

---

---

# *tabulae summae*

# Teil I

## Beobachtungsinstrumente

<b>1</b>	<b>Beobachtungen mit bloßem Auge</b>	<b>35</b>		
	Motivation	35		
	Hilfsmittel	36		
	Smartphone	38		
	Sternkarten	41		
	Scheiner-Methode	130		
	Lüthen-Kahlhöfer-Methode	132		
	Stative	135		
	Tauschutz	137		
	Selbstbau	139		
	Zubehör	144		
	Kauf Tipps	145		
<b>2</b>	<b>Atmosphäre der Erde</b>	<b>51</b>	<b>4</b>	<b>Astrofotographie</b> <b>149</b>
	Aufbau	51		Einleitung 149
	Atmosphärische Fenster	53		Aufnahmeverfahren 150
	Warum der Himmel blau ist?	54		Sternfeldaufnahmen 150
	Extinktion	55		Fokalaufnahmen 153
	Refraktion	58		Projektionsaufnahmen 156
	Scintillationsrauschen	59		Bildgröße 157
	Angaben zur Beobachtung	60		Belichtungszeit 158
	Wetter	63		Filter 162
	Solar-terrestrische Beziehungen	69		Digitaltechnik 164
	Luftleuchten	70		Kameraobjektiv 178
	Polarlichter	71		Aufnahmesoftware 180
	Nachtleuchtende Wolken	73		Fokussierung 185
	Haloerscheinungen	75		Hintergrund des Bildes 188
	Grüner Strahl	79		Nachbearbeitung am PC 202
	Zodiakallicht	80		Bildüberlagerung 202
	Dämmerung	82		Ebenen und Glätten 205
				Kontrastverstärkung 210
				Schärfung 212
				Astrofotographie mit Smartphone 216
				Lösungen für Probleme 228
<b>3</b>	<b>Optische Teleskope</b>	<b>85</b>		
	Fernrohrtypen	86		
	Optische Abbildungsfehler	93		
	Objektive	97		
	Okulare	109		
	Zusatzoptiken	112		
	Vergrößerung	114		
	Blickfeld	117		
	Lichtstärke	117		
	Auflösungsvermögen	120		
	Luftunruhe (Seeing)	124		
	Montierungen	125		
	Nachführfehler	128		
	Ausrichtung einer parallaktischen Montierung	129		

## 5 Photometrie 229

- Lichtelektrische Photometrie 230
- Photographische Photometrie 230
- Visuelle Schätzung 232
- Schätzung mit künstl. Vergleichsquelle 234
- Interpolationsmethode nach Pickering 235
- Stufenschätzmethode nach Argelander 236
- Digitalphotometrie 241
- Datenformat und Sättigung 242
- Punktspreizfunktion (PSF) 245
- Polsequenz 246
- Spektralphotometrie 246
- Messmethoden 247
- Umrechnungsfunktion 252
- Extinktion 256
- Genauigkeit 258
- JPEG und Sättigung 262
- Photometriesoftware 268
- Aufgabenbereiche 278
- Zusammenfassung und Ausblick 280

## 6 Spektroskopie 281

- Spektrograph 281
- Spaltlose Spektroskopie 289
- Objektivgitter 297
- Aufnahmen von Spektren 306
- Kalibrierung 312
- Spektrallinien 320
- Energiesparlampe 323
- Themengebiete 325
- Spektralklassifikation 327
- Vermessung der Linien 333
- Äquivalentbreite 342
- Spektrumsphotometrie 349
- Jugend forscht 354



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.

# Teil I

## Beobachtungsinstrumente (Fortsetzung)

### 7 Polarimetrie 357

- Theorie der Polarisation 357
- Beobachtung 363
- Messverfahren 367
- Kometen 372
- Be-Sterne 373
- Wolf-Rayet-Sterne 376
- Sternhaufen 380
- Galaxien 384
- Polarisation und Farben der Mineralien beim Mond 386
- Software 392

### 8 Hochauflösende Astronomie 393

- Großteleskope 393
- Aktive Optik 395
- Adaptive Optik 396
- Prinzip der Interferometrie 396
- Radiointerferometer 398
- Optisches Interferometer 399
- Speckle-Interferometrie 400
- Doppler-Tomographie 410

### 9 Radioastronomie 411

- Radioteleskope 411
- Very Long Base Interferometer 413
- LOFAR 415
- MeerKAT 417
- Square Kilometre Array 417
- Beobachtungstechniken 420
- Radioquellen 421
- Physik der Radiostrahlung 422
- Beteigeuze ( $\alpha$  Orionis) 425
- Radioastronomie für Amateure 428
- Astroteiler Stockert 439
- Sat-TV-Radioteleskop 439
- Amateur-Radioteleskop ›Spider 230‹ 445

### 10 Ultraviolett- und Infrarot-astronomie 451

- UV-Satelliten 451
- IR-Forschung 452
- IR-Satelliten und -sonden 453
- IR-Bänder 453
- IR für Amateure 453
- Kühlung 455

### 11 Röntgen- und Gamma-astronomie 457

- Satelliten 457
- Röntgenteleskope 458
- Wolter-Teleskop 458
- Gammadetektoren 459
- Tscherenkow-Teleskop 459
- Fluoreszenz-Teleskop 460

### 12 Gravitationswellen-astronomie 463

- Gravitationswellen 463
- Detektoren für Gravitationswellen 464
- Parameter eines Binärsystems 471
- Gravitationswellenobjekte 475

## 13 Virtuelles Observatorium 485

- Einleitung 485
- Data-Mining 486
- Kataloge 487
- Bedienung 496
- Werkzeuge 525
- Citizen-Science (Bürgerwissenschaft) 533
- Zooniverse 534

## 14 Interdisziplinäre Zusammenarbeit 537

- Überblick 537
- ProAm-Kampagnen 539
- Amateure unter sich 540
- Einzelobjekte 542
- Beifang in Deep-Sky-Bildern 548
- Veränderliche in der Nähe bekannter  
Deep-Sky-Objekte 551
- Delta-Scuti-Stern bei M 27 563
- Veränderliche bei M 33 569
- Bedeckungsveränderlicher bei  
NGC 4490 584
- W-Ursae-Majoris-Stern bei  
NGC 4565 591



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 II

# Astronomische Grundlagen

## 15 Strahlung und Helligkeit 603

Strahlungsintensität 603  
Strahlungsstrom 603  
Photometrische Systeme 604  
Auge 609  
RGB-Systeme 611  
Referenzfeld M 67 615  
Polsequenz 616  
Farbindex 617  
Bolometrische Korrektur 618  
Größenklassen 619  
Helligkeit der Sonne 619  
Weber-Fechner-Gesetz 620  
Entfernungsmodul 621  
Helligkeiten der Planeten 621  
Farbskalen 624

## 16 Entfernungen im Weltall 627

Einheiten 627  
Methoden 628  
Parallaxe 630  
Leuchtkraftentfernung 634

## 17 Koordinatensysteme 639

Himmelskoordinaten 639  
Umrechnung der Koordinaten 642  
Präzession 644  
Umrechnung des Äquinoktiums 645  
Referenzsystem 647  
Sichtbarkeit eines Gestirns 648  
Bestimmung des geographischen Ortes 648  
Koordinatennetze der Himmelskörper 651

## 18 Chronologie 657

Zeitmessung 657  
Gregorianischer Kalender 664  
Jahreslängen 665  
Monatslängen 665  
Julianisches Datum 666  
Osterformel 669

## 19 Teilchenphysik 671

Elementarteilchen 671  
Wechselwirkung 674  
Loop-Quantengravitation 678  
Vakuumfluktuation 680

## 20 Physik des Lichtes 683

Strahlungsgesetze 683  
Welle-Teilchen-Dualismus 685  
Lichtgeschwindigkeit 687  
Lichtablenkung 688  
Lichtbrechung 689  
Reflexion und Vergütung 693  
Spektrum 694  
Doppler-Effekt 701  
Zeeman-Effekt 703  
Tscherenkow-Strahlung 703  
Poynting-Robertson-Effekt 703  
Jarkowski-Effekt 704  
YORP-Effekt 704

## 21 Magnetismus

707

Einleitung 707  
Einheiten 708  
Entstehung 709  
Synchrotronstrahlung 710  
Messung 712  
Erdmagnetfeld 712  
Van-Allen-Gürtel 714  
Magnetische Stürme 715  
Sonne 716

## 22 Akkretion

721

Einleitung 721  
Protostern 722  
Supernova 722  
Mikroquasar 723  
Quasar 723  
Akkretionsscheibe 724  
Gammaburster 729



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

# Teil III

## Unser Sonnensystem

### 23 Sonne 733

Überblick 733  
Innerer Aufbau 734  
Rotation und Magnetfeld 737  
Oberfläche 738  
Wilson-Effekt 742  
Anwendungsbeispiel 747  
Atmosphäre 761  
Beobachtung 762  
Photographie 765  
Sonnenflecken 768  
Schwankungen der Sonnenfleckenaktivität 771  
Klassifizierung 774  
Auswertemethoden 776  
Software *SUNMAP* 782  
Sonnenfinsternisse 791

### 24 Erdmond 795

Überblick 795  
Formationen 796  
Libration 797  
Sternbedeckung 797  
Durchmesser eines Kraters 800  
Zeichnen von Mondkratern 801  
Höhe eines Mondberges 806  
Mondfinsternisse 809  
Lunar Transient Phenomena 813  
Ebbe und Flut 814

### 25 Planeten und ihre Monde 817

Einleitung 817  
Definition eines Planeten 818  
Übersicht 819  
Temperatur 821  
Definition der Oberfläche bei Gasplaneten 822  
Innerer Aufbau 823  
Beobachtung 823  
Merkur 824

Venus 827  
Erde 833  
Mars 834  
Jupiter 839  
Saturn 848  
Uranus 857  
Neptun 860

### 26 Zwerg- und Kleinplaneten 863

Übersicht 863  
Kommensurabilitäten 866  
Erdnahe Objekte 867  
Zwergplaneten 868  
Einzelobjekte 869  
Interstellare Objekte 878  
Beobachtung 880

### 27 Kometen 885

Einleitung 885  
Kern und Staubkoma 885  
Koma 887  
Schweif 887  
Chemische Zusammensetzung 889  
Bahnen 889  
Namensgebung 891  
Einzelobjekte 891  
Beobachtung 900

### 28 Meteore und Meteorite 909

Begriffe 909  
Übersicht 910  
Meteorströme 911  
Historische Einschläge 912  
Beobachtung 915



## 29 Planeten- und Kometenbahnen 919

- Kepler-Problem 919
- Kepler'sche Gesetze 923
- Librationspunkte 924
- Hill-Sphäre 925
- Bahnelemente und Koordinatensysteme 926
- Bahnelemente der Planeten 928

## 30 Ephemeridenrechnung und Bahnbestimmung 929

- Wahre Anomalie 929
- Ephemeridenrechnung 933
- Bahnbestimmung 938

## 31 Entstehung des Planetensystems 951

- Historische Weltbilder 951
- Entstehung der Planeten 952
- Einzelphänomene 957

## 32 Exoplaneten und Astrobiologie 963

- Braune Zwerge 963
- Exoplaneten 965
- Astrobiologie 980



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

## Teil IV

# Aufbau und Entwicklung der Sterne

### 33 Aufbau der Sterne

993

Einleitung 993  
Populationen 994  
Masse 995  
Radius 999  
Dichte 1003  
Temperatur 1003  
Relationen 1007  
Rotation 1009  
Energieprozesse 1010  
Konvektionszone 1016  
Sternaufbaurechnungen 1018

### 34 Zustandsdiagramme

1033

Hertzprung-Russell-Diagramm 1033  
Farben-Helligkeits-Diagramm 1037  
Zwei-Farben-Diagramm 1041

### 35 Entstehung der Sterne

1045

Einleitung 1045  
Kritische Masse 1045  
Gasfinger 1049  
Mikroturbulenz 1049  
Magnetfelder 1049  
Molekülwolken 1049  
Bildung von Sternhaufen 1050  
Drehimpulsproblem 1051  
Entstehung eines Sterns mit einer Sonnen-  
masse 1053  
Sternentstehungseffizienz 1054  
Lada-Klassen 1054  
IRDC 1055  
TW Hydrae 1056  
MN Lupi 1056  
Rho Ophiuchi 1056  
Epsilon Aurigae 1056

### 36 Entwicklung der Sterne

1061

Einleitung 1061  
Hydrostatische Zeitskala 1062  
Kelvin-Helmholtz-Zeitskala 1062  
Nukleare Zeitskala 1062  
Entartung 1063  
Schönberg-Chandrasekhar-Grenze 1064  
Kritische Masse 1065  
Brenndauer bei massereichen Sternen 1066  
Abzweigen von der Hauptreihe 1067  
Thermische Stabilität 1067  
Übergang zum Heliumbrennen 1068  
Schalenbrennen um einen entarteten  
Kern 1069  
Zweischalenbrennen 1071  
Wiederbelebung Weißer Zwerge 1071  
Pulsation der Sterne 1071  
Einzelobjekte 1075  
Entwicklung eines Binärsystems 1076  
Endstadium 1078  
Massenverlust 1081

### 37 Weiße Zwerge

1083

Einleitung 1083  
Zustandsgrößen 1083  
Stabilität 1088  
Heliumblitz der zweiten Generation 1090  
Spektralklassifikation 1091  
Verschmelzung von zwei Weißen  
Zwergen 1092  
Planetarischer Nebel 1093  
ZZ-Ceti-Sterne 1093

## 38 Neutronensterne 1097

Entstehung 1097  
Abschätzung des Magnetfeldes 1099  
Abschätzung der Dichte 1099  
Magnetare 1100  
Thermische Röntgen-Neutronensterne 1101  
Quasiperiodische Oszillatoren (QPO) 1102  
Quarksterne 1104  
RRATs 1105  
Einzelobjekte 1105

## 39 Pulsare 1109

Physik der Pulsare 1109  
Einzelobjekte 1114  
Entfernungsbestimmung 1120

## 40 Schwarze Löcher 1121

Einleitung 1121  
Modelle 1122  
Schwarzschild-Radius 1122  
Gravitationsradius 1123  
Kerr-Loch 1124  
Verschmelzung von Neutronensternen 1124  
Exotische Alternativen 1125  
Beobachtung 1126  
Einzelobjekte 1126  
Globale Betrachtung 1130  
Hawking-Strahlung 1131  
Primordiale Schwarze Löcher 1134  
Intermediäre Schwarze Löcher 1135  
Supermassereiche Schwarze Löcher 1135



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

# Teil V

## Unser Milchstraßensystem

### 41 Milchstraße 1143

Aufbau 1143  
Struktur 1144  
Gaia 1146  
Sternströme und Hyperschnellläufer 1148  
Ausstoß von Wasserstoffwolken 1148  
Gasblasen 1149  
Galaktischer Kern 1149  
Begleiter 1150  
Kollisionen 1151

### 42 Interstellare Materie 1153

Allgemeines 1153  
Lokale Blase 1154  
Wasserstoffmoleküle  $H_2$  1155  
Organische Moleküle 1156  
Interstellare Extinktion 1156  
Farbexzess 1157  
Q-Methode 1158  
Balmer-Dekrement 1159

### 43 Galaktische Nebel 1163

Allgemeines 1163  
Radius von HII-Regionen 1164  
Übersicht 1166  
Beobachtung 1166  
Einzelobjekte 1167  
Objekte für Teleobjektive 1186  
Herbig-Haro-Objekte 1192

### 44 Planetarische Nebel 1193

Allgemeines 1193  
Übersicht 1197  
Einzelobjekte 1197

### 45 Sternhaufen 1209

Offene Sternhaufen 1209  
Kugelsternhaufen 1218  
Entwicklung eines Sternhaufens 1223  
Altersbestimmung 1224

### 46 Doppelsterne 1233

Einleitung 1233  
Visuelle Doppelsterne 1234  
Astrometrische Doppelsterne 1234  
Spektroskopische Doppelsterne 1234  
Photometrische Doppelsterne 1234  
Kataklysmische Systeme 1236  
Statistik 1237  
Systemparameter 1238  
Radiusbestimmung 1239  
Massenbestimmung 1240  
Massenaustausch bei Doppelsternen 1241  
Beobachtungsobjekte 1244  
Einzelobjekte 1251  
Bestimmung von Abstand und Positionswinkel 1263  
Anwendungsbeispiele 1276  
Ephemeridenrechnung 1286

## 47 Veränderliche Sterne 1289

- Klassifikation 1289
- Pulsationsveränderliche 1291
- Eruptionsveränderliche 1302
- Rotationsveränderliche 1304
- Röntgenveränderliche 1304
- Kataklysmische Veränderliche 1304
- Novae 1314
- Beobachtungsobjekte 1325
- Auswahl der Vergleichssterne 1326
- Lichtkurve 1332
- Bestimmung von Minimums- und Maximumszeitpunkten 1344
- Bestimmung von Minimum und Maximum 1349
- Fehler bei der Minimums- und Maximumsbestimmung 1357

- Systemparameter 1358
- (B–R)-Diagramm 1358
- Spezielle Objekte 1367
- Gemeinschaftslichtkurve 1368
- Veröffentlichung der Ergebnisse 1373

## 48 Super- und Hypernovae 1379

- Überblick 1379
- Ursache 1380
- Supernova Typ Ia 1382
- Supernova Typ II 1383
- Lichtkurven 1384
- Lichtecho 1386
- Hypernova 1387
- Einzelobjekte 1390
- Supernovaüberreste 1400



Werkstatt der Hamburger Sternwarte, in der Bernhard Schmidt in den 1930er-Jahren die nach ihm benannte lichtstarke komafreie Spiegelsystem erfunden hat (MiHam 7, 1938).

## Teil VI

# Extragalaktischer Kosmos

## 49 Galaxien

1409

Einleitung 1409  
Klassifikation 1410  
Bildung der Galaxien 1417  
Entstehung der Spiralarme 1418  
Rotation 1420  
Dunkle Materie 1422  
Zwerggalaxien 1425  
Wechselwirkende Galaxien 1427  
Starburstgalaxien 1431  
Galaxienhaufen 1433  
Super(galaxien)haufen 1434  
Massen 1436  
Walls und Voids 1436  
Einstein-Straus-Vakuolen 1436  
Beobachtungsobjekte 1437  
Objekte für Teleobjektive 1447  
Flächenhelligkeit 1450

## 50 Aktive Galaxien

1459

Einleitung 1459  
Aktive Galaktische Kerne 1460  
Leuchtkraft 1462  
Eddington-Grenze 1463  
Maximalmasse 1464  
Entwicklung von Quasaren und AGN 1464  
Binäre Schwarze Löcher 1465  
Quasare 1466  
Radiogalaxien 1468  
BL-Lacertae-Objekte 1468  
Blasare 1469  
Seyfert-Galaxien 1470  
N-Galaxien 1471  
M87 – Zentralgalaxie des Virgoaufens 1471

## 51 Gravitationslinsen

1475

Einleitung 1475  
Physik der Linsen 1475  
Lichtzeitdifferenzen 1478  
Kosmische Fäden 1480  
Abell 1835 IR 1916 1480  
Mikrolinseneffekt 1481

## 52 Kosmologie

1483

Einleitung 1483  
Hubble-Gesetz 1484  
Expansion 1486  
Raumkrümmung 1487  
Alter der Welt 1488  
Zeitlicher Verlauf der Expansion 1490  
Entfernungsmaß 1491  
Berechnung d. Entfernung 1496  
Evolution des Universums 1502  
Temperatur 1503  
Planck-Blase 1504  
Planck-Ära (Urschaum) 1505  
Symmetriebrechung 1.Art  
(X-Ära, GUT-Ära) 1506  
Kosmische Fäden 1506  
Inflation 1508  
Symmetriebrechung 2.Art  
(Quark-Ära, Gluonen-Ära) 1510  
Symmetriebrechung 3.Art 1510  
Hadronen-Ära 1511  
Leptonen-Ära 1512  
Photonen-Ära 1513  
Materie-Ära 1513  
Quasare 1517  
Kosmische Hintergrundstrahlung 1517  
Kosmologische Modelle 1519  
Hierarchie im Weltraum 1530



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	1533	<b>I</b>	Glossar	1587
<b>B</b>	Raumsonden	1541	<b>J</b>	Parameter für DCRAW	1591
<b>C</b>	Energieressourcen der Erde	1547	<b>K</b>	Unterhaltsame Astronomie	1593
	Energieprozesse	1547		Silbenrätsel, um die Ecke gedacht	1593
	Reichweite der Vorkommen	1548		Kreuzworträtsel mit Bildern	1594
<b>D</b>	Polarimeter mit Wollaston-Prisma	1551		Gitterrätsel ›Jupiters Monde‹	1596
	Einleitung	1551	<b>L</b>	Lösungen der Aufgaben	1597
	Konstruktion	1551	<b>M</b>	Literatur und Quellen- nachweis	1613
	Dimensionierung der Optik	1552		Bildernachweis	1613
	Optomechanik	1553		Quellennachweis	1617
	Justierung	1553		Literatur	1630
	Beschaffung	1553		Jahrbücher	1632
	Test	1554		Fachzeitschriften	1633
<b>E</b>	Analoge Photographie	1559		Sternkataloge	1633
	Einleitung	1559		PC-Software	1634
	Photometrie	1560	<b>N</b>	Kontaktadressen	1643
<b>F</b>	Ausgleichsrechnung	1569		Astronomische Vereinigungen	1643
	Mittelwert	1569		Spezielle Kontakte für Beobachter	1645
	Lineare Regression	1570		Spezielle Bezugsquellen für den Selbstbau	1646
	Quadratische Regression	1572		Internet	1647
	Gauß-Fit	1573	<b>O</b>	Personenregister	1651
<b>G</b>	Kataloge	1575	<b>P</b>	Sachregister	1663
<b>H</b>	Periodika	1579			





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.