

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
1 Sphärische Astronomie	4
1.1 Koordinatensysteme	4
1.1.1 Horizontsystem	5
1.1.2 Äquatorsystem	6
1.1.3 Ekliptiksystem	8
1.1.4 Galaktisches System	9
1.1.5 Transformationen der Systeme	9
1.2 Die Zeit	11
1.2.1 Definitionen, Sonnenzeit und Sternzeit	11
1.2.2 Kalender	14
1.2.3 Der Stern von Bethlehem	18
1.3 Sternpositionen	19
1.3.1 Refraktion	20
1.3.2 Aberration	22
1.3.3 Parallaxe	24
1.3.4 Präzession, Nutation	25
1.3.5 Sternkataloge	27
1.3.6 Lichtablenkung und Exoplaneten	28
1.4 Orts- und Zeitbestimmung	29
1.4.1 Geographische Breite Φ	29
1.4.2 Zeitbestimmung	30
1.4.3 Moderne Navigationssysteme	31
2 Geschichte der Astronomie	32
2.1 Astronomie der Vor- und Frühgeschichte	32
2.1.1 Ägypten, Mesopotamien	34
2.1.2 China	36
2.1.3 Mittel- und Nordamerika	36
2.1.4 Altes Europa	37

2.2	Astronomie der Griechen	37
2.2.1	Philosophische Überlegungen	37
2.2.2	Erste Messungen	38
2.2.3	Navigation	41
2.3	Astronomie im Mittelalter und frühe Neuzeit	42
2.3.1	Astronomie der Araber	42
2.3.2	Mittelalter	42
2.3.3	Geozentrisch \rightarrow heliozentrisch	43
2.3.4	Kepler, Galilei, Newton	45
2.3.5	Himmelsmechanik	49
2.4	Moderne Astrophysik und Kosmologie	50
2.4.1	Die Entdeckung weiterer Objekte im Sonnensystem	50
2.4.2	Astrophysik	52
2.4.3	Das Universum	54
2.4.4	Schlussbemerkung	55
3	Himmelsmechanik	56
3.1	Mond und Planetenbahnen	56
3.1.1	Ephemeridenrechnung	58
3.1.2	Scheinbare Planetenbahnen am Himmel	60
3.1.3	Periheldrehung	63
3.1.4	Mondbahn	63
3.2	Zweikörperproblem	66
3.2.1	Drehimpuls, Flächensatz	68
3.2.2	Bahnform	68
3.2.3	Energiesatz	69
3.2.4	Drittes Keplergesetz	71
3.3	N-Körperproblem	72
3.3.1	Das allgemeine N-Körperproblem	72
3.3.2	Das allgemeine Dreikörperproblem	73
3.3.3	Eingeschränktes Dreikörperproblem	74
3.4	Raumflug	81
3.4.1	Entweichgeschwindigkeiten	81
3.4.2	Raketenformel	82
3.4.3	Satellit im Erdorbit	85
3.4.4	Einflüsse auf Satellitenbahnen	86
3.5	Resonanzen im Planetensystem	87
3.5.1	Chaos	87
3.5.2	Resonanzen im Sonnensystem	88
3.5.3	Migration von Planeten	89
3.6	Finsternisse	89
3.6.1	Mondfinsternisse	89
3.6.2	Sonnenfinsternisse	91

3.6.3	Planetentransits	93
4	Astronomische Instrumente	95
4.1	Teleskope	95
4.1.1	Abbildungsfehler	100
4.1.2	Teleskoptypen	102
4.1.3	Teleskopmontierungen	104
4.1.4	Robotische Teleskope	105
4.2	Moderne optische Teleskope	105
4.2.1	Moderne erdgebundene Teleskope	105
4.2.2	Das Hubble-Space-Teleskop und andere Projekte	109
4.3	Detektoren	111
4.3.1	Menschliches Auge, Photographie	111
4.3.2	CCD	112
4.3.3	CMOS	113
4.3.4	Speckle-Interferometrie	113
4.3.5	Bildkorrektur	113
4.4	Nicht optische Teleskope	114
4.4.1	Radioteleskope	114
4.4.2	Infrarotteleskope	117
4.4.3	Röntgenteleskope	119
4.5	Spektroskopie	119
4.5.1	Allgemeines zur Spektroskopie	119
4.5.2	Typen von Spektrographen	122
4.6	Strahlung und Spektrum	123
4.6.1	Das elektromagnetische Spektrum	123
4.6.2	Thermische Strahlung	124
4.6.3	Emissions- und Absorptionslinien	125
4.6.4	Polarisiertes Licht	128
4.6.5	Magnetfelder und Strahlung	130
4.6.6	Einsteinkoeffizienten	132
4.6.7	Kohärenz	133
5	Physik der Körper des Sonnensystems	134
5.1	Übersicht	134
5.2	Eigenschaften der Planeten	137
5.2.1	Rotationsdauer	137
5.2.2	Massenverteilung	138
5.2.3	Albedo	138
5.2.4	Spektrum	139
5.2.5	Globaler Energiehaushalt	139
5.2.6	Hydrostatisches Gleichgewicht	140
5.2.7	Stabilität eines Satelliten, Roche-Grenze	141

5.2.8	Planetenatmosphären	142
5.3	Die Erde	144
5.3.1	Aufbau der Erde	144
5.3.2	Geologische und biologische Entwicklung	146
5.3.3	Erdmagnetfeld	147
5.3.4	Erdatmosphäre	149
5.4	Der Mond	154
5.4.1	Allgemeines	154
5.4.2	Entstehung des Mondes	157
5.5	Merkur	158
5.6	Venus	160
5.6.1	Oberfläche der Venus	161
5.6.2	Atmosphäre der Venus	162
5.7	Mars	164
5.7.1	Marsoberfläche	165
5.7.2	Marsatmosphäre	168
5.7.3	Marsmonde	169
5.8	Jupiter	170
5.8.1	Allgemeine Eigenschaften	170
5.8.2	Jupiteratmosphäre	172
5.8.3	Magnetosphäre des Jupiter	173
5.8.4	Jupiterringe und Jupitermonde	174
5.9	Saturn	177
5.9.1	Saturnringe	178
5.9.2	Saturnmonde	179
5.10	Uranus und Neptun	181
5.10.1	Entdeckung und allgemeine Eigenschaften	181
5.10.2	Ringe und Satelliten von Uranus und Neptun	183
5.11	Zwergplaneten	184
5.11.1	Pluto	184
5.11.2	Ceres und weitere Zwergplaneten	185
5.12	Asteroiden	185
5.12.1	Benennung und Typen	185
5.12.2	Verteilung der Asteroiden	188
5.12.3	NEOs	189
5.13	Kometen	191
5.13.1	Kuipergürtel und Oort'sche Wolke	194
5.13.2	Sungrazer	196
5.14	Meteoroiden	197
5.14.1	Nomenklatur	197
5.14.2	Klassifikation	198
5.14.3	Interplanetare Materie	199

5.15	Entstehung des Sonnensystems	200
5.15.1	Extrasolare Planetensysteme	200
5.15.2	Theorien der Entstehung	202
5.15.3	Protoplanetarer Nebel	204
6	Die Sonne	206
6.1	Grunddaten und Koordinaten	206
6.1.1	Grunddaten	206
6.1.2	Koordinaten	207
6.1.3	Entfernung	207
6.1.4	Sonnenmasse	209
6.1.5	Radius	209
6.1.6	Leuchtkraft	210
6.1.7	Effektive Temperatur	210
6.1.8	Sonnenbeobachtung	211
6.2	Der Aufbau der Sonne, die ruhige Sonne	213
6.2.1	Sonneninneres	213
6.2.2	Photosphäre	215
6.2.3	Chromosphäre	217
6.2.4	Korona	218
6.3	Die Aktive Sonne	219
6.3.1	Flecken	219
6.3.2	Fackeln	223
6.3.3	Protuberanzen	223
6.3.4	Flares	224
6.3.5	Die Radiostrahlung	227
6.3.6	Röntgenstrahlung der Korona	229
6.4	Solarerterrestrische Beziehungen	231
6.4.1	Der Sonnenaktivitätszyklus	231
6.4.2	Zeitreihen, Periodenanalyse	232
6.4.3	Die solare Irradianz	233
6.5	Helioseismologie	237
6.5.1	Mathematische Beschreibung	238
6.5.2	Beobachtungsergebnisse	241
6.6	Magnetohydrodynamik der Sonne	243
6.6.1	Maxwell-Gleichungen	243
6.6.2	Induktionsgleichung	245
6.6.3	Plasmagleichungen	246
6.6.4	Bewegung eines Teilchens in einem Magnetfeld	248

7	Zustandsgrößen der Sterne	252
7.1	Entfernung, Helligkeiten	252
7.1.1	Scheinbare Helligkeit	252
7.1.2	Entfernung	253
7.1.3	Absolute Helligkeit, Entfernungsmodul	254
7.1.4	Bolometrische Helligkeit	255
7.2	Sternradien	256
7.2.1	Sterninterferometer	256
7.2.2	Sternbedeckungen durch den Mond	257
7.2.3	Bedeckungsveränderliche Sterne	258
7.2.4	Speckleinterferometrie	260
7.2.5	Microlensing	261
7.3	Masse	261
7.3.1	Drittes Keplersgesetz	261
7.3.2	Gravitationsrotverschiebung	263
7.3.3	Abgeleitete Größen	264
7.4	Sterntemperaturen	264
7.4.1	Sterne als Schwarze Körper	264
7.4.2	Weitere Temperaturbegriffe	265
7.5	Klassifikation der Sterne, HRD	266
7.5.1	Spektralklassifikation	266
7.5.2	Das Hertzsprung-Russell-Diagramm	267
7.5.3	Leuchtkraftklassen	270
7.5.4	Balmersprung	272
7.5.5	Sternpopulation und FHD	273
7.5.6	Die Masse-Leuchtkraft-Beziehung	273
7.6	Rotation und Magnetfelder	274
7.6.1	Rotation	274
7.6.2	Magnetfelder	276
7.7	Besondere Sterne	277
7.7.1	Helle Sterne	277
7.7.2	Algol und Bedeckungsveränderliche	278
8	Sternatmosphären	281
8.1	Quantenmechanische Beschreibung	281
8.1.1	Beschreibung eines Teilchens	282
8.1.2	Schrödingergleichung	282
8.1.3	Wellenfunktionen für Wasserstoff	283
8.1.4	Quantenzahlen	286
8.1.5	Elektronenkonfigurationen	286
8.1.6	Wasserstoff-Feinstruktur	287
8.1.7	Komplexe Atome	288
8.2	Anregung und Ionisation	289

8.2.1	Thermodynamisches Gleichgewicht	289
8.2.2	Boltzmannformel	291
8.2.3	Saha-Gleichung	292
8.3	Strahlungstransport	293
8.3.1	Lösungen der Transportgleichung	297
8.4	Absorptionskoeffizienten	300
8.4.1	Kontinuierliche Absorption	300
8.4.2	Streuung	301
8.4.3	Theorie der Absorptionslinien	302
8.5	Linienprofile	305
8.5.1	Dämpfung	305
8.5.2	Dopplerverbreiterung	306
8.5.3	Voigtprofil	308
8.6	Analyse von Sternspektren	308
8.6.1	Wachstumskurven	308
8.6.2	Quantitative Spektralanalyse	310
8.7	Sternatmosphärenmodelle	311
8.7.1	Vergleich: Sonne und Wega	311
8.7.2	Numerische Lösungen	312
9	Sternaufbau	316
9.1	Physikalische Grundgesetze des Sternaufbaus	316
9.1.1	Hydrostatisches Gleichgewicht	316
9.1.2	Bewegungsgleichung bei sphärischer Symmetrie	318
9.1.3	Hydrostatisches Gleichgewicht nach der Allgemeinen Relativitätstheorie	320
9.1.4	Zustandsgleichung	321
9.1.5	Entartung	323
9.1.6	Zusammenfassung: Zustandsgleichung	325
9.2	Energietransport	325
9.2.1	Konvektion	326
9.2.2	Strahlungstransport	326
9.2.3	Opazität	329
9.3	Energiequellen	330
9.3.1	Energieerzeugung durch Kontraktion	331
9.3.2	Thermonukleare Energieerzeugung	331
9.3.3	Neutrinos	337
9.4	Spezielle Sternmodelle	339
9.4.1	Polytrope Modelle	339
9.4.2	Homologe Gleichungen	342

10 Sternentwicklung	343
10.1 Sternentstehung und Entwicklung	343
10.1.1 Protosterne	343
10.1.2 Kollaps eines sonnenähnlichen Sterns	346
10.1.3 Entwicklung eines Sterns mit einer Sonnenmasse	347
10.2 Weiße Zwerge	349
10.2.1 Allgemeine Eigenschaften	349
10.2.2 Allgemeine Relativitätstheorie und Weiße Zwerge	351
10.2.3 Magnetfelder	352
10.2.4 Braune Zwerge	352
10.3 Neutronensterne	353
10.3.1 Bildung von Neutronensternen	353
10.3.2 Pulsare	354
10.4 Supernovae	359
10.4.1 Klassifizierung	359
10.4.2 Kernsynthese während einer SN	361
10.4.3 Beobachtete Supernovae	362
10.5 Schwarze Löcher	364
10.5.1 Allgemeines	364
10.5.2 Kandidaten für Schwarze Löcher	365
10.5.3 Quantentheorie Schwarzer Löcher	366
10.5.4 Akkretion	367
10.6 Gamma Ray Bursts	368
10.6.1 Eigenschaften der GRB	368
10.6.2 Erklärung der GRB	369
10.7 Vergleich der Sternentwicklung	369
10.8 Veränderliche Sterne	370
10.8.1 Allgemeines	370
10.8.2 Pulsationsveränderliche	372
10.8.3 Halbbregelmäßig Veränderliche	374
10.8.4 Eruptive Veränderliche	375
10.8.5 Pekuliare Sterne	378
10.8.6 Planetarische Nebel	379
10.8.7 Sternaktivität	379
11 Interstellare Materie	382
11.1 Entdeckung, allgemeine Eigenschaften	382
11.2 Interstellarer Staub	383
11.2.1 Extinktion	383
11.2.2 Streuung	385
11.2.3 Polarisierung	386
11.3 Interstellares Gas	387
11.3.1 Neutraler Wasserstoff	387

11.4	Emissionsnebel, H-II-Regionen	389
11.4.1	Besondere Emissionsnebel	392
11.4.2	Lichtechos	394
11.5	Kosmische Strahlung	394
12	Die Galaxis	397
12.1	Entfernungsbestimmungsmethoden	398
12.1.1	Trigonometrische Methoden	398
12.1.2	Photometrische Standardkerzen	400
12.2	Der Aufbau unserer Milchstraße	401
12.2.1	Grober Aufbau	401
12.2.2	Galaktische Koordinaten	402
12.2.3	Verteilung der Sterne	403
12.3	Sternpopulationen und Dichtewellen	409
12.3.1	Sternpopulationen	409
12.3.2	Dichtewellen, Spiralstruktur	411
12.4	Rotation der Galaxis	412
12.4.1	Radial- und Tangentialbewegung	412
12.4.2	Galaktische Rotation, LSR	413
12.4.3	Galaktische Rotationskurve	414
12.5	Dunkle Materie in der Milchstraße	419
12.5.1	Natur der dunklen Materie	419
12.5.2	Galaktisches Microlensing	420
12.6	Galaktisches Zentrum	423
12.6.1	Definition des Zentrums	423
12.6.2	Zentraler Sternhaufen und Schwarzes Loch	424
12.7	Spiralarme und andere Eigenschaften	424
13	Extragalaktische Systeme	426
13.1	Klassifikation	426
13.1.1	Verzeichnisse	426
13.1.2	Hubble-Klassifikation	427
13.1.3	Andere Klassifikationen von Galaxien	429
13.1.4	Elliptische Galaxien, E	429
13.1.5	Spiralgalaxien	431
13.1.6	Irreguläre Galaxien	433
13.1.7	Verteilung auf Typen	433
13.1.8	Integrale Eigenschaften und Durchmesser	434
13.1.9	Die Magellan'schen Wolken	435
13.1.10	Populationssynthese	436
13.2	Supermassive Schwarze Löcher	437
13.2.1	Detektion SMBHs	437
13.2.2	SMBHs und Galaxieneigenschaften	438

13.3	Aktive Galaxien	439
13.3.1	Aktive Galaxienkerne	439
13.3.2	Radiogalaxien	441
13.3.3	Quasare	444
13.3.4	Galaxien mit hoher Rotverschiebung	450
13.3.5	Blazare	450
13.4	Galaxienhaufen	451
13.4.1	Superhaufen	452
14	Kosmologie	454
14.1	Beobachtungsergebnisse	454
14.1.1	Blick in die Vergangenheit	455
14.1.2	Olbers-Paradoxon	455
14.1.3	Zählungen	455
14.1.4	Die Galaxienflucht	456
14.1.5	Homogenität und Isotropie	457
14.1.6	Methoden der Entfernungsbestimmung	458
14.2	Newton'sche Kosmologie	458
14.2.1	Expansion	459
14.2.2	Bewegungsgleichung	459
14.2.3	Energieerhaltung	460
14.3	Relativitätstheorie	461
14.3.1	Spezielle Relativitätstheorie	461
14.3.2	Allgemeine Relativitätstheorie	464
14.3.3	Materie und Raum-Zeit-Krümmung	466
14.3.4	Metrik des Raumes	468
14.3.5	Friedmann-Lemaître-Gleichungen	470
14.3.6	Gravitationswellen	474
14.4	Dunkle Energie, beschleunigte Expansion	474
14.4.1	Beobachtungen	474
14.4.2	Dunkle Energie	475
14.5	Das frühe Universum	476
14.5.1	Urknall-Beobachtungshinweise	476
14.5.2	Sunyaev-Zel'dovich-Effekt	477
14.5.3	Akustische Oszillationen	481
14.5.4	Bildung der Teilchen	482
14.5.5	Quarks und Quark-Gluonen-Plasma	483
14.5.6	Teilchenerzeugung	484
14.6	Symmetriebrechung im frühen Universum	485
14.6.1	Die vier Naturkräfte	485
14.6.2	Das frühe Universum	487
14.6.3	Inflationäres Universum	487
14.6.4	Stringtheorie	489

14.7	Paralleluniversum	493
14.7.1	Quantenschaum	493
14.7.2	Quantenvakuum	494
14.7.3	Paralleluniversen	494
14.8	Zeitskala	495
15	Mathematische Methoden	496
15.1	Statistik	496
15.1.1	Mittelwerte	496
15.1.2	Verteilungsfunktionen	499
15.1.3	Momente	500
15.2	Kurvenfits und Korrelationsrechnung	502
15.2.1	Anpassen von Kurven, Methode kleinster Quadrate	502
15.2.2	Korrelationen	506
15.3	Numerische Mathematik	507
15.3.1	Interpolationspolynome	507
15.3.2	Dividierte Differenzen	508
15.3.3	Newton'sches Interpolationsverfahren	508
15.3.4	Interpolation mit ungleichmäßig verteilten Stützstellen	510
15.3.5	Numerische Differenziation	511
15.3.6	Numerische Integration	513
15.3.7	Differenzialgleichungen	514
15.4	Fouriermethoden	517
15.4.1	Autokorrelation	517
15.4.2	Die Fast Fourier Transformation, FFT	518
15.4.3	Digitale Filter	520
15.4.4	Fouriertransformationen in der Optik	521
15.5	Vektorrechnung	523
15.5.1	Allgemeines	523
15.5.2	Gradient, Divergenz, Rotation	525
15.6	Splines	526
16	Anhang	528
16.1	Literatur	528
16.1.1	Allgemein	528
16.1.2	Literatur zu speziellen Themen	529
16.1.3	Zeitschriften	529
16.1.4	Wichtige Internetadressen	530
16.1.5	Software (professionelle)	530
16.2	Testfragen	531
16.3	Tabellen	533