
Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Sphärische Astronomie	5
2.1	Koordinatensysteme	6
2.1.1	Horizontsystem	6
2.1.2	Äquatorsystem	7
2.1.3	Ekliptiksystem	9
2.1.4	Galaktisches System	10
2.1.5	Transformationen der Systeme	10
2.2	Die Zeit	12
2.2.1	Definitionen, Sonnenzeit und Sternzeit	12
2.2.2	Kalender	14
2.2.3	Der Stern von Bethlehem	17
2.3	Sternpositionen	18
2.3.1	Refraktion	19
2.3.2	Aberration	21
2.3.3	Parallaxe	22
2.3.4	Präzession, Nutation	24
2.3.5	Sternkataloge	27
2.3.6	Lichtablenkung und Exoplaneten	28
2.4	Orts- und Zeitbestimmung	29
2.4.1	Geographische Breite Φ	29
2.4.2	Zeitbestimmung	30
2.4.3	Moderne Navigationssysteme	31
2.5	Aufgaben	32
3	Geschichte der Astronomie	35
3.1	Astronomie der Vor- und Frühgeschichte	35
3.1.1	Ägypten, Mesopotamien	37
3.1.2	China	39
3.1.3	Mittel- und Nordamerika	39

3.1.4	Altes Europa	40
3.2	Astronomie der Griechen	41
3.2.1	Philosophische Überlegungen	41
3.2.2	Erste Messungen	41
3.2.3	Navigation	44
3.3	Astronomie im Mittelalter und in früher Neuzeit	44
3.3.1	Astronomie der Araber	44
3.3.2	Mittelalter	45
3.3.3	Geozentrisch → heliozentrisch	46
3.3.4	Kepler, Galilei, Newton	48
3.3.5	Himmelsmechanik	51
3.4	Moderne Astrophysik und Kosmologie	53
3.4.1	Die Entdeckung weiterer Objekte im Sonnensystem	53
3.4.2	Astrophysik	54
3.4.3	Das Universum	56
3.4.4	Schlussbemerkung	57
4	Himmelsmechanik	59
4.1	Mond- und Planetenbahnen	59
4.1.1	Ephemeridenrechnung	61
4.1.2	Scheinbare Planetenbahnen am Himmel	63
4.1.3	Periheldrehung	65
4.1.4	Mondbahn	65
4.1.5	Gezeiten	67
4.1.6	Vergleich Gezeitenkraft des Mondes mit Kapillarwirkung in Pflanzen	69
4.2	Zweikörperproblem	70
4.2.1	Drehimpuls, Flächensatz	71
4.2.2	Bahnform	72
4.2.3	Energiesatz	73
4.2.4	Drittes Keplergesetz	75
4.3	N-Körperproblem	76
4.3.1	Das allgemeine N-Körperproblem	76
4.3.2	Das allgemeine Dreikörperproblem	77
4.3.3	Eingeschränktes Dreikörperproblem	78
4.4	Vielteilchensysteme	84
4.4.1	Virialsatz und Entfernung einer interstellaren Gaswolke	85
4.4.2	Ergodisches Verhalten	86
4.5	Raumflug	87
4.5.1	Entweichgeschwindigkeiten	87
4.5.2	Raketenformel	87
4.5.3	Satellit im Erdorbit	90

4.5.4	Einflüsse auf Satellitenbahnen	92
4.6	Resonanzen im Planetensystem	93
4.6.1	Chaos	93
4.6.2	Resonanzen im Sonnensystem	94
4.6.3	Migration von Planeten	94
4.7	Finsternisse	95
4.7.1	Mondfinsternisse	95
4.7.2	Sonnenfinsternisse	96
4.7.3	Planetentransits	99
4.8	Aufgaben	100
5	Astronomische Instrumente	103
5.1	Teleskope	103
5.1.1	Abbildungsfehler	108
5.1.2	Teleskoptypen	109
5.1.3	Teleskopmontierungen	111
5.1.4	Robotische Teleskope	113
5.2	Moderne optische Teleskope	114
5.2.1	Moderne erdegebundene Teleskope	114
5.2.2	Das Hubble-Space-Teleskop und andere Projekte	116
5.3	Detektoren	118
5.3.1	Menschliches Auge, Photographie	118
5.3.2	CCD	119
5.3.3	CMOS	120
5.3.4	Back-Illuminated Sensor	120
5.3.5	Speckle-Interferometrie	121
5.3.6	Bildkorrektur	121
5.4	Nicht-optische Teleskope	121
5.4.1	Radioteleskope	121
5.4.2	Infrarotteleskope	125
5.4.3	Röntgenteleskope	127
5.5	Spektroskopie	127
5.5.1	Allgemeines zur Spektroskopie	127
5.5.2	Typen von Spektrographen	129
5.6	Strahlung und Spektrum	130
5.6.1	Das elektromagnetische Spektrum	130
5.6.2	Thermische Strahlung	131
5.6.3	Emissions- und Absorptionslinien	132
5.6.4	Polarisiertes Licht	135
5.6.5	Magnetfelder und Strahlung	137
5.6.6	Einstein-Koeffizienten	139
5.6.7	Kohärenz	140

5.7	Aufgaben	140
6	Physik der Körper des Sonnensystems	143
6.1	Übersicht	144
6.2	Eigenschaften der Planeten	146
6.2.1	Rotationsdauer	146
6.2.2	Massenverteilung	147
6.2.3	Albedo	148
6.2.4	Spektrum	149
6.2.5	Globaler Energiehaushalt	149
6.2.6	Hydrostatisches Gleichgewicht	150
6.2.7	Stabilität eines Satelliten, Roche-Grenze	151
6.2.8	Planetenatmosphären	152
6.3	Die Erde	153
6.3.1	Aufbau der Erde	153
6.3.2	Geologische und biologische Entwicklung	155
6.3.3	Erdmagnetfeld	156
6.3.4	Erdatmosphäre	158
6.4	Der Mond	163
6.4.1	Allgemeines	163
6.4.2	Entstehung des Mondes	167
6.4.3	Das Mondinnere	168
6.5	Merkur	168
6.6	Venus	170
6.6.1	Oberfläche der Venus	172
6.6.2	Atmosphäre der Venus	173
6.6.3	Venus und der Klimawandel auf der Erde	176
6.7	Mars	177
6.7.1	Allgemeine Daten	177
6.7.2	Marsoberfläche	177
6.7.3	Marsatmosphäre	180
6.7.4	Mars – Terraforming?	181
6.7.5	Marsmonde	183
6.8	Jupiter	184
6.8.1	Allgemeine Eigenschaften	184
6.8.2	Jupiteratmosphäre	187
6.8.3	Magnetosphäre des Jupiter	190
6.8.4	Jupiterringe und Jupitermonde	191
6.9	Saturn	195
6.9.1	Allgemeine Daten	195
6.9.2	Saturnringe	196
6.9.3	Saturnmonde	197

6.10	Uranus und Neptun	199
6.10.1	Entdeckung und allgemeine Eigenschaften	199
6.10.2	Ringe und Satelliten von Uranus und Neptun	201
6.11	Zwergplaneten	203
6.11.1	Pluto	203
6.11.2	Ceres und weitere Zwergplaneten	204
6.12	Asteroiden	205
6.12.1	Benennung und Typen	205
6.12.2	Verteilung der Asteroiden	209
6.12.3	NEOs	210
6.13	Kometen	210
6.13.1	Kuipergürtel und Oort'sche Wolke	214
6.13.2	Sungrazer	216
6.14	Meteoroiden	217
6.14.1	Nomenklatur	217
6.14.2	Klassifikation	218
6.14.3	Interplanetare Materie	219
6.15	Entstehung des Sonnensystems	221
6.15.1	Extrasolare Planetensysteme	221
6.15.2	Theorien der Entstehung	221
6.15.3	Protoplanetarer Nebel	223
6.16	Aufgaben	224
7	Die Sonne	227
7.1	Grunddaten und Koordinaten	228
7.1.1	Grunddaten	228
7.1.2	Koordinaten	228
7.1.3	Entfernung	229
7.1.4	Sonnenmasse	230
7.1.5	Radius	231
7.1.6	Leuchtkraft	231
7.1.7	Effektive Temperatur	231
7.1.8	Sonnenbeobachtung	232
7.2	Der Aufbau der Sonne, die ruhige Sonne	233
7.2.1	Sonneninneres	235
7.2.2	Photosphäre	236
7.2.3	Chromosphäre	237
7.2.4	Korona	239
7.3	Die aktive Sonne	241
7.3.1	Sonnenflecken	241
7.3.2	Fackeln	245
7.3.3	Protuberanzen	247

7.3.4	Flares und koronale Massenauswürfe	247
7.3.5	Die Radiostrahlung	251
7.3.6	Röntgenstrahlung der Korona	253
7.4	Solarterrestrische Beziehungen	256
7.4.1	Der Sonnenaktivitätszyklus	256
7.4.2	Zeitreihen, Periodenanalyse	257
7.4.3	Die solare Irradianz	258
7.5	Helioseismologie	262
7.5.1	Mathematische Beschreibung	262
7.5.2	Beobachtungsergebnisse	266
7.6	Magnetohydrodynamik der Sonne	268
7.6.1	Maxwell-Gleichungen	268
7.6.2	Induktionsgleichung	270
7.6.3	Plasmagleichungen	270
7.6.4	Bewegung eines Teilchens in einem Magnetfeld	272
7.7	Aufgaben	276
8	Zustandsgrößen der Sterne	279
8.1	Entfernung, Helligkeiten	279
8.1.1	Scheinbare Helligkeit	279
8.1.2	Entfernung	281
8.1.3	Absolute Helligkeit, Entfernungsmodul	281
8.1.4	Bolometrische Helligkeit	282
8.2	Sternradien	283
8.2.1	Sterninterferometer	283
8.2.2	Sternbedeckungen durch den Mond	284
8.2.3	Bedeckungsveränderliche Sterne	285
8.2.4	Speckle-Interferometrie	287
8.2.5	Microlensing	288
8.3	Masse	288
8.3.1	Drittes Keplergesetz	288
8.3.2	Gravitationsrotverschiebung	290
8.3.3	Microlensing	291
8.3.4	Abgeleitete Größen	291
8.4	Sterntemperaturen	291
8.4.1	Sterne als Schwarze Körper	291
8.4.2	Weitere Temperaturbegriffe	292
8.5	Klassifikation der Sterne, HRD	293
8.5.1	Spektralklassifikation	293
8.5.2	Das Hertzsprung-Russell-Diagramm	295
8.5.3	Leuchtkraftklassen	297
8.5.4	Balmersprung	299

8.5.5	Sternpopulation und FHD	299
8.5.6	Die Masse-Leuchtkraft-Beziehung	300
8.6	Rotation und Magnetfelder	300
8.6.1	Rotation	301
8.6.2	Magnetfelder	302
8.7	Besondere Sterne	303
8.7.1	Helle Sterne	303
8.7.2	Algol und Bedeckungsveränderliche	304
8.8	Aufgaben	306
9	Sternatmosphären	309
9.1	Quantenmechanische Beschreibung	310
9.1.1	Beschreibung eines Teilchens	310
9.1.2	Schrödinger-Gleichung	310
9.1.3	Wellenfunktionen für Wasserstoff	311
9.1.4	Quantenzahlen	314
9.1.5	Elektronenkonfigurationen	315
9.1.6	Wasserstoff-Feinstruktur	315
9.1.7	Komplexe Atome	316
9.2	Anregung und Ionisation	317
9.2.1	Thermodynamisches Gleichgewicht	317
9.2.2	Boltzmannformel	318
9.2.3	Saha-Gleichung	320
9.3	Strahlungstransport	321
9.3.1	Lösungen der Transportgleichung	324
9.4	Absorptionskoeffizienten	327
9.4.1	Kontinuierliche Absorption	327
9.4.2	Streuung	329
9.4.3	Theorie der Absorptionslinien	329
9.5	Linienprofile	331
9.5.1	Dämpfung	331
9.5.2	Dopplerverbreiterung	333
9.5.3	Voigtprofil	334
9.6	Analyse von Sternspektren	335
9.6.1	Wachstumskurven	335
9.6.2	Quantitative Spektralanalyse	337
9.7	Sternatmosphärenmodelle	337
9.7.1	Vergleich: Sonne und Wega	337
9.7.2	Numerische Lösungen	339
9.8	Asteroseismologie	341
9.8.1	Beobachtungen	341
9.8.2	Typen von Wellen	342

9.9	Aufgaben	344
10	Sternaufbau	347
10.1	Physikalische Grundgesetze des Sternaufbaus	347
10.1.1	Hydrostatisches Gleichgewicht	347
10.1.2	Bewegungsgleichung bei sphärischer Symmetrie	350
10.1.3	Hydrostatisches Gleichgewicht nach der Allgemeinen Relativitätstheorie	351
10.1.4	Zustandsgleichung	353
10.1.5	Entartung	354
10.1.6	Zusammenfassung: Zustandsgleichung	356
10.2	Energietransport	356
10.2.1	Konvektion	357
10.2.2	Strahlungstransport	358
10.2.3	Opazität	361
10.3	Energiequellen	363
10.3.1	Energieerzeugung durch Kontraktion	363
10.3.2	Thermonukleare Energieerzeugung	364
10.3.3	Neutrinos	369
10.4	Spezielle Sternmodelle	371
10.4.1	Polytrope Modelle	371
10.4.2	Homologe Gleichungen	374
10.5	Aufgaben	375
11	Sternentwicklung	377
11.1	Sternentstehung und -entwicklung	378
11.1.1	Protosterne	378
11.1.2	Kollaps eines sonnenähnlichen Sterns	380
11.1.3	Das Alter der Sterne	381
11.1.4	Entwicklung eines Sterns mit einer Sonnenmasse	381
11.2	Vergleich der Sternentwicklung	384
11.2.1	Massearme Sterne	384
11.2.2	Massereiche Sterne	385
11.3	Weisse Zwerge	385
11.3.1	Allgemeine Eigenschaften	385
11.3.2	Allgemeine Relativitätstheorie und Weisse Zwerge	387
11.3.3	Magnetfelder	389
11.3.4	Braune Zwerge	389
11.4	Neutronensterne	389
11.4.1	Bildung von Neutronensternen	389
11.4.2	Pulsare	391
11.5	Supernovae	395

11.5.1	Klassifizierung	395
11.5.2	Kernsynthese während einer SN	397
11.5.3	Beobachtete Supernovae	399
11.6	Schwarze Löcher	401
11.6.1	Allgemeines	401
11.6.2	Kandidaten für Schwarze Löcher	403
11.6.3	Quantentheorie Schwarzer Löcher	404
11.6.4	Akkretion	405
11.7	Gamma Ray Bursts	406
11.7.1	Eigenschaften der GRB	406
11.7.2	Erklärung der GRB	407
11.8	Veränderliche Sterne	408
11.8.1	Allgemeines	408
11.8.2	Pulsationsveränderliche	410
11.8.3	Halbregelmäßig Veränderliche	414
11.8.4	Eruptive Veränderliche	415
11.8.5	Pekuliare Sterne	417
11.8.6	Planetarische Nebel	417
11.8.7	Sternaktivität	418
11.9	Masseverlust von Sternen	419
11.9.1	Ableitung nach Parker	419
11.9.2	Antrieb von Sternenwinden	420
11.10	Aufgaben	421
12	Interstellare Materie	423
12.1	Entdeckung, allgemeine Eigenschaften	423
12.2	Interstellarer Staub	424
12.2.1	Extinktion	424
12.2.2	Streuung	426
12.2.3	Polarisation	426
12.3	Interstellares Gas	427
12.3.1	Neutraler Wasserstoff	427
12.4	Emissionsnebel, H-II-Regionen	430
12.4.1	Besondere Emissionsnebel	433
12.4.2	Lichtechos	434
12.5	Kosmische Strahlung	434
12.6	Aufgaben	436
13	Die Galaxis	437
13.1	Entfernungsbestimmungsmethoden	438
13.1.1	Trigonometrische Methoden	438
13.1.2	Photometrische Standardkerzen	440

13.2	Der Aufbau unserer Milchstraße	442
13.2.1	Grober Aufbau	442
13.2.2	Galaktische Koordinaten	443
13.2.3	Verteilung der Sterne	444
13.2.4	Galaxis: Komponenten	446
13.2.5	Lokale Sonnenumgebung, Local Bubble	448
13.2.6	Stellarstatistik	450
13.3	Sternpopulationen und Dichtewellen	450
13.3.1	Sternpopulationen	450
13.3.2	Dichtewellen, Spiralstruktur	451
13.4	Rotation der Galaxis	453
13.4.1	Radial- und Tangentialbewegung	453
13.4.2	Galaktische Rotation, LSR	454
13.4.3	Galaktische Rotationskurve	455
13.5	Dunkle Materie in der Milchstraße	460
13.5.1	Die Natur der Dunklen Materie	460
13.5.2	Galaktisches Microlensing	461
13.6	Galaktisches Zentrum	461
13.6.1	Definition des Zentrums	462
13.6.2	Zentraler Sternhaufen und Schwarzes Loch	464
13.7	Entwicklung der Galaxis	465
13.8	Aufgaben	466
14	Extragalaktische Systeme	467
14.1	Klassifikation	467
14.1.1	Verzeichnisse	467
14.1.2	Hubble-Klassifikation	469
14.1.3	Andere Klassifikationen von Galaxien	471
14.1.4	Elliptische Galaxien, E	471
14.1.5	Spiralgalaxien	473
14.1.6	Irreguläre Galaxien	474
14.1.7	Verteilung auf die Typen	475
14.1.8	Integrale Eigenschaften und Durchmesser	475
14.1.9	Die Magellan'schen Wolken	477
14.1.10	Populationssynthese	478
14.2	Supermassive Schwarze Löcher	479
14.2.1	Detektion von SMBHs	479
14.2.2	SMBHs und Galaxieneigenschaften	480
14.3	Aktive Galaxien	481
14.3.1	Aktive Galaxienkerne	481
14.3.2	Radiogalaxien	483
14.3.3	Quasare	486

14.3.4	Galaxien mit hoher Rotverschiebung	491
14.3.5	Blazare	491
14.4	Galaxienhaufen	492
14.4.1	Superhaufen	494
14.4.2	Besondere Galaxienhaufen	495
14.5	Aufgaben	497
15	Kosmologie	499
15.1	Expansion des Universums	500
15.1.1	Blick in die Vergangenheit	500
15.1.2	Olbers-Paradoxon	501
15.1.3	Zählungen	501
15.1.4	Die Galaxienflucht	502
15.1.5	Homogenität und Isotropie	503
15.1.6	Methoden der Entfernungsbestimmung	503
15.2	Newton'sche Kosmologie	504
15.2.1	Expansion	504
15.2.2	Bewegungsgleichung	505
15.2.3	Energieerhaltung	505
15.3	Relativitätstheorie	506
15.3.1	Spezielle Relativitätstheorie	507
15.3.2	Vierervektoren, Transformationen	509
15.3.3	Allgemeine Relativitätstheorie	511
15.3.4	Materie und Raum-Zeit-Krümmung	512
15.3.5	Metrik des Raumes	514
15.3.6	Friedmann-Lemaître-Gleichungen	516
15.3.7	Gravitationswellen	520
15.4	Dunkle Energie, beschleunigte Expansion	521
15.4.1	Beobachtungen	521
15.4.2	Dunkle Energie	521
15.5	Das frühe Universum	522
15.5.1	Urknall-Beobachtungshinweise	522
15.5.2	Sunyaev-Zel'dovich-Effekt	523
15.5.3	Akustische Oszillationen	527
15.5.4	Bildung der Teilchen	527
15.5.5	Quarks und Quark-Gluonen-Plasma	529
15.5.6	Teilchenerzeugung	530
15.6	Symmetriebrechung im frühen Universum	531
15.6.1	Die vier Naturkräfte	531
15.6.2	Das frühe Universum	533
15.6.3	Inflationäres Universum	533
15.6.4	Stringtheorie	534

15.7	Paralleluniversum	538
15.7.1	Quantenschaum	539
15.7.2	Quantenvakuum	539
15.7.3	Die ersten Sterne	540
15.7.4	Paralleluniversen	541
15.8	Zeitskala	542
15.9	Aufgaben	542
16	Astrobiologie	545
16.1	Habitable Zonen	545
16.1.1	Was ist Leben?	545
16.1.2	Leben auf der Erde	546
16.1.3	Schutzschirme für Leben auf der Erde	547
16.1.4	Leben im Sonnensystem	548
16.2	Entdeckung extrasolarer Planetensysteme	548
16.2.1	Astrometrie	549
16.2.2	Radialgeschwindigkeitsmethode	549
16.2.3	Lichtkurven, Transitbeobachtungen	550
16.2.4	Microlensing	551
16.2.5	Einstein-Beaming	551
16.2.6	Erdgebundene Beobachtungen	552
16.3	Host Stars	552
16.3.1	Hertzsprung-Russell-Diagramm	552
16.3.2	Habitable Zone	554
16.3.3	Beispiele	556
16.4	Aufgaben	557
17	Mathematische Methoden	559
17.1	Statistik	559
17.1.1	Mittelwerte	559
17.1.2	Verteilungsfunktionen	561
17.1.3	Momente	562
17.2	Kurvenfits und Korrelationsrechnung	564
17.2.1	Anpassen von Kurven, Methode kleinsten Quadrat	564
17.2.2	Korrelationen	567
17.3	Differentialgleichungen	568
17.3.1	Lineare Differentialgleichungen erster Ordnung	568
17.3.2	Schwingungsgleichung	570
17.3.3	Partielle Differentialgleichungen	570
17.4	Numerische Mathematik	571
17.4.1	Interpolationspolynome	571
17.4.2	Dividierte Differenzen	572

17.4.3	Newton'sches Interpolationsverfahren	572
17.4.4	Interpolation mit ungleichmäßig verteilten Stützstellen	574
17.4.5	Numerische Differenziation	574
17.4.6	Numerische Integration	576
17.4.7	Differentialgleichungen	577
17.5	Fouriermethoden	580
17.5.1	Autokorrelation	580
17.5.2	Die Fast Fourier Transformation, FFT	581
17.5.3	Digitale Filter	583
17.5.4	Fouriertransformationen in der Optik	584
17.6	Vektorrechnung	585
17.6.1	Allgemeines	585
17.6.2	Gradient, Divergenz, Rotation	587
17.6.3	Anwendungen	589
17.7	Splines	589
17.8	Aufgaben	591
18	Anhang	595
18.1	Testfragen	595
18.2	Tabellen	597
Literatur	. . . . .	601
Allgemein	. . . . .	601
Literatur zu speziellen Themen	. . . . .	601
Zeitschriften	. . . . .	602
Wichtige Internetadressen	. . . . .	603
Software (professionelle)	. . . . .	603
Homepage des Verfassers:	. . . . .	603
Sachverzeichnis	. . . . .	605