

# Inhaltsübersicht

---

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

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

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Vorwort</b> .....	xix
<b>Teil I Das Entwickeln eines Blickwinkels</b> .....	2
<b>Kapitel 1 Unser heutiges Bild vom Universum</b> .....	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
<b>Kapitel 2 Entdecken Sie das Universum selbst</b> .....	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
<b>Kapitel 3 Astronomie als Wissenschaft</b> .....	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
	<b>Kapitel S1 Zeitmessung und Navigation anhand der Sterne . . . . .</b>	<b>117</b>
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
	<b>Teil II Schlüsselkonzepte der Astronomie . . . . .</b>	<b>150</b>
	<b>Kapitel 4 Wie das Universum funktioniert. . . . .</b>	<b>153</b>
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
<b>Kapitel 5 Licht und Materie . . . . .</b>		<b>189</b>
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
<b>Kapitel 6 Teleskope . . . . .</b>		<b>227</b>
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

<b>Teil III</b>	<b>Von anderen Welten lernen</b>	262
<b>Kapitel 7</b>	<b>Unser Sonnensystem</b>	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
<b>Kapitel 8</b>	<b>Die Entstehung des Sonnensystems</b>	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
<b>Kapitel 9</b>	<b>Planetare Geologie</b>	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
<b>Kapitel 10 Planetare Atmosphären .....</b>		<b>379</b>
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
<b>Kapitel 11 Jovianische Planeten .....</b>		<b>435</b>
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
	<b>Kapitel 12 Asteroiden, Kometen und Zwergplaneten .....</b>	<b>477</b>
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
	<b>Kapitel 13 Andere Planetensysteme .....</b>	<b>521</b>
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



<b>Teil IV</b>	<b>Ein tieferer Blick in die Natur</b>	<b>560</b>
<b>Kapitel S2</b>	<b>Raum und Zeit</b>	<b>563</b>
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
<b>Kapitel S3</b>	<b>Raumzeit und Gravitation</b>	<b>593</b>
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
<b>Kapitel S4</b>	<b>Bausteine des Universums</b>	<b>625</b>
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

<b>Kapitel 16 Sternentstehung</b> .....	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
<b>Kapitel 17 Sternenstaub</b> .....	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
<b>Kapitel 18 Der Friedhof der Sterne</b> .....	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
<b>Kapitel 22 Der Anbeginn der Zeit . . . . .</b>		<b>895</b>
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
<b>Kapitel 23 Dunkle Materie, Dunkle Energie und das Schicksal des Universums . . . . .</b>		<b>923</b>
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

<b>Teil VII</b>	<b>Leben auf und außerhalb der Erde</b>	<b>958</b>
<b>Kapitel 24</b>	<b>Leben im Universum</b>	<b>961</b>
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