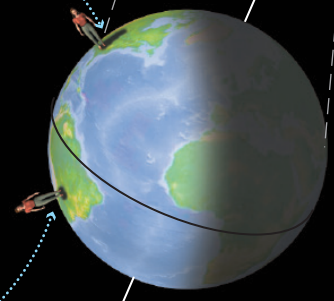
Die Südhalbkugel ist der Sonne zugewandt.



Zur Mittagszeit treffen Sonnenstrahlen auf der Nordhalbkugel in einem flacheren Winkel auf den Boden, was weniger stark konzentriertes Sonnenlicht bedeutet und längere Schatten verursacht.



Zur Mittagszeit treffen Sonnenstrahlen auf der Südhalbkugel in einem steileren Winkel auf den Boden, was stärker konzentriertes Sonnenlicht bedeutet und kürzere Schatten verursacht.



terschieds wird durch die Effekte aufgrund der Achsenneigung von $23,5^\circ$ völlig überdeckt. Hätte die Erde keine Achsenneigung, dann hätten wir keine Jahreszeiten. (Anmerkung: Manche Menschen missinterpretieren zudem Grafiken wie ► Abbildung 2.15. Sie erhalten den irrigen Eindruck, aufgrund der Position auf der Umlaufbahn sei eine Hemisphäre näher an der Sonne als die andere. Diese Fehlinterpretation ist möglich, weil solche Grafiken nie maßstabsgerecht gezeichnet werden. Bei einer maßstabsgerechten Abbildung wäre die Erde mikroskopisch klein, woraus sofort deutlich würde, dass beide Hemisphären praktisch gleich weit entfernt von der Sonne sind.)

Zum Nachdenken

Die Achsenneigung von Jupiter beträgt etwa 3° , ist also so gering, dass sie praktisch keine Auswirkungen hat. Saturn hat eine Achsenneigung von 27° , ein wenig mehr als die Erde. Beide Planeten haben nahezu kreisförmige Umlaufbahnen um die Sonne. Erwarten Sie Jahreszeiten auf Jupiter? Erwarten Sie Jahreszeiten auf Saturn? Erläutern Sie Ihre Antwort.

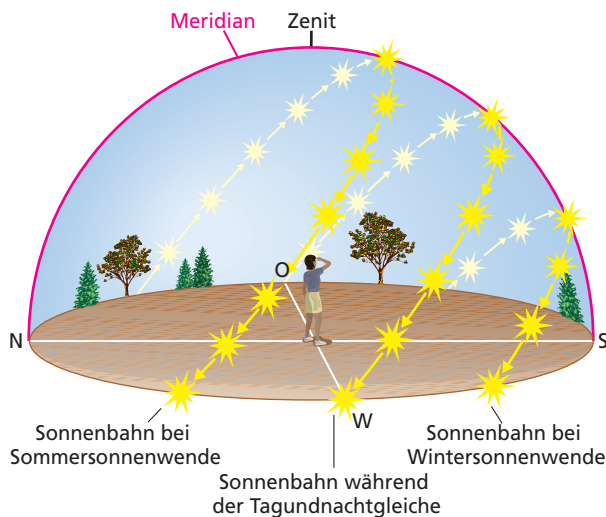


Abbildung 2.16: Diese Grafik zeigt die Bahnen der Sonne über den Himmel der nördlichen Hemisphäre (bei 40° Breite) während der Sonnenwenden und Tagundnachtgleichen. Beachten Sie, dass die Sonne exakt im Osten aufgeht und im Westen untergeht. Die Sommersonnenwende tritt an dem Tag ein, an dem die Sonne am weitesten im Norden auf- bzw. untergeht und den höchsten Punkt am Himmel erreicht. Die Wintersonnenwende ist an dem Tag, an dem die Sonne am weitesten im Süden auf- bzw. untergeht und ihren niedrigsten Punkt am Himmel erreicht.

Häufige Irrtümer

Die Ursache der Jahreszeiten

Viele Menschen nehmen an, die Jahreszeiten würden durch wechselnde Abstände zwischen Erde und Sonne verursacht. Doch wäre das richtig, dann müsste auf der ganzen Erde gleichzeitig Sommer bzw. Winter herrschen und das ist nicht der Fall: Die Jahreszeiten sind auf der Nord- und Südhalbkugel jeweils entgegengesetzt. Tatsächlich hat der geringfügige Entfernungsunterschied auf der Umlaufbahn praktisch keine Auswirkungen auf das Wetter. Die wahre Ursache der Jahreszeiten ist die Achsenneigung der Erde. Durch sie erhalten die nördliche bzw. südliche Halbkugel abwechselnd mehr oder weniger Sonnenlicht.

Sonnenwenden und Tagundnachtgleichen

Um die Veränderungen der Jahreszeiten festzulegen, definieren wir vier besondere Zeitpunkte innerhalb eines Jahres, die jeweils zu einer besonderen Position der Erde auf ihrer Umlaufbahn gehören (► Abbildung 2.15).

- Das **Sommersolstitium** (die *Sommersonnenwende* auf der Nordhalbkugel) tritt jedes Jahr um den 21. Juni ein. Es ist der Moment, an dem die nördliche Halbkugel der Sonne am stärksten zugeneigt ist und an dem sie das meiste Sonnenlicht empfängt (und die Südhalbkugel am wenigsten).
- Das **Wintersolstitium** (die *Wintersonnenwende* auf der Nordhalbkugel) tritt um den 21. Dezember ein. Es ist der Zeitpunkt, an dem die Nordhalbkugel am wenigsten direktes Sonnenlicht empfängt.
- Das **Frühlingsäquinoktium** (die *Frühlings-Tagundnachtgleiche* auf der Nordhalbkugel) tritt um den 21. März ein, wenn die Position der Nordhalbkugel von „geringfügig von der Sonne weggeneigt“ zu „geringfügig der Sonne zugeneigt“ wechselt.
- Das **Herbstäquinoktium** (die *Herbst-Tagundnachtgleiche* auf der Nordhalbkugel) tritt um den 22. September als Gegenstück zum Frühlingsäquinoktium ein, wenn sich die Nordhalbkugel wieder von der Sonne wegneigt.

Das genaue Datum und der Zeitpunkt der Sonnenwenden (*Solstitien*) und Tagundnachtgleichen (*Äquinoktien*) variieren von Jahr zu Jahr innerhalb weniger Tage um die genannten Daten. Das ist kein Zufall, denn unser moderner Kalender ist so gestaltet worden, dass die Sonnenwenden und Tagundnachtgleichen jedes Jahr etwa um die gleiche Zeit eintreten. Wie wir in *Kapitel S1* noch sehen werden, sichert der Kalender diesen Zusammenhang zwischen Datum und Jahreszeit, indem beinahe alle vier Jahre ein Schaltjahr mit dem 29. Februar als

Schalttag eingefügt wird. Diese im späten 16. Jahrhundert eingeführte Abfolge bewirkt, dass die durchschnittliche Länge des Kalenderjahrs fast genau der Zeit zwischen zwei Frühlingsäquinoktien entspricht.

In früheren Zeiten haben die Menschen die Tage, an denen Sonnenwenden und Tagundnachtgleichen eintreten, anhand von Beobachtungen der Sonne am Himmel festgelegt. Viele alte Bauwerke sind für diesen Zweck eingesetzt worden, darunter Stonehenge in England und der Sun-Dagger in New Mexiko (*Abschnitt 3.1*).

Die Tagundnachtgleichen fallen auf die beiden einzigen Tage des Jahres, an denen die Sonne exakt im Osten aufgeht und exakt im Westen untergeht (► *Abbildung 2.16*). Dies sind auch die beiden einzigen Tage, an denen das Sonnenlicht beide Hemisphären gleichmäßig beleuchtet. Die Sommersonnenwende tritt an dem Tag ein, an dem die Sonne ihren längsten und steilsten Bogen über den Himmel der nördlichen Halbkugel (und ihren kürzesten und niedrigsten Bogen am Himmel der Südhalbkugel) zieht. An diesem Tag geht daher die Sonne weiter nördlich auf und unter als an jedem anderen Tag des Jahres. Es ist also der Tag mit den meisten Sonnenstunden. Außerdem erreicht an diesem Tag die Sonne ihren höchsten Punkt am Nordhimmel. Das Gegenteil gilt für die Wintersonnenwende. Dann geht die Sonne am weitesten südlich auf und unter, die Nordhalbkugel hat die wenigsten Sonnenstunden und die Mittagssonne steht tiefer als an jedem anderen Tag des Jahres. ► *Abbildung 2.17* zeigt, wie sich die Position der Sonne im Laufe des Jahres verändert.

Die ersten Tage der Jahreszeiten

Üblicherweise bezeichnet jede Tagundnachtgleiche und jede Sonnenwende den ersten Tag einer Jahreszeit. Beispielsweise gilt der Tag der Sommersonnenwende als der „erste Sommertag“. Beachten Sie aber, dass die Sommersonnenwende stattfindet, wenn die nördliche Halbkugel am *stärksten* der Sonne zugeneigt ist. Sie fragen sich vielleicht, warum wir die Sommersonnenwende als den Anfang und nicht die Mitte des Sommers betrachten.

Die Wahl der Sommersonnenwende als „ersten Tag des Sommers“ ist sicher willkürlich. Allerdings lässt sich diese Wahl auf mindestens zweierlei Arten begründen. Zum einen war es für die Menschen früher viel einfacher, den Tag festzustellen, an dem die Sonne eine extreme Position am Himmel erreicht hatte – etwa den höchsten Punkt während der Sommersonnenwende – als andere dazwischenliegende Tage. Zum anderen verbinden wir die Jahreszeiten meist mit dem

Wetter – und da passen die Sonnenwenden und Tagundnachtgleichen gut zu den jahreszeitlichen Wetterlagen. Obwohl beispielsweise der Bogen der Sonne über der nördlichen Hemisphäre um die Sommersonnenwende am längsten und höchsten ist, stellen sich die wärmsten Tage erst ein oder zwei Monate später ein. Man kann das anhand eines Beispiels verstehen: Stellen Sie sich vor, was geschieht, wenn Sie einen Topf mit kalter Suppe aufwärmen. Selbst wenn Sie Ihren Herd von Anfang an auf höchste Stufe stellen, dauert es eine Weile, bis die Suppe warm wird. Auf ähnliche Weise braucht es seine Zeit, bis die Sonne den Boden und die Ozeane von der Winterkälte auf die Sommertemperaturen aufgeheizt hat. Meteorologisch gedacht stellt sich daher der Mitsommer erst Ende Juli und im frühen August ein. Deshalb ist die Sommersonnenwende eine recht gute Wahl für den „ersten Sommertag“. Aus ähnlichen Gründen ist die Wintersonnenwende eine gute Wahl für den ersten Wintertag und die Frühlings- und Herbst-Tagundnachtgleichen eignen sich gut als die ersten Tage dieser Jahreszeiten.



Abbildung 2.17: Diese Kompositaufnahme zeigt Aufnahmen der Sonne, die während eines ganzen Jahres in Abständen von 7 bis 11 Tagen zur selben Zeit (genauer gesagt zur selben „mittleren Sonnenzeit“, siehe *Abschnitt S1.1*) am selben Ort (in Carefree, Arizona) entstanden sind. Die Blickrichtung ist Osten, sodass Norden links und Süden rechts ist. Weil sich der Aufnahmeort auf der Nordhalbkugel befindet, müssen diejenigen Abbildungen der Sonnenscheibe, wo die Sonne hoch im Norden zu sehen ist, Zeiten in der Nähe der Sommersonnenwende darstellen, und diejenigen Abbildungen, wo sie tief im Süden steht, Zeiten nahe der Wintersonnenwende darstellen. Die Form einer Acht (ein sogenanntes Analemma) ergibt sich aus der Kombination aus der Neigung der Erdachse und der sich ändernden Geschwindigkeit der Erde auf ihrer Umlaufbahn um die Sonne (siehe das dazugehörige Spezialthema in S1).

Jahreszeiten in aller Welt

Die Namen der Sonnenwenden und Tagundnachtgleichen spiegeln die Jahreszeiten auf der Nordhalbkugel wider, was zu seltsam klingenden Angaben führt, wenn wir über die Jahreszeiten auf der Südhalbkugel sprechen. So herrscht beispielsweise am Tag der *Sommersonnenwende* auf der Südhalbkugel *Winter*. Diese offenbare Ungerechtigkeit gegenüber den Bewohnern der Südhalbkugel konnte entstehen, weil die Sonnenwenden und Tagundnachtgleichen vor langer Zeit von Menschen benannt wurden, die auf der Nordhalbkugel lebten. Eine ähnliche Ungerechtigkeit widerfährt den Menschen in der Äquatorregion. Bei genauer Betrachtung von ► Abbildung 2.15 erkennen Sie, dass der Erdäquator während der beiden Tagundnachtgleichen das meiste direkte Sonnenlicht erhält, an den beiden Sonnenwenden aber das geringste Sonnenlicht. Daher erleben die Menschen in der Äquatorregion die vier Jahreszeiten nicht auf dieselbe Weise wie Menschen in mittleren Breiten. Stattdessen wechseln in der Äquatorregion regnerische und trockene Jahreszeiten ab; die Regenzeiten treten dann auf, wenn die Sonne höher am Himmel steht.

Darüber hinaus sind die jahreszeitlichen Unterschiede während der Sonnenwenden in hohen Breiten viel extremer. So hat beispielsweise Alaska viel längere Sommertage und viel längere Winternächte als Florida. Tatsächlich wird die Sonne bei sehr hohen Breiten (in-

Häufige Irrtümer

12 Uhr mittags

Wann befindet sich die Sonne direkt über Ihnen am Himmel? Die meisten Menschen antworten „mittags“. Es stimmt, dass die Sonne jeden Tag ihren *höchsten* Punkt erreicht, wenn sie den Meridian überquert. Im Englischen nennt man diesen Zeitpunkt genau um 12 Uhr mittags „high noon“ (obwohl die Sonne den Meridian selten um Punkt 12 Uhr überquert, siehe *Abschnitt 51.2*). Wenn Sie nicht gerade in den Tropen leben (zwischen $23,5^\circ$ S und $23,5^\circ$ N), befindet sich die Sonne *niemals* direkt über Ihnen. Wann immer Sie die Sonne beim Spaziergehen sehen können, dürfen Sie sich sicher sein, dass sie sich *nicht* in Ihrem Zenit befindet. Wenn Sie sich nicht hinlegen, bedeutet ein Blick in den Zenit nämlich, den Kopf auf sehr unkomfortable Weise in den Nacken zu legen.

nerhalb des nördlichen und südlichen Polarkreises) im Sommer sogar zirkumpolar. Die Sonne geht während der Sommertage in diesem *Land der Mitternachtssonne* niemals unter (► Abbildung 2.18).

Warum sind die Jahreszeiten auf der Südhalbkugel der Erde weniger stark ausgeprägt?

Wie bereits besprochen, variiert zwar im Verlauf eines Jahres die Entfernung zwischen Erde und Sonne geringfügig, was aber nicht die Entstehung der Jahreszeiten bewirkt. Allerdings könnte man meinen, dass die veränderliche Sonnenentfernung die Ausprägung der Jah-

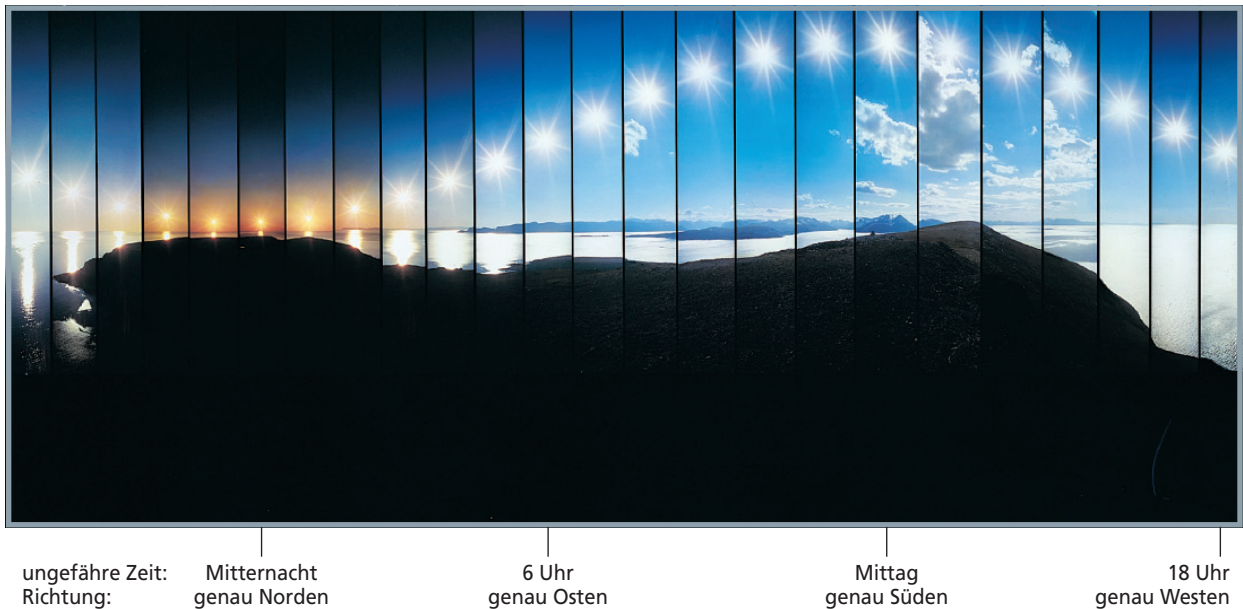


Abbildung 2.18: Diese Abfolge von Fotos zeigt den Weg der Sonne um den Horizont während der Sommersonnenwende am Polarkreis. Beachten Sie, dass die Sonne nicht untergeht, sondern den nördlichen Horizont um Mitternacht nur streift. Sie steigt dann allmählich höher und erreicht Mittags ihren höchsten Punkt, wenn sie genau im Süden steht.

reszeiten beeinflusst. So befindet sich die Erde Anfang Januar in ihrem sonnennächsten Punkt (Perihel) und Anfang Juli in ihrem sonnenfernsten Punkt (Aphel). Dadurch erhält die Nordhalbkugel im Winter etwas mehr und im Sommer weniger intensives Sonnenlicht als die südliche Hemisphäre. Dieses „zusätzliche“ Licht im Winter sollte die Winter auf der Nordhalbkugel weniger kalt und das geringere sommerliche Sonnenlicht die Sommer weniger heiß machen. Man könnte also für die Nordhalbkugel geringfügig ausgeglichene Jahreszeiten erwarten als auf der Südhalbkugel. Tatsächlich zeigen die Wetteraufzeichnungen, dass das Gegenteil der Fall ist: Die Jahreszeiten auf der Nordhalbkugel sind etwas stärker ausgeprägt als diejenigen der Südhalbkugel.

Der Hauptgrund dieser überraschenden Beobachtung wird deutlich, wenn Sie eine Weltkarte betrachten (► Abbildung 2.19). Der größte Teil der Landmassen liegt auf der Nordhalbkugel, auf der Südhalbkugel befinden sich die meisten Ozeane. Wie Sie an jedem Strand, See oder Pool beobachten können, braucht Wasser mehr Zeit zum Aufwärmen als Erde oder Felsen (hauptsächlich, weil das Sonnenlicht das Wasser bis in Tiefen von mehreren Metern aufheizt, während nur die obersten Schichten des Bodens erwärmt werden). Die Wassertemperatur schwankt deshalb zwischen Tag und Nacht kaum, während sich der Boden stark aufheizen und dramatisch abkühlen kann. Die größere Wassermenge auf der Südhalbkugel mäßigt daher das Klima. Die nördliche Hemisphäre, auf der sich mehr Land und weniger Ozeane befinden, heizt sich dagegen leichter auf und kühlt leichter ab. Das erklärt, warum die Jahreszeiten dort stärker ausgeprägt sind.

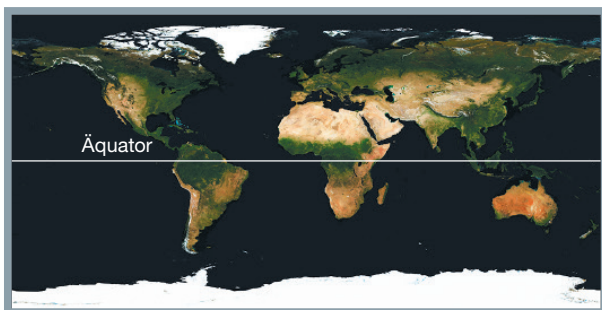


Abbildung 2.19: Diese Weltkarte zeigt, dass der größte Teil der Landmassen auf der Nordhalbkugel liegt, während die meisten Ozeane sich auf der Südhalbkugel befinden. Der mäßigende Einfluss des Wassers auf das Klima macht daher die Jahreszeiten in den südlichen Breiten weniger extrem als die Jahreszeiten auf der Nordhalbkugel.

Ein zweiter Grund für die extremeren Jahreszeiten auf der nördlichen Hemisphäre liegt in der etwas höheren Geschwindigkeit der Erde auf ihrer Umlaufbahn, wenn sie sich näher an der Sonne befindet, während sie in größerer Entfernung zur Sonne etwas langsamer ist. (Diese Tatsache ist Bestandteil des zweiten Kepler'schen Gesetzes, siehe *Abschnitt 3.3*). Demnach bewegt sich die Erde während des Sommers auf der nördlichen Hemisphäre (währenddessen die Erde weiter von der Sonne entfernt ist) etwas langsamer; daher dauern die Sommer der nördlichen Breiten etwa 2–3 Tage länger als die Sommer im Süden. Einige zusätzliche Tage mit mehr direktem Sonnenlicht bedeuten auch mehr Zeit zum Aufheizen.

Zusammengefasst hat die aufgrund der Umlaufbahn der Erde sich ändernde Entfernung zur Sonne praktisch keinen Einfluss auf die Jahreszeiten, denn andere Effekte sind weit wichtiger. Das gilt nicht notwendigerweise für andere Planeten, besonders wenn die Umlaufbahn stärker von der Kreisform abweicht und daher die Entfernungsunterschiede erheblich größer sind. So unterscheiden sich beim Mars die Entfernungen zur Sonne im sonnennächsten und im sonnenfernsten Punkt viel mehr als bei der Erde. Deshalb hat der Mars auf einer Hemisphäre bedeutend heftigere Jahreszeiten als auf der anderen, obwohl er fast dieselbe Achsenneigung aufweist wie die Erde (► Abbildung 10.24).

Wie verändert sich die Orientierung der Erdachse im Lauf der Zeit?

Bis jetzt haben wir sowohl tägliche als auch jahreszeitliche Änderungen am Himmel kennengelernt; es gibt aber noch weitere Veränderungen, die innerhalb größerer Zeiträume stattfinden. Eine der wichtigsten dieser langsamen Bewegungen heißt **Präzession**, eine allmähliche Schlingerbewegung, durch die sich die Orientierung der Erdachse im Weltraum ändert.

Präzession tritt bei vielen rotierenden Objekten auf. Sie können sie leicht beobachten, wenn Sie beispielsweise einen Kreisel drehen (► Abbildung 2.20a). So lange sich der Kreisel schnell dreht, werden Sie feststellen, dass seine Achse zusätzlich eine langsamere Kreisbewegung ausführt. Wir sagen dann, dass die Kreiselachse *präzediert*. Die Erde präzediert auf dieselbe Weise, allerdings weit langsamer (► Abbildung 2.20b): Jeder Umlauf der irdischen Präzession dauert etwa 26 000 Jahre. Während eines solchen Umlaufs verändert sich allmählich der Punkt, auf den die Erdachse

im Weltraum deutet. Zurzeit weist die Erdachse auf Polaris, weshalb er der Nordstern ist. In etwa 13 000 Jahren wird Wega der Stern sein, der (mit nur wenigen Grad Abstand) dem tatsächlichen Himmelsnordpol am nächsten liegt. Die meiste Zeit über weist die Erdachse aber auf keinen hellen Stern.

Beachten Sie, dass die Präzession den Betrag der Achsenneigung nicht verändert (der bei etwa $23,5^\circ$ bleibt) und deshalb auch die Jahreszeiten nicht ändert. Weil aber die Sonnenwenden und Tagundnachtgleichen zu bestimmten Punkten auf der Erdbahn gehören und davon abhängen, wie die Erdachse im Raum gerichtet ist, verlagern sich diese Punkte aufgrund der Präzession allmählich. Im Ergebnis verändern sich die Sternbilder, in denen die Sonnenwenden und Tagundnachtgleichen eintreten. Vor einigen Tausend Jahren stand die Sonne am Tag der Sommersonnenwende im Sternbild Krebs. Mittlerweile befindet sie sich in den Zwillingen. Das erklärt etwas, das Sie auf jeder Weltkarte sehen können: Der Breitengrad, auf dem die Sonne während der Sommersonnenwende direkt im Zenit steht ($23,5^\circ$), wird als *Wendekreis des Krebses* bezeichnet. Er muss also diesen Namen zu einer Zeit erhalten haben, als die Sonne während der Sonnenwende im Krebs stand.

Zum Nachdenken

War Polaris auch im Altertum der Polarstern? Erläutern Sie.

Warum gibt es diese Präzession? Sie wird von der Schwerkraft verursacht, die an einem geneigten, rotierenden Objekt angreift, das *keine* perfekte Kugel ist. Sie haben vermutlich schon gesehen, wie die Schwerkraft einen Kreisel beeinflusst. Wenn Sie versuchen, einen nicht rotierenden Kreisel aufrecht zu balancieren, kippt er fast immer sofort um. Dies geschieht, weil ein nichtsphärischer Kreisel fast immer eine Winzigkeit auf die eine oder andere Seite geneigt ist. Egal wie gering diese Neigung ist, die Schwerkraft kippt einen nicht rotierenden Kreisel schnell um. Wenn Sie den Kreisel aber in schnelle Rotation versetzen, kippt er nicht so leicht. Der rotierende Kreisel bleibt aufrecht, weil rotierende Objekte sich bevorzugt um immer dieselbe Achse drehen (eine Folge der Drehimpulserhaltung, siehe *Abschnitt 4.3*). Dies verhindert, dass die Schwerkraft den Kreisel sofort umkippt, denn das Kippen würde bedeuten, dass sich die Drehachse von beinahe senkrecht auf beinahe waagerecht verändern würde. Die Schwerkraft kann die Kreiselachse lediglich zur Präzessionsbewegung zwingen. Sobald die Reibung den Kreisel abbremst, werden die Präzessions-

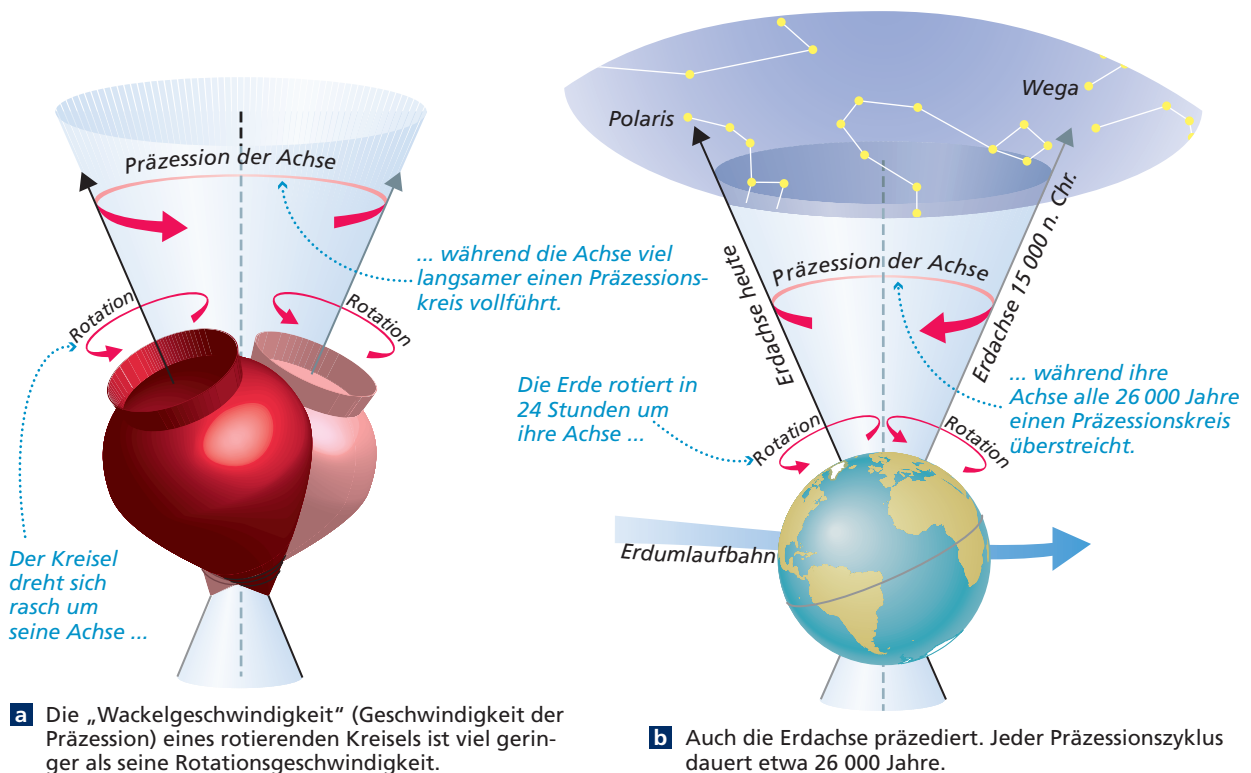


Abbildung 2.20: Die Präzession beeinflusst die Ausrichtung eines rotierenden Objekts, aber nicht den Betrag seiner Achsenneigung.

kreise immer größer, bis der Kreisel schließlich umkippt. Gäbe es keine Reibung, welche die Drehbewegung abbrems, so würde sich der Kreisel ewig weiterdrehen.

Häufige Irrtümer

Astrologische Sternzeichen

Sie kennen vermutlich Ihr astrologisches *Sternzeichen*. Als die Astrologie vor einigen Tausend Jahren entwickelt wurde, war das Sternzeichen eines Menschen dasjenige *Sternbild* (die Konstellation am Himmel), in dem sich die Sonne während seiner Geburt befand. Wegen der Präzession stimmt das aber heute für die meisten Menschen nicht mehr. Ist beispielsweise Ihr Geburtstag am 21. März, dann zeigt Ihnen ein Zeitungshoroskop, dass Ihr Sternzeichen der Widder ist. Allerdings steht die Sonne zu diesem Zeitpunkt im Sternbild Fische. Die astrologischen Sternzeichen beruhen auf den Angaben zu den Positionen der Sonne zwischen den Sternen, die der griechische Philosoph Ptolemäus um 150 v. Chr. in seinem Buch *Tetrabiblos* (Abschnitt 3.5) beschrieben hat. Seitdem sind etwa 2000 Jahre vergangen. Seit der damaligen Zuordnung von Namen und Daten zu den Sternzeichen hat die Erde etwa 1/13 ihres 26 000 Jahre andauernden Präzessionskreises hinter sich gebracht. Daher liegen die astrologischen Sternzeichen und die tatsächliche Position der Sonne in den Sternbildern heute beinahe einen Monat auseinander.

Die sich drehende (rotierende) Erde präzediert, weil Anziehungskräfte (die Gravitation) von Sonne und Mond auf sie wirken. Die Erde ist keine perfekte Kugel, ihr Durchmesser ist am Äquator größer als an den Polen. Weil der Äquator um $23,5^\circ$ gegen die Ebene der Ekliptik geneigt ist, versuchen die Anziehungskräfte von Sonne und Mond, diese Äquatorwülste in die Ebene der Ekliptik zu ziehen und so die Achsenneigung der Erde zu beseitigen. Wie der rotierende Kreisel versucht aber auch die Erde, sich weiterhin um dieselbe Achse zu drehen. Der Gravitation gelingt es daher nicht, die Achsenneigung der Erde zu verändern, sondern sie führt nur dazu, dass die Achse präzediert. Wenn Sie die Präzession und ihre Wirkungsweise besser verstehen möchten, können Sie mit einem einfachen Spielzeugkreisel, einem sogenannten Gyroskop, experimentieren. Ein Gyroskop ist im Wesentlichen ein rotierendes Rad, das so montiert ist, dass es sich frei drehen kann. Dadurch lässt sich leicht beobachten, wie die Drehgeschwindigkeit die Bewegung beeinflusst. (Die Tatsache, dass ein Kreisel oder Gyroskop versucht, seine Rotationsachse beizubehalten, wird beim sogenannten Kreiselkompass in der Navigation von Flugzeugen und Raumschiffen ausgenutzt.)

Der Mond: Unser ständiger Begleiter

2.3

Neben der Sonne ist der Mond der hellste und auffälligste Himmelskörper. Der Mond ist unser ständiger Begleiter im Weltraum und reist mit uns auf unserer Bahn um die Sonne.

Warum gibt es Mondphasen?

Während der Mond die Erde umkreist, kehrt er relativ zur Sonne am Himmel (also z. B. entlang der Verbindungslinie Erde–Sonne) etwa alle $29\frac{1}{2}$ Tage an dieselbe Position zurück. Diese Zeitspanne entspricht dem Zyklus der **Mondphasen**, in dem sich das Erscheinungsbild des Mondes am Himmel mit der Veränderung seiner Position zur Sonne ändert. Diese Dauer von $29\frac{1}{2}$ Tage ist auch der Ursprung des Wortes *Monat*.

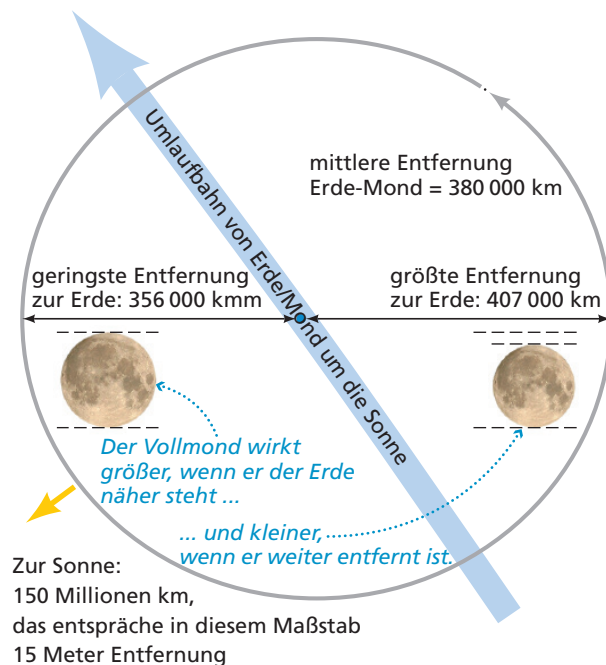


Abbildung 2.21: Wie diese Grafik in dem aus **Abschnitt 1.1** (vgl. **Abbildung 1.6**) bekannten Maßstab 1:10 Milliarden zeigt, kreist der Mond um die Erde. Der Ausschnitt der Erdumlaufbahn um die Sonne wirkt wie eine gerade Linie, denn der Abstand zur Sonne ist verglichen mit dem Radius der Umlaufbahn des Mondes sehr groß. Die eingefügten Fotos zeigen den Unterschied in der relativen Winkelausdehnung des Vollmonds, wenn sich der Mond am erdnächsten und erdfernten Punkt seiner Umlaufbahn befindet. Vollmond herrscht nur dann, wenn sich Sonne und Mond, von der Erde aus gesehen, gegenüberliegen.

Mondphasen verstehen

Der erste Schritt zum Verständnis der Mondphasen besteht darin zu erkennen, dass Sonnenlicht sowohl auf der Erde als auch auf dem Mond im Wesentlichen immer aus derselben Richtung kommt. Betrachten Sie dazu ► Abbildung 2.21, die die Mondumlaufbahn im selben Maßstab zeigt, den wir für das Sonnensystemmodell in Kapitel 1 verwendet haben. Denken Sie daran, dass die Sonne in diesem Maßstab 15 Meter von der Erde entfernt liegt. Das ist weit genug weg, dass die Sonne in fast genau derselben Richtung liegt, egal ob Sie sie von der Erde oder vom Mond aus betrachten.

Sie können die Mondphasen am einfachsten mit der Demonstration aus ► Abbildung 2.22 nachvollziehen. Nehmen Sie an einem sonnigen Tag einen Ball mit nach draußen. (Wenn es dunkel oder bewölkt ist, können Sie anstelle der Sonne auch eine Taschenlampe einsetzen: Legen Sie die Taschenlampe in einigen Metern Entfernung auf einen Tisch, sodass der Strahl in Ihre Rich-

SEHEN SIE SELBST



Wie die Sonne scheint sich der Mond langsam ostwärts durch die Sternbilder des Tierkreises zu bewegen. Während die Sonne für einen Umlauf allerdings ein Jahr benötigt, ist der Mond mit etwa einem Monat viel schneller. Er bewegt sich also etwa 360° pro Monat, das entspricht $0,5^\circ$ (also sein eigener Winkeldurchmesser) pro Stunde. Wenn der Mond heute Nacht sichtbar ist, gehen Sie hinaus und halten Sie seine Position relativ zu einigen hellen Sternen fest. Gehen Sie ein paar Stunden später erneut hinaus. Können Sie die Positionsänderung relativ zu den Sternen ausmachen?

tung fällt.) Halten Sie den Ball auf Armlänge vor sich; er soll den Mond darstellen, Ihr Kopf ist die Erde. Drehen Sie sich langsam herum (gegen den Uhrzeigersinn),

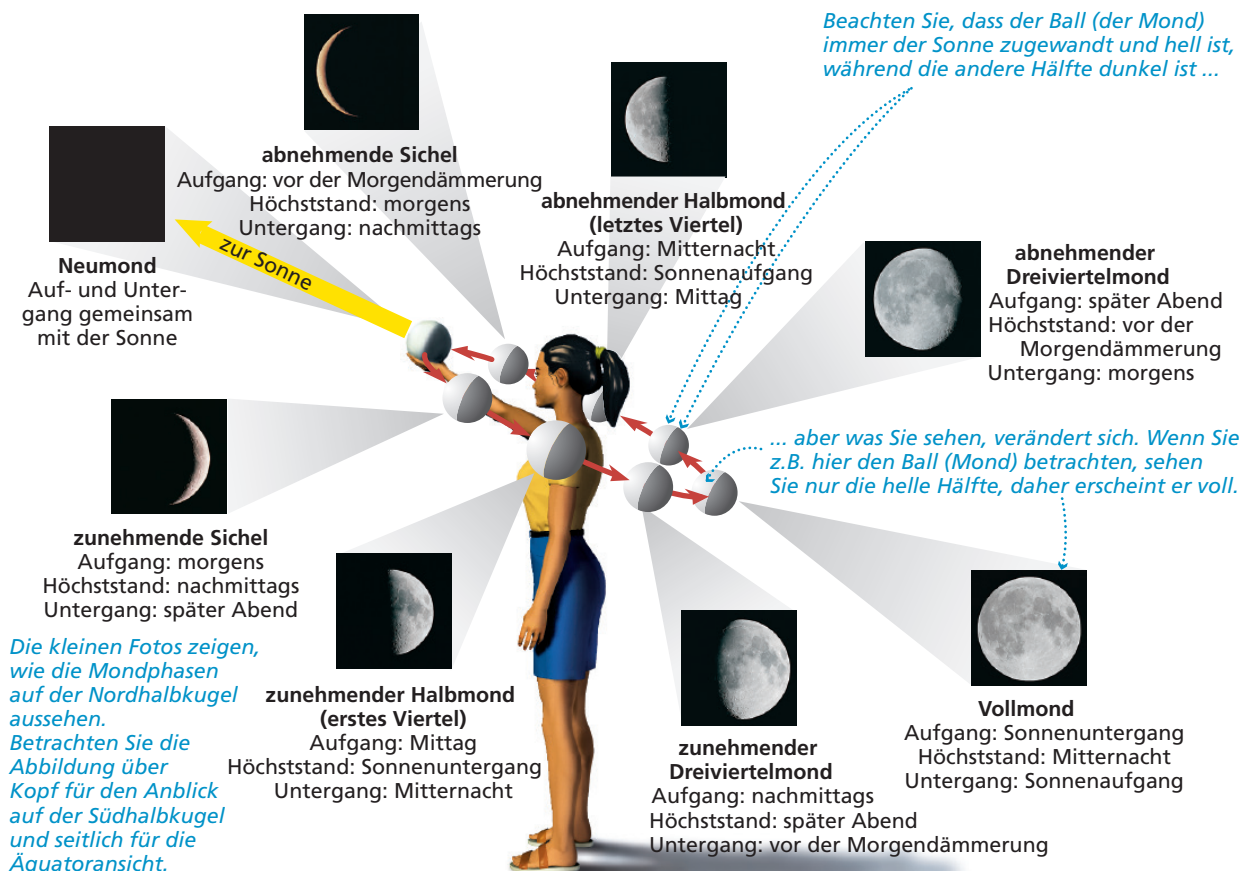


Abbildung 2.22: Eine einfache Demonstration illustriert die Mondphasen. Die Hälfte des Balls (der den Mond darstellt) ist der Sonne zugewandt und immer beleuchtet, während die andere Hälfte immer dunkel ist. Während der Ball aber um Ihren Kopf (die Erde) kreist, werden Phasen erkennbar. (Das Bild für den Neumond zeigt einen blauen Himmel, weil der Neumond sich am Himmel immer in der Nähe der Sonne befindet und daher gegen das helle Sonnenlicht nicht zu erkennen ist.)

Zum Nachdenken

Sie gehen morgens aus dem Haus und bemerken, dass die sichtbare Mondoberfläche zur Hälfte beleuchtet und zur Hälfte dunkel ist. Handelt es sich um den Mond im ersten Viertel oder im letzten Viertel? Woher wissen Sie das?

sodass der Ball Sie in derselben Richtung umkreist wie der Mond die Erde. Falls Sie sich auf der Südhalbkugel befinden, müssen Sie sich im Uhrzeigersinn drehen, da Sie den Himmel im Vergleich zur Ansicht von der Nordhalbkugel aus sozusagen auf dem Kopf stehend betrachten. Beim Drehen sehen Sie, dass der Ball dieselben Phasen aufweist wie der Mond. Denken Sie über diese Demonstration nach. Offenbar führen zwei wesentliche Fakten zu den Phasen des Balls:

- Die Hälfte des Balls wird immer von der Sonne (bzw. der Taschenlampe) beschienen, die andere Hälfte ist von der Sonne abgewandt und daher dunkel.
- Wenn Sie den Ball in unterschiedliche Positionen auf seiner „Umlaufbahn“ um Ihren Kopf bringen, sehen Sie unterschiedliche Kombinationen der hellen und dunklen Bereiche.

Wenn Sie beispielsweise den Ball gerade der Sonne gegenüberhalten, sehen Sie nur den hellen Bereich des Balls, was der „vollen“ Phase entspricht. Halten Sie den Ball in der Position des ersten Viertels, dann ist die eine Hälfte dunkel, die andere aber hell.

Aus denselben Gründen sehen wir Mondphasen. Die eine Hälfte des Monds wird ständig von der Sonne beschienen, aber wie viel dieser beleuchteten Hälfte wir von der Erde aus sehen können, hängt von der Position des Monds auf seiner Umlaufbahn ab. Die Fotografien in ► Abbildung 2.22 zeigen das Aussehen der Mondphasen. Das Neumond-Bild zeigt blauen Himmel, da der Neumond fast in derselben Richtung steht wie die Sonne und daher am hellen Taghimmel nicht ausgemacht werden kann.

Die verschiedenen Phasen sehen also nicht nur unterschiedlich aus, sie gehen auch zu jeweils unterschiedlichen Zeiten auf, erreichen ihren höchsten Punkt und gehen wieder unter. Da beispielsweise Vollmond genau dann herrscht, wenn der Mond sich gegenüber der Sonne befindet, muss der Vollmond gegen Sonnenuntergang aufgehen, seinen höchsten Punkt am Himmel gegen Mitternacht erreichen und gegen Sonnenaufgang wieder untergehen. Befindet sich der Mond dagegen im ersten Viertel 90° östlich der Sonne, dann

muss er gegen Mittag aufgehen, erreicht seinen höchsten Punkt gegen 18 Uhr und geht gegen Mitternacht unter. ► Abbildung 2.22 listet die ungefähren Zeitpunkte für den Aufgang, das Erreichen des höchsten Punkts am Himmel und den Untergang für jede Phase auf. (Die tatsächlichen Zeiten hängen von der geografischen Breite, der Jahreszeit und anderen Faktoren ab.)

Zu den Bezeichnungen der Phasen in ► Abbildung 2.22 gibt es drei interessante Anmerkungen. Erstens bezeichnen wir Phasen zwischen neu und voll als *zunehmend*; die Phasen zwischen voll und neu heißen *abnehmend*. Zweitens gibt es eigentlich keine Phase namens „Halbmond“. Was die meisten Menschen als Halbmond bezeichnen, ist eigentlich das erste Viertel oder das letzte Viertel. Diese Phasen heißen so, weil der Mond dann ein Viertel bzw. drei Viertel seines monatlichen Zyklus abgeschlossen hat (der üblicherweise mit dem Neumond beginnt). Drittens, die ganz schmalen Mondsicheln werden manchmal auch als „Neulicht“ (zunehmende Sichel) und „Altlicht“ (abnehmende Sichel) bezeichnet.

Beachten Sie, dass ein fast voller Mond im Wesentlichen das Gegenteil der Mondsichel ist – eine Mondsichel zeigt einen schmalen Streifen Licht, während ein fast voller Mond einen schmalen Streifen Dunkelheit zeigt.²

Anhand der Stellung der Sichel selbst kann man mithilfe der folgenden Eselsbrücke feststellen, ob es sich um „Neulicht“ oder „Altlicht“ handelt: Beim schriftlichen Kleinbuchstaben *a* wie „abnehmend“ wird der Bogen nach links geschrieben – eine nach links gebogene Mondsichel ist also abnehmend. Beim schriftlichen (*alt-deutschen*) Kleinbuchstaben *z* wie „zunehmend“ wird

² Im Englischen existiert ein eigener Begriff für den fast vollen Mond (egal ob zunehmend oder abnehmend), nämlich der „gibbous moon“ (*buckliger Mond*). Im Deutschen fehlt ein ähnlicher eigenständiger Begriff.

Häufige Irrtümer

Der Erdschatten und der Mond

Viele Menschen denken, dass die Mondphasen dadurch verursacht werden, dass der Schatten der Erde auf die Oberfläche des Mondes fällt. Das ist aber nicht der Fall. Wie wir gesehen haben, werden die Mondphasen dadurch verursacht, dass wir verschiedene Abschnitte seiner Tag- und Nachtseite zu unterschiedlichen Zeiten sehen, während er um die Erde kreist. Der Schatten der Erde fällt nur während einer (relativ seltenen) Mondfinsternis auf den Mond.

der Bogen hingegen nach rechts geschrieben, dementsprechend handelt es sich um eine zunehmende Mondsichel. Genau das Gegenteil ist für die „Schattensichel“ des fast vollen Mondes der Fall.

Die gebundene Rotation des Mondes

Obwohl wir viele Phasen des Mondes sehen können, haben wir von der Erde aus immer nur denselben Anblick des Mondes.³ Daraus können wir schließen, dass sich der Mond in derselben Zeit, in der er sich einmal um seine Achse dreht, einmal die Erde umkreist – eine Erscheinung, die wir als **gebundene Rotation** bezeichnen.

Die folgende Demonstration zeigt, warum der Mond gebunden rotieren muss, damit er der Erde immer denselben Teil seiner Oberfläche zuwendet. Legen Sie einen Ball auf einen Tisch – er stellt die Erde dar, Sie sind der Mond. Stellen Sie sich so hin, dass Sie den Ball ansehen und beginnen Sie dann, ihn zu umkreisen. Wenn Sie selbst sich nicht drehen, während Sie um den Ball herumgehen, werden Sie bereits nach einer halben Umdrehung nicht mehr in Richtung des Balls blicken (► Abbildung 2.23 a). Es gibt nur eine einzige Möglichkeit, den Ball immer zu sehen: Sie müssen sich genau einmal um sich selbst drehen, während Sie eine Um-

³ Weil die Umlaufgeschwindigkeit des Mondes sich verändert, während seine Rotationsgeschwindigkeit gleich bleibt, schwingt die sichtbare Fläche des Mondes während des Erdumlaufs etwas vor und zurück. Dieser Effekt heißt *Libration* und gestattet uns im Verlauf eines Monats, insgesamt etwa 59 % der Mondoberfläche zu beobachten, obwohl wir zu jedem gegebenen Zeitpunkt nur 50 % der Oberfläche sehen können.

Häufige Irrtümer

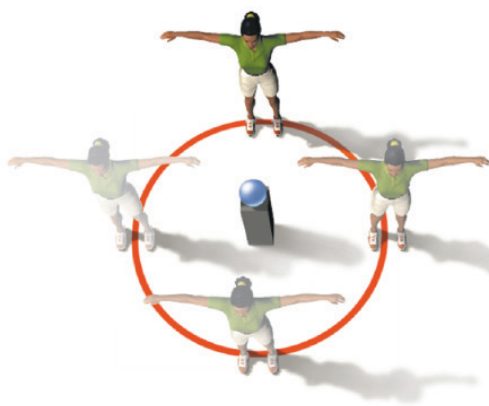
Die dunkle Seite des Mondes

Der Begriff der *dunklen Seite des Mondes* sollte eigentlich nur für seine Nachtseite benutzt werden – also die Seite, die von der Sonne abgewandt ist. Unglücklicherweise wird der Begriff *dunkle Seite* oft für das verwendet, was man besser *Rückseite* nennen sollte – die Seite, die man von der Erde aus niemals sehen kann. Viele Menschen meinen immer noch die Rückseite, wenn sie „dunkle Seite“ sagen, selbst wenn diese gar nicht dunkel ist. Während des Neumonds ist die Rückseite des Mondes beispielsweise der Sonne zugewandt und hell erleuchtet (► Abbildung 2.22). Der einzige Zeitpunkt, zu dem die Rückseite völlig dunkel ist, ist während des Vollmonds, wenn sie von Sonne und Erde abgewandt ist.

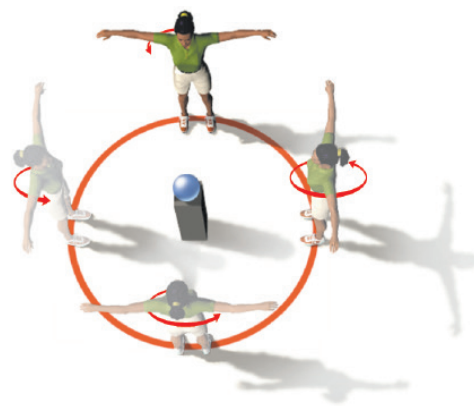
kreisung durchführen (► Abbildung 2.23 b). Beachten Sie, dass die gebundene Rotation des Mondes kein Zufall, sondern das Resultat der Erdanziehung auf den Mond ist, genau wie die Gezeiten (*Abschnitt 4.5*).

Der Blick vom Mond

Sie können Ihr Verständnis der Mondphasen festigen, indem Sie sich vorstellen, Sie würden auf der der Erde zugewandten Seite des Mondes leben. Was würden Sie dann sehen, wenn für die Menschen auf der Erde beispielsweise Neumond ist? Neumond tritt auf, wenn der Mond sich zwischen Sonne und Erde befindet; Sie würden also auf die Tagseite der Erde blicken und eine *Vollerde* sehen. In ähnlicher Weise würden Sie bei Voll-



a Wenn Sie sich beim Gehen nicht um Ihre Achse drehen, sehen Sie das Modell nicht ständig an.



b Sie sehen das Modell nur dann ständig an, wenn Sie sich während einer Umdrehung genau einmal um sich selbst drehen.

Abbildung 2.23: Da wir immer dieselbe Seite des Mondes sehen, muss sich der Mond in der Zeit, in der er einmal um die Erde kreist, auch einmal um sich selbst drehen. Wenn Sie um eine Modellerde herumgehen und sich vorstellen, Sie wären der Mond, können Sie den Grund dafür sofort erkennen.

Zum Nachdenken

Wie lange würden Ihr Tag und Ihre Nacht dauern, wenn Sie auf dem Mond leben würden? Erläutern Sie Ihre Antwort.

mond auf die Nachtseite der Erde blicken und hätten damit *Neuerde*. Ganz allgemein wäre die Phase der Erde immer der Mondphase entgegengesetzt, die zu diesem Zeitpunkt von der Erde aus sichtbar ist. Weil darüber hinaus der Mond der Erde immer fast dieselbe Seite zuwendet, würde die Erde beinahe stationär an Ihrem Himmel stehen, während sie ihre Phasen durchläuft.

Die Vorstellung des Blicks vom Mond klärt auch noch eine andere interessante Eigenschaft der Mondphasen: Der dunkle Teil der Mondfläche ist nicht *völlig* dunkel. Stellen Sie sich vor, Sie stünden auf dem Mond, während dieser von der Erde aus gesehen eine Sichel ist. Weil auf der Erde dann beinahe Neumond ist, stünde bei Ihnen beinahe die Vollerde am Himmel. Genau wie wir wegen des Mondlichts auch bei Nacht sehen können, würde das Licht der Erde Ihre Mondlandschaft beleuchten. (Weil die Erde viel größer ist als der Mond, ist die Vollerde am Mondhimmel ebenfalls viel größer und heller als der Vollmond am irdischen Himmel.) Dieses schwache Licht, das die dunkle Seite des Monds erhellt, wird oft als *aschfahles Licht* oder *Erdschein* bezeichnet. Es lässt uns den Umriss der gesamten Mondfläche selbst dann sehen, wenn noch kein Vollmond ist.

Häufige Irrtümer

Der Mond am Taghimmel und Sterne auf dem Mond

In Überlieferungen und Geschichten ist der Mond so sehr mit der Nacht verbunden, dass viele Menschen fälschlicherweise glauben, der Mond wäre nur bei Nacht sichtbar. Tatsächlich ist der Mond am Tag genauso oft über dem Horizont wie bei Nacht, allerdings ist er nur sichtbar, wenn sein Licht nicht vom Tageslicht überdeckt wird. Der Mond im ersten Viertel ist beispielsweise am späten Nachmittag bei seinem Aufgang am östlichen Himmel leicht zu erkennen und der Mond im letzten Viertel ist morgens, während er sich dem westlichen Horizont zuneigt, gut sichtbar.



Ein anderer Irrtum wird in Abbildungen begangen, in denen sich ein Stern im dunklen Teil des Monds befindet, während wir eine Sichel sehen. Dieser Stern scheint sich vor dem Mond zu befinden – doch das ist unmöglich, da sich der Mond viel näher bei uns befindet als jeder Stern.

Was verursacht Finsternisse?

Die Mondphasen wiederholen sich im Monatsrhythmus, aber immer mal wieder ist der Mond auch in deutlich eindrucksvollere Ereignisse involviert: Finsternisse. Es gibt zwei Arten davon (► Abbildung 2.24):

- Eine **Mondfinsternis** tritt auf, wenn sich die Erde direkt zwischen Sonne und Mond befindet, sodass der Erdschatten auf den Mond fällt.
- Eine **Sonnenfinsternis** tritt auf, wenn sich der Mond zwischen Sonne und Erde schiebt, sodass der Mondschaten auf die Erde fällt.

Beachten Sie, dass der Erdschatten während einer Mondfinsternis problemlos den gesamten Mond abdecken kann, da die Erde viel größer als der Mond ist. Daher kann eine Mondfinsternis immer von der gesamten Nachtseite der Erde aus gesehen werden. Im Gegensatz dazu kann der Schatten des Mondes zu jeder Zeit nur einen kleinen Teil der Erde bedecken. Deshalb müssen Sie sich auf dem relativ schmalen Pfad befinden, durch den sich der Schatten bewegt, um eine Sonnenfinsternis zu sehen. Daher sehen wir Mondfinsternisse häufiger als Sonnenfinsternisse, obwohl beide Finsternistypen etwa gleich häufig auftreten. (Tatsächlich sind Sonnenfinsternisse sogar geringfügig in der Überzahl.)

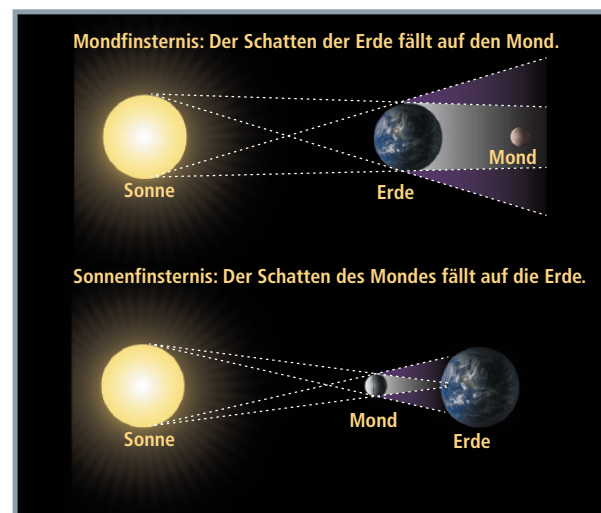


Abbildung 2.24: Diese Grafik illustriert die beiden Grundtypen von Finsternissen. Die Größenverhältnisse von Erde und Mond sind korrekt dargestellt, der relative Abstand zwischen ihnen wäre allerdings etwa 50-mal so groß wie hier gezeigt. Außerdem hat die Sonne einen etwa 100-mal so großen Durchmesser wie die Erde und die Entfernung Erde–Sonne ist etwa 400-mal so groß wie die Entfernung Erde–Mond.

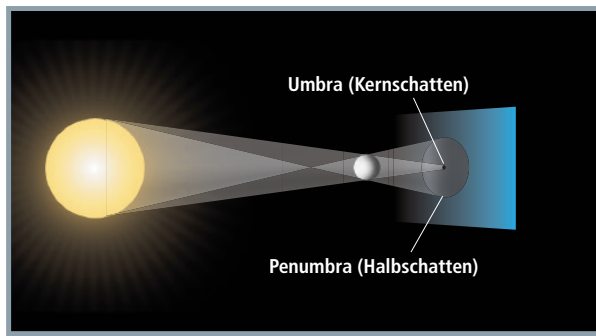
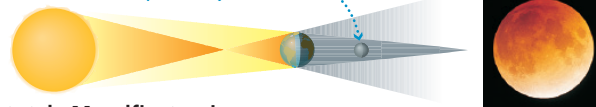


Abbildung 2.25: Diese Grafik zeigt die beiden kegelförmigen Bereiche des Schattens von Erde oder Mond, den das Sonnenlicht auf einen imaginären Bildschirm wirft. Wenn Sie aus dem Kernschatten zur Sonne zurückblicken, wäre sie vollständig abgedeckt. Wenn Sie sich dagegen im Halbschatten befinden, wäre die Sonne nur teilweise verdeckt.

Schattenregionen

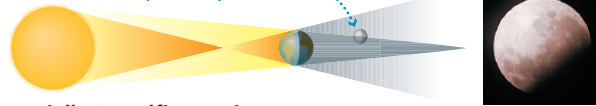
Um zu verstehen, was wir während der Finsternisse tatsächlich sehen, müssen wir uns die dreidimensionale Geometrie der Finsternisschatten ansehen. ► Abbildung 2.25 zeigt, wie Lichtstrahlen von den Rändern der Sonne laufen würden, wenn wir einen riesigen Bildschirm hinter die Erde oder den Mond stellen könnten. Beachten Sie, dass der Schatten aus zwei unterschiedlichen Bereichen besteht: einem zentralen Kernschatten (der Umbra), bei dem das Sonnenlicht vollständig blockiert wird, und einen umgebenden Halbschatten (der Penumbra), bei dem das Sonnenlicht nur teilweise

Der Mond durchläuft vollständig den Kernschatten (Umbra).



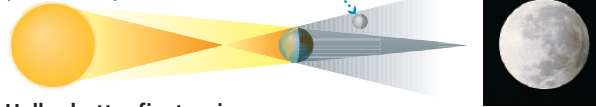
totale Mondfinsternis

Ein Teil des Mondes durchläuft den Kernschatten (Umbra).



partielle Mondfinsternis

Der Mond durchläuft den Halbschatten (Penumbra).



Halbschattenfinsternis

Abbildung 2.26: Die drei Erscheinungsformen einer Mondfinsternis. Der Mond ist während der Totalität eigentlich viel dunkler als während der partiellen Phase, wird hier aber so gezeigt, wie das menschliche Auge ihn aufgrund der Kontraste wahrnimmt.

abgedeckt wird. Anhand dieses Prinzips können wir Mond- und Sonnenfinsternisse im Detail betrachten.

Mondfinsternisse

Eine Mondfinsternis beginnt, wenn der Mond auf seiner Umlaufbahn zum ersten Mal in den Halbschatten der Erde eintritt. Danach können drei Arten der Mondfinsternis auftreten (► Abbildung 2.26). Sind Sonne, Erde und Mond nahezu perfekt auf einer Linie angeordnet, dann durchquert der Mond den Kernschatten der Erde, und es tritt eine **totale Mondfinsternis** ein. Ist die Ausrichtung nicht ganz so perfekt, durchquert nur ein Teil der Vollmondfläche den Kernschatten der Erde, der Rest bleibt im Halbschatten, sodass eine **partielle Mondfinsternis** vorliegt. Durchquert die Mondfläche nur den Halbschatten, tritt eine **Halbschattenfinsternis** ein.

Am häufigsten sind Halbschattenfinsternisse. Sie sind jedoch nicht besonders eindrucksvoll, weil sich der Vollmond nur wenig verfinstert. Bei einer partiellen Mondfinsternis hingegen verfinstert der Kernschatten der Erde deutlich einen Teil des Vollmonds. Die Krümmung des Schattens zeigt deutlich, dass die Erde rund ist. Eine totale Mondfinsternis ist besonders spektakulär, weil sich der Mond während der Totalität – dem Zeitraum, in dem sich der Mond vollständig im Kernschatten befindet (► Abbildung 2.27) – nicht nur verdunkelt, sondern sich auch rötlich verfärbt. Der von den Medien dafür in letzter Zeit geprägte Begriff „Blutmond“ dramatisiert das Phänomen allerdings unnötig. Die Totalität dauert ungefähr eine Stunde an. Dunkel wird der Mond, weil er sich im Erdschatten befindet.



Abbildung 2.27: Diese Kompositaufnahme zeigt (von links nach rechts), wie der Erdschatten während einer totalen Mondfinsternis über dem Mond läuft. Die Totalität (ganz rechts) begann kurz vor dem Untergang Mondes im Westen. Beachten Sie die deutliche Krümmung des Erdschattens und die Rötung des Vollmonds während der Totalität. Das Foto wurde auf der Kanareninsel Teneriffa (Spanien) aufgenommen.

Rot wird er, weil die Erdatmosphäre einen Teil des roten Lichtanteils der Sonne zum Mond streut.

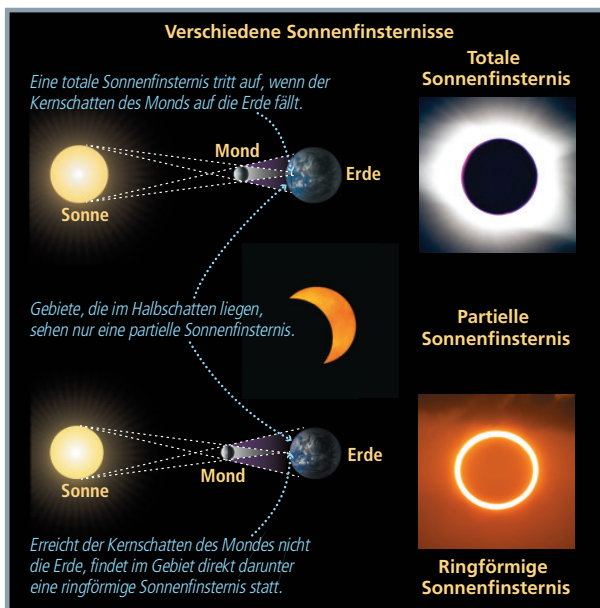
Sonnenfinsternisse

Auch bei Sonnenfinsternissen gibt es drei Erscheinungsformen (► Abbildung 2.28). Tritt eine Sonnenfinsternis ein, wenn sich der Mond auf seiner Umlaufbahn relativ nahe bei der Erde befindet, überstreicht der Kernschatten des Mondes einen kleinen Teil der Erdoberfläche (dessen Durchmesser etwa 270 km nie übersteigt). Innerhalb dieses Gebiets herrscht eine **totale Sonnenfinsternis**. Um dieses Gebiet der Totalität herum befindet sich ein viel größeres Gebiet (üblicherweise mit einem Durchmesser um 7000 km), das sich im Halbschatten des Mondes befindet. Innerhalb dieser Region nimmt man eine **partielle Sonnenfinsternis** wahr, in der nur ein Teil der Sonnenscheibe abgedeckt ist.

Tritt die Finsternis ein, wenn sich der Mond auf seiner Umlaufbahn relativ weit von der Erde entfernt befindet, ist die Winkelausdehnung des Mondes etwas kleiner; unter Umständen erreicht sein Kernschatten dann gar nicht mehr die Erdoberfläche. Im kleinen Gebiet direkt hinter dem Kernschatten nimmt man in diesem Fall eine **ringförmige Sonnenfinsternis** wahr. Dabei umgibt ein Ring aus Sonnenlicht die Mondscheibe.

Aufgrund der Überlagerung von Erdrotation und Mondumlauf um die Erde rasen Kern- und Halbschatten mit einer typischen Geschwindigkeit von etwa 1700 km/h über die Erdoberfläche. Daher zeichnet der Kernschatten eine schmale Linie über die Erde und die Totalität dauert nirgends länger als einige Minuten.

Eine totale Sonnenfinsternis ist ein spektakulärer Anblick. Zu Beginn scheint die Mondscheibe die Sonne gerade zu berühren. Im Lauf der folgenden Stunden „beißt“ der Mond scheinbar ein immer größeres Stück aus der Sonne heraus. Je näher die Totalität kommt, desto dunkler wird es und die Temperaturen fallen. Vögel begeben sich zur Nachtruhe, Grillen beginnen ihr nächtliches Konzert. Während der wenigen Minuten der Totalität deckt der Mond das Licht der Sonne vollständig ab, sodass die schwache Korona sichtbar wird (► Abbildung 2.29). Der Himmel ist so dunkel wie bei Dämmerung; die Planeten sowie helle Sterne werden am Himmel sichtbar. Nach dem Ende der Totalität tritt die Sonne allmählich hinter dem Mond hervor. Weil sich aber Ihre Augen an die Dunkelheit gewöhnt haben, scheint die Totalität viel schneller zu enden, als sie begonnen hat.



a Die drei Erscheinungsformen einer Sonnenfinsternis. Die Diagramme zeigen den auf die Erde fallenden Mondschaten. Beachten Sie die dunkle Umbra, die von der helleren Penumbra umgeben ist.



b Dieses Foto aus dem Erdborbit, aufgenommen von der Raumstation Mir aus, zeigt den Mondschaten (die Umbra) auf der Erde während der totalen Sonnenfinsternis vom 11. August 1999, die auch über Süddeutschland zu sehen war. Machen Sie sich klar, dass zu einem jeweiligen Zeitpunkt nur in einem kleinen Gebiet der Erde Totalität herrscht.

Abbildung 2.28: Während einer Sonnenfinsternis bewegt sich der Mondschaten schnell über die Erdoberfläche.

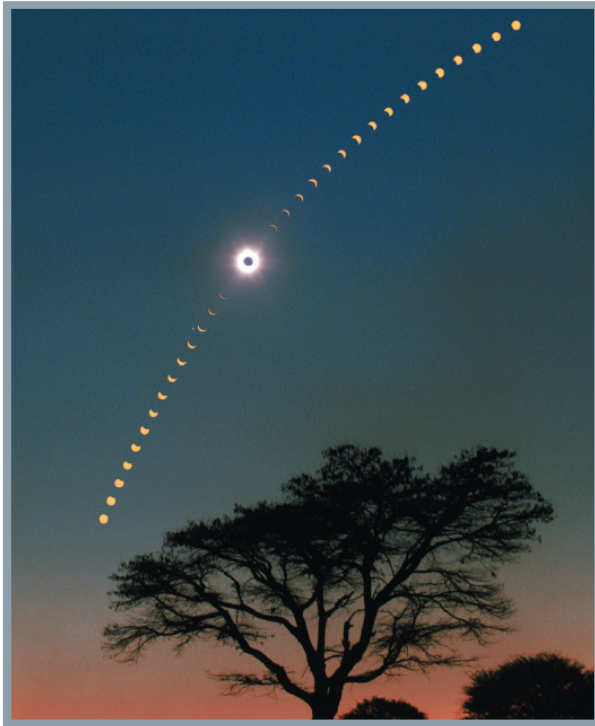


Abbildung 2.29: Diese mehrfach belichtete Aufnahme zeigt den Ablauf einer totalen Sonnenfinsternis. Die Totalität (die mittlere Aufnahme) dauert nur wenige Minuten, in denen die schwache Korona um die Sonne sichtbar wird.

Zum Nachdenken

Gehen Sie davon aus, dass in Teilen der Welt eine partielle Sonnenfinsternis zu sehen war. Ist noch am selben Tag, zwei Wochen oder zwei Monate später eine Mondfinsternis möglich? Erläutern Sie.

Bedingungen für Finsternisse

Wie häufig sind Finsternisse? Betrachten Sie nochmals das Schema zur Entstehung der Mondphasen in ► Abbildung 2.22. In dieser Abbildung sieht es aus, als würden Sonne, Erde und Mond bei jedem Neu- und Vollmond in einer Reihe stehen. Wäre dies das korrekte Bild der Mondumlaufbahn, dann hätten wir jeden Monat eine Mond- und eine Sonnenfinsternis. Das ist aber nicht der Fall, denn die Umlaufbahn des Mondes ist geringfügig (um ca. 5°) gegen die Ebene der Ekliptik geneigt (also der Ebene, in der die Umlaufbahn der Erde um die Sonne liegt).

Um sich das zu veranschaulichen, stellen Sie sich vor, die Ebene der Ekliptik wäre die Oberfläche des in ► Abbildung 2.30 skizzierten Teichs. Aufgrund seiner Bahn-

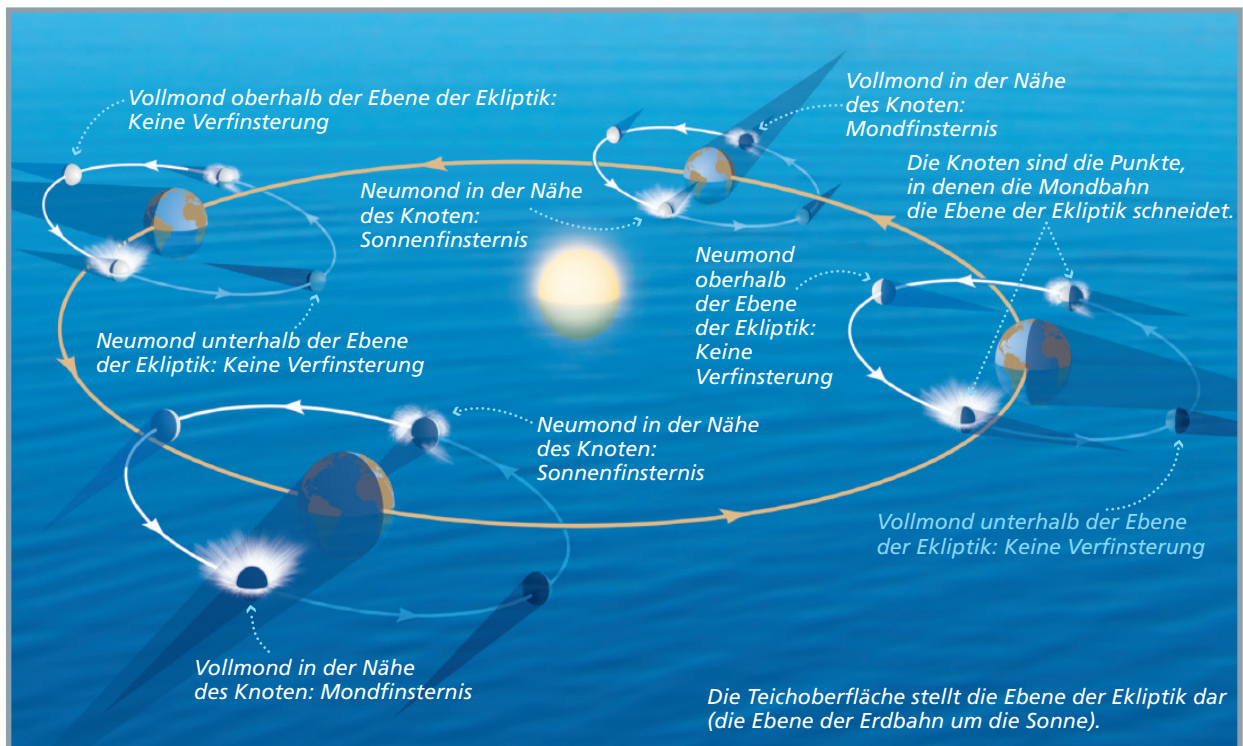


Abbildung 2.30: In dieser (nicht maßstabsgerechten) Grafik wird die Ebene der Ekliptik als Oberfläche eines Teichs dargestellt. Die Umlaufbahn des Mondes ist etwa 5° gegen die Ekliptik geneigt, daher befindet sich der Mond in einer Hälfte seiner Umlaufbahn über, in der anderen unterhalb der Ebene (also der Wasseroberfläche). Finsternisse treten nur auf, wenn der Mond sich zum einen in einem Knoten befindet (also gerade durch die Wasseroberfläche hindurchtritt) und zum anderen Neumond (für eine Sonnenfinsternis) oder Vollmond (für eine Mondfinsternis) herrscht. Dies ist im unteren linken und oberen rechten Teil der Grafik der Fall.

neigung ist der Mond die meiste Zeit entweder über oder unter der Wasseroberfläche. Bei jedem Umlauf um die Erde stößt er zweimal durch die Oberfläche hindurch: einmal, wenn er auftaucht, das andere Mal, wenn er eintaucht. Diese beiden Punkte der Umlaufbahn nennt man die **Knoten** der Mondbahn (oder kurz Mondknoten).

Bei näherer Betrachtung wird Ihnen auffallen, dass die Ausrichtung der Mondknoten das ganze Jahr über fast gleich bleibt (auf einer Diagonalen durch ► Abbildung 2.30). Daher befinden sich die Knoten zusammen mit Erde und Sonne nur zweimal im Jahr auf einer Linie. Finsternisse können nur innerhalb dieser auch als **Finsternissaisons** bezeichneten Zeiträume auftreten, die durchschnittlich etwa etwa fünf Wochen dauern. Damit eine Finsternis eintritt, müssen daher die folgenden Bedingungen vorliegen:

- Es muss Vollmond (für eine Mondfinsternis) oder Neumond (für eine Sonnenfinsternis) sein.
- Der Voll- bzw. Neumond tritt auf, wenn sich der Mond nah an einem der Knoten der Mondbahn befindet, also während einer Finsternissaison.

Da eine Finsternissaison ein paar Tage länger als ein Mondphasenzyklus dauert, enthält jede Finsternissaison immer eine Mondfinsternis (bei Vollmond) und eine Sonnenfinsternis (bei Neumond). Eine zweite Mond- oder Sonnenfinsternis kommt gelegentlich hinzu.

Vorhersage von Finsternissen

Nur wenige Phänomene haben die Menschheit im Verlauf der Geschichte mehr verwundert und inspiriert als Finsternisse. Für viele Kulturen waren Finsternisse mystische Ereignisse, die mit dem Schicksal oder Gottheiten zusammenhingen und über die unzählige Geschichten und Legenden kursierten. Eine dieser Legenden besagt, dass der griechische Philosoph Thales von Milet (ca. 624–546 v. Chr.) das Jahr (aber anscheinend nicht die richtige Zeit) einer totalen Sonnenfinsternis in seiner Heimat vorhergesagt hat. (Die antike Stadt Milet liegt in der heutigen Türkei.) Zufälligerweise trat die Finsternis ein, als sich zwei gegnerische Armeen – die Meder und die Lyder – zum Kampf aufstellten. Die Finsternis soll die beiden Armeen so erschreckt haben, dass sie die Waffen niederlegten, einen Friedensvertrag schlossen und nach Hause gingen. Da wir heute wissen, dass die einzige totale Sonnenfinsternis in dieser Region und etwa in jenem Zeitraum am 28. Mai 585 v. Chr. stattgefunden hat, kennen wir das genaue Datum der Vertragsunterzeichnung – es ist damit das früheste historische Ereignis, das exakt datiert werden kann.

Ein großer Teil des Geheimnisses, das Finsternisse umgibt, entstammt vermutlich der Schwierigkeit, sie vorherzusagen. Werfen Sie nochmals einen Blick auf ► Abbildung 2.30. Würde sie die ganze Wahrheit wiedergeben, dann würden die Finsternissaisons alle sechs Monate wiederkehren und die Vorhersage von Finsternissen wäre einfach. Bei einer beispielsweise immer im Januar und Juli stattfindenden Finsternissaisons würde bei jedem Vollmond und Neumond in dieser Zeit eine Finsternis eintreten. Die Abbildung lässt aber ein wesentliches Faktum zur Mondumlaufbahn außer Acht: Die Knoten drehen sich mit einer Umlaufdauer von 18,6 Jahren allmählich entlang der Mondumlaufbahn, dies wird auch als Nutation bezeichnet. Daher liegen zwei aufeinanderfolgende Finsternissaisons weniger als ein halbes Jahr auseinander (nur etwa 173 Tage) und finden daher in aufeinanderfolgenden Jahren zu unterschiedlichen Zeiten statt.

Die Kombination der sich veränderten Daten der Finsternissaison sowie des $29\frac{1}{2}$ -tägigen Zyklus der Mondphasen führt dazu, dass sich Finsternisse nach einem Zeitraum von 18 Jahren und 11,3 Tagen wiederholen. Dieser Zeitraum wird als **Saros-Zyklus** bezeichnet. Die Astronomen vieler vergangener Kulturen kannten diesen Zyklus und konnten vorhersagen, wann Finsternisse stattfinden würden. So konnten die Babylonier bereits vor 2500 Jahren mit bemerkenswertem Erfolg Finsternisse vorhersagen, Gleiches gilt für die Maya in Mittelamerika. Tatsächlich beinhaltet der Maya-Kalender einen Zyklus von 260 Tagen (Tzolk'in), der fast exakt dem 1,5-Fachen der 173,32 Tage zwischen aufeinanderfolgenden Finsternissen entspricht. Zwar ermöglicht der Saros-Zyklus eine Vorhersage, wann eine Sonnenfinsternis stattfindet, der Drittel-Tag in der Zykluslänge sorgt allerdings dafür, dass sich der Bereich der Erdoberfläche, wo eine Sonnenfinsternis sichtbar ist, mit jedem neuen Zyklus um etwa 120 Längengrade verschiebt. Diese und andere Feinheiten der Finsternisse (z.B. ob eine Sonnenfinsternis total oder ringförmig ist, was vom Abstand Erde–Mond zum Zeitpunkt der Sonnenfinsternis abhängt) machen genaue Finsternisvorhersagen sehr schwierig. Keine alte Kultur hatte die Kenntnisse, eine Finsternis in allen Details vorherzusagen.

Wir können heute Finsternisse präzise vorhersagen, weil wir die Details der Erd- und Mondbahn kennen. Viele astronomische Computerprogramme, Webseiten oder Apps führen die entsprechenden Berechnungen automatisch durch. In ► Tabelle 2.1 sind einige künfti-

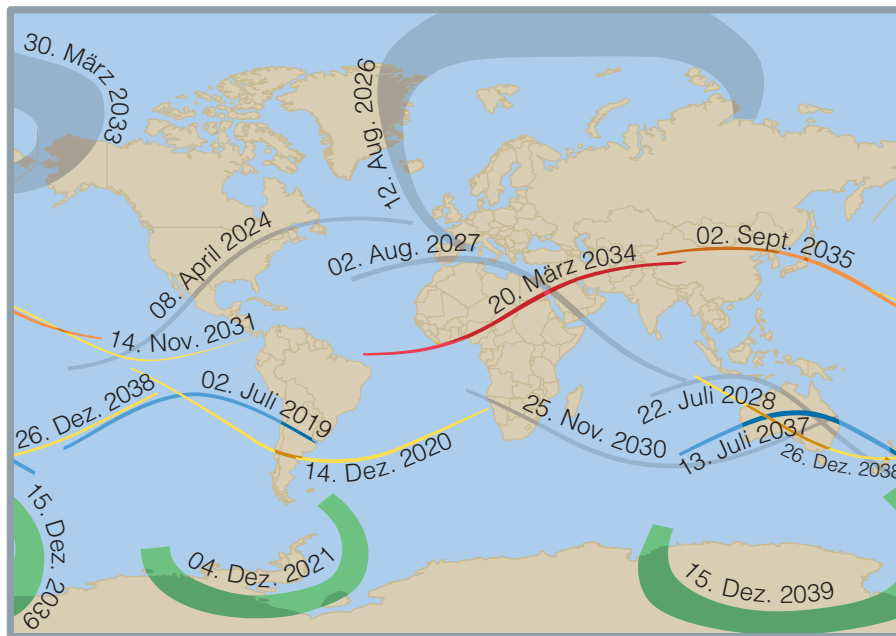


Abbildung 2.31: Diese Karte zeigt den Verlauf der Totalität für die Sonnenfinsternisse zwischen 2017 und 2045. Verlaufsbahnen in derselben Farbe bezeichnen Finsternisse, die sich in aufeinanderfolgenden Saros-Zyklen ereignen, die also 18 Jahre und 11 Tage auseinanderliegen. Die Sonnenfinsternis 2035 ereignet sich beispielsweise 18 Jahre und 11 Tage nach der Sonnenfinsternis von 2017 (beide sind in Rot dargestellt). (Die Daten stammen von der Eclipse-Homepage der NASA, die von Fred Espanak betrieben wird.)

ge Mondfinsternisse aufgeführt. Man sieht, dass die Finsternisse meist weniger als sechs Monate auseinanderliegen. Manchmal liegt aber auch nur ein Monat zwischen zwei Finsternissen, wie beispielsweise am 5. Juni und 5. Juli 2020. Diese beiden Finsternisse gehö-

ren zur selben Finsternissaison. ► Abbildung 2.31 zeigt den Verlauf der Totalität für die totalen Sonnenfinsternisse (nicht aber für partielle oder ringförmige) zwischen 2008 und 2030. Die Farben zeigen, welche Finsternisse innerhalb des Saros-Zyklus wiederkehren.

Tabelle 2.1: Die Mondfinsternisse zwischen 2020 und 2025*

Datum	Typ	Sichtbarkeitsregion
10. Januar 2020	Halbschatten	Europa, Afrika, Asien, Australien
05. Juni 2020	Halbschatten	Europa, Afrika, Asien, Australien
05. Juli 2020	Halbschatten	Amerika, Südwesteuropa, Afrika
30. November 2020	Halbschatten	Asien, Australien, Pazifik, Amerika
26. Mai 2021	total	Ostasien, Australien, Pazifik, Amerika
19. November 2021	partiell	Amerika, Nordeuropa, Ostasien, Australien, Pazifik
16. Mai 2022	total	Amerika, Europa, Afrika
08. November 2022	total	Asien, Australien, Pazifik, Amerika
05. Mai 2023	Halbschatten	Afrika, Asien, Australien
28. Oktober 2023	partiell	Amerika, Europa, Afrika, Asien, Australien
25. März 2024	Halbschatten	Amerika
18. September 2024	partiell	Amerika, Europa, Afrika
14. März 2025	total	Pazifik, Amerika, Westeuropa, Westafrika
07. September 2025	total	Europa, Afrika, Asien, Australien

* Die Zeitangaben basieren auf der Universal Time (UT) und entsprechen daher dem Datum in Greenwich (England) zum Zeitpunkt der Finsternis. Die lokale Zeit und das lokale Datum einer bestimmten Finsternis erfahren Sie aus den Nachrichten oder von bestimmten Webseiten. (Diese Daten stammen von der Eclipse Homepage der NASA, die von Fred Espanak betrieben wird.)

SEHEN SIE SELBST



Finden Sie mithilfe astronomischer Software oder über das Internet heraus, welche Planeten heute Nacht sichtbar sind und wo man nach ihnen suchen muss. Gehen Sie nach draußen und versuchen Sie, sie zu finden. Kann man sie leicht identifizieren oder ist es schwierig?

Das Planetenrätsel der Antike

2.4

Bislang haben wir die Erscheinung und die Bewegung der Sterne sowie von Sonne und Mond am Himmel betrachtet. Damit stehen nur die Planeten noch aus. Wie wir bald sehen werden, war die Planetenbewegung im Altertum ein Mysterium, das eine wesentliche Rolle in der Entwicklung der modernen Zivilisation gespielt hat.

Fünf Planeten lassen sich mit bloßem Auge leicht auffinden: Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn. Merkur ist nur selten beobachtbar und wenn, dann nur unmittelbar nach Sonnenuntergang oder vor Sonnenaufgang, denn er steht sehr dicht bei der Sonne. Die Venus erstrahlt oft sehr hell am frühen Abend im Westen oder am frühen Morgen im Osten. Wenn Sie am frühen Abend oder frühen Morgen einen sehr hellen „Stern“ sehen, ist das vermutlich die Venus. Wenn Jupiter bei Nacht sichtbar ist, dann ist er nach Sonne und Mond das hellste Objekt am Himmel. Der Mars lässt sich an seiner rötlichen Farbe oft erkennen, allerdings sollten Sie eine Sternkarte zu Rate ziehen, um sicherzugehen, dass Sie nicht einen hellen roten Stern sehen. Saturn ist mit bloßem Auge ebenfalls leicht zu sehen. Weil es aber viele Sterne gibt, die so hell sind wie Saturn, sollte man schon wissen, wohin man blicken muss. (Es hilft zu wissen, dass Planeten nicht so stark funkeln wie Sterne.) Manchmal stehen einige Planeten dicht beieinander und bilden einen besonders schönen Anblick (► Abbildung 2.32).

Weshalb war die Planetenbewegung am Himmel einst so rätselhaft?

Die Menschen haben bereits vor langer Zeit die Bewegung der Planeten zwischen den Sternen sehr sorgfältig beobachtet. Auch Sie können das tun. In jeder Nacht bewegen sich die Planeten genauso wie die Sterne am Himmel, sie gehen im Osten auf und im Westen unter.

Wenn Sie allerdings die Planetenbewegung über Wochen oder Monate hinweg beobachten, werden Sie feststellen, dass sich die Planeten allmählich durch die Sternbilder des Tierkreises bewegen. (Das Wort Planet stammt vom altgriechischen Wort für „Wandelstern“ ab.) Für sich allein genommen ist diese Bewegung nicht weiter verwunderlich. Schließlich bewegen sich auch Sonne und Mond durch diese Sternbilder.

Anders als Sonne und Mond, die sich relativ zu den Sternen stetig ostwärts bewegen, verändern die Planeten sowohl ihre Geschwindigkeit als auch ihre Helligkeit, während sie sich durch den Himmel bewegen. Obwohl sich Planeten *üblicherweise* relativ zu den Sternen nach Osten bewegen, kehren sie manchmal ihre Bewegungsrichtung um und bewegen sich dann nach Westen durch den Tierkreis (► Abbildung 2.33a und b). Diese Perioden der **scheinbaren retrograden Bewegung** (retrograd bedeutet „rückwärts“) dauern, je nach Planet, zwischen mehreren Wochen und mehreren Monaten.

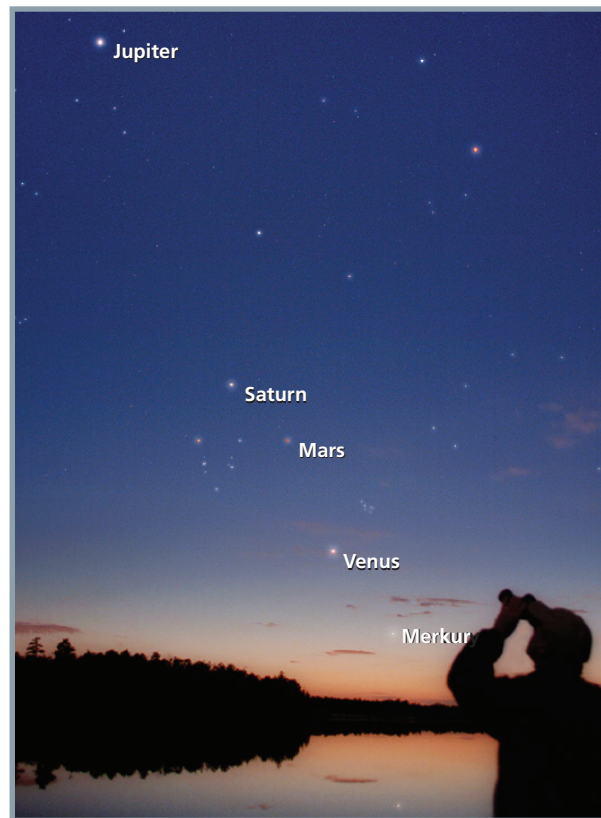
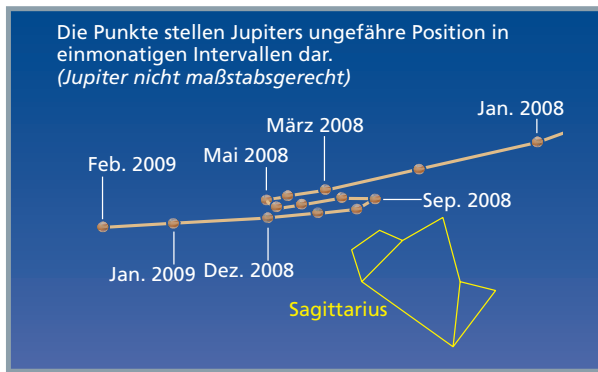
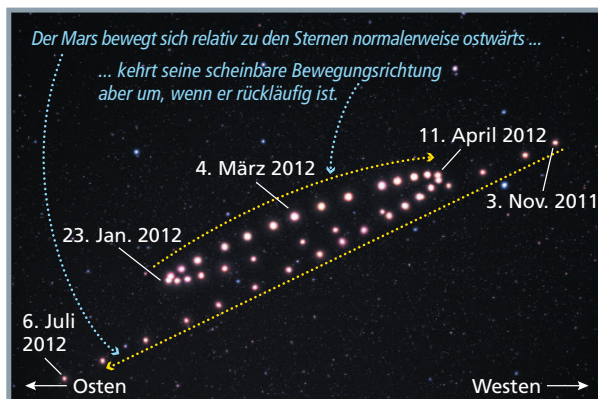


Abbildung 2.32: Dieses Foto zeigt eine seltene Planetenanordnung, in der alle fünf mit bloßem Auge sichtbaren Planeten am Himmel scheinbar eng beieinanderstehen. Es wurde am 23. April 2002, kurz nach Sonnenuntergang, in der Nähe von Chatsworth (New Jersey) aufgenommen. Die nächste vergleichbare Gruppierung dieser fünf Planeten tritt erst im September 2040 ein.



a Dieses Diagramm zeigt die ungefähre Position Jupiters am Sternhimmel zwischen Anfang 2008 und Anfang 2009. Beachten Sie die Rückwärtsbewegung der Bahn zwischen Mai und September 2008.



b Diese Kompositaufnahme aus Einzelbildern, die in den Jahren 2011 und 2012 in jeweils 5–7 Tagen Abstand aufgenommen wurden, zeigt die rückläufige Bewegung des Mars. Beachten Sie, dass Mars in der Mitte der retrograden Schleife am größten und am hellsten erscheint, da er sich zu diesem Zeitpunkt am erdnächsten Punkt seiner Umlaufbahn befand.

Abbildung 2.33: Zwei Beispiele für eine scheinbare retrograde Bewegung. Beachten Sie, dass der Mars in der Mitte der retrograden Schleife am größten und hellsten scheint, denn dort ist er in seiner Umlaufbahn der Erde am nächsten.

Die Völker der Antike, die an ein geozentrisches Weltbild glaubten, konnten sich die täglichen Bahnen der Planeten am Himmel leicht durch die Annahme erklären, dass es tatsächlich eine Himmelskugel gebe und sie sich jeden Tag um die Erde drehe. Aber die retrograde Bewegung der Planeten blieb ein großes Geheimnis. Warum konnten sich die Planeten manchmal umdrehen und rückwärts bewegen? Wie wir in *Kapitel 3* noch sehen werden, hatten die frühen Griechen einige raffinierte Ideen, um die gelegentliche Rückwärtsbewegung der Planeten zu erklären, obwohl sie an die falsche Vorstellung eines geozentrischen Universums gebunden waren. Allerdings war die griechische Erklärung ziemlich komplex und letztendlich falsch.

Im Gegensatz dazu lässt sich die retrograde Bewegung in einem heliozentrischen Sonnensystem einfach erklären. Sie können das mit der Hilfe eines Freunds leicht selbst nachvollziehen (► *Abbildung 2.34 a*). Wählen Sie auf einem Platz einen Punkt, der die Sonne darstellt. Sie selbst können die Erde verkörpern, indem Sie sich gegen den Uhrzeigersinn um die Sonne bewegen, Ihr Freund soll einen der äußeren Planeten darstellen (beispielsweise Mars oder Jupiter), indem er in größerer Entfernung ebenfalls im Gegenuhrzeigersinn um die Sonne geht. Ihr Freund sollte langsamer als Sie gehen, so wie sich auch die äußeren Planeten langsamer um die Sonne bewegen. Beobachten Sie, wie Ihr Freund sich in Bezug auf entfernte Bäume oder Gebäude bewegt. Obwohl Sie sich beide in derselben Richtung um die Sonne bewegen, scheint sich Ihr Freund vor dem fernen Hintergrund immer dann rückwärts zu bewegen, wenn Sie ihn auf Ihrer „Umlaufbahn“ einholen und überholen.

Dieser Versuch lässt sich direkt auf die Planeten übertragen. Mars benötigt beispielsweise fast zwei Jahre für einen Sonnenlauf (genau sind es 1,88 Jahre) und hat daher in der Zeit, in der die Erde einmal die Sonne umkreist, erst eine halbe Umdrehung vollbracht. Wenn Sie an verschiedenen Punkten ihrer Umlaufbahnen Verbindungslinien zwischen Erde und Mars ziehen, werden Sie sehen, dass diese Verbindungslinien sich relativ zu den Sternen üblicherweise nach Osten bewegen. Wenn die Erde auf ihrer Umlaufbahn den Mars überholt (► *Abbildung 2.34 b*) bewegen sich die Linien aber nach Westen. Wie Ihr Freund im Versuch ändert der Mars selbst nie seine Umlaufrichtung. Allerdings *scheint* er aus der Perspektive der Erde seine Richtung zu ändern. Um die scheinbare retrograde Bewegung von Merkur und Venus zu verstehen, die ja der Sonne näher stehen als die Erde, tauschen Sie einfach die Rollen mit Ihrem Freund und wiederholen Sie den Versuch.

Warum lehnten die alten Griechen die richtige Erklärung für die Planetenbewegung ab?

Wenn die scheinbare retrograde Bewegung sich doch so einfach dadurch erklären lässt, dass die Erde um die Sonne kreist, warum ist dann dieser Gedanke nicht schon in früheren Zeiten aufgekommen? Tatsächlich wurde der Gedanke, dass die Erde um die Sonne kreist, bereits um 260 v. Chr. von dem griechischen Astronomen Aristarchos verbreitet. Es ist nicht bekannt, warum Aristarchos ein Sonnensystem mit der Sonne im

SPEZIALTHEMA

Beeinflusst der Mond das menschliche Verhalten?

Von Werwölfen bis hin zur Romantik unter dem Vollmond – in allen menschlichen Kulturen findet sich immer wieder die Behauptung, dass unser Verhalten von den Mondphasen beeinflusst wird. Stecken auch wissenschaftliche Tatsachen dahinter?

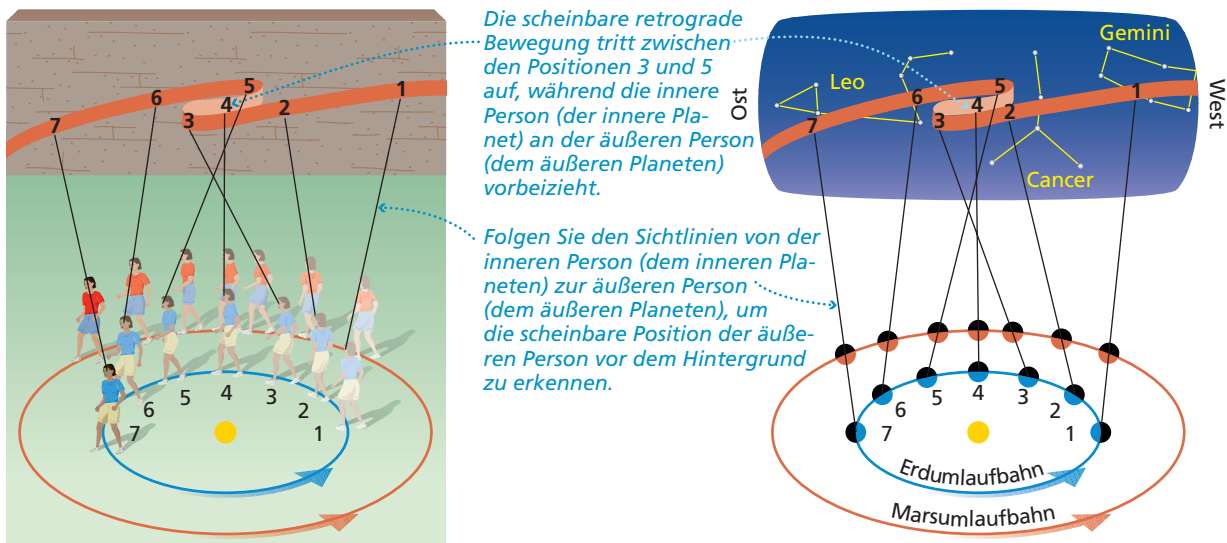
Der Mond beeinflusst die Erde ganz eindeutig. Der Mond ist beispielsweise der Hauptverantwortliche für die Gezeiten (Abschnitt 4.5). Allerdings beeinflusst die Gezeitenkraft so kleine Objekte wie den menschlichen Körper nicht direkt.

Wenn die physikalische Kraft des Mondes das menschliche Verhalten nicht beeinflusst, nimmt er dann auf andere Weise Einfluss auf uns? Natürlich wird jemand, der an der Küste wohnt, vom Steigen und Fallen der Gezeiten beeinflusst. Wassersportler, Fischer und Seeleute müssen den Gezeiten folgen. Obwohl der Mond ihr Verhalten nicht direkt beeinflusst, nimmt er doch indirekt, über seinen Einfluss auf die Ozeane, Einfluss auf sie.

Auch physiologische Muster bei vielen Arten scheinen den Mondphasen zu folgen. Einige Krabben und Schildkrö-

ten legen beispielsweise nur bei Vollmond ihre Eier. Beim Menschen ist keine der Eigenschaften so eng mit den Mondphasen verknüpft. Angesichts dessen, dass die Fortpflanzungszyklen bei anderen Säugetieren deutlich abweichen, scheint die Ähnlichkeit der durchschnittlichen Dauer des weiblichen Menstruationszyklus und der Monatslänge ein reiner Zufall zu sein.

Über die genannten Beispiele hinaus sind Behauptungen, das menschliche Verhalten werde von den Mondphasen beeinflusst, wissenschaftlich nur schwer zu belegen. So könnte es beispielsweise zwar sein, dass ein bestimmtes Verhalten bei Vollmond häufiger auftritt, andererseits wäre aber auch möglich, dass dieses Verhalten bei hellerem Himmel leichter ausgeübt werden kann. Ein schöner Vollmond könnte in Ihnen den Wunsch wecken, am Strand im Mondschein spazieren zu gehen. Es gibt aber keine wissenschaftlichen Hinweise anzunehmen, dass der Vollmond Sie in gleicher Weise beeinflussen würde, wenn Sie in einer tiefen Höhle eingeschlossen wären.



a Versuch zur retrograden Bewegung: Sie sehen, wie sich Ihr Freund (in Rot) vor dem fernen Hintergrund der Gebäude meist in einer Richtung bewegt. Doch wenn Sie (in Blau) ihn auf Ihrer Umlaufbahn einholen und überholen, scheint er sich rückwärts zu bewegen.

b Diese Zeichnung überträgt den Versuch auf einen Planeten. Betrachten Sie die Verbindungslinien zwischen Erde und Mars in der nummerierten Reihenfolge. Sie sehen, dass Mars sich vor dem Hintergrund der Sterne westwärts zu bewegen scheint, während die Erde auf ihrer Umlaufbahn an ihm vorbeizieht (etwa zwischen den Punkten 3 und 5 der Zeichnung).

Abbildung 2.34: Die scheinbare retrograde Bewegung – die gelegentliche Rückwärtsbewegung von Planeten vor dem Hintergrund der Sterne – lässt sich in einem heliozentrischen Sonnensystem leicht erklären.

Zentrum propagierte, aber die Tatsache, dass es die Planetenbewegung ganz natürlich erklärte, dürfte eine Rolle gespielt haben (siehe *Spezialthema, Seite 67*). Dennoch lehnten Aristarchos' Zeitgenossen diesen Gedanken ab und so dauerte es noch fast 2000 Jahre, bis sich seine Idee von einem heliozentrischen Sonnensystem durchsetzte.

Es gab eine Reihe von Gründen, warum die Griechen den Gedanken eines geozentrischen Universums so ungern aufgeben haben; einer der wichtigsten war die Unmöglichkeit, ein Phänomen namens **stellare Parallaxe** zu beobachten. Strecken Sie einen Arm aus und halten Sie einen Finger hoch. Wenn Sie den Finger nicht bewegen und abwechselnd das linke und rechte Auge öffnen bzw. schließen, dann scheint Ihr Finger vor dem Hintergrund hin und her zu springen. Diese scheinbare Bewegung, die sogenannte Parallaxe, tritt auf, weil Ihre Augen den Finger von unterschiedlichen Seiten Ihrer Nase aus betrachten. Wenn Sie Ihren Finger näher ans Gesicht führen, vergrößert sich die Parallaxe. Betrachten Sie dagegen einen entfernten Mast oder Baum, werden Sie gar keine Parallaxe feststellen. Dieses einfache Experiment zeigt, dass die Parallaxe von der Entfernung abhängt; dabei weisen nähere Objekte eine größere Parallaxe auf als weiter entfernte.

Stellen Sie sich nun vor, dass Ihre beiden Augen die Erde auf gegenüberliegenden Seiten ihrer Umlaufbahn darstellen und Ihr Finger einen relativ nahe gelegenen Stern; das ist das Grundprinzip der stellaren Parallaxe. Weil wir also die Sterne zu unterschiedlichen Zeiten von unterschiedlichen Orten auf unserer Sonnenumlaufbahn beobachten, sollten sich nahe gelegene Sterne vor dem Hintergrund weiter entfernter Sterne *scheinbar* auf kleinen Ellipsen bewegen (► Abbildung 2.35).

Weil die Griechen aber glaubten, alle Sterne würden auf derselben Himmelskugel liegen, erwarteten sie eine etwas andere Art der stellaren Parallaxe. Wenn die Erde die Sonne umkreisen würde, so ihre Argumentation, wären wir zu verschiedenen Zeiten des Jahres unterschiedlichen Bereichen der Himmelskugel näher und sollten daher Veränderungen im Winkelabstand der Sterne beobachten. Trotz aller Bemühungen fanden Sie jedoch keine Spur einer stellaren Parallaxe. Sie schlossen daher, dass eine der beiden folgenden Aussagen richtig sein müsste:

- Die Erde kreist um die Sonne, aber die Sterne sind so weit weg, dass eine stellare Parallaxe für das bloße Auge nicht zu erkennen ist.
- Es gibt keine stellare Parallaxe, weil sich die Erde im Zentrum des Universums befindet.

Zum Nachdenken

Wie weit liegen gegenüberliegende Punkte der Erdbahn auseinander? Wie weit sind die nächsten Sterne entfernt? Beschreiben Sie die Herausforderung bei der Beobachtung der stellaren Parallaxe. Es könnte hilfreich sein, sich den Erdborbit und die Entfernung zu den nächsten Sternen in dem aus Kapitel 1 bekannten Maßstab 1 : 10 Milliarden vorzustellen.

Abgesehen von wenigen bemerkenswerten Ausnahmen (wie Aristarchos) lehnten die Griechen die richtige Antwort (nämlich die erste) ab, weil sie sich nicht vorstellen konnten, dass die Sterne so weit entfernt wären. Heute beobachten wir mithilfe von Satellitenmissionen wie *Gaia* die stellare Parallaxe und haben den direkten Nachweis, dass sich die Erde um die Sonne bewegt. Genaue Messungen der stellaren Parallaxe sind die verlässlichste Methode, um die Entfernungen nahe gelegener Sterne zu messen (*Abschnitt 15.1*).

Das altertümliche Geheimnis der Planeten hat einen Großteil der historischen Debatte über die Stellung der Erde im Universum in Gang gehalten. Auf vielfache Weise können wir die technisierte Gesellschaft, die wir heute für so selbstverständlich halten, direkt auf die wissenschaftliche Revolution zurückführen, die mit dem Versuch begann, die merkwürdige Bewegung der Planeten am Himmels zu erklären. Wir werden uns im nächsten Kapitel genauer mit dieser Revolution befassen.

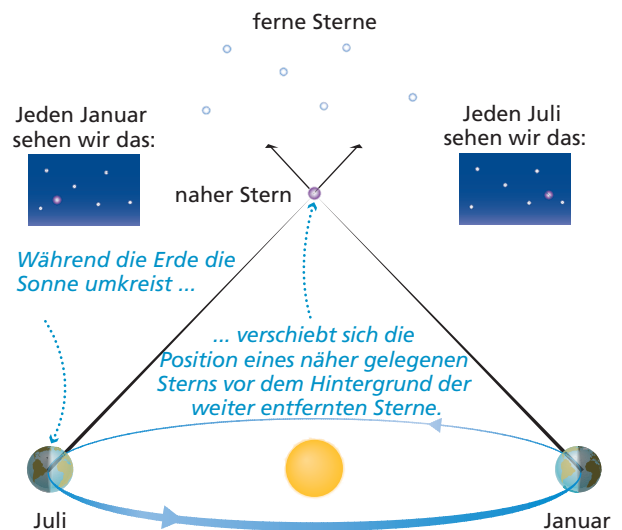


Abbildung 2.35: Die stellare Parallaxe ist die scheinbare Positionsänderung eines Sterns, den wir von unterschiedlichen Orten der Erdumlaufbahn beobachten. Diese Abbildung übertreibt die Verhältnisse maßlos. Die Größe der tatsächlichen Verschiebungen ist viel zu klein, als dass man sie mit bloßem Auge sehen könnte.

SPEZIALTHEMA

Wer vertrat als Erster das heliozentrische Sonnensystem?

Sie kennen sicherlich Kopernikus, dessen Arbeit Mitte des 16. Jahrhunderts die Revolution in Gang gesetzt hat, die schließlich den antiken Glauben an ein geozentrisches Sonnensystem hinwegfegte (*Abschnitt 3.3*). Allerdings war Kopernikus keineswegs der erste Mensch, der den Gedanken vertrat, die Erde würde um die Sonne kreisen. Als Kopernikus sich mit dieser Idee befasste, war sie schon fast 2000 Jahre alt.

Soweit wir wissen, arbeitete der griechische Wissenschaftler Aristarchos (ca. 310–230 v. Chr.) als Erster an der Idee, dass sich die Erde um die Sonne dreht und nicht umgekehrt. Er verbreitete seine Vorstellungen etwa um 260 v. Chr. Nur wenige von Aristarchos' Arbeiten sind erhalten; daher wissen wir nicht, was ihn zu dieser Idee brachte, die der damaligen Gewissheit eines geozentrischen Universums so sehr widersprach. Allerdings ist es sehr wahrscheinlich, dass er zu dem heliozentrischen Sonnensystem ermutigt wurde, weil es eine viel natürlichere Erklärung für die retrograde Bewegung der Planeten ermöglicht. Um das Fehlen einer erkennbaren stellaren Parallaxe zu erklären, nahm Aristarchos an, dass die Sterne extrem weit entfernt waren.

Aristarchos stützte seine Argumente, indem er die Größen von Mond und Sonne bestimmte. Während einer Mondfinsternis beobachtete er den Erdschatten auf dem Mond und schätzte anhand seiner Beobachtung den Monddurchmesser auf ein Drittel des Erddurchmessers – nur geringfügig über dem tatsächlichen Wert. Mithilfe eines geometrischen Arguments, das auf dem Winkel zwischen Sonne und dem Mond im ersten Viertel sowie im dritten Viertel basierte, kam er zu dem Schluss, dass die Sonne größer sein muss als die Erde. (Aller-

dings waren Aristarchos' Messungen falsch. Er bestimmte den Sonnendurchmesser auf das Siebenfache des Erddurchmessers, der tatsächliche Wert beträgt etwa das Hundertfache.) Seine Schlussfolgerung, die Sonne müsse größer sein als die Erde, könnte ein weiterer Grund für seine Annahme sein, die Erde kreise um die Sonne statt umgekehrt.

Obwohl er vermutlich als Erster die Idee vertrat, dass die Erde die Sonne umkreist, beruhen Aristarchos' Arbeiten zum großen Teil auf den Werken früherer Gelehrter. Herakleides (ca. 388–315 v. Chr.) hatte bereits früher die Ansicht vertreten, dass die Erde rotiere. Aristarchos könnte darauf aufgebaut haben, um die scheinbare tägliche Drehung der Sterne am Himmel zu erklären. Herakleides hatte zudem vorgeschlagen, dass nicht alle Himmelskörper die Erde umkreisen. Da Merkur und Venus sich am Himmel immer in relativer Nähe zur Sonne aufhalten, argumentierte er, dass diese beiden Planeten die Sonne umkreisen müssten. Mit seiner Argumentation, dass *alle* Planeten die Sonne umkreisen, hatte Aristarchos also die Gedanken von Herakleides und anderen vor ihm erweitert.

Aristarchos fand bei seinen Zeitgenossen nicht viel Gehör, doch seine Ideen waren nie wirklich tot. Sie wurden zu allen Zeiten von verschiedenen Gelehrten am Leben erhalten; Kopernikus war sich der Lehren von Aristarchos sehr wohl bewusst, als er seine eigene Vorstellung eines heliozentrischen Sonnensystems veröffentlichte. Dadurch beruht unser heutiges Verständnis des Universums zumindest teilweise auf der bemerkenswerten Vision eines Menschen, der vor über 2300 Jahren geboren wurde.

Ü B E R B L I C K

Kapitel 2 im Zusammenhang

In diesem Kapitel haben wir einen Überblick über die Erscheinungen an unserem Himmel gewonnen. Behalten Sie die folgenden Gedanken zum Gesamtbild in Erinnerung, wenn Sie tiefer in die Astronomie eintauchen:

- Astronomie wird Ihnen mehr Freude bereiten, wenn Sie den Himmel beobachten. Je mehr Sie über das Erscheinungsbild und die scheinbaren Bewegungen des Himmels lernen, umso mehr werden Sie das zu schätzen wissen, was Sie vom Universum sehen.
- Aus unserem Blickwinkel von der Erde ist die Vorstellung bequem, dass wir uns im Zentrum einer großen Himmels-

kugel befinden – obwohl wir auf einem Planeten leben, der einen Stern in einem ungeheuer großen Universum umkreist. Wir können die Erscheinungen an unserem lokalen Himmel verstehen, indem wir uns vorstellen, wie die Himmelskugel über unserer geografischen Breite aussieht.

- Die meisten Phänomene des Himmels sind recht leicht zu beobachten und zu verstehen. Trotzdem waren die komplexeren Phänomene – insbesondere Finsternisse und die scheinbare retrograde Bewegung der Planeten – für unsere Vorfahren über Tausende Jahre eine Herausforderung. Der Wunsch, diese Phänomene zu verstehen, hat Wissenschaft und Technik vorangetrieben.

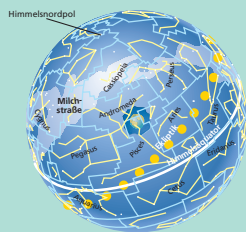
M E I N E K O S M I S C H E P E R S P E K T I V E

Egal wie abstrakt oder seltsam die Astronomie Ihnen manchmal erscheinen mag, Sie können sie immer mit Ihrer eigenen Wahrnehmung des Himmels über uns in Verbindung bringen. Die Geschichte der Astronomie ist eng mit der Entwicklung unserer Zivilisation verwoben.

Z U S A M M E N F A S S U N G

2.1 Muster am Nachthimmel

► Der Anblick des Universums von der Erde aus



Sterne und andere Himmelsobjekte scheinen sich auf einer großen **Himmelskugel** zu befinden, welche die Erde umgibt. Wir unterteilen die Himmelskugel in Sternbilder mit wohldefinierten Grenzen. Von jedem beliebigen Ort der Erde aus sehen wir zu jeder Zeit die halbe Himmelskugel als die Himmelskuppel unseres **lokalen Himmels**; in ihm bildet der **Horizont** die Grenze zwischen Erde und Himmel, der **Zenit** ist der Punkt direkt über uns und der **Meridian** verläuft genau von Süden durch den Zenit genau nach Norden.

► Warum gehen Sterne auf und unter?



Aufgrund der Erdrotation scheinen die Sterne im Lauf eines Tages um die Erde zu kreisen. Ein Stern, dessen Kreis vollständig oberhalb unseres Horizonts liegt, wird als **zirkumpolar** bezeichnet. Andere Sterne kreisen auf Bahnen, die den

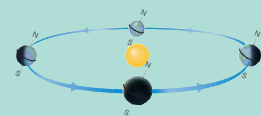
Horizont überqueren. Sie gehen daher jeden Tag im Osten auf und im Westen unter.

► Warum hängen die sichtbaren Sternbilder von der geografischen Breite und der Jahreszeit ab?

Die sichtbaren Sternbilder wechseln im Lauf des Jahres, weil aufgrund unserer Bahn um die Sonne unser Nachthimmel in verschiedenen Regionen des Weltalls liegt. Die Sternbilder variieren mit der **geografischen Breite** des Beobachtungsorts, weil die Breite die Orientierung des Horizonts relativ zur Himmelskugel festlegt. Der Himmel verändert sich nicht mit der **geografischen Länge**.

2.2 Die Ursache der Jahreszeiten

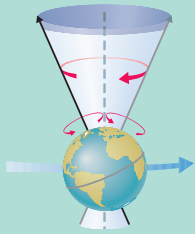
► Was verursacht die Jahreszeiten?



Ursache der Jahreszeiten ist die Neigung der Erdachse. Die Achse zeigt das ganze Jahr über in dieselbe Richtung (auf Polaris). Während

also die Erde um die Sonne kreist, werden verschiedene Regionen der Erde zu verschiedenen Zeiten des Jahres unterschiedlich vom Sonnenlicht beleuchtet. Die **Sommer-** und **Wintersonnenwenden** sind die Zeitpunkte im Jahr, an denen die Nordhalbkugel das meiste bzw. das wenigste Sonnenlicht bekommt. **Frühlings-** und **Herbst-Tagundnachtgleichen** sind die beiden Zeitpunkte, an denen beide Hemisphären gleich viel Licht erhalten.

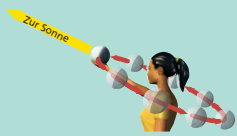
► Wie verändert sich die Orientierung der Erdachse im Lauf der Zeit?



Der 26 000 Jahre dauernde Zyklus der **Präzession** verändert die Orientierung der Erdachse im Weltraum, obwohl die Achsenneigung von etwa $23,5^\circ$ gegen die Ekliptik sich nicht ändert. Die sich verändernde Orientierung der Erdachse verändert das Muster der Jahreszeiten nicht. Allerdings ändert sie die Identität eines etwaigen „Polarsterns“ und verschiebt die Orte der Sonnenwenden und der Tagundnachtgleichen auf der Erdumlaufbahn.

2.3 Der Mond: Unser ständiger Begleiter

► Warum gibt es Mondphasen?



Die **Mondphase** hängt davon ab, welche Position relativ zur Sonne der Mond auf seiner Erdumlaufbahn einnimmt. Die Hälfte des Monds, die der Sonne zugewandt ist, ist immer beleuchtet, während die andere Hälfte im Dunkeln liegt.

Von der Erde aus sehen wir unterschiedliche Kombinationen heller und dunkler Bereiche.

► Was verursacht Finsternisse?

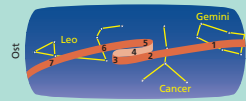


Fällt der Erdschatten auf den Mond, so haben wir eine **Mondfinsternis**. Blockiert der Mond unseren Blick auf die Sonne, dann sehen wir eine

Sonnenfinsternis. Finsternisse treten nicht bei jedem Neubzw. Vollmond auf, weil die Mondumlaufbahn geringfügig gegen die Ebene der Ekliptik geneigt ist. Es gibt unterschiedliche Erscheinungsformen von Finsternissen, je nachdem, wohin die dunklen Kernschatten und die helleren Halbschatten fallen.

2.4 Das Planetenrätsel der Antike

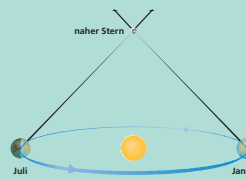
► Weshalb war die Planetenbewegung am Himmel früher so rätselhaft?



In Bezug auf die Sterne bewegen sich Planeten üblicherweise ostwärts über den Himmel. Allerdings gibt es Zeiträume über einige Wochen oder Monate hinweg, in denen sich ihre Bewegungsrichtung umkehrt.

Diese **scheinbare retrograde Bewegung** tritt auf, wenn die Erde an einem anderen Planeten vorbeizieht (oder von einem Planeten überholt wird). Dies war im Altertum ein großes Rätsel, denn damals ging man von einer Erde aus, die im Zentrum des Universums ruht.

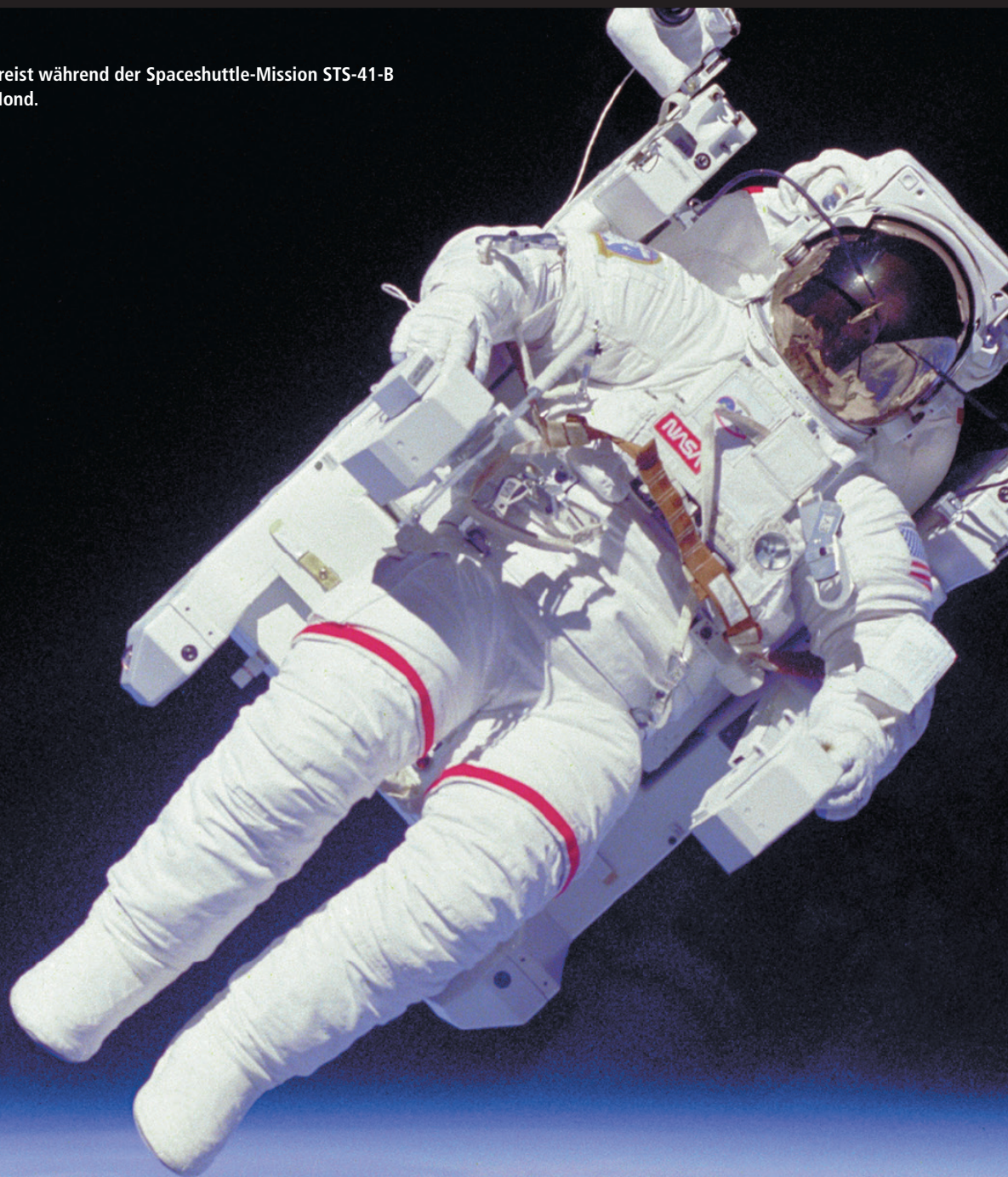
► Warum lehnten die alten Griechen die richtige Erklärung für die Planetenbewegung ab?



Die Griechen lehnten den Gedanken, die Erde umkreise die Sonne, unter anderem deswegen ab, weil sie keine **stellare Parallaxe** erkennen konnten. Das ist eine geringfügige scheinbare Änderung der Sternpositionen im Verlauf eines Jahres.

Für die meisten Griechen schien es unwahrscheinlich, dass die Sterne so weit entfernt lägen, dass man eine stellare Parallaxe nicht mit bloßem Auge erkennen könnte; doch genau das ist der Fall.

Astronaut Bruce McCandless umkreist während der Spaceshuttle-Mission STS-41-B die Erde, als wäre er ein kleiner Mond.



Astronomie als Wissenschaft

3

3.1	Die historischen Wurzeln der Naturwissenschaften ..	75
	Inwiefern denken alle Menschen wissenschaftlich? ..	75
	Wie ist die moderne Wissenschaft in der antiken Astronomie verwurzelt?	76
3.2	Naturwissenschaft im antiken Griechenland	83
	Warum führt die moderne Wissenschaft ihre Anfänge auf Griechenland zurück?	83
	Wie haben die Griechen die Planetenbewegung erklärt?	86
3.3	Die kopernikanische Wende	90
	Wie haben Kopernikus, Brahe und Kepler das geozentrische Weltbild angefochten?	90
	Wie lauten die drei Kepler'schen Gesetze der Planetenbewegung?	93
	Wie hat Galilei die kopernikanische Wende untermauert?	94
3.4	Das Wesen der Wissenschaft	97
	Wie können wir Wissenschaft von Nichtwissenschaft unterscheiden?	98
	Was ist eine wissenschaftliche Theorie?	106
3.5	Astrologie	109
	Wie unterscheiden sich Astrologie und Astronomie?	109
	Hat die Astrologie eine naturwissenschaftliche Grundlage?	110
	Überblick	113
	Zusammenfassung	113

Astronomie als Wissenschaft

*In der Wissenschaft brauchen wir vor allem Fantasie.
Es geht nicht nur um Mathematik oder um Logik,
sondern ein wenig auch um Schönheit und Poesie.*

– Maria Mitchell (1818–1889), Astronomin und die erste Frau, die in die American Academy of Arts and Sciences gewählt wurde

Heute wissen wir, dass die Erde ein Planet ist, der einen recht gewöhnlichen Stern umkreist, in einer Galaxie mit mehr als 100 Milliarden Sternen, und dass diese Galaxie nur eine von vielen in einem geradezu unglaublich riesigen Universum ist. Wir wissen, dass die Erde, zusammen mit dem gesamten Kosmos, in ständiger Bewegung ist. Wir wissen auch, dass die menschliche Zivilisation auf der kosmischen Zeitskala erst seit einem winzigen Moment existiert. Wie haben wir all das nur herausgefunden?

Es war nicht leicht. Die Astronomie ist die älteste Naturwissenschaft, ihre Wurzeln reichen bis zum Anfang der aufge-

zeichneten Geschichte zurück. Aber die beeindruckendsten wissenschaftlichen Erkenntnisse wurden erst in den letzten paar Jahrhunderten errungen.

In diesem Kapitel werden wir schrittweise nachverfolgen, wie sich die moderne Astronomie aus ihren Anfängen, insbesondere den Beobachtungen der alten Griechen, entwickelt hat. Besondere Aufmerksamkeit werden wir der Entwicklung der kopernikanischen Wende schenken, die den antiken Glauben an ein geozentrisches Weltbild abgelöst und die Grundlagen für den Aufstieg unserer technischen Zivilisation gelegt hat. Schließlich untersuchen wir das Wesen der modernen Wissenschaft und prüfen, wie man Wissenschaft¹ von Nichtwissenschaft unterscheiden kann.

¹ Während im Englischen deutlich zwischen Natur- und Geisteswissenschaften („science“ und „humanities“) unterschieden wird, vermischen sich diese beiden Begriffe im Deutschen. Wenn in diesem Kapitel allgemein von „Wissenschaft“ die Rede ist, sind stets die Naturwissenschaften gemeint.

Die historischen Wurzeln der Naturwissenschaften

3.1

Die grundlegenden Methoden der modernen Wissenschaft haben sich als eine der wertvollsten Erfindungen der Menschheitsgeschichte erwiesen. Sie haben uns in die Lage versetzt, fast all das zu entdecken, was wir heute über die Natur und das Universum wissen, und haben moderne Technologie überhaupt erst möglich gemacht. In diesem Abschnitt spüren wir den Wurzeln der Wissenschaft nach, die in Erfahrungen liegen, die fast allen Menschen und fast allen Kulturen gemein sind.

Inwiefern denken alle Menschen wissenschaftlich?

Die wissenschaftliche Denkweise kommt ganz von selbst. Mit etwa einem Jahr stellt ein Baby fest, dass alle Gegenstände nach unten fallen, wenn es sie loslässt. Es lässt den Ball los – er fällt. Es stößt einen Teller mit Essen von seinem Babystuhl – auch er fällt herunter. Es wirft weiterhin lauter verschiedene Dinge und alle fallen auf den Boden. Durch seine Beobachtungsgabe lernt das Baby etwas über die Welt um es herum und stellt fest, dass Dinge fallen, wenn sie nicht festgehalten werden. Und irgendwann ist das Kind mit diesen Fakten so vertraut, dass es sie – sehr zur Freude seiner Eltern – nicht mehr ständig überprüfen muss.

Eines Tages gibt jemand dem Kind einen mit Helium gefüllten Ballon. Es lässt ihn los – und zu seiner Überraschung steigt der Ballon zur Decke empor. Sein Verständnis der Natur muss angepasst werden. Es weiß nun, dass das Prinzip „alle Dinge fallen zu Boden“

nicht die ganze Wahrheit widerspiegelt, obwohl dieses Prinzip in den meisten Fällen gute Dienste leistet. Es wird noch Jahre dauern, bevor das Kind genug über die Atmosphäre, die Schwerkraft und das Konzept der Dichte gelernt hat, um zu verstehen, *warum* der Ballon nach oben steigt, obwohl die meisten anderen Dinge fallen. Vorerst freut es sich daran, etwas Neues und Unerwartetes zu sehen.

Die Erfahrungen des Babys mit fallenden Körpern und Ballons ist ein gutes Beispiel für die wissenschaftliche Denkweise. Im Wesentlichen besteht Wissenschaft darin, durch sorgfältige Beobachtungen sowie Experimente – d. h. Anordnungen zum systematischen Ausprobieren – etwas über die Natur zu lernen. Moderne Wissenschaftler denken also nicht anders als andere Menschen, sie sind schlicht darin geübt, ihr alltägliches Denken so zu organisieren, dass sie sich über ihre Entdeckungen leichter austauschen und ihr kollektives Wissen nutzen können.

Zum Nachdenken

Beschreiben Sie einige Fälle, in denen Sie durch systematisches Ausprobieren etwas gelernt haben, z. B. beim Kochen, beim Sport, bei einer Reparatur, dem Lernen im Beruf oder in vielen anderen Situationen.

Genau wie das Erlernen der Kommunikation durch Sprache, Kunst oder Musik einen allmählichen Prozess für ein Kind bedeutet, war die Entwicklung der Wissenschaft ein allmählicher Prozess für die Menschheit. Die Wissenschaft in ihrer heutigen Form erfordert akribische Detailgenauigkeit, unablässige Überprüfung jedes Stückchens an Information, damit dessen Verlässlich-

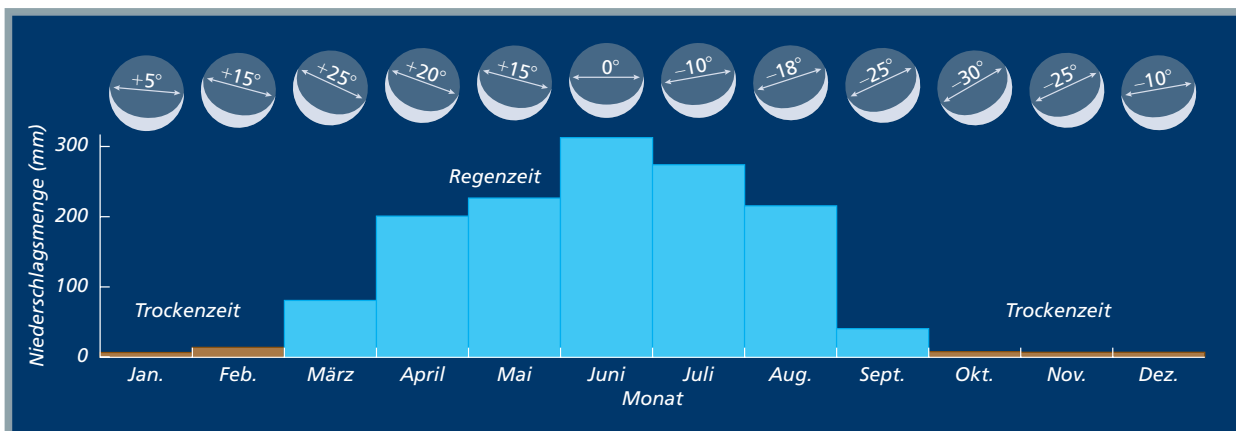


Abbildung 3.1: In Zentralnigeria korreliert die Ausrichtung der „Hörner“ der zunehmenden Mondsichel relativ zum westlichen Horizont (oben dargestellt) mit der durchschnittlichen Niederschlagsmenge zu verschiedenen Jahreszeiten. Die einheimischen Völker nutzen dies, um die Regenzeit mit angemessener Genauigkeit vorherzusagen. (Nach *Ancient Astronomers* von Anthony F. Aveni.)

Tabelle 3.1: Die sieben Wochentage und die Himmelskörper, nach denen sie benannt sind

Die Wochentage waren ursprünglich direkt mit den sieben damals bekannten beweglichen Himmelskörpern verknüpft, die wiederum mit verschiedenen Gottheiten in Verbindung gebracht wurden. Die Übereinstimmung ist nicht mehr perfekt, aber das Muster ist in vielen Sprachen noch immer klar erkennbar.

Himmelskörper	altnordische Gottheit*	Deutsch	Englisch	Französisch	Spanisch	Latein
Sonne	Sól (althochdt. Sunna)	Sonntag	Sunday	Dimanche	Domingo	Solis dies
Mond	Máni	Montag	Monday	Lundi	Lunes	Lunae dies
Mars	Týr (germ. Tiwaz, althochdt. Ziu)	Dienstag	Tuesday	Mardi	Martes	Martis dies
Merkur	Odin (germ. Wodan)	Mittwoch	Wednesday	Mercredi	Miércoles	Mercurii dies
Jupiter	Thor (germ. Donar)	Donnerstag	Thursday	Jeudi	Jueves	Iovis dies
Venus	Frigg (althochdt. Frijja), entspricht nicht Freya	Freitag	Friday	Vendredi	Viernes	Veneris dies
Saturn	–	Samstag	Saturday	Samedi	Sábado	Saturni dies

* nach John Lindow: *Norse Mythology - A Guide to Gods, Heroes, Rituals, and Beliefs*

keit sichergestellt werden kann, und die Bereitschaft, alte Überzeugungen aufzugeben, wenn sie nicht mehr mit den beobachteten Tatsachen der Welt um uns herum zu vereinbaren sind. Für professionelle Wissenschaftler sind diese Anforderungen der „anstrengende“ Teil ihres Berufs. Im Herzen sind professionelle Wissenschaftler wie das Kind mit dem Ballon: Sie freuen sich am Unerwarteten und werden durch die wenigen Momente belohnt, in denen sie – und wir alle mit ihnen – etwas Neues über das Universum lernen.

Wie ist die moderne Wissenschaft in der antiken Astronomie verwurzelt?

Die Astronomie wird häufig als die älteste der Wissenschaften bezeichnet, weil ihre Wurzeln bis in die Antike reichen. Frühe Zivilisationen haben die Astronomie nicht immer auf dieselbe Art und Weise oder aus denselben Gründen praktiziert, aus denen wir sie heute betreiben, haben aber dennoch immer wieder Erstaunliches erreicht. Das Verständnis dieser frühen Astronomie lässt uns besser einschätzen, wie und warum sich die Wissenschaft im Laufe der Zeit entwickelt hat.

Der praktische Nutzen der Astronomie

Seit vielen Tausend Jahren beobachten die Menschen den Himmel sehr genau. Mit einer der Gründe für dieses

Interesse an der Astronomie ist wahrscheinlich die uns Menschen innewohnende Neugier, aber viele alte Kulturen haben auch festgestellt, dass die Astronomie praktische Vorteile für die Zeitmessung, die Verfolgung jahreszeitlicher Veränderungen und die Navigation hatte.

Ein erstaunliches Beispiel sind die Menschen in Zentralafrika. Obwohl wir nicht genau wissen, wann sie diese Fertigkeit entwickelt haben, lernten die Menschen in einigen Gegenden durch Beobachtungen des Mondes, Niederschlagsmuster vorherzusagen. ► Abbildung 3.1 zeigt, wie das Verfahren funktioniert: Die Lage der „Hörner“ der zunehmenden Mondsichel (relativ zum Horizont) variiert im Laufe des Jahres, vor allem weil sich der Winkel, in dem die Ekliptik den Horizont schneidet, im Laufe des Jahres ändert. (Die Ausrichtung hängt zusätzlich vom Breitengrad ab.) In tropischen Regionen, in denen es ausgeprägte Regen- und Trockenzeiten gibt – anders als die vier Jahreszeiten, die in gemäßigten Breiten typisch sind –, kann man anhand der Ausrichtung der Mondsichel grob vorhersagen, wie viel Regen in den kommenden Tagen und Wochen zu erwarten ist.

Warum machten die Menschen der Frühzeit solche sorgfältigen und detaillierten Beobachtungen des Himmels? Zum Teil wollten sie vermutlich ihre angeborene Neugier befriedigen. Aber die Astronomie spielte auch eine praktische Rolle in ihrem täglichen Leben. Die Menschen nutzten die sich verändernden Positionen

von Sonne, Mond und Sternen, um den Ablauf der Zeit und der Jahreszeiten zu verfolgen – eine entscheidende Fähigkeit für Völker, die von der Landwirtschaft abhängen. So etwas erscheint uns heute veraltet, da wir die präzise Zeit und das Datum leicht von unseren Digitaluhren ablesen können. Es zeugt jedoch von den bemerkenswerten Fertigkeiten und Kenntnissen der Menschen der Frühzeit, als die einzigen Kalender und Uhren die Gestirne am Himmel waren.

Astronomie und Zeitmessung

Die moderne Zeitmessung leitet sich direkt von den schon in der Antike beobachteten Bewegungen am Himmel ab. Unsere Tageslänge ist die Zeit, welche die Sonne für einen vollen Himmelslauf benötigt. Die Länge eines Monats entspricht dem Zyklus der Mondphasen (*Abschnitt 2.3*) und unser Jahr basiert auf dem Zyklus der Jahreszeiten (*Abschnitt 2.2*). Die sieben Tage

der Woche wurden nach sieben Gottheiten benannt, die wiederum mit den sieben Himmelskörpern assoziiert wurden, die mit bloßem Auge sichtbar sind und sich durch die Sternbilder zu bewegen scheinen: Sonne, Mond und die fünf in der Antike bekannten Planeten (► Tabelle 3.1). Beachten Sie, dass die ursprüngliche antike Bezeichnung „Planet“ (Wandelstern) sich auf alle Körper bezog, die sich unter den Fixsternen bewegten. Daher befinden sich auch Sonne und Mond auf dieser Liste, nicht aber die Erde, deren Bewegung man am Himmel nicht sah.

Zum Nachdenken

Uranus ist mit bloßem Auge knapp erkennbar, wurde aber in der Antike nicht als Planet erkannt. Wenn Uranus heller wäre, hätten wir jetzt acht Tage pro Woche? Begründen Sie.

Da Zeitmessung von großer Bedeutung für den Alltag der Menschen war, aber präzise astronomische Beobachtungen erforderte, haben viele alte Kulturen bemerkenswerte Gebäude hinterlassen, die zu diesem Zweck genutzt wurden. Betrachten wir nun einige der vielen Methoden, mit denen die Menschen damals Zeitmessungen bewerkstelligt haben.

Bestimmen der Uhrzeit

Während des Tages konnten die frühen Menschen die Uhrzeit angeben, indem sie die Bahn der Sonne am Himmel verfolgten (*Abschnitt S1.2*). Viele Kulturen benutzten vermutlich einen Stock als einfache Sonnenuhr. Die frühen Ägypter errichteten große, oft zu Ehren der Sonne verzierte Obelisken, die vermutlich ebenfalls als einfache Uhren dienten (► Abbildung 3.2).

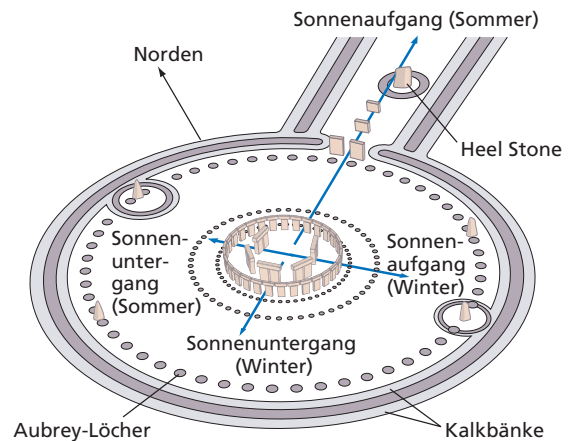
Bei Nacht konnten die frühen Menschen die Zeit anhand der Position und Phasen des Mondes bestimmen, wobei sie auf die Überlegungen zurückgriffen, die wir in *Kapitel 2* diskutiert haben (► Abbildung 2.22). Wie erwähnt, geht der Mond im ersten Viertel gegen Mitternacht unter, also kann es noch nicht Mitternacht sein, wenn der Mond im ersten Viertel noch oberhalb des westlichen Horizonts steht. Die Positionen der Sterne geben ebenfalls Aufschluss über die Zeit, sofern man das ungefähre Datum kennt (► Abbildung 2.14). So geht beispielsweise das Sternbild Orion im Dezember bei Sonnenuntergang auf, erreicht gegen Mitternacht den Meridian und geht gegen Sonnenaufgang unter. Wenn es also Winter ist und Orion untergeht, dann muss es bald dämmern.



Abbildung 3.2: Dieser ägyptische Obelisk mit einer Höhe von 27,6 m und einem Gewicht von 331 Tonnen steht seit 1588 auf dem Petersplatz in Rom. Er ist einer von 21 erhaltenen altägyptischen Obelisken, von denen die meisten heute in aller Welt verstreut sind. Der Schattenwurf des Obelisken könnte einst dazu gedient haben, die Zeit anzuzeigen.



a Die heutigen Reste von Stonehenge



b Archäologische Rekonstruktion von Stonehenge nach seiner Vollendung um 1550 v. Chr. Verschiedene vom Zentrum aus sichtbare astronomische Ausrichtungen werden ebenfalls gezeigt: Beispielsweise geht die Sonne zur Sommersonnenwende direkt über dem Markierungsstein (dem Fersenstein oder Heel Stone) auf.

Abbildung 3.3: Die prähistorische Anlage von Stonehenge im Süden Englands wurde in mehreren Etappen etwa zwischen 2750 v. Chr. und 1550 v. Chr. erbaut.

Wir können die Ursprünge unserer heutigen Uhren etwa 4000 Jahre in das alte Ägypten zurückverfolgen. Die Ägypter hatten die Tageshelle in zwölf Abschnitte gegliedert. Auch wir gliedern den 24-stündigen Tag in die zwölf Stunden vormittags und nachmittags¹. Anders als in unserer modernen Zeitmessung waren die ägyptischen „Stunden“ allerdings in ihrer Länge veränderlich, denn die Tageslänge ändert sich im Lauf eines Jahres. Beispielsweise waren die „Sommerstunden“ länger als die „Winterstunden“, denn ein Zwölftel der Tageshelle dauert im Sommer länger als im Winter. Erst viel später in der Geschichte wurde die Dauer der Stunde exakt festgelegt und in 60 gleich lange Minuten von jeweils 60 gleich langen Sekunden unterteilt.

Die Ägypter teilten auch die Nacht in zwölf gleiche Teile. Ägyptische Sternuhren, die man häufig auf den Sargdeckeln ägyptischer Pharaonen findet, katalogisierten im Wesentlichen, an welcher Himmelsposition bestimmte Sterne zu bestimmten Nacht- und Jahreszeiten zu finden waren. Da sie das Datum anhand des Kalenders kannten und die Position bestimmter Sterne am Himmel beobachten konnten, waren die Ägypter mithilfe der „Sternuhren“ in der Lage, auch bei Nacht die Uhrzeit anzugeben.

Etwa um 1500 v. Chr. hatten die Ägypter ihre „Sternuhren“ zugunsten von Wasseruhren aufgegeben. Wasseruhren messen die Zeit, indem Wasser durch eine Öffnung mit vorgegebener Größe fließt, ähnlich wie Sanduhren die Zeit messen, indem Sand durch einen engen Hals fällt.² Solche *Wasseruhren* hatten den Vorteil, dass sie auch bei bedecktem Himmel nutzbar waren. Mit der Zeit wurde die Wasseruhr in vielen Kulturen zum wichtigsten Zeitmessinstrument, z.B. für Griechen, Römer und Chinesen. Die Wasseruhren wiederum wurden im 17. Jahrhundert durch mechanische Uhren und diese im 20. Jahrhundert durch elektronische Uhren verdrängt. Einzig Sonnenuhren waren, obwohl es auch andere Arten von Uhren gab, seit der Antike ununterbrochen in Gebrauch. Sie sind auch heute noch zu Dekorationszwecken und als Erinnerung, dass Sonne und Sterne einst unsere einzigen Zeitmesser waren, beliebt.

Ablauf der Jahreszeiten

Viele alte Kulturen errichteten Bauwerke, mit deren Hilfe sie die Jahreszeiten verfolgen konnten. Auch einer der ältesten von Menschen errichteten freistehenden Bauten diente diesem Zweck: Stonehenge (► Abbildung 3.3). Stonehenge war sowohl astronomisches Hilfs-

¹ Im amerikanischen Originaltext finden sich hier die im Englischen üblichen Schreibweisen a. m. und p. m., die wir bestenfalls von Computern und Digitaluhren kennen. Sie stehen für *ante meridiem* (vor Mittag) und *post meridiem* (nach Mittag).

² Sanduhren wurden frühestens im 8. Jahrhundert n. Chr. erfunden, lange nach den Wasseruhren. Naturbelassene Sandkörner haben unterschiedliche Größe, daher hing die Entstehung genauer Sanduhren davon ab, Sand mit gleichmäßiger Korngröße zur Verfügung zu haben.

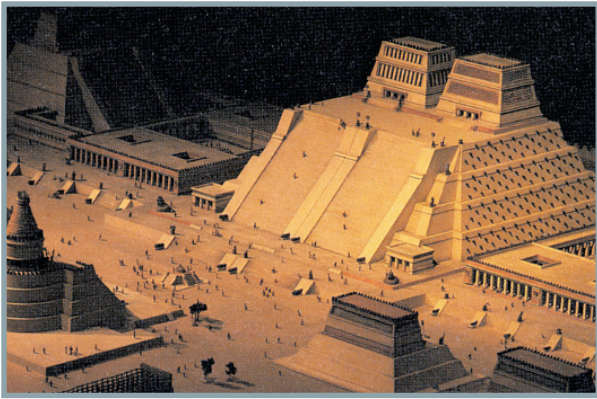


Abbildung 3.4: Dieses maßstabsgerechte Modell zeigt den Templo Mayor und die umgebende Plaza so, wie sie ausgesehen haben könnten, bevor die spanischen Konquistadoren die Zivilisation der Azteken zerstörten.

mittel, um den Ablauf der Jahreszeiten zu verfolgen, als auch ein sozialer und religiöser Versammlungsort.

Zu den beeindruckendsten Bauwerken, die dazu dienten, den Lauf der Jahreszeiten zu verfolgen, gehört der Templo Mayor (spanisch für „Großer Tempel“) in der aztekischen Stadt Tenochtitlán, die an der Stelle der heutigen Stadt Mexiko lag (► Abbildung 3.4). Auf einer 50 m hohen abgeflachten Pyramide befand sich ein Zwillingstempel. Von einem günstigen Aussichtspunkt auf der gegenüberliegenden Seite des Platzes konnte ein königlicher Beobachter sehen, wie die Sonne an den Tagundnachtgleichen in der Lücke zwischen den Tempeln aufging. Die Anlage wurde 1521 von den Konquistadoren zerstört. Aus der Zeit davor gibt es Berichte spanischer Besucher über aufwändige Rituale, bei denen bisweilen auch Menschen geopfert wurden; die Zeitpunkte dieser Rituale wurden durch astronomische Beobachtungen festgelegt. Nach der Zerstörung des Templo Mayor wurde aus seinen Steinen auf der großen Plaza von Mexiko-Stadt eine Kathedrale errichtet.

Viele Kulturen haben ihre Gebäude und Straßen an den vier Himmelsrichtungen ausgerichtet (Norden, Süden, Osten und Westen), um die Richtung von Auf- und Untergang der Sonne über das Jahr hinweg verfolgen zu können. Diese Art der Ausrichtung findet man an so verschiedenen Orten wie den ägyptischen Pyramiden, der Verbotenen Stadt in China oder in zeremoniellen Kivas (*Versammlungsräumen*), die vom Volk der Anasazi im Südwesten der USA errichtet wurden (► Abbildung 3.5). Viele der heutigen Städte behalten diese Art der Ausrichtung bei, weshalb so viele Straßen genau in Nord-Süd- bzw. Ost-West-Richtung verlaufen.



Abbildung 3.5: Dieses Bauwerk mit mehr als 20 Metern Durchmesser ist eine Kiva der Anasazi im Chaco Canyon in New Mexico. Sie wurde vor etwa 1000 Jahren errichtet. Die Hauptachse ist fast genau von Nord nach Süd ausgerichtet.

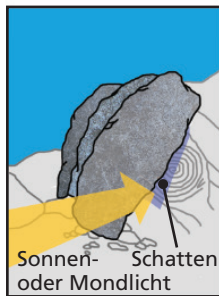
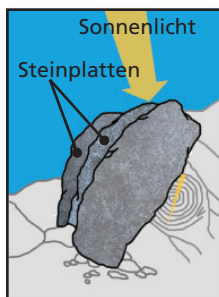
Andere Bauten dienten dazu, die Position der Sonne an bestimmten Tagen wie der Winter- oder Sommersonnenwende zu bestimmen. Zum Beispiel schuf das Volk der Anasazi eine Spirale mit 19 Windungen – den sogenannten *Sun-Dagger* – auf einem senkrechten Felsen im Chaco Canyon in New Mexico (► Abbildung 3.6). Drei große Steinplatten vor der Spirale verursachten im Lauf des Jahres unterschiedliche Muster aus Licht und Schatten (► Abbildung 3.6c). So führte die Stellung der Platten zu einen „Dolch“ (*Dagger*) aus Sonnenlicht, der nur an einem einzigen Tag im Jahr – am Mittag der Sommersonnenwende – durch das Zentrum der Spirale ging; zur Wintersonnenwende umgaben zwei Lichtstreifen die Spirale wie eine Klammer. Der *Sun-Dagger* könnte auch verwendet worden sein, um einen speziellen Zyklus des Mondes zu markieren, der für das angestammte Pueblo-Volk rituelle Bedeutung hatte. Die Auf- und Untergangspositionen des Vollmonds variieren mit dem 18,6-jährigen Zyklus (aufgrund der Präzession der Umlaufbahn des Mondes), sodass der Vollmond nur einmal in diesen 18,6 Jahren an seinem südlichsten Punkt am Osthorizont aufgeht. Zu diesem Zeitpunkt, dem „großen Stillstand des Mondes“, werfen die Felsplatten im Mondlicht einen Schatten, dessen Rand genau tangential zur Kante der Spirale verläuft. 9,3 Jahre später, zum Zeitpunkt des „kleinen Stillstandes des Mondes“, verläuft der Schattenrand direkt durch das Zentrum der Spirale, sodass eine ihrer Hälften im Schatten liegt und die andere vom Mondlicht erleuchtet wird. Der große Stillstand des Mondes kann auch mit Bauwerken am nahe gelegenen Chimney Rock und an Felsbauten im Mesa-Verde-Nationalpark in Colorado beobachtet werden.



a Ein einzelner Streifen Sonnenlicht verläuft nur am Mittag der Sommersonnenwende durch das Zentrum der eingekerbten Spirale.

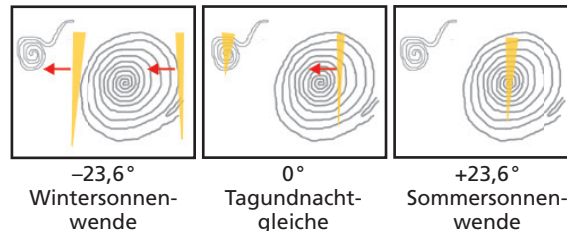


b Der Felsen Fajada Butte im Chaco Canon in New Mexico, auf dem sich an einer Klippe in Gipfelnähe des Sun-Dagger befindet.



c

d Sonnenlichtmuster zur Mittagszeit



e Schattenmuster während des Sonnen- und Mondaufgangs

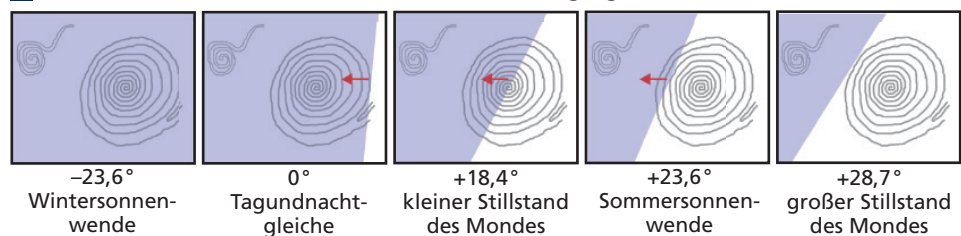


Abbildung 3.6: Der Sun-Dagger. Drei große Felsplatten vor der eingeritzten Spirale verursachen Licht- und Schattenmuster, die sich im Verlauf des Jahres veränderten. Hier sehen wir den einzigen „Dolch“ aus Sonnenlicht, der am Tag der Sommersonnenwende mittags das Zentrum der Spirale durchdrang. (Leider haben sich die Felsen innerhalb von nur 12 Jahren nach der Entdeckung der Stätte im Jahr 1977 verschoben – wahrscheinlich als Folge der Erosion des darunterliegenden Pfades durch die große Anzahl von Besuchern – sodass der Effekt heute nicht mehr auftritt.)

Zum Nachdenken

Untersuchen Sie die Bedeutung der Mondknoten und den Ablauf des 18,6-Jahres-Zyklus der Drehung der Knotenlinie (siehe *Abschnitt 2.3*). Welches Wissen ist erforderlich, um diesen Zyklus zu entdecken und Strukturen zu bauen, um Phänomene wie den großen Mondstillstand zu beobachten? Wie hängt dieser Zyklus mit dem etwas kürzeren Saros-Zyklus zusammen?

Sonnen- und Mondkalender

Die Erfassung der Jahreszeiten führte schließlich zur Einführung schriftlicher Kalender. Heute verwenden wir einen *solaren Kalender*, der mit den Jahreszeiten synchronisiert ist, sodass wiederkehrende Ereignisse wie Sonnenwenden und Tagundnachtgleichen jedes Jahr in etwa an denselben Daten stattfinden (*Abschnitt S1.1*). Die Länge unserer Monate basiert aber dennoch auf dem 29-tägigen Phasenzyklus des Mondes. Einige Kulturen schufen deshalb *lunare Kalender*, die sich am Zyklus des Mondes orientieren, sodass die Mondphase am ersten Tag eines Monats immer identisch ist.

Ein einfacher Mondkalender hat 12 Monate mit teils 29 und teils 30 Tagen. Durch die Wahl dieser Monatslängen wird der $29\frac{1}{2}$ -tägige Mondzyklus im Mittel widergespiegelt. Ein Mondkalender mit 12 Monaten hat daher nur 354 oder 355 Tage, also etwa 11 Tage weniger als ein Kalender auf Grundlage der Sonne. Ein solcher Kalender wird noch immer im Islam verwendet. Deshalb beginnt der Fastenmonat Ramadan (der neunte Monat) in jedem Jahr 11 Tage früher als im Jahr davor.

Um lunare und solare Kalender synchron zu halten, kann man davon Gebrauch machen, dass 19 Sonnenjahre fast genau 235 Mondmonaten entsprechen. Die Mondphasen treten also alle 19 Jahre wieder zu denselben solaren Daten auf. Dieser Zyklus wird als *metonischer Zyklus* bezeichnet, weil der griechische Astronom Meton ihn 432 v. Chr. entdeckte. (Allerdings dürfte er den babylonischen Astronomen ziemlich sicher schon einige Jahrhunderte früher bekannt gewesen sein). Weil aber 19 Jahre mit jeweils 12 Monaten nur $19 \cdot 12 = 228$ Monate sind, also sieben weniger als die benötigten 235 Monate, fügen Mondkalender, die dem metonischen Zyklus folgen, in sieben der 19 Jahre einen dreizehnten Monat ein. Der jüdische Kalender hat beispielsweise einen dreizehnten Monat im 3., 6. 8., 11., 14., 17 und 19. Jahr jedes 19-jährigen Zyklus.

Durch diese Abstimmung fallen die jüdischen Feiertage im Sonnenkalender in einen Zeitraum von etwa einem Monat, wobei sich die genauen Daten alle 19 Jahre wiederholen. Das erklärt auch, warum das Osterdatum sich in jedem Jahr verschiebt. Das Neue Testament verbindet Ostern mit dem jüdischen Passah-Fest. Mit nur geringer Abweichung vom ursprünglichen System feiern die Christen ihr Osterfest nun am ersten Sonntag nach dem ersten Frühlingsvollmond (also nach dem 21. März). Fällt der Vollmond auf einen Sonntag, findet Ostern am darauffolgenden Sonntag statt. (Die östlichen orthodoxen Kirchen berechnen das Osterdatum etwas anders, weil ihr Datum auf dem julianischen und nicht dem gregorianischen Kalender beruht, siehe *Abschnitt S1.1*)

Frühe Erkenntnisse

Viele alte Kulturen haben Planeten und Sterne sorgfältig beobachtet. Die Chinesen beispielsweise führen seit mindestens 5000 Jahren bemerkenswert ausführliche astronomische Aufzeichnungen. Anhand dieser Aufzeichnungen sind den chinesischen Astronomen viele wichtige Entdeckungen gelungen. Etwa im 15. Jahrhundert hatten die Chinesen ein großes Observatorium in Beijing (Peking) erbaut, welches dort noch heu-

te steht (► Abbildung 3.7). Wir können auch schriftliche Aufzeichnungen der alten Zivilisationen des Nahen und Mittleren Ostens wie die der Ägypter und Babylonier untersuchen.

Andere Kulturen hinterließen entweder keine eindeutigen schriftlichen Aufzeichnungen oder ihre Aufzeichnungen gingen verloren oder wurden zerstört, sodass wir ihre astronomischen Erkenntnisse rekonstruieren müssen, indem wir Artefakte analysieren, die sie zurückgelassen haben. Solche Untersuchungen werden unter dem Begriff *Archäoastronomie* zusammengefasst, der Archäologie und Astronomie verbindet. Wissenschaftler, die sich mit der Archäoastronomie beschäftigen, untersuchen zum Beispiel ein Bauwerk zumeist erst einmal hinsichtlich augenfälliger astronomischer Gesichtspunkte. Sie überprüfen beispielsweise, ob ein Beobachter im Zentrum besondere Sterne an speziellen markierten Steinen aufgehen sieht oder ob das Sonnenlicht nur an bestimmten Tagen wie den Sonnenwenden oder den Tagundnachtgleichen durch ein Fenster fällt. Allerdings reicht die bloße Tatsache einer Ausrichtung noch nicht aus, um nachzuweisen, dass ein Bauwerk auch einen astronomischen Zweck gehabt hatte. Die Ausrichtung könnte rein zufällig sein.

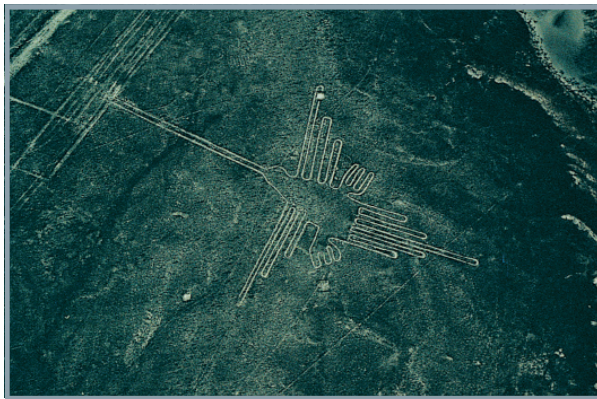
Während die bereits geschilderten Fälle leicht zu interpretieren sind, sind andere Fälle weniger klar. So haben beispielsweise alte Volksstämme im heutigen Peru in der Nazca-Ebene Hunderte von mehrere Kilometer langen Linien und Mustern in den Sand gescharrt. Viele dieser Linien deuten auf Orte, an denen an bestimmten Tagen im Jahr helle Sterne oder die Sonne aufgehen, aber das beweist gar nichts: Bei Hunder-



Abbildung 3.7: Dieses Bild zeigt ein Modell der Himmelskugel und andere Instrumente auf dem Dach des alten astronomischen Observatoriums in Beijing. Das Observatorium wurde im 15. Jahrhundert erbaut. Die hier abgebildeten Instrumente sind etwas jünger und zeigen den europäischen Einfluss durch Jesuitenmissionare.

ten Linien ist es sehr wahrscheinlich, dass viele davon zufällig astronomisch ausgerichtet sind, ganz gleich, wie oder warum sie angefertigt wurden. Die Muster dieser sogenannten Nazca-Linien, von denen etliche große Figuren oder Tiere (► Abbildung 3.8 a) darstellen, haben sogar zu noch mehr Diskussionen geführt. Einige Menschen glauben, sie könnten Darstellungen von Sternbildern sein, die von den Völkern der Region erkannt wurden, doch sicher ist das nicht.

Die wohl älteste Darstellung des Himmels findet sich auf der Himmelsscheibe von Nebra (► Abbildung 3.8 b). Auf dieser runden Bronzeplatte, die vermutlich aus der Bronzezeit stammt, sind Applikationen aus Gold zu se-



a Hunderte Linien und Muster sind in den Sand der Nazca-Ebene in Peru gescharrt. Dieses Luftbild zeigt die etwa 90 m große Figur eines Kolibris.



b Die Himmelsscheibe von Nebra. Diese in der Nähe der Stadt Nebra in Sachsen-Anhalt gefundene Bronzeplatte ist die älteste uns bekannte Darstellung des Himmels. Sie stammt vermutlich aus der Bronzezeit.

Abbildung 3.8: Viele archäologische Funde deuten darauf hin, dass schon die antiken Kulturen den Himmel beobachtet haben.

hen, die offenbar astronomische Beobachtungen und vielleicht auch religiöse Symbole zeigen. Sie wurde 1999 von Raubgräbern in einer Steinkammer auf dem Mittelberg nahe der Stadt Nebra in Sachsen-Anhalt gefunden. Auch hier gilt, dass sich zwar vieles in die Scheibe hineininterpretieren lässt, aber nur wenig davon wirklich als gesichert gilt. Die Himmelsscheibe könnte daher tatsächlich eine ausgeklügelte Kalenderhilfe gewesen sein – oder auch nur ein simples symbolisches Bildnis des Himmels.

Zum Nachdenken

Tierfiguren wie die in ► Abbildung 3.8 a sind erst aus der Vogelperspektive deutlich zu erkennen. Einige UFO-Enthusiasten vertreten daher die Auffassung, diese Muster müssten von Außerirdischen stammen. Was halten Sie von dieser Ansicht? Erläutern Sie Ihre Meinung.

In einigen Fällen haben die Wissenschaftler andere Hinweise auf die Absichten der ehemaligen Erbauer. So weisen beispielsweise Hütten, die vom Volk der Pawnees in Kansas errichtet wurden, strategisch angeordnete Löcher auf; durch diese lassen sich Sternbilder beobachten, die in den Überlieferungen der Pawnees von Bedeutung sind. Der Zusammenhang zwischen den Überlieferungen und den Gebäudemerkmalen liefert ein deutliches Indiz dafür, dass die Löcher eine absichtsvolle und keine zufällige Anordnung haben. Auf ähnliche Weise erforderten die Traditionen der Inkas in Südamerika – ihnen zufolge sollten die Inkaherrscher Nachkommen der Sonne sein –, dass die Bewegung der Sonne und der Sterne genau beobachtet wird. Dies unterstützt die Vermutung, dass die astronomische Ausrichtung in Inka-Städten und zeremo-



Abbildung 3.9: Das Weltkulturerbe Machu Picchu enthält Bauwerke, die auf den Sonnenaufgang zur Winter- und Sommer-sonnenwende ausgerichtet sind.

niellen Zentren, beispielsweise dem Weltkulturerbe Machu Picchu (► Abbildung 3.9), ebenfalls Absicht und keineswegs Zufall ist.

Andere Hinweise deuten auf die hoch entwickelten astronomischen Kenntnisse der frühen Polynesier hin, die zwischen den Inseln des mittleren und südlichen Pazifiks gelebt haben und dort gereist sind. Korrekte Navigation war für ihr Überleben unabdingbar, weil die nächste Insel in der Regel zu weit entfernt war, um sie sehen zu können. Nach anthropologischen Untersuchungen war die am meisten angesehene soziale Stellung in der polynesischen Kultur die des Navigators, einer Person, die das notwendige Wissen erworben hatte, um den Kurs für die großen Entfernungen zwischen den Inseln zu bestimmen. Die Navigatoren hatten sowohl ein beeindruckendes astronomisches Wissen als auch ebenso beeindruckende Kenntnisse der Muster von Wellen und Dünung, um bestimmte Inseln zu erreichen (► Abbildung 3.10). Die Sterne lieferten die allgemeine navigatorische Grundlage und wiesen den Navigatoren die grobe Richtung zu ihrem Ziel. Kamen sie in dessen Nähe, führten Wellen und Dünung sie genau zum gewünschten Ankerplatz. Ein Navigator hatte alle seine Kenntnisse im Kopf und gab sie in einem ausgeklügelten Programm zur Ausbildung künftiger Navigatoren an die nächste Generation weiter. Unglücklicherweise gingen viele Kenntnisse der Navigatoren mit dem Aufkommen der modernen Navigationstechnologie verloren.

Bis zu welchem Ausmaß sich wissenschaftliches Denken in unterschiedlichen Gesellschaften entwickelt, hängt von praktischen Erfordernissen, sozialen und politischen Bräuchen sowie dem Austausch mit anderen Kulturen ab. So waren beispielsweise die chinesische Wissenschaft und Technik, trotz des Vorsprungs, den sie

bei astronomischen Aufzeichnungen hatten, am Ende des 17. Jahrhunderts hinter den Stand in Europa zurückgefallen. Einige Historiker sehen den Hauptgrund für diesen Niedergang darin, dass die Chinesen ihre Wissenschaft und Technik als Staatsgeheimnisse betrachteten. Diese Geheimniskrämerei könnte die Entwicklung der chinesischen Wissenschaft gebremst haben, indem sie gerade die breite wissenschaftliche Zusammenarbeit verhinderte, die den europäischen Fortschritt zu Beginn der Renaissance angespornt hatte.

In Zentralamerika waren die Maya ebenfalls in gewisser Weise ihrer Zeit voraus. Ihr Zahlen- und mathematisches System wirken ziemlich modern. Sie benutzten das Konzept der Null schon 500 Jahre, bevor es durch indische Mathematiker um 600 v. Chr. in der eurasischen Welt eingeführt wurde.

Naturwissenschaft im antiken Griechenland

3.2

Bevor ein Bauwerk wie Stonehenge oder der Templo Mayor gebaut werden konnte, mussten sorgfältige Beobachtungen durchgeführt und immer wieder überprüft werden, um ihre Richtigkeit sicherzustellen. Sorgfältige, wiederholbare Beobachtungen liegen auch der modernen Naturwissenschaft zugrunde. Zumindest einige Elemente der modernen Naturwissenschaft waren mithin vielen alten menschlichen Kulturen gemeinsam. Unter anderen historischen Umständen könnte jede dieser Kulturen die erste gewesen sein, die das entwickelt hätte, was wir die moderne Wissenschaft nennen. Am Ende hat die Geschichte jedoch nur einen der vielen möglichen Wege eingeschlagen. Der Weg zur modernen Wissenschaft beginnt bei den alten Zivilisationen des Mittelmeerraums und des Nahen Ostens – und besonders im antiken Griechenland.

Warum führt die moderne Wissenschaft ihre Anfänge auf Griechenland zurück?

Griechenland entwickelte sich ab ca. 800 v. Chr. allmählich zu einer Macht im Nahen Osten und war etwa 500 v. Chr. gut etabliert. Seine geografische Lage machte es zu einem Knotenpunkt für Reisende, Händler und Armeen aus Nordafrika, Asien und Europa. Aufbauend auf den vielfältigen Ideen, die durch die Begegnung dieser Vielfalt der Kulturen hervorgebracht wurden, begannen die alten griechischen Philosophen bald ihre Bemühungen, das menschliche Verständnis der Natur vom Mythologischen hin zum Rationalen zu verlagern.

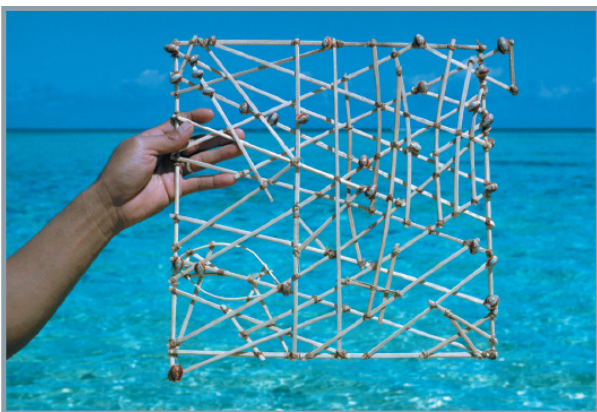


Abbildung 3.10: Eine mikronesische Stockkarte, ein Hilfsmittel polynesischer Navigatoren, das Dünungsmuster um Inseln wiedergibt.

Drei philosophische Neuerungen

Auf griechische Philosophen gehen mindestens drei wichtige Errungenschaften zurück, die den Weg für die moderne Wissenschaft ebneten. Erstens entwickelten sie die Tradition, die Natur ohne übernatürliche Erklärungen verstehen zu wollen, ihre Gedanken öffentlich zu debattieren und in Zweifel zu ziehen. Zweitens benutzten die Griechen die Mathematik, um ihre Ideen präzise darzulegen, weshalb sie die Auswirkungen neuer Gedanken viel tief greifender untersuchen konnten, als es sonst möglich gewesen wäre. Und drittens hatten die Griechen – indem viele ihrer philosophischen Aktivitäten aus scharfsinnigen Diskussionen bestanden, die nur um des Gedankens willen geführt wurden und keineswegs im modernen Sinn wissenschaftlich waren – auch die Vorteile logischer Schlussfolgerungen erkannt, die man aus Beobachtungen ziehen kann. Sie hatten verstanden, dass eine Erklärung der Welt nicht richtig sein konnte, wenn sie nicht den beobachteten Fakten entsprach.

Modelle der Natur

Der wohl größte griechische Beitrag zur Wissenschaft dürfte darin bestehen, dass sie diese drei Errungenschaften zur Idee des **Modells** zusammenführten, eine Idee, die auch in der heutigen Naturwissenschaft noch immer von zentraler Bedeutung ist. Wissenschaftliche Modelle unterscheiden sich ein wenig von den Modellen, die Sie vielleicht aus dem Alltag kennen. Hier denken wir bei Modellen eher an eine verkleinerte Wiedergabe, etwa ein Modellauto oder -flugzeug. Im Gegensatz dazu ist ein wissenschaftliches Modell eine begriffliche

Darstellung, die beobachtete Phänomene erklären und vorhersagen soll. Ein Modell des Erdklimas beispielsweise nutzt Logik und Mathematik, um unsere Kenntnisse über die Abläufe in der Atmosphäre wiederzugeben. Es soll die Klimaveränderungen erklären und vorhersagen, etwa die Änderungen, die mit dem Klimawandel zusammenhängen. So wie ein Modellflugzeug sinngemäß nicht alle Details eines echten Flugzeugs wiedergibt, muss ein wissenschaftliches Modell allerdings auch nicht sämtliche Naturbeobachtungen auf einmal erklären können. Selbst das Versagen eines wissenschaftlichen Modells kann von Nutzen sein, weil man dadurch oft Hinweise erhält, wie man ein besseres Modell entwickeln könnte.

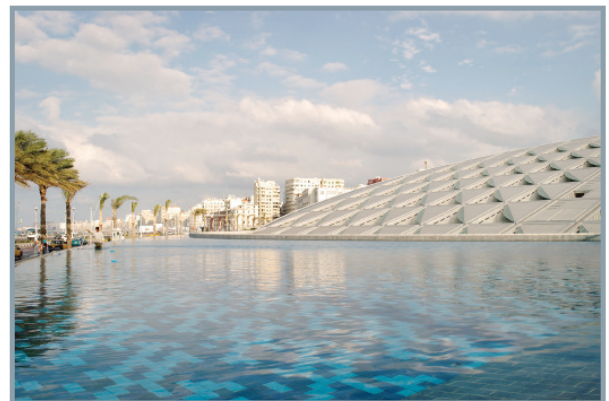
Von Griechenland zur Renaissance

Die griechischen Modelle der Natur versuchten solche Gegenstände zu erklären wie die Eigenschaften der Materie oder die Grundprinzipien der Bewegung der Sterne, von Sonne, Mond und Planeten. Für die Astronomie war das wichtigste der griechischen Modelle ihr geozentrisches Weltbild. Bevor wir uns jedoch den Details dieses Modells zuwenden, lohnt es sich, kurz zu diskutieren, wie die alte griechische Philosophie sich in ganz Europa verbreitete, wo sie sich schließlich zu den Prinzipien der modernen Wissenschaft entwickelte.

Einer der Gründe für den großen Einfluss der Griechen lag darin, dass sie sich in Politik und Krieg als ebenso geschickt erwiesen wie in der Philosophie. Etwa um 330 v. Chr. begann Alexander der Große (356–323 v. Chr.) mit einem Siegeszug, der das griechische Reich weit in den Mittleren Osten hinein erweiterte



a Dieses Gemälde zeigt, wie ein Innenhof der großen Bibliothek von Alexandria kurz nach ihrer Fertigstellung ausgesehen haben könnte.



b Die neue Bibliothek von Alexandria wurde 2003 eröffnet.

Abbildung 3.11: Die ehemalige Bibliothek von Alexandria bestand ab ca. 300 v. Chr. für mehrere Jahrhunderte.