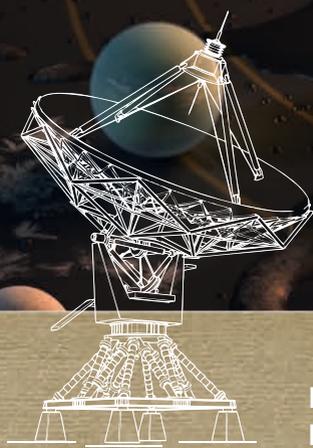


HANS-ULRICH KELLER

— Kompendium der Astronomie

EINFÜHRUNG
IN DIE WISSENSCHAFT
VOM UNIVERSUM

KOSMOS

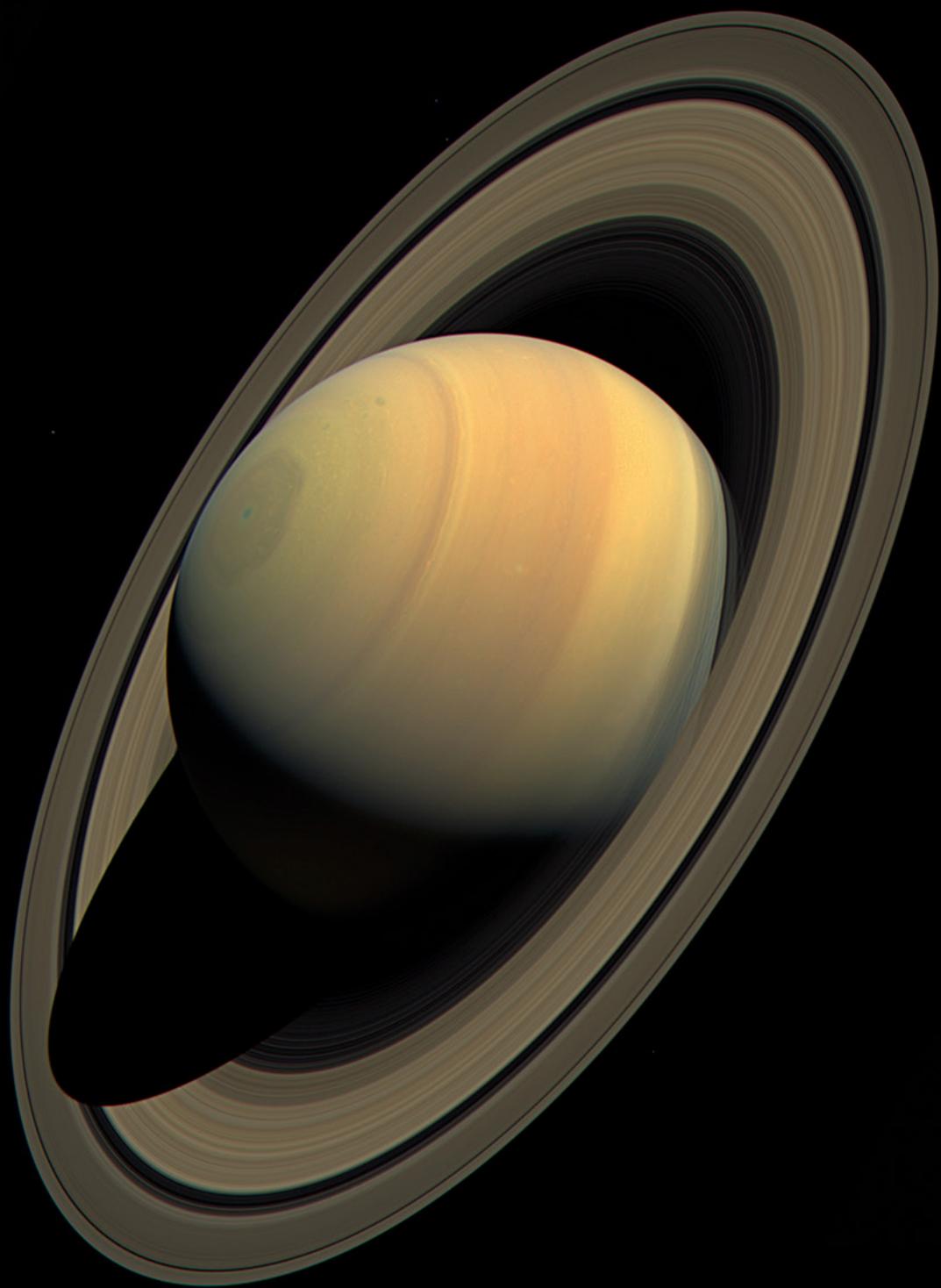


DAS KOMPAKTE
NACHSCHLAGEWERK

ZAHLEN — DATEN — FAKTEN



Kompendium der Astronomie



HANS-ULRICH KELLER

Kompendium der Astronomie

EINFÜHRUNG
IN DIE WISSENSCHAFT
VOM UNIVERSUM

KOSMOS

Inhalt

Vorwort	7	1.6 Moderne Teleskoptechniken	32
		1.6.1 Adaptive und aktive Optiken	36
		1.6.2 CCD-Empfänger	44
		1.7 Radioteleskope	45
		1.8 Auswertegeräte	49
Astronomie – die Wissenschaft vom Universum und seinen Sternen ..	8	1.9 Gravitationswellenobservatorien	50
		1.10 Planetarien	53
Die Stellung des Menschen im All	8	2 Sphärische Astronomie	54
Einteilung und Einordnung der Astronomie	10	2.1 Astronomische Koordinaten- systeme	54
1 Astronomische Instrumente	12	2.1.1 Beziehungen der Koordinatensysteme zueinander	59
1.1 Gnomonik	12	2.1.2 Das Nautische (Astronomische) Dreieck	61
1.2 Teleskope	14	2.1.3 Der Tierkreis (Zodiacus)	62
1.2.1 Auflösungsvermögen und Trennschärfe	15	2.2 Entfernungseinheiten in der Astronomie	64
1.2.2 Helligkeitsgewinn	18	2.3 Helligkeiten in der Astronomie	64
1.2.3 Vergrößerung und Abbildungs- maßstab	19	2.4 Zeit und Kalender	66
1.3 Fernrohrtypen	21	2.4.1 Zonenzeiten und Datumsgrenze	67
1.3.1 Klassischer Refraktor (Keplersches Fernrohr)	21	2.4.2 Die Zeitgleichung	71
1.3.2 Reflektor System Newton	25	2.4.3 Sternzeit	73
1.3.3 Reflektor System Cassegrain	26	2.4.4 Dynamische Zeit	78
1.3.4 Reflektor System Schmidt	26	2.4.5 Julianischer und Gregorianischer Kalender	80
1.3.5 Weitere Teleskopsysteme	26	2.4.6 Ephemeridenzeit	81
1.4 Teleskopmontierungen	29	2.4.7 Julianisches Datum	82
1.4.1 Azimutale oder horizontale Montierung	30	2.4.8 Zeitdilatation	83
1.4.2 Parallaktische oder äquatoriale Montierung	30	2.4.9 Planck-Zeit	83
1.5 Spezielle Teleskoptypen	30	3 Grundzüge der Himmels- mechanik	84
1.5.1 Passageninstrument und Meridiankreis	31	3.1 Zweikörperproblem	85
1.5.2 Zenitteleskop	31	3.2 Grundbegriffe	86
1.5.3 Coelostat, Heliostat, Siderostat	31	3.2.1 Bahnelemente	88
1.5.4 Teleskope neuer Technologien	31		

3.2.2	Drei- und Mehrkörperproblem/ Störungen	89	4.6	Meteoroiden, interplanetare Materie und die Heliosphäre	238
3.2.3	Die Lagrange-Librationspunkte	91	4.6.1	Meteoroiden	238
			4.6.2	Interplanetare Materie	240
			4.6.3	Heliosphäre und Heliopause	242
4	Das Sonnensystem	94	4.7	Kosmische Kollisionen	244
4.1	Die Sonne	95	5	Stellarastronomie	248
4.1.1	Die Atmosphäre der Sonne	96	5.1	Mess- und Zustandsgrößen der Sterne	248
4.1.2	Sonnenaktivität	99	5.1.1	Die Bezeichnungen der Sterne	249
4.1.3	Sonnenrotation	100	5.1.2	Die Helligkeiten der Sterne	252
4.1.4	Magnetischer Zyklus	103	5.1.3	Astronomische Entfernungseinheiten ...	255
4.2	Die Erde als Planet	104	5.1.4	Die sonnennächsten Sterne	258
4.2.1	Kugelgestalt und Rotation	104	5.1.5	Die Bewegungen der Sterne	261
4.2.2	Die Erdatmosphäre	110	5.1.6	Die Farben und die Spektralklassifikation der Sterne	266
4.2.3	Atmosphärische Erscheinungen	114	5.1.7	Die Leuchtkraftklassen	269
4.2.4	Der innere Aufbau der Erde	118	5.1.8	Das Hertzsprung-Russell-Diagramm	271
4.2.5	Präzession und Nutation	119	5.1.9	Sternatmosphären	272
4.2.6	Das Magnetfeld der Erde	125	5.2	Aufbau und Entwicklung der Sterne	276
4.3	Der Mond der Erde	128	5.2.1	Energiequellen der Sterne	278
4.3.1	Die Mondbahn	128	5.2.2	Sternentstehung	281
4.3.2	Die Mondphasen	134	5.2.3	Die Entwicklung der Sterne	289
4.3.3	Die Libration	135	5.3	Die Endstadien der Sterne	293
4.3.4	Gezeiten	140	5.3.1	Weißer Zwerge	293
4.3.5	Die Mondoberfläche	143	5.3.2	Neutronensterne	295
4.3.6	Das Mondinnere	150	5.3.3	Quarksterne	297
4.3.7	Sonnen- und Mondfinsternisse	154	5.3.4	Magnetare	298
4.4	Die Planeten	162	5.3.5	Kollapsare – Schwarze Löcher	302
4.4.1	Merkur	162	5.3.6	Schwarze Sterne	306
4.4.2	Venus	169	6	Doppelsterne, Veränderliche, Exoplaneten	310
4.4.3	Mars	175	6.1	Doppelsterne	310
4.4.4	Jupiter	182	6.2	Veränderliche Sterne	315
4.4.5	Saturn	186	6.2.1	Optisch Veränderliche	316
4.4.6	Uranus	191	6.2.2	Physisch veränderliche Sterne	318
4.4.7	Neptun	193	6.2.3	Planetarische Nebel	330
4.4.8	Zwergplaneten	195	6.3	Exoplaneten	333
4.4.9	Planetoiden	199			
4.4.10	Die Monde und Ringe der Planeten	210			
4.4.11	Die Rochesche Grenze	227			
4.4.12	Die Magnetfelder der Planeten	229			
4.5	Kometen	230			
4.5.1	Kometenbezeichnungen	231			
4.5.2	Physik der Kometen	231			
4.5.3	Kometenhelligkeiten	235			
4.5.4	Die Oortsche Kometenwolke	237			

6.4	Astrobiologie	338	9.2.3	Die Urknall-Singularität	399
6.5	Gravitationswellenastronomie	342	9.2.4	Die inflationäre Phase	401
7	Sternhaufen und Assoziationen	348	9.2.5	Die kritische Dichte	403
7.1	Offene Sternhaufen	349	9.2.6	Das Alter des Universums und die kosmologischen Parameter	404
7.2	Kugelförmige Sternhaufen	352	9.2.7	Die Zukunft des Universums	411
7.3	Bewegungshaufen	355	9.2.8	Dunkle Energie und beschleunigte Expansion	412
7.4	Sternassoziationen	356	9.2.9	Vakuumzerfall	416
7.5	Interstellare Materie	357	9.2.10	Kosmischer Kalender	417
8	Das Milchstraßensystem	362	10	Meilensteine der Astronomie	419
8.1	Galaktische Koordinaten	363	10.1	Vorteleskopische Zeit	419
8.2	Aufbau der Milchstraße	364	10.2	Teleskopische Zeit	420
8.3	Die Rotation der Milchstraße	368	10.3	Zeitalter der Weltraumfahrt	423
8.4	Das Zentrum der Milchstraße	370	11	Anhang	427
9	Galaxien und Kosmologie	372	11.1	Astronomische Symbole und Abkürzungen	427
9.1	Extragalaktische Sternsysteme	372	11.2	Einheiten und physikalische Konstanten	427
9.1.1	Entfernungsindikatoren der Galaxien	374	11.3	Mathematische Größen und Relationen	429
9.1.2	Eigenschaften der Galaxien	377	11.4	Sonstiges	433
9.1.3	Durchmesser, Leuchtkräfte und Massen der Galaxien	380	Periodensystem der chem. Elemente	433	
9.1.4	Die Magellanschen Wolken	383	Das elektromagnetische Spektrum	434	
9.1.5	Galaxienhaufen	383	Die Richtungen der Windrose	435	
9.1.6	Die Lokale Gruppe	386	11.5	Akronyme (Abkürzungen)	436
9.1.7	Die Zentren der Galaxien	388	Internet-Adressen	439	
9.1.8	Aktive Galaxien und Quasare	389	Weiterführende Literatur	440	
9.1.9	Die Entstehung der Galaxien	393	Register	441	
9.2	Kosmologie	394	Der nördliche Sternenhimmel	449	
9.2.1	Der Urknall	396	Der südliche Sternenhimmel	450	
9.2.2	Das Urknallszenario	398	Mond-Vorderseite	451	
			Mond-Rückseite	452	

Vorwort

Vorwort zur sechsten, erweiterten Auflage

In den letzten Jahrzehnten hat die Astronomie ungeheure Fortschritte gemacht. Das Alter des Universums wurde zu knapp 14 Milliarden Jahren bestimmt, man beobachtet fernste Galaxien, die sich bald nach dem Urknall bildeten, fand riesige Schwarze Löcher in den Zentren der Galaxien und in unserer eigenen Milchstraße, erforschte die Geburt, das Leben und die Endstadien der Sterne und eroberte mit unbemannten Raumsonden das Sonnensystem, unsere nähere kosmische Heimat.

Das Interesse an der Astronomie und der Weltraumfahrt nimmt in weiten Kreisen der Bevölkerung stetig zu, was auch an der großen Zahl astronomischer Bücher und Zeitschriften ersichtlich ist. Dabei gilt es, zwei Kategorien von Büchern zu unterscheiden: Einerseits gibt es populäre Einführungswerke mit rein beschreibendem Text ohne Formeln. Andererseits stehen reine Fachbücher zur Verfügung, die nur denjenigen Leserinnen und Lesern verständlich sind, die über ausreichende Kenntnisse der Mathematik und Physik verfügen.

Das vorliegende *Kompendium der Astronomie* schlägt einen Mittelweg ein. Es gibt eine kompakte und übersichtliche Darstellung der Himmelskunde mit zahlreichen Tabellen und Abbildungen. Es soll denjenigen eine kompetente Hilfe sein, die Daten, Fakten und Zahlen aus der Astronomie griffbereit zur Hand haben wollen. Als professionelle Einführung in die Wissenschaft vom Universum und seinen Gestirnen soll es sowohl Amateurastronomen und Sternfreunden als auch Schülern, Lehrern, Studierenden der Naturwissenschaften und Kollegen als Nachschlagewerk die benötigten Informationen liefern.

Das *Kompendium der Astronomie* ist keine umfangreiche und tiefeschürfende Einführung in die Himmelskunde, sondern ein Leitfaden mit kurzen aber prägnanten Erklärungen zum Verständnis auch komplizierter Zusammenhänge. Einfache und leicht

verständliche Skizzen helfen, sich schnell einen Einblick in das jeweilige Sachgebiet zu verschaffen.

Nun liegt die sechste, aktualisierte und erheblich erweiterte Auflage des *Kompendium der Astronomie* vor. Rund 50 Druckseiten mit zahlreichen Abbildungen sind hinzugekommen. Neue Kapitel und Themenkreise wurden aufgenommen. Völlig neu sind die Kapitel Gravitationswellenastronomie, Wolf-Rayet-Sterne, die Abschnitte Gravitationswellendetektor LIGO und Magnetfelder der Planeten. Erheblich erweitert wurden die Kapitel Himmelsmechanik, Planeten unseres Sonnensystems, Exoplaneten. Zahlreiche Tabellen kamen hinzu: Bedeutende Radioteleskope, die ersten 25 Trojaner, berühmte Kometen, die neue IAU-Namensliste heller Sterne, Rotverschiebungs-Entfernungs-Relation, Periodensystem der chemischen Elemente, um nur einige zu nennen. Auch das Kapitel „Meilensteine der Astronomie“ wurde aktualisiert und erweitert.

Als exakte Wissenschaft kommt die Astronomie ohne Mathematik nicht aus. Um die Formeln in diesem Werk zu verstehen, reichen einfache Kenntnisse der Schulmathematik aus. Auf höhere Mathematik wurde ganz verzichtet.

Dankbar bin ich wieder zahlreichen Fachkollegen für ihre nützlichen Hinweise und Anregungen.

Mein besonderer Dank gilt den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Verlags für ihre stete Unterstützung bei der Herstellung dieses Buches, namentlich Herrn Sven Melchert.

Herrn Gerhard Weiland aus Köln danke ich für die sorgfältige und professionelle Anfertigung der zahlreichen Grafiken.

Alle verbliebenen Unstimmigkeiten, Unklarheiten oder Fehler gehen jedoch voll zu Lasten des Autors.

Stuttgart, im Februar 2019

Hans-Ulrich Keller

Astronomie – die Wissenschaft vom Universum und seinen Sternen

Die Astronomie wird gelegentlich etwas euphorisch als „die älteste Wissenschaft der Menschheit“ bezeichnet. Den Astronomen schmeichelt dies. Mit gleichem Recht behauptet man von der Mathematik, sie sei die älteste aller Wissenschaften. Genau genommen gab es in grauer Vorzeit, als man die Erfahrungen und Entdeckungen des Menschengeschlechts systematisch zu sammeln und anzuwenden begann, noch keine Differenzierungen und Abgrenzungen der einzelnen Wissensgebiete. So waren im Altertum bei beschränktem Kenntnisstand die meisten Gelehrten auch Universalwissenschaftler. Ein Einzelner war damals durchaus in der Lage, im Wesentlichen das gesamte Wissen seiner Epoche aufzunehmen.

Durch die gewaltige Wissensvermehrung und durch die Differenzierung und Spezialisierung der Forschungsmethoden entstanden einzelne Wissenschaftszweige, die den Eindruck selbstständiger Disziplinen erwecken. Doch alle Erkenntnis ist stets Teil vom Ganzen, das sich mosaikartig zusammenfügen lässt. In der heutigen Zeit ist es sinnvoll, auf die integrierende Bedeutung der einzelnen Wissenschaftsdisziplinen hinzuweisen. Es ist leider immer noch üblich, „die Wissenschaften“ in zwei große Gruppen aufzuteilen: in die Natur- und in die Geisteswissenschaften. Doch was ist „Geist“? Ist die Chemie, eine reine Naturwissenschaft, etwa geistlos? Benötigt man keinen „Geist“, um das Verhalten eines Elementarteilchens zu beschreiben oder eine Planetenbahn aus vorher erfolgten Beobachtungen zu errechnen?

Genau betrachtet können alle Wissensdisziplinen, die bisher unter den Begriff „Naturwissenschaft“ fallen, der Physik zugeordnet werden. Die Einordnung ist eine Frage des Maßstabes (siehe Seite 11). Die Physik benötigt zu ihrer Beschreibung der Natur, zur Formulierung von Gesetzen die Mathematik, die umfassende Disziplin, die als einzige die Bezeichnung „Geisteswissenschaft“ verdient.

Die Astronomie ist die Lehre von den Gestirnen und den Gesetzen des Weltalls. Der Name Astronomie leitet sich aus dem Griechischen ab: $\alpha\sigma\tau\eta\rho$ -Gestirn, $\nu\omicron\mu\omicron\varsigma$ -Gesetz.

Die Astronomie ist ein Teilgebiet der Physik. Sie ist die Physik der großen Räume und großen Massen. Das Universum ist ein gigantisches Laboratorium, in dem höchste und tiefste Temperaturen auftreten, Materie in ungeheuer dichten Zuständen ebenso vorkommt

wie ein fast vollkommenes Vakuum, wo die ganze Bandbreite der elektromagnetischen Strahlung den Raum erfüllt, unvorstellbare Energiemengen freigesetzt werden, und in dem schließlich die Evolution sich seiner selbst bewusstes Leben hervorgebracht hat.

Die Astronomie erforscht das Universum und seine Objekte. Sie bedient sich dabei physikalischer Methoden, und zwar ausschließlich. Alle nicht aufgrund physikalischer Methoden gemachten Aussagen über den Kosmos, vor allem über seine Entstehung und Entwicklung, sind reine Spekulation und haben keinen Anspruch darauf, als wissenschaftliche Erkenntnisse angesehen zu werden.

Da die Astronomie ein Teilgebiet der Physik ist – manche Astronomen nennen die Astronomie nicht zu Unrecht die „eigentliche Physik“ – und sich physikalischer Methoden zur Erforschung des Weltalls bedient, sind die Astronomen im Grunde Physiker. Wer heute Astronomie betreiben will und als Berufsziel „Astronom“ anstrebt, muss ein Physikstudium absolvieren. Die Fortschritte in allen Disziplinen der Physik führen auch in der Astronomie zu neuen Erkenntnissen. Die Erforschung der Atomhüllen lässt die Spektren der Sterne verstehen und damit ihre physikalischen Zustände (Oberflächentemperatur, Druck, chemische Zusammensetzung, elektrische und magnetische Felder, Radial- und Rotationsgeschwindigkeiten usw.), die Erkenntnisse der Kernphysik erlauben die Beschreibung des Aufbaus, der Energieproduktion und der Entwicklung der Sterne, und die Fortschritte in der Hochenergiephysik ermöglichen eine immer genauere Beschreibung der Evolution des Kosmos, speziell seiner sehr frühen Phase. Andererseits befruchten neue Entdeckungen und Forschungsergebnisse der Astronomie viele Teilgebiete der Physik und verhelfen ebenso dort zu weiteren Erkenntnissen.

Die Stellung des Menschen im All

Hauptanliegen der Astronomie ist es, den Menschen ihre Stellung und ihre Rolle im Universum zu verdeutlichen. Noch immer beherrscht der Mittelpunktswahn – die Vorstellung, die Krone der Schöpfung zu sein – das Denken vieler Zeitgenossen. „Warum müssen wir zum Mond oder Mars hinauffliegen?“

wird oft gefragt. Über Sinn und Zweck bemannter Raumfahrt kann man mit Fug und Recht diskutieren. Aber wieso „hinauf“? Ist der Mond oder der Mars denn „oben“? Schon Nikolaus Kopernikus hat richtig darauf hingewiesen, dass „oben“ und „unten“ nur *auf* oder *in unmittelbarer Nähe* der Erdoberfläche durch die Schwerkraft festgelegt ist. Wer auf dem Mond steht, kann die Erde „oben“ sehen. Für den Beobachter auf der Erde, der die Richtung zum Erdmittelpunkt als „unten“ empfindet, ist der Mars einmal oben, dann aber wieder vorne oder hinten oder auch unten – je nach Position des Beobachters auf der rotierenden Erde. Korrekt gestellt müsste die Frage lauten: „Warum sollen wir zum Mond oder zum Mars *hinüberfliegen*?“ Im Geiste haben viele die Kopernikanische Revolution noch nicht vollzogen.

Unermesslich war die Kränkung der Menschheit, als die Astronomen nachwiesen, dass die Erde keineswegs im Mittelpunkt des Universums ruht, sondern um einen beliebigen Durchschnittssterne – unsere Sonne – taumelt. Und die Sonne ist wiederum einer unter mehreren hundert Milliarden Sternen am Rande unseres Milchstraßensystems, also in keiner hervorgehobenen Position. Und unsere Galaxis ist ein Milchstraßensystem unter Abermilliarden Galaxien allein im überschaubaren Bereich des Kosmos. Erbittert wurden die Gelehrten bekämpft, die dieses Wissen verbreiteten, bis hin zu ihrer physischen Vernichtung auf dem Scheiterhaufen.

Wer meint, diese Zeiten seien ein für alle Mal vorbei, der irrt. Auch wenn die Heimat der Menschheit an einem x-beliebigen Ort im Universum liegt, so sieht man sich immer noch als Krone der Schöpfung und meint, das gesamte Weltall mit all seinen Gestirnen sei eigens für uns geschaffen worden. Ein tragisches Vorurteil.

Das Weltall ist knapp 14 Milliarden Jahre alt und umfasst damit eine Zeitspanne, die sich völlig unserer höchst beschränkten Vorstellungskraft entzieht. Anschaulich wird diese Zeitspanne, wenn man sie auf ein irdisches Jahr komprimiert. Dann erfolgt der Urknall am 1. Januar. Unsere Sonne mit ihren Planeten taucht Anfang September auf. Die ersten Lebensformen (Prokaryoten) bilden sich auf der Erde im Oktober. Erst im Dezember beginnt das Leben das Festland zu erobern. Die „Erfolgsmodelle der Evolution“, die Dinosaurier, tauchen am 2. Weihnachtstag, dem 26. Dezember, auf der Weltbühne auf. Der sich seiner selbst bewusste Mensch, der Homo sapiens, erscheint erst am letzten Tag dieses Weltenjahres, nämlich am 31. Dezember, wenige Sekunden vor

Mitternacht (s. auch Tab. *Kosmischer Kalender* S. 418). Noch bevor ein weiterer Tag in diesem kosmischen Jahr vergangen sein wird, wird es uns, nämlich die Menschheit, nicht mehr geben. Und bald werden auch alle Spuren unserer Existenz getilgt sein. Die Existenz der Menschheit ist ganz offenbar ein belangloses Ereignis in einem teilnahmslosen Universum.

Noch heute werden diejenigen verfolgt, die die Herkunft und das Schicksal unserer Rasse wissenschaftlich zu erklären versuchen. Die Kränkung der eitlen Menschheit, die nicht wahrhaben will, nur eine kurze und belanglose Episode in der Milliarden Jahre langen Geschichte des Universums zu sein, ist enorm. Fanatisierte Glaubensfundamentalisten bedrohen auch heute noch Mitmenschen mit Folter und Tod, zünden Bomben und werfen Sprengkörper, wenn sie nicht deren abstruse Gedankengebäude akzeptieren und ihre Regeln befolgen. Dabei sollten wir eine tiefe Genugtuung empfinden, dass wir in der Lage sind, unsere Herkunft und unsere Stellung in den grenzenlosen Tiefen des Universums zu erforschen. Albert Einstein hat es einmal so ausgedrückt: „Das ewig Unbegreifliche an der Welt ist ihre Begreiflichkeit.“ Einstein fand es erstaunlich, dass der menschliche Verstand in der Lage ist, Aufbau und Entwicklung des Kosmos und seiner Gestirne zu erforschen.

Die vornehmste Aufgabe, derer sich Erdbewohner widmen können, ist die Ergründung des Universums und seiner Gesetze. Die Astronomie ist wohl das faszinierendste Abenteuer, das die Pioniere der Menschheit je unternommen haben. Ein Abenteuer, das uns unsere Stellung und Rolle im Weltgetriebe erahnen lässt und zu Einsichten führt, die uns Bescheidenheit lehren. Im Angesicht der Sternenwelt sollte uns klar werden, wie bedeutungslos unsere Existenz in den ungeheuren Dimensionen des Kosmos ist und wie töricht unsere täglichen, kleinlichen Streitereien sind.

Die Astronomie soll möglichst vielen Menschen ihre Herkunft und ihre Stellung im Universum veranschaulichen. Sie soll einen Denkprozess anregen, der für ein friedvolles und vernünftiges Zusammenleben aller Menschen sorgen kann, Fanatismus und Aggressionen aber abbaut und uns Ehrfurcht vor der Schöpfung lehrt. Dazu wollen und sollen möglichst viele Astronomen beitragen.

Das Abenteuer Astronomie ist nicht auf professionelle Sternforscher beschränkt. Jeder Mensch sollte den sternenübersäten Nachthimmel genießen und den Lauf der Gestirne durch eigene Beobachtungen verfolgen können. Mancher wird dabei zum Nachdenken über den Sinn seines Daseins angeregt.

Einteilung und Einordnung der Astronomie

Das umfangreiche Wissensgebiet der Astronomie lässt sich nach verschiedenen Gesichtspunkten in Teilbereiche gliedern.

1. Historische Aufgliederung

1.1 Vorteleskopische Astronomie

Von den Anfängen bis 1610. Beobachtungen mit bloßen Augen und einfachen Winkelmessgeräten.

1.2 Teleskopische Astronomie

Von der Erfindung des Fernrohrs (1610) bis 1957. Dieser Abschnitt ist durch Entdeckungen mit Hilfe von Teleskopen geprägt, die eine Erweiterung des beobachtbaren Raumbereiches und höhere räumliche Auflösung ermöglichen.

1.3 Astronomie im Raumfahrtzeitalter

Vom Start des ersten Erdsatelliten (1957, SPUTNIK I) bis heute. Durch Beobachtungen außerhalb der Erdatmosphäre sind Strahlen des gesamten elektromagnetischen Spektrums einer Beobachtung zugänglich. Ferner erlauben Raumsondenmissionen zu den Körpern des Sonnensystems direkte Messungen (In-situ-Experimente). Moderne Beobachtungstechniken erlauben extrem hohe räumliche, zeitliche und spektrale Auflösung.

2. Klassische Einteilung nach Arbeitsgebieten

2.1 Sphärische Astronomie

Erlaubt die Angabe der Positionen von Gestirnen an der Sphäre (Himmelskugel) mit Hilfe geeigneter Koordinatensysteme und leitet ihre Kinematik ab. Zur Sphärischen Astronomie gehören auch die Ephemeridenrechnung sowie die Zeit- und Ortsbestimmung.

2.2 Himmelsmechanik

Beschreibt unter Anwendung des Gravitationsgesetzes die Dynamik der Himmelskörper und bestimmt deren Bahnen.

2.3 Astrophysik

Untersucht die physikalischen Eigenschaften der Himmelskörper; Anwendung physikalischer Me-

thoden zur Erforschung und Beschreibung des Welt- raums und seiner Objekte.

3. Unterteilung nach Beobachtungsmethoden

3.1 Positionsastronomie (Astrometrie)

Bestimmung der Richtungen, aus denen das Licht der Gestirne einfällt. Aus den mit der Zeit veränderlichen Richtungen werden die Bewegungen der Gestirne abgeleitet und deren scheinbare Bahnen an der Sphäre beschrieben.

3.2 Fotometrie

Messung der Strahlungsintensitäten (Helligkeiten) der Gestirne und deren Veränderlichkeit mit der Zeit.

3.3.1 Spektralanalyse

Qualitative und quantitative Auswertung der Gestirnspektren zur Bestimmung ihrer physikalischen Parameter (chemische Zusammensetzung, Temperatur, Druck, Dichte, Rotationsfrequenz, Radialgeschwindigkeit etc.).

3.3.2 Polarimetrie

Messung des Polarisationsgrades vom Gestirnslicht.

4. Einteilung nach Himmelsobjekten

4.1 Sonnensystem

4.1.1 Erde als Planet

4.1.2 Erdmond

4.1.3 Planeten und ihre Monde

4.1.4 Zwerg- und Kleinplaneten (Planetoiden)

4.1.5 Kometen

4.1.6 Meteoroiden und interplanetare Materie

4.1.7 Sonne

4.2 Stellarastronomie und interstellare Materie

Doppelsterne/Veränderliche Sterne

4.3 Sternengesellschaften

Offene Sternhaufen, Kugelsternhaufen, Assoziationen, Bewegungshaufen.

4.4 Milchstraßensystem (Galaxis)

4.5 Extragalaktische Sternsysteme (Galaxien)

4.6 Kosmologie (Universum als Ganzes)

5. Moderne Aufgliederung

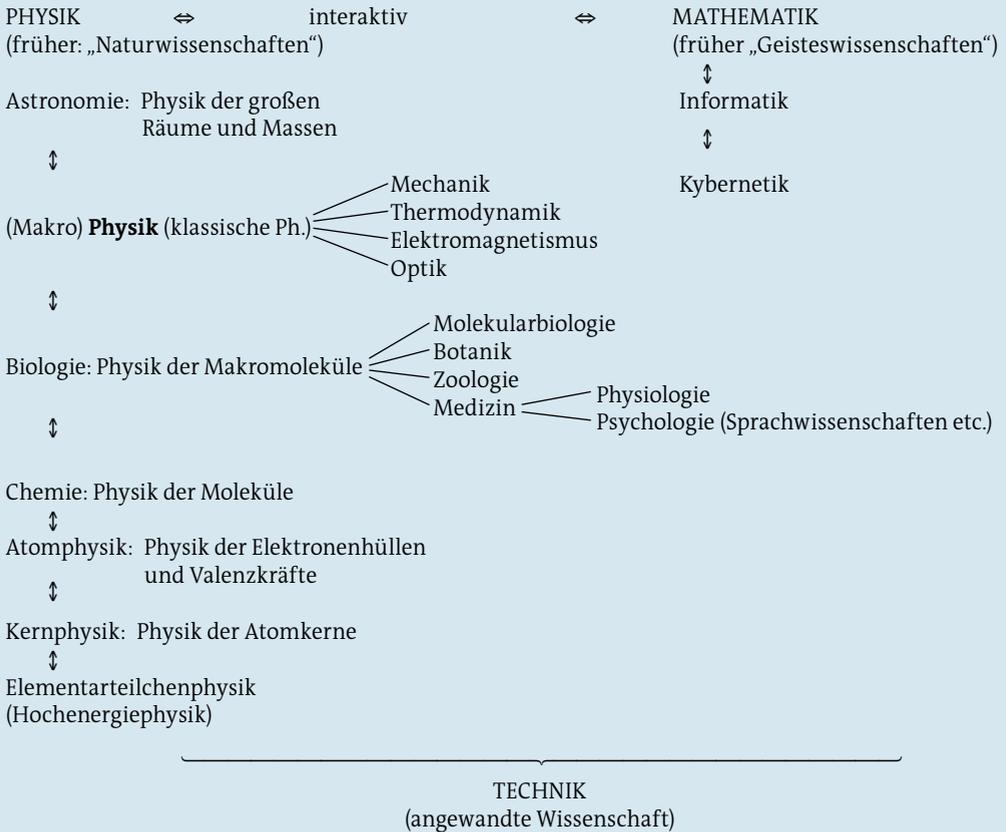
5.1 Ground based Astronomy
(Bodengebundene Astronomie)

- 5.1.1 Optische Astronomie
- 5.1.2 Radioastronomie (Radarastronomie)

5.2 Space Astronomy
(Beobachtung vom Weltraum aus)

- 5.2.1 Satellitenobservatorien (UV-, IR-, Röntgen- und Gammastrahlen-Astronomie)
- 5.2.2 In-situ-Experimente (Raumflugmissionen)

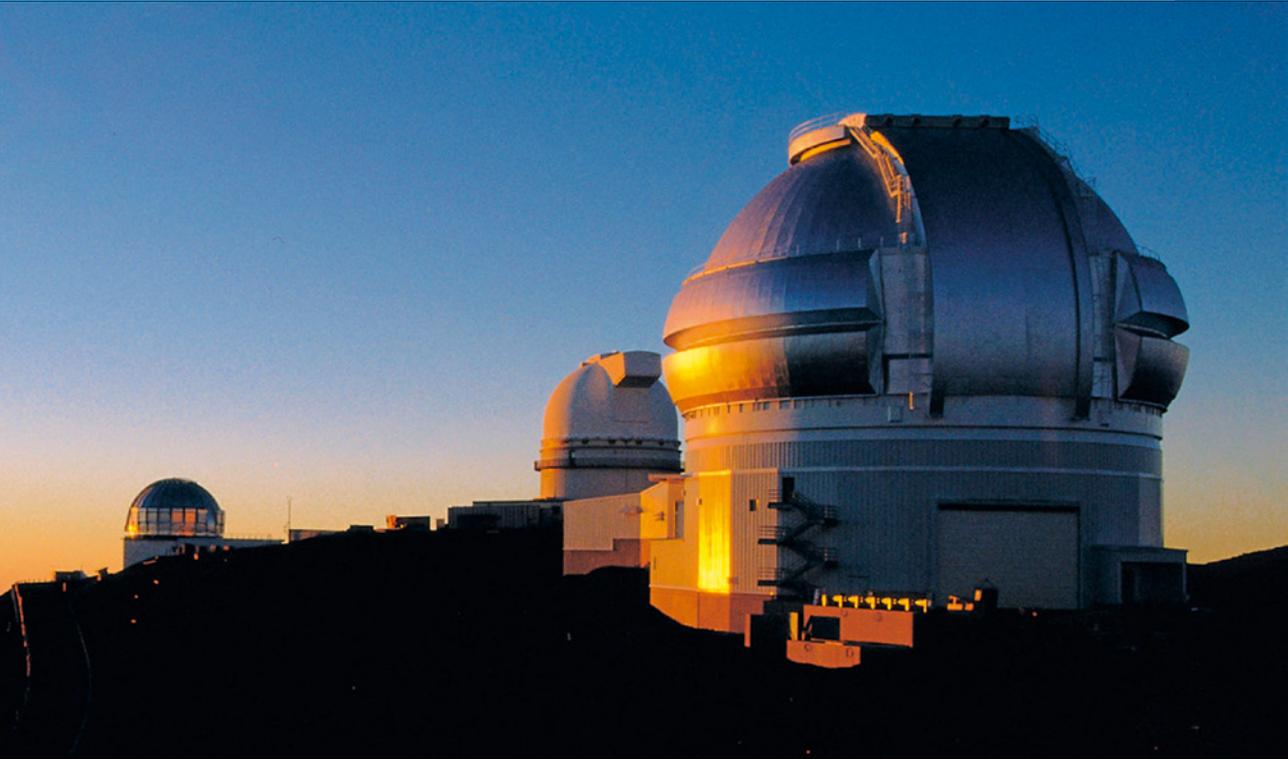
Astronomie im System der Wissenschaft aus moderner Sicht



Aufnahmen des Krabbennebels M1 in verschiedenen Wellenlängenbereichen (v. l. n. r.): im optischen, im infraroten, im Röntgenbereich sowie eine Überlagerung der drei Bilder. Während das Röntgenbild (kleines Bild) nur die hoch-energetischen Vorgänge rund um den Pulsar im Zentrum zeigt, lassen das optische und das Infrarotbild auch die Strukturen in den äußeren Bereichen erkennen.



1 Astronomische Instrumente



Die Erforschung des Weltalls wurde erst mit Hilfe von geeigneten Geräten zur Beobachtung, Messung und Auswertung möglich. Man spricht im Allgemeinen von astronomischen Instrumenten.

Zu den astronomischen Instrumenten zählen in erster Linie die Beobachtungsgeräte. Hinzu kommen ferner Apparate zur Auswertung der empfangenen Beobachtungsdaten. Im weiteren Sinne gehören außerdem Zeitmesser (Uhren) zu den astronomischen Geräten.

Das wichtigste astronomische Instrument ist das Fernrohr oder Teleskop (griech. *τελεε*, fern, *σκοπειν*, sehen). Durch seine lichtsammelnde Wirkung wird es möglich, zu immer schwächeren Objekten vorzudringen. Zudem erhöht sich das Auflösungsvermögen; man sieht mehr Details. Die Leistungsfähigkeit eines Teleskops wird dabei in erster Linie vom Objektivdurchmesser bestimmt.

Vor der Erfindung des Teleskops im Jahr 1610 benutzte man hauptsächlich Winkelmessgeräte, zu denen unter anderem **Astrolabium**, **Armillarsphäre**,

Quadrant (speziell Mauerquadrant), **Sextant**, Oktant, **Triquetrum** (parallaktisches Lineal) und Jakobsstab gehören.

Ein einfaches Instrument ist der **Gnomon** (Schattenstab), in größerer Ausführung Obelisk genannt. Er dient zur Bestimmung der Himmelsrichtungen, der Sonnenhöhe, der Uhrzeit und des Datums und damit auch der Länge eines tropischen Sonnenjahres.

1.1 Gnomonik

Unter Gnomonik versteht man die Lehre von den Sonnenuhrenkonstruktionen. Den einfachsten Fall einer Sonnenuhr stellt ein senkrecht postierter Stab dar, der im Sonnenlicht seinen Schatten auf eine horizontale Ebene wirft. Einen solchen Stab oder Säule nennt man Schattenstab oder Gnomon. Das Wort Gnomon stammt aus dem Griechischen: *ὄνόμεον* bedeutet Aufseher, Begutachter und Zeiger der Sonnenuhr. Die Griechen übernahmen den Gnomon von den

Babyloniern. Häufig wurde die Bezeichnung Gnomon für die Sonnenuhr selbst verwendet, also für Schattenstab samt Zifferblatt. Im Altertum wurden die Gnomone oft zu gewaltigen Säulen. Vor allem in Ägypten errichtete man riesige, vierkantige Steinpfeiler, deren Abschluss eine kleine Pyramide bildete. Solche überdimensionalen Schattenstäbe nennt man Obelisken (griech.: ὀβελός = der Spieß). Obelisken waren ein Kultsymbol des ägyptischen Sonnengottes Ra. Der höchste noch erhaltene Obelisk in Ägypten steht in Luxor und hat eine Höhe von 28 Meter. Er wurde unter der Herrschaft der Königin Hatschepsut errichtet. Mehrere Obelisken wurden von den Römern entwendet und nach Rom verschleppt, so ein fast 30 Meter langer Obelisk von Ramses II.

Aus Richtung und Länge des Schattens, den ein Gnomon wirft, lässt sich die Tagesstunde bestimmen. Der kürzeste Schatten markiert überdies die Nord-Süd-Richtung.

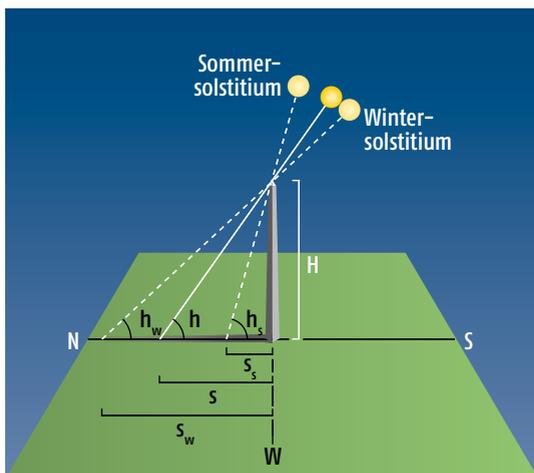
Ferner ergibt sich die Sonnenhöhe aus der Schattenlänge. Der Höhenwinkel h der Sonne bestimmt sich zu

$$h = \arctan (H/s)$$

wobei H die Höhe des Gnomons und s die Schattenlänge ist (s. Abbildung unten).

Da die Sonnenhöhe nicht nur eine Funktion der Tagesstunde (Uhrzeit) bzw. des Stundenwinkels der Sonne ist, sondern auch von der Jahreszeit, also der Sonnendeklination abhängt, lässt sich mit Hilfe eines Gnomons auch der Jahreslauf der Sonne bestimmen.

Aus der Höhe H des Gnomons und seiner Schattenlänge s lässt sich der Höhenwinkel h der Sonne bestimmen.



Aus Gnomonbeobachtungen lassen sich somit auch die Schiefe der Ekliptik (= halbe Deklinationsdifferenz zwischen Sommer- und Wintersolstitium) und die Elliptizität der Erdbahn ermitteln. Da aus den Schattenlängen respektive Sonnenhöhen die Jahreszeitenlänge ermittelt werden kann, zeigt sich, dass das Sommerhalbjahr (auf der Erdnordhalbkugel) länger dauert als das Winterhalbjahr. Dies ist eine direkte Folge des 2. Keplerschen Gesetzes: Im Aphel (Sonnenferne) läuft ein Planet langsamer als im Perihel (Sonnennähe). Die Erde geht Anfang Januar durch ihr Perihel, Anfang Juli durch ihr Aphel. Somit braucht sie etwa eine Woche länger, um ihre halbe Bahn im Sommerhalbjahr zurückzulegen als im Winterhalbjahr.

Um aus einem Gnomon eine Sonnenuhr werden zu lassen, muss man noch auf der Fläche, auf die der Schatten fällt, Markierungen anbringen, die die Funktion eines Uhrenzifferblattes haben.

Eine Sonnenuhr besteht somit aus einem Schattenspender (der nicht immer ein Stab oder eine Säule sein muss) und einem Zifferblatt. Nach ihrer Schatten auffangenden Fläche unterscheidet man zwischen Horizontal-, Vertikalsonnenuhren und Äquatorialen Sonnenuhren. Im ersten Fall liegt das Zifferblatt in der Horizontalebene des Aufstellungsortes. Vor allem bei sehr großen Sonnenuhren wird die Horizontalebene als Schattenauffangfläche gewählt. Vertikalsonnenuhren findet man an Gebäudewänden. Der einfachste Fall liegt bei einer Wand vor, die genau in Ost-West-Richtung steht. Man spricht von einer Südwand, weil die Front der Wand nach Süden sieht. Bei einer Südwand ist das Zifferblatt einer Sonnenuhr symmetrisch zum Schattenstab. Bei Wänden, die nach anderen Azimuten ausgerichtet sind (so genannte „abweichende“ Vertikalsonnenuhren), ist ein asymmetrisches Zifferblatt zu konstruieren.

Kleine, frei stehende Sonnenuhren sind meist als äquatoriale Sonnenuhren ausgebildet. Dabei gilt es, zwei Typen zu unterscheiden: Sonnenuhren mit äquatorparallelen Zifferblättern und solche mit erdachsparellen Zifferblättern. Im ersten Fall liegt das Zifferblatt in der Ebene des Himmelsäquators, ist also um den Komplementärwinkel der geografischen Breite des Standortes aus der Horizontebene herausgekippt. Im zweiten Fall ist das Zifferblatt parallel der Erdachse ausgerichtet und damit um den Winkel der geografischen Breite zur Horizontebene geneigt. Der Schattenstab zeigt in diesem Fall oftmals auf den Himmelsäquator.

Sonnenuhren zeigen in der Regel die Wahre Orts- sonnenzeit (WOZ) an. Um die Mittlere Ortssonnenzeit (MOZ) zu erhalten, ist die Zeitgleichung anzubringen (s. 2.4.2, S. 71). Die Zeitgleichungskurve (auch Analemma genannt) zeigt, wann die Sonnenuhr vorgeht und wann sie nachgeht (s. Abb. Seite 72/73). Bei positiver Zeitgleichung (ZGL = WOZ – MOZ) geht die Sonnenuhr vor, bei negativer hingegen *nach*.

Schließlich ist noch die Zeitdifferenz zwischen der Ortssonnenzeit, die sich auf den Ortsmeridian des Beobachters bezieht, und der Mitteleuropäischen Zeit (MEZ) zu berücksichtigen. Die MEZ ist die Mittlere Sonnenzeit für den Meridian 15° östlich von Greenwich. Pro Längengrad Differenz sind 4^m anzubringen. Steht eine Sonnenuhr auf dem Meridian 10° östlich von Greenwich, so geht sie 20^m gegenüber der MEZ *nach*.

Durch geeignete Konstruktionen der Zifferblätter und spezieller Formgebung der Schattenwerfer gelingt es, Sonnenuhren zu bauen, die beide Korrekturen (Zeitgleichung und Längendifferenz) berücksichtigen und deshalb nicht die WOZ, sondern die MEZ anzeigen. Eine besonders ausgereifte Sonnenuhren-Konstruktion hat Martin BERNHARDT aus Freudenstadt entwickelt.

1.2 Teleskope

Teleskope sind, abstrakt formuliert, kybernetische Systeme zur (optischen) Informationsübertragung. Sie setzen sich aus drei Baugruppen zusammen (vgl. Abbildung unten).

O: Objektiv, Z: Zwischenglieder, E: Empfänger

Das Objektiv eines Teleskops besteht entweder aus einer Sammellinse (oder einer Kombination von verschiedenen optischen Linsen, die eine lichtsam-

melnde Wirkung hervorrufen) oder einem konkaven Spiegel (kugelförmig, also sphärisch bzw. paraboloidische Form).

Teleskope mit Linsenobjektiven heißen **Refraktoren** (lat.: refringere = brechen), Spiegelteleskope werden **Reflektoren** (lat.: reflectere = zurückwenden) genannt.

Die Bezeichnung *Fernrohr* stammt von der äußeren Form der Linsenteleskope. Moderne Teleskope haben keine Ähnlichkeit mehr mit dem klassischen Typus des Fernrohrs.

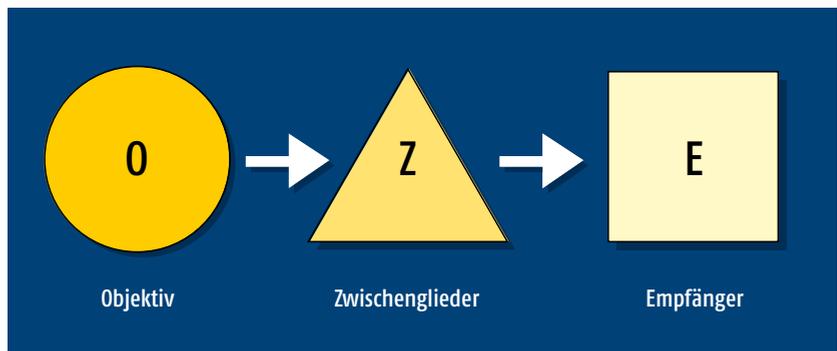
Zu den Zwischengliedern (Z) eines Teleskops zählen Fang- und Umlenkspiegel, Umkehr- und Nachvergrößerungslinsen, Filter etc. Sie sind notwendig, um den Strahlengang umzulenken beziehungsweise für den Empfänger aufzubereiten. Sie führen durch Absorption und Deformation der Wellenfront stets zu einem Informations**verlust**, weshalb man die Zahl der Zwischenglieder möglichst klein zu halten versucht. Beim klassischen Refraktor fehlen Zwischenglieder völlig.

Der Empfänger (E) verarbeitet das vom Objektiv erzeugte reelle Abbild des beobachteten Objekts. Als Empfänger kann das Auge dienen, das mittels eines Okulars das reelle Bild betrachtet, eine lichtempfindliche Schicht (fotografische Aufnahme), ein lichtelektrischer Detektor (Fotomultiplier) oder eine elektronische Kamera mit lichtempfindlichen Halbleiterelementen (CCD-Kamera = Charge Coupled Device).

Die Wirkung eines Teleskops ist zweifach und wird vom Objektiv bestimmt: Es erhöht die Auflösung und sammelt mehr Licht, als es dem bloßen Auge zugänglich ist.

Die Kenndaten eines Objektivs sind sein Durchmesser (D, freie Öffnung oder Eintrittspupille EP) und die (primäre) Brennweite F.

Die **Leistung** eines Teleskops wird von seinem **Objektivdurchmesser** bestimmt. Die Auflösung



Die Baugruppen eines Teleskops

(Trennschärfe) steigt linear mit dem Durchmesser, die lichtsammelnde Wirkung hingegen mit dem Quadrat des Durchmessers. Doppelter Durchmesser erbringt doppelt so hohe Auflösung und vierfachen Lichtgewinn.

Der Objektivdurchmesser wird in Zentimeter, oft aber noch in Zoll (inches) angegeben. Bei großen Teleskopen ist die Angabe in Metern üblich. Man spricht von einem 15-cm-Refraktor oder einem Sechszöller. Das große Spiegelteleskop auf Palomar Mountain ist ein 5-m-Reflektor oder schlicht „der 200-Zöller“.

1.2.1 Auflösungsvermögen und Trennschärfe

Die Vergrößerung eines Fernrohrs ist *kein* Kriterium für seine Leistungsfähigkeit. Denn durch die Wahl entsprechend kurz Brennweitiger Okulare kann man mit einem beliebigen Teleskop sehr hohe Vergrößerungen erzielen. Die Vergrößerung eines Teleskops berechnet sich wie folgt: Objektivbrennweite geteilt durch Okularbrennweite. Hat ein Fernrohr eine Objektivbrennweite von $F = 1 \text{ m}$, so ergibt sich eine Vergrößerung um den Faktor 100, wenn ein Okular mit einer Brennweite von $f = 10 \text{ mm}$ eingesetzt wird.

Denn es gilt: $F/f = 1000/10 = 100 \times$. Kommt jedoch beim gleichen Instrument ein Okular mit $f = 5 \text{ mm}$ zum Einsatz, so ergibt dies eine Vergrößerung von $V = 1000/5 = 200 \times$. Je mehr die Vergrößerung steigt, desto kleiner wird das Gesichtsfeld. Die Objekte erscheinen zwar größer, werden allerdings mit steigender Vergrößerung auch immer lichtschwächer und unschärfer. Strukturen und Details der beobachteten Objekte verschwimmen daher immer mehr, bis schließlich kaum mehr etwas zu erkennen ist.

Die Leistung eines Teleskops wird in erster Linie durch die Größe seines Objektivs bestimmt. Je größer der Objektivdurchmesser ist, desto höher ist auch die erzielte Auflösung und umso größer fällt die lichtsammelnde Wirkung des Teleskops aus. Mit wachsendem Objektivdurchmesser sind sowohl mehr Einheiten zu erkennen als auch immer lichtschwächere Sterne auszumachen.

Unter der **Auflösung** eines Teleskops versteht man die Eigenschaft, zwei nahe beieinander stehende Lichtpunkte, zum Beispiel einen engen Doppelstern, getrennt erkennen zu lassen. Der gleiche Doppelstern erscheint in einem Teleskop mit kleiner Öffnung oder gar mit bloßen Augen nur als *einzelner* Lichtpunkt.

Auflösungsvermögen

Objektivdurchmesser [cm]	Trennschärfe [ρ in "]
freies Auge (0,5)	~60
2	6,5
3	4,4
4	3,3
5	2,6
8	1,6
10	1,3
15	0,9
20	0,65
25	0,52
30	0,43
35	0,37
40	0,33
50	0,26
100	0,13
150	0,09
200	0,065

Erst ab einer gewissen Mindestöffnung sind zwei Lichtpunkte zu erkennen, der Doppelstern ist „aufgelöst“.

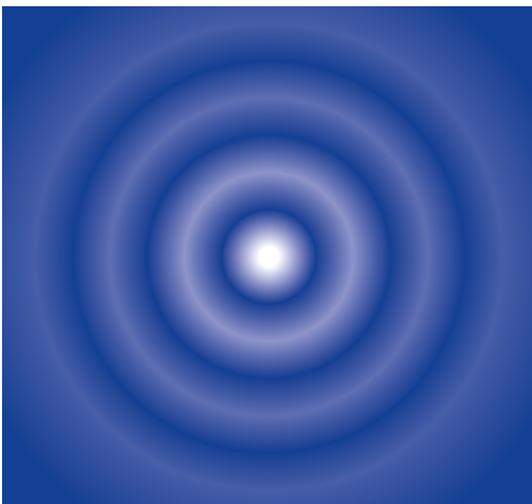
Fixsterne sieht man mit bloßen Augen, aber auch im Teleskop (wenn die Vergrößerung nicht zu stark gewählt wird) nur als Lichtpunkte. Dies ist jedoch nur bedingt zutreffend, denn ein mathematischer Punkt hat keine Ausdehnung und bleibt daher grundsätzlich unsichtbar. Die „Sternpunkte“ sind also in Wirklichkeit kleine Lichtscheibchen. Wegen der ungeheuren Entfernung der Fixsterne bewegen sich ihre scheinbaren Durchmesser in der Größenordnung von tausendstel Bogensekunden und kleiner. Was im Teleskop zu sehen ist, sind daher nicht die eigentlichen Sternscheibchen, sondern die so genannten „Beugungsscheibchen“, die infolge der Wellennatur des Lichtes entstehen. Die Beugungsscheibchen der Fixsterne sind viel größer als ihre geometrischen scheinbaren Durchmesser. Dies wird deutlich, wenn man die Vergrößerung eines Teleskops über die förderliche Vergrößerung (s. 1.2.3, S. 19) erheblich hinaufschraubt. Dann sieht man nicht mehr einen „Lichtpunkt“, sondern ein etwas schwächer leuchtendes Scheibchen, umgeben von einem, zwei oder auch drei feinen Lichttringen (siehe Abb. S. 16). Hierbei handelt es sich um das Beugungsbild des Sterns und nicht um den Sternglobus selbst. Die Beugung des Lichts an

der kreisrunden Objektivfassung folgt aus der Wellennatur des Lichts. Die exakte Theorie der Beugung des Lichts hat der adlige, englische Physiker John William Strutt RAYLEIGH (1842–1919) hergeleitet. Im Jahr 1904 erhielt Lord RAYLEIGH den Nobelpreis für Physik.

Ein Fernrohr lässt umso mehr Details und Strukturen erkennen, je kleiner die Beugungsscheibchen der Sternpunkte sind. Denn je kleiner die Beugungsscheibchen sind, umso enger können zwei Lichtpunkte zusammenrücken, bevor sie scheinbar zu einem einzigen Lichtfleck verschmelzen und nicht mehr in zwei Lichtpunkte aufgelöst werden können. Je kleiner die Beugungsscheibchen, desto besser ist somit die Auflösung. Die Auflösung ist daher ein Maß für die Leistung eines Teleskopobjektivs und damit des ganzen Fernrohrs.

Nach der Beugungstheorie des Lichts findet sich der Hauptteil des Lichts einer punktförmigen Quelle im Zentrum des Beugungsbildes, im so genannten **Airy-Scheibchen** (siehe Abb. unten), so benannt nach George Biddell AIRY (1801–1892), dem langjährigen Direktor der Sternwarte in Greenwich bei London und Astronomer Royal (1835). Gute Objektive sammeln mehr als 80 % des Lichts eines punktförmigen Sterns im Airy-Scheibchen. Das restliche Licht findet sich im ersten, zweiten und dritten Beugungsring. Rein theoretisch gibt es beliebig viele Beugungsringe, in der Praxis sind aber kaum mehr als drei zu sehen. Die Lichtintensitäten der einzelnen Beugungsringe nehmen mit steigender Ordnung immer weiter ab, die

Das Beugungsscheibchen eines „punktförmigen“ Sterns



Maxima werden immer kleiner. Man spricht vom Maximum 0. Ordnung (Zentrum des Airy-Scheibchens), 1. Ordnung (1. Beugungsring) usw.

Der Radius x des Airy-Scheibchens – das ist die Strecke vom Zentrum des Airy-Scheibchens bis zum ersten Lichtminimum – ergibt sich nach Lord RAYLEIGH zu:

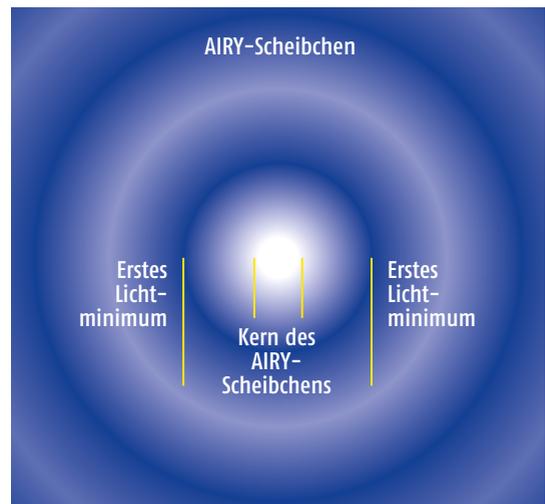
$$x = 1,22 \cdot \lambda / D \quad [\text{radian}]$$

Dabei ist λ die Wellenlänge des Lichts und D der Objektivdurchmesser (freie Öffnung oder Eintrittspupille) sowie x der Radius im Bogenmaß. Daraus folgt: Je kleiner die Wellenlänge und je größer der Objektivdurchmesser, desto kleiner fällt das Airy-Scheibchen aus und desto besser wird die Auflösung beziehungsweise der Kontrast eines Bildes bei nicht beugungsbegrenzter Optik.

Der Theorie nach können zwei Lichtpunkte noch getrennt erkannt werden, wenn das Helligkeitsmaximum des einen Beugungsscheibchens mit dem ersten Helligkeitsminimum des anderen zusammenfällt (siehe Abb. S. 17). Dann sind beide Lichtmaxima nullter Ordnung gerade einen Airy-Radius voneinander entfernt und die Beugungsscheibchen überdecken sich zur Hälfte. Somit sind zwei Sternpünktchen, die voneinander durch den Winkel ρ getrennt sind, noch zu erkennen, wenn

$$\rho = 1,22 \cdot \lambda / D \quad [\text{radian}]$$

Je kleiner das Airy-Scheibchen ist, desto höher ist die Auflösung des Teleskops.



erfüllt ist. Diese Bedingung wird **Rayleigh-Kriterium** genannt.

Beobachtet man Licht einer Wellenlänge von 5500 \AA ($= 550 \text{ nm}$) – dies ist gelbes Licht, für das menschliche Augen am empfindlichsten sind –, und gibt den Objektivdurchmesser D in Zentimeter an sowie den Winkel ρ in Bogensekunden ($1 \text{ radian} = 206\,265''$), so erhält man für das **Rayleigh-Kriterium**:

$$\rho = 13{,}8 / D$$

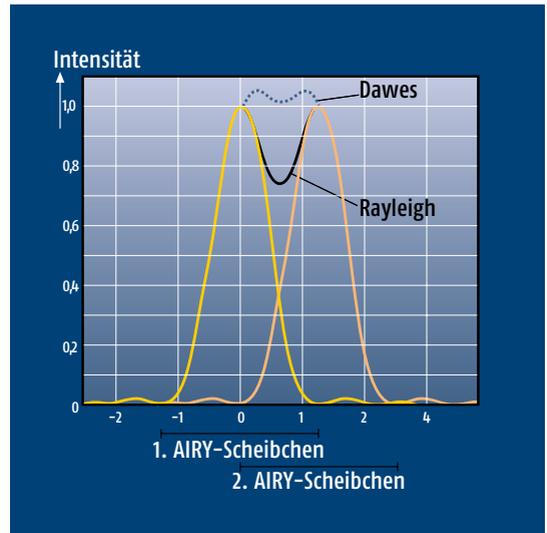
Das bedeutet: Ein Fernrohr von einem Zentimeter Öffnung trennt noch einen Doppelstern, der mindestens $13{,}8$ Separation aufweist. Stehen die Komponenten enger zusammen, werden sie nicht mehr in zwei Lichtpunkte aufgelöst. Ein Teleskop mit fünf Zentimeter freier Öffnung trennt noch Doppelsterne, deren Komponenten in $\rho = 13{,}8 / 5 = 2{,}76$ Abstand stehen.

Der durch das Rayleigh-Kriterium angegebene Minimalabstand ρ , bei dem zwei Lichtpunkte getrennt erkannt werden können, wird als **Trennschärfe** des Objektivs bezeichnet. Der reziproke Wert der Trennschärfe ρ heißt **Auflösung** A (s. auch Tabelle S. 15):

$$A = 1 / \rho$$

Die Trennschärfe beziehungsweise die Auflösung ist ein Maß für die Leistungsfähigkeit eines Teleskops.

Das Rayleigh-Kriterium ist ein theoretischer Wert, der unter idealen Bedingungen gilt: Darunter versteht man einwandfreie Optik, etwa gleich helle Sternpünktchen, sehr ruhige Luft und einen dunklen Himmelshintergrund. In der Praxis sind diese Voraussetzungen aber selten alle erfüllt, weshalb die theoretisch mögliche Auflösung oft nicht erreicht wird. Andererseits kann unter idealen Bedingungen das Rayleigh-Kriterium sogar unterboten werden. Zwischen den Lichtmaxima der beiden Airy-Scheibchen liegt das Minimum der Gesamtintensität im Sattel der Kurve bei $0,735$ (Lichtmaximum im Zentrum des Beugungsbildes $= 1,00$) – siehe auch Abb. oben. Rücken nun beide Sternpunkte näher aneinander heran, so wird die Tiefe des Minimums immer geringer, bis schließlich beide Airy-Scheibchen miteinander verschmelzen. Rein empirisch hat William Rutter DAWES (1799–1868) für die Trennschärfe eines Objektivs ein Kriterium gefunden, das noch unter der Rayleigh-Bedingung liegt. Dawes, ein englischer Geistlicher und Amateurastronom, war ein scharfäugiger Beobachter von Doppelsternen. Nach Dawes trennt ein Objektiv mit einem Durchmesser D (in



Die Intensitätsverteilung der Beugungsbilder zweier Sterne. Der Abstand beider Sterne entspricht dem Rayleigh-Kriterium. Außerdem ist die Intensitätssumme nach dem Dawes-Kriterium eingetragen.

Zentimeter) noch einen Doppelstern, wenn beide Komponenten in einem Mindestabstand von

$$\rho = 11{,}7 / D$$

stehen. Dieses **Dawes-Kriterium** gilt unter der Voraussetzung einwandfreier Optik. Im günstigsten Fall bei perfekter Optik enthält das Airy-Scheibchen 84% der einfallenden Lichtmenge, während sich in den Beugungsringen lediglich 16% finden. Bei Reflektoren (Spiegelteleskopen) befindet sich im Strahlengang meist ein Fang- oder Gegen Spiegel. Dieser schattet nicht nur einen Teil des Lichtstroms ab, sondern verändert auch das Beugungsbild: Das Airy-Scheibchen enthält weniger Licht, die Beugungsringe dafür etwas mehr. Dies verschlechtert etwas die Trennschärfe und vermindert bei nicht beugungsbegrenzter Optik den Kontrast. Für Spiegelteleskope lautet daher die Dawes-Formel:

$$\rho = 13'' / D$$

Wohlgermerkt, es handelt sich dabei um eine *empirische* Formel, die einen Anhaltspunkt für die erreichbare Auflösung gibt. Die tatsächliche Leistung eines Teleskops lässt sich erst in der Praxis feststellen (siehe Tabelle *Internationale Prüf-Doppelsterne*, 6.1, Seite 311). Die Dawes-Formel gibt die Auflösung bezie-

hungsweise die Trennschärfe unter günstigsten Bedingungen an.

Das Auflösungsvermögen ist abhängig von der Qualität der Optik, der Stabilität und Nachführungsgenauigkeit der Montierung, der Luftruhe und der Helligkeitsdifferenz der einzelnen Komponenten eines Doppelsterns. Bei bodengebundenen Teleskopen wird die erreichbare Auflösung durch die Turbulenz der irdischen Atmosphäre begrenzt. Selten kann $0,2''$ an Trennschärfe unterschritten werden. Bei Teleskopen über 50 cm Öffnung zählt nur noch der Lichtgewinn, die Auflösung wird bei größerem Objektivdurchmesser nicht mehr verbessert, es sei denn bei der Anwendung im Weltraum (Hubble-Weltraumteleskop) oder mit Hilfe spezieller Beobachtungsverfahren wie die so genannte Speckle-Interferometrie.

Die Rayleigh-Formel gilt streng genommen für monochromatisches Licht, also Licht *einer* Wellenlänge ($\lambda = 550 \text{ nm}$). Da das Sternenlicht sich aber im Allgemeinen aus elektromagnetischen Wellen aller Längen im sichtbaren Bereich zusammensetzt, sind die Verhältnisse in der Realität etwas komplizierter.

Die Qualität eines Fernrohrobjektivs lässt sich auch durch Angabe der **Strehschen Definitionshelligkeit** charakterisieren (nach Karl STREHL, 1928). Sie gibt an, wie viel Licht in Prozent im Airy-Scheibchen des Beugungsbildes einer punktförmigen Lichtquelle gesammelt wird. Der Rest findet sich in den Beugungsringen erster bis n -ter Ordnung. Wie schon erwähnt, enthält im Idealfall das Airy-Scheibchen 84% des einfallenden Lichts. Gute Linsenobjektive liefern durchaus Definitionshelligkeiten über 80% und kommen somit dem Idealwert sehr nahe. Bei den meisten Reflektoren liegt die Definitionshelligkeit deutlich unter 80%.

1.2.2 Helligkeitsgewinn

Neben dem Auflösungsvermögen ist die lichtsammelnde Wirkung ein Kriterium für die Leistungsfähigkeit eines Fernrohrobjektivs. Auch sie hängt vom Objektivdurchmesser D ab: Der Lichtgewinn nimmt proportional mit dem Quadrat des Objektivdurchmessers zu. Ein Fernrohr mit 5 cm freier Öffnung sammelt hundertmal mehr Licht ein als das dunkeladaptierte Auge mit 5 mm Pupillendurchmesser. Dies entspricht einem Helligkeitsgewinn von fünf Größenklassen. Kann man am aufgehellten Stadthimmel noch Sterne dritter Größenklasse sehen, so lässt ein Fernglas mit 5 cm freier Öffnung Sterne von 8^m Helligkeit erkennen.

Helligkeitsgewinn		
Objektivdurchmesser [cm]	Grenzgröße [m]	
freies Auge	(0,5)	~6
Fernglas	5	9,5
Refraktor	6	10,2
	10	11,7
	15	12,9
	20	13,4
	30	14
	50	14,5
Reflektor	60	15
	150	16,5

Es kann allerdings nicht der volle Lichtgewinn gemäß der größeren Objektivfläche ausgeschöpft werden. Bei Refraktoren absorbieren die Glasschichten der Linsen einen Teil des Sternenlichts. Bei Spiegelteleskopen wiederum schatten Fangspiegel und Halterungen einen Teil der Spiegelfläche ab (Apodisation), so dass nicht hundert Prozent des einfallenden Lichts genutzt werden können.

Der Helligkeitsgewinn erlaubt es, mit wachsendem Objektivdurchmesser immer lichtschwächere Objekte zu beobachten. Unter guten Sichtbedingungen kann man mit bloßen Augen Sterne bis zur 6. Größenklasse erkennen. Bereits mit einem 5-cm-Objektiv sind Sterne bis 10^m zu sehen (siehe Tabelle *Helligkeitsgewinn*, oben).

Die Lichtstärke I eines Teleskops gibt die Stärke des Lichtstroms für einen punktförmigen Stern in der Brennebene an:

$$I = \left(\frac{D}{\lambda}\right)^2 \cdot \left(\frac{D}{F}\right)^2$$

Bei gleichem Öffnungsverhältnis (D/F) nimmt die Lichtstärke mit dem Quadrat des Objektivdurchmessers D zu.

Ein 20-cm-Objektiv sammelt viermal mehr Sternenlicht ein als eines mit nur 10 cm Durchmesser. Zu berücksichtigen ist, dass bei Refraktoren (Linsenteleskopen) die Glaslinsen einen Teil des Lichtes absorbieren. Bei Reflektoren (Spiegelteleskopen) wiederum schattet der Fangspiegel im Strahlengang einen Teil des Hauptspiegels ab. Um die Öffnung und damit die lichtsammelnde Eigenschaft eines Fernrohres voll auszunutzen, ist eine Mindestvergrößerung zu wählen, damit der Himmelshintergrund entsprechend dunkel erscheint und der

Kontrast optimal wird, um Sternpünktchen zu erkennen.

Eine empirische Formel zur Bestimmung der Grenzgröße m , die man mit einem Objektiv von D Zentimeter Durchmesser erreichen kann, lautet:

$$m = 7 + 5 \cdot \lg D$$

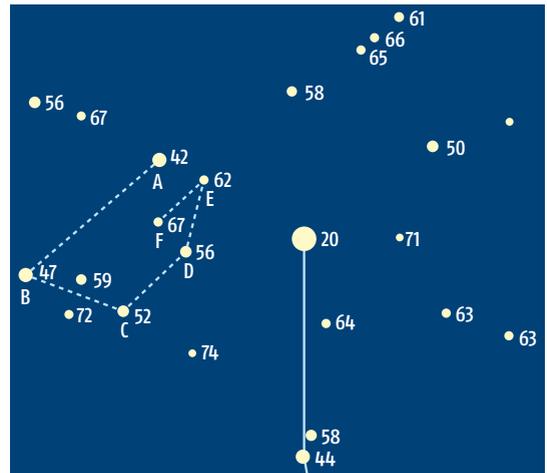
Nachstehende Tabelle erspart das Rechnen nach obiger Formel:

D [cm]	m	Vergrößerung
5	10,5	30 ×
7,5	11,4	45 ×
10	12,0	60 ×
15	12,9	90 ×
20	13,5	120 ×
25	14,0	150 ×
30	14,4	180 ×
35	14,7	210 ×
40	15,0	240 ×

Die Tabelle gilt für *punktförmige* Gestirne. Bei flächenhaften Objekten, wie interstellaren Nebeln oder Galaxien, sind die Grenzgrößen wesentlich geringer. Sie sind abhängig von der Gesamthelligkeit des Objektes und seiner Ausdehnung, woraus sich die Flächenhelligkeit ergibt, die meist in Größenklassen pro Quadratbogenminute angegeben wird.

Um die Leistung eines Teleskops zu testen, bis zu welcher Helligkeit mit ihm noch Sterne zu erkennen sind, dient die Nordpolarfolge als Testfeld (siehe Abb. oben). Sie hat den Vorteil, dass alle Sterne um den Pol in jeder klaren Nacht zu sehen sind, da sie ab etwa 10° nördlicher Breite zirkumpolar sind. Außerdem stehen sie stets in gleicher Höhe über dem Nordhorizont entsprechend der geografischen Breite des Beobachters (Polhöhe = geografische Breite). Dadurch ist die atmosphärische Extinktion für alle Sterne um den Pol gleich groß (bei gleichen atmosphärischen Bedingungen). Ab 52° bis 90° kann man die Extinktion vernachlässigen. Von 36° bis 52° ist zu den in der Abb. oben vermerkten Helligkeiten $0^m,1$ zu addieren. Auch kreuzen bei der Nordpolarfolge niemals störende Planeten das Gesichtsfeld.

In dieser Abb. steht der Polarstern im Zentrum, Helligkeit $2^m,0$. Eingetragen sind die visuellen Helligkeiten in Zehntelgrößenklassen. Dezimalpunkte sind vermieden, damit es nicht zu Verwechslung mit punktförmigen Sternen kommt und die Übersicht



Die Nordpolarfolge: Der Polarstern befindet sich im Zentrum (20 = $2^m,0$). Die gerade Linie deutet das Deichselende des Kleinen Wagens an.

besser wird. „58“ bedeutet somit $5^m,8$. Die ausgezogene Linie markiert das Deichselende des Kleinen Wagens. Die mit A – F gekennzeichneten Sterne sind mit strichlierten Linien verbunden und markieren die Folge abnehmender Sternhelligkeiten.

1.2.3 Vergrößerung und Abbildungsmaßstab

Die Auflösung beziehungsweise Trennschärfe eines Teleskops und damit seine primäre Leistungsfähigkeit wird wie oben dargelegt durch den Objektivdurchmesser bestimmt. Das Objektiv erzeugt in der Brennebene ein reelles Bild des beobachteten Sternfeldes, das man mittels eines Okulars betrachtet. Das Okular wirkt gewissermaßen als Lupe, mit der man das reelle Bild in der Fokalfäche beobachtet.

Die **Vergrößerung** (V), unter der man ein bestimmtes Objekt betrachtet, ergibt sich aus dem Verhältnis von Objektivbrennweite (F) zu Okularbrennweite (f):

$$V = F / f$$

Durch die Wahl verschiedener Okulare können bei einem Teleskop fast beliebige Vergrößerungen erzielt werden.

Um das Auflösungsvermögen eines Teleskops voll nutzen zu können, ist eine gewisse Mindestvergrößerung erforderlich. Im reellen Bild eines Fernrohrs

mag ein Doppelstern durchaus getrennt sein, wählt man aber eine zu geringe Vergrößerung, so kann man die beiden Airy-Scheibchen nicht getrennt sehen. Geht man davon aus, dass ein normalsichtiges Auge eine Trennschärfe von einer Bogenminute ($\rho = 60''$) hat, so ist nach dem **Dawes-Kriterium** folgende Mindestvergrößerung (V_{\min}) nötig, um einen Doppelstern zu trennen:

$$60'' = \left(\frac{11''7}{D} \right) \cdot V_{\min}$$

woraus folgt:

$$V_{\min} \approx 5 \cdot D$$

Um die theoretisch mögliche Auflösung eines Objektivs praktisch zu nutzen, muss man mindestens eine Vergrößerung wählen, die dem Fünffachen des Objektivdurchmessers in Zentimetern entspricht. Leichter sind jedoch die theoretisch erkennbaren Details zu sehen, wenn man die doppelte Mindestvergrößerung wählt, um das reelle Bild in der Brennebene zu beobachten. Man spricht dann von förderlicher Vergrößerung (V_F). Sie ergibt sich somit zu:

$$V_F \approx 10 \cdot D$$

Bei einem Teleskop von 15 Zentimeter freier Öffnung beträgt danach die Mindestvergrößerung $V_{\min} = 75$ -fach und die förderliche Vergrößerung $V_F = 150$ -fach.

Bei der förderlichen Vergrößerung hat man noch den Eindruck, ein Sternfeld zu betrachten, bei dem die Sterne punktförmig erscheinen. Man sieht einen „natürlichen“ Sternenhimmel. Vergrößert man erheblich mehr („Übervergrößerung“) durch Einsatz entsprechend kurzbrennweitiger Okulare, so sieht man die Airy-Scheibchen nicht mehr punktförmig, sondern als kleine, kreisrunde Lichtfleckchen. Weder verbessert sich bei Übervergrößerung die Auflösung noch nimmt der Detailreichtum beispielsweise einer Planetenoberfläche zu. Der Planet erscheint zwar immer größer (und blasser), aber es ist nicht mehr auf seiner Oberfläche zu erkennen. Nur in seltenen Fällen ist eine Übervergrößerung angebracht, wenn beispielsweise sehr enge Doppelsterne mit einem Fadentmikrometer zu vermessen sind.

Bei fotografischen Aufnahmen oder dem Einsatz einer CCD-Kamera ist nicht in erster Linie die Größe des Airy-Scheibchens im Winkel- oder Bogenmaß

gefragt, sondern dessen linearer Durchmesser. Denn das Auflösungsvermögen wird nicht ausgenutzt, wenn die Filmkörner oder Pixel-Abstände eines lichtempfindlichen Chips erheblich größer sind als die Durchmesser der Airy-Scheibchen.

Da der Abbildungsmaßstab eines Teleskops in der primären Brennfläche von der Objektivbrennweite F bestimmt wird, ergibt sich der *lineare* Durchmesser des **Airy-Scheibchens** zu:

$$d = 2,44 \cdot \lambda \cdot F / D$$

Dabei ist F/D die so genannte Blende oder Öffnungszahl. Üblicherweise wird bei Teleskopen jedoch der reziproke Wert der Blende angegeben, nämlich das **Öffnungsverhältnis** D/F .

Für gelbes Licht ($\lambda = 550 \text{ nm}$) ergibt sich die Größe des Airy-Scheibchens zu:

$$d = 1,34 \cdot F / D \quad [\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}]$$

Bei einem Teleskop von 25 cm freier Öffnung und einer Brennweite von 3,6 Metern weisen die Airy-Scheibchen einen linearen Durchmesser von $19,3 \mu\text{m}$ auf, das sind knapp zwei hundertstel Millimeter.

Der **Abbildungsmaßstab** gibt den linearen Durchmesser d eines Objektes im Primärfokus an, das man unter dem Winkel ρ sieht, wobei ρ in Grad einzusetzen ist:

$$d = F \cdot \tan \rho \quad [^\circ]$$

Bei sehr kleinen Winkeln kann man den Winkel direkt im Bogenmaß einsetzen:

$$d = F \cdot \rho \quad [\text{radian}]$$

Die Sonne hat beispielsweise einen scheinbaren Durchmesser von $32' (= 0^\circ 53')$. Bei einem Teleskop von 3,6 m Brennweite zeigt das Sonnenbild einen linearen Durchmesser von 3,3 cm.

Als Faustformel kann man sich merken: Sonne und Mond haben im Primärfokus einen linearen Durchmesser von:

$$d = F / 109$$

Pro Meter Brennweite ergibt sich somit ein Sonnenbeziehungswise Mondbild von einem Zentimeter Durchmesser. Bei 500 mm Brennweite ist das Sonnen-

bild nur einen halben Zentimeter groß. Bei einem Refraktor von zehn Metern Brennweite hat das Bild des Vollmondes einen Durchmesser von zehn Zentimetern.

Ist F die Brennweite in Metern, b die lineare Bildgröße und ρ der scheinbare Winkeldurchmesser eines Objektes in Grad, so gilt die folgende grobe Näherungsformel:

$$b = \rho [^\circ] \cdot F / 50$$

Die Leistungsfähigkeit eines Fernrohrs (Auflösungsvermögen und Helligkeitsgewinn) wird somit nicht durch die verwendete Vergrößerung bestimmt, sondern sie ist in erster Linie durch den Durchmesser des Objektivs, der freien Öffnung, gegeben.

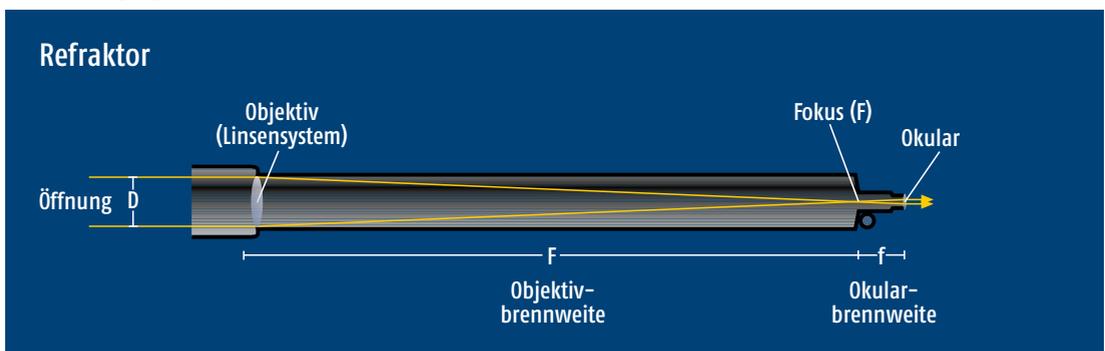
Um die volle Leistung eines Fernrohrs auch zu erhalten, ist eine stabile Teleskopmontierung Grundvoraussetzung. Denn ein wackelndes oder zitterndes Bild mit hin und her tanzenden Sternen im Okular lässt kaum die volle Auflösung des Teleskops zur Geltung kommen.

1.3 Fernrohrtypen

1.3.1 Klassischer Refraktor (Keplersches Fernrohr)

Das aus einer (oder mehreren) Linsen bestehende Objektiv erzeugt in der Brennebene ein reelles Bild, das mittels des Okulars betrachtet wird. Das Fernrohr ist **umkehrend**, das heißt, es liefert Bilder, die seitenverkehrt und auf dem Kopf stehend erscheinen. In der Astronomie ist es üblich, umkehrende Optiken zu verwenden, da man dadurch Zwischenglieder (zur Aufrichtung des Bildes) vermeidet, die die Abbildungsqualität verschlechtern.

Der Strahlengang des Keplerschen Fernrohrs



Große Linsenteleskope

Die ersten Fernrohre waren Linsenteleskope, also Refraktoren. Ein Linsenobjektiv hat aber einen gravierenden Nachteil: Kurzwelliges Licht wird stärker gebrochen als langwelliges. Blaue Lichtstrahlen vereinigen sich früher zu einem Fokus als rotes Licht. Die Bilder erscheinen mit farbigen Säumen und außerdem unscharf. Diesen „Farbfehler“ eines Linsenobjektivs nennt man chromatische Aberration. Um ihm zu entgehen, entwickelte Isaac NEWTON ein anderes Konzept. Er fertigte im Jahre 1668 als Erster ein Teleskop mit einem Hohlspiegel als Objektiv an. Sein Spiegel bestand aus einer Legierung von Kupfer und Zinn. Spiegelteleskope oder Reflektoren (von lat.: reflectere – zurückwerfen) zeigen keine chromatische Aberration, denn Lichtstrahlen aller Wellenlängen werden gleichermaßen, das heißt unter gleichen Winkeln, reflektiert. Zur Zeit Newtons und noch lange danach konnte man nur sphärische Spiegel herstellen. Ihre konkave Form ist Teil einer Kugeloberfläche. Um den Strahlengang aus dem Tubus herauszuleiten, setzte Newton einen ebenen Fangspiegel unter 45° zur optischen Achse geneigt in das Teleskop (siehe Abb. Seite 26). Damit wird aber die Lichtverteilung in den Beugungsscheibchen etwas ungünstiger. Kurzum, Kontrast und Auflösung sind bei einem Spiegelteleskop weniger gut als bei einem Linsenteleskop gleicher Öffnung. Hinzu kommt die störende sphärische Aberration: Achsennahe Strahlen werden in einem längeren Abstand vom Spiegel zum Fokus gebündelt als achsenferne.

Schon 1663 hat James GREGORY eine Lösung dieses Problems beschrieben. Statt eines sphärischen Spiegels sollte der Objektivspiegel parabolisch geschliffen werden, der Gegen- und Fangspiegel eine elliptische Form bekommen. Der elliptische Spiegel

steht dabei senkrecht zur optischen Achse und wirft das Licht durch den durchbohrten Hauptspiegel. Einen ähnlichen Vorschlag hat 1672 Laurent CASSEGRAIN gemacht, um die sphärische Aberration zu eliminieren. Der Primärspiegel sollte ebenfalls Teil einer Paraboloidoberfläche sein, der Fangspiegel jedoch konvex hyperbolisch. Die damalige Technologie war allerdings noch lange nicht imstande, solche Spiegelflächen mit der erforderlichen Genauigkeit zu produzieren.

Zwar zeigen auch Linsenteleskope eine sphärische Aberration. Aber wegen der besseren Bilddefinition und dem vergleichsweise unzureichenden Reflexionsgrad der Spiegelteleskope bevorzugten die Astronomen des 18. und 19. Jahrhunderts Refraktoren, vor allem als es gelang, die chromatische Aberration auch für Refraktoren weitgehend zu korrigieren. Chester Moor HALL hat 1729 den ersten Achromaten (griech., farbfrei) gefertigt, ein zweilinsiges Objektiv. Er verwendete zwei verschiedene Glassorten: Die konvexe Sam-

Die größten Linsenteleskope der Erde

Ort/ Land	Observatorium/ Name	Öffnung (cm)	Brennweite (cm)	Inbetriebnahme Jahr	Bemerkungen
Williams Bay, Wisconsin, USA	Yerkes Observatory 40-Zoll-Refraktor	102	1979	1897	
Mt. Hamilton, California, USA	Lick Observatory 36-Zoll-Refraktor	91	1737	1888	
Meudon, Frankreich	Observatoire de Paris 33-Zoll-Refraktor 25-Zoll-Refraktor	83 62	1618 1590	1889 1991	visuell fotografisch
Potsdam, Deutschland	Astrophysikalisches Observatorium 32-Zoll-Refraktor	80	1220	1899	
Pittsburgh, USA	Allegheny Observatory 30-Zoll-Thaw-Refraktor	76 76,2	1406 1440	1912 1985	neues Objektiv
Mont Gros, Nizza, Frankreich	Observatoire de Nice Lunette Bischoffsheim 30-Zoll-Refraktor	77	1790	1887	
St. Petersburg, Russland	Sternwarte Pulkowo 30-Zoll-Clark-Refraktor	76	1370	1884	
Greenwich, London, GB	Old Royal Observatory 28-Zoll-Grubb-Refraktor	71	850	1894	
Wien, Österreich	Universitäts-Sternwarte 27-Zoll-Grubb-Refraktor	69	1054	1883	geliefert 1879
Berlin-Treptow, Deutschland	Archenhold-Sternwarte 27-Zoll-Steinheil-Refraktor	68	2100	1896	
Charlottesville, Virginia, USA	Leander McCormick Observatory 26-Zoll-Clark-Refraktor	67	990	1885	
Johannesburg, Südafrika	Yale-Observatory 26-Zoll-Grubb-Refraktor	66	1060	1925	
Potsdam, Deutschland	Sternwarte Babelsberg 25,6-Zoll-Zeiss-Refraktor	65	1010	1915	
Llano del Hato Venezuela	Observatorio Astronomico Nacional 25,6-Zoll-Zeiss-Refraktor	65	1050	1972	geliefert 1959
Nagoya, Japan	Hida Observatory 25,6-Zoll-Zeiss-Refraktor	65	1050	1972	
Washington, D. C., USA	US Naval Observatory 26-Zoll-Clark-Refraktor	65	990	1873	
Gateshead, GB	Observatory Newall 25-Zoll-Cooke-Refraktor	62	910	1868	
Flagstaff, Arizona, USA	Lowell-Observatory 24-Zoll-Clark-Refraktor	61	945	1894	
Hamburg, Deutschland	Sternwarte Bergedorf 23,6-Zoll-Steinheil-Refraktor	60	900	1912	

mellinse war aus Kronglas, die zweite, konkave Linse aus Flintglas. Beide Linsen weisen eine chromatische Aberration auf, allerdings mit entgegengesetzter Wirkung, so dass sich der Farbfehler weitgehend aufhebt. Schließlich gelang es Peter DOLLOND 1765, ein dreilinsiges Objektiv herzustellen, das praktisch farbfehlerfrei war. Ein solches Objektiv nennt man Apochromat. Die Ära der großen Refraktoren erreichte schließlich im ausgehenden 19. Jahrhundert ihren beeindruckenden Höhepunkt, während der Siegeszug der großen Spiegelteleskope erst Anfang des 20. Jahrhunderts begann.

Verständlich, dass die Astronomen sich immer größere Objektive für ihre Forschung wünschten. Als Haupthindernis zeigte sich die Beschaffung von blasen- und schlierenfreien Glasblöcken, aus denen die Linsen auszuschneiden, zu schleifen und zu polieren waren. Man war daher nicht in der Lage, größere Linsenobjektive als mit vier Zoll (zehn Zentimeter) Durchmesser herzustellen. Erst dem schweizerischen Handwerker Pierre Louis GUINAND gelang es 1785, optisch einwandfreie homogene Glasblöcke zu fertigen. Nach über zwanzig Jahren des Probierens fand er eine neue Methode bei der Produktion größerer Glascheiben. Anstatt das geschmolzene Glas mit einem Holzknüppel umzurühren, benutzten Guinand und seine Mitarbeiter einen Rührlöffel aus porösem Ton. Durch längeres Rühren im flüssigen Glas stiegen die Blasen zur Oberfläche auf. Nach Erkalten der Glasschmelze erhielt man optisch homogenes Glas. Guinands Methode wurde auch seinem Mitarbeiter und späteren Partner Joseph von FRAUNHOFER (1787–1826) bekannt. Außerdem stellte Fraunhofer die Herstellung größerer achromatischer Objektive auf eine fundierte wissenschaftliche Basis. Statt wie bisher herumzuprobieren („präbeln“), wie Linsen zu schleifen und zu kombinieren sind, berechnete Fraunhofer den Strahlengang und ermittelte die genauen Kurvenradien der konvexen und konkaven Linsenflächen. Es gelang ihm, eine Reihe hochwertiger Achromate zu produzieren. Sein Meisterstück lieferte er für die Sternwarte in Dorpat, die 1804 gegründet worden war. Dorpat gehörte damals zum russischen Zarenreich (heute Tartu in Estland).

In Dorpat befand sich damals die älteste russische Universität. Fraunhofer begann 1818 mit der Fertigung des Dorpater Refraktors, der das damals größte Linsenobjektiv mit einem Durchmesser von 24,4 Zentimetern und einer Brennweite von 434 Zentimetern (Öffnungsverhältnis 1:17) erhielt. 1824 war der Achromat fertiggestellt und nach Dorpat geliefert, wo er



Das 80-cm-Linsenteleskop des Astrophysikalischen Observatoriums in Potsdam

am 24. Dezember 1824 unter dem Direktor der Sternwarte sein „First Light“ (engl., erstes Licht) sah – ein hübsches Weihnachtsgeschenk für Friedrich Georg Wilhelm Struve, dem Leiter der Sternwarte, der das Prachtstück hauptsächlich zur Vermessung von Doppelsternen nutzte. Allgemein sorgte der Dorpater Refraktor, der Erste mit einer brauchbaren parallaktischen Montierung, für großes Aufsehen und verhalf Fraunhofer zu großem Ruhm und Ehre. Er erhielt den Auftrag, ein noch größeres Objektiv für die Münchener Sternwarte in Bogenhausen zu liefern. Sein früher Tod entband ihn von dieser Aufgabe. Sein Nachfolger Georg Merz erfüllte den Auftrag, und im Jahre 1835 erhielt die Sternwarte Bogenhausen einen achromatischen Refraktor mit 28,5 cm freier Öffnung und 490 cm Brennweite.

Nur vier Jahre später fertigten Merz und sein Mechaniker Franz Joseph MAHLER (1795–1845) für die russische Sternwarte Pulkowo bei St. Petersburg ein Linsenfernrohr mit 38 cm Objektivdurchmesser und einer Brennweite von 690 cm an, was ein Öffnungsverhältnis von 1:18 ergibt. Erstmals wurde das sieben Meter lange Teleskop 1838 gen Himmel gerichtet.

Dass Russland das größte Teleskop der Welt besaß, ließ die Amerikaner nicht kalt, zumal die Bevölkerung in den USA durch spektakuläre Himmelserscheinungen astronomisch äußerst interessiert war. So gab es den Leonidensturm in der Nacht vom 12. auf 13. November 1833, gefolgt von zwei hellen Kometen. Der große Komet von 1843, der sogar tagsüber ob seiner großen Helligkeit zu sehen war, sorgte für gewaltiges Publikumsinteresse. Cincinnati Astronomen und der Eisenbahnvermesser Ormsby



Der 69-cm-Refraktor der Universitätssternwarte Wien

McKnight Mitchel wetterten: „Während die Russen mit ihren Horden von Barbaren mit dem besten Observatorium der Welt (nämlich Pulkowo) prahlen, besitzt unser Land mit all seinen Freiheiten und Fähigkeiten nicht ein einziges Observatorium dieser Größe!“ Der Aufruf blieb nicht ungehört. Innerhalb von nur zwei Tagen spendeten die Bürger von Cincinnati mehr als tausend Dollar (heutiger Wert etwa 20 000 Euro). Bereits 1845 war die University of Cincinnati stolze Besitzerin eines 11-inch (= 28-cm)-Refraktors – geliefert von der Firma Merz & Mahler aus München.

Nur zwei Jahre später (1847) erhielt das Observatorium des HARVARD College in Cambridge (Massachusetts) einen 15-inch (= 38,1-cm)-Refraktor, ebenfalls von Merz & Söhne aus München. Mächtig stolz war man, dass das Harvard-Teleskop jenes von Pulkowo um einen Millimeter (!) an freier Öffnung übertraf. Damit hatte man in den USA das weltweit größte Linsenfernrohr.

Ein wirklich großer Sprung und Aufstieg in die 60-cm-Klasse der Großrefraktoren gelang erstmals 1852 mit der Aufstellung des Craig-Refraktors in Wandsworth bei London. Mit 61 cm Objektivdurchmesser und einer Baulänge von gigantischen 24 Metern ($F = 2320$ cm) war er unangefochten der Champion unter den Linsenteleskopen. Allein, der stolze Refraktor war weitgehend unbrauchbar. Das optisch mangelhafte Objektiv und die störanfällige Mechanik ließen einen Beobachtungsbetrieb praktisch nicht zu. Vergleichbar waren die zahlreichen Verbesserungsversuche. Nach nur vier Jahren wurde der Betrieb eingestellt und das Gerät demontiert.

Der Harvard-Refraktor in Boston blieb fast zwei Jahrzehnte das größte Linsenfernrohr in den Verei-

nigten Staaten. Unter anderem hatte auch der Porträtmaler ALVAN CLARK (1804–1887) einen Blick durch dieses hervorragende Instrument geworfen. Er war nicht nur von dem, was er sah begeistert, sondern er fasste auch den Entschluss, ein noch größeres Linsenobjektiv zu fertigen. Im Jahre 1862 war es soweit: Das Dearborn-Observatorium der Old University of Chicago (heute Northwest University of Chicago) erhielt einen Refraktor mit 47 cm freier Öffnung. Als Clark das Objektiv prüfte, erschrak er. Neben dem hellen Sirius sah er ein Lichtpünktchen – ein Reflex? Clark dachte zunächst an einen Fertigungsfehler. Doch das Objektiv war einwandfrei gelungen. Clark hatte den Begleiter von Sirius, den Weißen Zwerg Sirius B entdeckt, nachdem schon vorher Friedrich W. Bessel aufgrund von Eigenbewegungsmessungen einen „dunklen“ Begleiter von Sirius vermutet hatte.

Clark gründete eine optische Firma, die nach seinem Tod sein Sohn ALVAN GRAHAM CLARK (1832–1897) fortführte, der noch bessere Resultate beim Bau von großen Objektiven erzielte als sein Vater. Die Clark-Linsenobjektive wurden weltberühmt und sind in den größten Refraktoren zu finden.

Der berühmte Astronom SIMON NEWCOMB bestellte 1870 für 50 000 Dollar bei Clark einen Refraktor für das US-Marine-Observatorium in Washington D.C. Drei Jahre später sah der 26-inch-Clark-Refraktor „First Light“. Mit 65,5 cm freier Öffnung und 990 cm Brennweite war das neue Linsenteleskop des US Naval Observatory das größte der Welt – ein neuer Rekord! Der Refraktor ist hervorragend. Mit ihm entdeckte ASAPH HALL 1877 die beiden winzigen Marsmonde Phobos und Deimos.

Doch der Marine-Refraktor von Washington D.C. blieb nicht lange Rekordhalter. Schon 1883 verfügte die Universitätssternwarte auf der Türkenschanze in Wien über einen Refraktor von 27 Zoll (= 68,6 cm) Objektivdurchmesser und 1054 cm Brennweite, hergestellt von der schottischen Firma HOWARD GRUBB (Dublin).

Schon bald (1885) übertrumpfte die Sternwarte Pulkowo den Wiener Rekord. Wieder einmal bekam sie den weltgrößten Refraktor, diesmal mit 76 cm Öffnung und 1406 cm Brennweite. Das Objektiv lieferte Clark, die Mechanik kam von REPSOLD in Hamburg.

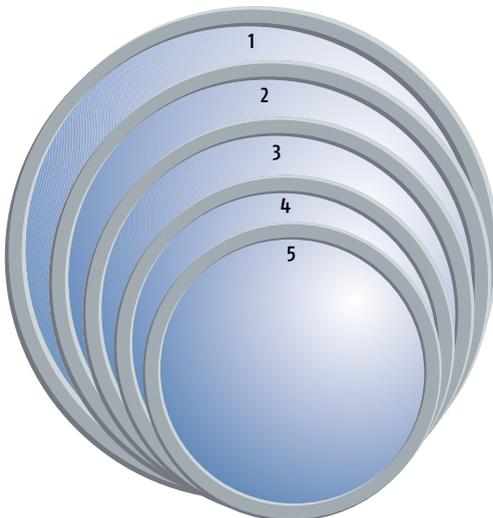
Auch dieser Rekord hielt nur zwei Jahre. Bereits 1887 wurde auf dem Mont Gros, einem 375 Meter hohen Hügel, ein Linsenteleskop von 77 cm Objektivdurchmesser und 1581 cm Brennweite für die Sternwarte Nizza aufgestellt – das so genannte „Lunette Bischoffsheim“ von den Herstellern Henry und

Gautier. Der gewaltige Refraktor ist in einer großen Kuppel mit 26 Meter Durchmesser untergebracht, die Gustave EIFFEL (1832–1923) entworfen hat, bekannt als Erbauer des nach ihm benannten Turmes in Paris.

Doch nur für ein Jahr konnte sich die Sternwarte Nizza rühmen, das größte Teleskop zu besitzen. Der schwerreiche Magnat James LICK aus San Francisco stiftete unter der Bedingung, im Fundament des Teleskopfeilers seine letzte Ruhestätte zu erhalten, den damals größten Refraktor mit einem 91,5 cm großen Objektiv und fast 18 Meter Brennweite. Er steht auf dem 1283 m hohen Mt. Hamilton bei San José im nach seinem Stifter benannte Lick-Observatorium. 1888 schließlich wurde der Lick-Refraktor in Betrieb genommen.

Neun Jahre lang führte der Lick-Refraktor den Titel „Größtes Linsenteleskop der Welt“, bis das bis heute mit 102 cm freier Öffnung und 19,5 Meter Brennweite größte Linsenfernrohr am Yerkes-Observatorium am 21. Oktober 1897 eingeweiht wurde. Der Eisenbahntycoon Charles Tyson YERKES spendete nicht nur das Teleskop, sondern auch das gesamte Observatorium. Es wurde in Williams Bay (Wisconsin) nahe dem See Geneva vierzig Kilometer nördlich von Chicago und knapp nördlich der Grenze zum Bundesstaat Illinois errichtet.

Objektivdurchmesser der großen Linsenteleskope im Vergleich



- | | |
|-------------------|-------------------|
| 1 Yerkes (102 cm) | 4 Wien (69 cm) |
| 2 Lick (91 cm) | 5 Hamburg (60 cm) |
| 3 Potsdam (80 cm) | |

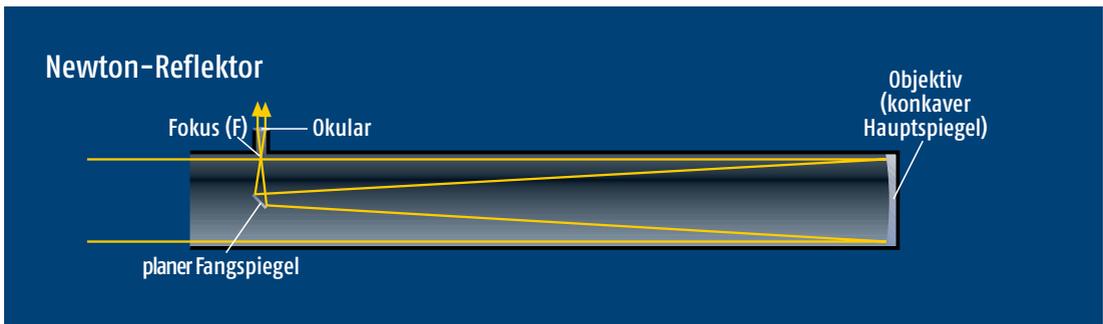


Der Yerkes-Refraktor ist mit 102 cm freier Öffnung das größte Linsenteleskop der Erde

Damit fand der Wettlauf zum Spitzenplatz der Riesenrefraktoren ein endgültiges Ende. Denn immer größere Linsenobjektive bringen immer weniger Lichtgewinn, da die Linsen immer dicker werden und somit immer mehr Licht absorbieren. Auch biegen sich große Linsenobjektive je nach Stellung des Teleskops unterschiedlich stark durch, da sie nur am Rand gefasst sind im Gegensatz zu Spiegelobjektiven, die an jedem Punkt der Rückseite unterstützt werden können. Somit bleibt der Yerkes-Refraktor wohl auch in Zukunft der größte Refraktor der Erde.

1.3.2 Reflektor System Newton

Ein unter 45° zur optischen Achse des Spiegelobjektivs (Hauptspiegel) geneigter Planspiegel (Fangspiegel) lenkt das vom Objektiv kommende konische Lichtbündel seitlich aus dem Teleskoptubus hinaus. Der Fokus (Brennpunkt) liegt beim Newton-Reflektor seitlich neben dem Vorderende des Teleskops. Bei größeren Spiegelteleskopen der Newtonschen Art legt der Fokus entsprechend der Position des Beobachtungsobjekts am Himmel relativ große Strecken zurück. Es müssen Beobachtungsleitern oder Hebebühnen verwendet werden. Wegen seiner asymme-



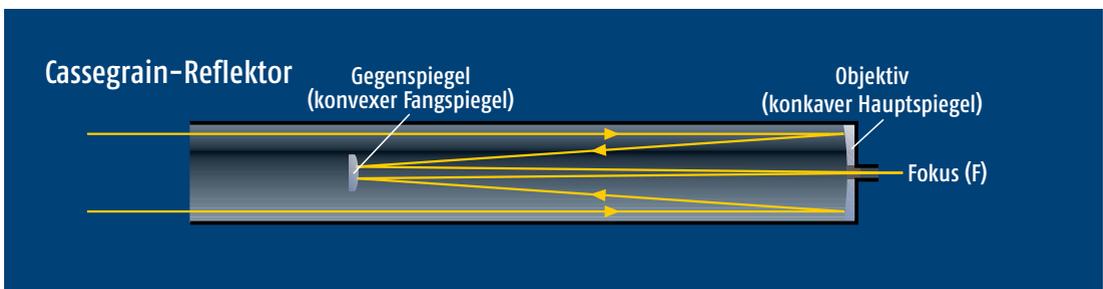
Der Strahlengang des Systems Newton

trischen Lage zur optischen Teleskophauptachse können schwere Zusatzgeräte wie große Spektrografen kaum eingesetzt werden. Für leichte Kameras oder visuelle Beobachtungen ist der Newton-Reflektor jedoch recht gut geeignet.

1.3.3 Reflektor System Cassegrain

Ein konvexer Fangspiegel wirft das vom konkaven Hauptspiegel (Objektiv) kommende Strahlenbündel zurück, wobei es durch die zentrische Bohrung des Hauptspiegels tritt. Der Fokus liegt knapp an der Rückseite des Hauptspiegels. Die Baulänge des Cassegrain-Teleskops ist kurz und gedrungen im Vergleich zum Objektivdurchmesser und der Primärbrennweite. Der Fokus ändert seine Lage nur wenig bei Ausrichtung des Teleskops auf Himmelsobjekte in verschiedenen Positionen. Man kann relativ bequem beobachten; es lassen sich relativ schwere und komplexe Empfänger (Spektrografen, lichtelektrische Fotometer – kurze Kabelwege bei Bewegung des Teleskops!) benutzen. Cassegrain-Spiegelteleskope eignen sich besonders für Gabelmontierungen (s. Abschnitt 1.4 *Teleskopmontierungen*, S. 29 f).

Der Strahlengang des Systems Cassegrain



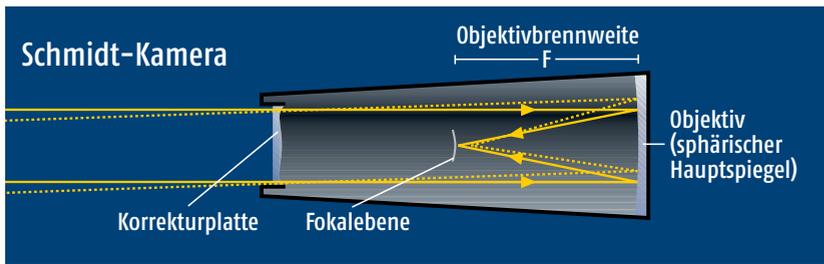
1.3.4 Reflektor System Schmidt

Schmidt-Teleskope arbeiten als Himmelskameras, man spricht auch von Schmidt-Kameras.

Das Licht wird vom sphärischen (kugelförmigen) Hauptspiegel direkt auf eine fotografische Schicht, die in der Brennebene angebracht ist, geworfen. Schmidt-Kameras sind komafreie Spiegelteleskope. Allerdings muss die durch den kugelförmigen Hauptspiegel für außerhalb der optischen Achse liegende Strahlen auftretende sphärische Aberration mittels einer Korrektionsplatte beseitigt werden. Die dünne Korrektionsplatte befindet sich im Krümmungsmittelpunkt des sphärischen Hauptspiegels, also in doppelter Objektivbrennweite.

1.3.5 Weitere Teleskopsysteme

Außer den genannten vier Teleskopsystemen gibt es noch weitere Konstruktionen wie Galilei-Refraktor, Nasmyth-Fokus, Coudé-Fokus, Gregory-Reflektor, Ritchey-Chrétien-Reflektor, Schiefspiegler nach Kutter sowie katadioptrische Systeme.



Der Strahlengang des Systems Schmidt

Das Galilei-Linsenfernrohr benutzt als Okular eine Zerstreuungslinse, was zu einer kurzen Baulänge führt. Die Gesamtlänge ergibt sich nämlich zu Objektivbrennweite *minus* Okularbrennweite. Dadurch eignet sich das Galileifernrohr speziell für kleinere Teleskope (Opernglas, Taschenfernrohr). Da kein reelles Bild in der Brennebene des Objektivs entsteht – und somit kein Fadenkreuz einsetzbar ist –, kann es als Sucherfernrohr nicht verwendet werden. Das Galileische Fernrohr wird auch gelegentlich holländisches Fernrohr genannt. Der Hauptvorteil liegt beim Galileischen Fernrohr darin, dass es, im Gegensatz zum Kepler-Fernrohr, aufrechte und seitenrichtige Bilder liefert.

Beim Nasmyth-System handelt es sich um eine Kombination aus Newton- und Cassegrain-Teleskop. Das Strahlenbündel wird wie beim Cassegrain-Reflektor von einem konvexen Fangspiegel in Richtung Objektivhauptspiegel zurückgeworfen, tritt aber nicht durch diesen, sondern wird vorher durch einen zur optischen Achse um 45° geneigten Planspiegel in die Deklinationsachse gelenkt, wo es seitlich austritt („Nasmyth-Fokus“). Hier können am Gabelholm mechanisch gesehen leichter umfangreiche Empfangsapparaturen angebracht werden.

Beim Coudé-System wird das Strahlenbündel durch einen weiteren Planspiegel von der Deklinations- in die Stundenachse umgelenkt. Dadurch lassen sich lange Brennweiten erzielen. Der wesentliche Vorteil dieses optischen Systems liegt darin, dass der Coudé-Fokus *ortsfest* bleibt, egal auf welchem Punkt am Himmel das Fernrohr gerichtet wird. Dadurch lassen sich schwere und umfangreiche Empfangsapparaturen (wie Coudé-Spektrografen hoher Auflösung) gut unterbringen.

Gregory-Reflektoren sind ähnlich den Cassegrain-Teleskopen konstruiert. Statt eines konvexen Fangspiegels haben Gregory-Teleskope jedoch einen *konkaven* Sekundärspiegel. Die Baulänge des Gregory-Teleskops ist bei gleichem Öffnungsverhältnis größer als bei einem Cassegrain-Reflektor. Nur wenige Gregory-Reflektoren sind heute im Einsatz. Als Vorteil

sah man früher an, dass das Gregory-System aufrechte und seitenrichtige Bilder liefert, während das Cassegrain-System wie das Kepler-Fernrohr *umkehrende* Wirkung hat.

Das Ritchey-Chrétien-System hat im Prinzip den gleichen Strahlengang wie das Cassegrain-Teleskop. Hauptspiegel und Sekundärspiegel sind jedoch aufeinander abgestimmte, asphärische Flächen, was in der Herstellung schwieriger und damit teuer ist. Beim R-C-System werden sphärische Aberration und Koma weitgehend behoben, so dass sich ein größeres nutzbares Gesichtsfeld ergibt.

Katadioptrische Systeme weisen eine Kombination von Linsen- und Spiegelsystemen auf. Die beiden verbreitetsten Systeme sind dabei die Schmidt-Cassegrain-Teleskope und die Maksutow-Teleskope, die in den folgenden Abschnitten beschrieben werden.

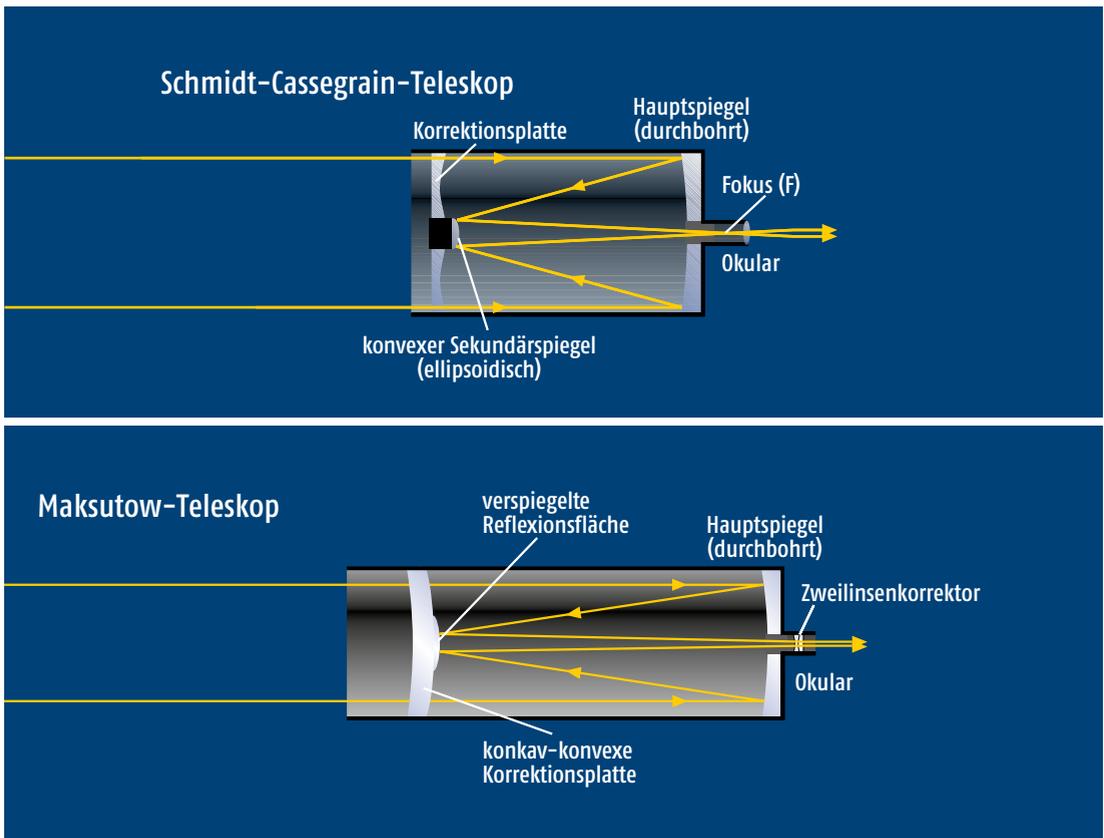
Schmidt-Cassegrain-System

Um die Baulänge einer klassischen Schmidt-Kamera zu verkürzen und den Fokus wieder hinter den Hauptspiegel zu legen, wo er auch für visuelle und spektroskopische Zwecke nutzbar ist, hat James G. BAKER (1914–2005) eine Konstruktion vorgeschlagen, bei der die Vorteile des Schmidt-Systems wie Beseitigung von sphärischer Aberration, Koma, Astigmatismus und Bildfeldkrümmung erhalten bleiben. Auf die Korrektionsplatte, die die volle Öffnung des Hauptspiegels aufweist, wird ein konvexer Sekundärspiegel angebracht, der das Strahlenbündel durch den durchbohrten, sphärischen Hauptspiegel leitet. Ein solches System wird Schmidt-Cassegrain-Teleskop genannt (s. Abb. Seite 29).

Das System eignet sich insbesondere für kleine, kompakte, transportable Fernrohre, da die Baulänge wesentlich kürzer (bis zu einem Viertel) der effektiven Brennweite ist. Um weitere Abbildungsfehler zu minimieren, hat der konvexe Sekundärspiegel die Form eines Rotationsellipsoids.

Große Spiegelteleskope der Erde (Freie Öffnung 3 m und größer, siehe auch Tabelle auf S. 38)

Observatorium/Ort Teleskop	Freie Öffnung (äquivalent)	Inbetriebnahme	Koordinaten	Bemerkungen
W.-M. Keck Observatory MAUNA KEA, Hawaii Keck I Telescope	982 cm	1991	+19°49' 155°28' W 4190 m	36 hexagonale Spiegel- segmente
Special Astrophysical Observatory Mt. Pastukow, SELENTSCHUKSKAJA (Kaukasus) Bolschoi-Teleskop	610 cm	1975	+43°39' 41°16' 0 2100 m	
Palomar Observatory PALOMAR MOUNTAIN, (Kalifornien) Hale Telescope	508 cm	1948	+33°21' 116°52' W 1706 m	
Multiple Mirror Telescope Observatory MOUNT HOPKINS (Arizona) MMT	446 cm	1979	+31°41' 110°53' W 2608 m	Viel-Spiegel- Teleskop
Obs. del Roque de los Muchachos LA PALMA (Kanaren) W.-Herschel-Teleskop	422 cm	1987	+28°46' 17°53' W 2332 m	
Inter-American Obs. (AURA) CERRO TOLLOLO (Chile)	401 cm	1976	-30°10' 70°49' W 2215 m	
Kitt Peak National Observatory KITT PEAK (Arizona) Mayall-Reflektor	401 cm	1973	+31°58' 111°36' W 2220 m	
Anglo-Australian Observatory SIDING SPRING, Coonabaraban (Australien) ATT	389 cm	1974	-31°17' 149°04' 0 1149 m	
Joint Astron. Centre MAUNA KEA (Hawaii) United Kingdom Infrared Telescope (UKIRT)	381 cm	1978	+19°50' 155°28' W 4194 m	
MAUNA KEA (Hawaii) Canadian-France- Hawaii Telescope (CFHT)	358 cm	1979	+19°49' 155°28' W 4200 m	
European Southern Observatory LA SILLA (Chile) ESO 3,60 Telescope	360 cm	1976	-29°16' 70°44' W 2387 m	
New Technology Telescope (NTT)	350 cm	1989	2353 m	Aktive Optik
Deutsch-Spanisches Observatorium CALAR ALTO (Südspanien)	350 cm	1983	+37°13' 2°32' W 2168 m	
LICK Observatory MOUNT HAMILTON (Kalifornien) Donald Shane Telescope	305 cm	1959	+37°21' 121°38' W 1290 m	
Mauna Kea Observatory MAUNA KEA (Hawaii) NASA Infrared Telescope Facility (IRTF)	302 cm	1979	+19°50' 155°28' W 4208 m	



Der Strahlengang des Schmidt-Cassegrain-Teleskops (oben) und des Maksutow-Teleskops (unten)

Ein weiterer Vorteil des Schmidt-Cassegrain-Systems ergibt sich aus dem Wegfall des Haltekreuzes für den Sekundärspiegel, da dieser direkt an der Korrektionsplatte aufgeklebt ist. Dadurch entfallen die störenden Beugungserscheinungen, die bei dem klassischen Schmidt-Teleskop den helleren Sternen spitze Zacken verleihen.

Maksutow-Teleskop

Beim Maksutow-Teleskop – auch als Maksutow-Cassegrain-System bezeichnet – ist die asphärische Korrektionsplatte des Schmidt-Teleskops durch einen sphärischen Meniskus (dünne konkav-konvexe Linse) ersetzt. Dieser gleicht durch Überkorrektur der sphärischen Aberration die entsprechende Unterkorrektur durch den Hauptspiegel weitgehend aus. Der Meniskus ist im Krümmungszentrum des sphärischen Hauptspiegels konzentrisch angebracht. Die zum Hauptspiegel zugekehrte Seite des Meniskus ist im

zentralen Bereich um die optische Achse verspiegelt, so dass das Strahlenbündel reflektiert und durch den durchbohrten Hauptspiegel in den Cassegrain-Fokus geleitet wird.

1.4 Teleskopmontierungen

Um mit einem Teleskop möglichst erschütterungsfrei beobachten und jede gewünschte Richtung einstellen zu können, sind mechanische Konstruktionen entwickelt worden, die eine zweckmäßige Aufstellung und Bedienung des Teleskops ermöglichen. Der Fachausdruck für solche Apparate lautet Teleskopmontierung oder kurz *Montierung*.

In der Regel besteht jede Montierung aus einem Gerüst mit zwei aufeinander senkrecht stehenden Achsen, um die sich der eigentliche Teleskopkörper drehen und damit auf jeden Punkt des Himmels ausrichten lässt. Man unterscheidet zwei Arten von Montierungen.