

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einführung</b> .....		1
<b>I. Klassische Astronomie und das Planetensystem</b> .....		5
<b>Sterne und Menschen: Beobachten und Denken</b>		
Historische Einleitung in die klassische Astronomie .....		6
<b>2. Klassische Astronomie</b>	<b>2.1 Koordinaten und Zeit:</b>	
	<b>Bewegungen von Sonne, Erde und Mond</b> .....	10
	2.1.1 Die Himmelskugel. Astronomische Koordinatensysteme .....	10
	2.1.2 Die Bewegungen der Erde. Jahreszeiten und Tierkreis .....	12
	2.1.3 Die Zeit: Tag, Jahr und Kalender .....	15
	2.1.4 Der Mond .....	17
	2.1.5 Mond- und Sonnenfinsternisse .....	19
	<b>2.2 Bahnbewegungen und Entfernungen im Planetensystem</b> ..	20
	2.2.1 Planetenbewegungen und Bahnelemente .....	21
	2.2.2 Kometen und Meteore .....	23
	2.2.3 Entfernungsbestimmungen, Dopplereffekt und Aberration .....	26
	<b>2.3 Mechanik und Gravitationstheorie</b> .....	28
	2.3.1 Newtonsche Gesetze .....	28
	2.3.2 Impuls- oder Schwerpunktsatz .....	29
	2.3.3 Drehimpuls- oder Flächensatz .....	30
	2.3.4 Energiesatz .....	31
	2.3.5 Virialsatz .....	31
	2.3.6 Gravitationsgesetz. Gravitationsenergie .....	32
	<b>2.4 Himmelsmechanik</b> .....	34
	2.4.1 Erstes und zweites Keplergesetz: Planetenbahnen .....	34
	2.4.2 Drittes Keplergesetz: Massenbestimmung .....	35
	2.4.3 Energiesatz und Entweichgeschwindigkeit .....	35
	2.4.4 Rotation und Trägheitsmoment .....	36
	2.4.5 Präzession .....	36
	2.4.6 Gezeiten .....	37
	2.4.7 Ptolemäisches und kopernikanisches Weltsystem .....	38
	<b>2.5 Weltraumforschung</b> .....	39
	2.5.1 Bahnen künstlicher Satelliten und Raumfahrzeuge .....	39
	2.5.2 Astronomische Beobachtungen vom Weltraum aus .....	40
	2.5.3 Erkundung des Mondes .....	42
	2.5.4 Raumfahrtmissionen im Planetensystem .....	43

**3. Physikalische Beschaffenheit der Körper im Planetensystem**

**3.1 Globale Eigenschaften der Planeten und Satelliten** ..... 46

3.1.1 Möglichkeiten zur Erforschung der Planeten und Satelliten ... 46

3.1.2 Globaler Energiehaushalt der Planeten ..... 48

3.1.3 Innerer Aufbau und Stabilität ..... 48

3.1.4 Aufbau der Planetenatmosphären ..... 50

**3.2 Erde, Mond und erdähnliche Planeten** ..... 52

3.2.1 Innerer Aufbau der erdähnlichen Planeten ..... 52

3.2.2 Radioaktive Altersbestimmungen. Erdgeschichte ..... 53

3.2.3 Magnetfelder. Plattentektonik ..... 54

3.2.4 Mondoberfläche ..... 58

3.2.5 Oberflächen der erdähnlichen Planeten ..... 60

3.2.6 Atmosphären der erdähnlichen Planeten ..... 67

**3.3 Planetoiden oder kleine Planeten (Asteroiden)** ..... 70

3.3.1 Bahnen der Planetoiden ..... 70

3.3.2 Eigenschaften der Planetoiden ..... 71

**3.4 Die großen Planeten** ..... 72

3.4.1 Jupiter ..... 72

3.4.2 Saturn ..... 78

3.4.3 Uranus ..... 80

3.4.4 Neptun ..... 83

**3.5 Pluto und transneptunische Kleinplaneten** ..... 85

3.5.1 Pluto und Charon ..... 85

3.5.2 Transneptunische Kleinplaneten ..... 86

**3.6 Kometen** ..... 87

3.6.1 Struktur, Spektren und chemische Zusammensetzung ..... 87

3.6.2 Entwicklung der Kometen ..... 89

**3.7 Meteore und Meteorite** ..... 90

3.7.1 Meteorite und Einschlagkrater ..... 90

3.7.2 Meteore in der Erdatmosphäre ..... 90

3.7.3 Eigenschaften und Herkunft der Meteorite ..... 91

**3.8 Interplanetare Materie** ..... 94

**II. Strahlung, Instrumente und Beobachtungsverfahren** ..... 97

**Entwicklung astronomischer Beobachtungsverfahren**

Historische Einführung in die Erschließung des elektromagnetischen Spektrums ..... 98

**4. Strahlung und Materie**

**4.1 Elektromagnetische Strahlung** ..... 101

**4.2 Spezielle Relativitätstheorie** ..... 102

4.2.1 Lorentztransformation. Dopplereffekt ..... 103

4.2.2 Relativistische Mechanik ..... 103

**4.3 Strahlungstheorie** ..... 104

4.3.1 Phänomenologische Strahlungsgrößen ..... 104

4.3.2 Emission und Absorption. Strahlungstransportgleichung ..... 107

4.3.3 Thermodynamisches Gleichgewicht und Hohlraumstrahlung . 109

	<b>4.4</b>	<b>Materie im thermodynamischen Gleichgewicht</b> .....	111
	4.4.1	Boltzmann-Statistik .....	111
	4.4.2	Geschwindigkeitsverteilung .....	112
	4.4.3	Thermische Anregung .....	112
	4.4.4	Thermische Ionisation .....	112
	4.4.5	Massenwirkungsgesetz .....	113
	<b>4.5</b>	<b>Wechselwirkung von Strahlung mit Materie</b> .....	113
	4.5.1	Freie Weglänge .....	114
	4.5.2	Wirkungsquerschnitt und Reaktionsrate .....	114
	4.5.3	Stoß- und Strahlungsprozesse: Kinetische Gleichungen .....	115
	4.5.4	Atomare Elementarprozesse .....	117
	4.5.5	Extinktions- und Emissionskoeffizienten .....	119
	4.5.6	Energiereiche Photonen und Teilchen .....	120
<b>5. Astronomische und astrophysikalische Instrumente</b>	<b>5.1</b>	<b>Teleskope und Detektoren im Optischen und Ultraviolett</b> .	123
	5.1.1	Teleskope herkömmlicher Art .....	123
	5.1.2	Auflösungsvermögen und Lichtstärke. Optische Interferometer .....	128
	5.1.3	Adaptive und aktive Optik. Großteleskope .....	131
	5.1.4	Optische Detektoren .....	136
	5.1.5	Spektrographen .....	138
	5.1.6	Weltraumteleskope .....	142
	<b>5.2</b>	<b>Teleskope und Detektoren für den Radio- und Infrarotbereich</b> .....	143
	5.2.1	Radioteleskope .....	144
	5.2.2	Empfänger und Spektrometer für den Radiofrequenzbereich ..	149
	5.2.3	Beobachtungsverfahren im Infrarot .....	151
	<b>5.3</b>	<b>Instrumente der Hochenergieastronomie</b> .....	153
	5.3.1	Teilchendetektoren .....	153
	5.3.2	Teleskope für die Kosmische Strahlung .....	155
	5.3.3	Gammastrahlenteleskope .....	156
	<b>5.4</b>	<b>Instrumente im Röntgenbereich und extremen Ultraviolett</b> .....	158
	5.4.1	Detektoren und Spektrometer im Röntgenbereich .....	159
	5.4.2	Teleskope und Satelliten im Röntgenbereich .....	159
	5.4.3	Teleskope für das extreme Ultraviolett .....	161
<b>III. Sonne und Sterne: Astrophysik des einzelnen Sterns</b> .....			163
		<b>Astronomie + Physik = Astrophysik</b>	
		Historische Einleitung .....	164
<b>6. Entfernungen und Zustandsgrößen der Sterne</b>	<b>6.1</b>	<b>Die Sonne</b> .....	169
	6.1.1	Photosphärisches Spektrum. Mitte-Rand-Variation .....	170
	6.1.2	Energieverteilung .....	171
	6.1.3	Leuchtkraft und Effektivtemperatur .....	172

	<b>6.2</b>	<b>Entfernungen und Geschwindigkeiten der Sterne</b> .....	173
	6.2.1	Trigonometrische Parallaxe .....	173
	6.2.2	Radialgeschwindigkeit und Eigenbewegung .....	174
	6.2.3	Stromparallaxe .....	174
	6.2.4	Sternpositionen und Kataloge .....	175
	<b>6.3</b>	<b>Helligkeiten, Farben und Radien der Sterne</b> .....	176
	6.3.1	Scheinbare Helligkeit .....	176
	6.3.2	Farbindex und Energieverteilung .....	177
	6.3.3	Absolute Helligkeit .....	180
	6.3.4	Bolometrische Helligkeit und Leuchtkraft .....	181
	6.3.5	Sternradien .....	181
	<b>6.4</b>	<b>Klassifikation der Sternspektren.</b>	
		<b>Hertzsprung-Russell-Diagramm</b> .....	182
	6.4.1	Spektraltyp .....	183
	6.4.2	Hertzsprung-Russell-Diagramm. Leuchtkraftklasse .....	183
	6.4.3	MK-Klassifikation .....	185
	6.4.4	Zweifarbendiagramm .....	187
	6.4.5	Rotation der Sterne .....	188
	<b>6.5</b>	<b>Doppelsterne und die Massen der Sterne</b> .....	188
	6.5.1	Visuelle Doppelsterne .....	189
	6.5.2	Spektroskopische Doppelsterne. Bedeckungsveränderliche ...	190
	6.5.3	Perioden und Rotation .....	190
	6.5.4	Massen der Sterne .....	191
	6.5.5	Enge Doppelsternsysteme .....	192
	6.5.6	Pulsare in Doppelsternsystemen .....	193
	6.5.7	Begleiter mit substellaren Massen:	
		Braune Zwerge und Planeten .....	195
<b>7. Spektren und Atmosphären der Sterne</b>	<b>7.1</b>	<b>Spektren und Atome</b> .....	198
	7.1.1	Grundbegriffe der Atomspektroskopie .....	198
	7.1.2	Anregung und Ionisation .....	201
	7.1.3	Linienabsorptionskoeffizient .....	204
	7.1.4	Verbreiterung der Spektrallinien .....	205
	7.1.5	Bemerkungen zur Molekülspektroskopie .....	207
	<b>7.2</b>	<b>Physik der Sternatmosphären</b> .....	208
	7.2.1	Aufbau der Sternatmosphären .....	208
	7.2.2	Absorptionskoeffizienten in Sternatmosphären .....	211
	7.2.3	Modellatmosphären. Spektrale Energieverteilung .....	213
	7.2.4	Strahlungstransport in den Fraunhoferlinien .....	215
	7.2.5	Wachstumskurve .....	217
	7.2.6	Quantitative Analyse der Sternspektren .....	218
	7.2.7	Elementhäufigkeiten in der Sonne und den Sternen .....	220
	<b>7.3</b>	<b>Die Sonne: Chromosphäre und Korona. Strömungen, Magnetfelder und Aktivität</b> .....	223
	7.3.1	Granulation und Konvektion .....	223
	7.3.2	Magnetfelder und Magnetohydrodynamik .....	224

	7.3.3	Sonnenflecke und Aktivitätszyklus. Magnetische Flußröhren .	226
	7.3.4	Chromosphäre und Korona .....	230
	7.3.5	Protuberanzen .....	236
	7.3.6	Sonneneruptionen oder Flares .....	238
	7.3.7	Sonnenwind .....	241
	7.3.8	Oszillationen: Helioseismologie .....	245
	<b>7.4</b>	<b>Veränderliche Sterne.</b>	
		<b>Strömungen, Magnetfelder und Aktivität bei Sternen</b> .....	248
	7.4.1	Pulsierende Sterne. R Coronae Borealis-Sterne .....	249
	7.4.2	Magnetische oder Spektrum-Veränderliche. Ap-Sterne und Metallliniensterne .....	252
	7.4.3	Aktivität, Chromosphären und Koronen bei kühlen Sternen ...	253
	7.4.4	Koronen, Sternwinde und Variabilität bei heißen Sternen .....	257
	7.4.5	Kataklysmische Veränderliche: Novae und Zwergnovae .....	259
	7.4.6	Röntgendoppelsterne: Akkretion auf Neutronensterne .....	261
	7.4.7	Supernovae und Pulsare .....	265
	7.4.8	Stellare Gammaquellen .....	273
	7.4.9	Gammaburster .....	274
<b>8. Aufbau und Entwicklung der Sterne</b>	<b>8.1</b>	<b>Grundgleichungen des Sternaufbaus</b> .....	277
	8.1.1	Hydrostatisches Gleichgewicht und Zustandsgleichung der Materie .....	278
	8.1.2	Temperaturverteilung und Energietransport .....	278
	8.1.3	Energieerzeugung durch Kernreaktionen .....	279
	8.1.4	Gravitationsenergie und thermische Energie .....	283
	8.1.5	Stabilität der Sterne .....	285
	8.1.6	Grundgleichungssystem und allgemeine Folgerungen .....	286
	<b>8.2</b>	<b>Entwicklung der Sterne</b> .....	287
	8.2.1	Hauptreihensterne: Zentrales Wasserstoffbrennen .....	288
	8.2.2	Aufbau der Sonne. Solare Neutrinos .....	289
	8.2.3	Vom Wasserstoff- zum Heliumbrennen .....	292
	8.2.4	Spätphasen der Sternentwicklung .....	294
	8.2.5	Nukleosynthese in Sternen .....	299
	8.2.6	Enge Doppelsternsysteme .....	302
	8.2.7	Physik der Akkretionsscheiben .....	304
	<b>8.3</b>	<b>Endstadien der Sternentwicklung</b> .....	306
	8.3.1	Braune Zwerge .....	306
	8.3.2	Zustandsgleichung elektronenentarteter Materie .....	307
	8.3.3	Aufbau der Weißen Zwerge .....	308
	8.3.4	Neutronensterne .....	309
	<b>8.4</b>	<b>Starke Gravitationsfelder</b> .....	310
	8.4.1	Allgemeine Relativitätstheorie .....	311
	8.4.2	Kugelsymmetrische Felder im Vakuum .....	312
	8.4.3	Lichtablenkung und Gravitationslinsen .....	313
	8.4.4	Schwarze Löcher .....	316
	8.4.5	Gravitationswellen .....	316

<b>IV. Sternsysteme. Kosmologie und Kosmogonie</b> .....	319
<b>Der Vorstoß ins Weltall</b>	
Historische Einleitung in die Astronomie des 20. Jahrhunderts .....	320
<b>9. Sternhaufen</b>	
<b>9.1 Offene Sternhaufen und Sternassoziationen</b> .....	326
9.1.1 Offene (galaktische) Sternhaufen .....	326
9.1.2 Sternassoziationen .....	327
9.1.3 Farben-Helligkeits-Diagramme und Alter offener Haufen .....	327
<b>9.2 Kugelsternhaufen</b> .....	330
9.2.1 Kugelhaufen in der Milchstraße .....	330
9.2.2 Metallhäufigkeit und Zweifarbendiagramm .....	332
9.2.3 Farben-Helligkeits-Diagramme und Alter der Kugelhaufen ...	332
9.2.4 Kugelhaufen in anderen Galaxien .....	335
<b>10. Interstellare Materie und Sternentstehung</b>	
<b>10.1 Interstellarer Staub</b> .....	338
10.1.1 Dunkelwolken .....	338
10.1.2 Interstellare Extinktion und Verfärbung .....	338
10.1.3 Polarisierung von Sternlicht durch interstellaren Staub .....	340
10.1.4 Eigenschaften der Staubkörner .....	341
10.1.5 Diffuse interstellare Absorptionsbänder .....	342
<b>10.2 Neutrales interstellares Gas</b> .....	343
10.2.1 Atomare interstellare Absorptionslinien .....	343
10.2.2 Die 21 cm-Linie des neutralen Wasserstoffs. HI-Wolken .....	345
10.2.3 Interstellare Moleküllinien. Molekülwolken .....	347
<b>10.3 Ionisiertes Gas: Leuchtende Gasnebel</b> .....	350
10.3.1 H II-Regionen .....	350
10.3.2 Planetarische Nebel .....	355
10.3.3 Supernovaüberreste .....	356
10.3.4 Heißes interstellares Gas .....	362
<b>10.4 Hochenergetische Komponenten</b> .....	363
10.4.1 Interstellare Magnetfelder .....	363
10.4.2 Kosmische Strahlung .....	364
10.4.3 Galaktische Gammastrahlung .....	370
<b>10.5 Frühe Entwicklung und Entstehung der Sterne</b> .....	372
10.5.1 Vor-Hauptreihensterne .....	373
10.5.2 Sternentstehungsgebiete .....	375
10.5.3 Gravitationsinstabilität und Fragmentation .....	377
10.5.4 Entwicklung der Protosterne .....	378
10.5.5 Strömungen in der Umgebung der Protosterne .....	380
10.5.6 Stellarstatistik und Geburtsraten der Sterne .....	383
<b>11. Aufbau und Dynamik des Milchstraßensystems</b>	
<b>11.1 Sterne und der Bau der Milchstraße</b> .....	387
11.1.1 Galaktische Koordinaten .....	387
11.1.2 Sternzählungen .....	387

11.1.3	Raumgeschwindigkeiten der Sterne .....	388
11.1.4	Sternhaufen:	
	Entfernungsbestimmung und Bau der Milchstraße .....	390
<b>11.2</b>	<b>Dynamik und Verteilung der Materie</b> .....	391
11.2.1	Rotation der galaktischen Scheibe .....	392
11.2.2	Verteilung der interstellaren Materie .....	394
11.2.3	Galaktische Bahnen der Sterne. Lokale Massendichte .....	398
11.2.4	Massenverteilung in der Milchstraße .....	400
11.2.5	Dynamik der Spiralarme .....	401
11.2.6	Populationen und Elementhäufigkeiten .....	402
<b>11.3</b>	<b>Zentralbereich der Milchstraße</b> .....	406
11.3.1	Galaktischer Bulge ( $R \leq 3$ kpc) .....	406
11.3.2	Kernbereich des galaktischen Bulge ( $R \leq 300$ pc) .....	407
11.3.3	Zirkumnukleare Scheibe und Minispirale ( $R \leq 10$ pc) .....	409
11.3.4	Innerster Bereich ( $R \leq 1$ pc) mit Sgr A* .....	410
<b>12. Galaxien und Galaxienhaufen</b>		
<b>12.1</b>	<b>Normale Galaxien</b> .....	413
12.1.1	Entfernungsbestimmung .....	413
12.1.2	Klassifikation und absolute Helligkeiten .....	416
12.1.3	Leuchtkraftfunktion .....	420
12.1.4	Helligkeitsprofil und Durchmesser .....	421
12.1.5	Dynamik und Massen .....	422
12.1.6	Sternpopulationen und Elementhäufigkeiten .....	427
12.1.7	Gas- und Staubverteilung .....	430
<b>12.2</b>	<b>Infrarot- und Starburst-Galaxien</b> .....	434
12.2.1	Infrarotgalaxien .....	434
12.2.2	Starburst-Aktivität .....	436
<b>12.3</b>	<b>Radiogalaxien, Quasare und Aktivität in Galaxienkernen</b> .....	437
12.3.1	Synchrotronstrahlung .....	437
12.3.2	Nichtthermische Radiostrahlung normaler Galaxien .....	440
12.3.3	Radiogalaxien .....	441
12.3.4	Quasare (Quasistellare Objekte) .....	446
12.3.5	Seyfert-Galaxien .....	453
12.3.6	Aktivität in Galaxienkernen .....	455
<b>12.4</b>	<b>Haufen und Superhaufen von Galaxien</b> .....	459
12.4.1	Lokale Gruppe .....	459
12.4.2	Klassifikation und Massen der Galaxienhaufen .....	460
12.4.3	Gas in Galaxienhaufen .....	462
12.4.4	Wechselwirkung der Galaxien.	
	Entwicklung der Galaxienhaufen .....	464
12.4.5	Superhaufen von Galaxien .....	465
<b>12.5</b>	<b>Entstehung und Entwicklung der Galaxien</b> .....	466
12.5.1	Entstehung der Galaxien und Galaxienhaufen .....	468
12.5.2	Intergalaktisches Medium und Lyman $\alpha$ -Systeme .....	470

	12.5.3 Wechselwirkende Galaxien .....	472
	12.5.4 Entwicklung der Galaxien .....	473
	12.5.5 Galaxien im frühen Universum .....	478
<b>13. Kosmologie: Der Kosmos als Ganzes</b>	<b>13.1 Weltmodelle</b> .....	481
	13.1.1 Fluchtbewegung der Galaxien .....	481
	13.1.2 Newtonsche Kosmologie .....	482
	13.1.3 Relativistische Kosmologie .....	484
	13.1.4 Materiekosmos .....	487
	<b>13.2 Strahlung und Beobachtung. Elemententstehung im Kosmos</b> .....	488
	13.2.1 Ausbreitung von Strahlung .....	488
	13.2.2 Beobachtete Parameter des heutigen Kosmos .....	490
	13.2.3 Mikrowellen-Hintergrundstrahlung .....	492
	13.2.4 Strahlungskosmos .....	495
	13.2.5 Elemententstehung im Kosmos .....	496
	13.2.6 Olbers-Paradox .....	497
	<b>13.3 Evolution des Kosmos</b> .....	497
	13.3.1 Planckzeit .....	498
	13.3.2 Fundamentale Teilchen und Wechselwirkungen .....	498
	13.3.3 Entwicklung des Kosmos nach dem Standardmodell .....	500
	13.3.4 Inflationärer Kosmos .....	503
	13.3.5 Andere Kosmologien .....	504
<b>14. Kosmogonie des Sonnensystems</b>	<b>14.1 Entstehung der Sonne und des Planetensystems</b> .....	506
	14.1.1 Überblick über das Planetensystem .....	506
	14.1.2 Protoplanetare Scheibe und Entstehung der Planeten .....	508
	14.1.3 Entstehung der Meteorite .....	510
	14.1.4 Entstehung des Erde-Mond-Systems .....	512
	14.1.5 Planetensysteme bei anderen Sternen .....	515
	<b>14.2 Entwicklung der Erde und des Lebens</b> .....	517
	14.2.1 Entwicklung der Atmosphäre und der Ozeane .....	517
	14.2.2 Molekularbiologische Grundlagen .....	518
	14.2.3 Präbiotische Moleküle .....	521
	14.2.4 Entwicklung der Lebewesen .....	522
<b>Anhang</b>	<b>A.1 Verschiedene Einheiten, Internationales Einheitensystem und Gaußsches System</b> .....	529
	<b>A.2 Namen der Sternbilder</b> .....	533
	<b>Ausgewählte Probleme</b> .....	535
	<b>Literatur und Daten</b> .....	543
	<b>Quellennachweis</b> .....	551
	<b>Sachverzeichnis</b> .....	557
	<b>Physikalische Fundamentalkonstanten</b> (Hintere Einbandinnenseite)	
	<b>Astronomische Konstanten und Einheiten</b> (Hintere Einbandinnenseite)	