

---

# *tabulae summae*

# Auf einen Blick

## Teil I

### Beobachtungsinstrumente und -methoden

- 1 Beobachtungen  
mit bloßem Auge
- 2 Atmosphäre der Erde
- 3 Optische Teleskope
- 4 Astrophotographie
- 5 Photometrie
- 6 Spektroskopie
- 7 Hochauflösende  
Astronomie
- 8 Radioastronomie
- 9 Ultraviolett- und  
Infrarotastronomie
- 10 Röntgen- und Gamma-  
astronomie
- 11 Gravitationswellen-  
astronomie

## Teil II

### Astronomische Grundlagen

- 12 Strahlung und Helligkeit
- 13 Entfernungen im Weltall
- 14 Himmelskoordinaten
- 15 Chronologie
- 16 Teilchenphysik
- 17 Physik des Lichtes
- 18 Magnetismus

## Teil III

### Unser Sonnensystem

- 19 Sonne
- 20 Erdmond
- 21 Planeten und ihre  
Monde
- 22 Zwerg- u. Kleinplaneten
- 23 Kometen
- 24 Meteore und Meteoriten
- 25 Planeten- und Kometen-  
bahnen
- 26 Ephemeridenrechnung  
und Bahnbestimmung
- 27 Entstehung des  
Planetensystems
- 28 Exoplaneten und  
Astrobiologie

---

**Teil IV**  
**Aufbau und Entwicklung**  
**der Sterne**

- 29 Aufbau der Sterne
- 30 Zustandsdiagramme
- 31 Entstehung der Sterne
- 32 Entwicklung der Sterne
- 33 Endstadium der Sterne
- 34 Weiße Zwerge
- 35 Neutronensterne
- 36 Pulsare
- 37 Schwarze Löcher

**Teil V**  
**Unser Milchstraßensystem**

- 38 Milchstraße
- 39 Interstellare Materie
- 40 Galaktische Nebel
- 41 Planetarische Nebel
- 42 Sternhaufen
- 43 Doppelsterne
- 44 Veränderliche Sterne
- 45 Supernovae

**Teil VI**  
**Extragalaktischer Kosmos**

- 46 Galaxien
- 47 Aktive Galaxien
- 48 Gravitationslinsen
- 49 Kosmologie

# Teil I

## Beobachtungsinstrumente

### 1 Beobachtungen mit bloßem Auge 33

Motivation 33  
Hilfsmittel 33  
Sternkarten 34

### 2 Atmosphäre der Erde 43

Aufbau 43  
Atmosphärische Fenster 45  
Warum der Himmel blau ist? 46  
Extinktion 46  
Refraktion 49  
Szintillationsrauschen 50  
Angaben zur Beobachtung 50  
Taupunkt 53  
Solar-terrestrische Beziehungen 54  
Luftleuchten 56  
Polarlichter 57  
Nachtleuchtende Wolken 58  
Haloerscheinungen 60  
Zodiakallicht 63

### 3 Optische Teleskope 65

Fernrohrtypen 66  
Optische Fehler 72  
Objektive 76  
Okulare 84  
Zusatzoptiken 87  
Vergrößerung 90  
Blickfeld 92  
Lichtstärke 92  
Auflösungsvermögen 95  
Luftunruhe (Seeing) 99  
Montierungen 100  
Nachführfehler 103  
Ausrichtung e. parallakt. Montierung 104  
Scheiner-Methode 105  
Lüthen-Kahlhöfer-Methode 107

Stative 109  
Tauschutz 112  
Selbstbau 114  
Zubehör 116  
Kauftipps 118

### 4 Astrophotographie 121

Aufnahmeverfahren 122  
Sternfeldaufnahmen 122  
Fokalaufnahmen 125  
Projektionsaufnahmen 127  
Bildgröße 128  
Belichtungszeit 128  
Filter 132  
Digitaltechnik 134  
Kameraobjektiv 143  
Aufnahmesoftware 145  
Hintergrund des Bildes 149  
Nachbearbeitung am PC 159  
Bildüberlagerung 160  
Ebenen und Glätten 162  
Kontrastverstärkung 166  
Schärfung 168

### 5 Photometrie 173

Zielsetzung 173  
Dynamikbereich 174  
Datenformat und Sättigung 174  
Punktspreizfunktion 177  
Polsequenz 178  
Spektralphotometrie 179  
Messmethoden 180  
Umrechnungsfunktion 185  
Extinktion 189  
Genauigkeit 191  
JPEG und Sättigung 194  
Zeitreferenz 197  
Aufgabenbereiche 198  
Zusammenfassung und Ausblick 200

<b>6</b>	<b>Spektroskopie</b>	<b>201</b>	<b>9</b>	<b>Ultraviolett- und Infrarot- astronomie</b>	<b>291</b>
	Spektrograph	201		UV-Satelliten	291
	Spektroskopie ohne Spalt	208		IR-Forschung	292
	Aufnahmen von Spektren	215		IR-Satelliten und -sonden	293
	Spektrallinien	227		IR-Bänder	293
	Energiesparlampe	230		IR für Amateure	294
	Themengebiete	231		Kühlung	295
	Spektralklassifikation	232			
	Vermessung der Linien	238	<b>10</b>	<b>Röntgen- und Gamma- astronomie</b>	<b>297</b>
	Äquivalentbreite	245		Satelliten	297
	Spektrumsphotometrie	249		Röntgenteleskope	298
	Jugend forscht	254		Wolter-Teleskop	298
<b>7</b>	<b>Hochauflösende Astronomie</b>	<b>255</b>		Gammadetektoren	299
	Großteleskope	255		Tscherenkow-Teleskop	299
	Aktive Optik	256		Fluoreszenz-Teleskop	300
	Adaptive Optik	257		Gammaskpektrometer	300
	Prinzip der Interferometrie	257	<b>11</b>	<b>Gravitationswellen- astronomie</b>	<b>301</b>
	Radiointerferometer	258		Gravitationswellendetektoren	301
	Optisches Interferometer	259		Gravitationswellensender	304
	Speckle-Interferometrie	261			
	Doppler-Tomographie	270			
<b>8</b>	<b>Radioastronomie</b>	<b>271</b>			
	Radioteleskope	271			
	LOFAR	273			
	Square Kilometre Array	274			
	Beobachtungstechniken	277			
	Radioquellen	278			
	Physik der Radiostrahlung	279			
	Beteigeuze ( $\alpha$ Orionis)	280			
	Einfaches Radioteleskop für Amateure	283			
	Amateur-Radioteleskop ›Spider 230‹	286			

## Teil II

# Astronomische Grundlagen

## 12 Strahlung und Helligkeit 313

- Strahlungsintensität 313
- Strahlungsstrom 313
- Photometrische Systeme 314
- Tycho- und Hipparcos-Katalog 318
- Auge 319
- RGB-Systeme 320
- Referenzfeld M 67 324
- Polgequenz 325
- Farbindex 326
- Bolometrische Korrektur 327
- Größenklassen 328
- Helligkeit der Sonne 328
- Weber-Fechner-Gesetz 329
- Entfernungsmodul 329
- Helligkeiten der Planeten 330
- Farbskalen 331

## 13 Entfernungen im Weltall 333

- Einheiten 333
- Methoden 334
- Parallaxe 336
- Leuchtkraftentfernung 340

## 14 Himmelskoordinaten 345

- Horizontalsystem 345
- Äquatorialsystem 346
- Ekliptikalsystem 347
- Galaktisches System 347
- Supergalaktisches System 347
- Umrechnung der Koordinaten 348
- Präzession 350
- Umrechnung des Äquinoktiums 351
- Nutation 352
- Tagbogen 352
- Morgen- und Abendweite 352
- Bestimmung des geographischen Ortes 354

## 15 Chronologie 357

- Zeitmessung 357
- Gregorianischer Kalender 362
- Jahreslängen 364
- Monatslängen 364
- Julianisches Datum 365
- Osterformel 367

## 16 Teilchenphysik 369

- Elementarteilchen 369
- Quarks 371
- Wechselwirkung 372
- Loop-Quantengravitation 375
- Vakuumfluktuation 378

## 17 Physik des Lichtes 379

- Welle-Teilchen-Dualismus 379
- Lichtgeschwindigkeit 381
- Lichtbrechung 382
- Spektrum 386
- Doppler-Effekt 391
- Zeeman-Effekt 392
- Tscherenkow-Strahlung 392
- Poynting-Robertson-Effekt 392
- Jarkowski-Effekt 392
- YORP-Effekt 393

## 18 Magnetismus 395

- Einleitung 395
- Einheiten 396
- Entstehung 397
- Messung 398
- Einzelobjekte 401
- Erdmagnetfeld 402
- Magnetische Stürme 403
- Van-Allen-Gürtel 403



Hauptdienstgebäude der Hamburger Sternwarte von der Rückseite mit Blick auf die historische Bibliothek, die unter anderem die ›Astronomia Instauratae Mechanica‹ von Tycho Brahe aus dem Jahre 1602 und die ›Tabulae Rudolphinae‹ von Johannes Keplers aus dem Jahre 1627 enthält.



Kuppelgebäude des historischen 1-Meter-Spiegels. Es war bei seiner Inbetriebnahme im Jahre 1911 das viertgrößte Teleskop der Welt. Nach seinem Umbau besitzt es eine Brennweite von 15 m. Seit 2011 befindet sich das Besucherzentrum der Sternwarte und das sehr elegante Café ›Raum und Zeit‹ in dem Gebäude.

# Teil III

## Unser Sonnensystem

### 19 Sonne 407

Überblick 407  
Innerer Aufbau 408  
Rotation und Magnetfeld 410  
Oberfläche 411  
Atmosphäre 413  
Beobachtung der Sonne 414  
Photographie 425  
Sonnenfinsternisse 426

### 20 Erdmond 429

Überblick 429  
Formationen 430  
Libration 430  
Sternbedeckung 431  
Durchmesser eines Kraters 433  
Zeichnen von Mondkratern 434  
Höhe eines Mondberges 438  
Mondfinsternisse 441  
Lunar Transient Phenomena 444

### 21 Planeten und ihre Monde 445

Definition eines Planeten 445  
Übersicht 446  
Albedo 449  
Temperatur 449  
Definition der Oberfläche bei Gasplaneten 450  
Innerer Aufbau 450  
Planetographische Koordinaten 450  
Beobachtung 454  
Merkur 455  
Venus 457  
Erde 464  
Mars 465  
Jupiter 470  
Saturn 479  
Uranus 487  
Neptun 490

### 22 Zwerg- und Kleinplaneten 493

Entdeckung 493  
Entstehung 494  
Übersicht 494  
Ceres 494  
Vesta 495  
Kommensurabilitäten 496  
Erdnahe Objekte 497  
Chiron 498  
Sylvia 499  
Kuiper-Gürtel 499  
Haumea 499  
Quaoar 500  
Sedna 500  
Eris 500  
Pluto 500  
Kandidaten für Zwergplaneten 502  
Beobachtung 503

### 23 Kometen 507

Aufbau 508  
Kern und Staubbkoma 508  
Koma 509  
Schweif 510  
Chemische Zusammensetzung 510  
Bahnen 511  
Namensgebung 512  
Einzelobjekte 513  
Beobachtung 520

### 24 Meteore und Meteorite 529

Begriffe 529  
Übersicht 530  
Meteorströme 530  
Historische Einschläge 532  
Beobachtung 535



## 25 Planeten- und Kometenbahnen 537

- Kepler-Problem 537
- Kepler'sche Gesetze 541
- Librationspunkte 542
- Hill-Sphäre 542
- Bahnelemente und Koordinatensysteme 543
- Bahnelemente der Planeten 546

## 26 Ephemeridenrechnung und Bahnbestimmung 547

- Wahre Anomalie 547
- Ephemeridenrechnung 551
- Bahnbestimmung 556

## 27 Entstehung des Planetensystems 567

- Historische Weltbilder 567
- Entstehung der Planeten 568
- Einzelphänomene 573

## 28 Exoplaneten und Astrobiologie 577

- Braune Zwerge 577
- Exoplaneten 578
- Astrobiologie 589



Kuppelgebäude des Großen Refraktors mit 60 cm Öffnung und 15 m Brennweite. Der Kuppelraum besitzt eine Hebebühne zum bequemen visuellen Beobachten.

## Teil IV

# Aufbau und Entwicklung der Sterne

## 29 Aufbau der Sterne

Relationen 595  
Masse 597  
Radius 601  
Dichte 604  
Temperatur 604  
Konvektionszone 608  
Populationen 611  
Energieprozesse 612  
Sternaufbaurechnungen 618

## 30 Zustandsdiagramme

Hertzprung-Russell-Diagramm 631  
Hayashi-Linie 633  
Farben-Helligkeits-Diagramm 634  
Zwei-Farben-Diagramm 638

## 31 Entstehung der Sterne

Kritische Masse 641  
Gasfinger 645  
Mikroturbulenz 645  
Magnetfelder 645  
Bildung von Sternhaufen 645  
Sternentstehungseffizienz 646  
Molekülwolken 646  
Drehimpulsproblem 647  
Entstehung eines Sterns mit einer  
  Sonnenmasse 648  
Lada-Klassen 649  
IRDC 650  
MN Lupi 651  
Rho Ophiuchi 651  
Epsilon Aurigae 653

## 32 Entwicklung der Sterne

Hydrostatische Zeitskala 655  
Kelvin-Helmholtz-Zeitskala 655  
Nukleare Zeitskala 656  
Schönberg-Chandrasekhar-Grenze 658  
Kritische Masse 659  
Brenndauer bei massereichen Sternen 659  
Abzweigen von der Hauptreihe 660  
Thermische Stabilität 661  
Übergang zum Heliumbrennen 662  
Schalenbrennen um einen entarteten  
  Kern 663  
Zweischalenbrennen 664  
Wiederbelebung Weißer Zwerge 665  
Pulsation der Sterne 665  
Einzelobjekte 668

## 33 Endstadium der Sterne

Abhängigkeit von der Urmasse 671  
Massenverlust 673  
Akkretionsscheibe 674

## 34 Weiße Zwerge

Zustandsgrößen 675  
Stabilität 678  
Heliumblitz der zweiten Generation 680  
Spektralklassifikation 681  
Planetarischer Nebel 682  
ZZ-Ceti-Sterne 682

## 35 Neutronensterne 685

- Entstehung 685
- Abschätzung des Magnetfeldes 686
- Abschätzung der Dichte 687
- Magnetare 688
- Thermische Röntgen-Neutronensterne 689
- Quasiperiodische Oszillatoren 690
- Quarksterne 692
- RRATs 692
- Einzelobjekte 693

## 36 Pulsare 697

- Physik der Pulsare 697
- Einzelobjekte 702
- Entfernungsbestimmung 707
- Synchrotronstrahlung 707

## 37 Schwarze Löcher 709

- Schwarzschild-Radius 709
- Hawking-Strahlung 710
- Modelle 712
- Kerr'sche Löcher 713
- Verschmelzung von Neutronensternen 714
- Mikroquasar 714
- Holosterne und Gravasterne 715
- Einzelobjekte 716



Kuppelgebäude des ehemaligen Lippert-Astrographen, das heute ein Spiegelteleskop nach Cassegrain mit 60 cm Öffnung und 9 m Brennweite beheimatet.

# Teil V

## Unser Milchstraßensystem

### 38 Milchstraße 721

- Aufbau 721
- Struktur 722
- Gaia 724
- Sternströme und Hyperschnellläufer 725
- Ausstoß von Wasserstoffwolken 725
- Gasblasen 725
- Galaktischer Kern 726
- Begleiter 727
- Kollisionskurs 727

### 39 Interstellare Materie 729

- Allgemeines 729
- Lokale Blase 730
- Wasserstoffmoleküle  $H_2$  730
- Organische Moleküle 731
- Interstellare Extinktion 732
- Farbexzess 732
- Q-Methode 733
- Balmer-Dekrement 734

### 40 Galaktische Nebel 737

- Allgemeines 737
- Radius von HII-Regionen 738
- Übersicht 740
- Beobachtung 740
- Einzelobjekte 741
- Objekte für Teleobjektive 757
- Herbig-Haro-Objekte 760

### 41 Planetarische Nebel 761

- Allgemeines 761
- Übersicht 764
- Einzelobjekte 764

### 42 Sternhaufen 775

- Offene Sternhaufen 775
- Kugelsternhaufen 781
- Entwicklung eines Sternhaufens 786
- Altersbestimmung 787

### 43 Doppelsterne 795

- Visuelle Doppelsterne 795
- Astrometrische Doppelsterne 795
- Spektroskopische Doppelsterne 796
- Photometrische Doppelsterne 796
- Kataklysmische Systeme 798
- Statistik 799
- Systemparameter 800
- Radiusbestimmung 800
- Massenbestimmung 801
- Massenaustausch bei Doppelsternen 802
- Beobachtungsobjekte 806
- Einzelobjekte 809
- Bestimmung von Abstand und Positionswinkel 820
- Ephemeridenrechnung 831



Kuppelgebäude des Äquatorials, einem Refraktor mit 26 cm Öffnung und 3 m Brennweite.

## 44 Veränderliche Sterne

835

- Klassifikation 835
- Pulsationsveränderliche 837
- Eruptionsveränderliche 845
- Rotationsveränderliche 846
- Röntgenveränderliche 847
- Kataklysmische Veränderliche 847
- Novae 851
- Einzelobjekte 861
- Methoden der Photometrie 862
- Lichtelektrische Photometrie 862
- Photographische Photometrie 863
- Visuelle Schätzung 864
- Helligkeitsschätzung mit einer künstlichen Vergleichsquelle 866
- Interpolationsmethode nach Pickering 868
- Stufenschätzmethode nach Argelander 869
- Heliozentrische Zeit 876
- Auswahl der Vergleichssterne 877

- Lichtkurve 879
- Bestimmung von Minimums- und Maximumszeitpunkten 885
- Fehler bei der Minimums- und Maximumsbestimmung 891
- Systemparameter 892
- (B–R)-Diagramm 893
- Spezielle Objekte 900
- Gemeinschaftslichtkurve 902

## 45 Supernovae

911

- Überblick 911
- Ursache 912
- Supernova Typ Ia 913
- Supernova Typ II 914
- Lichtkurven 915
- Lichtecho 917
- Einzelobjekte 918
- Supernovaüberreste 926



Schutzbau des historischen Repsold-Meridiankreises, der sich zurzeit im Depot des Deutschen Museums in München befindet.

## Teil VI

# Extragalaktischer Kosmos

## 46 Galaxien

- Klassifikation 936
- Bildung der Galaxien 942
- Entstehung der Spiralarme 944
- Rotation 945
- Dunkle Materie 948
- Wechselwirkende Galaxien 950
- Starburstgalaxien 954
- Galaxienhaufen 956
- Superhaufen 957
- Massen 958
- Walls und Voids 959
- Einstein-Straus-Vakuolen 959
- Statistik 960
- Projekt ›Galaxy Zoo‹ 960
- Beobachtungsobjekte 961
- Objekte für Teleobjektive 970

## 47 Aktive Galaxien

- Aktive Galaktische Kerne 975
- Leuchtkraft 976
- Eddington-Grenze 977
- Entwicklung von Quasaren und AGN 978
- Binäre Schwarze Löcher 979
- Quasare 980
- Radiogalaxien 981
- BL-Lacertae-Objekte 981
- Blasare 982
- Seyfert-Galaxien 983
- N-Galaxien 983
- M87 – Zentralgalaxie des Virgoaufens 984

935

## 48 Gravitationslinsen

- Physik der Linsen 987
- Lichtzeitdifferenzen 990
- Kosmische Fäden 990
- Abell 1835 IR 1916 991
- Mikrolinseneffekt 992

987

## 49 Kosmologie

- Hubble-Gesetz 993
- Expansion 996
- Raumkrümmung 996
- Alter der Welt 998
- Zeitlicher Verlauf der Expansion 999
- Entfernungsmaß 1001
- Evolution des Universums 1005
- Temperatur 1006
- Planck-Blase 1007
- Planck-Ära (Urschaum) 1008
- Symmetriebrechung 1.Art (X-Ära, GUT-Ära) 1009
- Kosmische Fäden 1009
- Inflation 1011
- Symmetriebrechung 2.Art (Quark-Ära, Gluonen-Ära) 1013
- Symmetriebrechung 3.Art 1013
- Hadronen-Ära 1014
- Leptonen-Ära 1015
- Photonen-Ära 1016
- Materie-Ära 1016
- Quasare 1016
- Kosmologische Modelle 1017
- Hierarchie im Weltraum 1025

993



Kuppelgebäude des Oskar-Lühning-Teleskops in Ritchey-Chrétien-Bauweise mit 1.2 m Öffnung und 15.6 m Brennweite.

## Teil VII Anhang

<b>A</b>	Zeittafeln	1029	<b>K</b>	Lösungen der Aufgaben	1067
<b>B</b>	Raumsonden	1035	<b>L</b>	Literatur und Quellen- nachweis	1079
<b>C</b>	Energieressourcen der Erde	1041		Bildernachweis	1079
	Energieprozesse	1041		Quellennachweis	1085
	Reichweite der Vorkommen	1042		Literatur	1092
<b>D</b>	Ausgleichsrechnung	1045		Jahrbücher	1094
	Mittelwert	1045		Fachzeitschriften	1095
	Lineare Regression	1047		Sternkataloge	1095
	Quadratische Regression	1049		PC-Software	1095
	Gauß-Fit	1050	<b>M</b>	Kontaktadressen	1099
<b>E</b>	Kataloge	1053		Astronomische Vereinigungen	1099
<b>F</b>	Glossar	1055		Spezielle Kontakte für Beobachter	1101
<b>G</b>	Parameter für DCRAW	1059		Spezielle Bezugsquellen für den Selbstbau	1102
<b>H</b>	Symbole	1061		Internet	1103
<b>I</b>	Konstanten	1063	<b>N</b>	Personenregister	1107
<b>J</b>	Kreuzworträtsel	1065	<b>O</b>	Sachregister	1117
			<b>P</b>	Corrigenda	1151





Das große Beamten-Wohnhaus liegt inmitten des idyllischen Teleskoparks.



Links der Schutzbau des Salvadorspiegels, bei dem es sich um ein Schmidt-Cassegrain-System mit 40 cm Öffnung und 8 m Brennweite handelt. Rechts der Schutzbau des ehemaligen Hamburger Robotischen Teleskops, das jetzt in Mexiko unter dem Namen TIGRE betrieben wird. Es besitzt eine Öffnung von 1.2 m bei 9.6 m Brennweite.